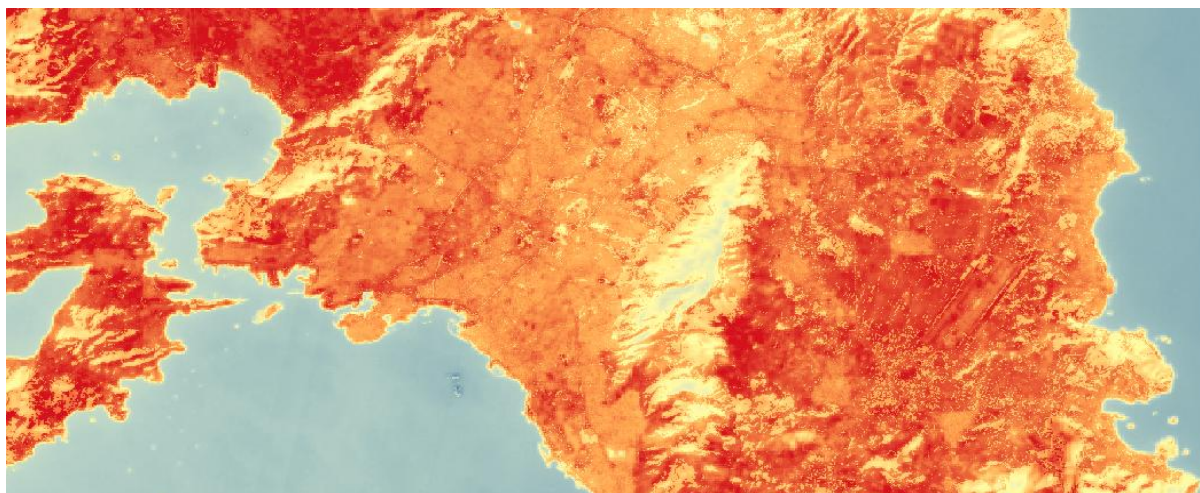




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

## Συσχέτιση βλάστησης και θερμοκρασιών αέρα και εδάφους από ταυτόχρονες δορυφορικές και επίγειες παρατηρήσεις στην Αττική



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σαρέλλη Αναστασία

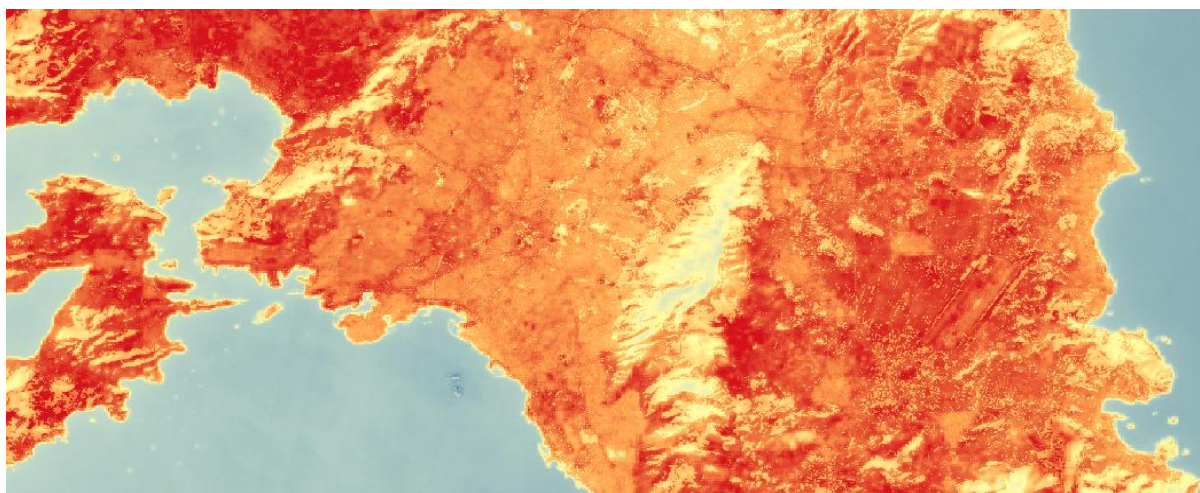
ΑΘΗΝΑ 2016

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ  
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF RURAL AND SURVEY ENGINEERING  
DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY – REMOTE SENSING LABORATORY

## Correlation between vegetation and air and land surface temperature from concurrent satellite and terrestrial measurements in Attica, Greece



DIPLOMA THESIS

Sarelli Anastasia

ATHENS 2016

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ  
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Συσχέτιση βλάστησης και θερμοκρασιών αέρα και εδάφους από  
ταυτόχρονες δορυφορικές και επίγειες παρατηρήσεις στην Αττική

Εγκρίθηκε από την τριμελή  
εξεταστική επιτροπή την  
.....2016

.....  
.....  
Κ. Καραντζαλος  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
.....  
Δ. Αργιαλάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
.....  
Β. Καραθανάση  
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ  
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ

*Αφιερώνεται*

*στους γονείς μου*

*Γιάννη και Μαίρη,*

*στην αδερφή μου*

*Ειρήνη*

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ  
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια περάτωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το θέμα της ανατέθηκε από τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Καράντζαλο στο αντικείμενο της τηλεπισκόπησης στο θερμικό υπέρυθρο, καθώς είχα εκφράσει από προηγούμενα έτη το ενδιαφέρον μου πάνω σε αυτό το πεδίο.

Η επιστήμη του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού επαφίεται σε ένα μεγάλο εύρος επιστημονικών αντικειμένων, όπως είναι η τηλεπισκόπηση, η γεωδαισία, η φωτογραμμετρία, το κτηματολόγιο, η χωροταξία, τα συγκοινωνιακά έργα, κ.ά. Το πλεονέκτημα της ειδικότητας αυτής αποτελεί η υψηλού επιπέδου αντίληψη και γνώση των χωρικών ιδιοτήτων του γεωγραφικού χώρου. Ο συνδυασμός της με την είσοδο ολοένα και νεώτερων δορυφορικών τεχνολογιών και ψηφιακών συστημάτων, έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεθοδολογιών για τη μελέτη του περιβάλλοντος και της κλιματικής αλλαγής σε παγκόσμιο, αλλά και σε τοπικό επίπεδο.

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον κ. Κωνσταντίνο Καράντζαλο για την εμπιστοσύνη, την υπομονή και τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης και συγγραφής της εργασίας αυτής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υπηρεσία Weather Underground για τα μετεωρολογικά δεδομένα που παρείχε, καθώς αποτέλεσαν ένα σημαντικό κομμάτι της εργασίας αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για όλη τη στήριξη και συμπαράσταση που μου έδειξε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και όλους μου τους φίλους και συμφοιτητές μου για τις υπέροχες αναμνήσεις που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.



Λογότυπο της υπηρεσίας Weather Underground © Copyright 2016 The Weather Company, LLC

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	9
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	13
ABSTRACT.....	15
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	19
1.1. Γενικά.....	19
1.2. Σκοπός της εργασίας .....	20
1.3. Δομή της εργασίας .....	20
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	23
2.1. Τηλεπισκόπηση στο Θερμικό Υπέρυθρο.....	23
2.2. Ο Συντελεστής Εκπομπής Ακτινοβολίας .....	25
2.2.1. Γενικά .....	25
2.2.2. Μέθοδοι Εκτίμησης Συντελεστή Εκπομπής Ακτινοβολίας από Δορυφορικά Δεδομένα.....	27
2.3. Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους .....	30
2.3.1. Εξίσωση Μετάδοσης Ακτινοβολίας .....	31
2.3.2. Μέθοδοι Εκτίμησης Θερμοκρασίας Επιφάνειας Εδάφους από Δορυφορικά Δεδομένα.....	31
2.3.3. Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους και Θερμοκρασία Αέρα .....	33
2.3.4. Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους και Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης NDVI .....	34
3. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	37
3.1. Περιοχή Μελέτης.....	37
3.1.1. Φυσικό και Ανθρωπογενές Περιβάλλον .....	37
3.1.2. Κλίμα .....	37
3.2. Τηλεπισκοπικά Δεδομένα .....	39
3.2.1. Ο Landsat 8 OLI/TIRS .....	39
3.2.2. Surface Reflectance Product [61].....	42
3.3. Συλλογή Τηλεπισκοπικών Δεδομένων .....	44
3.4. Προεπεξεργασία Δεδομένων .....	45
3.5. Μετεωρολογικά Δεδομένα .....	49
3.5.1. Το δίκτυο Weather Underground .....	49

3.5.2.	Συλλογή Μετεωρολογικών Μετρήσεων .....	49
4.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	51
4.1.	Μέθοδος Στατιστικής Ανάλυσης: Γραμμική Παλινδρόμηση .....	51
4.2.	Επεξεργασία Δεδομένων.....	53
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	61
5.1.	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας .....	61
5.2.	Χρονοσειρές .....	61
5.3.	Γραμμική Παλινδρόμηση Μεταξύ $T_{air}$ και LST .....	62
5.4.	Σχέση $T_{air}$ με NDVI .....	63
5.5.	Γραμμική Παλινδρόμηση Μεταξύ $T_{air}$ και LST με τη χρήση του NDVI ....	63
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	69
6.1.	Σύνοψη αποτελεσμάτων .....	69
6.2.	Σύνοψη Συμπερασμάτων .....	71
6.3.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	72
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	79

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη και εκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους από δορυφορικά δεδομένα αλλά και η εύρεση συσχέτισής της με τη θερμοκρασία αέρα είναι ένα αντικείμενο που απασχολεί έντονα την επιστημονική κοινότητα για αρκετές δεκαετίες. Λίγες όμως μελέτες έχουν διεξαχθεί ως προς τη σχέση θερμοκρασίας αέρα και εδάφους με τη βλάστηση σε μία περιοχή.

Προς την κατεύθυνση αυτή, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι συσχέτιση μεταξύ των θερμοκρασιών αέρα και εδάφους αλλά και μεταξύ των θερμοκρασιών αυτών και της βλάστησης σε ένα αστικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη έγινε στην περιοχή της Αττικής με δορυφορικές εικόνες του δέκτη Landsat 8 OLI/TIRS μεταξύ των χρονολογιών 30/04/2013 και 30/11/2015 και με επίγειες μετεωρολογικές μετρήσεις από σταθμούς στην περιοχή μελέτης, οι οποίες αποκτήθηκαν από την υπηρεσία Weather Underground.

Αρχικά υπολογίστηκε ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας με βάση τον δείκτη βλάστησης NDVI για όλα τα σημεία που χωροθετούνταν οι μετεωρολογικοί σταθμοί κάθε εικόνας Landsat 8, με τη χρήση του οποίου εκτιμήθηκαν οι επιφανειακές θερμοκρασίες στα σημεία αυτά. Με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης για όλα τα θερμοκρασιακά δεδομένα – δορυφορικά και επίγεια – υπολογίστηκε  $R^2 = 0.88$ , ενώ στα δεδομένα εκτός από εκείνα με νεφοκάλυψη ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν λίγο χαμηλότερος ( $R^2 = 0.87$ ).

Ως προς τη συσχέτιση των θερμοκρασιών αέρα και εδάφους με τη βλάστηση, βρέθηκε πως υπάρχει αρνητική συσχέτιση κατά τη θερινή αλλά και κατά τη χειμερινή περίοδο. Επομένως, δημιουργήθηκαν τρεις κατηγορίες εδάφους με βάση τον δείκτη βλάστησης NDVI για τις οποίες εφαρμόστηκε η μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης για τα θερμοκρασιακά δεδομένα. Παρατηρήθηκε υψηλότερη συσχέτιση μεταξύ των θερμοκρασιών αέρα και εδάφους όταν η τιμή του NDVI ήταν χαμηλότερη του 0.2 και μεγαλύτερη του 0.4, όταν δηλαδή η ύπαρξη ή μη υγιούς βλάστησης σε μία αστική περιοχή είναι πιο βέβαιη.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν νέες τιμές θερμοκρασίας αέρα βάσει των εξισώσεων της γραμμικής παλινδρόμησης που εκτιμήθηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Η απόκλιση των νέων τιμών ( $T_{air}'$ ) με των τιμών που είχαν μετρηθεί από τους μετεωρολογικούς σταθμούς ( $T_{air}$ ) ανέρχεται στο  $\pm 7.5^\circ\text{C}$ , με το 36% των τιμών να έχει διαφορά  $\leq 1^\circ\text{C}$  και το 17%  $\geq 3^\circ\text{C}$ . Τέλος, για να γίνει εντοπισμός των πιθανών πηγών σφαλμάτων, υπολογίστηκαν οι τυπικές αποκλίσεις των  $T_{air}'$  ανά κατηγορία και ανά ημερομηνία και πραγματοποιήθηκε συσχέτιση των σφαλμάτων αυτών με την ατμοσφαιρική παράμετρο της σχετικής υγρασίας.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα των συσχετίσεων μεταξύ των θερμοκρασιών αέρα και εδάφους και η σχέση των θερμοκρασιών αυτών με τη βλάστηση ήταν ενθαρρυντικά. Παρ'όλα αυτά, για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα διαπιστώθηκε η ανάγκη συμπερίληψης κι άλλων δεδομένων που περιγράφουν πιο αναλυτικά το αστικό περιβάλλον, καθώς και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες τη στιγμή της κάθε λήψης για κάθε σημείο.

**Λέξεις – Κλειδιά:** τηλεπισκόπηση στο θερμικό υπέρυθρο, θερμοκρασία εδάφους, θερμοκρασία αέρα, συντελεστής εκπομπής, γραμμική παλινδρόμηση, NDVI και θερμοκρασία, Landsat 8

## ABSTRACT

The estimation and study of land surface temperature (LST) from satellite data and the correlation between LST and air temperature is a subject of great concern in the scientific community. Few studies, though, have been conducted in order to find a relationship between air and land surface temperature with the use of vegetation in a specific area.

To this end, the main objective of the present diploma thesis is the correlation between air and land surface temperatures, and between these temperatures and vegetation in an urban environment. The study was conducted for the region of Attica, Greece, with the use of satellite images of the Landsat 8 OLI/TIRS sensors and real – time air temperature measurements obtained from Weather Underground Company, for a 2.5 years period of time.

The first step was the emissivity retrieval with the NDVI method for all the points where the meteorological stations were located, with which LSTs were estimated. Regression analysis for all the temperature data showed a good correlation of  $R^2 = 0.88$ , whereas for the data with no cloud detection the correlation was quite similar ( $R^2 = 0.87$ ).

Regarding the relationship between vegetation and air and land surface temperatures, it was found that a negative correlation exists during both summer and winter. Consequently, three different land use classes were created based on NDVI. Through a regression procedure these classes were correlated with the temperature data. The evaluation indicated higher correlation rates for the regions with lower ( $<0.2$ ) or higher ( $>0.4$ ) NDVI values, thus for regions that the existence or not of vegetation was more certain.

Afterwards, new air temperature values ( $T_{air}'$ ) were estimated based on the equations of linear regression that were computed at the previous step. Differences of  $\pm 7.5^{\circ}\text{C}$  between new and real air temperature values were found, from which the 36% of the values had differences  $\leq 1^{\circ}\text{C}$  and the 17%  $\geq 3^{\circ}\text{C}$ . Potential sources of uncertainty and error were also evaluated, firstly by the calculation of standard deviations of  $T_{air}'$  by class and by date and secondly by correlation between these errors and relative humidity.

To conclude, vegetation and land surface and air temperature relations can be extracted at a reasonable accuracy level with this method. These results are promising for the estimation of air temperature of an area from satellite data and vice versa. However, the use of urban analytics data and real – time atmospheric information of the region of interest is considered mandatory for the achievement of higher accuracy at the results.

**Keywords:** thermal remote sensing, land surface temperature, LST, air temperature, emissivity, linear regression, regression analysis, NDVI and temperature, relative humidity and temperature, Landsat 8



ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ  
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ  
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Γενικά

*Τηλεπισκόπηση* είναι η επιστήμη και η τέχνη απόκτησης πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μία περιοχή ή ένα φαινόμενο διά μέσου της ανάλυσης δεδομένων, τα οποία έχουν αποκτηθεί από έναν ανιχνευτή που δεν είναι σε επαφή με το υπό έρευνα αντικείμενο, περιοχή ή φαινόμενο [52]. Η συλλογή δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί απ' ευθείας στο πεδίο (επίγεια συλλογή δεδομένων) ή σε απόσταση από το υπό μελέτη αντικείμενο [53]. Κάποιες από τις βασικές εφαρμογές της είναι οι ακόλουθες:

- παρακολούθηση της ατμόσφαιρας και πρόβλεψη του καιρού
- σχεδιασμός χρήσεων γης
- μελέτη των οικοσυστημάτων
- εκμετάλλευση γεωργικών εκτάσεων
- πρόγνωση και παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών
- δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους
- χαρτογράφηση των βιοφυσικών παραμέτρων των ωκεανών

Για την παρατήρηση της γήινης επιφάνειας από απόσταση, οι ανιχνευτές μετρούν το ποσοστό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται από τα διάφορα υλικά (Πηγή: <http://el.wikipedia.org>). Η τηλεπισκόπηση στο θερμικό υπέρυθρο αφορά την ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα αντικείμενα μεταξύ των μηκών κύματος 3.0 – 14.0 μm του Η/Μ φάσματος, και παρέχει πληροφορίες για τις θερμικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος. Μερικές από τις εφαρμογές της είναι η ανάλυση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, η παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών, η παρακολούθηση ρύπανσης των υδάτων, και σε μικρότερη κλίμακα αποτυπώσεις υγρασίας σε στέγες κτιρίων και μελέτες μόνωσης κατοικιών [53].

Αντίστοιχα, η επιστήμη που εξετάζει την ατμόσφαιρα και τα φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα σε αυτή ονομάζεται *Μετεωρολογία*. Η Μετεωρολογία χρησιμοποιεί εξειδικευμένα όργανα φυσικής για τη μέτρηση των διάφορων μετεωρολογικών στοιχείων και παραμέτρων. Η κατάσταση της ατμόσφαιρας πάνω από μία περιοχή για μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, συμπεριλαμβανόμενης και της εξέλιξής της, ονομάζεται καιρός [54].

Η κατανομή του καιρού πάνω στην επιφάνεια της γης για μία ορισμένη χρονική στιγμή μπορεί να δώσει μία μεγάλη ποικιλία καιρικών καταστάσεων επομένως είναι άμεσα συνυφασμένη με τη γεωγραφία και την τοπολογία μίας περιοχής. Στην πράξη, ο καιρός αντιπροσωπεύει την κατάσταση της ατμόσφαιρας και αναφέρεται σε μεταβολές στις συνθήκες θερμότητας, υγρασίας και κίνησης του αέρα. Εν

ολίγοις, ο καιρός οφείλεται στις διεργασίες που συντελούν στην εξισορρόπηση των διαφορών που εμφανίζονται από ανισοκατανομή της ηλιακής ενέργειας πάνω στην επιφάνεια του πλανήτη [54].

## 1.2. Σκοπός της εργασίας

Εδώ και αρκετές δεκαετίες πολλές μελέτες έχουν γίνει στα πλαίσια της κλιματικής αλλαγής σε παγκόσμιο και τοπικό επίπεδο. Κύριο αντικείμενο αποτελεί η συσχέτιση της βλάστησης με τη θερμοκρασία που παρέχεται από τα δορυφορικά δεδομένα στο θερμικό υπέρυθρο, η οποία αντιστοιχεί στη θερμοκρασία που εκπέμπεται από τα αντικείμενα στην επιφάνεια της γης, ή αλλιώς στην επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους. Επιπρόσθετα, έχουν γίνει προσπάθειες συσχέτισης των θερμοκρασιακών δεδομένων που παρέχονται από δορυφορικούς δέκτες και από μετεωρολογικούς σταθμούς, με στόχο να εκτιμηθεί ένα μοντέλο για κάθε περιοχή ώστε να είναι δυνατή η εύρεση θερμοκρασιών αέρα από δορυφορικά δεδομένα και το αντίθετο. Και για τα δύο αυτά αντικείμενα, μελέτες έχουν καταλήξει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα με διάφορες μεθοδολογίες και με τη χρήση πολλαπλών 2Δ και 3Δ παραμέτρων. Παράλληλα έχουν εφαρμοστεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως για παράδειγμα δασικές περιοχές, χέρσα τμήματα εδάφους, αστικές περιοχές, κ. ά.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια συνδυασμού αυτών των δύο αντικειμένων, δηλαδή συσχέτιση των θερμοκρασιών αέρα και εδάφους από ταυτόχρονες μετρήσεις, δορυφορικές και επίγειες, με βάση τη βλάστηση σε ένα αστικό περιβάλλον. Παρόλο που μία αστική περιοχή αποτελεί ένα σύνθετο περιβάλλον, καθώς υπάρχει εναλλαγή στις χρήσεις γης από τις οποίες αποτελείται σε όλη την έκτασή της, η βλάστηση εξακολουθεί και παίζει καθοριστικό παράγοντα στη διαμόρφωση του κλίματος σε όλη την περιοχή, αλλά και στη διαμόρφωση μικροκλιμάτων εντός αυτής.

## 1.3. Δομή της εργασίας

Παρακάτω γίνεται μία παρουσίαση της οργάνωσης των κεφαλαίων της εργασίας αυτής, καθώς και του περιεχομένου του εκάστου κεφαλαίου.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση στις βασικές έννοιες της τηλεπισκόπησης στο θερμικό υπέρυθρο τμήμα του Η/Μ φάσματος, στην εκτίμηση επιφανειακών θερμοκρασιών εδάφους από δορυφορικά δεδομένα και στην εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας. Επιπλέον, παρουσιάζεται βάσει βιβλιογραφίας η σχέση που υπάρχει μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους και θερμοκρασίας αέρα, όπως

επίσης και η σχέση που υπάρχει μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους και του δείκτη βλάστησης NDVI.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται η περιοχή μελέτης και τα δορυφορικά και μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, ακολουθεί η προεπεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων και υπολογίζονται οι συντελεστές εκπομπής και οι επιφανειακές θερμοκρασίες εδάφους για τα σημεία που χωροθετούνται οι μετεωρολογικοί σταθμοί.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε στα δεδομένα αυτά και η ανάρτηση των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται προσπάθεια εντοπισμού των σφαλμάτων με τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, ανά κατηγορία κάλυψης γης, ανά ημερομηνία και με τη χρήση της σχετικής υγρασίας.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρατίθενται συνοπτικά τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία αυτή. Επισημαίνονται οι πηγές σφαλμάτων, ενώ τέλος δίνονται κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα σε θέματα που αφορούν την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής και, κατά συνέπεια, την εκτίμηση των θερμοκρασιών εδάφους, και τη βελτίωση της μεθοδολογικής προσέγγισης που ακολουθήθηκε.

Τέλος, ακολουθεί ο πίνακας βιβλιογραφίας πάνω στην οποία στηρίχτηκε η εργασία αυτή και στη συνέχεια το Παράρτημα όπου αναγράφονται τα χαρακτηριστικά των μετεωρολογικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν.



## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η θεωρία στην οποία στηρίζεται η εργασία αυτή, ενώ παράλληλα γίνεται και βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά το αντικείμενό της.

### 2.1. Τηλεπισκόπηση στο Θερμικό Υπέρυθρο

Το μέλαν σώμα είναι ένα θεωρητικό, ιδανικό σώμα το οποίο έχει την ιδιότητα να απορροφά το σύνολο της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω του και να εκπέμπει ενέργεια στο μέγιστο βαθμό ανά μονάδα επιφάνειας σε όλα τα μήκη κύματος. Η συνολική ενέργεια που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία του. Ένας δέκτης καταγράφει πληροφορίες για την συνολική ποσότητα ακτινοβολούμενης ενέργειας, η οποία εξέρχεται από τα αντικείμενα σε συγκεκριμένο εύρος μηκών κύματος και για το κύριο μήκος κύματος στο οποίο παρουσιάζεται η μεγαλύτερη ποσότητα ακτινοβολίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση τριών νόμων της φυσικής: τον νόμο Planck, τον νόμο Stefan – Boltzmann και τον νόμο μετατόπισης Wien.

#### *Νόμος Planck*

Με την βοήθεια της κβαντικής θεωρίας, ο Planck απέδειξε ότι η ειδική ένταση της ακτινοβολίας ( $L$ ) που εκπέμπεται από τη μονάδα επιφάνειας μέλανος σώματος θερμοκρασίας  $T$  ισούται με:

$$L = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} \quad (2.1)$$

όπου  $C_1$  και  $C_2$  είναι σταθερές, με  $C_1 = 1.191 \cdot 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$  και  $C_2 = 1.439 \cdot 10^4 \text{ } \mu\text{m K}$  και  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος.

#### *Νόμος Stefan – Boltzmann*

Η ροή της ολικής (για όλα τα μήκη κύματος) ακτινοβολούμενης ενέργειας  $M_b$  (σε  $\text{W m}^{-2}$ ) ισούται με:

$$M_b = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

όπου  $\sigma$  είναι η σταθερά Stefan – Boltzmann η οποία ισούται με  $5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin.

Από τον νόμο αυτό προκύπτει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας μελανού σώματος, αυξάνεται και η ροή της ολικής ακτινοβολούμενης ενέργειας.

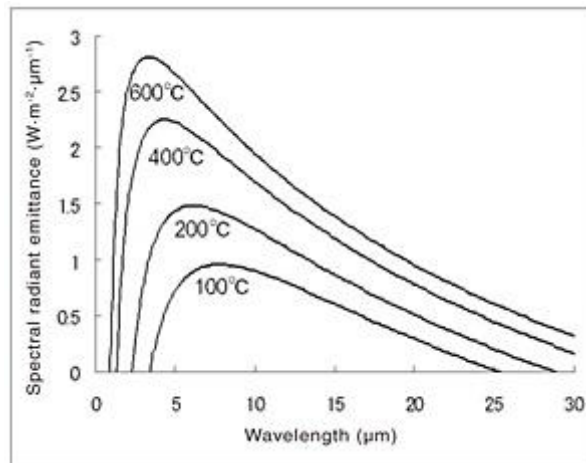
### Νόμος μετατόπισης Wien

Ο νόμος μετατόπισης Wien υπολογίζει το μήκος κύματος ενός μέλαν σώματος σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία. Εάν  $\lambda_{max}$  είναι το μήκος κύματος στο οποίο η συνάρτηση του Planck παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή, δηλαδή εκεί όπου συμβαίνει η μέγιστη φασματική εκπομπή ακτινοβολίας ενός αντικειμένου, από τα πιο πάνω προκύπτει ότι:

$$\lambda_{max} = \frac{k}{T} \quad (2.3)$$

όπου  $k$  είναι μία σταθερά ίση με 2898  $\mu\text{m K}$ .

Από τον νόμο αυτό, προκύπτει ότι όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία του μέλανος σώματος, τόσο το μέγιστο που παρουσιάζει η ακτινοβολία  $L$  μετατοπίζεται σε μικρότερα μήκη κύματος (Εικόνα 2-1).



Εικόνα 2-1 Διάγραμμα της έντασης ανά μονάδα μήκους κύματος σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για το μέλαν σώμα. Το μέγιστο της καμπύλης μετατοπίζεται σε μικρότερα μήκη κύματος όταν αυξάνεται η θερμοκρασία

Επομένως, βάσει των παραπάνω νόμων, η μέτρηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η θερμοκρασία μίας επιφάνειας και στην τηλεπισκόπηση.

Αξίζει να σημειωθεί πως η θερμοκρασία  $T$  στις παραπάνω εξισώσεις αντιστοιχεί στην θερμοκρασία ακτινοβολίας (radiant temperature,  $T_{rad}$ ), δηλαδή στην θερμοκρασία από την ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα συγκεκριμένο βάθος των αντικειμένων [1]. Για την περιοχή του θερμικού υπέρυθρου το βάθος αυτό είναι της τάξης κάποιων χιλιοστών του μέτρου [2]. Επομένως, η θερμοκρασία αυτή πρέπει να διαχωρίζεται από την κινητική ή την θερμοδυναμική θερμοκρασία [1][3].



## 2.2. Ο Συντελεστής Εκπομπής Ακτινοβολίας

### 2.2.1. Γενικά

Ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας (emissivity,  $\epsilon$ ) είναι ο λόγος της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα σώμα σε μία θερμοκρασία προς την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα με την ίδια θερμοδυναμική θερμοκρασία. Το εύρος τιμών του συντελεστή αυτού είναι μεταξύ 0 και 1, ενώ αποτελεί ένα μέτρο ικανότητας ενός υλικού να απορροφά και να εκπέμπει ενέργεια.

Ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες [4][5][6][7][8], όπως:

- **το οπτικό πεδίο**
- **την οπτική γωνία του δέκτη**
- **το χρώμα:** τα σκουρόχρωμα αντικείμενα έχουν υψηλότερο συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας συγκριτικά με τα ανοιχτόχρωμα, καθώς είναι καλύτεροι απορροφητές και πομποί ακτινοβολίας
- **τη χημική σύνθεση**
- **την τραχύτητα επιφάνειας:** όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα της επιφάνειας ενός αντικειμένου σε σχέση με το μέγεθος μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνολική επιφάνεια του αντικειμένου και η δυνατότητα απορρόφησης και επανεκπομπής ενέργειας
- **την περιεκτικότητα σε υγρασία:** τα σωματίδια του εδάφους που περιέχουν υγρασία έχουν υψηλός συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας, καθώς όσο περισσότερη υγρασία περιέχει ένα αντικείμενο, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητά του να απορροφάει ενέργεια
- **το μήκος κύματος:** για μήκη κύματος 4 – 100  $\mu\text{m}$  (θερμικό υπέρυθρο), σχεδόν όλες οι επιφάνειες είναι ικανές στο να απορροφούν και να εκπέμπουν ενέργεια, για μήκη κύματος 0.1 – 4  $\mu\text{m}$  (εγγύς υπέρυθρο) ο συντελεστής εκπομπής είναι σχετικά χαμηλός, ενώ για μήκη κύματος 0.1 – 100  $\text{cm}$  (μικροκύματα) ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται από το είδος και την κατάσταση της επιφάνειας [9]
- **τη συμπίεση του εδάφους**

### *Νόμος Ακτινοβολίας του Kirchhoff*

Κατά την αρχή διατήρησης της φυσικής ενέργειας, θεωρούμε τη σχέση μεταξύ της προσπίπτουσας, ανακλώμενης, απορροφούμενης και μεταδιδόμενης ενέργειας σε ένα αντικείμενο ως:

$$E_I = E_A + E_R + E_T \quad (2.4)$$

όπου  $E_I$  η ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στο αντικείμενο,  $E_A$  η συνιστώσα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από το αντικείμενο,  $E_R$  η συνιστώσα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται από το αντικείμενο και  $E_T$  η συνιστώσα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που μεταφέρεται μέσα στο αντικείμενο [52].

Εάν η εξίσωση διαιρεθεί με την ποσότητα  $E_I$ , προκύπτει η σχέση:

$$1 = \frac{E_A}{E_I} + \frac{E_R}{E_I} + \frac{E_T}{E_I} \quad (2.5)$$

Η Εξίσωση 2.5 αποτελεί την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, η οποία μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (2.6)$$

όπου  $\alpha_\lambda$ ,  $\rho_\lambda$  και  $\tau_\lambda$  είναι η απορροφητικότητα, η ανακλαστικότητα και η διαπερατότητα (συντελεστής μετάδοσης) του αντικειμένου.

Σύμφωνα με τον **νόμο ακτινοβολίας του Kirchhoff**, η ικανότητα εκπομπής ενός σώματος ή μίας επιφάνειας σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας ισούται με την ικανότητα απορρόφησής του, δηλαδή:

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda \quad (2.7)$$

Επομένως, η Εξίσωση 2.6 γράφεται ως:

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (2.8)$$

Εάν θεωρηθεί πως τα περισσότερα φυσικά υλικά είναι συνήθως αδιαπέραστα από τη θερμική υπέρυθη ακτινοβολία, ότι δηλαδή μεταδίδεται και εξέρχεται από την άλλη πλευρά του αντικειμένου ελάχιστη ισχύς ακτινοβολίας [53], τότε ισχύει ότι  $\tau_\lambda = 0$  και επομένως η Εξίσωση 2.8 μετατρέπεται στην εξίσωση:

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (2.9)$$

Αυτή η εξίσωση (Εξίσωση 2.9) αποδεικνύει πως ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας ενός αντικειμένου έχει άμεση σχέση με την ανακλαστικότητά του στο θερμικό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Δηλαδή, όσο υψηλότερη είναι η ανακλαστικότητα ενός αντικειμένου, τόσο μικρότερος ο συντελεστής εκπομπής.

Ο συντελεστής εκπομπής ανακλαστικότητας έχει μεγάλη σημασία κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας ακτινοβολίας  $T_{rad}$ . Από τον νόμο των Stefan – Boltzmann (Εξίσωση 2.2), για τα πραγματικά υλικά προκύπτει ότι:

$$M_b = \varepsilon \sigma T_{rad}^4 \quad (2.10)$$

Τα συστήματα τηλεπισκόπησης στο θερμικό υπέρυθρο καταγράφουν τη θερμοκρασία ακτινοβολίας του εδάφους ( $T_{rad}$ ) και όχι την πραγματική κινητική θερμοκρασία ( $T_{kin}$ ). Η σχέση μεταξύ των δύο αυτών θερμοκρασιών δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$T_{rad} = \varepsilon^{1/4} T_{kin} \quad (2.11)$$

Η Εξίσωση 2.11 δείχνει ότι η θερμοκρασία ακτινοβολίας για οποιοδήποτε αντικείμενο που καταγράφεται από έναν τηλεπισκοπικό δέκτη θα είναι μικρότερη από την κινητική θερμοκρασία του.

### 2.2.2. Μέθοδοι Εκτίμησης Συντελεστή Εκπομπής Ακτινοβολίας από Δορυφορικά Δεδομένα

Ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας όταν εκτιμάται από δορυφορικά δεδομένα χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές χαρτογράφησης του εδάφους και της εδαφικής υγρασίας, σε μελέτες εξατμισοδιαπνοής από τη βλάστηση και, γενικότερα, σε εκτιμήσεις προϋπολογισμού της ενέργειας στην επιφάνεια του εδάφους [6].

Τα κύρια προβλήματα που αφορούν την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon$  είναι [10]:

- η ραδιομετρική βαθμονόμηση του δορυφορικού δέκτη
- η ύπαρξη σύννεφων
- ατμοσφαιρικές διορθώσεις
- η ισχυρή εξάρτηση του συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon$  με την θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους (LST), δημιουργώντας ένα σύστημα εξισώσεων μαθηματικώς μη επιλύσιμο.

Επιπλέον, ένα ακόμη πρόβλημα για τη σωστή εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας αποτελεί και η χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφορικού δέκτη που χρησιμοποιείται, ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα [10]. Μία αστική περιοχή αποτελεί ένα σύνθετο περιβάλλον, κάτι το οποίο καθιστά δύσκολη την εξαγωγή των συντελεστών εκπομπής για κάθε στοιχείο του, καθώς σε κάθε εικονοστοιχείο είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν παραπάνω από μία χρήσεις γης, όπως για παράδειγμα κάποιο πάρκο (βλάστηση), σε συνδυασμό με κτίρια κατοικίας (τσιμέντο) και τμήμα οδικού δικτύου (άσφαλτος). Επομένως, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μορφολογία της περιοχής, η γεωμετρία των στοιχείων που την απαρτίζουν και οι γειτνιάσεις μεταξύ των διαφορετικών περιβάλλοντων που υπάρχουν.

Γενικά, η μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων της ανακλαστικότητας και του συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$  μπορούν να μεταβάλλουν και τη συνολική ακτινοβολία της εξεταζόμενης επιφάνειας. Επομένως, είναι απαραίτητη η *a priori* γνώση των τιμών του συντελεστή  $\epsilon$  ώστε να είναι εφικτή η διόρθωση των τιμών ακτινοβολίας του εδάφους (surface radiance) και η εξαγωγή των τιμών LST.

Πίνακας 2-1 Τιμές συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας για χρήσεις γης ενός αστικού περιβάλλοντος [51]

Χρήση γης	Συντελεστής εκπομπής
Αστικός ιστός / πυκνή δόμηση	0.946
Αστικός ιστός / μεσαίας πυκνότητας δόμηση	0.964
Σύνθετος αστικός ιστός	0.950
Αγροτική περιοχή	0.980
Υδάτινη επιφάνεια	0.990

Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά οι βασικότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην επιστημονική κοινότητα για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας  $\epsilon$  σε πολυφασματικούς δέκτες:

#### Εμπειρικές μέθοδοι

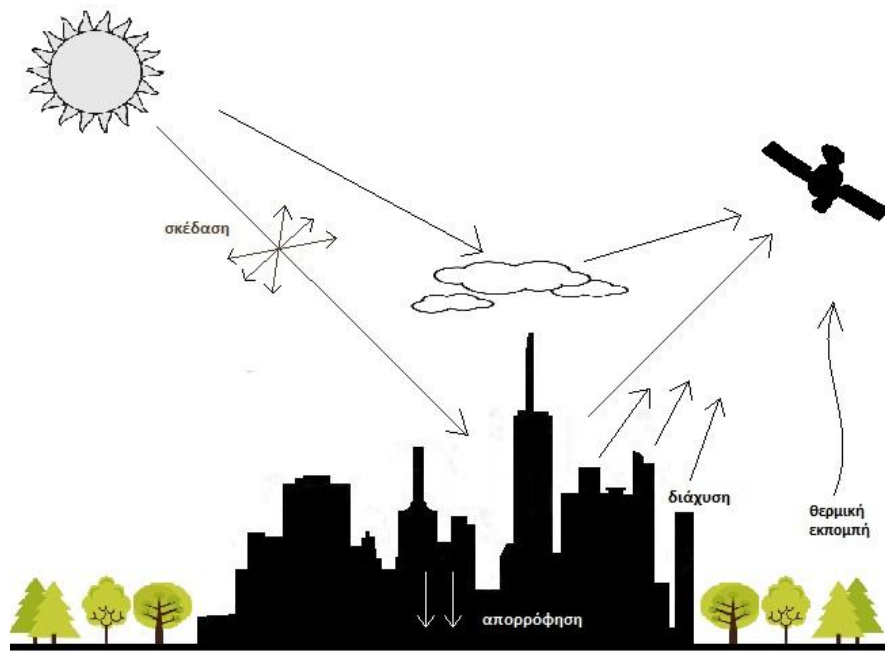
- με βάση την ταξινόμηση της περιοχής σε χρήσεις γης [11]
  - ακριβής για τις περισσότερες χρήσεις γης, κυρίως σε υψηλής ανάλυσης τηλεπισκοπικά δεδομένα, με *a priori* γνώση των συντελεστών εκπομπής για κάθε κλάση
  - σχετικά όχι τόσο αξιόπιστη, καθώς δεν υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ της ταξινόμησης με δεδομένα στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο και του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας και των θερμικών καναλιών
- με βάση τον δείκτη βλάστησης NDVI [12][13][14][15]
  - είναι άμεσα συνυφασμένη με την περιοχή μελέτης
  - απαιτούνται μόνο τα κανάλια στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο
  - εφικτή η εκτίμηση συντελεστή εκπομπής σε εικόνες μεγαλύτερης ανάλυσης για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα

### Μέθοδοι με πολλαπλά θερμικά κανάλια

- με βάση τις ιδιότητες φάσματος του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας
  - υπόθεση ότι ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας σε ένα κανάλι είναι χρονικά αμετάβλητος (μέθοδος two-temperature, TTM) [16]
  - υπόθεση ότι ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας για συγκεκριμένα μήκη κύματος έχει αμετάβλητο φάσμα (μέθοδος grey-body emissivity, GBE) [17]
  - έχοντας a priori γνώση του εύρους κατανομής του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας (μέθοδος emissivity bounds, EBM) [18]
- μέθοδος TES
  - βασική υπόθεση: η εμπειρική σχέση μεταξύ του ελάχιστου συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας και της φασματικής διαφοράς παραμένει αληθής για όλες τις επιφάνειες, εκτός από τις μεταλλικές
  - δεν απαιτείται η a priori γνώση της επιφάνειας
  - κύρια πηγή σφάλματος αποτελεί η ατμοσφαιρική υγρασία [19]
  - απαιτεί τη χρήση τουλάχιστον τριών καναλιών στο θερμικό υπέρυθρο
- μέθοδος κανονικοποιημένου συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας (Normalization emissivity method, NEM) [20][21]
  - σταθερός συντελεστής εκπομπής για όλα τα κανάλια N κάθε εικονοστοιχείου, κάτι το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό N κινητικών θερμοκρασιών κάθε εικονοστοιχείου από τις μετρημένες ακτινοβολίες
  - απαιτεί γνώση ατμοσφαιρικών μετρήσεων
- μέθοδος TISI
  - σχεδόν ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους [22][23][24]
  - η θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους πρέπει να εκτιμηθεί από μία υποθετική αρχική τιμή του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας [25]
  - η μέθοδος αυτή είναι συμπληρωματική της μεθόδου με τη χρήση του δείκτη NDVI και μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερα αποτελέσματα εάν εφαρμοστούν και οι δύο
  - απαιτεί τη χρήση δύο καναλιών το θερμικό υπέρυθρο

### 2.3. Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους

Το εδάφος αποτελεί τον βασικότερο δέκτη της ηλιακής ακτινοβολίας. Μέσα από τις διαδικασίες της απορρόφησης, της διάχυσης, της εκπομπής και της σκέδασης, η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα, καθορίζει και την θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους.



Εικόνα 2-2 Διαγραμματική απεικόνιση των διεργασιών που ακολουθεί η ηλιακή ακτινοβολία. Η ακτινοβολία σκεδάζεται λόγω σωματιδίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, προσπίπτει στα στοιχεία του εδάφους, διαχέεται από τα στοιχεία του εδάφους σε όμορα αντικείμενα ή στην ατμόσφαιρα και ακολουθεί η ανάκλαση στον δορυφορικό δέκτη. Ένα μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από τα αντικείμενα και τα σωματίδια, ενώ ένα άλλο εκπέμπεται ως θερμική ενέργεια.

Επομένως, η επιφανειακή θερμοκρασία μιας περιοχής είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους στις φυσικές διεργασίες της ενέργειας στην επιφάνεια του εδάφους. Κάποιες από τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται είναι στα πλαίσια του υδρολογικού κύκλου και της εξατμισοδιαπνοής, καθώς και για τη διαχείριση της βλάστησης και του αστικού κλίματος. Όταν συλλέγονται δεδομένα πολλών ετών, η θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση κλιματολογικών τάσεων είτε σε τοπικό είτε σε παγκόσμιο επίπεδο [26].

### 2.3.1. Εξίσωση Μετάδοσης Ακτινοβολίας

Η μετάδοση της ακτινοβολίας αφορά την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του πεδίου ακτινοβολίας και του ενεργειακού επίπεδου των μορίων των αντικειμένων, όπως αυτό ορίζεται από τον νόμο του Boltzmann. Η Εξίσωση Μετάδοσης Ακτινοβολίας (Radiative Transfer Equation, RTE) ορίζει ότι η ένταση της ακτινοβολίας  $I_0$  κατά τη διάρκεια της διάδοσής της προς μία κατεύθυνση είναι αντικείμενο απωλειών λόγω απορρόφησης και διάχυσης αλλά και αύξησής της λόγω εκπομπής και σκέδασης της ακτινοβολίας [58].

Μία απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης είναι η εξής [27]:

$$B(T) = \tau [\varepsilon L + (1 - \varepsilon) I^\downarrow] + I^\uparrow \quad (2.12)$$

όπου  $B(T)$  είναι η ακτινοβολία που φτάνει στον δέκτη με θερμοκρασία φωτεινότητας  $T$ ,  $L$  η ακτινοβολία της επιφάνειας του εδάφους,  $\tau$  η ατμοσφαιρική διαπερατότητα ενός καναλιού,  $\varepsilon$  η εκπομπή της επιφάνειας του εδάφους,  $I^\downarrow$  η κατερχόμενη ακτινοβολία και  $I^\uparrow$  η ανερχόμενη ακτινοβολία.

### 2.3.2. Μέθοδοι Εκτίμησης Θερμοκρασίας Επιφάνειας Εδάφους από Δορυφορικά Δεδομένα

Οι δορυφορικοί δέκτες στο θερμικό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (10 – 12  $\mu\text{m}$ ) καταγράφουν την ενέργεια που εκπέμπεται από τα αντικείμενα στην επιφάνεια του εδάφους, η οποία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της εκπεμπόμενης θερμοκρασίας, ή αλλιώς, της θερμοκρασίας φωτεινότητας των αντικειμένων αυτών. Με βάση τη θεωρία που αναπτύχθηκε στα παραπάνω εδάφια, παρακάτω αναγράφονται οι τρεις βασικότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση της κινητικής θερμοκρασίας της επιφάνειας εδάφους.

Σημειώνεται πως μία αβεβαιότητα της τάξης του 0.01 στο συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει σφάλμα 0.5°C στον υπολογισμό του LST. Το σφάλμα αυτό μπορεί να φτάσει και τον 1 °C κατά τους θερινούς μήνες, ακόμα και αν υπάρχει λιγότερη υγρασία στην ατμόσφαιρα [28].

#### *Η μέθοδος με βάση την Εξίσωση Μετάδοσης Ακτινοβολίας*

Με βάση τον νόμο του Planck (Εξίσωση 2.1) και την εξίσωση μετάδοσης ακτινοβολίας (Εξίσωση 2.12) μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους  $T_{LST}$  με τον παρακάτω τύπο [27]:

$$T_{LST} = \frac{C_1}{\lambda \ln \left( \frac{C_2}{\lambda^5 (B(T) - I^{\uparrow} - \tau(1-\varepsilon) I^{\downarrow} / \tau \varepsilon)} + 1 \right)} \quad (2.13)$$

με  $C_1 = 14387.7 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  και  $C_2 = 1.19104 \cdot 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ .

### Μέθοδος με ένα κανάλι (Single - Channel, SC)

Ο αλγόριθμος SC εξάγει την επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους με ένα κανάλι, χρησιμοποιώντας και τιμές της ποσότητας υδρατμών στην ατμόσφαιρα (water vapor content) για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς αυτή η παράμετρος επηρεάζει τις μετρήσεις των δορυφορικών δεκτών. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο SC είναι οι εξής [29]:

$$T_{LST} = \gamma \left[ \frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (2.14)$$

$$\gamma = \left\{ \frac{C_1 L}{B T^2} \left[ \frac{\lambda^4}{C_2} L + \lambda^{-1} \right] \right\}^{-1} \quad (2.15)$$

$$\delta = -\gamma L + B T \quad (2.16)$$

όπου  $T_{LST}$  η θερμοκρασία εδάφους,  $\varepsilon$  ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας,  $L$  η ακτινοβολία εδάφους,  $B T$  η θερμοκρασία φωτεινότητας, και  $\psi_i$  συντελεστές οι οποίοι υπολογίζονται με τη χρήση της ποσότητας υδρατμών.

### Μέθοδος Split - Window (SW)

Η μέθοδος SW χρησιμοποιεί δύο κανάλια στο θερμικό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, και με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα από τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. [30] Μία γενικευμένη μορφή της εξίσωσης για την εκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους  $T_{LST}$  είναι η Εξίσωση 2.17 [31]:

$$T_{LST} = b_0 + (b_1 + b_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + b_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{T_i + T_j}{2} + (b_4 + b_5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + b_6 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{T_i - T_j}{2} + b_7 (T_i - T_j)^2 \quad (2.17)$$

όπου  $\varepsilon$  η μέση εκπομπή ακτινοβολίας των δύο καναλιών,  $T_i$ ,  $T_j$  οι θερμοκρασίες φωτεινότητας κάθε καναλιού,  $\Delta\varepsilon$  η διαφορά των συντελεστών εκπομπής των δύο καναλιών και  $b_k$  ( $k = 0, 1, \dots, 7$ ) παράμετροι οι οποίοι υπολογίζονται με αλγόριθμους προσομοίωσης των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικρατούν τη στιγμή της κάθε λήψης.



### 2.3.3. Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους και Θερμοκρασία Αέρα

Η θερμοκρασία του αέρα αποτελεί το σημαντικότερο κλιματολογικό στοιχείο για μία περιοχή. Οι βασικότεροι παράγοντες που διαμορφώνουν την θερμοκρασία αέρα είναι:

- η ένταση και η διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας
- οι παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως η διάχυση
- η απόσταση από την θάλασσα
- τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους που συνδέονται με την ανακλαστικότητα του εδάφους και την φυτοκάλυψή του
- οι συναλλαγές θερμότητας επιφάνειας γης – ατμόσφαιρας
- τα θαλάσσια ρεύματα
- το υψόμετρο

Όσο αφορά τον τελευταίο παράγοντα, σημειώνεται πως η θερμοκρασία του αέρα ελαττώνεται με το ύψος μέσα στη τροπόσφαιρα και στη μετεωρολογία η μεταβολή αυτή ονομάζεται κατακόρυφη θερμοβαθμίδα. Κατά μέσο όρο η μεταβολή αυτή ισούται με 6.5 °C για κάθε 1000 m υψομέτρου [54].

Ως επιφανειακή θερμοκρασία θεωρείται η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους, η οποία, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί συνάρτηση της ποσότητας της θερμότητας που δέχεται και αυτής που ανακλά. Παράγοντες που επηρεάζουν την θερμοκρασία του εδάφους είναι τα φυσικά συστατικά που καθορίζουν και την υφή του, όπως επίσης η υγρασία που περιέχει. Για μία αστική περιοχή, τα στοιχεία που παίζουν σημαντικό ρόλο για την διαμόρφωση της επιφανειακής θερμοκρασίας είναι η έκταση και η πυκνότητα της βλάστησης, το ύψος των κτιρίων και το κύριο υλικό κατασκευής τους, η πυκνότητα και η δομή των κτιρίων σε έναν αστικό ιστό καθώς και η χρήση γης που εντοπίζεται σε μία περιοχή (κατοικία, εμπορικά κέντρα, βιομηχανικά κέντρα, κτλ) [32].

Η θερμοκρασία του αέρα μετριέται «υπό σκιά» μέσα σε ειδικό στέγαστρο, τον μετεωρολογικό κλωβό. Η διάταξη των μετεωρολογικών αυτών σταθμών εξαρτάται από την μορφολογία της κάθε περιοχής, και η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα γίνεται συνήθως 2m πάνω από την επιφάνεια όπου έχουν τοποθετηθεί οι σταθμοί. Συλλέγεται ως σημειακά δεδομένα τα οποία επεξεργάζονται για την εξαγωγή κλιματολογικών στοιχείων και θερμοκρασιακών καμπύλων σε μορφή χρονοσειρών για κάθε περιοχή. Στις ενδιάμεσες περιοχές των σταθμών όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις, τα θερμοκρασιακά δεδομένα υπολογίζονται με διάφορες μεθόδους παρεμβολής [33][34][35]. Ο Anderson [36], χρησιμοποιώντας τη μέθοδο παρεμβολής Kriging, υπολόγισε το σφάλμα RMSE παρεμβολής στους 1.62 °C. Παρόλα αυτά, πολλές φορές οι μέθοδοι παρεμβολής παρουσιάζουν κάποια ελλωτώματα, όπως

είναι η μη ομοιόμορφη χωροθέτηση των μετεωρολογικών σταθμών σε μία περιοχή και η έλλειψη πρόσβασης σε δεδομένα πραγματικού χρόνου [37].

Αντίθετα, η θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους μπορεί να υπολογιστεί με τη σάρωση μίας περιοχής από κάποιον θερμικό δέκτη, ο οποίος μπορεί να είναι χειρός, να είναι τοποθετημένος σε αεροσκάφος είτε τοποθετημένος σε δορυφόρο. Από αυτό συνεπάγεται η χωρική συνέχεια των μετρήσεων επιφανειακών θερμοκρασιών σε διαφορετικές κλίμακες αναλόγως τον τρόπο συλλογής για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές καταγραφής, οι οποίες, αναλόγως τον δέκτη, πραγματοποιούνται με καθορισμένη συχνότητα. Επομένως, η θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους σε τοπική και παγκόσμια κλίμακα [38].

#### 2.3.4. Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους και Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης NDVI

Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ των τιμών ανακλαστικότητας του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου καναλιού:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (2.12)$$

Το εύρος τιμών του δείκτη είναι από -1 έως 1. Οι περιοχές που περιέχουν πυκνή και υγιή βλάστηση, σε γενικές γραμμές, θα επιφέρουν υψηλές τιμές NDVI εξαιτίας της υψηλής ανακλαστικότητάς τους στο εγγύς υπέρυθρο και της χαμηλής που παρουσιάζουν στο ορατό (κόκκινο). Σε αντίθεση, τα σύννεφα, το νερό και το χιόνι παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο ορατό απ' ό,τι στο εγγύς υπέρυθρο, επομένως οι τιμές του δείκτη θα είναι αρνητικές. Οι βραχώδεις και άγονες περιοχές έχουν παρόμοιες ανακλαστικότητες στα δύο κανάλια και έχουν ως αποτέλεσμα σχεδόν μηδενικούς δείκτες βλάστησης [52].

Όπως προαναφέρθηκε, η βλάστηση αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη διαμόρφωση του κλίματος, και κατά συνέπεια των θερμοκρασιών αέρα και επιφάνειας μίας περιοχής. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους [39]:

1. η υγιής βλάστηση χρησιμοποιεί ένα μέρος της θερμικής ενέργειας για τη διαδικασία φωτοσύνθεσης, και με αυτόν τον τρόπο συμβάλλει στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα στην περιοχή που χωροθετείται
2. κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης απελευθερώνονται υδρατμοί οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας του αέρα αλλά και

αύξηση του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας, γεγονός που συμβάλλει στην μείωση και της επιφανειακής θερμοκρασίας της περιοχής

Συνεπώς, ο NDVI, εκτός από την παρακολούθηση της ποιότητας και της ποσότητας της βλάστησης, αποτελεί κι έναν σημαντικό δείκτη για την μελέτη του αστικού κλίματος [40].



### 3. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την εκπόνηση της εργασίας, όπως επίσης και τα βασικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

#### 3.1. Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε είναι η Αττική, και πιο συγκεκριμένα ο γεωγραφικός χώρος στον οποίο χωροθετείται το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας και των προαστίων.

##### 3.1.1. Φυσικό και Ανθρωπογενές Περιβάλλον

Η περιοχή της Αθήνας και των προαστίων περιβάλλεται δυτικά από το όρος Αιγάλεω (469 m), βόρεια από την Πάρνηθα (1.413 m), βορειοανατολικά από την Πεντέλη (1.109 m) και ανατολικά από τον Υμηττό (1026 m), ενώ στα νότια βρέχεται από τον Σαρωνικό κόλπο. Εκτός από ποικιλία στο ανάγλυφο του εδάφους – πεδινές εκτάσεις, λόφοι, ορεινοί όγκοι και παραθαλάσσιες περιοχές, υπάρχει και έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα στο μεγαλύτερο τμήμα της, αφού συγκεντρώνει περίπου 2.120.000 κατοίκους, σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (Πηγή: [www.wikipedia.gr](http://www.wikipedia.gr)). Τα βασικά ανθρωπογενή χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης είναι το σύνθετο αστικό περιβάλλον της, τα προάστια στο βορειοανατολικό και νοτιοανατολικό τμήμα της Αττικής, η περιοχή του αεροδρομίου στα Σπάτα καθώς επίσης και η περιοχή της Ελευσίνας, όπου παρατηρείται έντονη βιομηχανική δραστηριότητα.

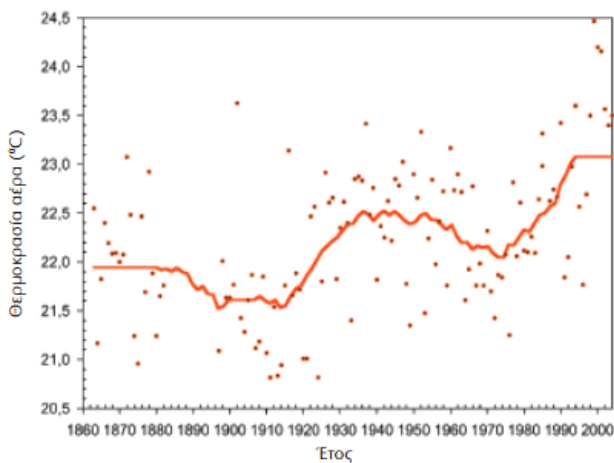
##### 3.1.2. Κλίμα

Το κλίμα της Αττικής είναι εύκρατο και εντάσσεται κλιματολογικά στον μεσογειακό τύπο κλίματος. Ως μεσογειακό κλίμα χαρακτηρίζεται το κλίμα εκείνο με ήπιους, αλλά υγρούς χειμώνες και ζεστά, αλλά ξηρά καλοκαίρια. Η θερμοκρασία κατά τους χειμερινούς μήνες κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα (μέση θερμοκρασία Ιανουαρίου: 9.2°C), ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες οι θερμοκρασίες φτάνουν σε πολύ υψηλά επίπεδα και για λίγες μέρες εμφανίζεται καύσωνας με θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 40°C. Στις περιοχές με πυκνή δόμηση επικρατούν συνθήκες οι οποίες επιβαρύνουν σημαντικά το ήδη θερμό φυσικό κλίμα της Αττικής.

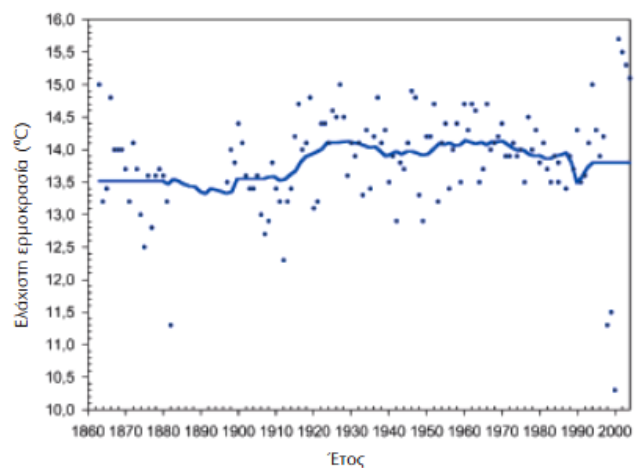
Βροχές σημειώνονται κυρίως από τον Οκτώβριο έως και τον Απρίλιο αλλά συνολικά ολόκληρο τον χρόνο τα ύψη βροχής είναι πολύ χαμηλά και δεν ξεπερνούν τα 400 – 450 mm.

Οι χιονοπτώσεις σημειώνονται κάθε χρόνο σχεδόν στα γύρω ορεινά της Αττικής, πιο σπάνια στα βόρεια προάστια των Αθηνών και ακόμα πιο σπάνια στο κέντρο της πόλης [59] .

Η θερμοκρασία του αέρα είναι το βασικότερο στοιχείο διαμόρφωσης της κλιματολογίας μιας περιοχής, καθώς επηρεάζει την καθημερινή διαβίωση του ανθρώπου (ενδυμασία, θέρμανση, ψύξη, θερμική άνεση). Σαν συμπληρωματικά στοιχεία της μέσης τιμής θερμοκρασίας του αέρα είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της που συμβαίνουν σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (πχ εντός ενός εικοσιτετραώρου). Οι μεταβλητές αυτές δίνουν τα όρια μέσα στα οποία κινήθηκε η θερμοκρασία στο διάστημα αυτό.



**Εικόνα 3-1α Διαχρονική μεταβολή των μέσων ετήσιων τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα**



**Εικόνα 3-1β Διαχρονική μεταβολή των μέσων ετήσιων τιμών της ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα**

Η Εικόνα 3-1α δείχνει μία φανερά αυξητική τάση της μέγιστης θερμοκρασίας κατά την περίοδο 1863 – 2004 για την περιοχή της Αθήνας. Το γεγονός αυτό ίσως οφείλεται στο ότι το κλίμα της Αθήνας έχει πλέον διαμορφωθεί από την δόμηση της πόλης. Η μεγάλη κάλυψή της με κτιριακά συγκροτήματα, ασφαλτόδρομους και δυσανάλογη έκταση πρασίνου (με τη μορφή μεγάλων πάρκων) αναγκάζει σε άνοδο τη μέγιστη θερμοκρασία. Τα οικοδομικά υλικά μετά το μεσημέρι εκπέμπουν μεγάλη ακτινοβολία θερμότητας, γεγονός που ανεβάζει τη μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας. Αντίθετα, τη νύχτα, και ιδιαίτερα μετά τα μεσάνυχτα, τα οικοδομικά υλικά ψύχονται περισσότερο συγκριτικά με το γυμνό ή καλυμμένο με βλάστηση έδαφος. Η ψύξη

των υλικών γίνεται με βραδύτερο ρυθμό από την θέρμανσή τους με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται η ελάχιστη θερμοκρασία σε ανάλογο βαθμό (Εικόνα 3-1β) [55].

## 3.2. Τηλεπισκοπικά Δεδομένα

### 3.2.1. Ο Landsat 8 OLI/TIRS

Ο Landsat 8 αποτελεί τον όγδοο δορυφόρο γεωσκόπησης της αμερικανικής αποστολής Landsat, μία συνεργασία μεταξύ της NASA και του Αμερικανικού Γεωλογικού Ινστιτούτου, παρέχοντας μεσαίας χωρικής ανάλυσης (15 m – 100 m) πολυφασματικά δεδομένα στο ορατό, εγγύς υπέρυθρο, μέσο υπέρυθρο και θερμικό υπέρυθρο τμήμα του οπτικού φάσματος. Εκτελεί συνολικά 233 ηλιοσύγχρονες κυκλικές τροχιές γύρω από τη γη, περνώντας από το ίδιο σημείο κάθε 16 ημέρες. Η χαρτογραφική προβολή που χρησιμοποιείται είναι η Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική προβολή (Universal Transverse Mercator, UTM) ή η Πολική Στερεογραφική Προβολή (Polar Stereographic, PS), ενώ οι εικόνες έχουν ραδιομετρική ανάλυση τα 16 bit και είναι της μορφής GeoTIFF [60].

Το σύστημα αποτελείται από δύο βασικά τμήματα: το παρατηρητήριο και τον επίγειο σταθμό. Το παρατηρητήριο αφορά την διαστημική πλατφόρμα στην οποία είναι τοποθετημένοι δύο δέκτες, ο Operational Land Imager (OLI) και ο Thermal InfraRed Sensor (TIRS). Ο επίγειος σταθμός λαμβάνει και συλλέγει όλα τα δεδομένα που αποστέλλονται από τον δορυφόρο, ενώ παρέχει τη δυνατότητα τόσο του σχεδιασμού και προγραμματισμού των απαραίτητων εργασιών του παρατηρητηρίου, όσο και της διαχείρισης και διανομής των επιστημονικών δεδομένων.

Ο OLI και ο TIRS συλλέγουν από κοινού δεδομένα, καλύπτοντας όλη την επιφάνεια της γης με μέγεθος της κάθε εικόνας να είναι 185 x 180 km. Και οι δύο δέκτες φέρουν σαρωτές επιμήκους σάρωσης (pushbroom), οι οποίοι χρησιμοποιούν γραμμική διάταξη ανιχνευτών, με περισσότερους από 7000 ανιχνευτές ανά φασματικό κανάλι. Αυτές οι διατάξεις είναι τοποθετημένες στο εστιακό επίπεδο του σαρωτή, ώστε όλες οι γραμμές σάρωσης να απεικονίζονται από όλες τις γραμμικές διατάξεις συγχρόνως. Επομένως, η απουσία μετακινούμενων οργάνων δίνει τη δυνατότητα στους σαρωτές, και επομένως στους δέκτες, να παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία των πληροφοριών της γήινης επιφάνειας, μεγαλύτερη σταθερότητα του δορυφόρου και, κατά συνέπεια, υψηλή γεωμετρική ακρίβεια.

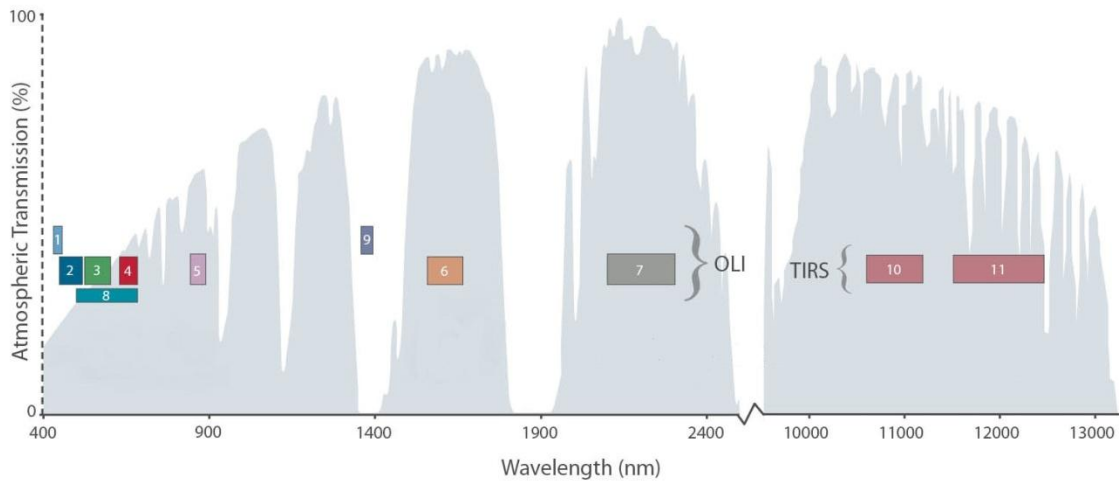
Πίνακας 3-1 Τα κανάλια του Landsat 8 OLI/TIRS και οι χρήσεις τους (Πηγή: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>)

Κανάλι	Μήκος κύματος (μm)	Χρήση – Χωρική ανάλυση
Band 1 – coastal aerosol	0.43 - 0.45	χρήσιμο για μελέτες παράκτιων περιοχών και αερολυμάτων (30 m)
Band 2 – blue	0.45 - 0.51	χρήσιμο για χάρτες βαθυμετρίας, διαχωρισμός εδάφους από βλάστηση και φυλλοβόλων από κωνοφόρα δέντρα (30 m)
Band 3 - green	0.53 - 0.59	δίνει έμφαση στο μέγιστο της ανάκλαστικότητας της βλάστησης, χρήσιμο για εκτίμηση ασθενειών φυτών (30 m)
Band 4 – red	0.64 - 0.67	διακρίνει διαφορετικά είδη βλάστησης (30 m)
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	δίνει έμφαση στο ποσοστό βιομάζας και στις ακτογραμμές (30 m)
Band 6 - Short-wave Infrared (SWIR) 1	1.57 - 1.65	ξεχωρίζει το ποσοστό υγρασίας εδάφους και βλάστησης, διαπερνά τα λεπτά σύννεφα (30 m)
Band 7 - Short-wave Infrared (SWIR) 2	2.11 - 2.29	βελτιωμένες τιμές ποσοστού υγρασίας εδάφους και βλάστησης (30 m)
Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	μεγαλύτερη ευκρίνεια εικόνων (15 m)
Band 9 – Cirrus	1.36 - 1.38	βελτιωμένος εντοπισμός θυσάνων (30 m)
Band 10 – TIRS 1	10.60 – 11.19	παραγωγή θερμοκρασιακών χαρτών και εκτίμηση υγρασίας εδάφους (30*100 m)
Band 11 – TIRS 2	11.5 - 12.51	βελτιωμένη παραγωγή θερμοκρασιακών χαρτών και εκτίμηση υγρασίας εδάφους (30*100 m)

Ο Operational Land Imager (OLI) συλλέγει δεδομένα από εννιά φασματικά κανάλια, εκ των οποίων τα επτά είναι αντίστοιχα με τα κανάλια των δεκτών Thematic Mapper (TM) και Enhanced Thematic Mapper (ETM+) των προηγούμενων δορυφόρων Landsat 5 και Landsat 7. Στον Landsat 8 έχουν προστεθεί δύο νέα κανάλια, ένα για την εκτίμηση της ποιότητας των υδάτων και ένα για τη βελτίωση εντοπισμού λεπτών νεφών που βρίσκονται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (θυσάνων).

Ο Thermal InfraRed Sensor (TIRS) μετράει την θερμοκρασία του εδάφους και τα δεδομένα που παρέχει χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές που αφορούν τη διαχείριση υδάτων. Η τεχνολογία που διαθέτει χρησιμοποιείται σε δύο κανάλια στο θερμικό υπέρυθρο, κάνοντας εφικτό τον διαχωρισμό των θερμοκρασιών της γήινης επιφάνειας με αυτή της ατμόσφαιρας και, άρα, παρέχοντας καλύτερες εκτιμήσεις θερμοκρασίας συγκριτικά με τους προηγούμενους δέκτες Landsat, οι οποίοι διαθέτουν ένα θερμικό κανάλι.





Εικόνα 3-2 Τα κανάλια του Landsat 8 OLI/TIRS

Σημειώνεται πως ο οργανισμός USGS έχει αναρτήσει διορθώσεις για τις σκηνές των θερμικών καναλιών 10 και 11 του δέκτη TIRS που έχουν ληφθεί πριν από τις 03/02/2014, καθώς βρέθηκαν διαφορές μεταξύ των βαθμονομημένων εικόνων των θερμικών καναλιών και των μετρήσεων που έγιναν για την θερμοκρασία επιφάνειας των υδάτων. Οι διαφορές αυτές επίκεινται στο ότι οι θερμοκρασίες των υδάτινων επιφανειών που εξήχθησαν από τον TIRS, μετά από ατμοσφαιρική διόρθωση και διόρθωση με τον συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας είναι θερμότερες κατά 2°C ή και παραπάνω από τις μετρημένες. Επίσης, αυτές οι διαφορές δεν είναι ίδιες σε όλο το εστιακό επίπεδο του δέκτη, καθιστώντας την αβεβαιότητα βαθμονόμησης μεγαλύτερη από την καθορισμένη.

Όσο αφορά την βαθμονόμηση των θερμικών καναλιών, ο οργανισμός USGS προτείνει να αφαιρείται:

- η τιμή 0.29 W/(m<sup>2</sup> sr μm) για το κανάλι 10
- η τιμή 0.51 W/(m<sup>2</sup> sr μm) για το κανάλι 11

για κάθε τιμή ακτινοβολίας, ώστε οι νέες τιμές να είναι πιο κοντά στις πραγματικές τιμές.

Οι τιμές αυτές βασίζονται σε συγκρίσεις με μετρημένες θερμοκρασίες υδάτων και αντιστοιχούν σε διόρθωση -2.1 °C για το κανάλι 10 και -4.4 °C για το κανάλι 11, για θερμοκρασία φωτεινότητας ίση με 22.8 °C. Το σφάλμα rms είναι περίπου 0.12 W/(m<sup>2</sup> sr μm) (0.8 °C) για το κανάλι 10 και 0.2 W/(m<sup>2</sup> sr μm) (1.75 °C) για το κανάλι 11.

### 3.2.2. Surface Reflectance Product [61]

Ο οργανισμός USGS, εκτός από τις σκηνές που λαμβάνονται από τους δέκτες OLI και TIRS του Landsat 8, διανέμει στο κοινό και υψηλού επιπέδου προϊόντα. Τα προϊόντα αυτά αφορούν γήινες μεταβλητές, όπως:

- την ανακλαστικότητα του εδάφους
- τη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους
- την κάλυψη γης με χωρική ανάλυση τα 30 m
- εκτάσεις καμμένων περιοχών
- περιοχές καλυμμένες με χιόνι και
- εκτάσεις υδάτινων περιοχών

με την προϋπόθεση να προσφέρουν τη βάση για τη δημιουργία μακροπρόθεσμων επιστημονικών δεδομένων Landsat, προσαρμοσμένων για την παρακολούθηση, αξιολόγηση και πρόβλεψη των μεταβολών της γήινης επιφάνειας μέσα στον χρόνο.

Το προϊόν ανακλαστικότητας του εδάφους (Surface Reflectance Product) παράγεται με χωρική ανάλυση τα 30 m και με χαρτογραφική προβολή την Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική προβολή (Universal Transverse Mercator, UTM) ή την Πολική Στερεογραφική Προβολή (Polar Stereographic, PS). Το κάθε προϊόν αποτελείται από δέκα αρχεία, εκ των οποίων τα επτά αφορούν τα κανάλια του OLI ατμοσφαιρικά διορθωμένα και ανηγμένα σε τιμές ανακλαστικότητας του εδάφους, με ραδιομετρική ανάλυση 16 bit σε μορφή GeoTIFF, ενώ τα υπόλοιπα τρία αφορούν την ποιότητα και την επικάλυψη των εικονοστοιχείων της κάθε σκηνής από ατμοσφαιρικές μεταβλητές.

Πιο συγκεκριμένα:

- Το κανάλι Cloud QA

Το κανάλι αυτό κάνει αναφορά στην παρουσία νεφών και στα επίπεδα αερολυμάτων (aerosols) στην ατμόσφαιρα, για κάθε εικονοστοιχείο των εικόνων και χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό του βαθμού διόρθωσης της ανακλαστικότητας.

Για τα bits 4 και 5 υπάρχει περαιτέρω ερμηνεία, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-3), η οποία αφορά το ποσοστό της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε αερολύματα.

**Πίνακας 3-2 Ερμηνεία των τιμών του καναλιού Cloud QA**

Bit	Ερμηνεία
0	Cirrus cloud
1	Cloud
2	Adjacent to cloud
3	Cloud shadow
4	Aerosol
5	Aerosol
6	Unused
7	Internal test

**Πίνακας 3-3 Ερμηνεία των bit 4 και 5 του καναλιού Cloud QA**

Τιμή	Ερμηνεία
00	Climatology-level aerosol content
01	Low aerosol content
10	Average aerosol content
11	High aerosol content

- Το κανάλι Cfmask

Το κανάλι Cfmask αποτελεί μία εναλλακτική του καναλιού Cloud QA, καθώς προσδιορίζει την παρουσία σύννεφου, σκιάς σύννεφου, χιονιού ή νερού για κάθε εικονοστοιχείο του προϊόντος. Η ερμηνεία του κάθε εικονοστοιχείου του καναλιού αυτού παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-4)

**Πίνακας 3-4 Ερμηνεία εικονοστοιχείων του καναλιού Cfmask**

Τιμή Εικονοστοιχείου	Ερμηνεία
255	Fill
0	Clear
1	Water
2	Cloud shadow
3	Snow
4	Cloud

- Το κανάλι Cfmask Cloud Confidence

Το κανάλι αυτό παρουσιάζει το ποσοστό εμπιστοσύνης παρουσίας σύννεφου για κάθε εικονοστοιχείο, το οποίο έχει εντοπιστεί από τον αλγόριθμο Cfmask στο προϊόν ανακλαστικότητας εδάφους του Landsat. Στον Πίνακα 3-5 παρουσιάζονται οι τιμές του καναλιού αυτού, όπως επίσης και η ερμηνεία τους.

Πίνακας 3-5 Ερμηνεία εικονοστοιχείων του καναλιού Cfmask Cloud Confidence

Τιμή εικονοστοιχείου	Ερμηνεία
255	Fill
0	None
1	<= 12.5% cloud confidence
2	> 12.5% and <= 22.5% cloud confidence
3	> 22.5% cloud confidence

### 3.3. Συλλογή Τηλεπισκοπικών Δεδομένων

Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι του πολυφασματικού τηλεπισκοπικού δορυφόρου Landsat 8 και η απόκτησή τους πραγματοποιήθηκε μέσα από την πλατφόρμα Earth Explorer του οργανισμού United States Geological Survey (USGS). Οι ημερομηνίες αφορούν το διάστημα από τις 30 Απριλίου 2013 έως και τις 30 Νοεμβρίου 2015. Από το αρχείο μεταδεδομένων συλλέχθηκε η ώρα λήψης στο κέντρο της κάθε σκηνής για κάθε ημερομηνία, η οποία αναφέρεται στην Μέση Ώρα Γκρίνουιτς (Greenwich Mean Time, GMT), επομένως έγινε αναγωγή στην ζώνη ώρας όπου βρίσκεται η περιοχή μελέτης (GMT + 0200) και σε περίοδο θερινής ώρας (GMT +0300), αναλόγως την ημερομηνία. Σημειώνεται πως επιλέχθηκαν οι σκηνές εκείνες με νεφοκάλυψη μικρότερη από 30%, ώστε η περιοχή μελέτης να είναι όσο γίνεται καθαρή. Οι ημερομηνίες και ώρες (μέσες και τοπικές) για το συγκεκριμένο path/row της περιοχής μελέτης (183/34) είναι οι εξής:

A/A	Ημερομηνία	GMT standard	GMT time zone
1	30/4/2013	9:06:54	12:06:54
2	19/7/2013	9:07:05	12:07:05
3	4/8/2013	9:07:08	12:07:08
4	20/8/2013	9:07:09	12:07:09
5	5/9/2013	9:07:09	12:07:09
6	7/10/2013	9:07:01	12:07:01
7	23/10/2013	9:06:55	12:06:55
8	8/11/2013	9:06:52	11:06:52
9	16/3/2014	9:05:37	11:05:37
10	1/4/2014	9:05:20	12:05:20
11	22/7/2014	9:05:00	12:05:00
12	23/8/2014	9:05:12	12:05:12
13	10/10/2014	9:05:20	12:05:20
14	19/3/2015	9:04:42	11:04:42
15	6/5/2015	9:04:15	12:04:15
16	9/7/2015	9:04:37	12:04:37
17	25/7/2015	9:04:43	12:04:43

18	26/8/2015	9:04:55	12:04:55
19	11/9/2015	9:05:01	12:05:01
20	13/10/2015	9:05:08	12:05:08
21	14/11/2015	9:05:14	11:05:14
22	30/11/2015	9:05:16	11:05:16



Εικόνα 3-3 Έγχρωμο σύνθετο RGB432 της περιοχής μελέτης



Εικόνα 3-4 Έγχρωμο σύνθετο RGB543 της περιοχής μελέτης

### 3.4. Προεπεξεργασία Δεδομένων

Για να γίνει χρήση των εικόνων του δορυφόρου Landsat 8, αρχικά πραγματοποιήθηκε η περικοπή τους στα όρια της περιοχής μελέτης. Οι τελικές εικόνες έχουν μέγεθος 1410x1360 εικονοστοιχεία και χωρική ανάλυση 30 μέτρα.

Τα κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν είναι το κανάλι 4 (Red), το κανάλι 5 (Near InfraRed) και το κανάλι 10 (Thermal InfraRed 1). Το κανάλι 11 (Thermal InfraRed 2) δεν χρησιμοποιείται, καθώς έχει παρατηρηθεί μεγαλύτερη αβεβαιότητα στις τιμές που παρέχει από εκείνες του καναλιού 10. Τα δύο πρώτα κανάλια είναι από το προϊόν Surface Reflectance Product του Landsat 8, επομένως δεν υφίστανται κάποια περαιτέρω επεξεργασία καθώς οι ψηφιακές τιμές των εικόνων αποτελούν ατμοσφαιρικά διορθωμένες τιμές ανακλαστικότητας του εδάφους. Για το θερμικό

κανάλι, ακολουθείται η διαδικασία προεπεξεργασίας των εικόνων όπως αναγράφεται παρακάτω.

#### *Μετατροπή σε τιμές θερμοκρασίας φωτεινότητας (Brightness Temperature, BT)*

Οι ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων του θερμικού καναλιού μετατρέπονται αρχικά σε τιμές ακτινοβολίας (top of atmosphere radiance) με βάση την Εξίσωση 3.1, ενώ, σύμφωνα με τον οργανισμό USGS, αφαιρείται η τιμή των  $0.29 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m})$  από κάθε τιμή ακτινοβολίας για τις εικόνες που λήφθηκαν πριν τις 03/02/2014 λόγω του σφάλματος που προαναφέρθηκε στον δέκτη TIRS, ώστε να είναι πιο κοντά στις πραγματικές τιμές ακτινοβολίας, με σφάλμα  $\pm 0.12 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m})$  ( $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L \quad (3.1)$$

όπου  $L_\lambda$  η φασματική ακτινοβολία ( $\text{Watts}/(\text{m}^2 \cdot \text{srad} \cdot \mu\text{m})$ ),  $M_L$  και  $A_L$  συντελεστές που προκύπτουν από το αρχείο μεταδεδομένων και  $Q_{cal}$  η ψηφιακή τιμή του εικονοστοιχείου.

Στη συνέχεια, οι τιμές ακτινοβολίας ανάγονται σε τιμές θερμοκρασίας (brightness temperature) σε βαθμούς της κλίμακας Kelvin, με βάση την παρακάτω εξίσωση (Εξίσωση 3.2) [62] :

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (3.2)$$

όπου BT η θερμοκρασία φωτεινότητας (K),  $L_\lambda$  η φασματική ακτινοβολία ( $\text{Watts}/(\text{m}^2 \cdot \text{srad} \cdot \mu\text{m})$ ) και  $K_1, K_2$  συντελεστές που προκύπτουν από το αρχείο μεταδεδομένων.

Για να μετατραπούν οι βαθμοί Kelvin σε βαθμούς Κελσίου, χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$BT_C = BT_K - 273.15 \quad (3.3)$$

#### *Μετατροπή σε τιμές θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους (Land Surface Temperature, LST)*

Για την μετατροπή της θερμοκρασίας φωτεινότητας σε θερμοκρασία επιφάνειας ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:



- Υπολογισμός δείκτη NDVI

Ο NDVI ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ των τιμών ανακλαστικότητας του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου καναλιού και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (3.4)$$

- Εκτίμηση συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής χρησιμοποιείται η μέθοδος με τον δείκτη βλάστησης NDVI. Η μέθοδος αυτή είναι απλή στην εφαρμογή της και ενδείκνυται για την περιοχή μελέτης, καθώς τα σημεία χωροθετούνται σε περιοχές με διαφορετική πυκνότητα δόμησης και ύπαρξη φυτοκάλυψης, δεδομένα τα οποία μπορούν να φανούν από τις τιμές NDVI. Οι Sobrino και Raissouni [41] υπολόγισαν την τιμή του συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$  με τη μέθοδο αυτή. Σημειώνεται πως ο δέκτης του οποίου τα δεδομένα χρησιμοποιήσαν στην μελέτη είναι ο Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), επομένως για την χρήση των παρακάτω εξισώσεων έγινε αντιστοιχία των καναλιών του δέκτη αυτού με τα κανάλια του Landsat 8.

- Για  $NDVI \leq 0.2$ :

Η επιφάνεια θεωρείται πως δεν έχει καθόλου βλάστηση, επομένως ο συντελεστής  $\epsilon$  υπολογίζεται από την τιμή ανακλαστικότητας του καναλιού 3 του δορυφόρου Landsat 8:

$$\epsilon = 0.980 - 0.042 \cdot \text{band3} \quad (3.5)$$

- Για  $0.2 < NDVI < 0.5$ :

Η επιφάνεια θεωρείται πως καλύπτεται και από υγιή βλάστηση και από γυμνό έδαφος (στην περίπτωση που εξετάζεται, τεχνητές επιφάνειες), της οποίας ο συντελεστής εκπομπής  $\epsilon$  μπορεί να εκτιμηθεί από το ποσοστό βλάστησης  $P_v$  :

$$\epsilon = 0.971 + 0.018 \cdot P_v \quad (3.6)$$

όπου το  $P_v$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_v = (NDVI - 0.2)^2 / 0.09 \quad (3.7)$$

- Για  $NDVI \geq 0.5$ :

Η επιφάνεια θεωρείται πως καλύπτεται μόνο από βλάστηση, επομένως ο συντελεστής  $\varepsilon$  μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$\varepsilon = 0.985 \quad (3.8)$$

- Υπολογισμός τιμών θερμοκρασίας εδάφους (LST)

Το τελευταίο βήμα για τον υπολογισμό των LSTs είναι η παρακάτω εξίσωση [43]:

$$T_s = \frac{BT}{1 + \left[ \left( \frac{BT}{\rho} \right) \ln \varepsilon \right]} \quad (3.9)$$

όπου  $T_s$  η θερμοκρασία εδάφους ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $BT$  η θερμοκρασία φωτεινότητας (brightness temperature,  $^{\circ}\text{C}$ ),  $\lambda$  το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (για το οποίο θα χρησιμοποιηθεί το μέσο μήκος κύματος του θερμικού καναλιού 10 ( $\lambda = 10.895 \mu\text{m}$ ) [43],  $\varepsilon$  ο συντελεστής εκπομπής που υπολογίστηκε παραπάνω και

$$\rho = h \frac{c}{\sigma} = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m K} \quad (3.10)$$

όπου  $\sigma$  είναι η σταθερά του Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $h$  η σταθερά του Planck ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ) και  $c$  η ταχύτητα του φωτός ( $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) [5].

Η εξίσωση αυτή προέρχεται από την μέθοδο εκτίμησης επιφανειακών θερμοκρασιών με βάση την εξίσωση μετάδοσης ακτινοβολίας (Εξίσωση 2.13). Επιλέγεται αυτή η μέθοδος καθώς έχει βρεθεί πως έχει καλύτερη ακρίβεια από τις άλλες δύο μεθόδους που αναφέρθηκαν στο Εδάφιο 2.3.2, με μέσο σφάλμα τετραγωνικής απόκλισης (RMSE) χαμηλότερο από  $1^{\circ}\text{C}$  για το κανάλι 10 του Landsat 8 [44].

Επιπλέον, για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, όπως επισημαίνεται και στο Εδάφιο 2.3.2, χρησιμοποιούνται και δεδομένα για ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων. Δεδομένου ότι η περιοχή της Αθήνας και προαστίων που περιβάλλεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς έχει έκταση περίπου  $570 \text{ km}^2$ , θεωρείται πως η ατμόσφαιρα είναι ομοιογενής πάνω από την περιοχή αυτή κάθε στιγμή [42]. Επομένως το σφάλμα που θα προκύψει από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες θα αποτελεί συστηματικό σφάλμα για κάθε εικόνα.



## 3.5. Μετεωρολογικά Δεδομένα

### 3.5.1. Το δίκτυο Weather Underground

Το Weather Underground είναι μία υπηρεσία με έδρα το San Francisco, California, η οποία διαθέτει ένα δίκτυο από μετεωρολογικούς σταθμούς με παγκόσμια κάλυψη και παρέχει μετεωρολογικά δεδομένα – προγνώσεις και ιστορικά στοιχεία - μέσω του διαδικτύου. Ο κάθε σταθμός ανήκει είτε σε κάποιο φυσικό πρόσωπο (Personal Weather Station, P.W.S) και είναι τοποθετημένος εντός της ιδιοκτησίας του υπό την επίβλεψη του ατόμου αυτού, είτε σε κάποιον φορέα. Συνολικά υπάρχουν παγκοσμίως πάνω από 180.000 σταθμοί στο δίκτυο αυτό, οι οποίοι καταγράφουν σε καθημερινή βάση την θερμοκρασία του αέρα ( $^{\circ}\text{C}$ ), την σχετική υγρασία (Relative Humidity, RH, %), την ατμοσφαιρική πίεση (hPa), την αθροιστική βροχόπτωση (mm) καθώς και την ταχύτητα και διεύθυνση του αέρα. Τα δεδομένα της κοινότητας που συλλέγονται, έπειτα από επεξεργασία και συντονισμό από την ομάδα μετεωρολόγων του δικτύου, αναρτώνται στην ιστοσελίδα του δικτύου και για κάθε σταθμό ξεχωριστά και, επιπρόσθετα, παρέχονται και προγνώσεις σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο των διαφορετικών κλιματολογικών στοιχείων [63].

### 3.5.2. Συλλογή Μετεωρολογικών Μετρήσεων

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας αυτής προέρχονται από τους σταθμούς του παγκόσμιου δικτύου Weather Underground. Οι σταθμοί επιλέχθηκαν ώστε να καλύπτουν σχεδόν όλη την επιφάνεια της περιοχής μελέτης, διαθέτοντας ικανοποιητικό αριθμό μετρήσεων, και το σύνολό τους ανέρχεται σε 43. Επιπλέον, το υψόμετρο στο οποίο χωροθετούνται επιλέγεται να είναι κάτω από 1000 m, καθώς όπως αναφέρθηκε στο Εδάφιο 2.3.3, πάνω από το υψόμετρο αυτό οι θερμοκρασία του αέρα ελαττώνεται σημαντικά. Σημειώνεται πως δεν υπάρχουν δεδομένα από όλους τους σταθμούς για όλες τις ζητούμενες ημερομηνίες, κι αυτό οφείλεται σε διάφορα τεχνικά προβλήματα ή θέματα συντήρησης των σταθμών από τους ιδιοκτήτες τους. Οι σταθμοί, όπως επίσης και οι συντεταγμένες και το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-6), ενώ η χωροθέτησή τους στην περιοχή μελέτης φαίνεται στην Εικόνα 3-5. Στο Παράρτημα αναγράφονται πιο αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε σταθμού, όπως αυτά διατίθενται στην ιστοσελίδα του δικτύου Weather Underground.

Τέλος, επιλέχθηκαν οι μετρήσεις θερμοκρασίας του κάθε μετεωρολογικού σταθμού για τις συγκεκριμένες ώρες και ημερομηνίες λήψης των διαθέσιμων τηλεπισκοπικών δεδομένων (σε βαθμούς Κελσίου).

A/A	Μετεωρολογικός Σταθμός	z (m)	φ	λ	A/A	Μετεωρολογικός Σταθμός	z (m)	φ	λ
1	Acharnes	210	38.097	23.732	23	Kessariani	132	37.971	23.752
2	Acharnes 2	184	38.083	23.745	24	Kifissia	298	38.071	23.809
3	Agios Dimitrios	94	37.929	23.738	25	Marathon Beach	3	38.124	24.000
4	Agios Stefanos	379	38.147	23.858	26	Marathonas	14	38.133	23.987
5	Alimos	28	37.915	23.713	27	Maroussi	242	38.045	23.827
6	Ano Glyfada	128	37.891	23.768	28	Moschato	9	37.945	23.680
7	Ano Liosia	212	38.085	23.680	29	Nea Ionía	164	38.034	23.770
8	Ano Melissia	359	38.064	23.842	30	Nea Philadelphia	117	38.041	23.740
9	Ano Vrilisia	307	38.047	23.845	31	Neo Irakleio	192	38.052	23.762
10	Argyroupoli	103	37.912	23.751	32	Neos Kosmos	67	37.956	23.722
11	Artemida Attikis	34	37.939	24.003	33	Paleo Faliro	21	37.926	23.706
12	Aspropirgos - Attica	45	38.064	23.588	34	Pallini	253	38.016	23.878
13	Chalandri	181	38.016	23.795	35	Papagou	197	37.998	23.789
14	Chalandri Patima	299	38.040	23.855	36	Perama Attikis	14	37.963	23.575
15	Drosia Attikis	420	38.104	23.866	37	Peristeri	51	38.012	23.699
16	Galatsi	149	38.014	23.749	38	Pireas	49	37.930	23.641
17	Galatsi 2	31	38.018	23.754	39	Pireas 2	39	37.953	23.631
18	Gerakas	164	38.003	23.858	40	Vrilisia	228	38.034	23.830
19	Glyfada	82	37.888	23.757	41	Vyronas	163	37.961	23.761
20	Ilion	124	38.042	23.698	42	Ymittos	121	37.953	23.749
21	Kalamaki		37.917	23.700	43	Ymittos 2	141	37.959	23.753
22	Kantza	179	37.990	23.861					

Πίνακας 3-6 Οι μετεωρολογικοί σταθμοί για την περιοχή της Αθήνας που επιλέχθηκαν από το δίκτυο Weather Underground



Εικόνα 3-5 Χωροθέτηση μετεωρολογικών σταθμών στην περιοχή μελέτης

## 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της στατιστικής ανάλυσης που χρησιμοποιείται καθώς και η μεθοδολογία που εφαρμόζεται για την επεξεργασία των δεδομένων.

### 4.1. Μέθοδος Στατιστικής Ανάλυσης: Γραμμική Παλινδρόμηση

Μία από τις πιο διαδεδομένες στατιστικές μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων είναι η γραμμική παλινδρόμηση (linear regression), μέσω της οποίας επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ διάφορων μεταβλητών. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η πρόβλεψη της μίας μεταβλητής από τις υπόλοιπες.

Στην περίπτωση δύο μεταβλητών ( $X$ ,  $Y$ ), ως εξαρτημένη μεταβλητή  $Y$  ορίζεται η μεταβλητή της οποίας η τιμή πρόκειται να προβλεφθεί, ενώ η ανεξάρτητη  $X$  αποτελεί την μεταβλητή εκείνη, η οποία χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής.

Για την μελέτη της απλής γραμμικής παλινδρόμησης θα πρέπει να ισχύουν τα ακόλουθα [56] :

- Οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής  $Y$  προέρχονται από έναν πληθυσμό κανονικά καταταμημένο
- Οι διακυμάνσεις των κατανομών συχνοτήτων των δειγμάτων της μεταβλητής  $Y$  που λαμβάνονται από τον αντίστοιχο πληθυσμό πρέπει να είναι ίσες μεταξύ τους
- Τα σφάλματα της μεταβλητής  $Y$  θεωρείται ότι είναι αθροιστικά και
- Τα σφάλματα των τιμών της μεταβλητής  $X$  είναι αμελητέα ή πολύ μικρά σε σχέση με τα σφάλματα της εξαρτημένης μεταβλητής  $Y$

Η απεικόνιση της γραμμής παλινδρόμησης απεικονίζεται στο διάγραμμα διασποράς. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται:

- Αν υπάρχει ή όχι επίδραση των τιμών  $X_i$  επί των αντίστοιχων τιμών  $Y_i$ . Στην περίπτωση που δεν υφίσταται η επίδραση αυτή, παρατηρείται μία ακανόνιστη διασπορά των ζευγών  $X_i, Y_i$  στο χώρο.
- Από τη στιγμή που υπάρχει επίδραση της ανεξάρτητης μεταβλητής  $X$  επί της εξαρτημένης μεταβλητής  $Y$ , από το διάγραμμα γίνεται αντιληπτή η μορφή της μεταξύ τους συσχέτισης (γραμμική, εκθετική, κτλ)

Η απλή γραμμική παλινδρόμηση μπορεί να εκφρασθεί από τη σχέση:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i \quad (4.1)$$

όπου  $\alpha, \beta$  οι άγνωστοι παράμετροι του γραμμικού υποδείγματος.

Η λύση των σχέσεων (4.1) παριστάνεται με την εξίσωση:

$$\hat{Y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} X_i \quad (4.2)$$

Σαν ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης ορίζεται η ευθεία εκείνη για την οποία ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις:

- Οι αποκλίσεις  $Y_i - \hat{Y}_i$  ακολουθούν κανονική κατανομή
- Η συνολική διασπορά των σημείων  $X_i, Y_i$  γύρω από την ευθεία παλινδρόμησης είναι η μικρότερη μεταξύ όλων των ευθειών που θεωρητικά μπορούν να χαραχθούν μεταξύ των σημείων του διαγράμματος διασποράς.

Ο βέλτιστος τρόπος προσδιορισμού των συντελεστών  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$  είναι η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων (Ordinary Least Squares), με την οποία κατασκευάζεται η καλύτερη ευθεία προσαρμογής. Η γραμμή αυτή είναι εκείνη για την οποία ισχύει:

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta} X_i)^2 = \min \quad (4.3)$$

όπου  $N$  το μέγεθος του δείγματος των ζευγών  $X_i, Y_i$ .

Οι εκτιμήσεις  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$  οι οποίες θα ελαχιστοποιούν την τιμή του  $S$  ορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.4)$$

$$\hat{\alpha} = \bar{Y} - \hat{\beta} \bar{X} \quad (4.5)$$

Για να γίνει έλεγχος του κατά πόσο οι διακυμάνσεις στις ανεξάρτητες μεταβλητές εξηγούν τις διακυμάνσεις στις εξαρτημένες μεταβλητές, χρησιμοποιείται ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$ . Ο συντελεστής προσδιορισμού εκφράζει το ποσοστό μεταβλητότητας των παρατηρήσεων που ερμηνεύεται από το μοντέλο και δίνεται από τον τύπο:

$$R^2 = \frac{S_{XY}^2}{S_{XX}S_{YY}} \quad (4.6)$$

Το  $R^2$  λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Είναι προφανές πως όσο μεγαλύτερη τιμή έχει, τόσο καλύτερο είναι το μοντέλο που έχει θεωρηθεί διότι ερμηνεύει μεγαλύτερο μέρος της παρατηρούμενης μεταβλητότητας [56].

## 4.2. Επεξεργασία Δεδομένων

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε στο Εδάφιο 3.4, υπολογίζονται οι τιμές του **συντελεστή εκπομπής** για κάθε σταθμό από όλες τις εικόνες βάσει του δείκτη βλάστησης NDVI. Οι μέσες τιμές των συντελεστών που βρέθηκαν για κάθε σταθμό, όπως επίσης οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

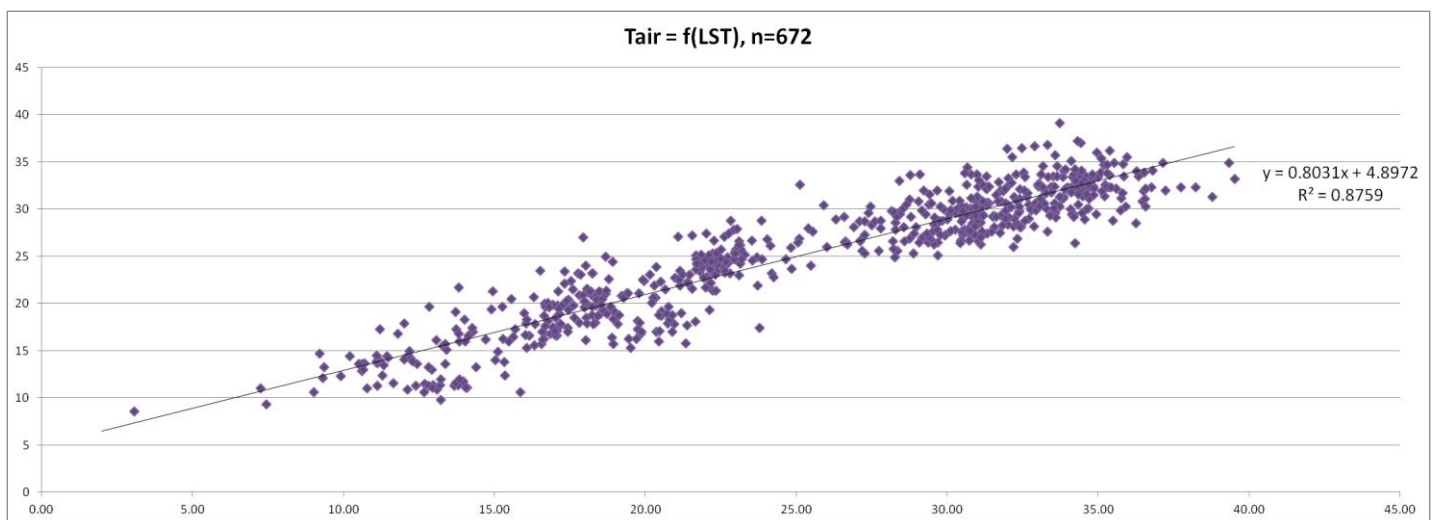
Πίνακας 4-1 Μέση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας για κάθε μετεωρολογικό σταθμό, όπως υπολογίστηκαν από όλα τα δεδομένα με τη χρήση του δείκτη βλάστησης NDVI

A/A	Μετεωρολογικός σταθμός	Μέση τιμή	min	max
1	Acharnes	0.974	0.971	0.985
2	Acharnes 2	0.920	0.904	0.936
3	Agios Dimitrios	0.937	0.909	0.971
4	Agios Stefanos	0.977	0.974	0.983
5	Alimos	0.973	0.971	0.982
6	Ano Glyfada	0.939	0.907	0.972
7	Ano Liosia	0.972	0.971	0.974
8	Ano Melissa	0.973	0.972	0.974
9	Ano Vrilisia	0.956	0.900	0.975
10	Argyroupoli	0.928	0.907	0.972
11	Artemida Attikis	0.976	0.974	0.980
12	Aspropirgos - Attica	0.923	0.903	0.971
13	Chalandri	0.967	0.910	0.973
14	Chalandri Patima	0.941	0.903	0.974
15	Drosia Attikis	0.983	0.980	0.987
16	Galatsi	0.923	0.904	0.944
17	Galatsi 2	0.935	0.903	0.972
18	Gerakas	0.941	0.909	0.972
19	Glyfada	0.952	0.911	0.972
20	Ilion	0.913	0.901	0.932
21	Kalamaki	0.925	0.914	0.942
22	Kantza	0.976	0.973	0.986
23	Kessariani	0.900	0.887	0.927
24	Kifissia	0.985	0.975	0.988
25	Marathon Beach	0.976	0.972	0.985
26	Marathonas	0.985	0.984	0.988
27	Maroussi	0.966	0.910	0.973
28	Moschato	0.914	0.894	0.947
29	Nea Ionia	0.936	0.921	0.955
30	Nea Philadelphia	0.916	0.893	0.933
31	Neo Irakleio	0.927	0.906	0.971
32	Neos Kosmos	0.920	0.905	0.943
33	Paleo Faliro	0.919	0.899	0.971

34	Pallini	0.979	0.869	0.988
35	Papagou	0.973	0.971	0.974
36	Perama Attikis	0.904	0.895	0.914
37	Peristeri	0.941	0.914	0.972
38	Piraias 2	0.914	0.882	0.929
39	Pireas	0.904	0.889	0.920
40	Vrilisia	0.978	0.972	0.984
41	Vyronas	0.899	0.885	0.923
42	Ymittos	0.921	0.907	0.971
43	Ymittos 2	0.907	0.887	0.926

Μετά τη συλλογή όλων των διαθέσιμων δεδομένων, είναι εφικτή η δημιουργία **χρονοσειρών** τόσο για τις θερμοκρασίες αέρα από όλους τους διαθέσιμους μετεωρολογικούς σταθμούς, όσο και για τις θερμοκρασίες της επιφάνειας εδάφους από τον Landsat 8. Τα δύο διαγράμματα φαίνονται στις Εικόνες 4-2 και 4-3.

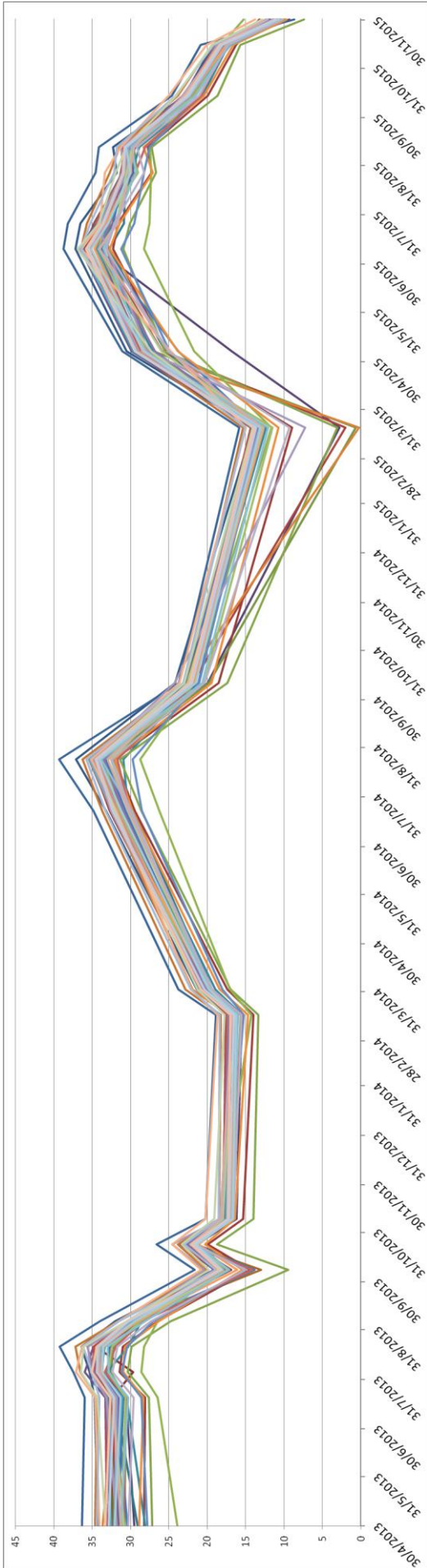
Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια εύρεσης της **συσχέτισης μεταξύ των θερμοκρασιών που μετρήθηκαν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς (θερμοκρασίες αέρα,  $T_{air}$ ) και των θερμοκρασιών που υπολογίστηκαν από το θερμικό υπέρυθρο κανάλι 10 του δέκτη Landsat 8 (θερμοκρασίες επιφάνειας, LST)**. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή της γραμμικής παλινδρόμησης. Τα ζεύγη θερμοκρασιών που χρησιμοποιούνται αφορούν όλους τους σταθμούς και όλες τις ημερομηνίες, και το πλήθος τους ανέρχεται στα 672 (Εικόνα 4-1).



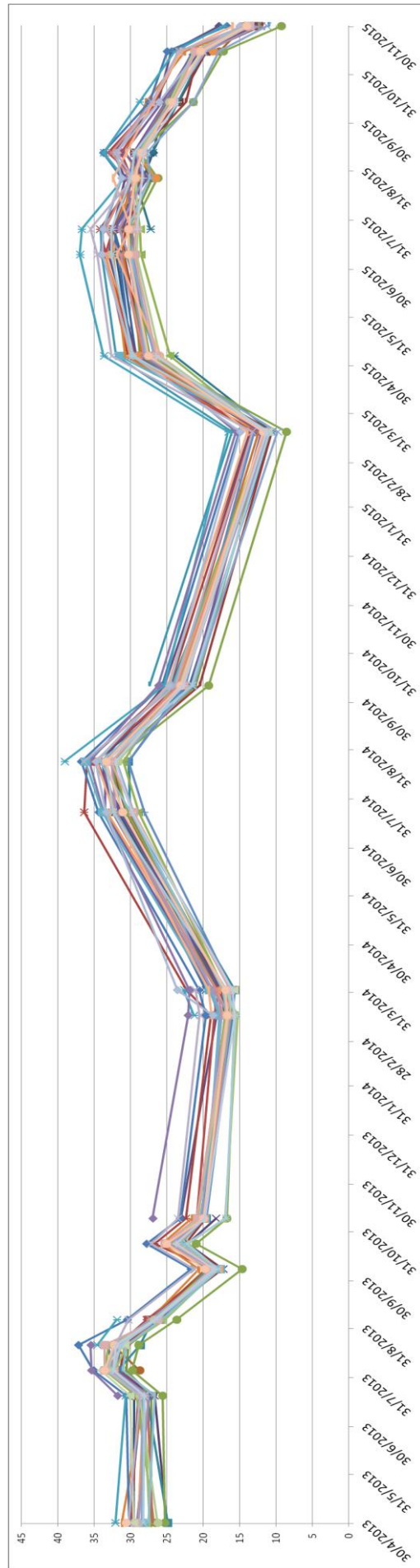
**Εικόνα 4-1** Διάγραμμα διασποράς και ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης για όλα τα ζεύγη θερμοκρασιών  $T_{air}$  και LST



ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ ΔΟΥΡΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ



**Εικόνα 4-2** Χρονοσειρές θερμοκρασιών επιφάνειας εδάφους (LST) όλων των σημείων αναφοράς

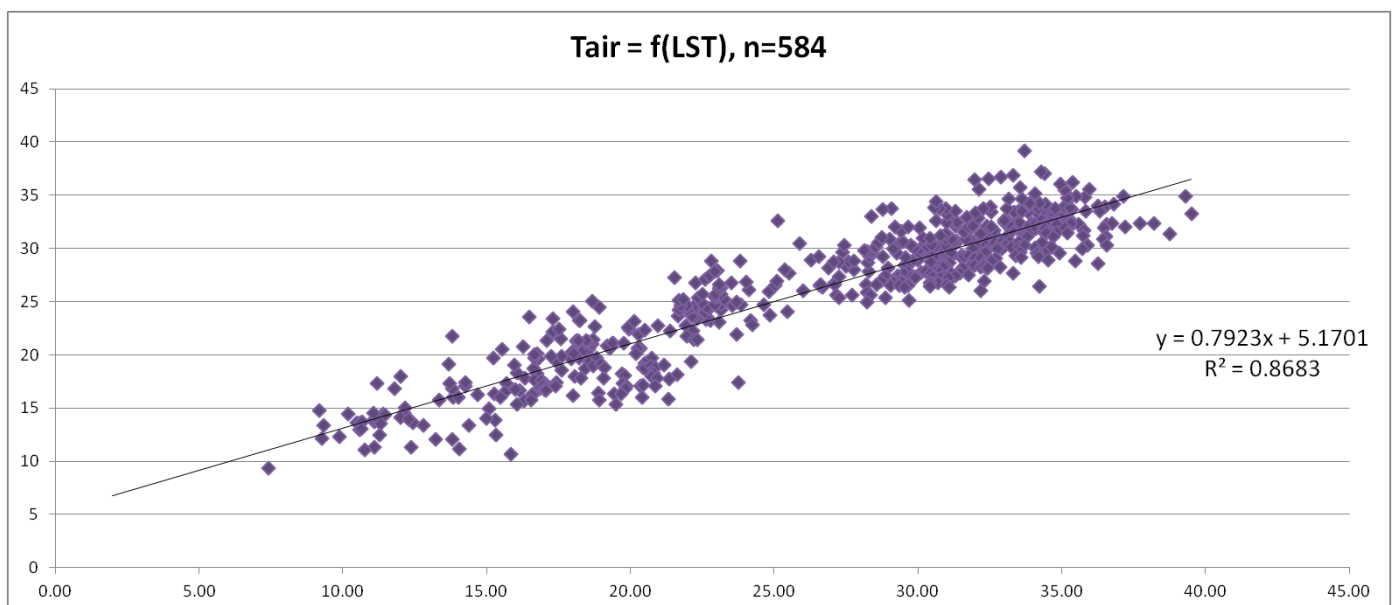


**Εικόνα 4-3** Χρονοσειρές θερμοκρασιών αέρα (Tair) όλων των σημείων αναφοράς

Έπειτα, ακολουθείται η ίδια διαδικασία για όλα τα ‘καθαρά’ εικονοστοιχεία, δηλαδή εκείνα στα οποία δεν υπάρχει νεφοκάλυψη. Τα εικονοστοιχεία αυτά εντοπίζονται για κάθε σκηνή από το κανάλι Cfmask του προϊόντος Surface Reflectance του δορυφόρου Landsat8. Με το λογισμικό MATLAB δημιουργείται ένας αλγόριθμος ο οποίος εντοπίζει και καταγράφει για τα συγκεκριμένα εικονοστοιχεία στα οποία χρωθετούνται οι σταθμοί τις τιμές του καναλιού Cfmask. Όσα εικονοστοιχεία έχουν την τιμή 0, σημαίνει, όπως προαναφέρθηκε στο Εδάφιο 3.2.2, πως είναι ‘καθαρά’ και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία αυτή, ενώ εάν παρουσιάζεται η τιμή 4, δηλαδή καλύπτονται από σύννεφα, παραλείπονται.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή παρουσιάστηκαν, εκτός από την τιμή 0, οι τιμές 2 και 4, οι οποίες αναφέρονται αντίστοιχα σε εικονοστοιχεία με εντοπισμό σκιάς σύννεφου και σε εικονοστοιχεία με νεφοκάλυψη. Τα πρώτα, εκείνα δηλαδή που αφορούν σκιά σύννεφου, θεωρούμε ότι δεν έχουν επίδραση στην ψύξη των αντικειμένων του εδάφους, καθώς τα σύννεφα είναι σε κίνηση και καλύπτουν τα αντικείμενα για λίγο χρόνο [52]. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αλγόριθμου για την κατάταξη των εικονοστοιχείων που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή αυτή βάση του καναλιού Cfmask παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

	Landsat 8	WU
Clear	796	572
Shadow	20	12
Cloud	126	88
<b>Σύνολο Εικονοστοιχείων</b>	<b>942</b>	<b>672</b>



**Εικόνα 4-4** Διάγραμμα διασποράς και ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης για τα ζεύγη θερμοκρασιών Tair και LST στα οποία δεν υπάρχει νεφοκάλυψη σύμφωνα με το κανάλι Cfmask

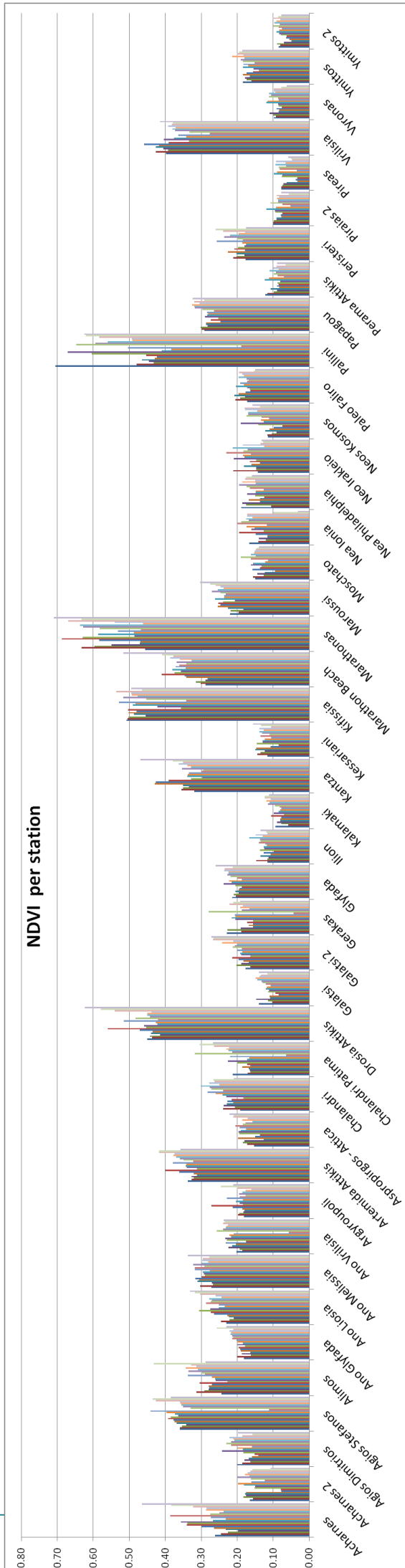


Για να βρεθεί το είδος **σχέσης μεταξύ των θερμοκρασιακών τιμών με τον δείκτη βλάστησης NDVI**, αρχικά υπολογίζονται οι τιμές NDVI για κάθε σταθμό και για κάθε ημερομηνία. Οι τιμές θερμοκρασίας που επιλέγονται να γίνει η συσχέτιση είναι εκείνες του αέρα, καθώς θεωρούνται με μικρότερη αβεβαιότητα από εκείνες που έχουν αντληθεί από το θερμικό κανάλι του Landsat 8, λόγω των σφαλμάτων βαθμονόμησης που παρουσιάστηκαν.

Στη συνέχεια, οι ημερομηνίες χωρίζονται σε εκείνες που ανήκουν σε θερινή περίοδο και σε εκείνες που ανήκουν σε χειμερινή περίοδο (Πίνακας 4-2), καθώς ο δείκτης βλάστησης διαφοροποιείται αναλόγως την εποχή. Στην Εικόνα 4-5 φαίνονται διαγραμματικά οι τιμές του κάθε σταθμού για όλες τις διαθέσιμες ημερομηνίες, όπου παρατηρείται η διαφοροποίηση αυτή. Τέλος, δημιουργούνται τα διαγράμματα διασποράς για κάθε εποχή, χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή θερμοκρασίας αέρα για κάθε τιμή του δείκτη βλάστησης NDVI (Εικόνες 4-6, 4-7).

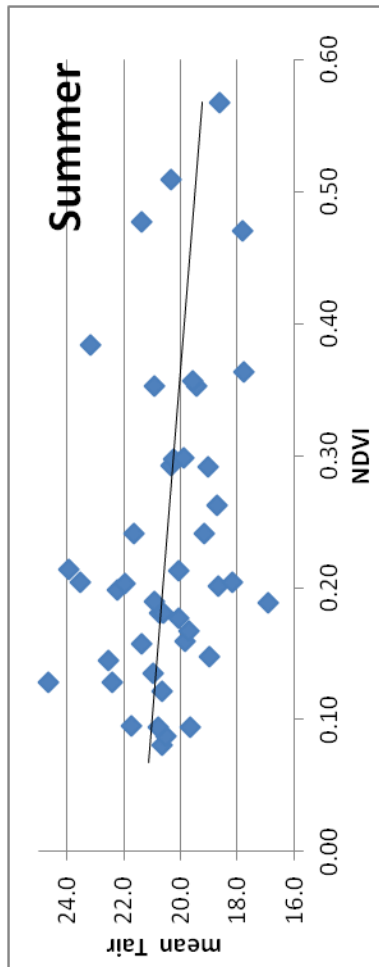
**Πίνακας 4-2** Κατάταξη ημερομηνιών των δορυφορικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε θερινή και χειμερινή περίοδο

Θερινή Περίοδος	Χειμερινή Περίοδος
30/4/2013	5/9/2013
19/7/2013	7/10/2013
4/8/2013	23/10/2013
20/8/2013	8/11/2013
22/7/2014	16/3/2014
23/8/2014	1/4/2014
6/5/2015	10/10/2014
9/7/2015	19/3/2015
25/7/2015	11/9/2015
26/8/2015	13/10/2015
	14/11/2015
	30/11/2015

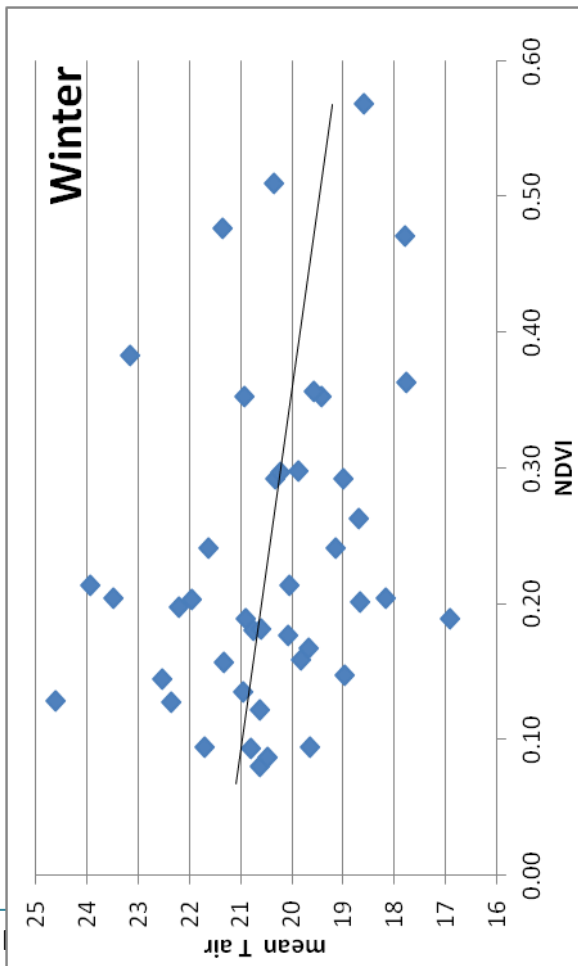


ΕΡΜΟ  
ΚΑΙ ΕΠ

**Εικόνα 4-5** Διάγραμμα τιμών δείκτη NDVI για κάθε σταθμό έτσι όπως υπολογίστηκε από τα δορυφορικά δεδομένα για κάθε ημερομηνία



**Εικόνα 4-6** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ θερμοκρασίας αέρα και δείκτη βλάστησης NDVI για την θερινή περίοδο



**Εικόνα 4-7** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ θερμοκρασίας αέρα και δείκτη βλάστησης NDVI για τη χειμερινή περίοδο

ΔΟΜΕ

Από τη στιγμή που παρατηρείται αρνητική συσχέτιση μεταξύ των θερμοκρασίας και του δείκτη βλάστησης NDVI και στις δύο περιόδους που ορίστηκαν, γίνεται προσπάθεια διαχωρισμού όλων των δεδομένων με βάση τον δείκτη αυτό, ώστε να βρεθούν γραμμικές εξισώσεις που να υποστηρίζουν τη συσχέτιση μεταξύ των  $T_{air}$  και LST με καλύτερο συντελεστή προσδιορισμού, και επομένως η συσχέτιση να είναι ισχυρότερη.

Οι κατηγορίες των εικονοστοιχείων της περιοχής μελέτης ως προς τις τιμές του NDVI ορίζονται στις παρακάτω τρεις:

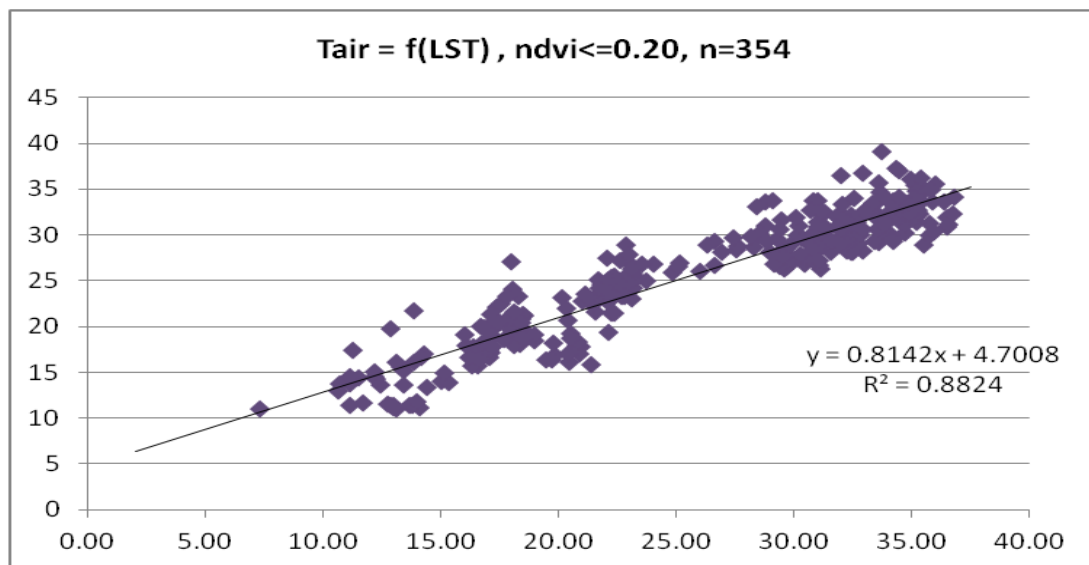
- περιοχές με έντονη βλάστηση
- περιοχές που βρίσκονται σε αστικό περιβάλλον χωρίς βλάστηση (περιοχές με πυκνή δόμηση, με έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα ή που καλύπτονται από σκέτο έδαφος)
- περιοχές που βρίσκονται σε αστικό περιβάλλον με παρουσία βλάστησης

Για να εντοπιστούν τα όρια των τιμών του δείκτη NDVI για την παραπάνω κατηγοριοποίηση, χρησιμοποιούνται εμπειρικά διάφορες τιμές του ως κατώφλι για κάθε κατηγορία. Η αντιστοιχία που επιλέγεται στο τέλος είναι η εξής (Πίνακας 4-3):

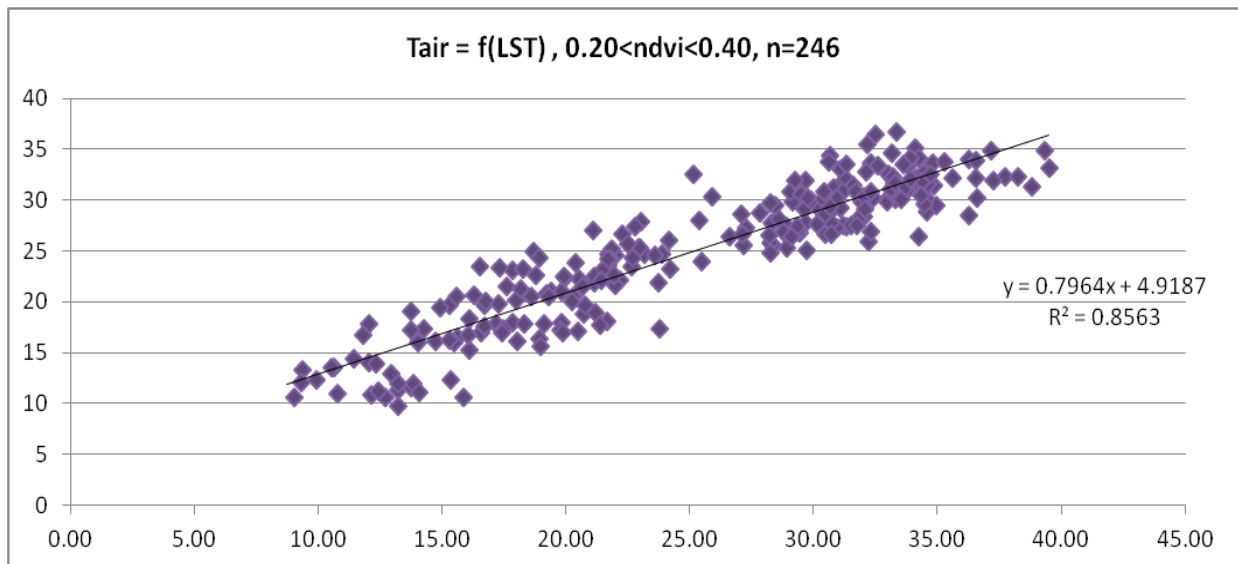
Πίνακας 4-3 Κατηγοριοποίηση δεδομένων ανάλυσης βάσει του δείκτη NDVI

A/A	Κατηγορία	Εύρος τιμών NDVI
1	Αστικό περιβάλλον	$\leq 0.20$
2	Μίξη βλάστησης – αστικού περιβάλλοντος	$0.20 - 0.40$
3	Έντονη βλάστηση	$\geq 0.40$

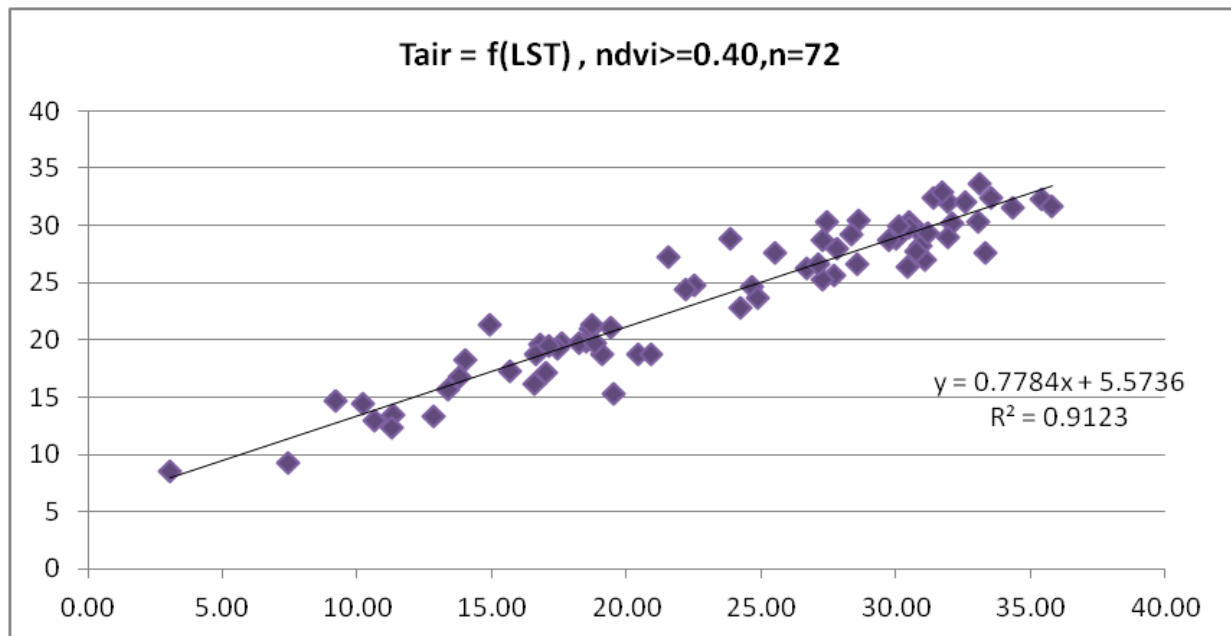
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα των γραμμικών παλινδρομήσεων που εφαρμόστηκαν σε κάθε κατηγορία.



Εικόνα 4-8 Διάγραμμα διασποράς και ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης για τα ζεύγη θερμοκρασιών  $T_{air}$  και LST της κατηγορίας 'Αστικό περιβάλλον' με  $NDVI \leq 0.2$



Εικόνα 4-9 Διάγραμμα διασποράς και ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης για τα ζεύγη θερμοκρασιών Tair και LST της κατηγορίας 'Μίξη βλάστησης – αστικού περιβάλλοντος' με  $0.2 < NDVI < 0.4$



Εικόνα 4-10 Διάγραμμα διασποράς και ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης για τα ζεύγη θερμοκρασιών Tair και LST της κατηγορίας 'Έντονη βλάστηση' με  $NDVI \geq 0.40$

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα εδάφια που ακολουθούν γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που βρέθηκαν από την παραπάνω μεθοδολογία και στατιστική ανάλυση.

### 5.1. Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας

Στον Πίνακα 4-1 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή εκπομπής για κάθε σταθμό όπως υπολογίστηκαν με τη χρήση του NDVI. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι περιοχές με περισσότερη και πιο πυκνή υγιή βλάστηση έχουν και υψηλότερο συντελεστή, καθώς η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στηρίζεται στο γεγονός ότι ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους και τη βλάστηση. Επομένως, όσο περισσότερο καλύπτεται μία περιοχή από υγιή βλάστηση, τόσο ο συντελεστής εκπομπής πλησιάζει στη μονάδα.

Όσο αφορά τα σημεία στα οποία χωροθετούνται οι μετεωρολογικοί σταθμοί, υψηλότερη μέση τιμή του συντελεστή παρουσιάζουν οι περιοχές του Μαραθώνα, της Κηφισιάς και της Δροσιάς, με τιμές πάνω από 0.980, ενώ ακολουθούν περιοχές κυρίως των βορειοανατολικών προαστίων όπου υπάρχει έντονο το στοιχείο της βλάστησης, όπως είναι η Παλλήνη, τα Βριλησσία, ο Άγιος Στέφανος και η Κάντζα. Αντίθετα, οι περιοχές με τη χαμηλότερη μέση τιμή συντελεστή εκπομπής είναι εκείνες όπου επικρατεί το αστικό στοιχείο, με πυκνή δόμηση και ελάχιστη ύπαρξη αστικού πράσινου. Αυτές είναι ο Βύρωνας, η Καισαριανή, ο Πειραιάς, το Πέραμα Αττικής και ο Υμηττός, με τιμές συντελεστή κάτω από 0.910.

Οι διαφοροποιήσεις του συντελεστή εκπομπής για τα σημεία αναφοράς οφείλονται στην εποχικότητα της βλάστησης που επικρατεί στην κάθε περιοχή, και άρα στο είδος της, αλλά ενδεχομένως και σε αλλαγές σε χρήση γης γύρω από το σημείο όπου έχει τοποθετηθεί ο κάθε σταθμός. Πιο συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο εύρος τιμών που παρατηρείται είναι στον σταθμό της Παλλήνης, με εύρος τιμών συντελεστή  $\Delta\epsilon = 0.119$ . Ακολουθούν οι σταθμοί των Άνω Βριλησίων, του Π. Φάληρου και στο Πάτημα Χαλανδρίου, με το  $\Delta\epsilon$  να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.070 – 0.075. Τέλος, μικρότερο  $\Delta\epsilon$  έχουν οι περιοχές όπου βρίσκονται οι σταθμοί στα Άνω Μελίσσια, στον Παπάγο και στα Άνω Λίοσια, με  $\Delta\epsilon = 0.003$ .

### 5.2. Χρονοσειρές

Όπως ήταν αναμενόμενο, και οι δύο καμπύλες θερμοκρασιών παρουσιάζουν τις ελάχιστες τιμές κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών (Σεπτέμβριος – Μάρτιος) και τις μέγιστες κατά τη διάρκεια των θερινών (Απρίλιος – Αύγουστος). Ως προς τις

μέγιστες τιμές, και τα τρία θερινά διαστήματα παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές, με θερμοκρασίες να κυμαίνονται μεταξύ 27°C και 39°C, και στις μετρημένες θερμοκρασίες αέρα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς αλλά και στις θερμοκρασίες LST, με τις δεύτερες να είναι λίγο πιο υψηλές. Όσο αφορά τις ελάχιστες τιμές των θερμοκρασιακών καμπυλών της περιοχής μελέτης, δεν είναι εφικτή η άντληση κάποιου συμπεράσματος καθώς δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα κατά τους χειμερινούς μήνες και κυρίως κατά την περίοδο Δεκεμβρίου – Ιανουαρίου. Αυτό οφείλεται τόσο στην συχνότητα λήψης δορυφορικών εικόνων του Landsat 8, η οποία ανέρχεται στις 16 ημέρες, όσο και στις καιρικές συνθήκες που επικρατούν τις συγκεκριμένες ημερομηνίες διέλευσης του δορυφόρου (ύπαρξη νεφοκάλυψης πάνω από τη ζητούμενη περιοχή).

Εάν συγκρίνουμε τις δύο χρονοσειρές μεταξύ τους, είναι εμφανής η έλλειψη μετεωρολογικών δεδομένων για αρκετές ημερομηνίες και σταθμούς. Αυτό, όπως έχει προαναφερθεί, ίσως οφείλεται σε βλάβες των μετεωρολογικών σταθμών ή σε απουσία συντήρησής τους από τους ιδιοκτήτες τους. Επιπλέον, μπορούν να εντοπιστούν σφάλματα μετρήσεων είτε για τα μετεωρολογικά, είτε για τα τηλεπισκοπικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των δύο αυτών χρονοσειρών, στις 31/03/2015 ορισμένες θερμοκρασίες LST έχουν αρκετά χαμηλότερη τιμή συγκριτικά με τις υπόλοιπες που έχουν υπολογιστεί για τους άλλους σταθμούς την ημερομηνία αυτή και με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες  $T_{air}$ . Επομένως για τις συγκεκριμένες τιμές ίσως υπάρχει κάποιο ραδιομετρικό σφάλμα στη μέτρηση του θερμικού δέκτη TIRS λόγω ύπαρξης νεφοκάλυψης πάνω από τα συγκεκριμένα σημεία και τα οποία αφαιρούνται από τη συνέχεια της διαδικασίας.

### 5.3. Γραμμική Παλινδρόμηση Μεταξύ $T_{air}$ και LST

Με τη μέθοδο αυτή παρατηρείται πως ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  είναι αρκετά υψηλός ( $R^2 = 0.876$ ), γεγονός που δείχνει ότι περίπου το 88% της διακύμανσης των θερμοκρασιών  $T_{air}$  μπορούν να ερμηνευθούν από την διακύμανση των θερμοκρασιών LST. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με την βιβλιογραφία. Οι Pelta, Chudnovsky και Schwarz [45] για την περιοχή του Tel-Aviv υπολόγισαν αντίστοιχη τιμή  $R^2 = 0.81$ , ενώ οι Kawashima, Ishida, Minomura και Miwa [46] υπολόγισαν για περιοχή στην κεντρική Ιαπωνία συντελεστή  $R^2$  ίσο με 0.80 .

Επιπλέον, παρατηρείται πως ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  παραμένει υψηλός ( $R^2 = 0.87$ ) και με την εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης στα ζεύγη θερμοκρασιών των 'καθαρών' εικονοστοιχείων, αλλά χαμηλότερος συγκριτικά με την χρήση όλων των διαθέσιμων εικονοστοιχείων. Παρόμοιο αποτέλεσμα έχουν

βρει και οι Gallo, Hale, Tarpley και Yu [47] για περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Συγκεκριμένα, το 94% της διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα στη μελέτη αυτή μπορεί να ερμηνευθεί από τη διακύμανση της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους για όλα τα δεδομένα, ενώ για τα ‘καθαρά’ δεδομένα η μέση τιμή του ποσού αυτού ισούται περίπου με 87%.

#### 5.4. Σχέση $T_{air}$ με NDVI

Στις Εικόνες 4-6 και 4-7 παρατηρείται πως ο δείκτης βλάστησης NDVI συσχετίζεται αρνητικά με την θερμοκρασία αέρα, με πιο ισχυρή συσχέτιση κατά τους θερινούς μήνες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το ίδιο φαινόμενο συμβαίνει με την θερμοκρασία εδάφους LST. Πολλές μελέτες έχουν δείξει την ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ του LST και του NDVI [48]. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Donglian S. και M. Kafatos [49], η συσχέτιση μεταξύ των θερμοκρασιών εδάφους LST με τον δείκτη βλάστησης NDVI εξαρτάται από την εποχή και την ώρα, με ισχυρότερη αρνητική συσχέτιση κατά τη θερινή περίοδο.

#### 5.5. Γραμμική Παλινδρόμηση Μεταξύ $T_{air}$ και LST με τη χρήση του NDVI

Παρατηρείται πως και οι τρεις κατηγορίες έχουν υψηλή γραμμική συσχέτιση, με  $R1^2 = 0.88$ ,  $R2^2 = 0.86$  και  $R3^2 = 0.91$ . Συγκριτικά με τον συντελεστή προσδιορισμού από όλα τα δεδομένα, καλύτερη συσχέτιση υπάρχει στην πρώτη και στην τελευταία κατηγορία, σε εκείνες δηλαδή που η ύπαρξη ή μη της βλάστησης σε κάθε εικονοστοιχείο είναι πιο σίγουρη, σε αντίθεση με την δεύτερη κατηγορία, όπου η ύπαρξη βλάστησης είναι σε συνδυασμό με κάποια τεχνητή επιφάνεια ή γυμνό έδαφος. Οι παράμετροι  $\alpha$ ,  $\beta$  των εξισώσεων μεταξύ  $T_{air}$  και LST για κάθε κατηγορία παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1.

Πίνακας 5-1 Συντελεστές των ευθειών παλινδρόμησης για κάθε κατηγορία

A/A	Κατηγορία	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
1	Αστικό περιβάλλον	0.8142	4.7008	0.882
2	Μίξη βλάστησης – αστικού περιβάλλοντος	0.7964	4.9187	0.856
3	Έντονη βλάστηση	0.7784	5.5736	0.912

Επιπρόσθετα, υπολογίζονται νέες τιμές θερμοκρασίας αέρα ( $T_{air}'$ ) από τις τιμές LST, με την εφαρμογή της κάθε εξίσωσης  $y = \alpha_i x + \beta_i$  στην κατηγορία που αντιστοιχεί, όπου  $y$  είναι η  $T_{air}'$  και  $x$  η τιμή LST που έχει υπολογιστεί, σε βαθμούς Κελσίου ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Οι διαφορές  $\Delta T$  μεταξύ των αρχικών (πραγματικών) τιμών  $T_{air}$  και των νέων τιμών  $T_{air}'$  που υπολογίστηκαν κυμαίνονται από  $-7.7^{\circ}\text{C}$  έως  $7.3^{\circ}\text{C}$ . Πιο συγκεκριμένα, από τα 671 ζεύγη μετρήσεων, τα 554 έχουν  $\Delta T < 3^{\circ}\text{C}$  εκ των οποίων τα 243 έχουν  $\Delta T \leq 1^{\circ}\text{C}$ , ενώ τα υπόλοιπα 117 ζεύγη παρουσιάζουν  $\Delta T \geq 3^{\circ}\text{C}$  (τα  $\Delta T$  σε απόλυτη τιμή), με τα ποσοστά των μετρήσεων αυτών επί το σύνολό τους να είναι αντίστοιχα 36%, 47% και 17% (Πίνακας 5 -2).

**Πίνακας 5-2 Ποσοστά δεδομένων αναλόγως το  $\Delta T$  μεταξύ των πραγματικών και των υπολογισμένων θερμοκρασιών αέρα**

$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	%
$\leq 1$	36
$1 < \Delta T < 3$	47
$\geq 3$	17

Η τυπική απόκλιση ( $s^2$ ) των νέων  $T_{air}'$  που υπολογίστηκαν με την κατηγοριοποίηση βάσει του δείκτη βλάστησης NDVI και με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης ανέρχεται στους  $5.44^{\circ}\text{C}$ , η ρίζα μέσης τετραγωνικής απόκλισης (RMSE) στους  $2.33^{\circ}\text{C}$  και το μέσο σφάλμα (mean average error, MAE) στους  $2.29^{\circ}\text{C}$ .

Οι Xiao, Ouyang και Zheng [50] υπολόγισαν με την ίδια μεθοδολογία για την πόλη του Πεκίνου τυπική απόκλιση ίση με  $4.1^{\circ}\text{C}$ , ενώ οι Vancutsem, Ceccato, Dinku και Coppor [37] υπολόγισαν τυπική απόκλιση ίση με  $2.4^{\circ}\text{C}$  και μέσο σφάλμα MAE =  $1.73^{\circ}\text{C}$  για διαφορετικά οικοσυστήματα στην Αφρική.

Αντίστοιχα, η τυπική απόκλιση και το μέσο σφάλμα των υπολογισμένων  $T_{air}'$  για κάθε κατηγορία φαίνεται στον Πίνακα 5-3 και για κάθε ημερομηνία στον Πίνακα 5-4.

**Πίνακας 5-3 Τυπική απόκλιση  $s^2$ , μέσο σφάλμα MAE και αριθμός μετρήσεων n για κάθε κατηγορία**

A/A	Κατηγορία	$s^2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	MAE ( $^{\circ}\text{C}$ )	n
1	Αστικό περιβάλλον	5.16	1.8	354
2	Μίξη βλάστησης – αστικού περιβάλλοντος	6.30	2.0	246
3	Έντονη βλάστηση	3.69	1.5	72



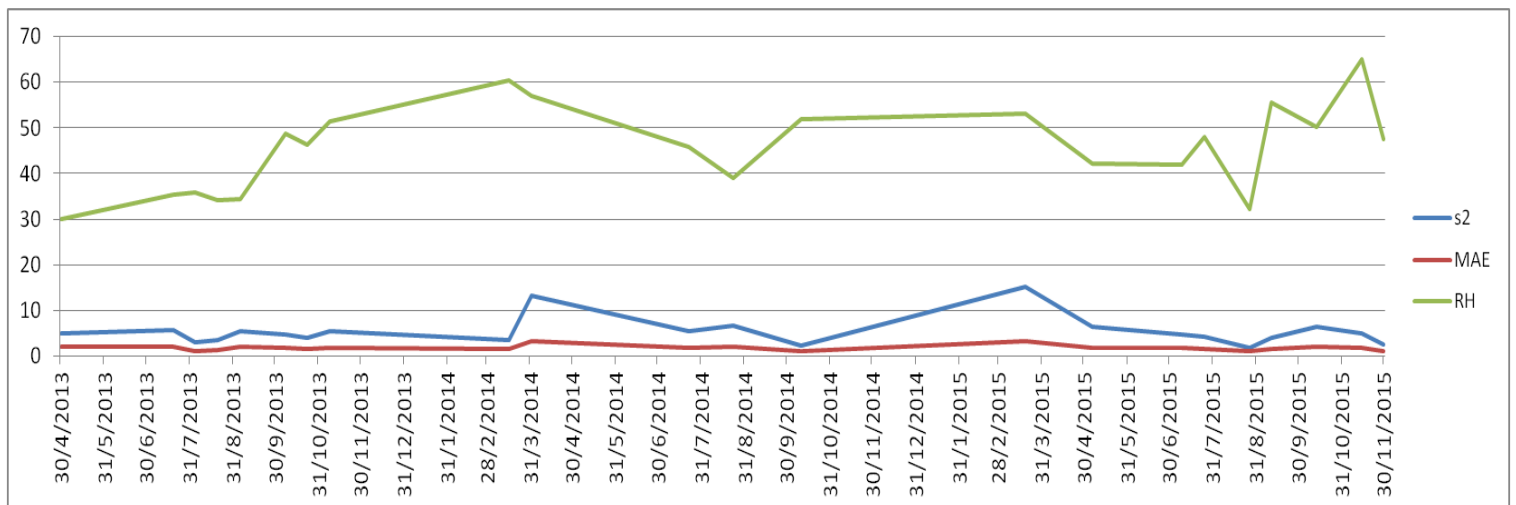
Πίνακας 5-4 Τυπική απόκλιση  $s^2$ , μέσο σφάλμα ΜΑΕ, αριθμός μετρήσεων n, ποσοστό νεφοκάλυψης δεδομένων από το κανάλι Cfmask και μέση σχετική υγρασία (Mean Relative Humidity, MRH) για κάθε ημερομηνία

Ημερομηνία	$s^2$ (°C)	ΜΑΕ (°C)	n	Νεφοκάλυψη %	MRH (%)
30/4/2013	5.06	2.0	27	0.0	30
19/7/2013	5.78	2.1	27	0.0	35
4/8/2013	3.00	1.1	30	0.0	36
20/8/2013	3.57	1.3	28	0.0	34
5/9/2013	5.53	2.0	26	0.0	34
7/10/2013	4.82	1.8	29	58.6	49
23/10/2013	3.99	1.6	27	37.0	46
8/11/2013	5.34	1.7	29	58.6	51
16/3/2014	3.45	1.6	32	0.0	60
1/4/2014	13.24	3.3	36	0.0	57
22/7/2014	5.46	1.9	30	3.3	46
23/8/2014	6.67	2.0	33	0.0	39
10/10/2014	2.24	1.1	35	34.3	52
19/3/2015	15.22	3.3	35	68.6	53
6/5/2015	6.39	1.9	34	0.0	42
9/7/2015	4.82	1.8	30	0.0	42
25/7/2015	4.15	1.6	31	0.0	48
26/8/2015	1.75	1.0	33	0.0	32
11/9/2015	3.91	1.5	31	0.0	56
13/10/2015	6.35	2.1	30	20.0	50
14/11/2015	4.94	1.7	29	0.0	65
30/11/2015	2.42	1.1	30	0.0	48

Στον Πίνακα 5-3 παρατηρείται πως μεγαλύτερη αβεβαιότητα υπάρχει στην κατηγορία 'Μίξη βλάστησης – αστικού περιβάλλοντος', ακολουθεί η κατηγορία 'Αστικό περιβάλλον' και έπειτα η κατηγορία 'Έντονη βλάστηση'. Αυτό ίσως οφείλεται στο ότι η περιοχή μελέτης είναι αστική, επομένως είναι πολύ πιθανό να χρειάζεται και άλλες παράμετρους υπολογισμού της ζητούμενης συσχέτισης πέρα από τον δείκτη βλάστησης NDVI. Επακόλουθο αυτού αποτελεί το σφάλμα εκτίμησης του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας, και συνεπώς, το σφάλμα υπολογισμού των θερμοκρασιών επιφάνειας εδάφους, δημιουργώντας τυπικές αποκλίσεις έως 6.3 °C.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα ανά ημερομηνία του Πίνακα 5-4, αρχικά παρατηρείται πως στους χειμερινούς μήνες το εύρος τιμών της τυπικής απόκλισης είναι 2.24 °C – 15.22 °C και κατά τους θερινούς μήνες 1.75 °C – 6.67 °C. Το γεγονός αυτό δείχνει πως από μετρήσεις κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου μπορούν να βγουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς η τυπική απόκλιση κατά την περίοδο

αυτή είναι σχεδόν η μισή από τα αποτελέσματα των χειμερινών μηνών. Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως η νεφοκάλυψη δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στην ύπαρξη σφαλμάτων στον υπολογισμό των εξισώσεων συσχέτισης μεταξύ  $T_{air}$  και LST. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις υπάρχουν στα δεδομένα των ημερομηνιών 1/4/2014 ( $s^2 = 13.24 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) και 19/3/2015 ( $s^2 = 15.22 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Το ποσοστό των εικονοστοιχείων στα οποία χωροθετούνται οι σταθμοί και στα οποία, σύμφωνα με το κανάλι Cfmask του Landsat 8, υπάρχει νεφοκάλυψη είναι αντίστοιχα 0.0% και 68.6%. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην ύπαρξη μικροσωματιδίων στην ατμόσφαιρα, όπως είναι οι ατμοσφαιρικοί ρύποι, τα αερολύματα ή ακόμα και η ύπαρξη υγρασίας στον αέρα.



Εικόνα 5-1 Χρονοσειρά μεταβολής τυπικής απόκλισης  $s^2$ , μέσου σφάλματος MAE και μέσης σχετικής υγρασίας RH

Από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις σχετικής υγρασίας (Relative Humidity, RH). Η σχετική υγρασία δίνει το μέτρο του κατά πόσο η ατμόσφαιρα είναι μακριά ή κοντά στο σημείο κόρου, δηλαδή το σημείο εκείνο της θερμοκρασίας του αέρα που όταν οι υδρατμοί ψυχθούν δημιουργούν σταγόνες δρόσου. Για την εύρεση των τιμών της σχετικής υγρασίας ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτήν που ακολουθήθηκε κατά τη συλλογή των μετεωρολογικών δεδομένων. Για κάθε ημερομηνία και κάθε σταθμό, συλλέγονται οι τιμές της σχετικής υγρασίας που υπήρχε στην ατμόσφαιρα τη στιγμή της κάθε μέτρησης, και στη συνέχεια, ανά ημερομηνία υπολογίζεται η μέση τιμή. Η μέση σχετική υγρασία (mean relative humidity, MRH) της κάθε ημερομηνίας αναγράφεται στον Πίνακα 5-4.

Στην Εικόνα 5-1 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές μεταβολής της τυπικής απόκλισης, του μέσου σφάλματος και της μέσης σχετικής υγρασίας. Είναι φανερό πως η μορφή των καμπύλων που αντιστοιχούν στα δύο είδη σφαλμάτων είναι παρόμοια με

εκείνη της μέσης σχετικής υγρασίας. Δηλαδή, στις περιοχές του διαγράμματος όπου η μέση σχετική υγρασία παρουσιάζει μέγιστα, οι τιμές των σφαλμάτων είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές των κοντινών ημερομηνιών, ενώ όταν παρουσιάζει ελάχιστα, οι τιμές των σφαλμάτων τείνουν να είναι χαμηλές συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί πως η σχετική υγρασία όντως προσθέτει σφάλματα στις μεθοδολογίες εκτίμησης της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους, και, κατά συνέπεια, στις μεθοδολογίες συσχέτισης των θερμοκρασιών επιφάνειας εδάφους με τις θερμοκρασίες αέρα.



## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται στην αρχή μία σύνοψη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία και ανάλυση των τηλεπισκοπικών και μετεωρολογικών δεδομένων, ενώ ακολουθούν τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω στο αντικείμενο αυτό.

### 6.1. Σύνοψη αποτελεσμάτων

Παρότι είναι γνωστό ότι η συσχέτιση θερμοκρασιών εδάφους και αερά απαιτεί σύνθετα μοντέλα και πολλαπλές παραμέτρους, σε αυτή την εργασία μελετήθηκε η συσχέτισή τους σε μια περιορισμένη χωρικά κλιμακα γύρω από ένα αστικό κέντρο. Η περιοχή που χρησιμοποιήθηκε ως περιοχή μελέτης είναι εκείνη της Αθήνας και των προαστίων της, τα δορυφορικά δεδομένα είναι του Landsat 8 OLI/TIRS, ενώ τα θερμοκρασιακά δεδομένα προήλθαν από σταθμούς του δικτύου Weather Underground που εκτείνονται σε ένα μεγάλο ποσοστό της περιοχής.

Αρχικά δημιουργήθηκαν χρονοσειρές για την περίοδο 30/04/2013 έως 30/11/2015 για τις θερμοκρασίες αέρα, αλλά και για τις θερμοκρασίες επιφάνειας εδάφους (LST) οι οποίες είχαν υπολογιστεί με τη χρήση της εξίσωσης μετάδοσης ακτινοβολίας. Με τη σύγκριση των δύο χρονοσειρών, παρατηρήθηκε από τις θερμοκρασιακές καμπύλες πως υπάρχει μία ποιοτική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Για την εύρεση της συσχέτισης αυτής, εφαρμόστηκε στα δεδομένα η μέθοδος της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, με την οποία επιτεύχθηκε συντελεστής προσδιορισμού ίσος με 0.876, γεγονός που έδειξε ένα καλό ποσοστό συσχέτισης για όλα τα δεδομένα. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής έγινε και στα ζεύγη θερμοκρασιών στα οποία, σύμφωνα με το προϊόν Surface Reflectance του Landsat 8, παρατηρήθηκε η ύπαρξη νεφοκάλυψης, όπου ο συντελεστής προσδιορισμού παρέμεινε υψηλός, αλλά χαμηλότερος συγκριτικά με τη συσχέτιση όλων των δεδομένων.

Στη συνέχεια, βάσει βιβλιογραφίας, έχει διαπιστωθεί πως υπάρχει αρνητική συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους και του δείκτη βλάστησης NDVI, με ισχυρότερη συσχέτιση κατά τους θερινούς μήνες. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να συγκριθεί ο δείκτης NDVI με τη θερμοκρασία αέρα, αφού βρέθηκε πως οι δύο διαφορετικές θερμοκρασίες μπορούν να συσχετιστούν με υψηλή ακρίβεια. Τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια με την βιβλιογραφία, επομένως ήταν εφικτός ο διαχωρισμός της περιοχής μελέτης σε κατηγορίες ανάλογα με τον δείκτη βλάστησης για την επίτευξη ισχυρότερων συσχετίσεων μεταξύ των θερμοκρασιών αέρα και επιφάνειας εδάφους.

Δημιουργήθηκαν τρεις κατηγορίες στην περιοχή μελέτης: η πρώτη με τιμές NDVI μικρότερες ή ίσες με την τιμή 0.20, η δεύτερη μεταξύ των τιμών 0.20 και 0.40 και η τρίτη με τιμές μεγαλύτερες ή ίσες με την τιμή 0.40. Με αυτήν την κατηγοριοποίηση δημιουργήθηκαν τρεις νέες εξισώσεις  $T_{air} = f(LST)$ , εκ των οποίων η πρώτη αφορούσε τις περιοχές χωρίς βλάστηση και, αφού η περιοχή μελέτης είναι αστική περιοχή, τις περιοχές με ύπαρξη τεχνητών επιφανειών (κτίρια, αθλητικές εγκαταστάσεις, οδικό δίκτυο, κτλ). Η δεύτερη αφορούσε περιοχές με μίξη βλάστησης και εδάφους ή τεχνητών επιφανειών και η τρίτη περιοχές με έντονη και πυκνή βλάστηση (πάρκα, άλση, πλατείες, κτλ). Αφού εφαρμόστηκε σε κάθε κατηγορία η μέθοδος της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, υπολογίστηκαν οι νέοι συντελεστές προσδιορισμού, με τιμές  $R1 = 0.88$ ,  $R2 = 0.86$  και  $R3 = 0.91$ . Παρατηρήθηκε υψηλότερη συσχέτιση μεταξύ των  $T_{air}$  και των LST, όπως προβλεπόταν, με εξαίρεση την δεύτερη κατηγορία, παραμένοντας όμως ικανοποιητική.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι νέες θερμοκρασίες αέρα από τις παραπάνω εξισώσεις με βάση τις θερμοκρασίες επιφάνειας εδάφους. Η τυπική απόκλιση των νέων  $T_{air}'$  ήταν ίσες με  $5.4^{\circ}\text{C}$ , η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από τη βιβλιογραφία. Για να γίνει εντοπισμός της πηγής των σφαλμάτων, αρχικά υπολογίστηκαν οι τυπικές αποκλίσεις των νέων  $T_{air}'$  ανά κατηγορία και στη συνέχεια ανά ημερομηνία.

*Ανά κατηγορία*, παρατηρήθηκε πως μεγαλύτερο σφάλμα υπήρχε στις θερμοκρασίες της κατηγορίας 'Μίξη βλάστησης – αστικού περιβάλλοντος', όπου ο διαχωρισμός των επιμέρους στοιχείων του αστικού περιβάλλοντος δεν ήταν εφικτός. Αυτό ίσως οφειλόταν σε σφάλματα κατά την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας, και, κατά συνέπεια, σε σφάλματα στον υπολογισμό των θερμοκρασιών επιφάνειας εδάφους.

*Ανά ημερομηνία*, υπολογίστηκε αρχικά το ποσοστό νεφοκάλυψης από τον αλγόριθμο C<sub>f</sub>mask του Landsat 8 και η μέση σχετική υγρασία για κάθε ημερομηνία από τις μετεωρολογικές παρατηρήσεις του δικτύου Weather Underground. Παρατηρήθηκε πως στους χειμερινούς μήνες το τυπικό σφάλμα ήταν σχεδόν διπλάσιο από ό,τι στους θερινούς. Επίσης, η νεφοκάλυψη δεν εισήγαγε πάντα σφάλμα στις μετρήσεις, εκτός κι αν υπήρχε κάποιο χονδροειδές σφάλμα, το οποίο μπορούσε να φανεί στη σύγκριση των χρονοσειρών  $T_{air}$  και LST, όπως έγινε και στην αρχή της επεξεργασίας των δεδομένων. Αντίθετα, ένα από τα στοιχεία εκείνα που ήταν υπεύθυνα για την εισαγωγή σφαλμάτων στις μεθοδολογίες που αφορούν τη θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους είναι η ατμοσφαιρική υγρασία. Ένα μέτρο της είναι η σχετική υγρασία, της οποίας η μέτρηση γίνεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς παράλληλα με τη μέτρηση θερμοκρασίας. Παρατηρήθηκε πως όσο περισσότερη σχετική υγρασία υπήρχε στην ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερο σφάλμα θα υπήρχε στις υπολογισμένες  $T_{air}$ . Αυτό οφειλόταν στα σφάλματα που εισήχθησαν

κατά τον υπολογισμό του LST λόγω της ύπαρξης μικροσωματιδίων στην ατμόσφαιρα (υδρατμών).

## 6.2. Σύνοψη Συμπερασμάτων

Από τα παραπάνω αποτελέσματα της επεξεργασίας των τηλεπισκοπικών δεδομένων του δέκτη Landsat 8 OLI/TIRS και των μετεωρολογικών παρατηρήσεων του δικτύου Weather Underground, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

1. η θερμοκρασία αέρα έχει υψηλή συσχέτιση με την θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους για την περιοχή της Αθήνας και των προαστίων, με  $R^2 = 0.88$  ( $n = 672$ ), όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης
2. η σύγκριση των θερμοκρασιακών καμπύλων μεταξύ θερμοκρασιών αέρα και θερμοκρασιών επιφάνειας εδάφους συμβάλλει στον εύκολο εντοπισμό χονδροειδών σφαλμάτων στα δεδομένα
3. η γνώση των περιοχών με ύπαρξη ή μη πυκνής/ υγιούς βλάστησης είναι σημαντική για την παρακολούθηση, εκτίμηση και πρόγνωση θερμοκρασιών και θερμοκρασιακών μεταβολών σε μία περιοχή
4. ο δείκτης βλάστησης NDVI παίζει ισχυρό ρόλο στον υπολογισμό και στην εκτίμηση θερμοκρασιών επιφάνειας εδάφους, και, κατά συνέπεια, και θερμοκρασιών αέρα, αλλά για τις αστικές περιοχές απαιτούνται και άλλοι δείκτες που να περιγράφουν τα χαρακτηριστικά μορφολογίας και δομής τους σε 2 και 3 διαστάσεις (π.χ. 3D αεροδυναμικά μοντέλα κίνησης)
5. από μετρήσεις κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου μπορούν να βγουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς η τυπική απόκλιση κατά την περίοδο αυτή είναι σχεδόν η μισή από τα αποτελέσματα των χειμερινών μηνών
6. η νεφοκάλυψη στις μεθοδολογίες εκτίμησης θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους δεν παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς αφορά χονδροειδή σφάλματα στις υπολογισμένες τιμές LST, τα οποία μπορούν να εντοπιστούν από τη σύγκριση χρονοσειρών των δύο διαφορετικών θερμοκρασιών
7. είναι εφικτός ο υπολογισμός θερμοκρασιών αέρα με σχετικά καλή ακρίβεια από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες επιφάνειας εδάφους για την περιοχή της Αθήνας και των προαστίων, εάν είναι γνωστή μόνο η τιμή του δείκτη NDVI
8. κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη κι άλλων δεδομένων για κάθε σταθμό που αφορούν υγρασία αέρα, ατμοσφαιρικούς ρύπους και ποσότητα αερολυμάτων τα οποία επηρεάζουν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους, για την εύρεση εξισώσεων που να περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη σχέση μεταξύ  $T_{air}$  και LST, καθώς εισάγουν επιπρόσθετα σφάλματα στα κανάλια που αφορούν το οπτικό, εγγύς υπέρυθρο και θερμικό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

9. όσο πιο πυκνό δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών έχει μία περιοχή, τόσο περισσότερα θερμοκρασιακά δεδομένα σύγκρισης θα υπάρχουν για τα δορυφορικά δεδομένα, με αποτέλεσμα την εύρεση της βέλτιστης σχέσης μεταξύ των δύο παραμέτρων για την περιοχή αυτή και καλύτερη αξιολόγηση της μεθοδολογίας

### 6.3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Παρακάτω αναγράφονται μερικές προτάσεις για συνέχιση της έρευνας πάνω στο αντικείμενο αυτό:

- χρήση δεδομένων από δορυφορικούς δέκτες με συχνότερη διέλευση πάνω από την περιοχή μελέτης για την κατασκευή πληρέστερων χρονοσειρών
- εφαρμογή σε περιοχές χωρίς σύνθετες τεχνητές επιφάνειες, με κύριο χαρακτηριστικό τη βλάστηση
- εύρεση συσχέτισης σχετικής υγρασίας με θερμοκρασιακά δεδομένα
- εφαρμογή σε εικόνες υψηλότερης χωρικής ανάλυσης:
  - διαχωρισμός περιοχών σε περισσότερες κατηγορίες χρήσης γης λόγω καλύτερης διακριτικής ικανότητας
  - εύρεση τραχύτητας της κάθε επιφάνειας και προσπάθεια υπολογισμού συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας με μεγαλύτερη ακρίβεια
- προσθήκη μετρήσεων υγρασίας εδάφους για καλύτερη εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας
- εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής σε περιοχές με μεγαλύτερα υψόμετρα



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΞΕΝΗ

1. Becker F., Z.-L. Li, 1995: Surface Temperature and Emissivity at Various Scales: Definition, Measurement and Related Problems. *Remote Sensing Reviews* 12: 225–53
2. Wan Z. M, 1999: MODIS Land Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document. Version 3.3. Washington, DC: NASA/GSFC, 1–77
3. Norman J. M., F. Becker, 1995: Terminology in Thermal Infrared Remote Sensing of Natural Surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 153–66
4. Schmugge T., French A., Ritchie J. C., Rango A., H. Pelgrum, 2002: Temperature and Emissivity Separation from Multispectral Thermal Infrared Operation. *Remote Sensing of the Environment*, 79: 189 – 198
5. Weng Q. H., Dengsheng L. and J. Schubring, 2004: Estimation of Land Surface Temperature Vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies. *Remote Sensing of the Environment*, 89: 476 – 483
6. Li Z.-L., Wu H., Wang N., Qiu S., Sobrino J. A, Wan Z., Tang B.-H., Yan G., 2013: Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 1–44
7. Sobrino J. A., N. Raissouni, Z.-L. Li. 2001: A Comparative Study of Land Surface Emissivity Retrieval from NOAA Data. *Remote Sensing of Environment* 75: 256–66
8. Sobrino J. A., J. C. Jimenez-Munoz, W. Verhoef, 2005: Canopy Directional Emissivity: Comparison between Models. *Remote Sensing of Environment* 99: 304–14
9. Sokolik I. N., 2003: Lecture Notes for Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans ATOC/ASEN 5235. Georgia Institute of Technology
10. Yang J., Wong M.S., Menenti M., Nichol J., 2015: Study of the geometry effect on land surface temperature retrieval in urban environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 109: 77 – 87
11. Snyder, W. C., Z. Wan, Y. Zhang, and Y. Z. Feng., 1998: Classification-Based Emissivity for Land Surface Temperature Measurement from Space.” *International Journal of Remote Sensing* 19: 2753–74
12. Van de Griend A. A., M. Owe, 1993: On the Relationship between Thermal Emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for Natural Surfaces. *International Journal of Remote Sensing* 14: 1119–31
13. Valor E., V. Caselles, 1996: Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas. *Remote Sensing of Environment* 57: 167–84

14. Jimenez-Munoz J. C., J. A. Sobrino, A. Gillespie, D. Sabol, W. T. Gustafson, 2006: Improved Land Surface Emissivities over Agricultural Areas Using ASTER NDVI. *Remote Sensing of Environment* 103: 474–87
15. Dash P., F. M. Gottsche, F. S. Olesen, H. Fischer, 2005: Separating Surface Emissivity and Temperature Using Two-Channel Spectral Indices and Emissivity Composites and Comparison with a Vegetation Fraction Method. *Remote Sensing of Environment* 96: 1–17
16. Watson K, 1992: Two-Temperature Method for Measuring Emissivity. *Remote Sensing of Environment* 42: 117 – 21
17. Barducci A., I. Pippi., 1996: Temperature and Emissivity Retrieval from Remotely Sensed Images Using the ‘Grey Body Emissivity’ Method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34: 681–95
18. Jaggi S., D. Quattrochi, R. Baskin, 1992: An Algorithm for the Estimation of Bounds on the Emissivity and Temperatures from Thermal Multispectral Airborne Remotely Sensed Data. In Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, Pasadena, CA, June 1–5, 22–4
19. Sabol D. E. Jr, A. R. Gillespie, E. Abbott, G. Yamada., 2009: Field Validation of the ASTER Temperature–Emissivity Separation Algorithm.” *Remote Sensing of Environment* 113: 2328–44
20. Gillespie A. R., 1985: Lithologic Mapping of Silicate Rocks Using TIMS. In Proceedings of the Thermal Infrared Multispectral Scanner Data User’s Workshop, Pasadena, CA, June 18–19, 29–44
21. Mushkin A., L. K. Balick, A. R. Gillespie, 2005: Extending Surface Temperature and Emissivity Retrieval to the Mid-Infrared (3–5  $\mu\text{m}$ ) Using the Multispectral Thermal Imager (MTI). *Remote Sensing of Environment* 98: 141–51
22. Becker F., Z.-L. Li, 1990: Temperature-Independent Spectral Indices in Thermal Infrared Bands. *Remote Sensing of Environment* 32: 17–33
23. Li Z.-L., F. Becker, 1990: Properties and Comparison of Temperature-Independent Thermal Infrared Spectral Indices with NDVI for HAPEX Data. *Remote Sensing of Environment* 33: 165–82
24. Li Z.-L., F. Becker, M. P. Stoll, Z. M. Wan, 1999: Evaluation of Six Methods for Extracting Relative Emissivity Spectra from Thermal Infrared Images. *Remote Sensing of Environment* 69: 197–214
25. Nerry F., F. Petitcolin, M. P. Stoll, 1998: Bidirectional Reflectivity in AVHRR Channel 3: Application to a Region in Northern Africa. *Remote Sensing of Environment* 66: 298–316
26. Jin M., 2004: Analysis of land skin temperature using AVHRR observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85: 587–600
27. Yu X., X. Guo, Z. Wu, 2014: Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split

- Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sensing*, 6: 9829-9852, doi: 10.3390/rs6109829
28. Chen F., S. Yang, Z. Su, K. Wang, 2016: Effect of emissivity uncertainty on surface temperature retrieval over urban areas: Investigations based on spectral libraries. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 114: 53 – 65
29. Jiménez-Munoz J. C., J. Cristóbal, J. A. Sobrino, G. Sòria, M. Ninyerola, X. Pons, 2009: Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47: 339–349
30. Du C., Ren H., Qin Q., Meng J., Zhao S., 2015: A Practical Split-Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8 Data. *Remote Sensing*, 7(1): 647-665, doi:10.3390/rs70100647
31. Wan Z., 2014: New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140: 36–45
32. Li J., Song C., Cao L., Zhu F., Meng X., Wu J., 2011: Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China, *Remote Sensing of the Environment*, 115: 3249 – 3263
33. Basist A., N.C. Grody, T.C. Peterson, C.N. Williams, 1998: Using the special sensor microwave/imager to monitor land surface temperatures, wetness, and snow cover. *Journal of Applied Meteorology* 37: 888–911
34. Peterson T.C., A.N. Basist, C.N. Williams, N.C. Grody, 2000: A blended satellite — In situ near-global surface temperature dataset, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81: 2157–2164
35. Florio E.N., S.R. Lele, Y.C. Chang, R. Sterner, G.E. Glass, 2004: Integrating AVHRR satellite data and NOAA ground observations to predict surface air temperature: A statistical approach. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 2979–2994
36. Anderson S., 2002: An evaluation of spatial interpolation methods on air temperature in Phoenix, Arizona State, Department of Geography, Arizona State University , Retrieved from the World Wide Web: <http://www.cobblestoneconcepts.com/ucgis2summer/anderson/anderson.htm>
37. Vancutsem C., Ceccato P., Dinku T., S. J. Connor, 2009: Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of the Environment* 114: 449 – 465
38. Stisen S., I. Sandholt, A. Nørgaard, R. Fensholt, L. Eklundh, 2007: Estimation of diurnal air temperature using MSGSEVIRI data in West Africa. *Remote Sensing of the Environment*, 110: 262–274
39. Annibale R., Bonafoni S., Pichierri M., 2014: Spatial and temporal trends of the surface and air heat island over Milan using MODIS data. *Remote Sensing of the Environment* 150: 163 – 171

40. Gallo K. P., Owen T. W., 1999: Satellite based adjustments for the urban heat island temperature bias. *Journal of Applied Meteorology*, 38: 806 - 813
41. Sobrino J. A., N. Raissouni, 2000: Toward Remote Sensing Methods for Land Cover Dynamic Monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing* 21(2): 353-366
42. Stathopoulou M., C. Cartalis, 2007: Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: an application to major cities in Greece. *Solar Energy*, 81: 358–368
43. Markham B. L., J. L. Barker, 1985: Spectral characterization of the Landsat Thematic Mapper sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 6: 697–716
44. Yu X., X. Guo, Z. Wu 2, 2014: Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sensing* 6: 9829-9852, doi: 10.3390/rs6109829
45. Pelta, Chudnovsky, Schwarz, 2016: Spatio-temporal behavior of brightness temperature in Tel-Aviv and its application to air temperature monitoring, *Environmental Pollution* 208: 153 – 160
46. Kawashima, Ishida, Minomura, Miwa, 2000: Relations between Surface Temperature and Air Temperature on a Local Scale during Winter Nights, *Journal of Applied Meteorology* 39: 1570 – 1578
47. Gallo K., Hale R., Tarpley D., Y. Yu, 2011: Evaluation of the Relationship between Air and Land Surface Temperature under Clear- and Cloudy-Sky Conditions. *Notes and Correspondence, American Meteorological Society*, 767 – 775
48. Gurney, R. K., J. P. Ormsby, D. K. Hall, 1983: Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape. *Permafrost: Fourth Int. Conf.*, Fairbanks, AK, University of Alaska and National Academy of Sciences, 401 – 404
49. Sun D., M. Kafatos, Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature - related drought indices over North America, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, 2007
50. Xiao R., Ouyang Z., Zheng H., Li W., Schienke E. W., Wang X., 2007: Spatial pattern of impervious surfaces and their impacts on land surface temperature in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 19: 250-256
51. Stathopoulou, M., Cartalis, C. Petrakis, M., 2006: Integrating CORINE land cover data and Landsat TM for surface emissivity definition: an application for the urban area of Athens, Greece, *International Journal of Remote Sensing*

### **ΕΛΛΗΝΙΚΗ**

52. Αργιαλάς Δ., 1999: Σημειώσεις μαθήματος «Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση», Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
53. Καραθανάση Β., 2014: Σημειώσεις μαθήματος «Ειδικά Κεφάλαια Τηλεπισκόπησης», Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
54. Φλοκας Απ., 1997: Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Εκδόσεις ΖΗΤΗ
55. Καμπεζίδης Χ., Το κλίμα της Αθήνας, 'Ε&Τ', Περιοδική ενημερωτική έκδοση της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας, Υπουργείο Ανάπτυξης, Απρίλιος 2005, σελ. 23 – 28)
56. Λιώκη – Λειβαδά Η., Δ.Ν. Ασημακόπουλος, 2004: «Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη στατιστική», Τεύχος Ι, Εκδόσεις Συμμετρία
57. Μπουτσικας Μ.Β., 2004: Σημειώσεις μαθήματος «Στατιστικά Προγράμματα», Τμήμα Στατ. & Ασφ. Επιστήμης, Πανεπιστήμιο Πειραιώς

### **ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ**

58. <http://www.earth.esa.int>
59. <http://www.meteo-news.gr>
60. <http://landsat.usgs.gov>
61. [http://landsat.usgs.gov/documents/provisional\\_l8sr\\_product\\_guide.pdf](http://landsat.usgs.gov/documents/provisional_l8sr_product_guide.pdf)
62. [http://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php)
63. <http://www.wunderground.com>



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα αυτό γίνεται περιγραφή των 43 μετεωρολογικών σταθμών της υπηρεσίας Weather Underground που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, όπως αυτοί περιγράφονται στην ιστοσελίδα της. Συγκεκριμένα, εκτός από τις πολικές συντεταγμένες τους, αναγράφονται το είδος του κάθε σταθμού όπως επίσης και το λογισμικό που χρησιμοποιείται, όπου αυτά είναι διαθέσιμα στις πληροφορίες που παρέχονται από το Weather Underground.

### 1. Acharnes

Latitude	N 38 ° 5 ' 49 "
Longitude	E 23 ° 43 ' 54 "
Hardware	ProWeatherStation
Software	Cumulus v1.9.4



### 2. Acharnes 2

Latitude	N 38 ° 4 ' 57 "
Longitude	E 23 ° 44 ' 41 "
Hardware	LaCrosse Weather Pro Center Remote Monitoring 2800 Series
Software	Cumulus v1.9.4

### 3. Agios Dimitrios

Latitude	N 37 ° 55 ' 45 "
Longitude	E 23 ° 44 ' 17 "
Hardware	Tycon Power Systems ProWeatherStation
Software	Cumulus v1.9.4



#### 4. Agios Stefanos

Latitude	N 38 ° 8 ' 50 "
Longitude	E 23 ° 51 ' 30 "
Hardware	Davis Pro 2 Weather Station
Software	Wunderground v.1.15

#### 5. Alimos

Latitude	N 37 ° 54 ' 54 "
Longitude	E 23 ° 42 ' 48 "
Hardware	DAVIS Vantage Pro
Software	Wunderground v.1.15





6. Ano Glifada

Latitude	N 37 ° 53 ' 29 ''
Longitude	E 23 ° 46 ' 5 ''
Hardware	Oregon Scientific WMR100
Software	WeatherSnoop2.1.5



7. Ano Liosia

Latitude	N 38 ° 5 ' 4 ''
Longitude	E 23 ° 40 ' 48 ''
Hardware	Davis Vantage Pro2 Plus (Wireless)
Software	

8. Ano Melisia

Latitude	N 38 ° 3 ' 49 ''
Longitude	E 23 ° 50 ' 30 ''
Hardware	Watson W-8681-SOLAR
Software	Cumulus v1.9.4

9. Ano Vrilia

Latitude	N 38 ° 2 ' 48 ''
Longitude	E 23 ° 50 ' 40 ''
Hardware	Velleman WS 1080
Software	

10. Argiroupoli

Latitude	N 37 ° 54 ' 44 ''
Longitude	E 23 ° 45 ' 2 ''
Hardware	ProWeatherStation
Software	WeatherDisplay:WD_co

11. Artemida

Latitude	N 37 ° 56 ' 20 ''
Longitude	E 24 ° 0 ' 9 ''
Hardware	265-NE
Software	

12. Aspropirgos

Latitude	N 38 ° 3 ' 48 ''
Longitude	E 23 ° 35 ' 15 ''
Hardware	Davis Vantage Pro2
Software	

13. Chalandri

Latitude	N 38 ° 0 ' 56 ''
Longitude	E 23 ° 47 ' 41 ''
Hardware	Davis Vantage PRO 2
Software	WeatherDisplay:10.37

14. Chalandri Patima

Latitude	N 38 ° 2 ' 22 ''
Longitude	E 23 ° 51 ' 17 ''
Hardware	Oregon WRM200
Software	WeatherDisplay:10.37

15. Drosia Attikis

Latitude	N 38 ° 6 ' 14 ''
Longitude	E 23 ° 51 ' 57 ''
Hardware	Davis Pro2 24h Aspirated
Software	WeatherDisplay:10.37

16. Galatsi

Latitude	N 38 ° 0 ' 50 "
Longitude	E 23 ° 44 ' 55 "
Hardware	DAVIS VANTAGE VUE
Software	

17. Galatsi 2

Latitude	N 38 ° 1 ' 4 "
Longitude	E 23 ° 45 ' 14 "
Hardware	Tycon Power Systems ProWeatherStation
Software	wview-5.21.7

18. Gerakas

Latitude	N 38 ° 0 ' 12 "
Longitude	E 23 ° 51 ' 27 "
Hardware	National Geographic 265NE
Software	wview-5.20.2

19. Glifada

Latitude	N 37 ° 53 ' 15 "
Longitude	E 23 ° 45 ' 24 "
Hardware	Oregon Scientific WMR200
Software	Cumulus v1.9.4



20. Ilion

Latitude	N 38 ° 2 ' 30 "
Longitude	E 23 ° 41 ' 53 "
Hardware	ws2350
Software	Cumulus v1.9.4

21. Kalamaki

Latitude	N 37 ° 55 ' 0 "
Longitude	E 23 ° 42 ' 0 "
Hardware	Davis Vantage Pro2 Wireless
Software	WeatherLink 6.0.0

22. Kantza

Latitude	N 37 ° 59 ' 22 "
Longitude	E 23 ° 51 ' 38 "
Hardware	
Software	VWS V15.00



23. Kessariani

Latitude	N 37 ° 58 ' 14 "
Longitude	E 23 ° 45 ' 8 "
Hardware	Oregon Scientific WMR200
Software	meteobridge

#### 24. Kifisia

Latitude	N 38 ° 4 ' 14 "
Longitude	E 23 ° 48 ' 30 "
Hardware	Davis Vantage Pro 2
Software	VWS V14.01

#### 25. Marathon Beach

Latitude	N 38 ° 7 ' 26 "
Longitude	E 24 ° 0 ' 1 "
Hardware	National Geographic 265NE
Software	

#### 26. Marathon

Latitude	N 38 ° 7 ' 59 "
Longitude	E 23 ° 59 ' 12 "
Hardware	Hobby Boards ADS
Software	



#### 27. Maroussi

Latitude	N 38 ° 2 ' 40 "
Longitude	E 23 ° 49 ' 37 "
Hardware	
Software	

28. Moschato

Latitude	N 37 ° 56 ' 41 "
Longitude	E 23 ° 40 ' 46 "
Hardware	ProWeatherStation
Software	WeatherDisplay:WD_co

29. Nea Ionia

Latitude	N 38 ° 2 ' 1 "
Longitude	E 23 ° 46 ' 13 "
Hardware	Davis, Vantage Pro2
Software	

30. Nea Philadelphia

Latitude	N 38 ° 2 ' 28 "
Longitude	E 23 ° 44 ' 22 "
Hardware	ws 2350
Software	

31. Neo Irakleio

Latitude	N 38 ° 3 ' 8 "
Longitude	E 23 ° 45 ' 43 "
Hardware	
Software	VWS V14.00

32. Neos Kosmos

Latitude	N 37 ° 57 ' 20 "
Longitude	E 23 ° 43 ' 19 "
Hardware	Davis Vantage Pro2 (Wireless)
Software	Wunderground v.1.15

### 33. Paleo Faliro

Latitude	N 37 ° 55 ' 34 "
Longitude	E 23 ° 42 ' 22 "
Hardware	Davis Vantage Pro 2
Software	Wunderground v.1.15

### 34. Pallini

Latitude	N 38 ° 0 ' 57 "
Longitude	E 23 ° 52 ' 41 "
Hardware	Davis Vantage Pro2 (Cabled)
Software	Cumulus v1.9.4

### 35. Papagou

Latitude	N 37 ° 59 ' 53 "
Longitude	E 23 ° 47 ' 20 "
Hardware	Oregon Scientific WMR928NX
Software	

### 36. Perama Attikis

Latitude	N 37 ° 57 ' 46 "
Longitude	E 23 ° 34 ' 30 "
Hardware	
Software	Cumulus v1.9.4

### 37. Peristeri

Latitude	N 38 ° 0 ' 42 "
Longitude	E 23 ° 41 ' 55 '
Hardware	TFA Matrix
Software	weewx-3.2.1



### 38. Pireas

Latitude	N 37 ° 55 ' 48 ''
Longitude	E 23 ° 38 ' 28 ''
Hardware	DAVIS VANTAGE PRO 2
Software	

### 39. Pireas 2

Latitude	N 37 ° 57 ' 12 ''
Longitude	E 23 ° 37 ' 49 ''
Hardware	DAVIS
Software	Cumulus v1.9.4

### 40. Vrilissia

Latitude	N 38 ° 2 ' 2 ''
Longitude	E 23 ° 49 ' 46 ''
Hardware	Fine Offset
Software	Cumulus v1.9.4



#### 41. Vyronas

Latitude	N 37 ° 57 ' 40 ''
Longitude	E 23 ° 45 ' 40 ''
Hardware	Oregon WMR100N
Software	VWS V14.01



#### 42. Ymittos

Latitude	N 37 ° 57 ' 12 ''
Longitude	E 23 ° 44 ' 56 ''
Hardware	DAVIS VANTAGE PRO 2
Software	Wunderground v.1.15



43. Ymittos 2

Latitude	N 37 ° 57 ' 31 "
Longitude	E 23 ° 45 ' 12 "
Hardware	DAVIS VANTAGE PRO 2
Software	