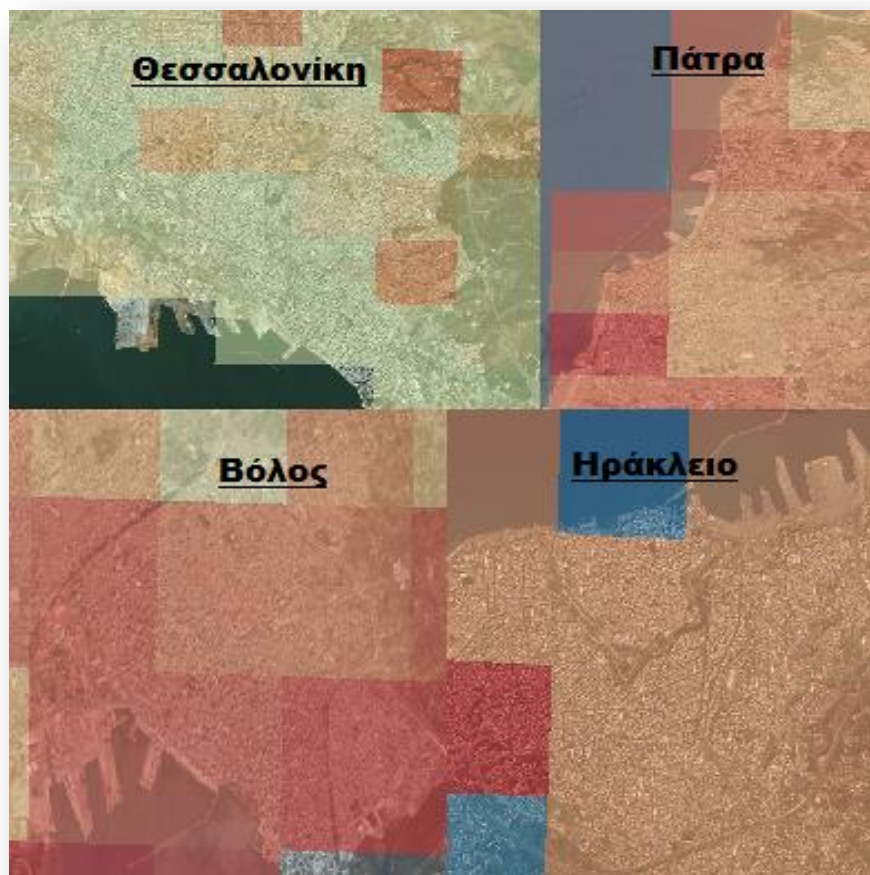


Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος-Μετεωρολογίας

Μ.Δ.Ε. «ΦΥΣΙΚΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»

Χρήση δορυφορικών δεδομένων MODIS για τη
χωροχρονική ανάλυση των επιφανειακών θερμοκρασιών
εδάφους, για το διάστημα 2001-2015, σε αστικά κέντρα
μεσαίου μεγέθους της Ελλάδος



Πετρινόλη Καλλιόπη

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Καρτάλης

Αθήνα, 2016

Πρόλογος

Σήμερα το 70% του πληθυσμού στην Ευρώπη κατοικεί σε αστικές περιοχές, ενώ εκτιμάται ότι το ποσοστό αυτό θα φθάσει το 90% το 2030. Ως αποτέλεσμα αυτής της συγκέντρωσης, έχει ενισχυθεί η αστικοποίηση (urbanization), ενώ φαινόμενα όπως η αστική επέκταση, η αστική διάχυση, η αστική θερμική νησίδα, κ.α. απασχολούν το σύνολο σχεδόν των πόλεων. Ειδικότερα το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας συναρτάται ουσιαστικά με την κατάσταση του θερμικού περιβάλλοντος και αποτυπώνεται και μέσω της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους (Land Surface Temperature: LST).

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην εκτίμηση και ερμηνεία των επιφανειακών θερμοκρασιών εδάφους, για το διάστημα 2001-2015, σε αστικά κέντρα μεσαίου μεγέθους της Ελλάδος, ενώ εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Φυσικής, του Τομέα Φυσικής Περιβάλλοντος-Μετεωρολογίας, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Κωνσταντίνο Καρτάλη, γιατί ως Επιβλέπων αυτής της διπλωματικής εργασίας, με υποστήριξε, με βοήθησε με τις συμβουλές του και με καθοδήγησε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Επίσης, πραγματικά δε ξέρω πώς να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Αναστάσιο Πολύδωρο και Θάλεια Μαυράκου, που με την ουσιαστική βοήθειά τους, τα σχόλια και τις πολύτιμες γνώσεις τους πάνω στο αντικείμενο της δορυφορικής τηλεπισκόπησης, η εργασία αυτή ολοκληρώθηκε.

Ακόμη, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου, στους φίλους μου για την κατανόηση, τη στήριξη και τη βοήθειά τους. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, για όλα αυτά που αντιπροσωπεύουν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ευρέως γίνεται αντιληπτό ότι η μελέτη του κλίματος είναι πλέον απαραίτητη. Οι μεταβολές στο ενεργειακό ισοζύγιο, έχουν επηρεαστεί από τις αλλαγές στην κάλυψη και χρήση γης. Ο ανθρώπινος παράγοντας παίζει καθοριστικό ρόλο, ώστε οι αλλαγές αυτές να πραγματοποιούνται ραγδαία και όχι με φυσικό τρόπο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για τη μελέτη και αποτύπωση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους (Land Surface Temperature-LST), μιας παραμέτρου που συμβάλλει ουσιαστικά στην εκτίμηση αυτών των μεταβολών και επιτρέπει την εκτίμηση της κατάστασης του θερμικού περιβάλλοντος. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δορυφορικές καταγραφές για τη χωροχρονική ανάλυση της LST σε 4 πόλεις μεσαίου μεγέθους της Ελλάδος (Θεσσαλονίκη, Πάτρα, Ηράκλειο, Βόλος), για τα έτη 2001-2015. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που καταγράφηκαν από το ραδιόμετρο MODIS, που βρίσκεται στο δορυφόρο Terra της NASA. Η επιλογή του MODIS κρίθηκε κατάλληλη καθώς έχει εύρος σάρωσης 2.330km και συνδυάζει ικανοποιητικά χωρική, χρονική, φασματική και ραδιομετρική διακριτική ικανότητα. Επίσης, τα δεδομένα είναι υψηλής ποιότητας και από αυτά μπορεί να εξαχθεί, με κατάλληλη επεξεργασία, η πληροφορία για διάφορες γεωφυσικές παραμέτρους. Σε αυτήν την περίπτωση, η τιμή της παραμέτρου LST ελέγχθηκε για την ποιότητά της (Quality Control), καθώς μπορεί να αφορά σε μία ημέρα με νεφοκάλυψη και ως εκ τούτου δεν είναι αντιπροσωπευτική. Εκτιμήθηκε ο αριθμός των καθαρών (ανέφελων) ημερών-νυχτών που διαμορφώνουν ένα αξιοποιήσιμο αρχείο δεδομένων. Θέτοντας ως προϋπόθεση ένα όριο ελάχιστων παρατηρήσεων για κάθε μήνα, υπολογίσθηκαν οι μέσοι όροι της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους σε μηνιαία βάση. Στη συνέχεια, για την διερεύνηση της θερμικής επιβάρυνσης λόγω κλιματικής μεταβολής, εκτιμήθηκαν για κάθε σημείο του πλέγματος 1km x 1km της υπό

μελέτη περιοχής, οι μακροχρόνιες τάσεις με χρήση γραμμικής παλινδρόμησης. Στη συνέχεια, με τη χρήση ενός προϊόντος του MODIS, προσδιορίστηκαν οι αστικοί ιστοί των συγκεκριμένων πόλεων. Τέλος, η επεξεργασία ολοκληρώθηκε με (α) τη δημιουργία χαρτών, όπου αποτυπώνεται η τιμή της τάσης για κάθε μήνα, για κάθε πόλη ξεχωριστά, μέσα στη δεκαπενταετία και (β) την κατασκευή διαγραμμάτων των βασικών παραμέτρων που μελετήθηκαν. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι για το παραπάνω διάστημα, σε όποιες περιοχές δεν υπήρχε ουσιαστική μεταβολή στην κάλυψη και χρήση γης αυτών των πόλεων, η μεταβολή της LST είναι αμελητέα, γεγονός που αποδίδεται στην κεντροβαρική εξάρτηση της παραμέτρου αυτής από το είδος του υλικού επιφανείας και τις ιδιότητες του. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η αποτύπωση του θερμικού περιβάλλοντος, μέσω της LST, σε πόλεις μεσαίου μεγέθους, με τη χρήση δεδομένων MODIS, επιτρέπει τη γενικότερη κατανόηση χωροχρονικών αλλαγών στο θερμικό περιβάλλον. Στην περίπτωση όμως που απαιτείται λεπτομερέστερη χωρική ανάλυση, θα πρέπει η ανάλυση αυτή να αξιοποιήσει δορυφορικά δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης (της τάξης των 100 x 100 μέτρων) ή να επιχειρηθεί η βελτίωση της χωρικής ανάλυσης μέσω της τεχνικής του υποβιβασμού κλίμακας (downscaling).

Abstract

Land Surface Temperature (LST) is a key variable to study the changes in land use and land cover of urban areas. The land surface radiation budget is responsible for the available energy between Earth and the atmospheric system. This study presents a methodology to estimate LST using satellite images, provided by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on board Terra of NASA. The MODIS products combine a satisfactory spatial, radiometric and spectral resolution and give information for various geophysical parameters. This methodology is applied to the major cities of Greece (Thessaloniki, Patra, Heraklion and Volos), for the period of 2001-2015. Specifically, the MODIS data were checked for their quality and the number of clear sky days-nights was estimated. A limit of minimum observations was set for every month, in order to calculate the monthly mean LST and the long term trends by using linear regression. The data analysis was completed with the map construction of each city's monthly trend. In conclusion, it is observed that for the above period, where there was no change in land cover and land use of these cities, LST's variation is negligible, due to the fact that this parameter is highly dependent on the type of the surface material and its properties. It should be noted that the depiction of the thermal environment through LST, in medium-sized cities, using MODIS data allows an understanding spatiotemporal changes in the thermal environment. In case we needed more detailed spatial analysis, should this analysis to utilize satellite data of high spatial resolution (on the order of 100 x 100 meters) or attempt to improve the spatial resolution of the technique of reclassification scale (downscaling).

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
Abstract	6
Εισαγωγή	10
A. Θεωρητικό Υπόβαθρο	12
A.1 Δορυφορική Τηλεπισκόπηση	12
A.2 Δορυφορικοί Αισθητήρες	13
A.3 Επιφανειακή Θερμοκρασία Εδάφους (Land Surface Temperature-LST)	17
A.4 Φασματοραδιόμετρο MODIS	19
A.5 Αλγόριθμος «split window» για την εξαγωγή της LST.....	22
A.6 Κλιματικές Ζώνες της Ελλάδος.....	26
B. Μεθοδολογία	28
B.1 Περιοχές Μελέτης.....	28
B.1.1 Κάλυψη και χρήση γης των υπό μελέτη περιοχών	31
B.2.1 Διαδικασία Ανάκτησης Δεδομένων.....	38
B.2.2 Μετατροπή των τιμών των pixels σε LST.....	42
B.2.3 Αξιολόγηση Δεδομένων	44
Γ. Στατιστική Επεξεργασία Χρονοσειράς	46
Γ.1 Υπολογισμός Μέσων Μηνιαίων Τιμών LST	46
Γ.2 Προσδιορισμός Αστικών Περιοχών.....	47
Γ.3 Μέθοδος Γραμμικής Παλινδρόμησης.....	49
Δ. Αποτελέσματα.....	53
Δ.1 Θεσσαλονίκη.....	53
Δ.2 Πάτρα.....	60
Δ.3 Ηράκλειο.....	68

Δ.4 Βόλος	75
Ε. Συμπεράσματα	82
ΣΤ. Βιβλιογραφία	88
Παράρτημα	91

Εισαγωγή

Η κατανόηση του ισοζυγίου ενέργειας στο αστικό περιβάλλον είναι σημαντική για ένα πλήθος εφαρμογών που εντάσσονται στην παρατήρηση και μελέτη της Γης, όπως την μικρο-κλιματολογία (Arnfield, 2003; Voogt & Oke, 2003), την παγκόσμια κλιματική αλλαγή και τις αλληλεπιδράσεις ανθρώπου – περιβάλλοντος (Yang et al., 2003; Weng, 2009a). Η επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους, η λευκαύγεια, ο συντελεστής εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας κ.α. επηρεάζουν το ισοζύγιο ακτινοβολιών σε μία αστική επιφάνεια. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Για παράδειγμα, η εκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους πραγματοποιείται στη φασματική περιοχή του θερμικού υπέρυθρου ενώ της λευκαύγειας στη φασματική περιοχή του ορατού.

Στο κεφάλαιο Α, παρατίθενται το θεωρητικό υπόβαθρο που είναι απαραίτητο για την κατανόηση της παρούσας εργασίας. Αρχικά γίνεται, μία σύντομη αναφορά στο αντικείμενο της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και έπειτα ακολουθεί μία συνοπτική παρουσίαση των δορυφορικών αισθητήρων και των χαρακτηριστικών τους. Ακολουθεί μία πλήρη ανάλυση της παραμέτρου της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους ώστε να γίνει κατανοητός ο λόγος και η αναγκαιότητα μελέτης της. Πραγματοποιείται μια εκτεταμένη αναφορά στο ραδιόμετρο MODIS, από το οποίο συλλέχθηκαν τα δορυφορικά δεδομένα που ήταν απαραίτητα. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της LST μέσω του συντελεστή εκπομπής και τέλος, περιγράφονται οι κλιματικές ζώνες στις οποίες διαιρείται η Ελλάδα.

Στο κεφάλαιο Β, παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Πρώτα, γίνεται αναφορά στα δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και μετά, στην ανάλυση των αστικών περιοχών που μελετήθηκαν. Αναφέρονται, όλα τα προϊόντα και τα λογισμικά που ήταν

απαραίτητα για την αξιολόγηση και την επεξεργασία των δεδομένων. Επίσης, γίνεται μία αποτύπωση των τύπων κάλυψης γης των υπό μελέτη περιοχών, στο πλαίσιο ερμηνείας της LST.

Στο κεφάλαιο Γ, γίνεται μία εκτενής ανάλυση για το πώς πραγματοποιήθηκε η στατιστική επεξεργασία της 15 ετούς χρονοσειράς για κάθε αστικό κέντρο, ώστε να υπολογιστεί η μέση μηνιαία τιμή της LST και η ποσοστιαία μακροχρόνια τάση της.

Στο κεφάλαιο Δ, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους και των ποσοστιαίων τάσεων της, τόσο σε γραφήματα, όσο και σε χάρτες χρωματικής απεικόνισης.

Στο κεφάλαιο Ε, παρατίθενται τα συμπεράσματα και ένα σύντομος σχολιασμός για τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και για την όλη μελέτη. Τέλος, στο Παράρτημα συμπεριλαμβάνονται και οι υπόλοιποι χάρτες που δημιουργήθηκαν και δεν παρουσιάστηκαν στο κύριο μέρος της εργασίας.

A. Θεωρητικό Υπόβαθρο

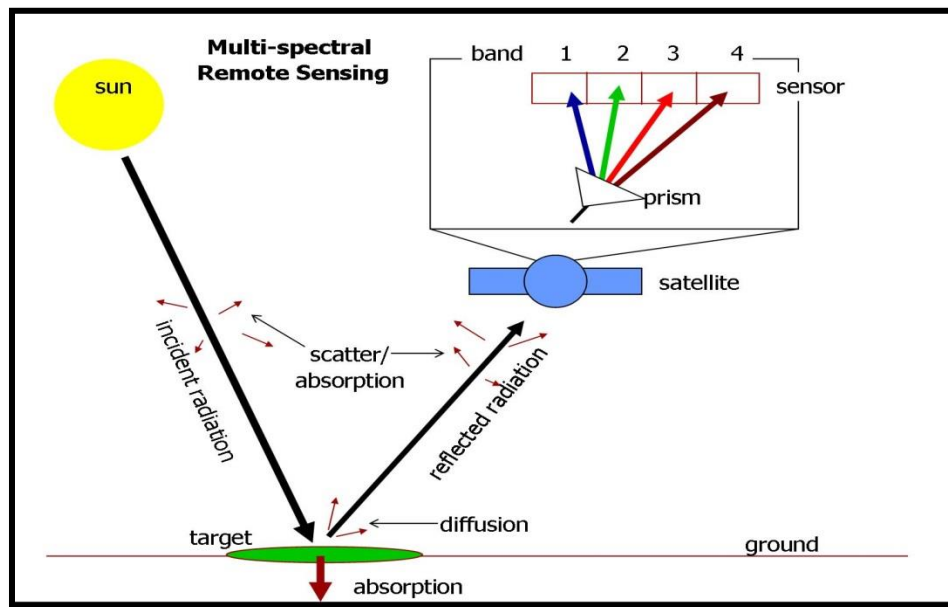
A.1 Δορυφορική Τηλεπισκόπηση

Η παρατήρηση της γης από το διάστημα αποτελεί τα τελευταία χρόνια, σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη του περιβάλλοντος, την κατανόηση του παγκόσμιου κλίματος, καθώς και το σχεδιασμό και την υποστήριξη αναπτυξιακών και παραγωγικών δραστηριοτήτων σε μία περιοχή. Εδώ εισέρχεται η έννοια της τηλεπισκόπησης ή τηλεανίχνευσης (remote sensing), καθώς η παρατήρηση φαινομένων και χαρακτηριστικών πραγματοποιείται από απόσταση (Εικόνα 1).

Ο όρος δορυφορική τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διαδικασίας λήψης πληροφοριών με τη χρήση ανιχνευτικών συσκευών που φέρονται από δορυφόρους παρατήρησης της γης και υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής της σε έδαφος, ατμόσφαιρα και θάλασσα. Σήμερα πλέον, τα δεδομένα που διατίθενται, είναι από δορυφόρους τελευταίας γενιάς. Γεγονός που σημαίνει, ότι οι δορυφόροι αυτοί είναι σε θέση να παρέχουν εικόνες υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας ($<1\text{m}$) και ως εκ τούτου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για εφαρμογές σε αστικό περιβάλλον.

Η τεχνολογία της τηλεπισκόπησης έχει εξελιχθεί σε αντικείμενο επιστημονικής έρευνας, κυρίως μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο (Weng, 2009b). Νωρίτερα η ανάπτυξή της καθοδηγούνταν κυρίως από στρατιωτικούς σκοπούς και αργότερα εφαρμόστηκε για πολιτικές εφαρμογές. Πλέον η τηλεπισκόπηση μπορεί συνεισφέρει στη μετεωρολογία, στην γεωργία, στην κλιματολογία, στην υδρολογία, στις χρήσεις και κάλυψη γης, στη χαρτογραφία και πολλά άλλα. Πρόσφατα με την εμφάνιση των υψηλής χωρικής ανάλυσης εικόνων και τις πιο εξελιγμένες τεχνικές, η μελέτη του αστικού περιβάλλοντος και οι εφαρμογές τηλεπισκόπησης που σχετίζονται με αυτό, έχουν κερδίσει σημαντικό έδαφος στην επιστημονική κοινότητα.

Η γήινη επιφάνεια ανακλά και απορροφά την ηλιακή (μικρού μήκους κύματος) και ατμοσφαιρική (υπέρυθη) ακτινοβολία που δέχεται και παράλληλα εκπέμπει η ίδια, υπέρυθη ακτινοβολία (γήινη ακτινοβολία).



Εικόνα 1: Αρχή λειτουργίας δορυφορικής τηλεπισκόπησης για τη λήψη πληροφοριών

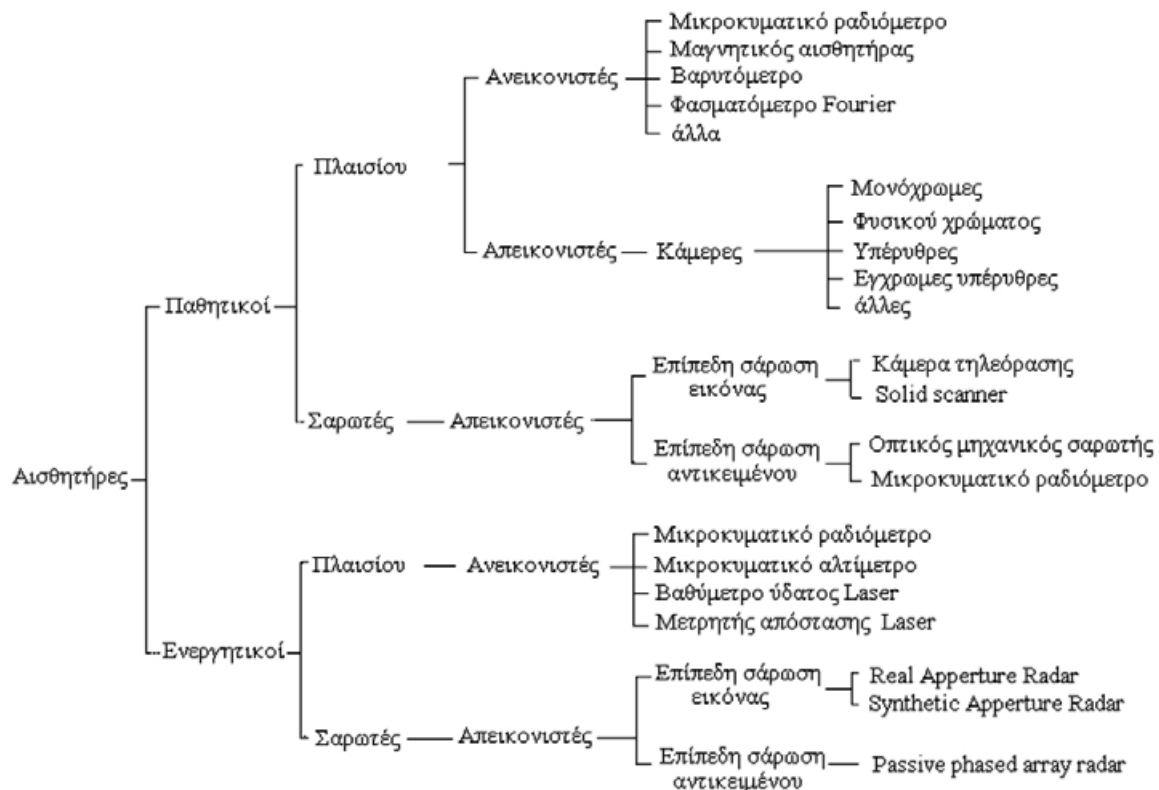
Ο λόγος της έντασης της ανακλώμενης ακτινοβολίας από μία επιφάνεια προς την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ορίζεται ως λευκαύγεια (albedo). Οι δορυφορικοί αισθητήρες ανιχνεύουν και καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου, που είτε ανακλάται είτε εκπέμπεται από μία επιφάνεια σε κάποια φασματική περιοχή στη γη, ή σκεδάζεται από την ατμόσφαιρα.

A.2 Δορυφορικοί Αισθητήρες

Οι δορυφορικοί αισθητήρες ανήκουν στην ευρεία κατηγορία των ραδιομέτρων, που είναι όργανα μέτρησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και η λειτουργία τους βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Στην περίπτωση που ο αισθητήρας περιλαμβάνει φράγμα περίθλασης, το οποίο διαχωρίζει την

ακτινοβολία που εκτείνεται σε μία περιοχή του φάσματος, σε μικρότερες φασματικές περιοχές, τότε ονομάζεται φασματοραδιόμετρο.

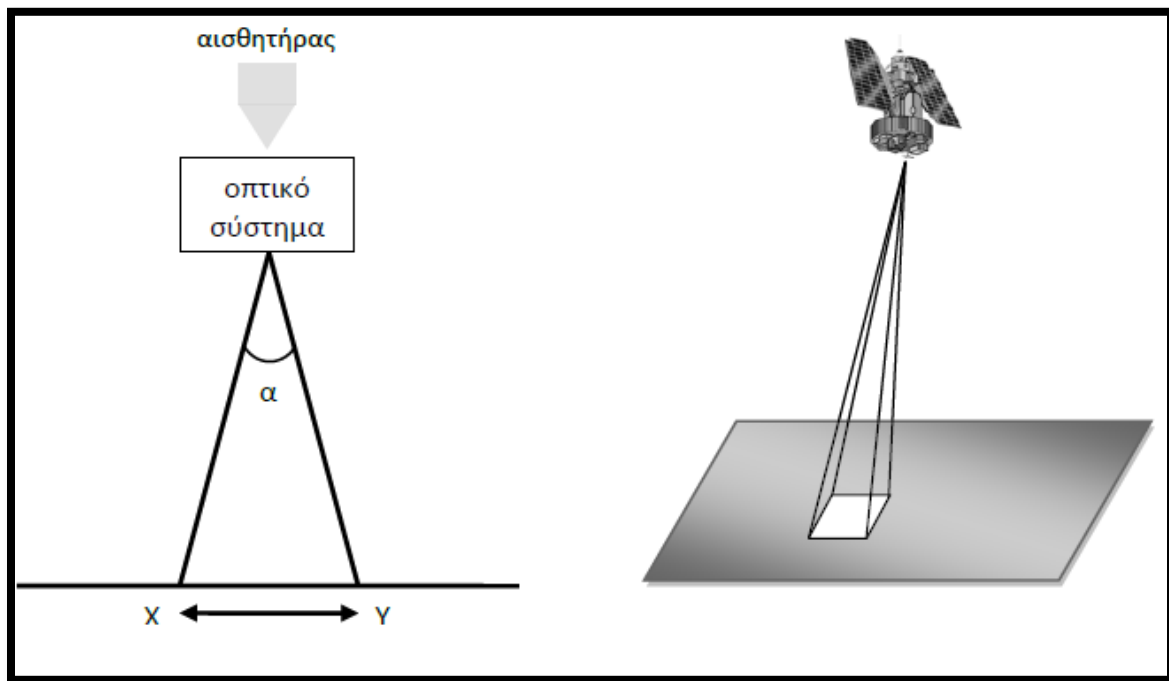
Τα καταγραφικά αυτά συστήματα που φέρονται από δορυφόρους, διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Εικόνα 2), τους ενεργητικούς και τους παθητικούς αισθητήρες, ανάλογα με την πηγή ακτινοβολίας που καταγράφουν. Οι ενεργητικοί ανιχνευτές εκπέμπουν ακτινοβολία και την κατευθύνουν προς το στόχο, αυτή οπισθοσκεδάζεται, επιστρέφει και καταγράφεται από το σύστημα. Αντίθετα, οι παθητικοί αισθητήρες καταγράφουν την ακτινοβολία που εκπέμπει ή ανακλά ο στόχος. Άλλοι τρόποι κατάταξης των αισθητήρων σε υποκατηγορίες είναι ανάλογα με τη διαδικασία ανίχνευσης της υπό μελέτη περιοχής (ανεικονιστές - απεικονιστές) και ανάλογα με το πώς καταγράφουν την ακτινοβολία (συστήματα πλαισίου – σαρωτές) (Καρτάλης & Φειδάς, 2006).



Εικόνα 2: Ταξινόμηση των δορυφορικών αισθητήρων

Σημαντική παράμετρος ενδιαφέροντος στη δορυφορική τηλεπισκόπηση είναι η διακριτική ικανότητα, όπως διακρίνεται σε:

- **Χωρική διακριτική ικανότητα (Spatial Resolution)**, είναι η ικανότητα του ανιχνευτή να διακρίνει δύο αντικείμενα που βρίσκονται πολύ κοντά στη σκηνή. Ποσοτικά ισούται με την ελάχιστη απόσταση που μπορούν να έχουν δύο αντικείμενα ώστε να είναι ευδιάκριτες οι διαστάσεις τους ή το μικρότερο μέγεθος που πρέπει να έχει ένα αντικείμενο για να μπορεί να ανιχνευτεί. Καθορίζεται από το στιγμιαίο πεδίο κατόπτευσης (Instantaneous Field of View, IFOV), τη στερεά γωνία με την οποία ο αισθητήρας “βλέπει” την επιφάνεια της γης, η οποία καθορίζει την περιοχή της γήινης επιφάνειας που κατοπτρεύετε από συγκεκριμένο ύψος λήψης, σε μία δεδομένη στιγμή (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Στιγμιαίο πεδίο κατόπτευσης (IFOV)

- **Φασματική διακριτική ικανότητα (Spectral Resolution)**, η οποία αφορά το εύρος των περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στις οποίες καταγράφει ένας πολυφασματικός ανιχνευτής και τον αριθμό των καναλιών που αυτός χρησιμοποιεί. Η μορφή της καμπύλης της φασματικής απόκρισης μιας επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος λ , καλείται

φασματική υπογραφή και είναι μοναδική για κάθε επιφάνεια. Επομένως, η φασματική υπογραφή αποτελεί τη βάση για το διαχωρισμό διαφορετικών τάξεων ή στοιχείων και λεπτομερειών και για αυτό το λόγο είναι καθοριστικής σημασίας για το διαχωρισμό του είδους των επιφανειών σε μία εικόνα.

- **Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα (Radiometric Resolution)**, η οποία ορίζεται ως η ευαισθησία του αισθητήρα να ανιχνεύει διαφορές στην ισχύ του σήματος, που εκφράζεται μέσω της μεταβολής στην ένταση της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης, από την επιφάνεια της γης, ακτινοβολίας. Είναι μείζονος σημασίας, καθώς η ραδιομετρική τιμή που καταγράφει ο αισθητήρας καθορίζει την πραγματική πληροφορία που περιέχεται στα δορυφορικά δεδομένα. Η τιμή αυτή μετατρέπεται σε ψηφιακή ($0-2^x$) και συγκεκριμένα στους απεικονιστές, τα δορυφορικά δεδομένα απεικονίζονται με διαφορετικούς τόνους του γκρι, με το 0 να αντιστοιχεί στο μαύρο και το 255 στο λευκό, στην περίπτωση δεδομένων 8-bit. Αν μελετηθεί μία εικόνα λιγότερων bits, θα γίνει αντιληπτό ότι υπολείπεται σε επίπεδο και λεπτομέρεια της πληροφορίας.
- **Χρονική διακριτική ικανότητα (Temporal Resolution)**, η οποία έχει σχέση με τη συχνότητα λήψης εικόνων για την ίδια περιοχή. Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφόρου, με αποτέλεσμα να κυμαίνεται από λίγα λεπτά για τους γεωστάσιμους δορυφόρους μέχρι μερικές εβδομάδες για τους δορυφόρους πολικής τροχιάς. Αξίζει να σημειωθεί ότι για μεταβολές που εξελίσσονται αργά στο χρόνο, όπως συμβαίνει στην κάλυψη και χρήση γης, η μεγάλη χρονική διακριτική ικανότητα δεν είναι απαραίτητη. Κάτι τέτοιο όμως θα ήταν απαραίτητο σε εφαρμογές που σχετίζονται με την παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων, όπου η εξέλιξη στο χρόνο είναι γρήγορη.

A.3 Επιφανειακή Θερμοκρασία Εδάφους (Land Surface Temperature-LST)

Κύρια πηγή ενέργειας της Γης αποτελεί ο ήλιος, καθώς ρυθμίζει τη θερμοκρασία του εδάφους άμεσα και τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας άμεσα, με την απορρόφηση της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας και έμμεσα με ροή λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας. Η διαθέσιμη ενέργεια ενός σώματος ή ενός συστήματος, όπως είναι φυσικό, είναι το αποτέλεσμα των ενεργειακών ανταλλαγών με το περιβάλλον του. Ο προσδιορισμός του ενεργειακού ισοζυγίου αλλά και του ισοζυγίου ακτινοβολιών είναι σημαντικός. Οι ενεργειακές ανταλλαγές μεταξύ ήλιου-γης, γήινης επιφάνειας-ατμόσφαιρας, ατμόσφαιρας-διαστήματος, καθορίζουν τις τιμές της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους, της θερμοκρασίας του αέρα, των άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων και συνδέονται με τις κλιματικές αλλαγές.

Συνεπώς, η επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (LST) είναι ένας καλός δείκτης του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια του εδάφους. Ουσιαστικά συνδυάζει τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης επιφάνειας-ατμόσφαιρας και των ενεργειακών ροών ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και το έδαφος (Mannstein, 1987; Sellers et al., 1988). Υπό αυτή την έννοια, αποτελεί μία παράμετρο-κλειδί στη φυσική των διαδικασιών της γήινης επιφάνειας και χρησιμοποιείται σε διάφορα πεδία που σχετίζονται με την εξατμισοδιαπνοή, την κλιματική αλλαγή, τον υδρολογικό κύκλο, την απεικόνιση της βλάστησης, το αστικό κλίμα και τις περιβαλλοντολογικές μελέτες.

Εξαιτίας της έντονης ετερογένειας των χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας, όπως η βλάστηση, η τοπογραφία και το έδαφος (Liu et al., 2006 ; Neteler, 2010), η LST μεταβάλλεται ραγδαία στο χώρο όσο και στο χρόνο (Vauclin et al., 1982; Prata et al., 1995) .

Την ίδια στιγμή κρίνεται αναγκαία η μελέτη της LST καθώς, οι αλλαγές στην κάλυψη γης δεν πραγματοποιούνται σταδιακά και με φυσικό τρόπο αλλά

ταχέως λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Οι αλλαγές στην κάλυψη γης σε συνδυασμό με τις αλλαγές στη χρήση γης και μάλιστα αν αυτές μελετηθούν σε παγκόσμιο επίπεδο, έχουν άμεση επίπτωση στη βιοτική ποικιλομορφία και στην αλλαγή του κλίματος. Επίσης, η επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους εξαρτάται ακόμη από παράγοντες όπως, η ώρα της ημέρας, οι εποχές, το γεωγραφικό πλάτος, η κατάσταση της ατμόσφαιρας, τα υλικά κατασκευής, τα πολεοδομικά χαρακτηριστικά της αστικής περιοχής κ.α., συνεπώς η μελέτη της πορείας της και οι μεταβολές της, αποτυπώνουν σημαντικά στοιχεία της ατμόσφαιρας γενικότερα.

Δεδομένης όμως της πολυπλοκότητας της LST, οι επίγειες μετρήσεις δε μπορούν πρακτικά να παρέχουν τιμές για μεγάλες εκτάσεις. Με την ανάπτυξη της τηλεπισκόπησης, τα δορυφορικά δεδομένα προσφέρουν τη μοναδική δυνατότητα για μέτρηση της LST σε παγκόσμια κλίμακα με ικανοποιητική χρονική και χωρική διακριτική ικανότητα.

Οι δορυφορικοί αισθητήρες καταγράφουν την ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται από μία γήινη επιφάνεια και σκεδάζεται από την ατμόσφαιρα ή την ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα σώματα στη γη. Στην τηλεπισκόπηση, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καθορίζεται ποσοτικά από την ένταση και το μήκος κύματος ή τη συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι το μέσο μεταφοράς της πληροφορίας από το στόχο στο δορυφορικό αισθητήρα. Συγκεκριμένα, η επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους υπολογίζεται από τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία που εκπέμπεται από τις διάφορες επιφάνειες που υπάρχουν στη γη και καταγράφεται από τα ραδιόμετρα MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

Α.4 Φασματοραδιόμετρο MODIS

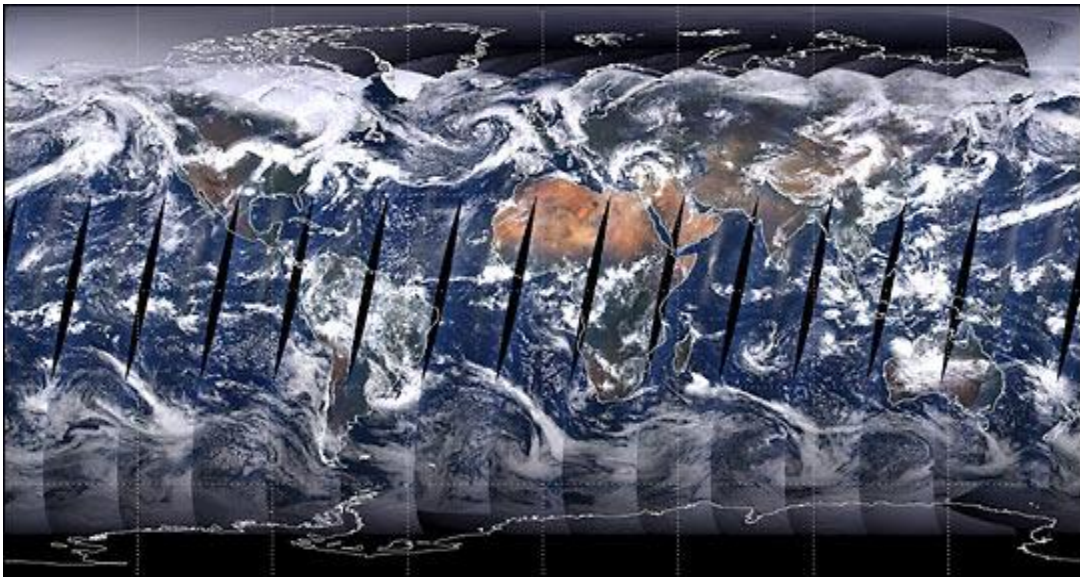
Ο παθητικός αισθητήρας MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) που αποδίδεται ως αισθητήρας Μέτριας Ανάλυσης Απεικονιστικού Φασματο-ραδιομέτρου, τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη Γη από τη NASA το 1999, κατά την αποστολή NASA Earth Observing System (EOS – Σύστημα παρατήρησης της Γης). Το πρώτο όργανο πτήσης MODIS, Protoflight Model (PFM ή Μοντέλο Πρώτης Πτήσης, ΜΠΠ) είναι ενιαίο με το διαστημικό σκάφος Terra (EOS AM-1), που εκτοξεύθηκε επιτυχώς στις 18 Δεκεμβρίου του 1999. Το δεύτερο όργανο πτήσης MODIS flight 1 (FM1 ή Μοντέλο Πτήσης 1, ΜΠ1) είναι ενιαίο με το διαστημικό σκάφος Aqua (EOS OM-1) που εκτοξεύθηκε επιτυχώς στις 4 Μαΐου του 2002.



Εικόνα 4: Φασματο-ραδιόμετρο MODIS

Η τροχιά του Terra γύρω από τη Γη συγχρονίζεται έτσι ώστε να περνά από βόρεια προς τα νότια εγκάρσια του Ισημερινού το πρωί (Εικόνα 5), ενώ ο Aqua περνά από νότια προς τα βόρεια εγκάρσια του Ισημερινού το απόγευμα. Από το Φεβρουάριο του 2000 λαμβάνονται ημερησίως δεδομένα για όλη την επιφάνεια

της Γης, τους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα σε μέση χωρική διακριτική ικανότητα αλλά με υψηλή φασματική διακριτική ικανότητα και επαναληψιμότητα λήψεων. Πλέον με τα ραδιόμετρα MODIS συλλέγονται δεδομένα 4 φορές την ημέρα σε 36 φασματικές ζώνες και καλύπτεται όλη η επιφάνεια της γης σε μία ημέρα (Εικόνα 5), με χωρική διακριτική ικανότητα 250m (VIS φασματικά κανάλια 1 και 2), 500m (NIR φασματικά κανάλια 3-7), 1km (φασματικά κανάλια 8-36) ενώ το εύρος κάλυψής του είναι 2.330km.



Εικόνα 5: Ο αισθητήρας MODIS σαρώνει την γήινη επιφάνεια στη διάρκεια μιας ημέρας

Η υψηλή ακρίβεια του ραδιομέτρου MODIS, το καθιστά σημαντικό επιστημονικό εργαλείο για τη μελέτη της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής, αφού χρησιμοποιείται ευρέως για την αποτύπωση των ειδών κάλυψης γης και των μεταβολών της και ακόμη, επιτρέπει την παρατήρηση βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων των ωκεανών. Στους επόμενους πίνακες αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά του MODIS (Πίνακας 1) και οι εφαρμογές που προτείνονται για κάθε φασματικό κανάλι (Πίνακας 2).

Πίνακας 1: Προδιαγραφές και χαρακτηριστικά των MODIS

Specifications	
Orbit	705 km, 10:30 a.m. descending node (Terra) or 1:30 p.m. ascending node (Aqua), sun-synchronous, near-polar, circular
Scan rate	20.3 rpm, cross track
Swath	2330 km (cross track) by 10 km (along track at nadir)
Dimensions	
Telescope	17.78 cm diam. off-axis, afocal (collimated), with intermediate field stop
Size	1.0 x 1.6 x 1.0 m
Weight	228.7 kg
Power	162.5 W (single orbit average)
Data rate	10.6 Mbit/s (peak daytime); 6.1 Mbit/s (orbital average)
Quantization	12 bits
Spatial Resolution	250 m (bands 1–2) 500 m (bands 3–7) 1000 m (bands 8–36)
Design life	6 years

Πίνακας 2: Εφαρμογές των MODIS

Band	Wavelength (nm)	Resolution (m)	Primary Use	Band	Wavelength (μm)	Resolution (m)	Primary Use
1	620–670	250	Land/Cloud/Aerosols Boundaries	20	3.660–3.840	1000	Surface/Cloud Temperature
2	841–876	250		21	3.929–3.989	1000	
3	459–479	500	Land/Cloud/Aerosols Properties	22	3.929–3.989	1000	
4	545–565	500		23	4.020–4.080	1000	Atmospheric Temperature
5	1230–1250	500		24	4.433–4.498	1000	
6	1628–1652	500		25	4.482–4.549	1000	Cirrus Clouds Water Vapor
7	2105–2155	500		26	1.360–1.390	1000	
8	405–420	1000	Ocean Color/ Phytoplankton/ Biogeochemistry	27	6.535–6.895	1000	Cloud Properties
9	438–448	1000		28	7.175–7.475	1000	
10	483–493	1000		29	8.400–8.700	1000	Ozone
11	526–536	1000		30	9.580–9.880	1000	Surface/Cloud Temperature
12	546–556	1000		31	10.780–11.280	1000	
13	662–672	1000		32	11.770–12.270	1000	
14	673–683	1000		33	13.185–13.485	1000	Cloud Top Altitude
15	743–753	1000		34	13.485–13.785	1000	
16	862–877	1000		35	13.785–14.085	1000	
17	890–920	1000	Atmospheric Water Vapor	36	14.085–14.385	1000	
18	931–941	1000					
19	915–965	1000					

A.5 Αλγόριθμος «split window» για την εξαγωγή της LST

Το προϊόν “Επιφανειακή Θερμοκρασία Εδάφους και Συντελεστής Εκπομπής” (Land Surface Temperature and Emissivity) παράγεται μέσω της μεθόδου «split window». Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ανάκτηση της LST σε συνθήκες ανέφελου ουρανού, με βάση τη διαφορετική απορρόφηση υδρατμών σε δύο γειτονικά υπέρυθρα κανάλια. Προτάθηκε αρχικά από τον McMillin (1975), για την εκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας από δορυφορικές μετρήσεις. Από τότε, ποικίλοι «split window» αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί και τροποποιηθεί για την ανάκτηση της LST και σήμερα οι περισσότεροι από αυτούς έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε δεδομένα που καταγράφηκαν από το MODIS.

Έχει παρατηρηθεί ότι ο συντελεστής εκπομπής, όπως και η επιφανειακή θερμοκρασία μεταβάλλονται ανάλογα με την κάλυψη γης και αυτό μπορεί να συμβεί σε ένα μόλις εικονοστοιχείο του MODIS. Όμως οι διαστάσεις των εικονοστοιχείων είναι συνήθως τέτοιες, ώστε η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους και η φύση του να διαφέρουν μέσα στο ίδιο εικονοστοιχείο. Η θερμοκρασία εδάφους, μπορεί να διαφέρει μέχρι και 10 K σε απόσταση μερικών μέτρων, λόγω επιδράσεων σκίασης, διακυμάνσεων της ηλιακής ακτινοβολίας, και επιδράσεις της τοπογραφίας (Prata, 1993).

Αυτά τα μικτά εικονοστοιχεία μπορούν να τύχουν επεξεργασίας, υπολογίζοντας ένα μέσο όρο του συντελεστή εκπομπής από όλες τις επιφάνειες που αποτυπώνονται σε ένα εικονοστοιχείο. Παρ’όλες όμως τις διακυμάνσεις του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας, υπάρχουν ενδείξεις ότι η φασματική εκπομπή των χερσαίων τύπων κάλυψης γης είναι σχετικά σταθερή, στα μήκη κύματος 10,5-12,5μm, εκεί που είναι τοποθετημένα τα κανάλια MODIS 31 και 32. Αν λοιπόν γνωρίζουμε το συντελεστή εκπομπής στα κανάλια αυτά, η μέθοδος «split window» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διόρθωση της επίδρασης της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας στην εκτίμηση της LST ανάλογα με τη γωνία

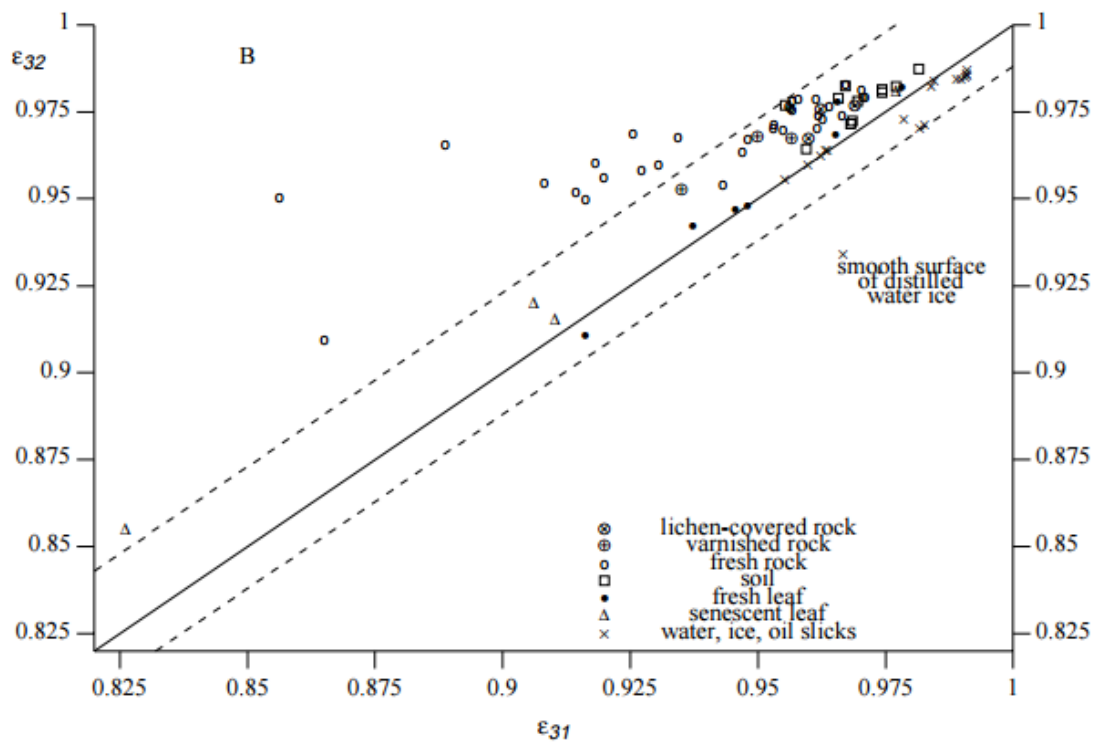
λήψης, με βάση τη διαφορετική απορρόφηση (Price, 1984; Becker, 1987; Wan and Dozier, 1989; Becker and Li, 1990; Sobrino et al., 1991; Vital, 1991; Kerr et al., 1992; Otle and Stoll, 1993; Prata, 1994; Wan and Dozier, 1996).

Η μέθοδος split window αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας μοντέλα συνάρτησης κατανομής αμφίδρομης ανακλαστικότητας (linear Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF). Οι φασματικοί συντελεστές προήλθαν από μετρήσεις εργαστηρίου διαφόρων υλικών και οι παράμετροι δομής από περιγραφές του τύπου κάλυψης γης. Το κάθε εικονοστοιχείο ταξινομείται σε μια από τις 14 κλάσεις ανάλογα με τον συντελεστή εκπομπής. Κλάσεις κάλυψης γης (land cover classes) με παρόμοιο συντελεστή εκπομπής συγχωνεύονται σε μία κλάση, όπως για παράδειγμα δύο κλάσεις δασών. Επιπρόσθετα, για κάποιες κλάσεις είναι απαραίτητος ο επιπλέον διαχωρισμός, όπως για παράδειγμα η κλάση των αναπτυσσόμενων καλλιεργειών και των αδρανών καλλιεργειών, λόγω του διαφορετικού συντελεστή εκπομπής τους.

Ο αλγόριθμος “Generalized Split Window” υπολογισμού της LST όπως προτάθηκε από τους Wan και Dozier (1996), βασίζεται σε κάποιες υποθέσεις για την ατμόσφαιρα, το εύρος των τιμών της LST και του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας του εδάφους:

- Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και ειδικά το προφίλ των υδρατμών μεταβάλλονται γρήγορα με το χρόνο, τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Επίσης, δεν είναι εύκολο να μετρηθεί η σχετική υγρασία με ακρίβεια καλύτερη από 10%.
- Η LST ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή και τον χρόνο και σχετίζεται λιγότερο με τη θερμοκρασία του αέρα κοντά στην επιφάνεια. Η διαφορά μεταξύ των ημερήσιων και νυχτερινών θερμοκρασιών των διαφόρων τύπων κάλυψης γης, μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 10°C (Betts et al., 1996).

- Ο συντελεστής εκπομπής, των περισσότερων τύπων κάλυψης γης στα κανάλια του MODIS 31 και 32, είναι σχετικά σταθερός και κυμαίνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Μέσοι όροι συντελεστών εκπομπής υλικών, στις ζώνες MODIS 31 και 32

Έτσι γενικεύοντας τη γραμμική μορφή του αλγορίθμου LST των Wan-Dozier, μέσα από ένα split window LST αλγόριθμο για το MODIS, που εξαρτάται από τη γωνία λήψης (Wan and Dozier, 1996), ο αλγόριθμος εκτίμησης της LST, δίνεται από την παρακάτω μορφή:

$$T_S = \left(A_1 + A_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{31}+T_{32}}{2} + \left(B_1 + B_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) (T_{31} - T_{32}) + C \quad (1)$$

όπου $\varepsilon = 0.5(\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32})$, η μέση τιμή των συντελεστών εκπομπής στα κανάλια 31 και 32

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{31} - \varepsilon_{32}$$

T_{31} και T_{32} : θερμοκρασία λαμπρότητας στα κανάλια 31 και 32

A_i, B_i, C : σταθερές για $i=1,2,3$, που προσδιορίζονται από πίνακες κατηγοριοποίησης της εκπομπής ανάλογα με τον τύπο επιφάνειας

A.6 Κλιματικές Ζώνες της Ελλάδος

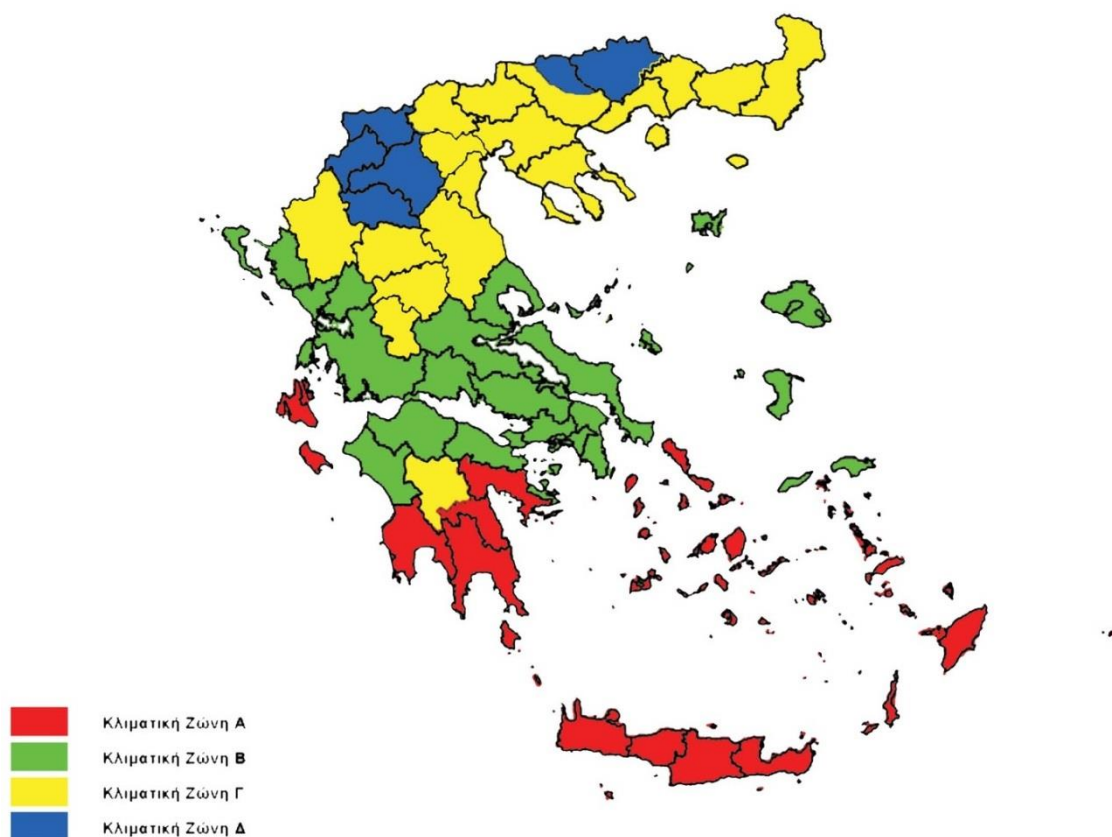
Η Ελλάδα βρίσκεται στη βόρεια εύκρατη ζώνη της γης και συγκεκριμένα στην ανατολική λεκάνη της Μεσογείου. Έχει Μεσογειακό τύπο κλίματος (κατά Suran), αλλά δεν παρουσιάζει κλιματική ενότητα, λόγω του γεωγραφικού κυρίως παράγοντα. Ο ήλιος σε κανένα τόπο της Ελλάδος, δε φθάνει στο ζενίθ και ο ετήσιος κύκλος μπορεί να διαιρεθεί σε ψυχρή-βροχερή εποχή (Οκτώβριος-Μάρτιος) και σε θερμή-άνομβρη (Απρίλιος-Σεπτέμβριος). Οι κύριοι παράγοντες που διαμορφώνουν το φυσικό κλίμα της Ελλάδος, είναι:

- Η γεωγραφία
- Η ηλιακή ακτινοβολία
- Η γενική κυκλοφορία
- Οι αέριες μάζες
- Οι τοπικοί άνεμοι

Σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ (ΦΕΚ 407/9.4.2010, ‘Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων – ΚΕΝΑΚ), η ελληνική επικράτεια διαιρείται σε 4 κλιματικές ζώνες με βάση τις βαθμοημέρες θέρμανσης (Α. Ματζαράκης, Χ. Μπαλαφούτης. ‘Γεωγραφική Κατανομή Βαθμοημερών Θέρμανσης στον Ελληνικό Χώρο για Ενεργειακή Χρήση’). Στον Πίνακα 3 προσδιορίζονται οι νομοί που υπάγονται στις τέσσερις κλιματικές ζώνες, από τη θερμότερη στη ψυχρότερη και στην Εικόνα 7 αποτυπώνεται σχηματικά η διάκριση των κλιματικών ζωνών στην Ελλάδα. Σε κάθε νομό, οι περιοχές που βρίσκονται σε υψόμετρο άνω των 500 μέτρων, εντάσσονται στην επόμενη ψυχρότερη κλιματική ζώνη από εκείνη στην οποία ανήκουν σύμφωνα με τα προηγούμενα. Για τη Δ ζώνη όλες οι περιοχές ανεξαρτήτως υψομέτρου περιλαμβάνονται στη ζώνη Δ.

Πίνακας 3: Νομοί ελληνικής επικράτειας ανά κλιματική ζώνη

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ	NOMOI
ΖΩΝΗ Α	Ηρακλείου, Χανίων, Ρεθύμνου, Λασιθίου, Κυκλάδων, Δωδεκανήσου, Σάμου, Μεσσηνίας, Λακωνίας, Αργολίδας, Ζακύνθου, Κεφαλληνίας & Ιθάκης, Κύθηρα & νησιά Σαρωνικού (Αττικής), Αρκαδίας (πεδινή)
ΖΩΝΗ Β	Αττικής (εκτός Κυθήρων & νησιών Σαρωνικού), Κορινθίας, Ηλείας, Αχαΐας, Αιτωλοακαρνανίας, Φθιώτιδας, Φωκίδας, Βοιωτίας, Ευβοίας, Μαγνησίας, Λέσβου, Χίου, Κέρκυρας, Λευκάδας, Θεσπρωτίας, Πρέβεζας, Άρτας
ΖΩΝΗ Γ	Αρκαδίας (ορεινή), Ευρυτανίας, Ιωαννίνων, Λάρισας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Πιερίας, Ημαθίας, Πέλλης, Θεσσαλονίκης, Κιλκίς, Χαλκιδικής, Σερρών (εκτός ΒΑ τμήματος), Καβάλας, Ξάνθης, Ροδόπης, Έβρου
ΖΩΝΗ Δ	Γρεβενών, Κοζάνης, Καστοριάς, Φλώρινας, Σερρών (ΒΑ τμήμα), Δράμας



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση κλιματικών ζωνών ελληνικής επικράτειας

B. Μεθοδολογία

B.1 Περιοχές Μελέτης

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μελέτη τεσσάρων πόλεων της Ελλάδος, ώστε να εκτιμηθεί η μεταβολή της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους LST και η μακροχρόνια τάση της στο διάστημα 2001-2015. Σκοπός είναι να επικεντρωθεί η επεξεργασία στα αστικά όρια αυτών των περιοχών, λαμβάνοντας υπόψη και τις διαφορές τους ως προς την κλιματική ζώνη που ανήκουν, την κάλυψη-χρήση γης και τη δομή του αστικού ιστού. Πιο συγκεκριμένα, οι πόλεις στις οποίες ανήκουν οι αστικές περιοχές που θα μελετηθούν, αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω :

Θεσσαλονίκη

Η Θεσσαλονίκη είναι η δεύτερη σε πληθυσμό και έκταση πόλη της Ελλάδος. Ο μόνιμος πληθυσμός του δήμου Θεσσαλονίκης, σύμφωνα με την Απογραφή Πληθυσμού - Κατοικιών 2011, υπολογίζεται στους 323.637 κατοίκους (ΕΛ.ΣΤΑΤ.) και έχει έκταση 20,52 km². Η Θεσσαλονίκη βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της περιφερειακής ενότητας Θεσσαλονίκης, στο μυχό του Θερμαϊκού κόλπου. Είναι κτισμένη αμφιθεατρικά στις πλαγιές του Κέδρινου λόφου και περιβάλλεται στα ανατολικά από το δάσος του Σείχ Σου. Τρεις ποταμοί, ο Αξιός, ο Λουδίας και ο Γαλλικός, εκβάλλουν δυτικά της πόλης ενώ ακόμα νοτιότερα εκβάλλει ο Αλιάκμονας. Το Δέλτα του Αξιού αποτελεί υδροβιότοπο ιδιαίτερης σημασίας. Ο Δήμος Θεσσαλονίκης καταλαμβάνει κυρίως την κεντρική έκταση της πόλης της Θεσσαλονίκης με το ιστορικό της κέντρο και τις περιοχές γύρω από αυτό, το λιμάνι, καθώς και τις συνοικίες που εκτείνονται προς τα ανατολικά της πόλης. Στην έκταση του δήμου βρίσκονται τα κυριότερα αξιοθέατα και μνημεία της Θεσσαλονίκης. Η βιομηχανική περιοχή βρίσκεται περίπου 16χλμ δυτικά της

πόλης της Θεσσαλονίκης και το Διεθνές Αεροδρόμιο «Μακεδονία» (SKG) βρίσκεται σε απόσταση 14 χιλιομέτρων από το κέντρο της πόλης. Η Κεντρική Πανεπιστημιούπολη του Α.Π.Θ. βρίσκεται στο κέντρο της πόλης της Θεσσαλονίκης. Ανήκει στην κλιματική ζώνη Γ, το κλίμα της είναι μεσογειακό, αλλά εμπεριέχει και ηπειρωτικά στοιχεία. Η υψηλότερη μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι 25,3°C και σημειώνεται τον Αύγουστο με ελάχιστη διαφορά από την αντίστοιχη του Ιουλίου. Ο πιο ψυχρός μήνας είναι ο Ιανουάριος με μέση ημερήσια θερμοκρασία 4,8°C.

Πάτρα

Η Πάτρα, πρωτεύουσα του νομού Αχαΐας, αποτελεί το πιο σημαντικό λιμάνι και τη μεγαλύτερη πόλη της Πελοποννήσου. Το πολεοδομικό συγκρότημα της Πάτρας είναι το τρίτο μεγαλύτερο στην Ελλάδα. Ένα κεντρικό χαρακτηριστικό της αστικής γεωγραφίας της Πάτρας είναι η διαίρεσή της στην Άνω και Κάτω πόλη. Η Κάτω πόλη περιλαμβάνει τον αστικό πυρήνα και το λιμάνι, βρίσκεται δίπλα στη θάλασσα και απλώνεται μεταξύ των εκβολών των ποταμών Γλαύκου και Χαράδρου. Ο δήμος Πατρέων έχει πληθυσμό 213.984 κατοίκους (Απογραφή 2011, ΕΛ.ΣΤΑΤ.) και έκταση 333,14 km² και η πόλη της Πάτρας έχει μόνιμο πληθυσμό 168.034 κατοίκων (Απογραφή 2011, ΕΛ.ΣΤΑΤ.). Μεγάλης σημασίας για τη βιοποικιλότητα της περιοχής και για τη διαφύλαξη του κλίματος της, έχει το έλος της Αγυιάς, ένα μικρό και παράκτιο υδατικό οικοσύστημα. Η βιομηχανική περιοχή της Πάτρας βρίσκεται εκτός του κέντρου της πόλης, στο δήμο Δυτικής Αχαΐας, όπως επίσης και ο Κρατικός Αερολιμένας Αράξου που βρίσκεται εκτός της περιοχής μελέτης. Ακόμη, η Πανεπιστημιούπολη βρίσκεται στο Ρίο και τη χωρίζει μικρή απόσταση από το αστικό κέντρο της Πάτρας. Κατατάσσεται στην κλιματική ζώνη Β και χαρακτηρίζεται από μεσογειακό τύπο κλίματος με ήπιους, υγρούς χειμώνες και θερμά, ξηρά καλοκαίρια. Η υψηλότερη μέση ημερήσια

θερμοκρασία είναι 25,3°C και παρατηρείται τον Αύγουστο, ενώ η χαμηλότερη τον Ιανουάριο και είναι 10,3°C.

Ηράκλειο

Το Ηράκλειο είναι η μεγαλύτερη πόλη της Κρήτης καθώς και ο μεγαλύτερος λιμένας του νησιού και έδρα του δήμου Ηρακλείου. Βρίσκεται στα βόρεια παράλια της Κρήτης, είναι ο τέταρτος πολυπληθέστερος δήμος της χώρας. Η κεντρική πόλη έχει πληθυσμό 140.730 μόνιμους κατοίκους (Απογραφή 2011, ΕΛ.ΣΤΑΤ.) και έχει έκταση 120 km². Κύριοι οικονομικοί τομείς της πόλης είναι η γεωργία και το εμπόριο. Διαθέτει βιομηχανική περιοχή 4 χιλιόμετρα νοτιοανατολικά του κέντρου. Το Ηράκλειο διαθέτει επίσης ένα από τα μεγαλύτερα σε κίνηση αεροδρόμια της Ελλάδος και είναι τοποθετημένο 5 χμ ανατολικά από το κέντρο του Ηρακλείου, καθώς και λιμάνι με πυκνή ακτοπλοϊκή συγκοινωνία κυρίως με τον Πειραιά. Η πανεπιστημιούπολη του Ηρακλείου, βρίσκεται στην περιοχή Βουτών και δεν είναι κοντά στην περιοχή μελέτης. Το Ηράκλειο ανήκει στην κλιματική ζώνη Α, το κλίμα του είναι εύκρατο προς θαλάσσιο μεσογειακό, με ήπιους χειμώνες και δροσερά καλοκαίρια. Η υψηλότερη ημερήσια θερμοκρασία 25,2 °C καταγράφεται τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ η χαμηλότερη τον Ιανουάριο και είναι 12,1 °C.

Βόλος

Ο Βόλος είναι πόλη της Θεσσαλίας και πρωτεύουσα του νομού Μαγνησίας, χτισμένη στον μυχό του Παγασητικού κόλπου και στους πρόποδες του Πηλίου. Ο διευρυμένος δήμος του, έχει μόνιμο πληθυσμό 144.449 κατοίκων (Απογραφή 2011, ΕΛ.ΣΤΑΤ.), έκταση 387,14 km² και ανήκει στους επτά μεγαλύτερους δήμους του ελληνικού χώρου. Αποτελείται από τέσσερις Δημοτικές Ενότητες εκ

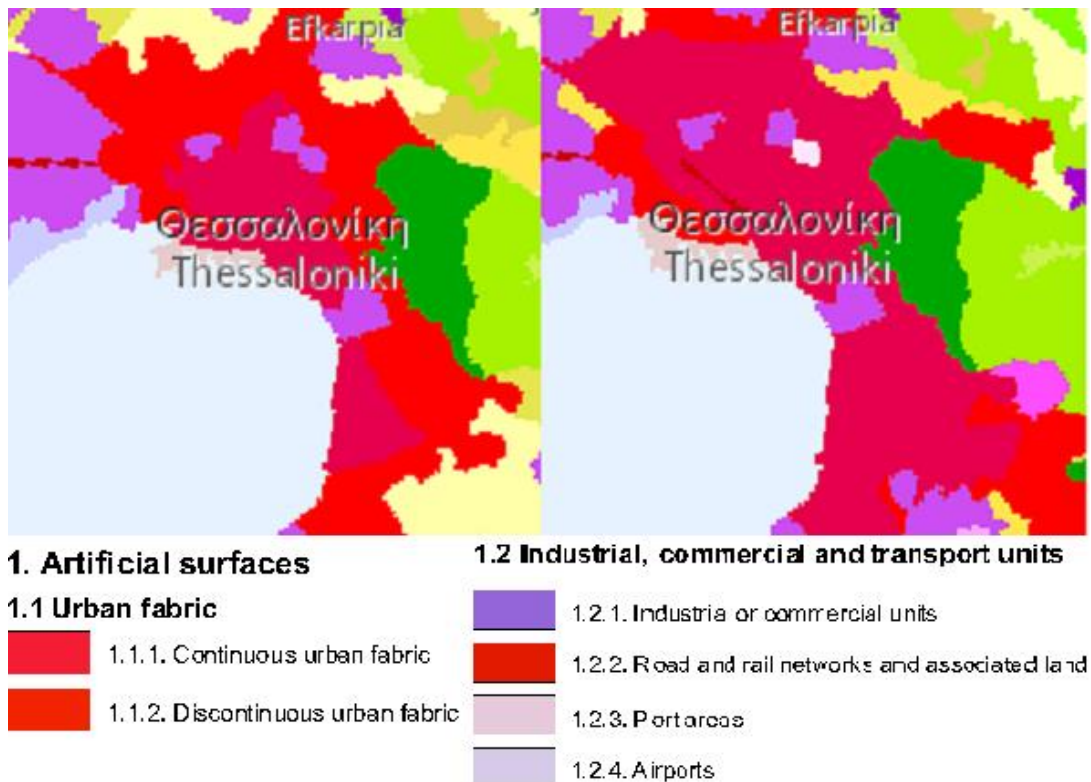
των οποίων η δημοτική ενότητα του Βόλου αποτελεί τον πυρήνα της πόλης του Βόλου, με μόνιμο πληθυσμό 86.046 κατοίκους. Χαρακτηρίζεται από έντονες αστικές λειτουργίες, μια σημαντική παρουσία της βιομηχανίας, του εμπορικού λιμανιού και την ύπαρξη της πλειονότητας των τμημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το κλίμα της περιοχής του Βόλου έχει τα χαρακτηριστικά του μεσογειακού κλίματος των παραθαλασσίων περιοχών της Θεσσαλίας με ετήσιες διαφορές μεταξύ μεγίστης και ελαχίστης θερμοκρασίας άνω των 20°C. Κατατάσσεται στην κλιματική ζώνη Β, όπως και η πόλη της Πάτρας.

B.1.1 Κάλυψη και χρήση γης των υπό μελέτη περιοχών

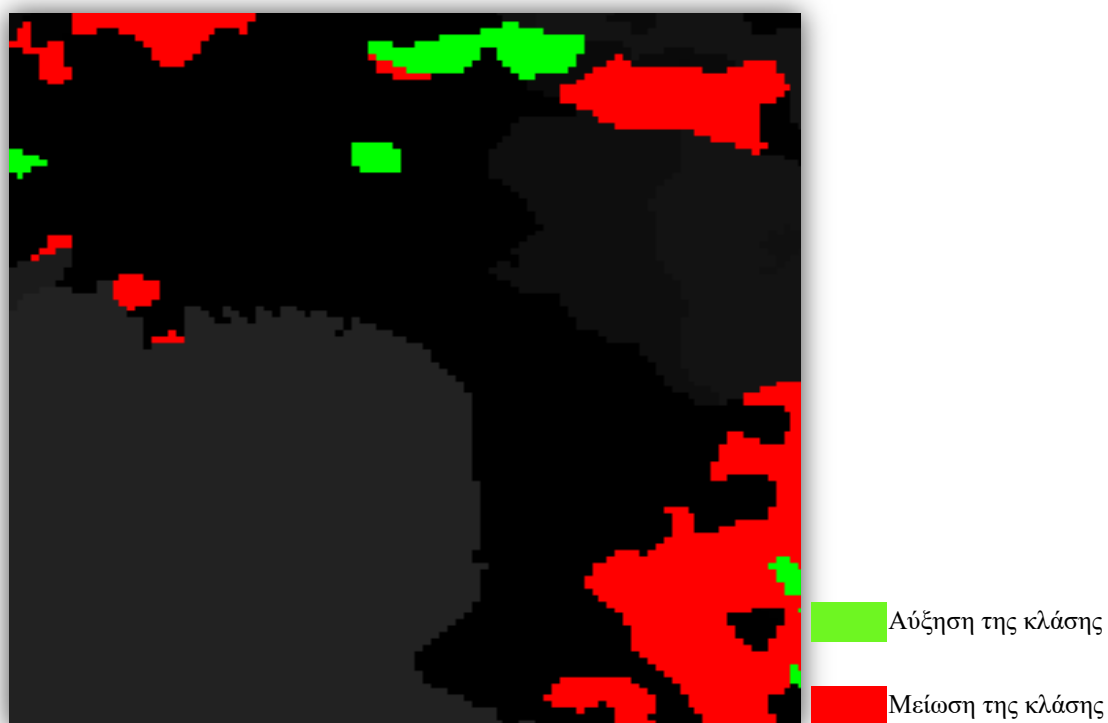
Με τον όρο χρήση γης (land use), γίνεται αναφορά στον τρόπο χρήσης της γης από τον άνθρωπο, συνήθως με έμφαση στο λειτουργικό ρόλο της γης στις οικονομικές δραστηριότητες (Campbell, 2002). Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι είναι περισσότερο μία αφηρημένη έννοια καθώς αρκετές φορές δεν είναι ξεκάθαρη η πραγματική χρήση ενός τμήματος γης και επιπλέον, σε μερικές περιοχές μεταβάλλεται η χρήση τους ανάλογα με την εποχή. Η κάλυψη γης (land cover) σε αντίθεση με τη χρήση γης, είναι άμεσα παρατηρήσιμη και αφορά στην κατηγοριοποίηση των διαφόρων φυσικών και ανθρωπογενών στοιχείων του εδάφους.

Η δυνατότητα καταγραφής του τύπου κάλυψης και των χρήσεων γης θα μπορούσε να δώσει μία ερμηνεία των τάσεων της LST που υπολογίσθηκαν, καθώς παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 8) αποτυπώνεται η κάλυψη γης για τη Θεσσαλονίκη το 2000 και το 2012 από δεδομένα που είναι διαθέσιμα μέσω του Corine Land Cover (CLC), το οποίο αφορά σε κάλυψη γης σε 44 τάξεις. Αυτό που παρατηρείται γενικά είναι ότι, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, κομμάτια ασυνεχούς αστικού ιστού έχουν μετατραπεί σε τμήματα συνεχή αστικού ιστού.

Οι δύο εικόνες για τη Θεσσαλονίκη του 2000 και του 2012 χρησιμοποιήθηκαν και με κατάλληλη επεξεργασία μέσω του λογισμικού Erdas Imagine 2014, δημιουργήθηκε μία εικόνα, στην οποία αποτυπώνονται οι έντονες μεταβολές στον τύπο κάλυψης γης, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του Corine Land Cover. Αν για παράδειγμα ο τύπος κάλυψης γης, ενός υπό μελέτη τμήματος, ανήκει στην κλάση 4 όπου αποτυπώνονται γενικά οι υδάτινες επιφάνειες, μεταβάλλεται και πλέον ανήκει στην κλάση 1 όπου εμπεριέχονται οι τεχνητές επιφάνειες, αυτό ερμηνεύεται ως σημαντική μείωση της κλάσης. Όταν αποτυπώνεται μεγάλη αύξηση ή μείωση της κλάσης, αυτό σημαίνει ότι αλλάζει σημαντικά ο συντελεστής εκπομπής, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους.

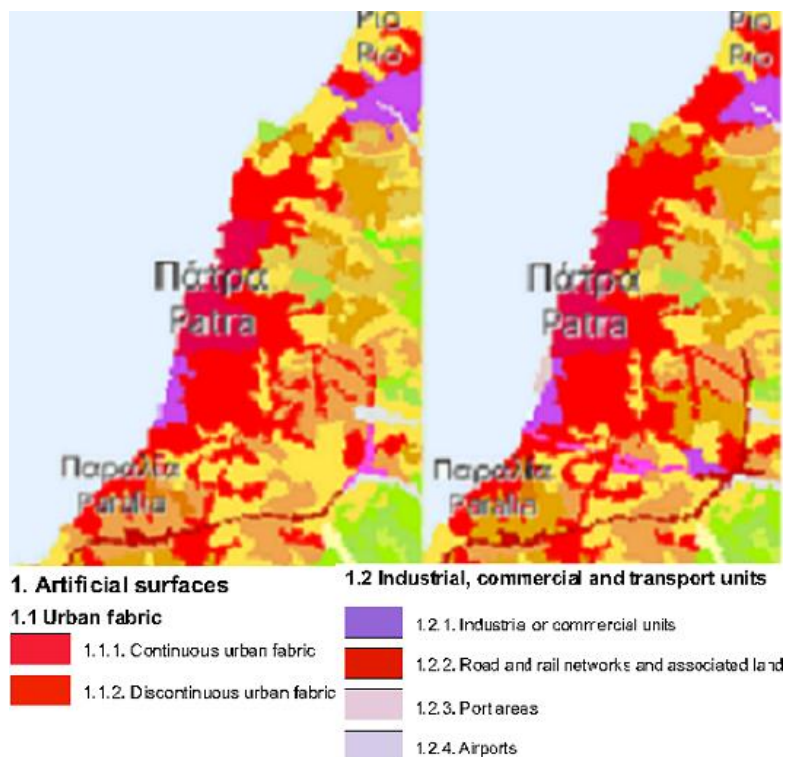


Εικόνα 8: χάρτης κάλυψης γης της Θεσσαλονίκης για το 2000 (αριστερά) και για το 2012 (δεξιά)

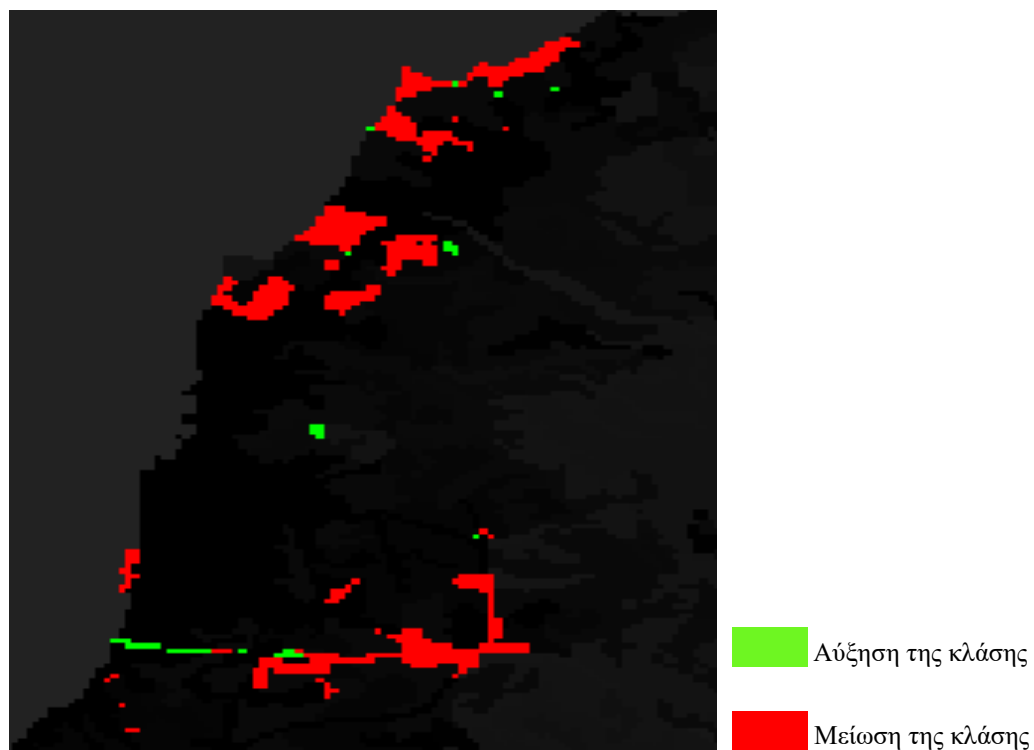


Εικόνα 9: Αποτύπωση των έντονων μεταβολών κλάσης για τη Θεσσαλονίκη, στο διάστημα 2000-2012

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες πόλεις που μελετήθηκαν. Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 10), φαίνεται η κάλυψη γης για την Πάτρα για τα έτη 2000 και 2012. Για την αστική περιοχή της Πάτρας δεν παρατηρείται κάποια μεταβολή όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 11, με τις μεταβολές στις κλάσεις.

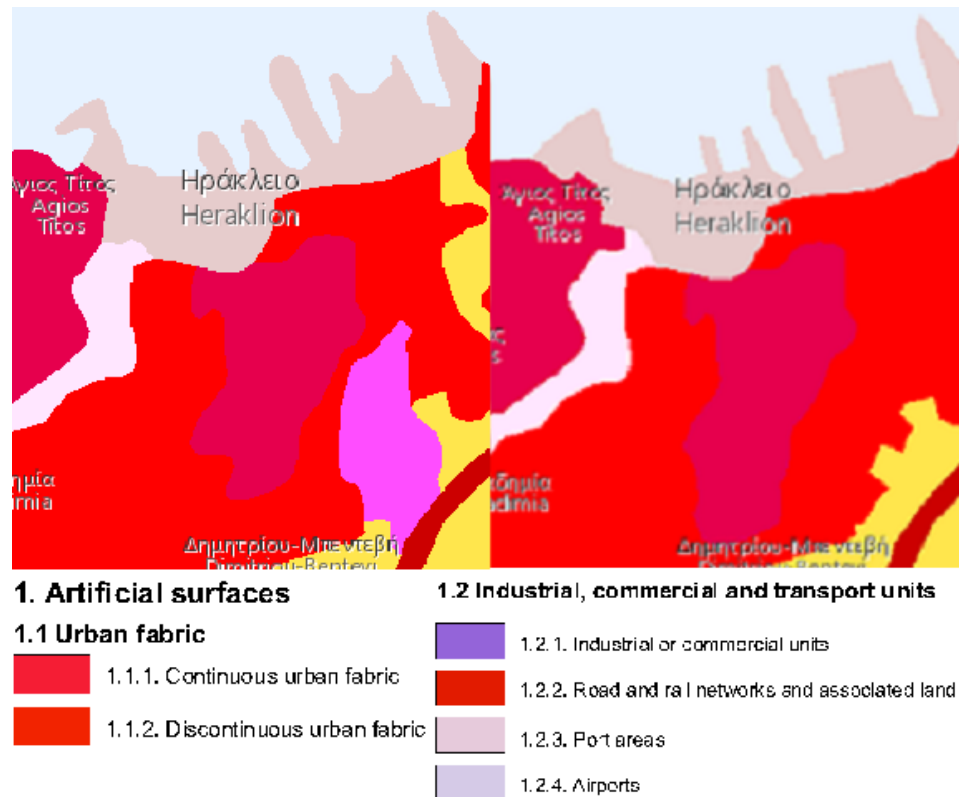


Εικόνα 10: Χάρτης κάλυψης γης της Πάτρας για το 2000 (αριστερά) και για το 2012 (δεξιά)

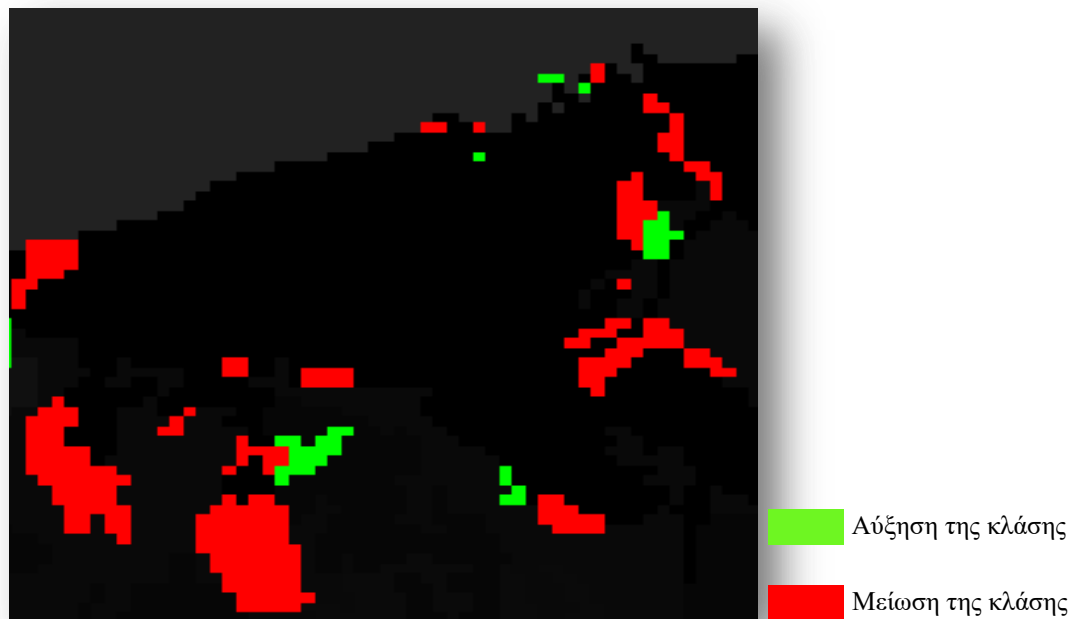


Εικόνα 11: Αποτύπωση των έντονων μεταβολών κλάσης για την Πάτρα, στο διάστημα 2000-2012

Για την αστική περιοχή του Ηρακλείου επίσης δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική μεταβολή στην κάλυψη γης για το χρονικό διάστημα 2000-2012 (Εικόνα 12). Παρατηρείται μία αύξηση στις περιοχές του λιμανιού και μία αύξηση του συνεχούς αστικού ιστού, αριστερά του λιμανιού, όπως αποδεικνύεται και στην Εικόνα 13 με τις ουσιαστικές μεταβολές στις κλάσεις γης .

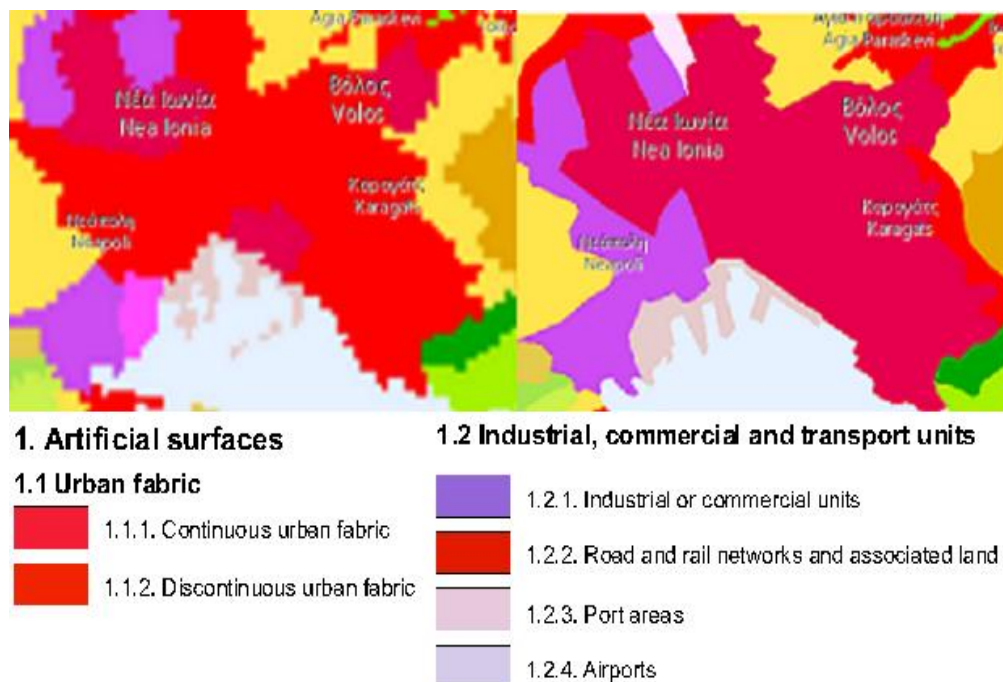


Εικόνα 12: Χάρτης κάλυψης γης του Ηρακλείου για το 2000 (αριστερά) και για το 2012 (δεξιά)

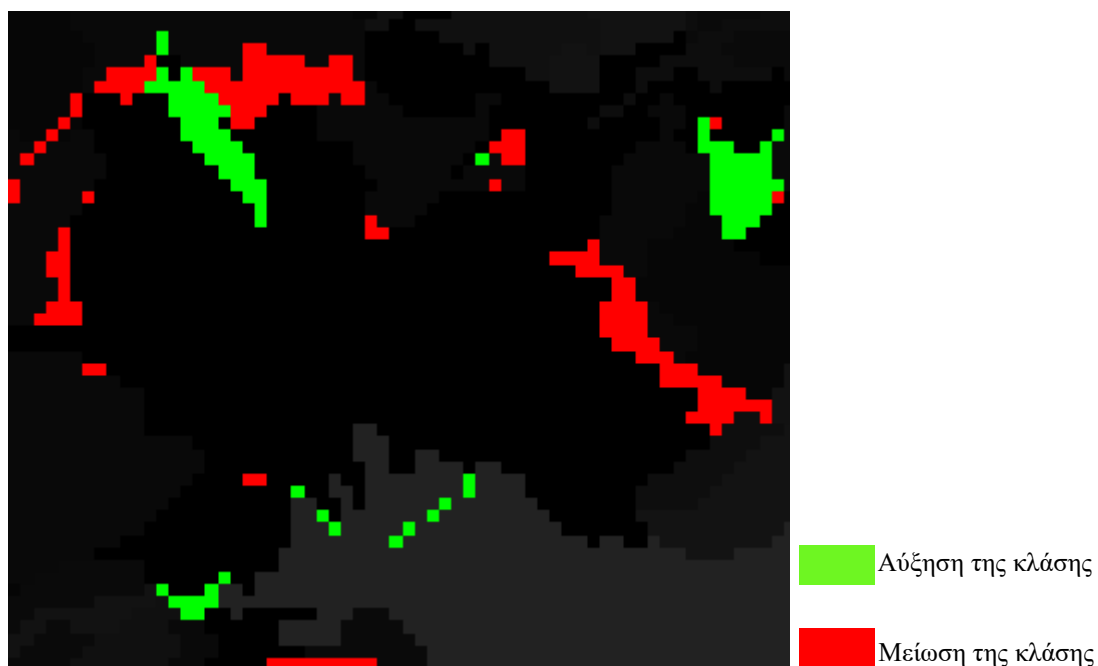


Εικόνα 13: Αποτύπωση των έντονων μεταβολών κλάσης για το Ηράκλειο, στο διάστημα 2000-2012

Τέλος για την περιοχή του Βόλου, από την εικόνα που αφορά στην κάλυψη γης για τα έτη 2000 και 2012 (Εικόνα 14), παρατηρείται μεταβολή στα τμήματα του λιμανιού, αύξηση των βιομηχανικών και εμπορικών μονάδων γύρω από το λιμάνι και μεταβολή του ασυνεχούς αστικού ιστού σε συνεχή στην αστική περιοχή του Βόλου. Στην Εικόνα 15, παρατηρείται εμφανώς η αύξηση και η μείωση της κλάσης.



Εικόνα 14: Χάρτης κάλυψης γης του Βόλου για το 2000 (αριστερά) και για το 2012 (δεξιά)



Εικόνα 15: Αποτύπωση των έντονων μεταβολών κλάσης για τον Βόλο, στο διάστημα 2000-2012

B.2 Δορυφορικά Δεδομένα

B.2.1 Διαδικασία Ανάκτησης Δεδομένων

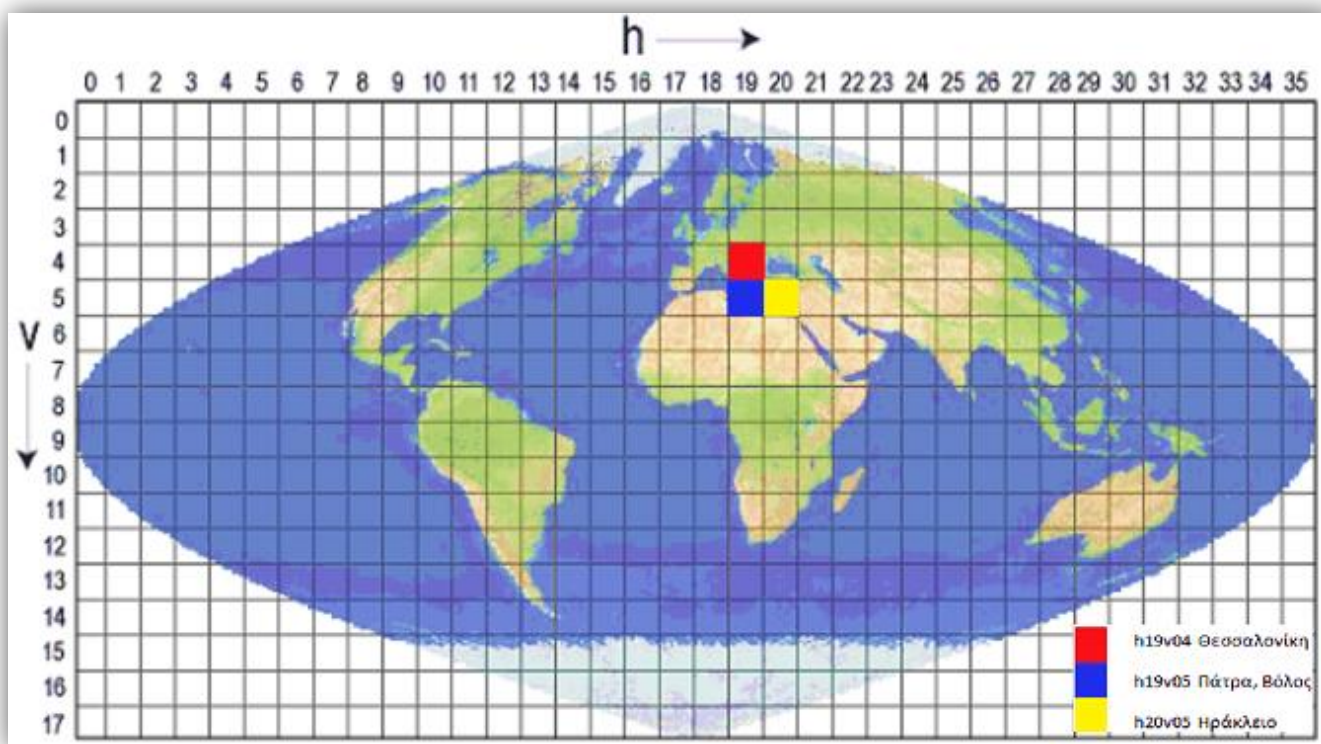
Τα δεδομένα που ήταν απαραίτητα στην παρούσα διπλωματική εργασία, για τη δημιουργία χρονοσειράς 15 ετίας, ανακτήθηκαν από τον ιστότοπο της NASA και από προϊόντα MODIS 8 ημερών του δορυφόρου Terra. Πιο συγκεκριμένα από τα προϊόντα εδάφους που διαθέτει το MODIS, χρησιμοποιήθηκε το MOD11A2 που ανήκει στην κατηγορία “Επιφανειακή Θερμοκρασία Εδάφους και Συντελεστής Εκπομπής Οκταήμερο Επίπεδο 3 Παγκόσμιο 1km” (“ Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day L3 Global 1km”) και εκτιμάται στις ζώνες 31, 32. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από το καθημερινό προϊόν LST 1km (MOD11A1) και αποθηκεύονται σε ένα πλέγμα Sinusoidal Grid, ως ο μέσος όρος των τιμών της LST κατά τη διάρκεια των 8 ημερών.

Πίνακας 4 : Συνοπτικός πίνακας των δεδομένων του προϊόντος MODIS LST, MOD11A2

Earth Science Data Type (ESDT)	Product Level	Nominal Data Array Dimensions	Spatial Resolution	Temporal Resolution	Map Projection
MOD11A2	L3	1200 rows by 1200 columns	1km (actual 0.928km)	eight days	Sinusoidal

Τα προϊόντα εδάφους MODIS παράγονται σε 4 χωρικές αναλύσεις (250m, 500m, 1km και 0,05 degree) και υπάρχει επιλογή ανάμεσα σε 3 τύπους προβολής (Sinusoidal, Lambert Azimuthal Equal-Area, and Geographic). Ουσιαστικά, η κάθε προβολή αναφέρεται σε διαφορετικό τρόπο διαίρεσης της γης όχι σε συντεταγμένες αλλά σε tiles. Τα περισσότερα όμως από τα υψηλής ανάλυσης προϊόντα εδάφους MODIS παράγονται σε Sinusoidal Tile Grid, εκτός από τα

προϊόντα Sea Ice. Στο σύστημα αυτό, η επιφάνεια της γης διαιρείται σε ένα πλέγμα με τετράγωνα διάστασης 10° μοιρών (tiles). Το σύστημα συντεταγμένων tile ξεκινάει στο (0,0) (οριζόντιος αριθμός tile, κάθετος αριθμός tile) στην επάνω αριστερή γωνία και συνεχίζει δεξιά (οριζόντια) και προς τα κάτω (κάθετα), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 17), όπου αποτυπώνονται και οι περιοχές μελέτης ανάλογα με το tile που ανήκουν.



Εικόνα 17: Sinusodial Tile Grid-Διαίρεση γήινης επιφάνειας σε tiles, με σημειωμένα τα tiles των περιοχών μελέτης

Τα δεδομένα MODIS αρχειοθετούνται σε Hierarchical Data Format - Earth Observing System (HDF-EOS) φακέλους και είναι διαθέσιμα σε ψηφιακή μορφή HDF, λόγω της ανάγκης για αποθήκευση και οργάνωση μεγάλου όγκου δεδομένων, αρχείων και βιβλιοθηκών. Το φορμά αυτό υποστηρίζεται από πολλές πλατφόρμες λογισμικών όπως το Matlab, το JAVA αλλά στη συγκεκριμένη εργασία η επεξεργασία έγινε μέσω του ERDAS IMAGINE 2014.

Τα δεδομένα MODIS διατίθενται ελεύθερα για τους χρήστες. Η συλλογή των δεδομένων έγινε από το διαδικτυακό τόπο <https://lpdaac.usgs.gov/>, μέσω της διαδρομής Tools → Data Access → Data Pool → LPDAAC2Disk Download Manager → Login with URS. Έπειτα, γίνεται επιλογή του προϊόντος MODIS, της περιοχής μελέτης μέσω της κατασκευής ενός ορθογωνίου πάνω στον παγκόσμιο χάρτη από εικόνες του TerraMetrics, της επιθυμητής χρονικής περιόδου και τέλος επιλογή του τύπου των αρχείων, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 18). Τέλος, με την επιλογή Submit αρχίζει η λήψη των δεδομένων. Οι επιλογές για τον τύπο του αρχείου αναφέρονται σε :

- Science, αποθηκεύει αρχεία τύπου .hdf
- Metadata, αποθηκεύει αρχεία τύπου .hdf.xml
- Browse, αποθηκεύει αρχεία τύπου .jpg

The screenshot displays the LPDAAC2Disk Download Manager interface. On the left, a map of Crete, Greece, is shown with a red rectangular selection box over the island. The right panel contains search parameters: Archive Center (LPDAAC), Shortname (MOD11A2), Version (005), Begin Date (2001-01-01), End Date (2015-12-31), and checkboxes for Science (checked), Metadata, Browse, and QA. There are 'Reset' and 'Submit' buttons at the bottom.

Εικόνα 18: Διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη συλλογή δεδομένων

Το αρχείο HDF που θα κατέβει, θα έχει την εξής κωδικοποίηση,

MOD11A2.A2010153.h20v05.005.2010164120728.hdf που αντιστοιχεί σε:

- MOD11A2, ονομασία προϊόντος
- A2010153, ιουλιανή ημερομηνία που ερμηνεύεται ως 2010-153 όπου το πρώτο μέρος αναφέρεται στο έτος (2010) και το δεύτερο στον αριθμό των ημερών (153^η ημέρα δηλαδή 2 Ιουνίου)
- h20v05, το tile που ανήκει το αρχείο
- 005, έκδοση του αρχείου
- 2010164120728, ιουλιανή ημερομηνία παραγωγής δηλαδή 13/06/2010 και ώρα 12:07:28
- HDF, τύπος αρχείου

B.2.2 Μετατροπή των τιμών των pixels σε LST

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν σε μορφή HDF, δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμα. Επίσης, τα αρχεία αυτά εμπεριέχουν παγκόσμια χαρακτηριστικά, μεταδεδομένα (metadata) και σύνολα επιστημονικών δεδομένων (Scientific Data Sets-SDSs) (Πίνακας 5).

Πίνακας 5 : Scientific Data Sets του προϊόντος MOD11A2

SDS Name	Long Name	Number Type	Unit	Valid Range	Fill Value	scale factor	add offset
LST_Day_1km	Daily daytime 1km grid Land-surface Temperature	uint16	K	7500-65535	0	0.02	0.0
QC_Day	Quality control for daytime LST and emissivity	uint8	none	0-255	0	NA	NA
Day_view_time	(local solar) Time of daytime Land-surface Temperature observation	uint8	hrs	0-240	0	0.1	0
Day_view_angle	View zenith angle of daytime Land-surface Temperature	uint8	deg	0-130	255	1.0	-65.0
LST_Night_1km	Daily nighttime 1km grid Land-surface Temperature	uint16	K	7500-65535	0	0.02	0.0
QC_Night	Quality control for nighttime LST and emissivity	uint8	none	0-255	0	NA	NA
Night_view_time	(local solar) Time of nighttime Land-surface Temperature observation	uint8	hrs	0-240	0	0.1	0
Night_view_angle	View zenith angle of nighttime Land-surface Temperature	uint8	deg	0-130	255	1.0	-65.0
Emis_31	Band 31 emissivity	uint8	none	1-255	0	0.002	0.49
Emis_32	Band 32 emissivity	uint8	none	1-255	0	0.002	0.49
Clear_day_cov	day clear-sky coverage	uint16	none	0-65535	0	0.0005	0.
Clear_night_cov	night clear-sky coverage	uint16	none	0-65535	0	0.0005	0.

**Πίνακας 6 : Καταχώρηση παγκόσμιων ιδιοτήτων StructMetadata.0
του MOD11A2**

Object	Definition
DIMENSION_1	XDim = 1200
DIMENSION_2	YDim = 1200
DataField_1	DataFieldName=LST_Day_1km
DataField_2	DataFieldName=QC_Day
DataField_3	DataFieldName=Day_view_time
DataField_4	DataFieldName=Day_view_angle
DataField_5	DataFieldName=LST_Night_1km
DataField_6	DataFieldName=QC_Night
DataField_7	DataFieldName=Night_view_time
DataField_8	DataFieldName=Night_view_angle
DataField_9	DataFieldName=Emis_31
DataField_10	DataFieldName=Emis_32
DataField_11	DataFieldName=Clear_day_cov
DataField_12	DataFieldName=Clear_night_cov

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων στο Erdas Imagine 2014, έγινε μετατροπή των HDF σε αρχεία τύπου εικόνας, .img και προσδιορίστηκαν οι περιοχές μελέτης με περικοπή της εικόνας. Στη συνέχεια, ακολουθήθηκε μια διαδικασία για τη μετατροπή των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων σε τιμές επιφανειακών θερμοκρασιών εδάφους και το αρχικό φορμά HDF μετατράπηκε σε GeoTIF. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκαν οι τελεστές ‘scale factor’ και ‘add_offset’ ώστε να μετατραπούν οι ακέραιες ψηφιακές τιμές κάθε εικονοστοιχείου, κάθε tile σε αντίστοιχη τιμή γεωφυσικής παραμέτρου. Έτσι, για την εξαγωγή των τιμών της LST, επιλέχθηκε το πεδίο δεδομένων 1 (Data Field), το κάθε αρχείο πολλαπλασιάστηκε με τον παράγοντα (scale factor) 0.02 όπως απαιτείται από τις οδηγίες χρήσης του προϊόντος και το add_offset έχει πάντα την τιμή 0. Ενδεικτικά, η μετατροπή που πραγματοποιήθηκε (descaling) ακολουθεί την παρακάτω σχέση:

$$LST = (\text{scale factor}) * [(\text{stored value}) - (\text{add offset})] \quad (1)$$

Η μονάδα μέτρησης των τιμών της LST, δίνεται από τον τελεστή unit και είναι οι βαθμοί Kelvin (K) όπως και στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (Système International, SI).

B.2.3 Αξιολόγηση Δεδομένων

Σημαντικός παράγοντας για την αξιοποίηση των δεδομένων είναι η διασφάλιση ως προς την ποιότητα τους. Η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για ένα συγκεκριμένο σκοπό και σε ποιο βαθμό εξυπηρετούν αυτό τον σκοπό. Η χρησιμότητα και η χρηστικότητα τους μπορούν να ελεγχθούν μέσω των μεταδεδομένων των HDF και μπορεί να αναφέρεται ως ‘Quality_ Assurance’ ή πιο περιγραφικά ως ‘Cloud_ Mask’ και βρίσκονται στο data set που ονομάζεται Quality Control (QC). Η πιο βασική πηγή σφαλμάτων που επιδρά στην ποιότητα των δεδομένων είναι η νεφοκάλυψη και μπορεί να εκτιμηθεί από αλγόριθμους ανίχνευσης εικονοστοιχείων που είτε καλύπτονται πλήρως είτε μερικώς από νέφη.

Ο αλγόριθμος αυτός καθορίζει αν ένα εικονοστοιχείο είναι καθαρό ή όχι αλλά και πόσο το καλύπτει η νέφωση, καθώς, αυτό είναι πιθανό να διαφέρει. Το αποτέλεσμα προσδιορίζεται από τα δύο πρώτα bits των 48 bits για κάθε εικονοστοιχείο και έτσι δίνεται η πληροφορία για την νεφοκάλυψη όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 7). Στην παρούσα εργασία έγινε επιλογή των pixels με QA ‘00’ στα οποία η τιμή της LST είναι καλή ποιοτικά και δε χρειάζεται να ελεγχθεί περαιτέρω και τα pixels με QA ‘01’ στα οποία η ποιότητα της LST είναι αναγκαίο να εξεταστεί .

Πίνακας 7: Εικονοστοιχείο-Επίπεδο QA σε όλα τα προϊόντα εδάφους MODIS

bits	Long Name	Key
1 & 0	Mandatory QA flags	00=LST produced, good quality, not necessary to examine more detailed QA 01=LST produced, other quality, recommend examination of more detailed QA 10=LST not produced due to cloud effects 11=LST not produced primarily due to reasons other than cloud
3 & 2	Data quality flag	00=good data quality 01=other quality data 10=TBD 11=TBD
5 & 4	Emis Error flag	00=average emissivity error ≤ 0.01 01=average emissivity error ≤ 0.02 10=average emissivity error ≤ 0.04 11=average emissivity error > 0.04
7 & 6	LST LST Error flag	00=average LST error $\leq 1K$ 01=average LST error $\leq 2K$ 10=average LST error $\leq 3K$ 11=average LST error $> 3K$

Η εκτίμηση των δεδομένων ολοκληρώθηκε με την εξαγωγή των Clear sky days και Clear sky nights, όπου και προσδιορίζεται η νεφοκάλυψη για την LST ημέρας και νύχτας, ανάλογα με την τιμή του εικονοστοιχείου, 1 για καθαρό ουρανό ή αντίθετα 0. Σε αυτό το σημείο τέθηκε ένα όριο τουλάχιστον 6 παρατηρήσεων με καθαρό ουρανό, το μήνα, ώστε να εξασφαλίζεται ότι θα υπάρχει ένας ικανοποιητικός αριθμός δεδομένων που θα οδηγεί σε αξιόπιστο αποτέλεσμα κατά την εξαγωγή της μέσης μηνιαίας LST.

Γ. Στατιστική Επεξεργασία Χρονοσειράς

Γ.1 Υπολογισμός Μέσων Μηνιαίων Τιμών LST

Λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων, οι τιμές της LST ομαδοποιήθηκαν ανά μήνα ώστε να είναι ευκολότερος ο υπολογισμός των μέσων μηνιαίων τιμών και να διευκολυνθεί γενικότερα, η στατιστική ανάλυση. Η μέση τιμή της LST, δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

όπου w_i : ο συντελεστής βαρύτητας του στοιχείου x_i .

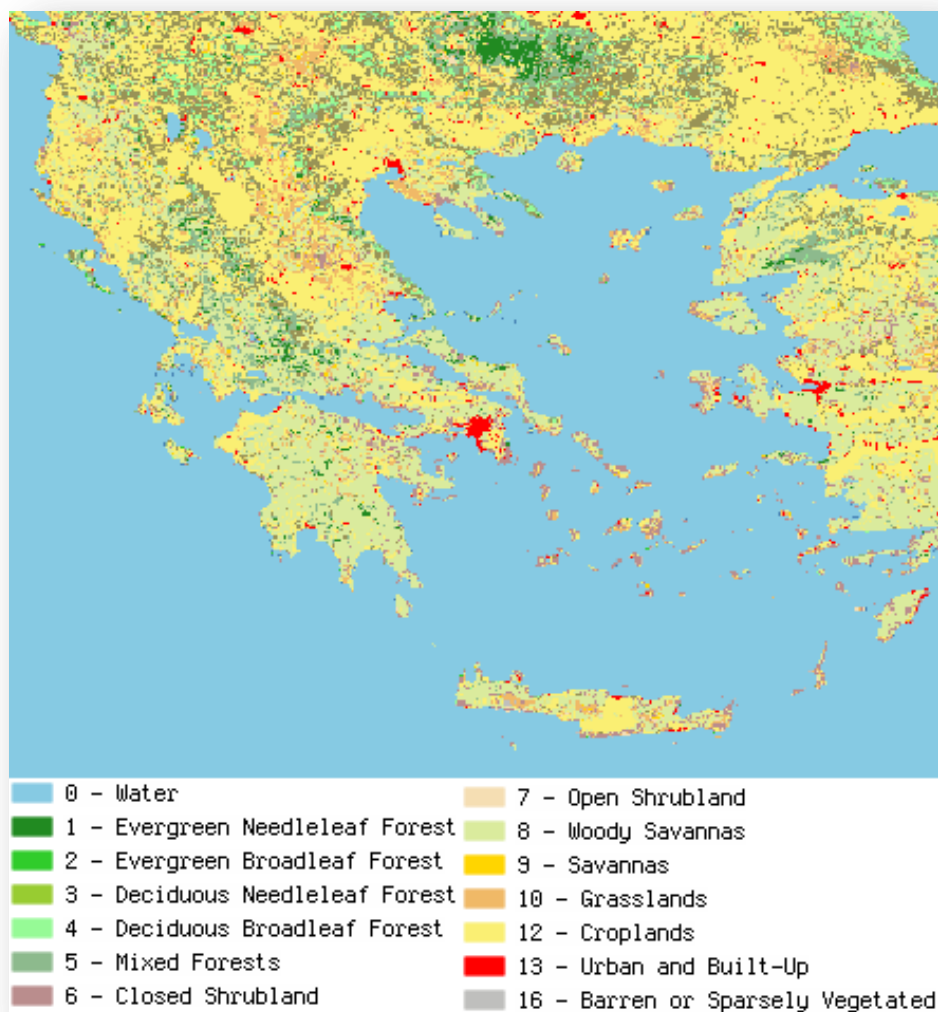
Είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι ο συντελεστής βαρύτητας μπορεί να λάβει την τιμή 0 ή 1 ανάλογα με την κάλυψη του εικονοστοιχείου από νέφη και έχει γίνει αναφορά στη διαδικασία υπολογισμού του (B.2.2 § 2). Συνεπώς αθροίζοντας το γινόμενο των τιμών της LST σε κάθε εικονοστοιχείο με τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας και διαιρώντας το με το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας υπολογίστηκε η μέση μηνιαία τιμή της LST. Συνολικά υπολογίστηκαν μέσοι όροι για 180 μήνες τόσο για ημερήσιες όσο και για νυχτερινές λήψεις για κάθε πόλη ξεχωριστά. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τη δημιουργία ειδικών μοντέλων μέσω της δυνατότητας Model Maker του λογισμικού Erdas Imagine 2014.

Γ.2 Προσδιορισμός Αστικών Περιοχών

Στην παρούσα εργασία, η μελέτη επικεντρώνεται στον προσδιορισμό των μακροχρόνιων τάσεων της LST των αστικών περιοχών της Θεσσαλονίκης, της Πάτρας, του Βόλου και του Ηρακλείου. Λόγω αυτού είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός αυτών των περιοχών και για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος σκοπός χρησιμοποιήθηκε το προϊόν MCD12Q1 (MODIS Land Cover Type Product).

Η μάσκα για τις αστικές περιοχές (urban mask), παράγεται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο επιβλεπόμενης ταξινόμησης, που εκτιμάται, χρησιμοποιώντας μία βάση δεδομένων κάλυψης γης, υψηλής ανάλυσης. Χρησιμοποιεί φασματικές και χρονικές πληροφορίες που προέρχονται από το MODIS. Το MCD12Q1 τροφοδοτεί σε ετήσια βάση από το 2001, με παγκόσμιους χάρτες κάλυψης γης, χωρικής ανάλυσης 500m. Το πρωταρχικό σύστημα κάλυψης γης παρέχεται από μία ταξινόμηση IGBP (International Geosphere Biosphere Programme Data) σε 17 κλάσεις κάλυψης γης (Belward et al., 1999; Scean, 1999; Friedl et al., 2002; Friedl et al., 2010), όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 19.

Το MCD12Q1 παρέχεται δωρεάν από τον ιστότοπο της NASA και χρησιμοποιήθηκε για περιοχές που το 2001 ήταν αστικές και παρέμειναν μέχρι το 2015. Διαφορετικό προϊόν εφαρμόστηκε σε κάθε πόλη ξεχωριστά, ανάλογα με το tile που ανήκουν και άλλο για το έτος 2001 και 2015, καθώς μπορεί να υπάρχουν αλλαγές στην κάλυψη γης.



Εικόνα 19: Δορυφορικός χάρτης κάλυψης γης για την Ελλάδα

Τα όρια των αστικών περιοχών που μελετήθηκαν, προσδιορίστηκαν μέσω του λογισμικού QGIS. Με αυτό τον τρόπο περιορίστηκαν τα εικονοστοιχεία του αρχείου μόνο σε αυτά που κάλυπταν τις περιοχές μελέτης και έτσι υπολογίστηκαν οι τιμές των ποσοστιαίων μακροχρόνιων τάσεων των αστικών περιοχών.

Γ.3 Μέθοδος Γραμμικής Παλινδρόμησης

Σε αυτό το σημείο της εργασίας χρειάστηκε να μελετηθεί η σχέση δύο ή περισσότερων τυχαίων μεταβλητών ώστε τελικά να υπολογιστεί η μακροχρόνια τάση της LST. Ουσιαστικά η τάση (trend) που θα υπολογιστεί, φανερώνει την αύξηση ή τη μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους κατά τη διάρκεια 2001-2015. Για να πραγματοποιηθεί αυτό είναι αναγκαία η κατασκευή μιας μαθηματικής εξίσωσης (μοντέλου) που να περιγράφει τη σχέση μεταξύ των υπό μελέτη μεταβλητών. Συνεπώς είναι αναγκαίο, να γίνει εκτίμηση της μεταβολής μιας τυχαίας μεταβλητής Y σε σχέση με μια ή περισσότερες μεταβλητές X_1, X_2, \dots, X_n . Αν το μοντέλο που εξετάζουμε είναι τέτοιας μορφής που η τυχαία μεταβλητή Y είναι γραμμική συνάρτηση των παραμέτρων του μοντέλου τότε μιλάμε για ένα γραμμικό μοντέλο (linear model). Η απλούστερη μορφή τέτοιας σχέσης είναι:

$$Y = \alpha + \beta X \quad (3)$$

όπου α και β είναι σταθερές.

Η μεταβλητή X λέγεται ανεξάρτητη μεταβλητή (independent variable) ενώ η τυχαία μεταβλητή Y λέγεται εξαρτημένη (dependent variable). Το πρόβλημα συνίσταται στον προσδιορισμό της ευθείας παλινδρόμησης (regression line). Στην περίπτωση που η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι μία, το μοντέλο αναφέρεται ως μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης (simple linear regression model). Ακόμη είναι αναγκαίο να τονισθεί ότι με το όρο 'γραμμικό' χαρακτηρίζονται οι παράμετροι και όχι οι μεταβλητές. Η γραμμική σχέση (3) μπορεί να πάρει την παρακάτω στοχαστική μορφή:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

όπου το ε_i αντιπροσωπεύει ένα τυχαίο λάθος.

Σκοπός είναι ο ακριβέστερος υπολογισμός των σταθερών α και β για να υπάρχει καλύτερη συσχέτιση των υπό μελέτη μεταβλητών. Μία από τις μεθόδους

εκτίμησης των α, β είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Ε.Τ.) ή μέθοδος του Gauss (least-squares method). Δοθέντων των τιμών $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ενός τυχαίου δείγματος $(x_1, Y_1), (x_2, Y_2), \dots, (x_n, Y_n)$, η σχέση (4) γίνεται ως εξής:

$$\varepsilon_i = y_i - (\alpha + \beta x_i) \quad (5)$$

όπου ε_i είναι η τιμή του "σφάλματος" ε για το ζεύγος τιμών (x_i, y_i) , για

$i = 1, 2, \dots, n$.

Βέβαια, λόγω του ότι οι τιμές των α, β δε μπορεί να παρατηρηθούν, δεν είναι δυνατή και η γνώση των τιμών του ε_i . Αν όμως συμβολίσουμε με a, b τις εκτιμήσεις των άγνωστων παραμέτρων α, β , τότε οι παρατηρούμενες τιμές ε_i των ε_i θα δίνονται από τον τύπο:

$$e_i = y_i - (a + bx_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Ένα κριτήριο ικανοποιητικής προσέγγισης (εκτίμησης) είναι δυνατόν να στηριχθεί στην ελαχιστοποίηση μιας κατάλληλα επιλεγμένης συνάρτησης της απόκλισης αυτού που παρατηρείται (y_i) από αυτό που εκτιμάται ότι πρέπει να παρατηρηθεί ($a + bx_i$). Όταν ως τέτοια συνάρτηση θεωρηθεί η μέση τετραγωνική απόκλιση του y_i από το $a + bx_i$, η επιλογή των τιμών a και b πρέπει να εξασφαλίζει ελάχιστη τιμή της επόμενης παράστασης:

$$\frac{\sum_{i=1}^n e^2}{n} = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (7)$$

όπου $\sum e^2$: το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων (Sum of Squares of Errors, SSE).

Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται τότε και μόνο τότε εάν ικανοποιείται το παρακάτω σύστημα εξισώσεων :

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial b} = 0 \quad (9)$$

$$\text{όπου } P = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2$$

Επειδή η παραπάνω μέθοδος στηρίζεται στην ελαχιστοποίηση της παράστασης P, ονομάζεται μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (method of least -squares). Οι εξισώσεις τότε γράφονται κανονικά:

$$\bar{y} = a + b\bar{x} \quad (10)$$

$$\text{και επομένως } a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (11)$$

όπου

$$b = \frac{n \sum y_i x_i - \sum y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (12)$$

Στην προκειμένη περίπτωση, η εξαρτημένη μεταβλητή y είναι η LST και η ανεξάρτητη μεταβλητή x είναι ο χρόνος t, που αντιστοιχεί στο έτος. Έτσι, η εξίσωση για τη συγκεκριμένη εργασία παίρνει τη μορφή:

$$LST(t) = at + b \quad (13)$$

η εξίσωση της ευθείας παλινδρόμησης είναι απαραίτητη για την εύρεση της τάσης και οι σταθερές a, b είναι αυτές που έχουν προσδιοριστεί από τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης (Εξισώσεις (11),(12)).

Για να μελετηθεί το ποσοστό επί τοις εκατό της τάσης, ώστε να εκτιμηθεί αν η LST αυξήθηκε ή μειώθηκε, μέσα στη δεκαπενταετία και σε τι βαθμό, χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$LSTtrend(\%) = \frac{LST(2015) - LST(2001)}{LST(2001)} \quad (14)$$

Η διαδικασία εύρεσης της μακροχρόνιας τάσης, όπως και των σταθερών a,b, πραγματοποιήθηκε μέσω ειδικών μοντέλων που δημιουργήθηκαν στο Erdas Imagine 2014. Εκτιμήθηκε η τάση επί τοις εκατό σε κάθε εικονοστοιχείο που αντιστοιχεί σε επιφάνεια $1\text{km} \times 1\text{km}$, για κάθε μήνα ξεχωριστά, για κάθε πόλη και αποτυπώθηκε τόσο σε διαγράμματα, όσο και σε θεματικούς χάρτες (Κεφάλαιο Δ).

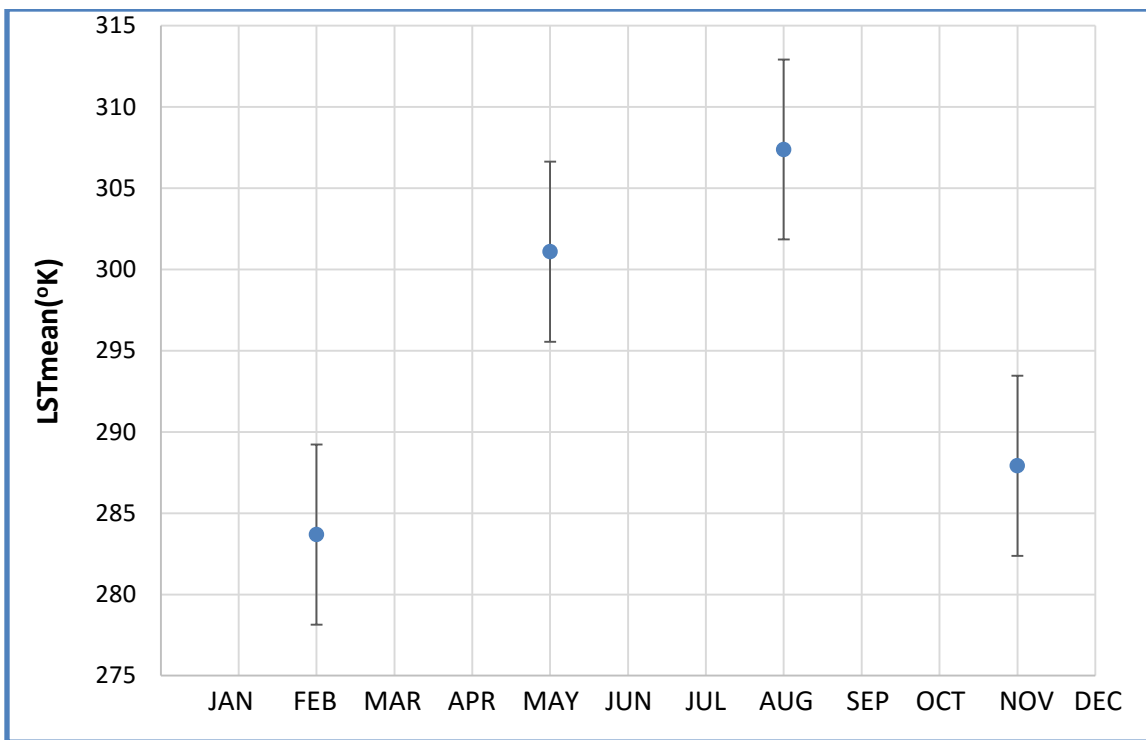
Δ. Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων για κάθε πόλη ξεχωριστά τόσο για τον υπολογισμό της LST όσο και την εκτίμηση και αποτύπωση της μακροχρόνιας τάσης (trend). Αρχικά παρουσιάζονται οι τιμές της LST για τέσσερις μήνες, όπου κάθε μήνας είναι χαρακτηριστικός για κάθε εποχή του έτους και έπειτα, παρατίθενται σε πίνακες οι τιμές των ποσοστιαίων τάσεων, η αποτύπωσή τους σε χάρτες και σε διαγράμματα με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση. Η τυπική απόκλιση είναι ένα καλός δείκτης ακρίβειας φανερώνει πόσο αντιπροσωπευτικές είναι υπολογισθείσες τιμές και ποιο είναι το εύρος τιμών γύρω από τη μέση τιμή.

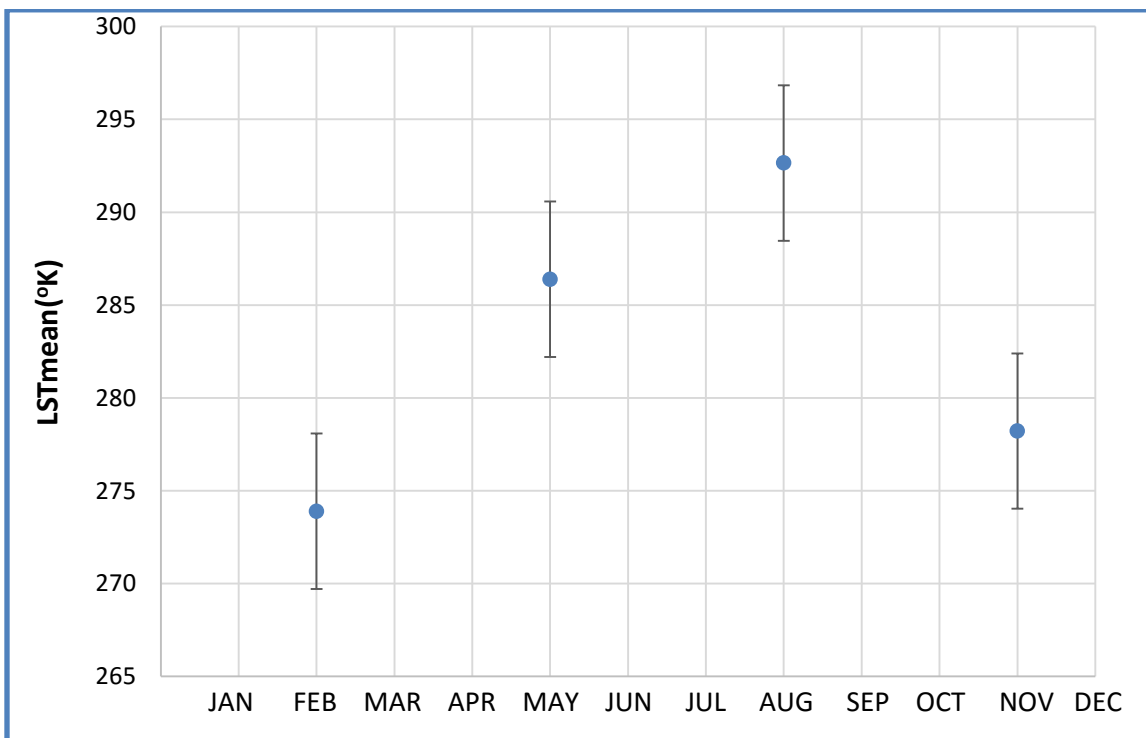
Δ.1 Θεσσαλονίκη

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους για την αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, για τους μήνες Φεβρουάριο, Μάιο, Αύγουστο και Νοέμβριο ώστε να αποτυπωθεί και η εποχιακή διακύμανση της παραμέτρου.

Στα διαγράμματα της LST (Γράφημα 1,2), είναι εμφανές ότι η μέγιστη επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους για την αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, παρατηρείται τον μήνα Αύγουστο και για την ημέρα και για τη νύχτα, στους 307,383 K (34,4°C) και στους 292,648 K (20°C) αντίστοιχα. Ενώ, η ελάχιστη LST παρατηρείται τον Φεβρουάριο στους



Γράφημα 1: Αποτύπωση LST MODIS Terra Day



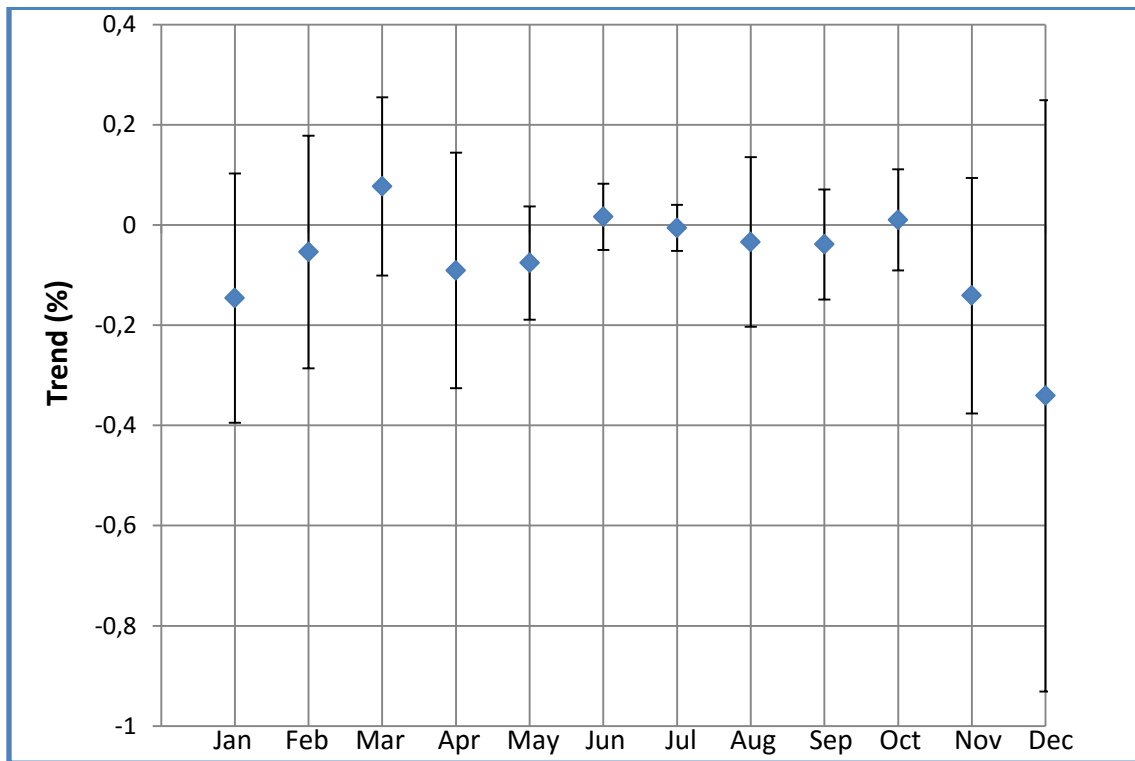
Γράφημα 2: Αποτύπωση LST MODIS Terra Night

Στον πίνακα 8 που ακολουθεί, αποτυπώνεται η μέση τιμή της τάσης επί τοις εκατό μαζί με την τυπική απόκλιση για κάθε μήνα, για την αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

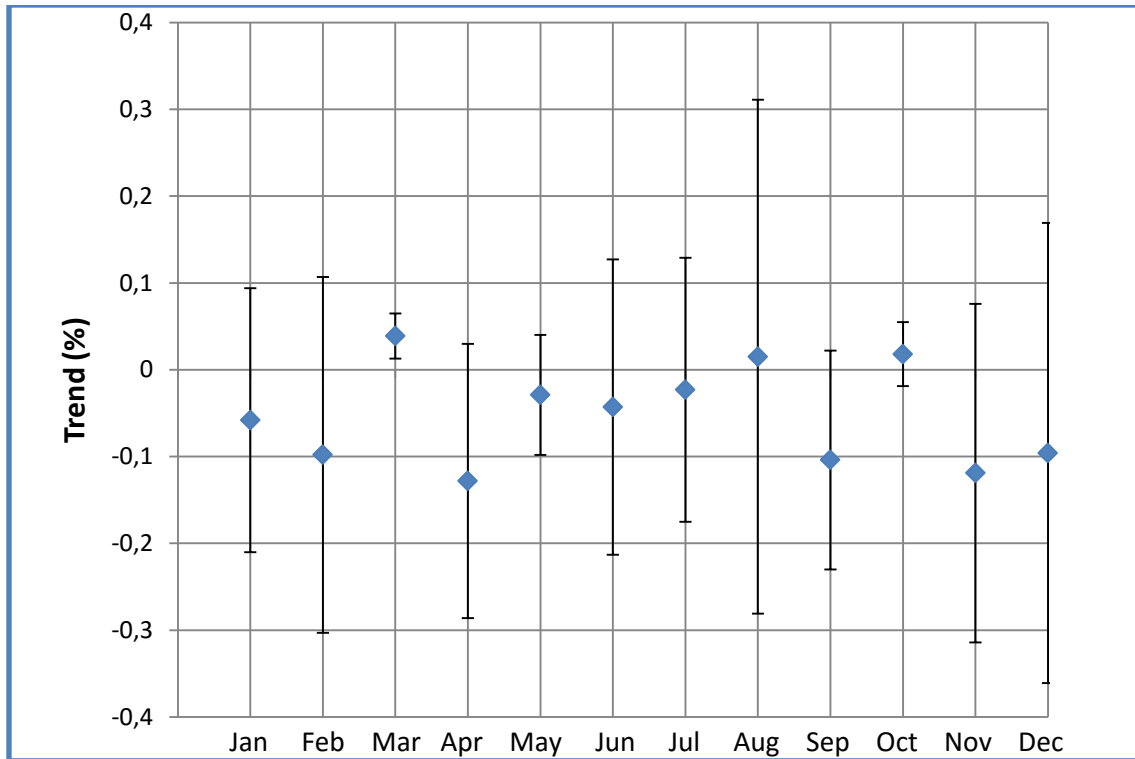
Πίνακας 8: Αποτύπωση ποσοστιαίων μακροχρόνιων τάσεων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση) του αστικού ιστού της Θεσσαλονίκης

Θεσσαλονίκη		
	MODIS Terra Trend % _ Day	MODIS Terra Trend %_Night
	Mean±StdDev	Mean±StdDev
Jan	-0,146±0,249	-0,058±0,152
Feb	-0,054±0,232	-0,098±0,205
Mar	0,077±0,178	0,039±0,026
Apr	-0,091±0,235	-0,128±0,158
May	-0,076±0,113	-0,029±0,069
Jun	0,016±0,066	-0,043±0,170
Jul	-0,006±0,046	-0,023±0,152
Aug	-0,034±0,169	0,015±0,296
Sep	-0,039±0,110	-0,104±0,126
Oct	0,010±0,101	0,018±0,037
Nov	-0,141±0,235	-0,119±0,195
Dec	-0,341±5,965	-0,096±0,265

Εύκολα γίνεται αντιληπτό και από τα παρακάτω γραφήματα (Γράφημα 3,4), ότι οι τιμές των ποσοστιαίων τάσεων κυμαίνονται γύρω από το μηδέν, με ελάχιστες ακραίες παρατηρήσεις όπως για τον μήνα Δεκέμβριο κατά τη διάρκεια της ημέρας, που όμως χαρακτηρίζεται από μεγάλη τυπική απόκλιση. Σε γενικές γραμμές, οι τάσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές και δεν παρατηρείται να ακολουθούν κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο.



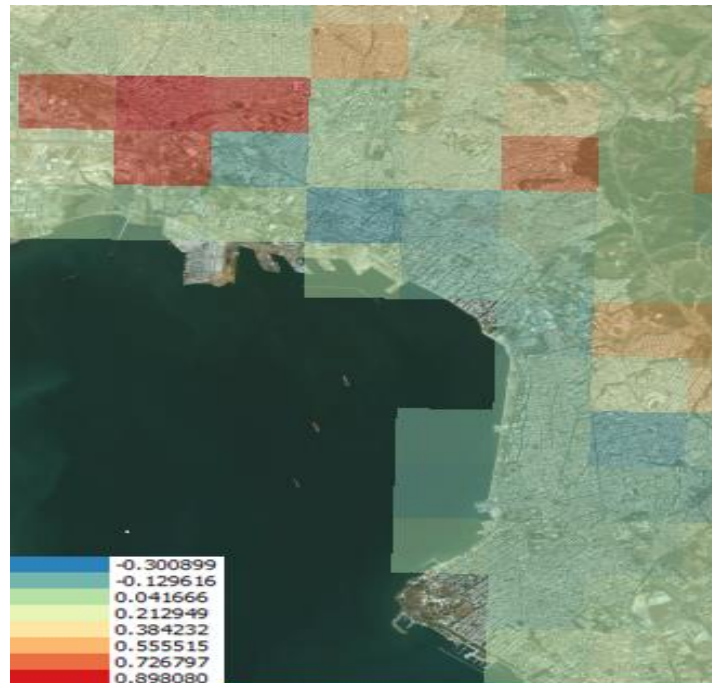
Γράφημα 3: Αποτύπωση Trend(%) MODIS Terra Day



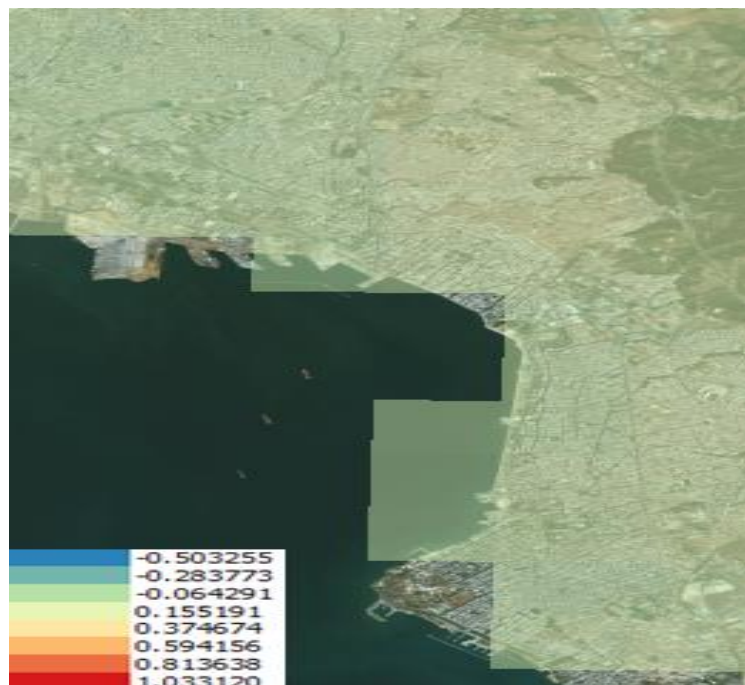
Γράφημα 4: Αποτύπωση Trend(%) MODIS Terra Night

Στη συνέχεια αποτυπώνονται οι χάρτες για την ποσοστιαία μακροχρόνια τάση σε κάθε εικονοστοιχείο, για τους μήνες Μάρτιο και Οκτώβριο. Ίδιοι χάρτες έχουν πραγματοποιηθεί για όλους τους μήνες του έτους και συμπεριλαμβάνονται στο Παράρτημα. Επειδή, από την αποτύπωση της τάσης είναι φανερή και η μεταβολή της LST στο διάστημα 2001-2015, κρίθηκε προτιμότερο στους χάρτες να γίνει κατευθείαν αποτύπωση του trend (%), ώστε να φαίνεται και η αύξηση ή μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους. Στην Εικόνα 20 φαίνεται ξεκάθαρα ότι τα pixels που παρουσιάζουν αυξητική τάση κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον μήνα Μάρτιο, βρίσκονται μέσα στα όρια της αστικής περιοχής της Θεσσαλονίκης. Στην Εικόνα 21 αποτυπώνονται οι τιμές των ποσοστιαίων τάσεων ανά pixel για την περιοχή της Θεσσαλονίκης για τον Μάρτιο κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στην Εικόνα 22, παρατηρείται μια γενικότερη αυξητική τάση για την

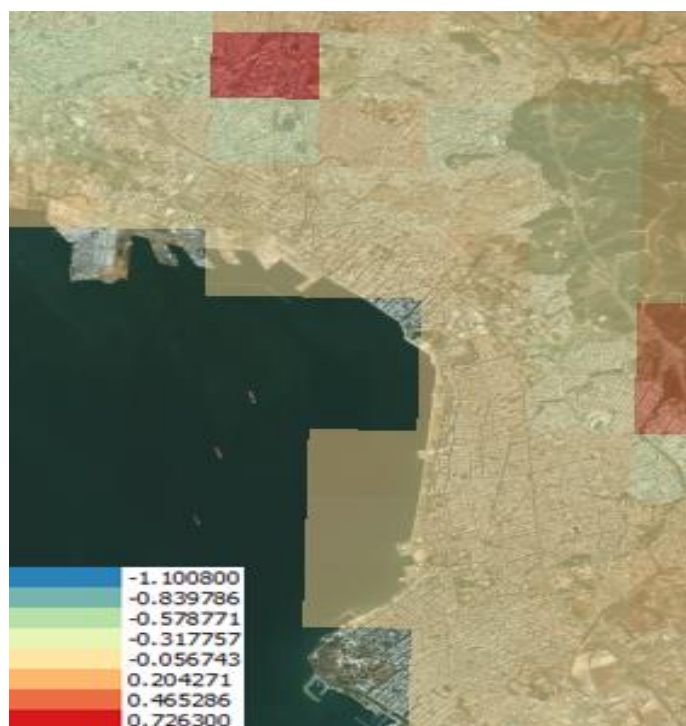
περιοχή της Θεσσαλονίκης για τον Οκτώβριο κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ αντίθετα κατά τη διάρκεια της νύχτας (Εικόνα 23), δεν παρατηρείται κάτι τέτοιο.



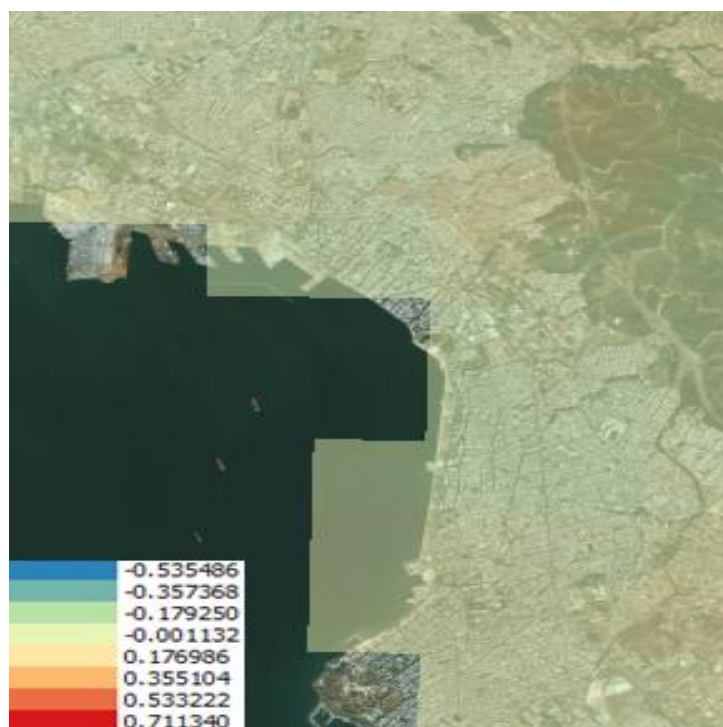
Εικόνα 20: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για τη Θεσσαλονίκη τον Μάρτιο, MODIS Terra Day



Εικόνα 21: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για τη Θεσσαλονίκη τον Μάρτιο, MODIS Terra Night



Εικόνα 22: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για τη Θεσσαλονίκη τον Οκτώβριο, MODIS Terra Day

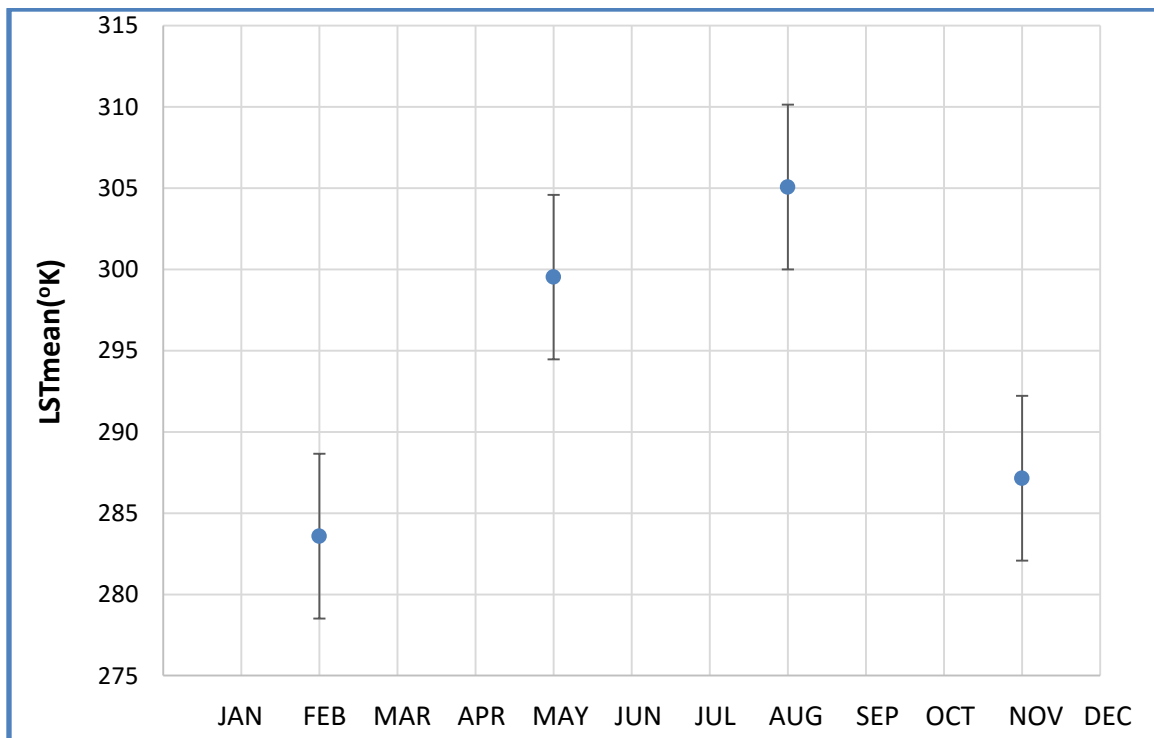


Εικόνα 23: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για τη Θεσσαλονίκη τον Οκτώβριο, MODIS Terra Night

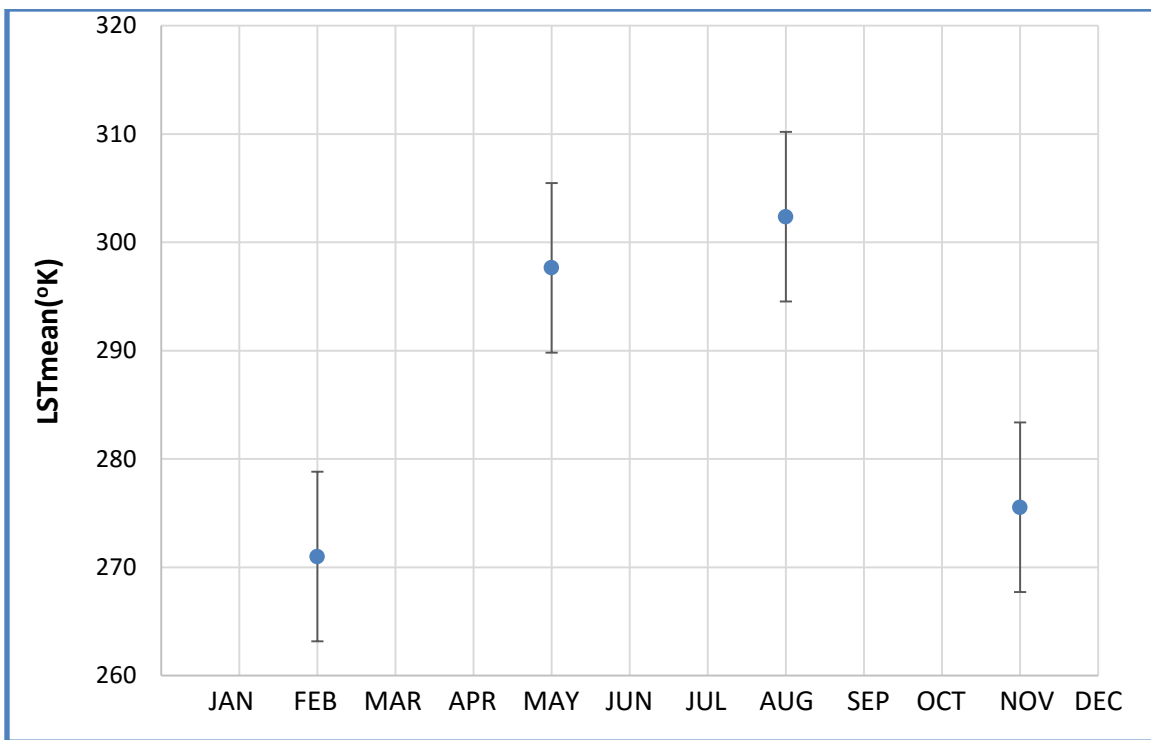
Δ.2 Πάτρα

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους για την αστική περιοχή της Πάτρας, για τους μήνες Φεβρουάριο, Μάιο, Αύγουστο και Νοέμβριο, ένα μήνα χαρακτηριστικό για κάθε εποχή.

Στα διαγράμματα της LST (Γράφημα 3,4), είναι εμφανές ότι η μέγιστη επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους για την αστική περιοχή της Πάτρας, παρατηρείται τον μήνα Αύγουστο και για την ημέρα και για τη νύχτα, στους 305,069 K (32°C) και στους 302,369 K (29°C) αντίστοιχα.



Γράφημα 5: Αποτύπωση LST MODIS Terra Day



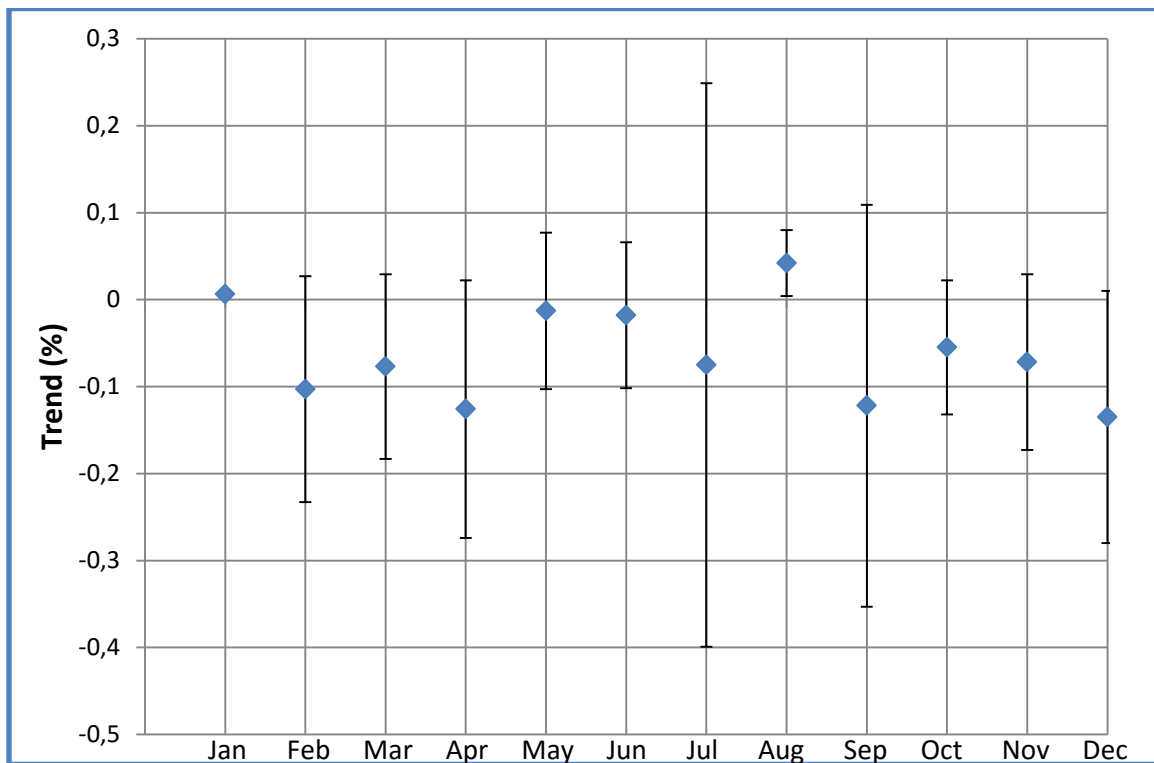
Γράφημα 6: Αποτύπωση LST MODIS Terra Night

Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 9), αποτυπώνεται η μέση τιμή του trend επί τοις εκατό μαζί με την τυπική απόκλιση για κάθε μήνα, για την αστική περιοχή της Πάτρας. Η πλειοψηφία των trends τόσο στις ημερήσιες παρατηρήσεις όσο και στις νυχτερινές, είναι αρνητική. Στατιστικά σημαντικές μεταβολές δεν παρατηρούνται και συνεπώς δε διακρίνεται κάποια ουσιαστική μεταβολή της LST για το διάστημα 2001-2015 για τον αστικό ιστό της Πάτρας.

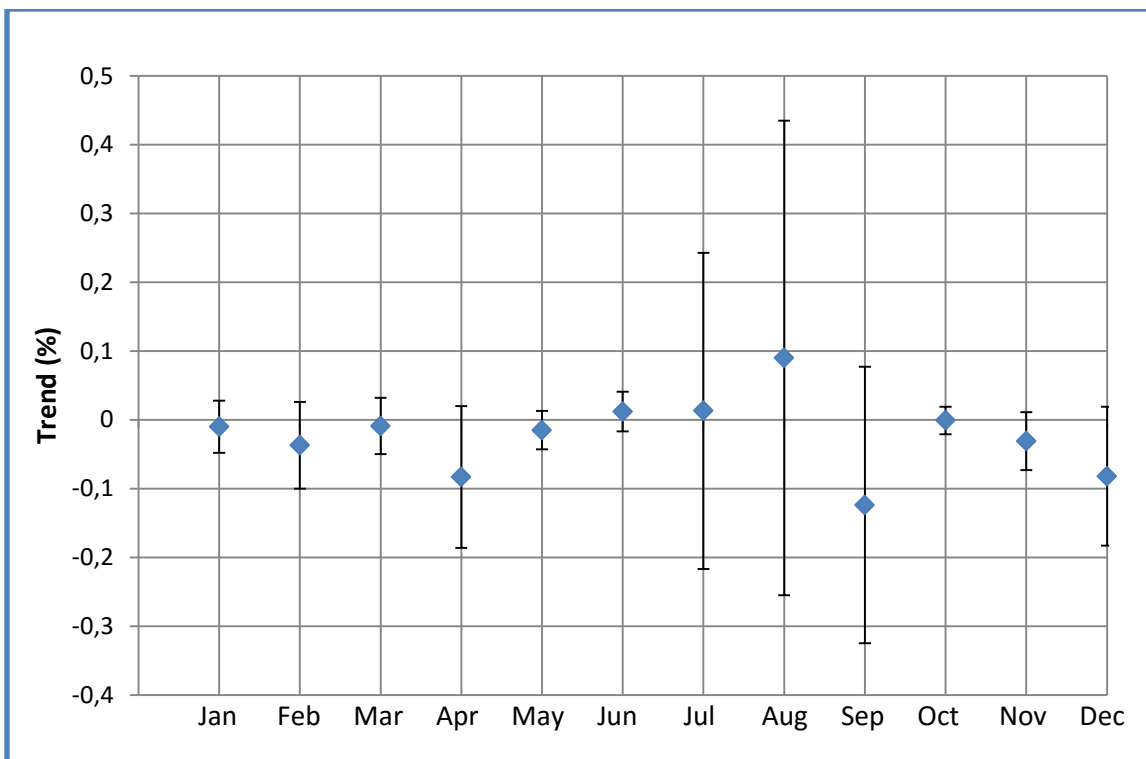
Πίνακας 9: Αποτύπωση ποσοστιαίων μακροχρόνιων τάσεων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση) του αστικού ιστού της Πάτρας

Πάτρα		
	MODIS Terra Trend % _ Day	MODIS Terra Trend %_Night
	Mean±StdDev	Mean±StdDev
Jan	0,006±0,003	-0,010±0,038
Feb	-0,103±0,130	-0,037±0,063
Mar	-0,077±0,106	-0,009±0,041
Apr	-0,126±0,148	-0,083±0,103
May	-0,013±0,090	-0,015±0,028
Jun	-0,018±0,084	0,012±0,029
Jul	-0,075±0,324	0,013±0,230
Aug	0,042±0,038	0,090±0,345
Sep	-0,122±0,231	-0,124±0,201
Oct	-0,055±0,077	-0,001±0,020
Nov	-0,072±0,101	-0,031±0,042
Dec	-0,135±0,145	-0,082±0,101

Εύκολα γίνεται αντιληπτό και από τα παρακάτω γραφήματα (Γράφημα 7,8), ότι οι τιμές των ποσοστιαίων trends κυμαίνονται γύρω από το μηδέν, με τη μεγαλύτερη μεταβολή να αποτυπώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας τον μήνα Δεκέμβριο και να αντιστοιχεί σε μείωση της LST κατά $0,4^{\circ}\text{C}$. Ενώ, κατά τη διάρκεια της νύχτας, αυτό παρατηρείται τον μήνα Σεπτέμβριο και αντιστοιχεί σε μείωση της LST κατά $0,3^{\circ}\text{C}$.



Γράφημα 7: Αποτύπωση Trend(%) MODIS Terra Day



Γράφημα 8: Αποτύπωση Trend(%) MODIS Terra Night

Στη συνέχεια, ακολουθούν οι χάρτες όπου αποτυπώνεται η ποσοστιαία μακροχρόνια τάση σε κάθε εικονοστοιχείο, για τους μήνες Ιανουάριο και Αύγουστο. Ίδιοι χάρτες έχουν πραγματοποιηθεί για όλους τους μήνες του έτους και περιλαμβάνονται στο Παράρτημα. Στην Εικόνα 24, τα pixels που παρουσιάζουν αυξητική τάση κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον μήνα Αύγουστο, είναι μέσα στα όρια της αστικής περιοχής της Πάτρας και η μέγιστη αύξηση της LST σε εικονοστοιχείο, αντιστοιχεί περίπου σε 2,2°C. Επίσης, στους χάρτες που αποτυπώνουν την τάση κατά τη διάρκεια της νύχτας (Εικόνες 25, 27), διακρίνεται έντονα το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (Urban Heat Island-UHI). Αυτό οφείλεται στην ιδιότητα του δομημένου περιβάλλοντος να αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας και να την απελευθερώνει με αργούς ρυθμούς το βράδυ. Το φαινόμενο μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια της ημέρας ή της νύχτας, αλλά αναπτύσσεται καλύτερα κατά τη διάρκεια της νύχτας

με συνθήκες άπνοιας και ανέφελου ουρανού. Έχει σημαντικό αντίκτυπο στη ζήτηση ενέργειας, στην ανθρώπινη υγεία και στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

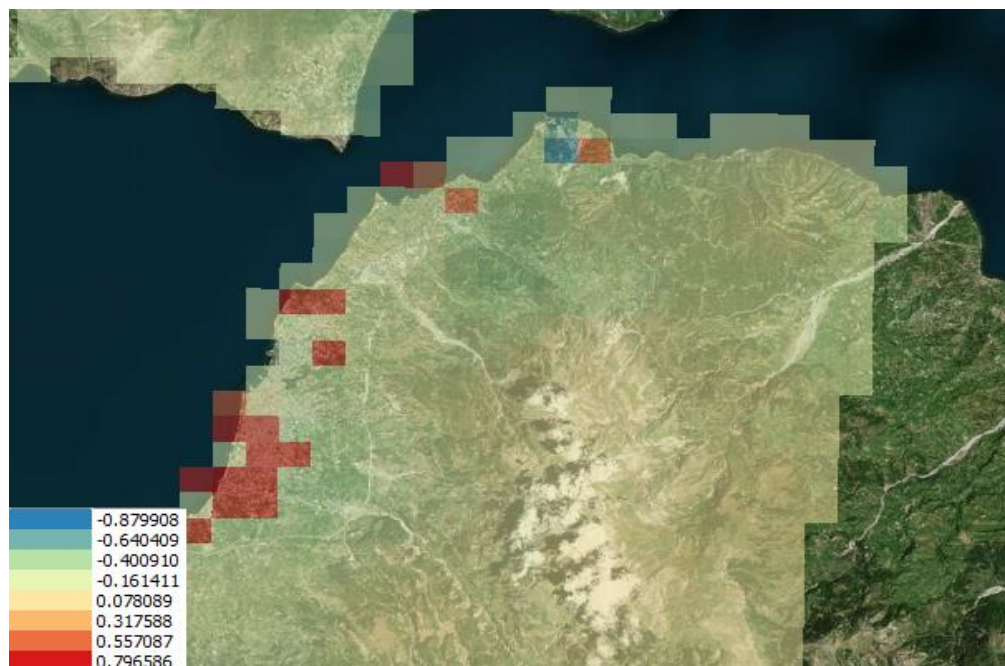
Η ύπαρξη του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας αποδίδεται σε διάφορες αιτίες: παγίδευση τόσο της εισερχόμενης ηλιακής, όσο και της εξερχόμενης μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, η μείωση της τυρβώδους μεταφοράς θερμότητας λόγω της γεωμετρίας των αστικών χαράδρων, μείωση της εξατμισοδιαπνοής και αύξηση της αποθήκευσης θερμότητας λόγω των υλικών κατασκευής καθώς η ατμοσφαιρική ρύπανση οδηγεί σε αύξηση της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος από τον ουρανό (1987 Oke). Εξαρτάται από το μέγεθος, τον πληθυσμό και τη βιομηχανική ανάπτυξη της πόλης, σε συνδυασμό με την τοπογραφία, τη φυσική διάταξη, τις περιφερειακές κλιματικές και μετεωρολογικές συνθήκες (Oke et al. 1991). Ακόμη παρουσιάζει ενδιαφέρον ότι τα pixels που καλύπτουν παράκτιες περιοχές έχουν υψηλές τιμές τάσης κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας, κάτι που συνδέεται με το πολεοδομικό σχέδιο των παράκτιων περιοχών, που αναπτύσσονται κατά μήκος των ακτών. Εκεί παρατηρείται έντονη συγκέντρωση πηγών θερμότητας και πυκνότητα δόμησης, παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους.



Εικόνα 24: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για την Πάτρα τον Ιανουάριο, MODIS Terra Day



Εικόνα 25: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για την Πάτρα τον Ιανουάριο, MODIS Terra Night



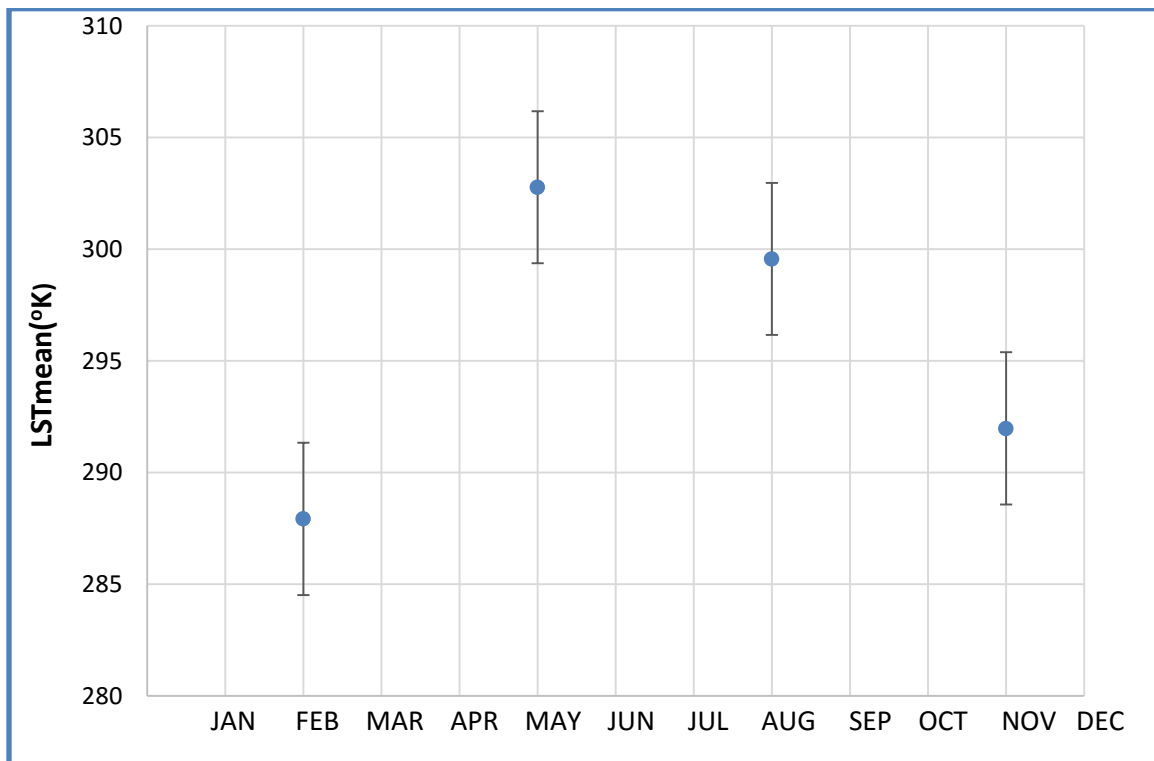
Εικόνα 26: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για την Πάτρα τον Αύγουστο, MODIS Terra Day



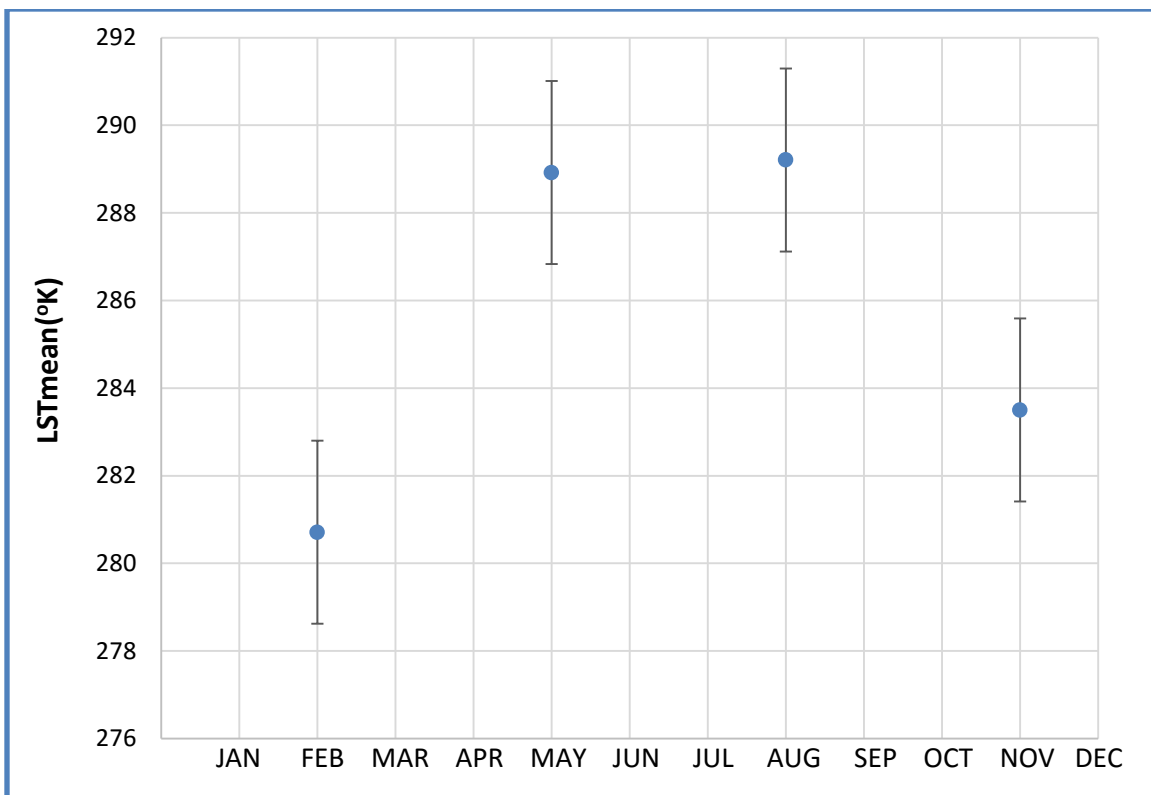
Εικόνα 27: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για την Πάτρα τον Αύγουστο, MODIS Terra Night

Δ.3 Ηράκλειο

Καταρχάς, στα διαγράμματα που ακολουθούν (Γραφήματα 13,14), παρουσιάζονται οι τιμές της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους για την αστική περιοχή του Ηρακλείου, για τους μήνες Φεβρουάριο, Μάιο, Αύγουστο και Νοέμβριο ώστε να αποτυπωθεί και η εποχικότητα της παραμέτρου. Είναι εμφανές ότι η μέγιστη επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους για το Ηράκλειο, παρατηρείται τον μήνα Μάιο κατά τη διάρκεια της ημέρας και αντιστοιχεί στους 302,771 K (29,8°C), ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας, η μέγιστη LST παρατηρείται τον Αύγουστο με ελάχιστη διαφορά από τη μέση τιμή της LST τον Μάιο και αντιστοιχεί στους 289,207 K (16,2°C).



Γράφημα 13: Αποτύπωση LST MODIS Terra Day



Γράφημα 14: Αποτύπωση LST MODIS Terra Night

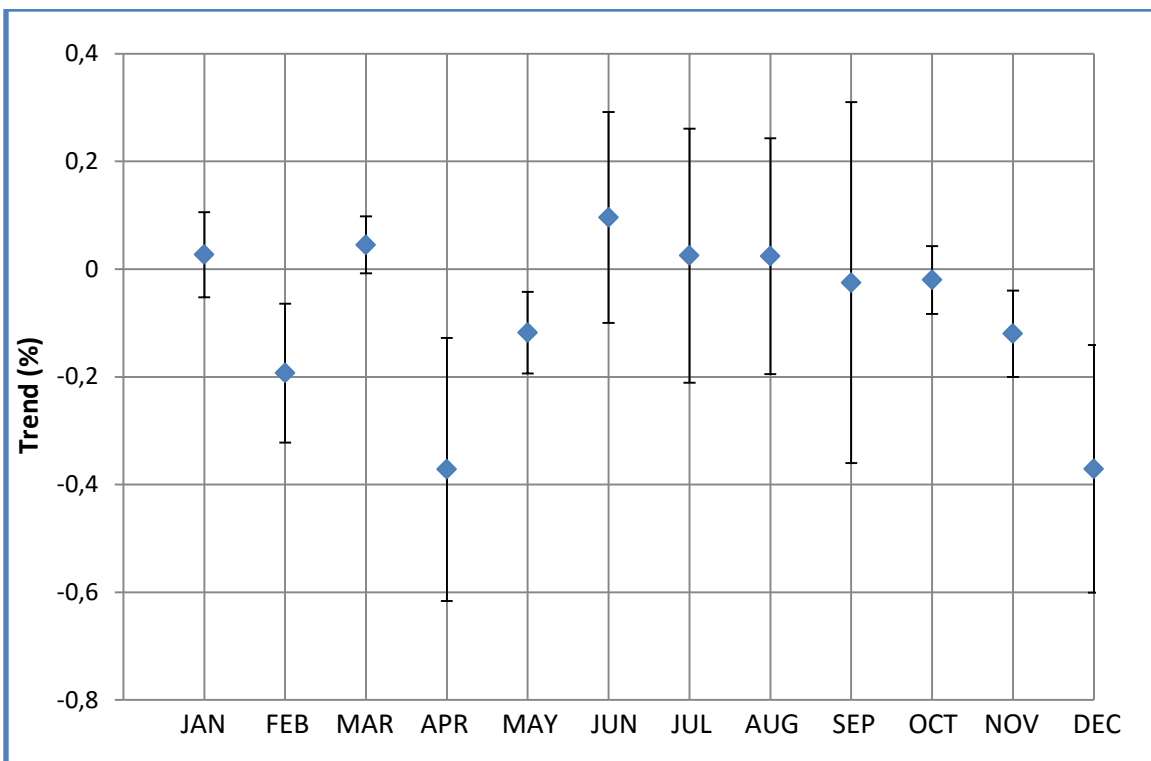
Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 10), αποτυπώνεται η μέση τιμή της τάσης (%) μαζί με την τυπική απόκλιση για κάθε μήνα, για την αστική περιοχή του Ηρακλείου. Στατιστικά σημαντικές αρνητικές τάσεις, παρατηρούνται για τους μήνες Απρίλιο και Δεκέμβριο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η αρνητική τάση -0,372% για τον Απρίλιο οδηγεί σε μείωση 1°C και η αρνητική τάση -0,371% για τον Δεκέμβριο αντιστοιχεί πάλι σε μείωση 1°C. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, διακρίνονται στατιστικά σημαντικές θετικές τάσεις για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο που οδηγούν σε αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους της τάξεως των 1,3°C και των 1,5°C, αντίστοιχα.

Οι τιμές των τάσεων για κάθε μήνα ξεχωριστά αναπαρίστανται στα παρακάτω γραφήματα (15,16), όπου τα εύρη των σφαλμάτων αντιπροσωπεύουν

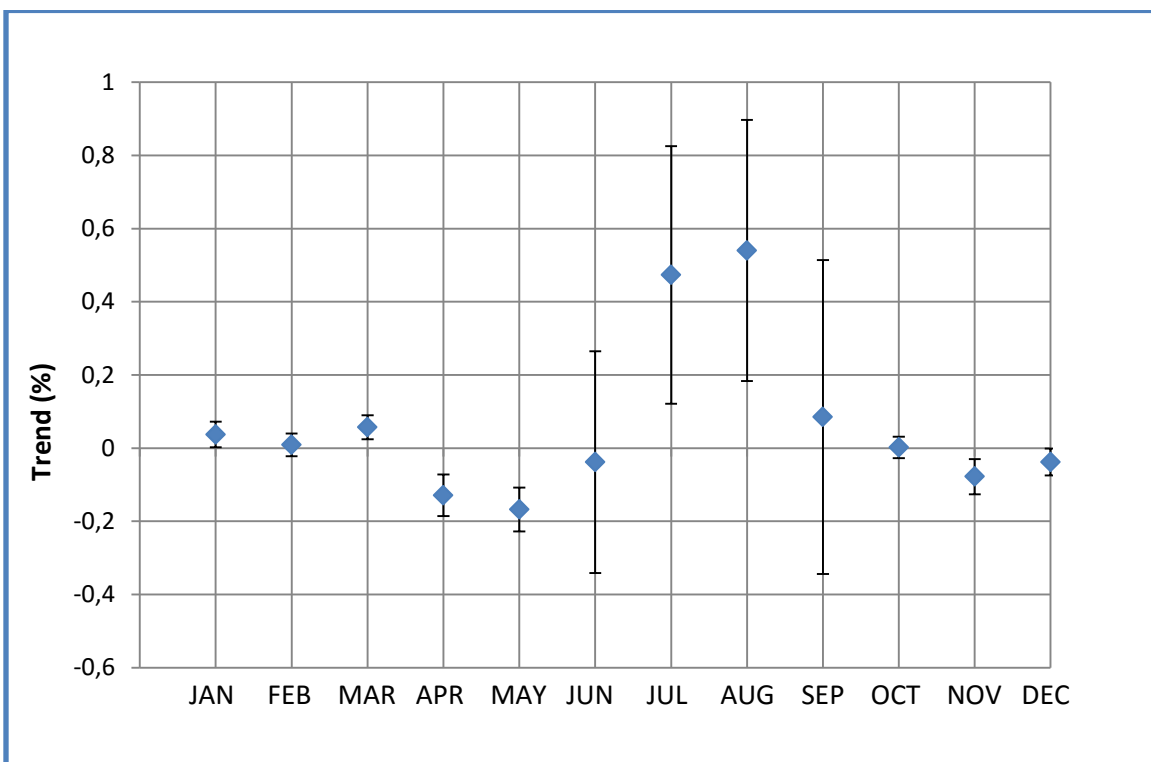
τις αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις. Στην πλειοψηφία τους τα trends δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές μεταβολές.

Πίνακας 10: Αποτύπωση ποσοστιαίων μακροχρόνιων τάσεων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση) του αστικού ιστού του Ηρακλείου

Ηράκλειο		
	MODIS Terra Trend % _ Day	MODIS Terra Trend %_Night
	Mean±StdDev	Mean±StdDev
Jan	0,027±0,079	0,037±0,035
Feb	-0,193±0,129	0,009±0,031
Mar	0,045±0,053	0,057±0,033
Apr	-0,372±0,244	-0,129±0,057
May	-0,118±0,076	-0,168±0,060
Jun	0,096±0,196	-0,038±0,303
Jul	0,025±0,236	0,473±0,352
Aug	0,024±0,219	0,540±0,357
Sep	-0,025±0,335	0,085±0,429
Oct	-0,020±0,063	0,002±0,029
Nov	-0,120±0,080	-0,078±0,048
Dec	-0,371±0,230	-0,038±0,037



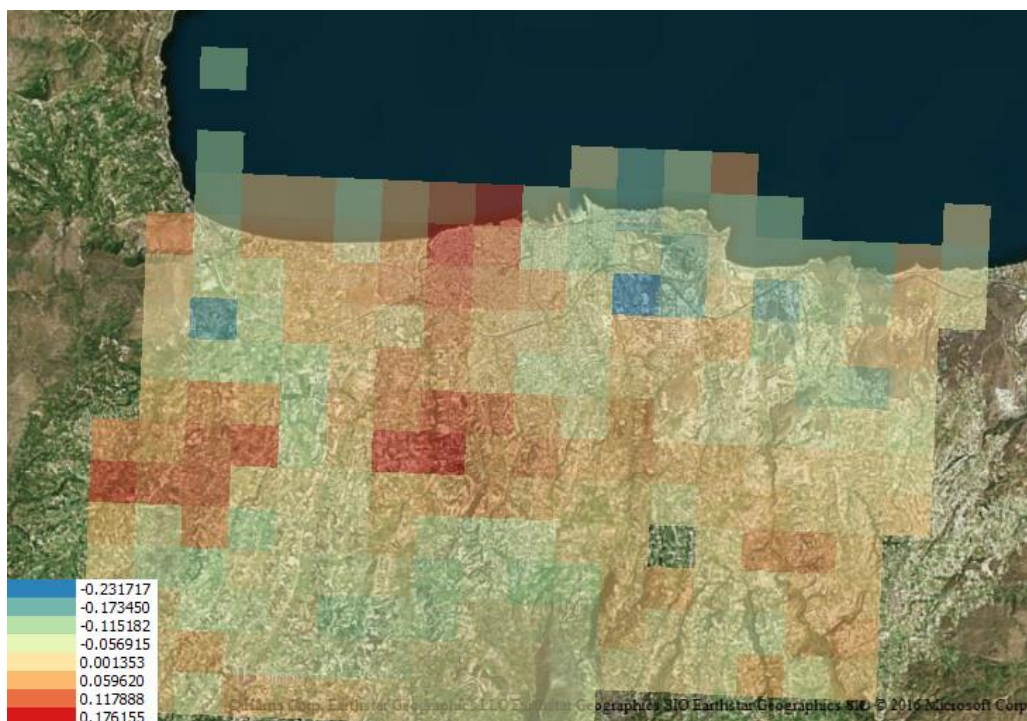
Γράφημα 15: Αποτύπωση Trend (%) MODIS Terra Day



Γράφημα 16: Αποτύπωση Trend (%) MODIS Terra Night

Στη συνέχεια, ακολουθούν οι χάρτες όπου αποτυπώνεται η ποσοστιαία μακροχρόνια τάση σε κάθε εικονοστοιχείο, για τους μήνες Ιανουάριο και Αύγουστο. Ίδιοι χάρτες έχουν πραγματοποιηθεί για όλους τους μήνες του έτους και συμπεριλαμβάνονται στο Παράρτημα. Παρατηρείται και εδώ έντονα το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας και είναι ευδιάκριτο, κυρίως κατά τους θερινούς μήνες και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Εδώ επίσης, τα pixels που καλύπτουν παράκτιες περιοχές έχουν υψηλές τιμές τάσης λόγω του πολεοδομικού σχεδίου των παράκτιων περιοχών.

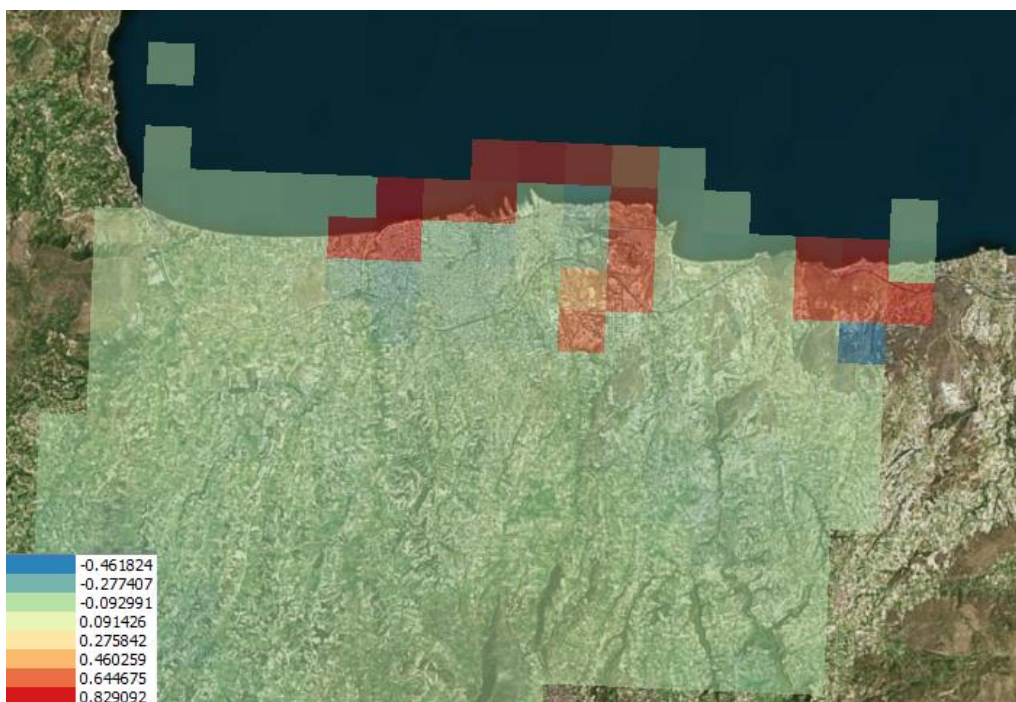
Οι τιμές των trends των εικονοστοιχείων στα όρια της αστικής περιοχής του Ηρακλείου κυμαίνονται από $-0,1\%$ έως $+0,2\%$ περίπου για τον Ιανουάριο κατά τη διάρκεια της ημέρας (Εικόνα 28), ενώ αντίθετα κατά τη διάρκεια της νύχτας (Εικόνα 29), από $+0,01\%$ έως $+0,1\%$. Για τον Αύγουστο κατά τη διάρκεια της ημέρας (Εικόνα 30), η πλειοψηφία των εικονοστοιχείων έχει τάση με τιμή $-0,09\%$. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της νύχτας (Εικόνα 31), τα pixels που καλύπτουν τον αστικό ιστό του Ηρακλείου κυμαίνονται από $+0,7\%$ έως $+1,0\%$.



Εικόνα 28: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για το Ηράκλειο τον Ιανουάριο, MODIS Terra Day



Εικόνα 29: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για το Ηράκλειο τον Ιανουάριο, MODIS Terra Night



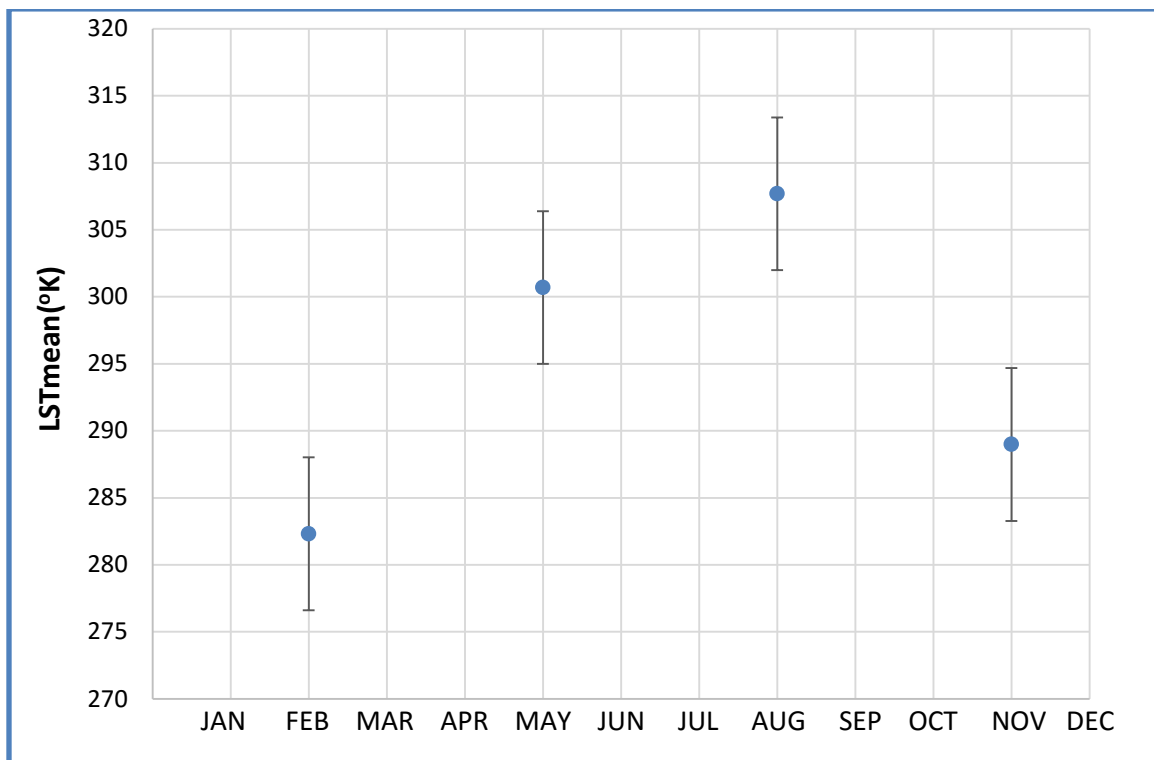
Εικόνα 30: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για το Ηράκλειο τον Αύγουστο, MODIS Terra Day



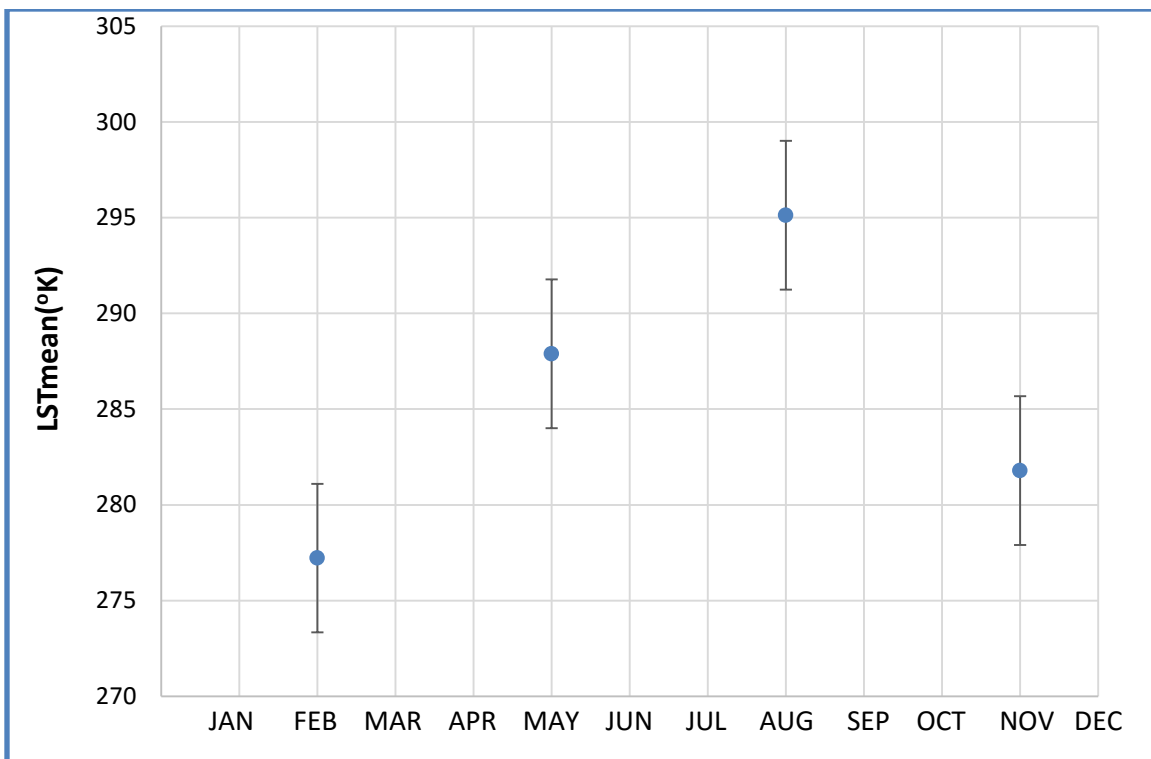
Εικόνα 31: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για το Ηράκλειο τον Αύγουστο, MODIS Terra Night

Δ.4 Βόλος

Στα παρακάτω γραφήματα (9,10), παρουσιάζονται οι τιμές της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους για την αστική περιοχή του Βόλου, για τους μήνες Φεβρουάριο, Μάιο, Αύγουστο και Νοέμβριο ώστε να αποτυπωθεί και η εποχιακή διακύμανση της παραμέτρου. Επίσης, στους χάρτες που ακολουθούν αποτυπώνεται η τιμή της ποσοστιαίας μακροχρόνιας τάσης για τους μήνες Μάιο και Δεκέμβριο. Διακρίνεται ότι η μέγιστη επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους για τον Βόλο, παρατηρείται τον μήνα Αύγουστο και για την ημέρα και για τη νύχτα, στους 307,686 K (34,7°C) και στους 295,132 K (22°C) αντίστοιχα.



Γράφημα 9: Αποτύπωση LST MODIS Terra Day

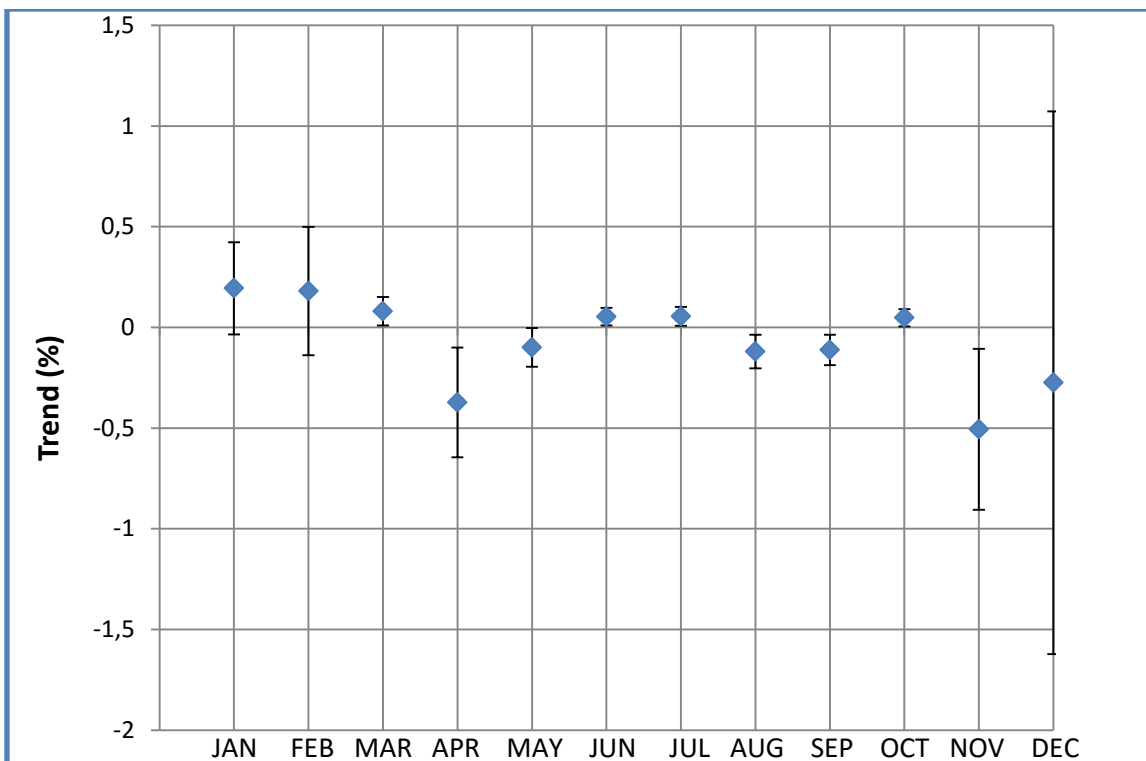


Γράφημα 10: Αποτύπωση LST MODIS Terra Night

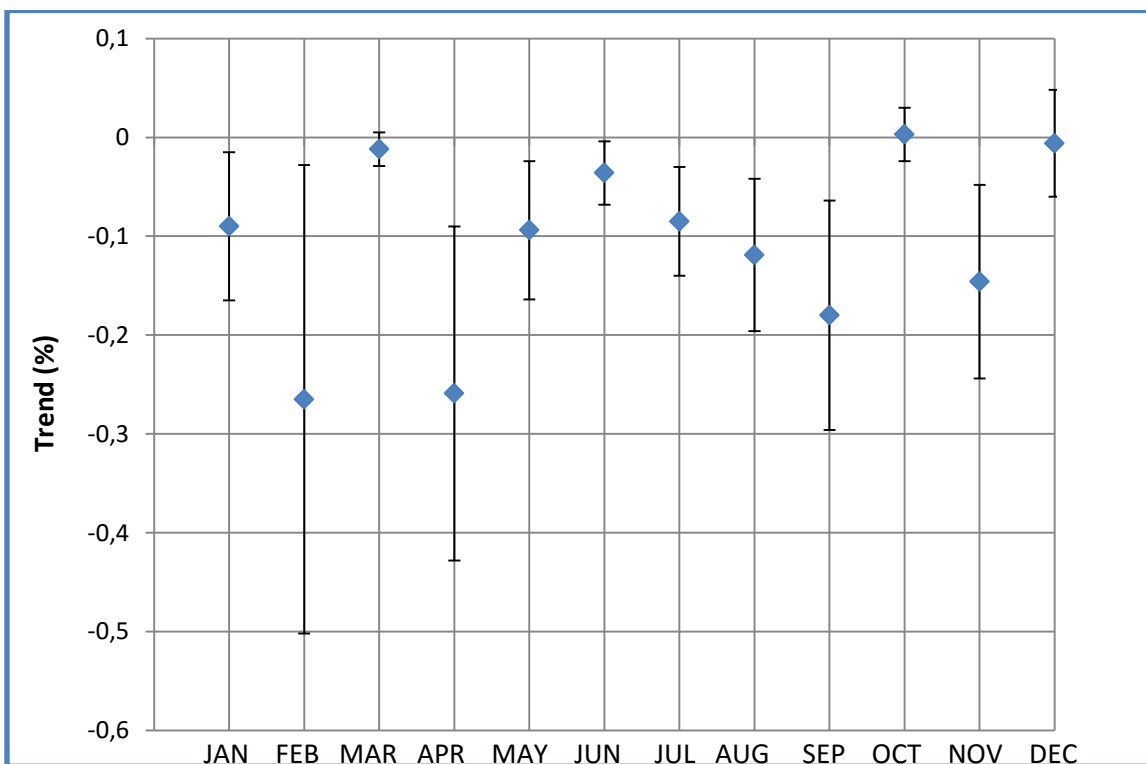
Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 11), αποτυπώνεται η μέση τιμή του trend επί τοις εκατό μαζί με την τυπική απόκλιση για κάθε μήνα, για την αστική περιοχή του Βόλου. Στις ημερήσιες παρατηρήσεις είναι ευδιάκριτο ότι για τον μήνα Νοέμβριο εμφανίζεται αρνητική τάση της LST που αντιστοιχεί σε μείωση $1,4^{\circ}\text{C}$. Επίσης, η αρνητική τάση της LST για τον μήνα Απρίλιο αντιστοιχεί σε μείωση 1°C . Η πλειοψηφία των τάσεων στις νυχτερινές παρατηρήσεις, είναι αρνητική και η μέγιστη αρνητική τάση παρατηρείται τον Φεβρουάριο που οδηγεί σε μείωση $0,7^{\circ}\text{C}$. Σε γενικές γραμμές όμως οι τάσεις για τους υπόλοιπους μήνες κυμαίνονται γύρω από το μηδέν, γεγονός που συνεπάγεται ότι δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική μεταβολή για την LST μέσα στη δεκαπενταετία. Όλα αυτά αποτυπώνονται και στα επόμενα γραφήματα (11,12), όπου φαίνεται η ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για κάθε μήνα ξεχωριστά μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση.

Πίνακας 11: Αποτύπωση ποσοστιαίων μακροχρόνιων τάσεων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση) του αστικού ιστού του Βόλου

Βόλος		
	MODIS Terra Trend % _ Day	MODIS Terra Trend %_Night
	Mean±StdDev	Mean±StdDev
Jan	0,194±0,229	-0,090±0,075
Feb	0,180±0,318	-0,265±0,237
Mar	0,080±0,071	-0,012±0,017
Apr	-0,373±0,272	-0,259±0,169
May	-0,099±0,096	-0,094±0,070
Jun	0,053±0,043	-0,036±0,032
Jul	0,054±0,047	-0,085±0,055
Aug	-0,120±0,083	-0,119±0,077
Sep	-0,112±0,076	-0,180±0,116
Oct	0,048±0,043	0,003±0,027
Nov	-0,506±0,400	-0,146±0,098
Dec	-0,275±1,348	-0,006±0,054



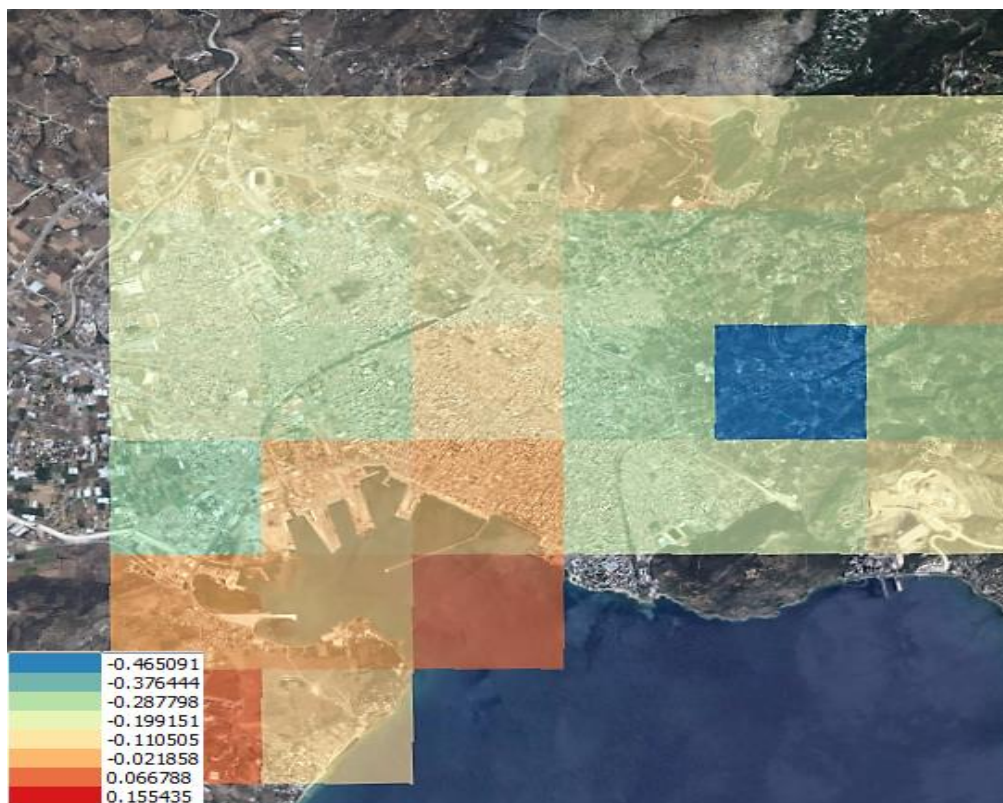
Γράφημα 11: Αποτύπωση Trend (%) MODIS Terra Day



Γράφημα 12: Αποτύπωση Trend (%) MODIS Terra Night

Στη συνέχεια, ακολουθούν οι χάρτες όπου αποτυπώνεται η ποσοστιαία μακροχρόνια τάση σε κάθε εικονοστοιχείο, για τους μήνες Μάιο και Δεκέμβριο. Ίδιοι χάρτες έχουν πραγματοποιηθεί για όλους τους μήνες του έτους και συμπεριλαμβάνονται στο Παράρτημα. Στην Εικόνα 32, τα pixels που παρουσιάζουν αυξητική τάση κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον μήνα Μάιο, βρίσκονται μέσα στα όρια του αστικού ιστού του Βόλου και η μέγιστη αύξηση της LST σε εικονοστοιχείο, αντιστοιχεί περίπου σε $0,4^{\circ}\text{C}$. Ομοίως, για τον μήνα Δεκέμβριο τα pixels με αυξητική τάση βρίσκονται εντός της αστικής περιοχής του Βόλου και η μεγαλύτερη μείωση σε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί σε $12,6^{\circ}\text{C}$.

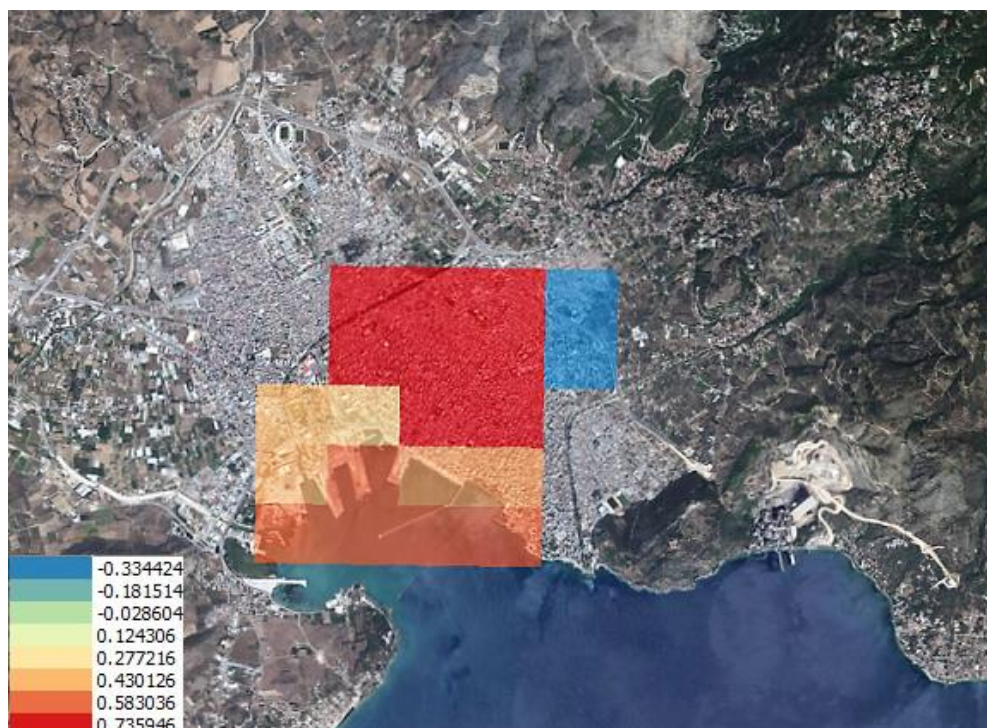
Επίσης, στους χάρτες που αποτυπώνουν το trend κατά τη διάρκεια της νύχτας για τον Μάιο (Εικόνα 33) και τον Δεκέμβριο (Εικόνα 35), διακρίνεται έντονα και εδώ, το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Ακόμη, είναι ενδιαφέρον ότι τα pixels που βρίσκονται πάνω από παράκτιες περιοχές δίνουν και εδώ, υψηλές τιμές τάσης, λόγω της πυκνότητας δόμησης των παράκτιων περιοχών κατά μήκος των ακτών.



Εικόνα 32: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για τον Βόλο τον Μάιο, MODIS Terra Day



Εικόνα 33: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για τον Βόλο τον Μάιο, MODIS Terra Night



Εικόνα 34: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για τον Βόλο τον Δεκέμβριο, MODIS Terra Day



Εικόνα 35: Ποσοστιαία μακροχρόνια τάση για τον Βόλο τον Δεκέμβριο, MODIS Terra Night

Ε. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε η μελέτη των χωροχρονικών μεταβολών της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους σε τέσσερις μεσαίου μεγέθους πόλεις της Ελλάδος, μέσω της στατιστικής ανάλυσης μια χρονοσειράς εύρους 15 ετών για καθεμία πόλη. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από δορυφορικές καταγραφές του ραδιομέτρου MODIS του δορυφόρου Terra και ανακτήθηκαν από προϊόντα οκταήμερου (1 παρατήρηση την ημέρα στις 11:30 και 1 παρατήρηση τη νύχτα στις 22:00).

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να τονισθεί ότι μία σημαντική αδυναμία του ραδιομέτρου MODIS είναι η μέτρια χωρική διακριτική ικανότητά του, η οποία βέβαια επιτρέπει την ανάδειξη μεταβολών της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους με χωρική και χρονική ανομοιογένεια και χωρική ανισοτροπία, όμως υστερεί στην ερμηνεία στατιστικά σημαντικών μεταβολών, όπου εκεί θα ήταν απαραίτητη υψηλότερη χωρική ανάλυση. Σε δορυφορικά δεδομένα μεσαίας χωρικής ανάλυσης, ο συντελεστής εκπομπής ενός εικονοστοιχείου αποτελεί σύνθεση των συντελεστών εκπομπής των διαφορετικών τύπων επιφανειών που ενδεχομένως αποτελούν το εικονοστοιχείο. Επίσης, οι Jiménez-Muñoz et al. (2006) ανέλυσαν τις πηγές σφάλματος στην εκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους και κατέληξαν πως μόνο η αβεβαιότητα στην εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής οδηγεί σε ένα σφάλμα της τάξης του 0.4 K στον υπολογισμό της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους.

Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό πως αν οι υπό μελέτη περιοχές ήταν μικρές τόσο ώστε να καλύπτονται από λίγα pixels, το αποτέλεσμα δε θα ήταν αξιόπιστο και η χωρική διακριτική ικανότητα που χρησιμοποιήθηκε δε θα ήταν η κατάλληλη. Όμως, οι αστικές περιοχές που μελετήθηκαν απαρτίζονται από αρκετά εικονοστοιχεία και επομένως τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα. Επίσης, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα πλέον κατάλληλα για να υπάρχει μία

ισορροπία μεταξύ χωρικής και χρονικής διακριτικής ικανότητας, ώστε να επιτευχθεί ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας.

Μετά τη συλλογή των πρωτογενών δεδομένων και την κατάλληλη επεξεργασία τους ώστε να είναι αξιοποιήσιμα και να δίνουν τιμές επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους ανά εικονοστοιχείο. Τα δεδομένα αξιολογήθηκαν και μετά από στατιστική επεξεργασία της 15ετούς χρονοσειράς υπολογίστηκαν αρχικά, οι μέσοι όροι των τιμών της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους ανά μήνα και έπειτα, οι μακροχρόνιες τάσεις της LST μόνο για τις αστικές περιοχές της Θεσσαλονίκης, της Πάτρας, του Ηρακλείου και του Βόλου. Η εξαγωγή των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν σε αστικές περιοχές βασίστηκε σε έτοιμο προϊόν (MCD12Q1) που περιλαμβάνεται στα προϊόντα εδάφους της NASA. Τέλος, οι τιμές των ποσοστιαίων trends αποτυπώθηκαν σε χάρτες χρωματικής απεικόνισης των πόλεων που μελετήθηκαν. Αυτά που προέκυψαν από τις τιμές των τάσεων είναι τα εξής:

- Για την αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, σύμφωνα με τις τιμές των trends που καταγράφηκαν, δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές μεταβολές.
- Για την αστική περιοχή της Πάτρας αποτυπώθηκαν στατιστικά σημαντικές θετικές τάσεις για τους μήνες Ιανουάριο και Αύγουστο, κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Για την αστική περιοχή του Ηρακλείου κατά τη διάρκεια της ημέρας, καταγράφηκαν αρκετές στατιστικά σημαντικές αρνητικές τάσεις, με τη μεγαλύτερη να αντιστοιχεί σε μείωση της LST κατά 1°C τον μήνα Απρίλιο. Επίσης, κατά τη διάρκεια της νύχτας παρατηρήθηκαν εξίσου σημαντικές αρνητικές και θετικές τάσεις με το μεγαλύτερο trend να αντιστοιχεί σε αύξηση της LST κατά $1,5^{\circ}\text{C}$, τον Αύγουστο.
- Για την αστική περιοχή του Βόλου, αποτυπώθηκε ένα σημαντικός αριθμός αρνητικών και θετικών τάσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας, με το μεγαλύτερο trend να καταγράφεται τον Νοέμβριο και να αντιστοιχεί σε

μείωση της LST κατά 1,4°C. Ακόμη, κατά τη διάρκεια της νύχτας παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές αρνητικές τάσεις.

Η ερμηνεία των υπολογισθέντων τάσεων βρίσκεται στα χαρακτηριστικά των αστικών περιοχών που μελετήθηκαν. Οι τέσσερις αυτές αστικές περιοχές παρουσιάζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά, διαθέτουν εμπορικό λιμάνι και έχουν βιομηχανική δραστηριότητα, συνεπώς σημειώνονται αυξημένες ανθρωπογενείς πηγές θερμότητας. Επίσης, ως παράκτιες περιοχές επωφελούνται από την επίδραση του ευεργετικού φαινομένου της θαλάσσιας αύρας, που περιορίζει την επιβάρυνση του θερμικού τους περιβάλλοντος. Ακόμη, λόγω του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, το κέντρο της πόλης, στο οποίο ο αστικός ιστός είναι πυκνότερος, είναι θερμότερο από τα προάστια, λόγω των υλικών δόμησης που έχουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα και μικρή ανακλαστικότητα.

Από την άλλη πλευρά, η έκταση και ο πληθυσμός των αστικών περιοχών που μελετήθηκαν, συμβάλλουν ουσιαστικά στην ερμηνεία της τάσης της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους (LST), δεν παρατηρείται όμως αντίστοιχη εξάρτηση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας από αυτούς τους παράγοντες. Στον Πίνακα 12, παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των υπό μελέτη πόλεων, όχι όμως των αστικών περιοχών αλλά για τους ευρύτερους δήμους στους οποίους υπάγονται οι περιοχές αυτές καθώς δεν ήταν δυνατόν να βρεθούν ακριβείς πληροφορίες μόνο για τα κέντρα των πόλεων όπως θα ήταν το επιθυμητό.

Πίνακας 12: Συνοπτική αποτύπωση χαρακτηριστικών των υπό μελέτη δήμων

Δήμος	Έκταση (km ²)	Πληθυσμός	Γεωγραφικό Πλάτος	Κλιματική Ζώνη	Μέγιστη Μέση LST (K)
Θεσσαλονίκη	20,52	323.637	40°38'N	Γ	307,383
Πάτρα	334,14	168.034	38°15'N	B	305,069
Ηράκλειο	245,12	173.450	35°20'N	A	302,771
Βόλος	387,14	144.449	39°22' N	B	307,686

Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την εποχική διακύμανση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους και την εξάρτηση της από το γεωγραφικό πλάτος. Στους χάρτες χρωματικής απεικόνισης των ποσοστιαίων τάσεων, παρατηρήθηκε ξεκάθαρα η ενίσχυση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας στις αστικές περιοχές της Πάτρας, του Ηρακλείου και του Βόλου, ενώ για την αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης δεν παρατηρήθηκε ενίσχυση του φαινομένου.

Επιπλέον, οι χάρτες που αποτυπώνουν την κάλυψη και τη χρήση γης των περιοχών που μελετήθηκαν και τις μεταβολές που πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 2000-2012 επαληθεύουν ικανοποιητικά τις τιμές των τάσεων της LST που υπολογίσθηκαν. Για παράδειγμα, σε pixels που παρατηρείται αυξητική τάση της LST, παρατηρήθηκε ότι υπήρχε μετατροπή ασυνεχούς σε συνεχή αστικό ιστό

Βέβαια, η LST είναι μία πολυσυλλεκτική παράμετρος και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, σε μια μελέτη του κλίματος αστικής περιοχής, απαιτείται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση σε πολλαπλές χρονικές και χωρικές κλίμακες και τομείς. Μία ολοκληρωμένη ερμηνεία των αποτελεσμάτων για τις στατιστικά σημαντικές μεταβολές απαιτεί μία πλήρη ανάλυση του αστικού μικροκλίματος αυτών των περιοχών, των θερμικών συνεισφορών στα κέντρα των υπό μελέτη πόλεων, γνώση της τοπογραφίας και των πολεοδομικών χαρακτηριστικών τους,

αποτύπωση της μεταβολής στην κάλυψη και χρήση γης αυτών των αστικών περιοχών.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων MODIS, για τον υπολογισμό της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους και την αποτύπωση των τάσεων σε χάρτες. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε μία «μακροαποτύπωση του θερμικού περιβάλλοντος των τεσσάρων αστικών περιοχών», αποτύπωση που μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μία μελλοντική μελέτη με αντικείμενο την ερμηνεία των στατιστικά σημαντικών μεταβολών των περιοχών αυτών.

Η σημασία της εν λόγω εργασίας έγκειται στην αναγκαιότητα μελέτης της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους των συγκεκριμένων αστικών περιοχών. Η Θεσσαλονίκη, η Πάτρα, το Ηράκλειο και ο Βόλος είναι σημαντικές πόλεις της Ελλάδος, ενώ δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς ως προς το θερμικό τους περιβάλλον. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η αποτύπωση των τάσεων της LST και μάλιστα, με την αξιοποίηση ενός τεράστιου όγκου δεδομένων που παρέχονται από δορυφορικές καταγραφές με ικανοποιητική χωρική ανάλυση. Ακόμη είναι σημαντικό ότι παρατηρήθηκαν αρκετές στατιστικά σημαντικές μεταβολές που φανερώνουν επιβάρυνση του θερμικού περιβάλλοντος των τεσσάρων αστικών περιοχών. Τα αποτελέσματα που παρήχθησαν είναι χρήσιμα σε πολλές μελέτες σχετικά με το αστικό μικροκλίμα, την περιβαλλοντική ποιότητα και την αλλαγή του μικροκλίματος, καθώς αποτυπώνουν την τάση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους για τα κέντρα αυτών των πόλεων, σε διάστημα δεκαπενταετίας.

Τέλος, η επεξεργασία των δεδομένων μέσω του λογισμικού ERDAS IMAGINE 2014 έκανε εφικτή την επεξεργασία ενός τεράστιου όγκου δεδομένων, την καλύτερη κατανόηση της φυσικής του προβλήματος μέσω των μοντέλων που δημιουργήθηκαν και την εκτίμηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων άμεσα με

τον έλεγχο του αρχείου GeoTIF, τόσο με την απεικόνιση των εικονοστοιχείων που καλύπτουν την αστική περιοχή όσο και των μεταδεδομένων του. Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με κάποιες αλλαγές, για τη μελέτη της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους άλλων περιοχών.

ΣΤ. Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

- Akhoondzadeh, M. & Saradjian, M. R. (2008). Comparison of Land Surface Temperature Mapping Using MODIS and ASTER Images in Semi-Arid Area, 873-876.
- Becker, F. & Li, Z. L. (1995). Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems. Remote Sensing Reviews.
- Calkins, H. W., & Tomlinson, R. F. (1977). Geographic Information Systems: Methods and Equipment for Land Use Planning. Ottawa, Canada: International Geographical Union, Commission of Geographical Data Sensing and Processing and U.S. Geological Survey.
- Coll, C., Caselles, V., Sobrino, J. A. & Valor, E. (1994). On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. International Journal Remote Sensing.
- Lu, D. & Weng, Q. (2006). Use of impervious surface in urban land use classification. Remote Sensing of Environment .
- Prata, A. J. (2002). Land Surface Temperature Measurement from Space: AATSR Algorithm Theoretical Basis Document, CSIRO Atmospheric Research Aspendale, Australia.
- Roy, D.P., Borak, J.S., Devadiga, S., Wolfe, R.E., Zheng, M., Descloitres, J. (2002). The MODIS Land Quality Assessment Approach. Remote Sensing of Environment.
- Stathopoulou, M., Cartalis, C., Keramitsoglou, I. (2004). Mapping micro-urban heat islands using NOAA/AVHRR images and CORINE Land Cover: an application to coastal cities of Greece. International Journal of Remote Sensing 25 (12), 2301 – 2316.

- Stathopoulou, M., Cartalis, C. and Petrakis, M. (2007). Integrating Corine Land Cover data and Landsat TM for surface emissivity definition: application to the urban area of Athens, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 3291 – 3304.
- Stathopoulou, M., Cartalis, C. (2006). Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece, 358 – 368.
- Wan, Z. (2006). Collection-5. MODIS Land Surface Temperature Products. Users' Guide.
- Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., and Li, Z.. (2002). Validation of the Land Surface Temperature Products Retrieved from Terra Moderate Resolution Image Spectroradiometer Data.
- Wan, Z. (1999). MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD), Version 3.3.
- Voogt, J.A., Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment* 86 (3), 370 – 384.
- Yu, Y., Privette, J. L. and Pinheiro, A. C. (2008). Evaluation of Split-Window Land Surface Temperature Algorithms for Generating Climate Data Records. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.

Ελληνική

- Καρτάλης, Κ. & Φείδας, Χ., (2006). Αρχές και Εφαρμογές της Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης. Εκδόσεις, Β. Γκιούρδας Εκδοτική.
- Μερτίκας Σ., (2000). Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας. Εκδόσεις ION, Αθήνα.
- Μητράκα Ζ., (2011). Ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων σε επίπεδο υποεικονοστοιχείου για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής επιφάνειας εδάφους σε αστικές περιοχές. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Παράρτημα