

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

# Ταξινόμηση Δορυφορικών Εικόνων σε Επίπεδο Υπό-εικονοστοιχείου για την Εκτίμηση του Συντελεστή Εκπομπής Επιφάνειας Εδάφους σε Αστικές Περιοχές

## Φεβρουάριος 2011

Μητράκα Ζηνοβία



Τριμελής Επιτροπή

Τσουχλαράκη Ανδρονίκη Λέκτορας Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Παρτσινέβελος Παναγιώτης Λέκτορας Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης

Χρυσουλάκης Νεκτάριος Ερευνητής Β', Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ηράκλειο

## Προλογος

Αν και τα αστικά κέντρα καλύπτουν μόνο ένα μικρό ποσοστό της παγκόσμιας επιφάνειας της γης, το μεγαλύτερο μέρος του ανθρώπινου πληθυσμού συγκεντρώνεται σε αυτά. Ως αποτέλεσμα η ανθρώπινη δραστηριότητα λαμβάνει κυρίως χώρα σε αστικό περιβάλλον παρεμβαίνοντας σημαντικά στο ισοζύγιο της ενέργειας. Το ενεργειακό ισοζυγίου σε αστικό επίπεδο, αποτελεί στις μέρες μας ένα κυρίαρχο αντικείμενο μελέτης των επιστημών που μπορούν να χαρακτηριστούν επιστήμες της Γης. Η δορυφορική τηλεπισκόπιση συμβάλει στην παρατήρηση της Γης και των φαινομένων που εξελίσσονται σε αυτή αποτελώντας ένα σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη του περιβάλλοντος, την κατανόηση του κλίματος σε παγκόσμιο αλλά και τοπικό επίπεδο, καθώς και άλλες εφαρμογές.

Η παρούσα εργασία, που εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, αφορά την ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου υπολογισμού του συντελεστή εκπομπής επιφάνειας εδάφους. Ο συντελεστής εκπομπής των επιφανειών είναι απαραίτητος παράγοντας για την εκτίμηση της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους, που με τη σειρά της είναι σημαντική για πληθώρα μελετών που σχετίζονται με το ισοζύγιο ενέργειας. Επίσης, ακριβείς χωρο-χρονικές εκτιμήσεις του συντελεστή εκπομπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση του τύπου του εδάφους και την γεωλογική χαρτογράφηση.

Η εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη συνδρομή ανθρώπων και φορέων, χάρη στη συμβολή των οποίων η εργασία αυτή ολοκληρώθηκε. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω την Τσουχλαράκη Ανδρονίκη, γιατί ως επιβλέπουσα αυτής της διπλωματικής εργασίας, με υποστήριξε από την αρχή και καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Παρτσινέβελο Παναγιώτη, γιατί εξαρχής πίστεψε στην προσπάθεια μου και οι συμβουλές, τα σχόλια και οι παρατηρήσεις του συνέβαλαν σημαντικά στην εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας για την παροχή της τεχνογνωσίας, αλλά και του εξοπλισμού που χρησιμοποίησα στα πλαίσια της εκπόνησης της εργασίας, αλλά και τον Χρυσουλάκη Νεκτάριο προσωπικά, για τον προσανατολισμό προς το συγκεκριμένο θέμα, για τις εξαιρετικά εποικοδομητικές μας συζητήσεις μας κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και για τη γενικότερη συμβολή του σε αυτή. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καμαριανάκη Ιωάννη γιατί μοιράστηκε μαζί μου τις στατιστικές του γνώσεις για τη λύση του προβλήματος φασματικής ανάμιξης και αν και σε άλλη ήπειρο, ήταν πάντα δίπλα μου για κάθε προβληματισμό που προέκυπτε στην πορεία. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον αδερφό μου Πέτρο, αλλά και τη μητέρα μου Δέσποινα, γιατί χωρίς τη στήριξη τους δεν θα έφτανα ποτέ να γράφω αυτές τις γραμμές.

### Περιληψη

Η γνώση της χωρικής κατανομής του συντελεστή εκπομπής επιφάνειας εδάφους είναι σημαντική για την εκτίμηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους, η οποία με τη σειρά της είναι απαραίτητη για εφαρμογές όπως η εκτίμηση των τυρβωδών ροών αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας, οι μελέτες του ενεργειακού ισοζυγίου, η μοντελοποίηση του αστικού θόλου, οι βιοκλιματικές μελέτες ακόμα και ο αστικός σχεδιασμός. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, μια νέα μέθοδος αναπτύχθηκε για την εκτίμηση συντελεστή εκπομπής επιφάνειας εδάφους, για αστικές περιοχές. Η νέα αυτή μέθοδος βασίζεται σε ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων με χρήση ανάλυσης φασματικής ανάμιξης. Η αστική επιφάνεια μοντελοποιήθηκε υποθέτοντας ότι αποτελείται τρεις βασικές συνιστώσες: βλάστηση, μη-διαπερατές επιφάνειες και έδαφος. Λόγω της πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει το αστικό περιβάλλον, η συνιστώσα των μη-διαπερατών επιφανειών χωρίστηκε επιπλέον σε δύο συνιστώσες. Τα κλάσματα κάλυψης γης κάθε συνιστώσας υπολογίστηκαν με χρήση μιας προηγμένης προσέγγισης φασματικής απόσμηξης που βασίζεται στη μέθοδο ελαχίστων απολύτων διαφορών. Στη συνέχεια, με βάση κατανομές συντελεστή από φασματικές βιβλιοθήκες υπολογίστηκαν αντιπροσωπευτικές τιμές συντελεστή εκπομπής για κάθε συνιστώσα. Ακολουθώντας την προτεινόμενη μέθοδο, έχοντας το κλάσμα της κάθε συνιστώσας και λαμβάνοντας υπόψη την αντιπροσωπευτική τιμή συντελεστή εκπομπής της, μία συνολική τιμή συντελεστή εκπομπής υπολογίζεται για κάθε εικονοστοιχείο. Η μέθοδος που προτείνεται αφενός εκμεταλλεύεται την πληροφορία σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου και έτσι πλεονεκτεί έναντι παρόμοιων μεθόδων και αφετέρου μπορεί να εφαρμοστεί σε δορυφορικές εικόνες στο ορατό και το εγγύς υπέρυθρο και καθιστά δυνατή την εκτίμηση συντελεστή εκπομπής επιφάνειας εδάφους με χρήση δεδομένων από τους περισσότερους πολυφασματικούς δορυφορικούς αισθητήρες. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε σε πολυφασματικά δεδομένα ASTER για την ευρύτερη περιοχή του Ηρακλείου. Οι παραγόμενοι χάρτες συντελεστή εκπομπής, όπως και χάρτες θερμοκρασίας εδάφους συγκρίθηκαν με προϊόντα υψηλού επιπέδου ASTER, τα οποία θεωρήθηκαν δεδομένα αναφοράς. Τα σφάλματα που υπολογίστηκαν υποδεικνύουν ότι οι εκτιμώμενες τιμές συντελεστή εκπομπής είναι αρκετά κοντά στο προϊόν υψηλού επιπέδου ASTER, με ένα συνολικό RMSE 0.017737.

### Abstract

The spatial distribution of urban surface emissivity is essential for surface temperature estimation, which is critical in several applications, such as surface turbulent sensible and latent heat fluxes estimation, energy budget, urban canopy modeling, bio-climatic studies and urban planning. In this study, a new method of improving the estimation of urban surface emissivity is proposed based on spectral mixture analysis. The urban surface is assumed to be consisted of three fundamental land cover components, namely vegetation, impervious and soil that refer to land cover types. Due to the complexity of urban environment the impervious component is further divided into two impervious land cover components. Emissivity values are assigned to each of the four components based on emissivity distributions derived from spectral libraries. The fractional covers are estimated using an advanced unmixing approach based on least absolute deviation method. Following the proposed method, having the fraction of each cover component, and taking into account the respective emissivity value for each component an overall emissivity for a given pixel is estimated. The methodology proposed here is applicable to visible and near infrared satellite imagery and enables direct derivation of emissivity maps from most multispectral satellite sensors. The proposed method was applied to ASTER multispectral data for the broader area of Heraklion, Greece. The derived emissivity map, as well as land surface temperature map, was evaluated against ASTER High Level Products. Error measurements revealed estimated emissivity values to be close to the ASTER emissivity high level product. An overall RMSE of 0.017737 was computed.

## Περιέχομενα

Пρ	აბე	ιογος		2
П٤	ερί	ληψη .		3
Ał	osti	ract		4
1.	Εı	ισαγωγ	/ή	7
2.	ικό Υπόβαθρο	. 11		
	2.2	1 Τηλ	επισκόπηση και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών	. 11
	2.2	2 Τα	Δορυφορικά Συστήματα	. 12
		2.2.1	Ταξινόμηση Δορυφορικών Αισθητήρων	. 13
		2.2.2	Διακριτική Ικανότητα Δορυφορικού Αισθητήρα	. 13
	2.3	3 Ηλε	εκτρομαγνητική ακτινοβολία	. 16
		2.3.1	Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη	. 19
		2.3.2	Αλληλεπίδραση ύλης και ακτινοβολίας	. 22
		2.3.3	Φασματικές ιδιότητες των επιφανειών	. 23
	2.4	4 Επε	ξεργασία Δορυφορικών Εικόνων	. 24
		2.4.1	Γεωμετρική Διόρθωση – Ορθοαναγωγή	. 24
		2.4.2	Μετατροπή Ψηφιακών Τιμών σε Τιμές Ακτινοβολίας	. 26
	2.	5 Ταξ	ινόμηση Δορυφορικών Εικόνων	. 26
	2.0	6 Υπα	ολογισμός Συντελεστή Εκπομπής Επιφάνειας	. 28
		2.6.1	Αλγόριθμος TES	. 28
		2.6.2	Μέθοδος ΤΙSΙ	. 29
		2.6.3	Μέθοδος των Φασματικών Λόγων	. 30
		2.6.4	Μέθοδος του Αλφα Υπόλοιπου	. 31
		2.6.5	Μέθοδος του NDVI	. 31
		2.6.6	Μέθοδοι που βασίζονται σε Ταξινόμηση	. 33
	2.	7 To	Ραδιόμετρο ASTER	. 34
3.	N	Ιεθοδα	λογία	. 40
	3.:	1 Περ	οιοχή Μελέτης και Δορυφορικά Δεδομένα	. 40
	3.2	2 Προ	ο-επεξεργασια Εικόνων	. 43
	3.3	3 Ταξ	ινόμηση σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου	. 46
		3.3.1	Γραμμική Ανάλυση Φασματικής Ανάμιξης	. 46
		3.3.2	Επιλογή των Ακροστοιχείων	. 46
	3.4	4 Εκτ	ίμηση του Συντελεστή Εκπομπής	. 48

	3.5	Εκτίμηση της Ακρίβειας της Μεθόδου	53			
4.	Απο	τελέσματα	55			
	4.1	Ταξινόμηση σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου	55			
	4.2	Χάρτης Εκτιμώμενου Συντελεστή Εκπομπής	62			
	4.3	Μελέτη Σφαλμάτων	65			
5.	5. Συμπεράσματα					
6.	Βιβλ	ιογραφία	73			
7.	Ακρ	ωνύμια	78			
Παραρτήματα						
	Παρα	άρτημα Ι – Κώδικας R	80			
	Παρα	άρτημα ΙΙ – Κώδικας Matlab	82			
	Παρα	άρτημα ΙΙΙ – Κώδικας Matlab	93			

## 1. Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον σε μελέτες θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους και σε μελέτες χαρακτηριστικών του ενεργειακού ισοζυγίου με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Η κατανόηση του ισοζυγίου ενέργειας στο αστικό περιβάλλον είναι σημαντική για ένα πλήθος εφαρμογών που εντάσσονται στην παρατήρηση και μελέτη της Γης, όπως την μικροκλιματολογία (Arnfield, 2003; Voogt & Oke, 2003), την παγκόσμια κλιματική αλλαγή, τις αλληλεπιδράσεις ανθρώπου – περιβάλλοντος (Yang et al., 2003; Weng, 2009a) και είναι επίσης σημαντική για πρακτικές σχεδιασμού και διαχείρισης (Chrysoulakis et al., 2009). Το ισοζύγιο ακτινοβολίας της αστικής επιφάνειας κυρίως ορίζεται από δύο ποσότητες, την λευκαύγεια και την θερμοκρασία εδάφους. Οι δύο αυτές ποσότητες μπορούν να εκτιμηθούν με την χρήση της δορυφορικής τηλεπισκόπισης (Chrysoulakis, 2003). Με την αξιοποίηση των δορυφορικών δεδομένων για εκτίμηση των προαναφερθέντων φυσικών παραμέτρων είναι δυνατή η δημιουργία

Για την εκτίμηση της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους από δορυφορικές παρατηρήσεις στη φασματική περιοχή του θερμικού υπέρυθρου, τρεις κύριες επιδράσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη και να διορθωθούν: η γωνία λήψης, ο συντελεστής εκπομπής και η επίδραση της ατμόσφαιρας. Οι Jiménez-Muñoz et al. (2006) ανέλυσαν τις πηγές σφάλματος στην εκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους και κατέληξαν πως μόνο η αβεβαιότητα στην εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής οδηγεί σε ένα σφάλμα της τάξης του 0.4 K στον υπολογισμό θερμοκρασίας εδάφους.

Ο συντελεστής εκπομπής είναι ένα μέτρο της εγγενούς ικανότητας της επιφάνειας να μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε ενέργεια που ακτινοβολείται από την επιφάνεια. Βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην σύνθεση της επιφάνειας, την τραχύτητα της και άλλες φυσικές παραμέτρους της, όπως η περιεκτικότητά της σε υγρασία (Becker & Li 1990; 1995; Nerry et al., 1988; 1990; Salisbury & D'Aria, 1992; 1994; Salisbury et al., 1994). Δεδομένου λοιπόν ότι ο συντελεστής εκπομπής δεν εξαρτάται μόνο από τον τύπο της επιφάνειας αλλά και από την φυσική της κατάσταση, επιδέχεται μεγάλες διαφοροποιήσεις στο χρόνο. Το γεγονός αυτό καθιστά την εκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους ακόμη πιο περίπλοκη. Ο συντελεστής εκπομπής επιφάνειας επηρεάζει την ακτινοβολία που μετράται από ένα δορυφορικό αισθητήρα με τρεις τουλάχιστον σημαντικές επιδράσεις (Prata, 1993): α) η μείωση του συντελεστή εκπομπής μειώνει το μέγεθος της ανερχόμενης από την επιφάνεια ακτινοβολίας, β) η συμπεριφορά μη-μέλανος σώματος δημιουργεί μια συνεισφορά από την ανακλώμενη ακτινοβολία της επιφάνειας και γ) η ανισοτροπία της ανακλαστικότητα και του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας μπορούν να αυξήσουν τη συνολική ακτινοβολία που φτάνει στον δορυφορικό αισθητήρα. Άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής από δορυφορικά δεδομένα είναι το φαινόμενο των μικτών εικονοστοιχείων και της ζενίθας γωνίας.

Η κυριότερη δυσκολία όσον αφορά την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής με χρήση δορυφορικών δεδομένων είναι η εκτίμηση του για διάφορους τύπους επιφανειών και για αισθητήρες διαφορετικής χωρικής και φασματικής διακριτικής ικανότητας (Coll et al., 1994). Οι διαστάσεις των εικονοστοιχείων είναι συνήθως τέτοιες, ώστε η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους και η φύση του μπορεί να διαφέρουν μέσα στο ίδιο εικονοστοιχείο. Η θερμοκρασία εδάφους, μπορεί να διαφέρει μέχρι και 10 Κ σε απόσταση μερικών μέτρων, λόγω επιδράσεων σκίασης, διακυμάνσεων της ηλιακής ακτινοβολίας, και επιδράσεις της τοπογραφίας (Prata, 1993). Αυτή η ανομοιομορφία, καθιστά δύσκολο τον προσδιορισμό μιας τιμής θερμοκρασίας εδάφους για μία δεδομένη κλίμακα και ακόμη δυσκολότερη τη συσχέτιση της με τιμές θερμοκρασίας εδάφους και συντελεστή εκπομπής σε άλλες κλίμακες. Όταν ένα ανομοιογενές (μικτό) εικονοστοιχείο αποτυπώνεται από έναν δορυφορικό αισθητήρα, ουσιαστικά αυτό που αποτυπώνεται είναι η ακτινοβολία από όλους τους ομοιογενείς στόχους με ένα τρόπο που εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας και το συντελεστή εκπομπής της. Η αλλαγή της γωνίας κατόπτευσης του αισθητήρα, μεταβάλει το ποσοστό της εισερχόμενης σε αυτόν ακτινοβολίας (Prata, 1994). Οι Sobrino et al. (1996) σχολιάζουν το πρόβλημα της εκτίμησης της γωνιακής μεταβολής του συντελεστή εκπομπής για in-situ μετρήσεις σε χερσαίες περιοχές, καθώς και στην περίπτωση των δορυφορικών δεδομένων. Ο Prata (1994) πρότεινε μια παραμετροποίηση για την γωνιακή μεταβολή του συντελεστή εκπομπής για γυμνό έδαφος. Για ξηρές, γυμνές επιφάνειες, η επίδραση του συντελεστή εκπομπής στην εκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους είναι ιδιαίτερα σημαντική και η ακρίβεια πρέπει να αγγίζει το ± 0.005. Για επιφάνειες με βλάστηση, οι επιδράσεις του συντελεστή εκπομπής ελαχιστοποιούνται από την κοιλότητα και η γωνιακή μεταβολή δεν είναι σημαντική για βλάστηση όπως για παράδειγμα καλλιεργειών οι οποίες μπορούν να μοντελοποιηθούν καλά υποθέτοντας λαμπερτιανές συνθήκες (Sobrino et al. 1990). Όπως εξήγησε ο Prata (1994), η αιτία είναι ότι η κοιλότητα αυξάνει τον συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας και μειώνει την φασματική αντίθεση. Τα δύο αυτά φαινόμενα, μειώνουν τη συνολική επίδραση στην ακρίβεια εκτίμησης της θερμοκρασίας εδάφους.

Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής (Becker & Li 1990; Watson 1992; Kealy & Gabell 1990; Valor & Caselles 1996; Snyder et al. 1998; Sobrino & Raissouni 2000). Οι Dash et al. (2002) συνόψισαν τις διάφορες τεχνικές εκτίμησης του συντελεστή εκπομπής και ανέλυσαν τους σημαντικότερους περιορισμούς τους. Η υπόθεση συμπεριφοράς φαιού σώματος, η ανάγκη δορυφορικής λήψης δύο φορές τη μέρα ή η υπόθεση ότι η διαφορά στην τιμή του συντελεστή εκπομπής μεταξύ μέρας και νύχτας είναι αμελητέα και η a priori γνώση του συντελεστή εκπομπής για διάφορους τύπους κάλυψης γης είναι τα οι πιο σημαντικοί περιορισμοί που παρουσιάζουν οι περισσότερες μέθοδοι. Για ένα συγκεκριμένο τύπο επιφάνειας, η μεταβολή του συντελεστή εκπομπής δεν είναι καλά ορισμένος, αλλά οι μετρήσεις υποδεικνύουν ότι είναι της τάξης του ± 0.01, εκτός της περίπτωσης των δομικών αλλαγών. Έτσι, όπως εξήγησε ο Prata (2002), αυτό που παίζει πιο σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους είναι η μεταβολή του τύπου της επιφάνειας και όχι οι μεταβολές μεταξύ ίδιων τύπων. Οι Snyder et al. (1998) προτείνανε μια μέθοδο υπολογισμού του συντελεστή εκπομπής που βασίζεται σε ταξινόμηση τύπων κάλυψης γης και δυναμικής πληροφορίας. Στα πλαίσια ανάπτυξης της μεθόδου των Snyder et al. (1998) δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων συντελεστή εκπομπής με χρήση γραμμικών μοντέλων Συνάρτησης Δι-διευθυνσιακής Κατανομής Ακτινοβολίας (BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function) και φασματικούς συντελεστές που προήλθαν από εργαστηριακές μετρήσεις (Salisbury & D'Aria 1992; 1994; Salisbury et al. 1994; Snyder et al. 1997) διάφορων τύπων υλικών και δομικών παραμέτρων παρόμοιων με αυτών των τύπων κάλυψης γης (Snyder & Wan 1998). Κατά την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής από δεδομένα κάλυψης γης, ένα μεγάλο μέρος του σφάλματος οφείλεται στον μικρό αριθμό τύπων κάλυψης γης, καθώς και στην χαμηλή συχνότητα ενημέρωσης των χαρτών κάλυψης γης. Το σφάλμα αυξάνεται γραμμικά στην περαιτέρω εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής και μπορεί να φτάσει μέχρι 6 Κ για μικρά σχετικά σφάλματα στο συντελεστή εκπομπής (Yu et al., 2008).

Η αποτύπωση του αστικού περιβάλλοντος λαμβάνοντας υπόψη τις φυσικές του παραμέτρους διατηρεί την ετερογένεια των αστικών τύπων κάλυψης γης καλύτερα από ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι ταξινόμησης (Clapham, 2003; Ji & Jensen, 1999), χαρακτηρίζει την αστική κάλυψη γης ανεξάρτητα από ανθρωπογενείς ορισμούς (Jensen, 1983; Ridd, 1995) και αποτυπώνει καλύτερα τις αλλαγές μέσα στο χρόνο (Ji & Jensen, 1999; Rashed et al., 2005). Το μοντέλο VIS (Βλάστηση – Μηδιαπερατές επιφάνειες και Έδαφος) που πρότεινε ο Ridd (1995) λαμβάνει υπόψη τον συνδυασμό των συνιστωσών του αστικού περιβάλλοντος, αν αγνοηθούν οι υδάτινες επιφάνειες. Οι Lu & Weng (2004) αναφέρουν μελέτες όπου έχει εφαρμοστεί το μοντέλο VIS για τον χαρακτηρισμό των αστικών οικοσυστημάτων.

Σε αυτή την εργασία, προτείνεται μια νέα μεθοδολογία για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας από δορυφορικά δεδομένα μεσαίας χωρικής ανάλυσης. Η αστική κάλυψη γης μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια παραλλαγή του μοντέλου VIS (Ridd, 1995) και γίνεται ταξινόμηση σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου χρησιμοποιώντας Ανάλυση Φασματικής Ανάμιξης (ΑΦΑ). Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής εκπομπής είναι γραμμικός συνδυασμός των συντελεστών εκπομπής όλων των συνιστωσών κάλυψης αστικού περιβάλλοντος μέσα στο εικονοστοιχείο, μπορεί να παραχθεί μια χωρική κατανομή του συντελεστή εκπομπής, από δορυφορικά δεδομένα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο, πάνω στο οποίο βασίζεται η παρούσα εργασία. Αρχικά, παρατίθεται μια εισαγωγή στη δορυφορική τηλεπισκόπηση και τα ΓΠΣ και στην συνέχεια αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχτηκε η ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Γίνεται μια εισαγωγή για την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την ύλη και πώς αυτή καταγράφεται από δορυφορικούς αισθητήρες και περιγράφονται οι γενικές αρχές επεξεργασίας εικόνας που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά σε μεθόδους ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων και εξηγείται η ανάγκη χρήσης μεθόδων σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου. Τέλος, παρατίθενται οι πιο διαδεδομένοι σήμερα μέθοδοι υπολογισμού συντελεστή εκπομπής και μια περιγραφή του αισθητήρα ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), δεδομένα του οποίου χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται με λεπτομέρειες η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε. Αρχικά γίνεται μια σύντομη αναφορά στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και την περιοχή μελέτης και στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία προ-επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων. Έπειτα, γίνεται περιγραφή της υλοποίησης της μεθόδου ΑΦΑ για την ταξινόμηση της δορυφορικής εικόνας σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου και αναλύονται όλα τα βήματα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Στη συνέχεια περιγράφεται η εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης για τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής επιφάνειας εδάφους. Τέλος, γίνεται περιγραφή των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της ακρίβειας της μεθόδου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου στην περιοχή μελέτης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου συντελεστή εκπομπής σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της πιο διαδεδομένης σύγχρονης μεθόδου. Επίσης, παρατίθενται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με χρήση εναλλακτικής μεθόδου παλινδρόμησης σε σύγκριση με την ευρέως διαδεδομένη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης.

Στα παραρτήματα επίσης, υπάρχουν όλοι οι πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν σε γλώσσες R (Koenker, 2005) και Matlab<sup>®</sup> για την υλοποίηση και εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου.

## 2. Θεώρητικό Υποβάθρο

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο, πάνω στο οποίο βασίζεται η παρούσα εργασία. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, κάνει χρήση μεθόδων τηλεπισκόπισης και ΓΣΠ για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας του εδάφους. Αρχικά, παρατίθεται μια εισαγωγή στη δορυφορική τηλεπισκόπηση και τα ΓΣΠ και στην συνέχεια αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχτηκε η ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Πιο συγκριμένα παρατίθεται μια εισαγωγή για τα δορυφορική τηλεπισκόπηση και τα ΓΣΠ και στην συνέχεια αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχτηκε η ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Πιο συγκριμένα παρατίθεται μια εισαγωγή για τα δορυφορικά συστήματα, την αλληλεπίδρασή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη και πώς αυτή καταγράφεται από δορυφορικούς αισθητήρες και περιγράφονται οι γενικές αρχές επεξεργασίας εικόνας που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά σε μεθόδους ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων σε επίπεδο εικονοστοιχείου και εξηγείται η ανάγκη χρήσης μεθόδων σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου. Τέλος, παρατίθενται οι πιο διαδεδομένοι σήμερα μέθοδοι υπολογισμού συντελεστή εκπομπής και μια περιγραφή του αισθητήρα ΑSTER, δεδομένα του οποίου χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία.

#### 2.1 Τηλεπισκοπήση και Γεωγραφικά Σύστηματα Πληροφορίων

Η τηλεπισκόπιση αφορά στις δραστηριότητες της καταγραφής και παρατήρησης αντικειμένων και γεγονότων που βρίσκονται σε απομακρυσμένο σημείο από αυτό της παρατήρησης. Στην τηλεπισκόπηση, οι αισθητήρες δεν έρχονται σε άμεση επαφή με τα αντικείμενα ή τα γεγονότα υπό μελέτη. Αυτό που συνήθως καταγράφουν οι αισθητήρες τηλεπισκόπισης είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η παρατήρηση αποτυπώνεται συνήθως σαν μια εικόνα που αναπαριστά την υπό παρακολούθηση σκηνή. Επιπλέον βήματα ανάλυσης και ερμηνείας της εικόνας χρειάζονται συνήθως για την εξαγωγή ωφέλιμης πληροφορίας από αυτή. Σαν πιο στενή έννοια, η τηλεπισκόπιση αναφέρεται στην επιστήμη και την τεχνολογία ανάκτησης πληροφορίας για της Γης.

Η τεχνολογία της τηλεπισκόπησης έχει εξελίχθη σε αντικείμενο επιστημονικής έρευνας κυρίως μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο (Weng, 2009b). Νωρίτερα η ανάπτυξή της καθοδηγούνταν κυρίως από στρατιωτικούς σκοπούς. Αργότερα, η τηλεπισκόπηση εφαρμόστηκε ευρέως και για πολιτικές εφαρμογές. Το εύρος των εφαρμογών τηλεπισκόπησης περιλαμβάνει την μετεωρολογία, την κλιματολογία, την γεωργία, την αρχαιολογία, την χαρτογραφία, την μελέτη της παράκτιας ζώνης, τη δασολογία, τη γεωλογία, τις φυσικές καταστροφές, την ωκεανογραφία, τους υδάτινους πόρους, τις χρήσεις και κάλυψη γης και πολλά άλλα. Πρόσφατα, με την εμφάνιση των υψηλής χωρικής ανάλυσης εικόνων και πιο εξελιγμένες τεχνικές, η μελέτη του αστικού περιβάλλοντος και οι

εφαρμογές τηλεπισκόπισης που σχετίζονται με αυτό έχουν κερδίσει μεγάλο έδαφος στην επιστημονική κοινότητα.

Η εμφάνιση των ΓΠΣ στα μέσα της δεκαετίας του 1960, αντικατοπτρίζει την πρόοδο στην τεχνολογία των υπολογιστών και την επίδραση της ποσοτικής επανάστασης της γεωγραφίας. Τα ΓΣΠ έχουν εξελιχθεί δραματικά από ένα εργαλείο αυτοματοποίησης της χαρτογράφησης και διαχείρισης των δεδομένων που ήταν όταν πρωτοεμφανίστηκαν, σε ικανή τεχνολογία χειρισμού και ανάλυσης δεδομένων και πιο πρόσφατα την επιστήμη της Γεωπληροφορικής. Η εμπορική επιτυχία των ΓΣΠ από τις αρχές τις δεκαετίας του 1980 τα εδραίωσε σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και για το λόγο αυτό είναι δύσκολο να δοθεί ένας αποδεκτός ορισμός. Οι Calkins & Tomlinson (1977) είχαν δώσει έναν πρώτο ορισμό για το ΓΠΣ:

Ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (ΓΠΣ) είναι ένα λογισμικό πακέτο που έχει σχεδιαστεί για καθορισμένη χρήση με γεωγραφικά δεδομένα και εκτελεί μια ολοκληρωμένη γκάμα εφαρμογών διαχείρισης γεωγραφικών δεδομένων. Οι εφαρμογές αυτές συμπεριλαμβάνουν την εισαγωγή δεδομένων, την αποθήκευση, την ανάκτηση και την παρουσίαση σε συνδυασμό με μια ποικιλία περιγραφικών και αναλυτικών πληροφοριών.

Ο Wilkinson (1996) συνοψίζει τρεις κύριους τρόπους με τους οποίους η τηλεπισκόπηση και τα ΓΣΠ μπορούν να συνδυαστούν για να ενισχύσουν το ένα το άλλο:

- (1) η τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται ως εργαλείο για την συλλογή δεδομένων για χρήση στα ΓΣΠ.
- (2) τα δεδομένα από τα ΓΣΠ χρησιμοποιούνται ως βοηθητική πληροφορία για την βελτίωση των προϊόντων της τηλεπισκόπησης
- (3) η τηλεπισκόπηση και τα ΓΣΠ χρησιμοποιούνται από κοινού για μοντελοποίηση και ανάλυση.

Για την ολοκληρωμένη επεξεργασία των στοιχείων που προέρχονται από την τηλεπισκόπηση λοιπόν η χρήση ενός ΓΣΠ είναι απαραίτητη για να μπορεί να γίνει συνδυασμός τηλεπισκοπικών στοιχείων με άλλες πηγές, για την πληρέστερη δυνατή εκμετάλλευση και παρουσίαση τόσο των φυσικών, αλλά και άλλων χωρικών χαρακτηριστικών, όπως κοινωνικών και οικονομικών.

#### 2.2 ΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα καταγραφικά συστήματα που φέρονται από δορυφόρους ανήκουν στην ευρεία κατηγορία των **ραδιομέτρων** (radiometer), τα οποία αποτελούν όργανα μέτρησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Εάν ο αισθητήρας περιλαμβάνει ένα φράγμα περίθλασης το οποίο διαχωρίζει την

ακτινοβολία, που εκτείνεται σε μια περιοχή του φάσματος, σε μικρότερες φασματικές περιοχές, τότε αυτός ονομάζεται **φασματοραδιόμετρο** (spectroradiometer).

Η λειτουργία όλων των ραδιομέτρων και συνεπώς των περισσότερων δορυφορικών αισθητήρων βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Σύμφωνα με αυτό, όταν ένα αρνητικά φορτισμένο φωτοευαίσθητο υλικό εκτεθεί σε ακτινοβολία, παράγονται ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα η ένταση του οποίου είναι ανάλογη της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Έτσι, οι μεταβολές στο ηλεκτρικό ρεύμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση των μεταβολών στην ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην πλάκα με το φωτοευαίσθητο υλικό.

#### 2.2.1 Ταξινομήση Δορυφορικών Αισθητήρων

Οι δορυφορικοί αισθητήρες κατατάσσονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τη πηγή της ακτινοβολίας που καταγράφουν: τους παθητικούς και τους ενεργητικούς. Οι **παθητικοί αισθητήρες** αποτελούν συστήματα ανίχνευσης και καταγραφής της ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή ανακλάται από το παρατηρούμενο αντικείμενο - στόχο. Τα συστήματα αυτά ανιχνεύουν το τμήμα του φάσματος που εκτείνεται από την περιοχή των πολύ μικρών μηκών κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας έως την περιοχή του απώτερου υπερύθρου. Αντίθετα, οι **ενεργητικοί ανιχνευτές** χρησιμοποιούν δική τους πηγή ακτινοβολίας την οποία κατευθύνουν προς το υπό έρευνα αντικείμενο, αυτή στη συνέχεια ανακλάται στο στόχο (αντικείμενο ή περιοχή της επιφάνειας της γης), επιστρέφει και καταγράφεται από το σύστημα.

Οι αισθητήρες, επίσης, ανάλογα με τις διεργασίες ανίχνευσης της περιοχής ενδιαφέροντος διακρίνονται σε **ανεικονιστές** (μετρούν την ακτινοβολία η οποία προέρχεται από όλα τα σημεία της περιοχής που καταγράφεται, την ολοκληρώνουν σε μια μέση τιμή και την μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα) και **απεικονιστές** (λειτουργούν καταγραφικά σε δυο διαστάσεις (μήκος και πλάτος), συνθέτοντας μια εικόνα της περιοχής που ανιχνεύουν με βάση την ακτινοβολία που προέρχεται από κάθε σημείο της). Ακόμα, οι αισθητήρες ανάλογα τον τρόπο καταγραφής της ακτινοβολίας κατατάσσονται σε δυο άλλες κατηγορίες: τα συστήματα πλαισίου (εκτελούν στιγμιαία μέτρηση της ακτινοβολίας η οποία προέρχεται από όλη τη σκηνή) και τους σαρωτές (σαρώνουν την σκηνή σημείο προς σημείο κατά μήκος διαδοχικών γραμμών, σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα) (Καρτάλης & Φείδας, 2006).

#### 2.2.2 Διακριτική Ικανότητα Δορυφορικού Αισθητήρα

Χαρακτηριστικά των δορυφορικών αισθητήρων αποτελούν η χωρική, η φασματική, η ραδιομετρική και η χρονική διακριτική ικανότητα τους ικανότητα.

#### Χωρική Διακριτική Ικανότητα

Η χωρική διακριτική ικανότητα είναι η ικανότητα του αισθητήρα να διακρίνει δυο αντικείμενα στη σκηνή που βρίσκονται πολύ κοντά. Ποσοτικά ισούται με τη μικρότερη απόσταση που μπορούν να έχουν δύο αντικείμενα ώστε οι διαστάσεις τους να διακρίνονται χωριστά και καθαρά ή το ελάχιστο μέγεθος που πρέπει να έχει ένα αντικείμενο για να μπορεί να ανιχνευτεί. Εκφράζεται συνήθως σε m ή km και καθορίζεται από το στιγμιαίο πεδίο κατόπτευσης του αισθητήρα. Στιγμιαίο πεδίο κατόπτευσης (Instantaneous Field of View, IFOV) ονομάζεται η στερεά γωνία με την οποία ο αισθητήρας "βλέπει" την επιφάνεια τη γης η οποία καθορίζει την περιοχή της γήινης επιφάνειας που κατοπτεύεται από συγκεκριμένο ύψος λήψης, σε μια δεδομένη στιγμή (Σχήμα 1). Η περιοχή της γης που αντιστοιχεί στο στιγμιαίο πεδίο κατόπτευσης καλείται κελί ανάλυσης και είναι αυτό που καθορίζει τη χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα. Το μέγεθος του κελιού ανάλυσης μπορεί να υπολογιστεί αν πολλαπλασιαστεί το IFOV με την απόσταση του αισθητήρα από το έδαφος. Για να διακριθεί ένα ομογενές στοιχείο στην εικόνα θα πρέπει το μέγεθός του να είναι γενικά μεγαλύτερο ή ίσο από το κελί ανάλυσης της εικόνας.





Η απόλυτη τιμή της χωρικής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή μπορεί να μεταβληθεί, διότι η γωνία κατόπτευσης εξαρτάται από το ύψος του δορυφόρου και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Συνήθως οι δορυφόροι που βρίσκονται σε πολύ υψηλή τροχιά, ενώ καταγράφουν μεγάλες περιοχές, έχουν μικρή χωρική διακριτική ικανότητα. Οι τιμές της χωρικής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή αναφέρονται στο ίχνος του δορυφόρου στην επιφάνεια της γης (Σχήμα 1). Για τις περιοχές της εικόνας που απέχουν από το ίχνος του δορυφόρου, η διακριτική ικανότητα του

αισθητήρα μειώνεται, αφού αυξάνεται η απόσταση του δορυφόρου από το στόχο ενώ παράλληλα προστίθεται η γεωμετρική παραμόρφωση λόγω του σφάλματος παράλλαξης.

Ας σημειωθεί ότι η χωρική διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα επηρεάζεται και από το μήκος κύματος της προσλαμβανόμενης ακτινοβολίας. Καθώς η ενέργεια της ακτινοβολίας μειώνεται με την αύξηση του μήκους κύματος, οι θερμικοί αισθητήρες, δηλ. οι αισθητήρες που καταγράφουν στην περιοχή της θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας, έχουν μεγάλο στιγμιαίο πεδίο κατόπτευσης για να εξασφαλίσουν ότι ικανοποιητικό ποσό ενέργειας θα φτάσει στον ανιχνευτή για να γίνει μια αξιόπιστη μέτρηση. Για το λόγο αυτό, η χωρική διακριτική ικανότητα των περισσότερων θερμικών ανιχνευτών είναι μικρή. Έτσι για παράδειγμα, τα θερμικά κανάλια (κανάλια 10-14) του ASTER έχουν χωρική διακριτική ικανότητα 90 m σε αντίθεση με τα υπόλοιπα κανάλια στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο και μέσο υπέρυθρο, των οποίων η διακριτική ικανότητα είναι 15 m και 30 m αντίστοιχα (Πίνακας 1).

#### Φασματική Διακριτική Ικανότητα

Η **φασματική διακριτική ικανότητα** σχετίζεται με το εύρος των περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στις οποίες πραγματοποιεί καταγραφές ένας πολυφασματικός ανιχνευτής και τον αριθμό των φασματικών καναλιών που αυτός χρησιμοποιεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η φασματική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα σε ένα κανάλι, τόσο μικρότερο είναι το εύρος της φασματικής περιοχής της ακτινοβολίας που καταγράφεται στο κανάλι αυτό. Όσο πιο μικρές σε εύρος είναι οι ζώνες τόσο πιο μεγάλος ο αριθμός των ζωνών.

Η φασματική διακριτική ικανότητα είναι πολύ σημαντική για το διαχωρισμό του είδους των επιφανειών στην εικόνα. Διαφορετικές τάξεις ή στοιχεία και λεπτομέρειες στην εικόνα είναι δυνατόν να διαχωριστούν συγκρίνοντας τις φασματικές τους υπογραφές σε συγκεκριμένες περιοχές του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ευρείες τάξεις, όπως υδάτινες επιφάνειες και βλάστηση, μπορούν εύκολα να διαχωριστούν χρησιμοποιώντας φασματικές περιοχές με μεγάλο εύρος (Σχήμα 6).

Εξελιγμένοι αισθητήρες (υπερφασματικοί) καταγράφουν σε εκατοντάδες πολύ μικρού εύρους φασματικές περιοχές στο ορατό, εγγύς και μέσο υπέρυθρο φάσμα. Η πολύ υψηλή φασματική διακριτική ικανότητα τους διευκολύνει το διαχωρισμό των γήινων επιφανειών με μεγάλη ανάλυση και ακρίβεια με βάση τη φασματική τους απόκριση σε κάθε μια από τις φασματικές αυτές περιοχές.

#### Ραδιομετρική Διακριτική Ικανότητα

Η **ραδιομετρική διακριτική ικανότητα** ορίζεται ως η ευαισθησία του ανιχνευτή να ανιχνεύει διαφορές στην ισχύ του σήματος δηλ. διαφορές στην ένταση της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης από

την επιφάνεια της γης ακτινοβολίας. Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα είναι σημαντική καθώς η πραγματική πληροφορία που περιέχεται στα δορυφορικά δεδομένα καθορίζεται από τις ραδιομετρικές τιμές που καταγράφει ο αισθητήρας. Έτσι, η ακρίβεια στην ανίχνευση μεταβολών στο σήμα σχετίζεται άμεσα με τη δυνατότητα ανίχνευσης των αντίστοιχων μεταβολών στα φυσικά χαρακτηριστικά των επιφανειών.

Οι ραδιομετρικές τιμές που καταγράφει ο αισθητήρας μετατρέπονται σε ψηφιακές τιμές που κυμαίνονται από 0 έως μια τιμή η οποία αποτελεί δύναμη του 2 (2<sup>×</sup>). Η τιμή x, στην οποία υψώνεται το 2 για να δώσει το εύρος των ψηφιακών τιμών, καθορίζεται από τον αριθμό των bits που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση των αριθμών σε bytes. Έτσι, εάν ένας αισθητήρας χρησιμοποιεί 8 bits σε κάθε byte για την κωδικοποίηση των αριθμών σε bytes. Έτσι, εάν ένας αισθητήρας χρησιμοποιεί 8 bits σε κάθε byte για την κωδικοποίηση των δεδομένων, τότε θα υπάρχουν 28=256 ψηφιακές τιμές διαθέσιμες σε κάθε byte, που θα κυμαίνονται από 0 έως 255. Εάν χρησιμοποιηθούν 10 bits, τότε θα είναι διαθέσιμες 210=1024 ψηφιακές τιμές διαθέσιμες σε κάθε byte, που θα κυμαίνονται από 0 έως 255. Εάν χρησιμοποιηθούν 10 bits, τότε θα είναι διαθέσιμες 210=1024 ψηφιακές τιμές διαθέσιμες σε κάθε byte, που θα κυμαίνονται από 0 έως 255. Εάν χρησιμοποιηθούν 10 bits, τότε θα είναι διαθέσιμες 210=1024 ψηφιακές τιμές διαθέσιμες σε κάθε byte, που θα κυμαίνονται από θεως 255. Εάν χρησιμοποιηθούν 10 bits, τότε θα είναι διαθέσιμες 210=1024 ψηφιακές τιμές διαθέσιμες σε κάθε byte, που θα κυμαίνονται από 0 έως 255. Εάν χρησιμοποιηθούν 10 bits, τότε θα είναι διαθέσιμες 210=1024 ψηφιακές τιμές διαθέσιμες σε κάθε byte, που θα κυμαίνονται από 0 έως 1023. Στην περίπτωση αυτή η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα θα είναι μεγαλύτερη. Η ραδιομετρική ικανότητα για παράδειγμα των καναλιών στο ορατό, εγγύς και μέσο υπέρυθρο του ΑSTER (κανάλια 1-9), είναι 8 bit m, ενώ των θερμικών καναλιών (κανάλια 10-14) είναι 12 bit (Πίνακας 1).

#### Χρονική Διακριτική Ικανότητα

Η **χρονική διακριτική ικανότητα** σχετίζεται με τη συχνότητα λήψης εικόνων για την ίδια περιοχή. Η χρονική διακριτική ικανότητα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφόρου και κυμαίνεται από λίγα λεπτά για τους γεωστάσιμους δορυφόρους μέχρι μερικές εβδομάδες για τους δορυφόρους πολικής τροχιάς. Η συχνότητα λήψης εικόνων μιας περιοχής είναι μια σημαντική παράμετρος σε πολλές εφαρμογές. Η δορυφορική τηλεπισκόπηση έχει τη δυνατότητα καταγραφής σειράς διαδοχικών εικόνων και με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η παρακολούθηση αλλαγών στην επιφάνεια της γης. Σε μεταβολές που εξελίσσονται αργά στο χρόνο, όπως αυτές των χρήσεων και της κάλυψης γης, δεν είναι απαραίτητη η μεγάλη χρονική διακριτική ικανότητα του δορυφορικού συστήματος. Σε ορισμένες εφαρμογές, όμως, όπως στη μετεωρολογία και στις φυσικές καταστροφές, στις οποίες παρακολουθούνται δυναμικά φαινόμενα με γρήγορη εξέλιξη στο χρόνο, η παράμετρος της χρονικής διακριτικής ικανότητας είναι σημαντική, πολλές φορές περισσότερο και από οποιαδήποτε άλλη παράμετρο.

#### 2.3 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολια

Κύρια πηγή ενέργειας του συστήματος γης - ατμόσφαιρας είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου. Οι δορυφορικοί αισθητήρες καταγράφουν την ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται από μια γήινη επιφάνεια και σκεδάζεται από την ατμόσφαιρα ή την ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα σώματα στη γη. Στην τηλεπισκόπηση, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καθορίζεται ποσοτικά από την ένταση (Ι), το μήκος κύματος (λ) ή την συχνότητα (ν) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαιρείται σε περιοχές με βάση το μήκος κύματος (λ). Το σύνολο των περιοχών αυτών συνιστά το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατηγοριοποιείται με βάση τη θέση του μήκους κύματος στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα συνίσταται από κύματα με μήκη κύματος από 0.1 μm έως 100 m και χωρίζεται σε περιοχές, όπως το υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, το υπεριώδες, το ορατό κ.ά. Ένα μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιείται στην τηλεπισκόπηση φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος το οποίο χρησιμοποιείται στην τηλεπισκόπιση.

Η **ορατή** (visible) περιοχή του φάσματος έχει όρια που καθορίζονται από την ανθρώπινη όραση (0.38 μm έως 0.72 μm). Η ορατή ακτινοβολία υποδιαιρείται σε τρία βασικά χρώματα, το ιώδες-μπλε (0.4 – 0.5 μm), το πράσινο (0.5 – 0.6 μm) και το κόκκινο (0.6 – 0.7 μm), τα οποία ονομάζονται πρωτεύοντα αθροιστικά χρώματα (additive primaries) καθώς κανένα από αυτά τα χρώματα δεν μπορεί να παραχθεί από τη σύνθεση των άλλων δυο. Όλα τα υπόλοιπα χρώματα προκύπτουν από τον κατάλληλο συνδυασμό των τριών πρωτευόντων χρωμάτων με την κατάλληλη αναλογία. Το χρώμα ενός σώματος στο ορατό φάσμα ορίζεται από το φάσμα του φωτός που ανακλά. Έτσι για παράδειγμα, ένα αντικείμενο έχει κόκκινο χρώμα επειδή ανακλά ή διαχέει το κόκκινο φώς και απορροφά το μπλε και το πράσινο. Τα δευτερεύοντα χρώματα σχηματίζονται όταν ένα αντικείμενο ανακλά δυο ή περισσότερα πρωτεύοντα χρώματα που συνδυαζόμενα μεταξύ τους δίνουν ως αποτέλεσμα ένα δευτερεύον χρώμα. Για παράδειγμα, το κίτρινο χρώμα προέρχεται από το συνδυασμό του κόκκινου με το πράσινο και ως εκ του ένα σώμα κίτρινου χρώματος θα απορροφά

το μπλε και θα ανακλά τα άλλα δυο. Το λευκό χρώμα μπορεί να παραχθεί από το συνδυασμό, σε ίσες αναλογίες, και των τριών πρωτευόντων χρωμάτων.

Η **υπέρυθρη** (infrared) περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος περιλαμβάνει μήκη κύματος μεγαλύτερα από την περιοχή του κόκκινου τμήματος του ορατού και εκτείνεται από 0.7 μm έως 1000 μm. Διαιρείται σε τρεις ζώνες, αν και τα όριά τους δεν είναι πλήρως καθορισμένα: στο εγγύς, μέσο και απώτερο υπέρυθρο. Το εύρος του υπέρυθρου που χρησιμοποιείται στους οπτικούς δέκτες είναι μικρότερο, και εκτείνεται από 0.72 μm έως 15 μm.

Η **εγγύς υπέρυθρη** (near infrared) φασματική ζώνη συνίσταται από μήκη κύματος λίγο μεγαλύτερα από αυτά του ορατού, εκτεινόμενη από το 0.72 μm έως το 1.5 μm. Η **μέση υπέρυθρη** (middle infrared) ακτινοβολία περιλαμβάνει μήκη κύματος από 1.5 μm έως 5.6 μm ενώ η **απώτερη υπέρυθρη** (far infrared) ακτινοβολία καταλαμβάνει μια ευρεία περιοχή του φάσματος με μήκη κύματος από 5.6 μm έως 1000 μm, που εκτείνεται έως την περιοχή των μικροκυμάτων.

Το υπέρυθρο χωρίζεται επίσης σε ανακλώμενο και θερμικό. Η υπέρυθρη ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από τον ήλιο και ανακλάται από τη γήινη επιφάνεια, πριν φτάσει στο δορυφορικό ανιχνευτή, ονομάζεται **ανακλώμενη υπέρυθρη** (reflected infrared). Περιλαμβάνει μήκη κύματος λίγο μεγαλύτερα από αυτά του κόκκινου (0.7 μm έως 3.0 μm) και συμπεριφέρεται με τρόπο ανάλογο με το ορατό φάσμα. Η υπέρυθρη ακτινοβολία με μήκη κύματος που εκτείνονται από 3 μm έως και 1000 μm (1 mm) εκπέμπεται από τη γη και για αυτό το λόγο καλείται **θερμική υπέρυθρη** (thermal infrared) ακτινοβολία.

Η **μικροκυματική** ακτινοβολία ή αλλιώς μικροκύματα (microwaves) περιλαμβάνει μεγάλα μήκη κύματος που εκτείνονται από 1 mm έως 1 m. Η φασματική περιοχή των μικροκυμάτων με τα μικρότερα μήκη κύματος έχει παρόμοιες ιδιότητες με τη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή έχει την ιδιότητα να διαπερνά τα νέφη και να εισχωρεί βαθιά σε μια γήινη επιφάνεια, ανάλογα με το μήκος κύματος της.

Ως **ένταση ακτινοβολίας**,  $I_{\lambda}$  ορίζεται το ποσό της ενέργειας  $dE_{\lambda}$  ακτινοβολίας μήκους κύματος λ που βρίσκεται στο κέντρο μιας στοιχειώδους περιοχής του φάσματος dλ, η οποία διέρχεται σε χρόνο dt από μία επιφάνεια dA, κατά μία διεύθυνση μέσα σε στερεά γωνία dΩ. Η ένταση της ακτινοβολίας κατά την διεύθυνση OD (Σχήμα 3) δίνεται από την σχέση:

$$I_{\lambda} = \frac{dE_{\lambda}}{dt \cdot d\Omega \cdot d\lambda \cdot dA \cdot \cos \theta}$$

όπου θ η ζενιθιακή γωνία. Μονάδα μέτρησης είναι  $Wm^{-2}\Omega^{-1}\mu m^{-1}$ .

Θεωρητικό Υπόβαθρο



**Σχήμα 3.** Ακτινοβολία στοιχειώδους επιφάνειας dA, στην διεύθυνση OD μέσα σεστοιχειώδη γωνία dΩ. (Καρτάλης & Φείδας, 2006).

#### 2.3.1 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη

Η ακτινοβολία κατά την αλληλεπίδρασή της με την ύλη εκπέμπεται, απορροφάται και ανακλάται και τέλος διαπερνά ένα σώμα (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Ανάκλαση, εκπομπή, απορρόφηση και διαπερατότητα της ακτινοβολίας

**Απορρόφηση** (absorption): Όταν ακτινοβολία προσπέσει σε ένα σώμα τότε ένας μέρος απορροφάται και η θερμοκρασία του σώματος αυξάνεται. Το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα σώμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος, τη φύση του υλικού και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Ποσοτικά η ικανότητα της επιφάνειας να απορροφά περιγράφεται από τον συντελεστή απορρόφησης (*α*) που ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που

απορροφάται προς την ισχύ που προσπίπτει. Το μέλαν σώμα απορροφά πλήρως την ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος. Τα πετρώματα της γης για παράδειγμα είναι καλοί απορροφητές σε αντίθεση με το χιόνι και τον πάγο.

**Ανάκλαση** (reflection): Εκφράζει την ικανότητα ενός σώματος να αποκρούει την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό χωρίς να μεταβάλλεται ούτε η φύση του σώματος ούτε τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας που προσπίπτει και ανακλάται. Ανάλογα με τον συντελεστή απορρόφησης, ορίζεται και ο συντελεστής ανάκλασης (*ρ*) ως το πηλίκο της ισχύος που ανακλάται προς την ισχύ που προσπίπτει στο σώμα.

**Διαπερατότητα** (transmission): Η διέλευση ενός ποσοστού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μέσα από ένα σώμα ονομάζεται διαπερατότητα. Η διαπερατότητα ενός σώματος εξαρτάται εκτός από τη φύση του σώματος και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Για ένα ορισμένο πάχος του υλικού, η ικανότητα του να μεταδίδει την ακτινοβολία εκφράζεται με τον συντελεστή διαπερατότητας (*τ*). Ο συντελεστής διαπερατότητας, ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος της ακτινοβολίας που διέρχεται από το σώμα προς την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Το νερό και ιδιαίτερα η ατμόσφαιρα είναι αρκετά διαπερατά στην ηλιακή ακτινοβολία. Για παράδειγμα το γυαλί έχει μεγάλη διαπερατότητα στη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία και πολύ μικρή στη μεγάλου μήκους ακτινοβολίας από το ένα μέσο στο άλλο, η διεύθυνση της ακτινοβολίας αλλάζει ως αποτέλεσμα της διαφορετικής ταχύτητας διάδοσης της ακτινοβολίας στα δυο μέσα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **διάθλαση** (defraction).

**Σκέδαση** (scattering): Αποτελεί τη διαδικασία απομάκρυνσης των φωτονίων από την αρχική δέσμη και μεταβολή της διεύθυνσης κίνησής τους κατά την πρόσκρουση της ακτινοβολίας στα αιωρούμενα σωματίδια ή στα μόρια ενός ρευστού. Η ένταση της σκέδασης εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων αυτών, τη συγκέντρωσή τους, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και το μήκος διαδρομής της ακτινοβολίας στο ρευστό.

**Εκπομπή** (emission): Όλα τα υλικά σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ένταση της ακτινοβολίας αυτής εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται και από τη φύση του σώματος. Όσο πιο θερμό είναι ένα σώμα τόσο πιο έντονα ακτινοβολεί και μάλιστα σε πιο μικρά μήκη κύματος.

**Μέλαν σώμα** (blackbody) ορίζεται το υποθετικό σώμα του οποίου η ένταση ακτινοβολίας της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, για κάθε μήκος κύματος και σε κάθε θερμοκρασία, είναι ισότροπη και η μέγιστη δυνατή. Το μέλαν σώμα είναι τέλειος, ιδανικός πομπός και απορροφητής και απορροφά

πλήρως την ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος και επανεκπέμπει όλη την ενέργεια που λαμβάνει.

**Συντελεστής εκπομπής**  $\varepsilon$  (emissivity) ενός πραγματικού σώματος για ένα ορισμένο μήκος κύματος λ, ορίζεται το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας  $I(\lambda)$  που εκπέμπει το σώμα σε θερμοκρασία Τ, προς την ένταση ακτινοβολίας  $I_M(\lambda)$  του ιδίου μήκους κύματος που εκπέμπει το μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία, δηλαδή:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{I(\lambda)}{I_{M}(\lambda)} \tag{1}$$

Ο συντελεστής εκπομπής περιγράφει ουσιαστικά την ικανότητα της επιφάνειας ενός σώματος να εκπέμπει ακτινοβολία σε μια δεδομένη θερμοκρασία. Ο συντελεστής εκπομπής λοιπόν κυμαίνεται μεταξύ τιμών 0 και 1 και μεταβάλλεται με το μήκος κύματος, τη φύση του σώματος και τη γωνία παρατήρησης. Τα σώματα που έχουν σταθερό συντελεστή εκπομπής για κάθε μήκος κύματος ονομάζονται **φαιά σώματα**. Για ένα αδιαφανές σώμα, όπου διαπερατότητα είναι μηδέν ( $\tau = 0$ ), έχουμε  $\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1$  και από το νόμο του Kirchoff  $\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$ , έχουμε  $\varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda}$ . Αν μετρηθεί λοιπόν ο συντελεστής ανάκλασης ( $\rho_{\lambda}$ ) μιας αδιαφανούς επιφάνειας, τότε μπορεί να προσδιοριστεί και ο συντελεστής εκπομπής της ( $\varepsilon_{\lambda}$ ).



μήκος κύματος

**Σχήμα 5.** Συντελεστής εκπομπής σωμάτων ως προς το μήκος κύματος.

Για κάθε μήκος κύματος  $\lambda$  και λόγω διατήρησης της ενέργειας για του συντελεστές  $\alpha_{\lambda}$ ,  $\rho_{\lambda}$ ,  $\tau_{\lambda}$ ισχύει:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$$

Για το μέλαν σώμα που δρα ως τέλειος απορροφητής ισχύει:  $\alpha > 1$  και  $\rho > 0$ , δηλαδή όλη η ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διαπερνά την επιφάνεια του σώματος και κατόπιν απορροφάται. Κανένα πραγματικό σώμα δεν εκπέμπει ακτινοβολία σαν τέλειο μέλαν σώμα, αλλά ανάλογα με την περίπτωση μπορούν να γίνουν ορισμένες προσεγγίσεις. Έτσι η γη και ο ήλιος μπορούν να θεωρηθούν μέλανα σώματα. Κάθε άλλο σώμα εκπέμπει ακτινοβολία μικρότερης έντασης από ότι ένα μέλαν σώμα της ίδιας θερμοκρασίας.

#### 2.3.2 Αλληλεπιδράση ύλης και ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία που καταγράφουν οι δορυφορικοί αισθητήρες, έχει υποστεί αρκετές επιδράσεις κατά την διαδρομή της μέσα από το σύστημα γης - ατμόσφαιρας. Γενικά, η επίδραση της ύλης στην ακτινοβολία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι σημαντικότεροι αυτών, όπως η φυσική κατάσταση της ύλης (στερεά, υγρά ή αέρια) και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, καθορίζουν και το είδος της επίδρασης π.χ. σκέδαση, απορρόφηση και ανάκλαση. Το είδος της επίδρασης εξαρτάται από τος διαδιόμενης ακτινοβολίας.

Η γήινη επιφάνεια ανακλά και απορροφά την ηλιακή (μικρού μήκους κύματος) και ατμοσφαιρική (υπέρυθρη) ακτινοβολία που δέχεται και παράλληλα εκπέμπει η ίδια υπέρυθρη ακτινοβολία (γήινη ακτινοβολία). Οι αισθητήρες των δορυφόρων καταγράφουν την ακτινοβολία που προέρχεται από την υπό διερεύνηση επιφάνεια και αποτελεί το αποτέλεσμα όλων των προηγούμενων διεργασιών. Το ποσοστό της καταγραφόμενης ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε κάθε μια από τις παραπάνω διεργασίες εξαρτάται από τη φύση της προσπίπτουσας επιφάνειας, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και τη γωνία πρόσπτωσης.

Η **ανάκλαση** (reflection) αξιοποιείται από τη δορυφορική τηλεπισκόπηση κυρίως για την καταγραφή του ορατού ή υπέρυθρου φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ανάκλαση χρησιμοποιείται επίσης και για την καταγραφή της μικροκυματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται προς την επιφάνεια της γης από δορυφορικές συσκευές τύπου ραντάρ.

Η διεργασία της ανάκλασης συνίσταται στην αλλαγή της διεύθυνσης της ακτινοβολίας κατά την πρόσπτωση της σε μια αδιαφανή επιφάνεια και εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Εάν η επιφάνεια είναι ομαλή και λεία σε σχέση με το μήκος κύματος, τότε όλη ή μέρος της ακτινοβολίας επιστρέφει σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση και η ανάκλαση ονομάζεται **κατοπτρική**. Ανάκλαση μπορεί να λάβει χώρα και μεταξύ επιφανειών που βρίσκονται υπό γωνία και τότε καλείται διπλής αναπήδησης ανάκλαση ή **γωνιακή** ανάκλαση. Εάν η επιφάνεια είναι ομαλή ανάκλαση.

διασκορπίζεται προς όλες τις διευθύνσεις και η ανάκλαση ονομάζεται **διάχυση**. Μια επιφάνεια η οποία διαχέει την ακτινοβολία ισόποσα προς όλες τις κατευθύνσεις ονομάζεται **ισότροπη ή Λαμπερτιανή** επιφάνεια. Μια τέτοια επιφάνεια έχει την ίδια λαμπρότητα με οποιαδήποτε γωνία παρατήρησης. Στην περίπτωση αυτή η ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στον παρατηρητή, δηλαδή στο δορυφόρο, εξαρτάται μόνο από τη γωνία πρόσπτωσης και την απόσταση του παρατηρητή από την επιφάνεια.

Ορίζουμε σαν **λευκάγεια** (albedo) τον λόγο της έντασης της ανακλώμενης ακτινοβολίας από μια επιφάνεια προς την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας για όλες τις γωνίες και όλα τα μήκη κύματος. Η λευκαύγεια εκφράζεται συνήθως επί τοις εκατό και μπορεί να αναφέρεται σε ολόκληρο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας ή μόνο σε ένα τμήμα του. Στην ορατή περιοχή του φάσματος, ανοιχτόχρωμες επιφάνειες έχουν μεγαλύτερη τιμή λευκαύγειας, ενώ σκουρόχρωμες μικρότερη. Τα υλικά της επιφάνειας της γης, έχουν λευκαύγεια που κυμαίνεται από 0.9 (φρέσκο χιόνι) έως περίπου 0.04 (ξυλάνθρακας). Κοιλότητες με έντονη σκιά μπορεί να εμφανίσουν λευκαύγεια που πλησιάζει το μηδέν του μέλανος σώματος.

#### 2.3.3 Φασματικές ιδιότητες των επιφανείων

Με τη βοήθεια της δορυφορικής τηλεπισκόπησης μπορούμε να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των διαφόρων επιφανειών εξετάζοντας την ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται από αυτές. Το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται στα διάφορα μήκη κύματος επηρεάζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά και τη σύσταση κάθε αντικειμένου, με το δικό του χαρακτηριστικό τρόπο. Με τη χρήση ειδικών αισθητήρων, κυρίως φασματόμετρων, μπορούμε να μελετήσουμε τη φασματική απόκριση των επιφανειών στα διάφορα μήκη κύματος. Με τον όρο φασματική απόκριση των επιφανειών στα διάφορα μήκη κύματος. Με τον όρο φασματική απόκριση εννοούμε την κατανομή της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από μια επιφάνεια σε σχέση με το μήκος κύματος λ. Κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετική φασματική απόκριση, η μελέτη της οποίας μας επιτρέπει τη διάκριση μιας επιφάνειας από κάποια άλλη και την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με το σχήμα, το μέγεθος, τις φυσικές ακόμη και χημικές ιδιότητες της. Η μορφή της καμπύλης της φασματικής απόκρισης μιας επιφάνειας απο εσχέση με το μήκος κύματος λ κάθε επιφάνειας αποτελεί τη βάση για την αναγνώριση και τον μεταξύ τους διαχωρισμό.

Στο Σχήμα 6 για παράδειγμα, παρουσιάζεται η φασματική υπογραφή διαφόρων υλικών, όπως αυτά δίνονται στην φασματική βιβλιοθήκη ASTER. Είναι χαρακτηριστική η διαφορά στην ανακλαστικότητα του εδάφους με τη βλάστηση στο κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο. Η βλάστηση

παρουσιάζει μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο από ότι το έδαφος και το αντίθετο παρατηρείται στο κόκκινο.



Σχήμα 6. Φασματικές υπογραφές τριών βασικών επιφανειών: βλάστηση, έδαφος και νερό (πληροφορία από τη φασματική βιβλιοθήκη ASTER).

#### 2.4 Επεξεργασιά Δορύφορικών Εικονών

Το δορυφορικά δεδομένα, στην αρχική τους μορφή, τις περισσότερες φορές δεν μπορούν απευθείας να αξιοποιηθούν και η ανάλογη κάθε φορά προ-επεξεργασία των εικόνων είναι απαραίτητη. Η προ-επεξεργασία σε γενικές γραμμές περιλαμβάνει ραδιομετρικές και γεωμετρικές διορθώσεις και στην περίπτωση εξαγωγής γεωφυσικών παραμέτρων που αφορούν την επιφάνεια της Γης, είναι απαραίτητη και η διόρθωση της επίδρασης της ατμόσφαιρας.

#### 2.4.1 Γεωμετρική Διορώωση – Ορωοαναγώγη

Η πρωτογενής δορυφορική εικόνα εμφανίζει γεωμετρικές παραμορφώσεις οι οποίες διακρίνονται σε συστηματικές και μη συστηματικές παραμορφώσεις. Οι συστηματικές παραμορφώσεις είναι σταθερές και προβλέψιμες και μπορεί να οφείλονται σε στρέβλωση σάρωσης, στην ταχύτητα του κατόπτρου σάρωσης, στη στιγμιαία γωνία σάρωσης (πανοραμική παραμόρφωση), στην ταχύτητα του δορυφόρου στην περιστροφή της γης, στην προοπτική ή στο ανάγλυφο (Toutin, 2004).

Η γεωμετρική διόρθωση ή γεωαναφορά έχει ως στόχο το μετασχηματισμό του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας σε ένα συγκεκριμένο σύστημα χαρτογραφικής προβολής. Όλα τα εικονοστοιχεία συνδέονται με τις χαρτογραφικές συντεταγμένες. Έτσι κάθε εικονοστοιχείο δεν χαρακτηρίζεται μόνο από τις συντεταγμένες της εικόνας (γραμμές και στήλες) αλλά και από τις αντίστοιχες συντεταγμένες στο προβολικό σύστημα του χάρτη. Με τη διαδικασία αυτή η δορυφορική εικόνα αποκτά την κλίμακα και τις ιδιότητες προβολής του χάρτη επιτρέποντας έτσι την εισαγωγή της σε ένα ΓΣΠ και την ταυτόχρονη χρήση της με άλλα θεματικά πεδία πληροφορίας. Μια ολοκληρωμένη γεωμετρική διόρθωση, εκτός των άλλων, θα πρέπει να απαλείψει τα σφάλματα που εισάγονται στην εικόνα από την τοπογραφία και το ανάγλυφο.

Τα αντικείμενα τα οποία βρίσκονται στο ίχνος του δορυφόρου στο ναδίρ έχουν ορατές μόνο τις κορυφές τους ενώ όλα τα άλλα αντικείμενα φαίνονται υπό γωνία. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7α) από τα τρία κτίρια, αποτυπώνεται μόνο η κορυφή του μεσαίου (στο ναδίρ) ενώ των άλλων δύο είναι ορατή και μια πλευρά τους. Όσο μεγαλύτερο ύψος έχουν τα αντικείμενα και όσο πιο μακριά από το κέντρο της εικόνας βρίσκονται τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η παραμόρφωση που εμφανίζουν στην εικόνα.



**Σχήμα 7.** Γεωμετρική παραμόρφωση λόγω υψομέτρου αναγλύφου. α)Ενώ στην εικόνα αποτυπώνεται μόνο η κορυφή του μεσαίου κτιρίου, από τα άλλα δύο κτίρια, αποτυπώνεται και η μία πλευρά τους. β)Τα σημεία Α και Γ μετατοπίζονται στην εικόνα στα σημεία Α΄ και Γ΄ λόγω του αναγλύφου σε συνδυασμό με τη γεωμετρία λήψης.

Η διαδικασία διόρθωσης σφαλμάτων που οφείλονται στο ανάγλυφο ονομάζεται **ορθοαναγωγή** (orthorectification). Με την ορθοαναγωγή γίνεται γεωμετρική διόρθωση ενώ παράλληλα

διορθώνονται οι παραμορφώσεις που εισάγονται στην εικόνα λόγω του υψομέτρου του αναγλύφου. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model, DEM) και πληροφορίες για την κάμερα ή τον αισθητήρα του καταγραφικού συστήματος.

#### 2.4.2 Μετατροπή Ψηφιακών Τίμων σε Τίμες Ακτινοβολίας

Επιδράσεις στη ραδιομετρία της εικόνας μπορεί να οφείλονται σε διαφορετικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα ο θόρυβος του συστήματος λήψης ή η ελαττωματική λειτουργία των αισθητήρων. Η επίδραση της ατμόσφαιρας επιφέρει επίσης αλλοιώσεις στη ραδιομετρία της εικόνας που για πολλές εφαρμογές πρέπει να διορθωθούν.

Η βαθμονόμηση των δορυφορικών εικόνων αφορά την απόλυτη ρύθμιση, με σκοπό να καθοριστεί η σχέση μεταξύ των ψηφιακών τιμών της εικόνας και της πραγματικής εισερχόμενης στο αισθητήρα ακτινοβολίας. Η σχέση μεταξύ σήματος εισόδου και σήματος εξόδου σε έναν ανιχνευτή συνήθως θεωρείται γραμμική της μορφής:

$$V_0 = aV_i + b$$

όπου  $V_0$  είναι μια γνωστή ακτινοβολία από πηγή αναφοράς,  $V_i$  είναι η παρατηρούμενη ψηφιακή τιμή και a, b είναι συντελεστές βαθμονόμησης. Αν έχουν προσδιοριστεί οι συντελεστές βαθμονόμησης με χρήση μιας πηγής αναφοράς, είναι δυνατή η μετατροπή των ψηφιακών τιμών σε τιμές ακτινοβολίας.

#### 2.5 Ταεινομήση Δοργφορικών Εικονών

Η ταξινόμηση μιας δορυφορικής εικόνας αποσκοπεί στον εντοπισμό ομογενών επιφανειών σε μια εικόνα. Κάθε εικονοστοιχείο ταξινομείται με βάση τις φασματικές του τιμές τους σε κλάσεις ή κατηγορίες με φυσική όμως σημασία (όπως έδαφος, θάλασσα, βλάστηση κ.α.). Η ταξινόμηση ενός εικονοστοιχείου σε μια κλάση γίνεται με βάση διάφορους κανόνες. Μπορούν να διακριθούν δύο μεγάλες κατηγορίες ταξινόμησης, όπως αυτές ορίζονται στην τηλεπισκόπιση: επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Στην μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση στατιστικοί κανόνες χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ομάδων εικονοστοιχείων με παρόμοια χαρακτηριστικά. Υπάρχουν μέθοδοι μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης εντελώς αυτοματοποιημένες, και άλλες όπου κάποιες παράμετροι, όπως ο αριθμός των κλάσεων κ.α., μπορούν να δοθούν. Στην περίπτωση της επιβλεπόμενης ταξινόμησης γίνεται επιλογή εκπαιδευτικού δείγματος (εικονοστοιχεία τα οποία αντιπροσωπεύουν αναγνωρίσιμες δομές στην εικόνα ή στοιχεία κάλυψης γης) το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μιας παραμετρικής υπογραφής η οποία αντιπροσωπεύει μια τάξη στην εικόνα. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η πρότερα γνώση της περιοχής ενδιαφέροντος

και των κλάσεων που θα δημιουργηθούν. Τα φασματικά χαρακτηριστικά του εκπαιδευτικού δείγματος χρησιμοποιούνται στη συνέχεια με χρήση διάφορων αλγορίθμων για τον εντοπισμό εικονοστοιχείων με παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά, τα οποία στη συνέχεια αποδίδονται στην αντίστοιχη κλάση. Πιο ανεπτυγμένες μέθοδοι ταξινόμησης λαμβάνουν υπόψη και άλλα χαρακτηριστικά πέραν των φασματικών, όπως τη χωρική πληροφορία, την υφή και γενικά επιπλέον βοηθητική πληροφορία. (Mather, 2004)

Οι μέθοδοι που προαναφέρθηκαν αφορούν την ταξινόμηση ενός εικονοστοιχείου σε μια κλάση. Στην περίπτωση των δορυφορικών εικόνων όμως, και ανάλογα με την διακριτική ικανότητα του αισθητήρα, ένα εικονοστοιχείο μπορεί μεν να αποτυπώνει μια ομογενή περιοχή (**αμιγές** εικονοστοιχείο), αλλά πολλές φορές η περιοχή που αποτυπώνεται είναι ανομοιογενής (**μικτό** εικονοστοιχείο) όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Η ακτινοβολία που καταγράφεται από τον δορυφορικό αισθητήρα για ένα μικτό εικονοστοιχείο αποτελεί συνδυασμό των ακτινοβολιών διαφορετικών υλικών.



Εικόνα 1. Αναπαράσταση αμιγών και μικτών εικονοστοιχείων δορυφορικής εικόνας. Η ακτινοβολία που καταγράφεται σε κάθε περίπτωση διαφέρει (Plaza et al., 2010).

Ανεπτυγμένες μέθοδοι ταξινόμησης, μπορούν να κάνουν χρήση της πληροφορίας σε **επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου** (sub-pixel classification methods). Στην περίπτωση αυτή κάθε εικονοστοιχείο δεν αντιστοιχείται αυστηρά σε μία κλάση, αλλά αντίθετα μπορεί να προσδιοριστεί το ποσοστό του εικονοστοιχείου που αντιστοιχεί στην εκάστοτε κλάση. Διάφορες μέθοδοι σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου έχουν προταθεί (Weng, 2007). Η μέθοδος της μοντελοποίησης ανάμιξης βασίζεται στην παραδοχή ότι τα χαρακτηριστικά των μικτών εικονοστοιχείων αποτελούν ανάμιξη των χαρακτηριστικών ενός μικρού αριθμού τύπων κάλυψης γης. Η μέθοδος αυτή είναι η ΑΦΑ και συναντάται σε διάφορες παραλλαγές. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κανόνες

ταξινόμησης που βασίζονται σε ασαφή λογική. Στη περίπτωση αυτή δίνεται ένα μέτρο του βαθμού στον οποίο ένα εικονοστοιχείο ανήκει σε μερικές ή σε ακόμα και σε όλες τις κλάσεις.

Στην περίπτωση του αστικού περιβάλλοντος, οι μέθοδοι ταξινόμησης σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου ενδείκνυνται λόγω της πολυπλοκότητας και των διαφορετικών επιφανειών που το χαρακτηρίζουν.

Το αστικό περιβάλλον είναι ένας πολύπλοκος συνδυασμός κτιρίων, δρόμων, πεζοδρομίων, πάρκινγκ, δέντρων, κήπων, εδάφους, νερού κ.α. Κάθε ένα από τα στοιχεία που αποτελούν το αστικό περιβάλλον έχει μοναδικές βιοφυσικές ιδιότητες και ο συνδυασμός τους αποτελεί αυτό που ονομάζεται αστικό μοτίβο. Για να κατανοηθεί η δυναμική του αστικού μοτίβου και οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτό, θα πρέπει να ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια το χωρικό μοτίβο και οι χρονικές του μεταβολές.

#### 2.6 Υπολογισμός Σύντελεστη Εκπομπής Επιφανείας

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι εκτίμησης του συντελεστή εκπομπής από δορυφορικά δεδομένα. Η εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής από δεδομένα του θερμικού υπερύθρου φάσματος ακτινοβολίας έχει δύο σημαντικά εμπόδια: α) την επίδραση της ατμόσφαιρας και την β) την ίδια τη φύση των θερμικών μετρήσεων κατά λόγω της οποίας ο συντελεστής εκπομπής και η θερμοκρασία συγχέονται (Sobrino et al., 2008). Τα σφάλματα που παρουσιάζουν οι υπάρχουσες μέθοδοι βασίζονται κυρίως σε: θόρυβο των οργάνων και σφάλματα στη βαθμονόμηση, αβεβαιότητες στην εκτίμηση της κατερχόμενης ακτινοβολίας, επιδράσεις της ατμόσφαιρας και απλουστεύεσεις των μεθόδων. Ένας αριθμός μεθόδων για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής επιφάνειας από δορυφορικά δεδομένα παρατίθεται παρακάτω.

#### 2.6.1 Αλγοριωμός ΤΕS

Ο αλγόριθμος TES (Temperature Emissivity Separation) προτάθηκε από τους Gillespie et al. (1998) για τον δορυφόρο ASTER και αν και συνδυάζει διάφορες μεθόδους υπολογισμού του συντελεστή εκπομπής, βασίζεται σε ατμοσφαιρικά δεδομένα από άλλες πηγές. Ο TES κάνει μια προσπάθεια εκτίμησης της προς τα κάτω ανακλώμενης ακτινοβολίας και εκτιμά έναν αρχικό φασματικό συντελεστή εκπομπής. Κάποιοι περιορισμοί που προέρχονται από δεδομένα παλινδρόμησης ελαχίστων τιμών συντελεστή εκπομπής από φασματικές βιβλιοθήκες, προλαμβάνουν σφάλματα υποτίμησης. Ο TES εφαρμόζεται σε θερμικά δεδομένα ASTER τα οποία έχουν ήδη διορθωθεί για την ατμοσφαιρική απορρόφηση κατά τη διαδρομή της ακτινοβολίας. Η εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής εδάφους από τον TES γίνεται σε τρεις φάσεις:

Αρχικά υπολογίζονται κανονικοποιημένοι συντελεστές εκπομπής και δίνεται μια αρχική εκτίμηση θερμοκρασίας εδάφους. Ένας σταθερός συντελεστής εκπομπής υποτίθεται για Ν φασματικά κανάλια και υπολογίζονται Ν θερμοκρασίες εδάφους. Για κάθε εικονοστοιχείο η μέγιστη από αυτές τις Ν θερμοκρασίες επιλέγεται και χρησιμοποιείται με τη σειρά της για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής για τα υπόλοιπα κανάλια. Η αρχική τιμή συντελεστή εκπομπής που χρησιμοποιείται είναι 0.97. Η ανακλώμενη ακτινοβολία απομακρύνεται με επαναλήψεις. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η μεταβολή μεταξύ των βημάτων να είναι μικρότερη από κάποιο σταθερό κατώφλι, ή μέχρι ο αριθμός των επαναλήψεων να ξεπεράσει ένα μέγιστο αριθμό.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται σχετικοί συντελεστές εκπομπής με χρήση ατμοσφαιρικά διορθωμένων ακτινοβολιών ( $R_i$ ) και βρίσκοντας τον λόγο των παραπάνω υπολογιζόμενων συντελεστών εκπομπής με τη μέση τιμή τους:

$$\beta_i = \frac{5 \cdot \varepsilon_i}{\sum \varepsilon_i}$$

όπου

$$ε_i = \frac{R_i}{B_i(T_{NEM})}$$
 και  $T_{NEM} = \max(T_i)$ 

Τέλος, μια εμπειρική σχέση μεταξύ της ελάχιστης τιμής συντελεστή εκπομπής ( $\mathcal{E}_{min}$ ) και της διαφοράς μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου λόγου χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του  $\mathcal{E}_{min}$  και τελικά του συντελεστή εκπομπής, όπως περιγράφεται από την σχέση:

$$\varepsilon_{\min} = 0.944 - 0.687(\max \beta_i - \min \beta_i)^{0.737}$$
 και  $\varepsilon_i = \beta_i \frac{\varepsilon_{\min}}{\min \beta_i}$ 

#### 2.6.2 Μεθόδος ΤΙSI

Οι Becker & Li (1990) προτείνανε την μέθοδο TISI (Temperature - Independent Thermal Infrared Spectral Indices), μια ευσταθή μέθοδο για την εκτίμηση του σχετικού συντελεστή εκπομπής. Η TISI κάνει χρήση μιας προσέγγισης της συνάρτησης του Plank για την κατασκευή δεικτών, ανεξάρτητων από την θερμοκρασία εδάφους και ευθέως σχετιζόμενων με τον συντελεστή εκπομπής. Η ατμοσφαιρικά διορθωμένη στο έδαφος φασματική ακτινοβολία μπορεί να γραφεί ως:

$$R_i = \varepsilon_i \alpha_i T_s^{n_i} C_i$$
, όπου  $C_i = 1 + \frac{(1 - \varepsilon_i) L_i^{\downarrow}}{\varepsilon_i B_i(T_s)}$ 

και  $\alpha_i$  και  $n_i$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από το μήκος κύματος για την απόκλιση της θερμοκρασίας γύρω από μια θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$ . Για την εκτίμηση του δείκτη TISI, υπολογίζονται οι λόγοι τιμών ακτινοβολίας από δύο κανάλια  $R_i$  και  $R_j$  με τις κατάλληλες δυνάμεις  $\alpha_i$  και  $\alpha_j$ , όπως  $\alpha_i = 1$  και  $\alpha_j = n_i / n_j = n_{ij}$  ώστε να ικανοποιείται η σχέση  $\alpha_i n_i - \alpha_j n_j = 0$ , γεγονός που κάνει το λόγο σχεδόν ανεξάρτητο από την θερμοκρασία:

$$\frac{R_i^{\alpha_i}}{R_j^{\alpha_j}} = \frac{\varepsilon_i \alpha_i C_i}{\varepsilon_j^{n_{ij}} \alpha_j^{n_{ij}} C_j^{n_{ij}}}$$

Τέλος, ο δείκτης ΤΙSΙ ορίζεται ως:

$$TISI_{ij} = rac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j^{n_{ij}}} C_{ij}$$
 όπου  $C_{ij} = C_i (C_j^{n_{ij}})^{-1}$ 

Το  $C_{ij}$  εξαρτάται από τον συντελεστή εκπομπής, την ατμόσφαιρα και την κατάσταση της επιφάνειας. Αυστηρά,  $C_{ij} = 1$  μόνο όταν Ts  $\rightarrow \infty$  ή για  $\varepsilon_i = \varepsilon_j = 1$ , αλλά για ένα μεγάλο εύρος τιμών θερμοκρασίας εδάφους και συντελεστή εκπομπής το  $C_{ij} = 1$  είναι μια καλή προσέγγιση στο φάσμα 8 – 13 μm. Η ανεξαρτησία του TISI από την θερμοκρασία αυξάνει την ευαισθησία του σε μεταβολές του συντελεστή εκπομπής. Ο TISI δεν απαιτεί την a priori γνώση του συντελεστή εκπομπής ή της επιφάνειας. Πάραυτα, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και κυρίως το υετίσιμο νερό πρέπει να είναι γνωστά για την ατμοσφαιρική διόρθωση. Χωρίς περαιτέρω υποθέσεις, ο TISI διευκολύνει κυρίως στον υπολογισμό λόγων. Για μια απόλυτη τιμή συντελεστή εκπομπής, γίνεται η υπόθεση ότι ο λόγος του φασματικού συντελεστή εκπομπής για κάθε εικονοστοιχείο δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της μέρας και ότι η BRDF είναι γνωστή. Κάτω λοιπόν από ορισμένες συνθήκες ο συντελεστής εκπομπής μπορεί να υπολογιστεί με τον νόμο του Kirchoff αν είναι γνωστή η ανακλαστικότητα.

#### 2.6.3 Μεθόδος των Φασματικών Λογών

Η μέθοδος των φασματικών λόγων του Watson (1992) βασίζεται στην παραδοχή ότι οι λόγοι των φασματικών ακτινοβολιών δεν είναι ευαίσθητοι σε μικρές διαφορές της θερμοκρασίας εδάφους, αν και η ίδια η φασματική ακτινοβολία είναι. Ο λόγος του συντελεστή εκπομπής υπολογίζεται από λόγους φασματικών ακτινοβολιών για δύο κανάλια *i* και *r* από τη σχέση:

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_r} = \left[\frac{B_i(T_{i,G}) - L_i^{\downarrow}}{B_r(T_{r,G}) - L_r^{\downarrow}}\right] \left[\frac{B_i(T_s) - L_r^{\downarrow}}{B_i(T_s) - L_i^{\downarrow}}\right]$$

όπου η θερμοκρασία εδάφους  $T_s$  θα πρέπει να είναι γνωστή. Η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας λαμπρότητας μεταξύ των Ν καναλιών μπορεί να θεωρηθεί μια καλή εκτίμηση της  $T_s$ .

#### 2.6.4 Μεθόδος του Αλφά Υπολοιπου

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τους Kealy & Gabell (1990) και κάνει χρήση της προσέγγισης του Wien της συνάρτησης του Plank για ακτινοβολίες  $\mathbf{R}_i(\mathbf{T}_i)$  στο κανάλι i. Μετά υπολογίζεται ο φυσικός λογάριθμος και πολλαπλασιάζοντας με  $\lambda_i$ , η  $\mathbf{T}_s$  εξαλείφεται αφαιρώντας το μέσο λογάριθμο των N καναλιών από κάθε λογάριθμο. Τα υπόλοιπα ονομάζονται συντελεστές-άλφα  $\mathbf{a}_{res}$  και δίνονται από τη σχέση:

$$a_{resi} = \lambda_i \ln \varepsilon_i - \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \ln \varepsilon_i}{N}$$

Αφαιρώντας την παραπάνω σχέση για ένα κανάλι αναφοράς *r* από ένα άλλο κανάλι *i* και υπολογίζοντας τα εκθετικά καταλήγουμε στη σχέση:

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j^{n_{ij}}} = (\exp(a_{resi} - a_{resj}))^{a_{resi}}$$
όπου  $n_{ij} = \frac{n_i}{n_j}$ 

και  $n_i$  είναι μια σταθερά για συγκεκριμένο μήκος κύματος, για το κανάλι i, για τη σύνηθες μεταβολή θερμοκρασία γύρω από μια θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$ . Οι Gu & Gillespie (2000) βελτίωσαν τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιώντας ανάπτυξη Taylor για τη γραμμικοποίηση της συνάρτησης του Plank.

#### 2.6.5 Μέθοδος του NDVI

Οι Sobrino & Raissouni (2000) πρότειναν μια απλοποιημένη μέθοδο για την εκτίμηση συντελεστή εκπομπής από ατμοσφαιρικά διορθωμένα δεδομένα χαμηλής χωρικής ανάλυσης. Κάνοντας την υπόθεση ότι τα εικονοστοιχεία μιας δορυφορικής εικόνας αποτελούν συνδυασμό βλάστησης και εδάφους, μπορεί να εκτιμηθεί ο δείκτης βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) και τελικά ο συντελεστής εκπομπής. Σύμφωνα με τους Dash et al. (2002) αυτή η μέθοδος εκτιμά με καλή ακρίβεια τον συντελεστή εκπομπής σε περιοχές με αρκετή βλάστηση, αλλά για περιοχές με μικρό NDVI, όπως για παράδειγμα άνυδρες περιοχές, παρουσιάζει αδυναμία.

Για 0.2 ≤ NDVI ≤ 0.5, η επιφάνεια σε κάθε εικονοστοιχείο είναι ετερογενής. Ο συντελεστής εκπομπής για την επιφάνεια αυτή μπορεί να δοθεί χρησιμοποιώντας την θεωρητική προσέγγιση που μοντελοποιεί την επιφάνεια θεωρώντας την ένα συνδυασμό από γυμνό έδαφος και βλάστηση:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{vi} P_v + \varepsilon_{si} (1 - P_v) + C_i$$

όπου  $\varepsilon_{si}$  και  $\varepsilon_{vi}$  είναι οι συντελεστές εκπομπής του γυμνού εδάφους και της βλάστησης αντίστοιχα στο κανάλι *i*, P<sub>v</sub> είναι το ποσοστό της βλάστησης και C<sub>i</sub> είναι ο όρος που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και λαμβάνει υπόψη τις εσωτερικές ανακλάσεις. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου C<sub>i</sub>, θεωρήθηκαν διαφορετικοί τύποι βλάστησης. Με χρήση in-situ μετρήσεων, οι Sobrino et al. (2001) προσδιόρισαν τις τιμές του συντελεστή εκπομπής για τα κανάλια 4 και 5 του δορυφόρου AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer):

$$\varepsilon_4 = 0.968 + 0.021 P_{\nu}$$
 kal  $\varepsilon_5 = 0.974 + 0.015 P_{\nu}$ 

Έτσι, ο μέσος συντελεστής εκπομπής για τα δύο κανάλια του AVHRR και η διαφορά συντελεστή εκπομπής μεταξύ των δύο καναλιών είναι:

$$\varepsilon = 0.971 + 0.018 P_{v}$$
 kal  $\Delta \varepsilon = -0.006(1 - P_{v})$ 

αν οι τιμές NDVI<sub>max</sub>=0.5 και NDVI<sub>min</sub>=0.2 αντιστοιχούν σε τιμές NDVI για γυμνό έδαφος και βλάστηση αντίστοιχα και το  $P_{\nu}$  δίνεται από τη σχέση:

$$P_{v} = \frac{(NDVI - NDVI_{\min})^{2}}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})^{2}} = \frac{(NDVI - 0.2)^{2}}{0.09}$$

Για NDVI < 0.2, το εικονοστοιχείο θεωρείται έδαφος με ελάχιστη βλάστηση η ακόμα και γυμνό (P<sub>v</sub>=0). Χρησιμοποιώντας τα φασματικά δεδομένα των γυμνών εδαφών (Salisbury & D' Aria, 1992) με συντελεστή εκπομπής μεγαλύτερο ή ίσο με 0.94 στα κανάλια 4 και 5 του AVHRR, προέκυψαν δύο γραμμικές σχέσεις από τη συσχέτιση του μέσου ενεργού συντελεστή εκπομπής και τη διαφορά του συντελεστή εκπομπής από την ανακλαστικότητα στο κανάλι 1 του AVHRR.

$$ε = 0.980 - 0.042 \rho_1$$
 και  $Δε = -0.003 - 0.029 \rho_1$ 

Για NDVI > 0.5, το εικονοστοιχείο θεωρείται από αποτελείται μόνο από βλάστηση ( $P_v = 1$ ), συνεπώς οι τιμές  $\varepsilon_{v4} = \varepsilon_{v5} = 0.985$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Έτσι, ο μέσος συντελεστής εκπομπής μπορεί να γραφεί ως

 $\varepsilon = \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = 0.985 + \mu_i$ ,  $\mu \epsilon C_i = 0.004$ 

Οι Jiménez-Muñoz et al. (2006) προσάρμοσαν τον αλγόριθμο αυτό του NDVI για τα κανάλια 10-14 του ASTER. Ο συντελεστής *P<sub>v</sub>* δίνεται από τη σχέση

$$P_{\nu} = \frac{(NDVI - NDVI_{\min})^2}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})^2}$$

Οι τιμές  $NDVI_{min}$  και  $NDVI_{max}$  αντιστοιχούν στις τιμές  $NDVI_{soil}$  και  $NDVI_{vegetation}$  και για το κανάλι 13 του ASTER ο συντελεστής εκπομπής δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{13} = 0.968 + 0.022 \cdot P_{y}$$

Οι Stathopoulou et al. (2007) πρότειναν σε αστικό περιβάλλον την ανάμιξη τεχνητών υλικών με βλάστηση και όχι έδαφος. Έτσι, με χρήση δεδομένων από την φασματική βιβλιοθήκη ASTER και τη μέθοδο των Sobrino et al. (2004) για την εκτίμηση για την εκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους από δεδομένα Landsat TM, τροποποίησαν τη μέθοδο NDVI προτείνοντας την σχέση

$$\varepsilon_{TM6} = 0.017 P_{\mu} + 0.963$$

για τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής σε αστικές περιοχές.

#### 2.6.6 Μεθοδοι που βασιζονται σε Ταξινομηση

Για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής από στατικά δεδομένα κάλυψης γης και δυναμική πληροφορία οι Snyder et al. (1998) πρότειναν μια μέθοδο εκτίμησης βασισμένη σε ταξινόμηση, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων συντελεστή εκπομπής. Μια τέτοια βάση χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο split window του MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής (Wan, 1999). Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας μοντέλα BRDF. Οι φασματικοί συντελεστές προήλθαν από μετρήσεις εργαστηρίου διάφορων υλικών και οι παράμετροι δομής από περιγραφές του τύπου κάλυψης γης. Το κάθε εικονοστοιχείο ταξινομείται σε μια από τις 14 κλάσεις συντελεστή εκπομπής. Κλάσεις κάλυψης γης με παρόμοιο συντελεστή εκπομπής συγχωνεύονται σε μία κλάση, όπως για παράδειγμα η κλάση των αναπτυσσόμενων καλιεργειών και των αδρανών καλλιεργειών, λόγω του διαφορετικού συντελεστή εκπομπής τους. Από μοντέλα πυρήνων στη συνέχεια υπολογίζεται η BRDF και τέλος η ημισφαιρική ανάκλαση. Ο συντελεστής εκπομπής υπολογίζεται ως –ανάκλαση (νόμος του Kirchoff).

Βοηθητικά δεδομένα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής, όπως για παράδειγμα η βιβλιοθήκη συντελεστή εκπομπής MODIS UCSB, η φασματική βιβλιοθήκη ASTER ή δεδομένα κάλυψης γης CORINE.

Χάρτες συντελεστή εκπομπής μπορούν να βασιστούν στην συσχέτιση τύπων κάλυψης γης με τιμές συντελεστή εκπομπής. Ο Chrysoulakis (2003) έκανε ανάθεση τιμών συντελεστή εκπομπής από πειραματικές μετρήσεις σε κάθε τύπο επιφάνειας εδάφους για την εκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους για την περιοχή της Αθήνας με χρήση δεδομένων ASTER. Οι τύποι κάλυψης γης εκτιμήθηκαν με ταξινόμηση εικόνων ASTER. Οι Stathopoulou et al. (2004) συνδύασαν θερμικά δεδομένα κάλυψης γης Corine για την Ελλάδα για τον προσδιορισμό συντελεστή εκπομπής και στη συνέχεια χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματα για την παραγωγή χαρτών θερμοκρασίας εδάφους χωρικής ανάλυσης 250 m. Επίσης οι Stathopoulou et al. (2007) συνδύασαν θερμικά δεδομένα Landsat TM με δεδομένα κάλυψης γης Corine για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής και στη συνέχεια από τη φασματική βιβλιοθήκη ASTER για την εκτίμηση φασματικής ανάκλασης για διάφορα υλικά σε θερμικά κανάλια του AVHRR και στη συνέχεια με χρήση του νόμου του Kirchhoff τα μετέτρεψαν σε συντελεστή εκπομπής. Τέλος, οι Nichol et al. (2009) δημιούργησαν μια μέθοδο φασματικής ενίσχυσης για θερμικά δεδομένα ASTER και Landsat για να υποστηρίξουν τη μελέτη θερμικής νησίδας στο Χονγκ Κόνγκ.

Συνοψίζοντας, ο αλγόριθμος ΤΕS αν και δίνει αρκετά ακριβείς εκτιμήσεις της θερμοκρασίας εδάφους και του συντελεστή εκπομπής, υπολογίζει τις δύο αυτές παραμέτρους ταυτόχρονα και επίσης για την εφαρμογή του απαιτούνται ατμοσφαιρικά διορθωμένα δορυφορικά δεδομένα. Η μέθοδος του NDVI δίνει αρκετά καλές εκτιμήσεις του συντελεστή εκπομπής σε μη αστικές περιοχές, όμως παρουσιάζει αδυναμία σε αστικές περιοχές λόγω της μοντελοποίησης της κάλυψης γης με χρήση δύο κατηγοριών: βλάστηση και έδαφος. Επίσης, άλλες μέθοδοι εκτίμησης συντελεστή εκπομπής (όπως η TISI, των Φασματικών Λόγων και του Άλφα Υπολοίπου) δεν παράγουν εύκολα αξιοποιήσιμα αποτελέσματα γιατί δεν δίνουν απόλυτη τιμή συντελεστή εκπομπής. Τέλος, οι μέθοδοι που βασίζονται σε ταξινόμηση, και εφαρμόζονται σε στατικά δεδομένα κάλυψης γης, δεν ενδείκνυνται για την εκτίμηση μιας δυναμικής παραμέτρου, όπως τον συντελεστή εκπομπής. Επίσης, μέθοδοι εκτίμησης του συντελεστή εκπομπής που βασίζονται σε ταξινόμηση και τον διαχωρισμό των εκάστοτε κλάσεων κάλυψης γης και επίσης στην αντιστοίχηση μιας ενιαίας τιμής στην εκάστοτε κλάση. Είναι φανερό λοιπόν πως υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης νέων μεθόδων για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής με στόχο την βελτίωση της ακρίβειας εκτίμησης σε αστικές κυρίως περιοχές.

#### 2.7 ΤΟ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΟ ASTER

Το σύστημα ASTER είναι ένα υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας ραδιόμετρο του δορυφόρου Terra, ο οποίος είναι ένας από τους βασικούς δορυφόρους του συστήματος EOS (Earth Observation Satellites). Το ύψος πτήσης του είναι στα 705 km και η γωνία κλίσης του 98,2°. Έχει επαναληπτικότητα 16 ημερών και η ηλιοσύχρονη πολική τροχιά φέρει τον δορυφόρο πάνω από τον Ισημερινό τοπική ώρα 10:30 π.μ. Ο πολυφασματικός δέκτης ακτινοβολίας – ASTER, καλύπτει μία ευρεία φασματική περιοχή από το ορατό μέχρι το θερμικό υπέρυθρο με 14 φασματικά κανάλια υψηλής χωρικής διακριτικής και ραδιομετρικής ικανότητας (Πίνακας 1). Έτσι λοιπόν κατοπτεύει την επιφάνεια της γης με τρία διαφορετικά υποσυστήματα :

- Δέκτης ορατού εγγύς υπέρυθρου (VNIR: Visible and Near InfRared), το οποίο αποτελείται από
   3 φασματικές ζώνες που κατοπτεύουν στο ναδίρ και μία επιπλέον η οποία κατοπτεύει προς τα πίσω, παρέχοντας στερεοσκοπική κάλυψη.
- Δέκτης μέσου υπέρυθρου (SWIR: ShortWave InfraRed), το οποίο αποτελείται από 6 φασματικές ζώνες.
- Δέκτης θερμικού υπερύθρου (TIR: Thermal InfraRed), το οποίο αποτελείται από 5 φασματικές ζώνες.

		Φασματική περιοχή (μm)	Χωρική Διακριτική Ικανότητα (m)	Ραδιομετρική Διακριτική Ικανότητα
1	Ορατό και εγγύς υπέρυθρο - VNIR	0.52 - 0.60	15	8 bits
2		0.63 - 0.69	15	
3N		0.76 - 0.86 (στο ναδίρ)	15	
3B		0.76 - 0.86	15	
4	Μέσο υπέρυθρο - SWIR	1.600 - 1.700	30	8 bits
5		2.145 - 2.185	30	
6		2.185 - 2.225	30	
7		2.235 - 2.285	30	
8		2.295 - 2.365	30	
9		2.360 - 2.430	30	
10	Θερμικό υπέρυθρο – TIR	8.125 - 8.475	90	12 bits
11		8.475 - 8.825	90	
12		8.925 - 9.275	90	
13		10.25 - 10.95	90	
14		10.95 - 11.65	90	

**Πίνακας 1.** Κανάλια, φασματικές περιοχές και χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφόρου ASTER (http://asterweb.jpl.nasa.gov).

Τα προϊόντα ASTER εμφανίζονται πιο αναβαθμισμένα από άλλα προϊόντα τηλεπισκόπισης (Εικόνα2), έχοντας τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Με 14 φασματικές ζώνες παρέχουν μία ευρύτερη κάλυψη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από τα 0,52 μm μέχρι τα 11,65 μm.
- Η χωρική διακριτική ικανότητα είναι 15 m, 30 m και 90 m για το ορατό και κοντινό υπέρυθρο,
   για το υπέρυθρο μικρού κύματος και για το θερμικό υπέρυθρο, αντίστοιχα.
- Τα κανάλια της φασματικής ζώνης 3 του εγγύς υπέρυθρου δηλαδή από τα 0,76 μm μέχρι τα
   0.86 μm χρησιμοποιούνται για στερεοσκοπική κάλυψη λαμβάνοντας εικόνες σχεδόν ταυτόχρονα κατά μήκος της τροχιάς (along track) όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.



Εικόνα 2. Σύγκριση του ραδιομέτρου ASTER με το Landsat όπου φαίνεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που καλύπτεται από τα κανάλια του κάθε αισθητήρα και η χωρική τους διακριτική ικανότητα http://asterweb.jpl.nasa.gov/images/spectrum.jpg).

#### Το ύποσύστημα VNIR

Το υποσύστημα VNIR αποτελείται από δύο ανεξάρτητα τηλεσκόπια. Τα τηλεσκόπια αυτά είναι παραταγμένα το ένα κατακόρυφα (τηλεσκόπιο nadir) και το άλλο προς τα πίσω (τηλεσκόπιο backwards) σχηματίζοντας μεταξύ τους γωνία 26,8 μοίρες. Αυτή ακριβώς η διάταξη εξασφαλίζει την στερεοκάλυψη. Οι ανιχνευτές για κάθε μία ζώνη αποτελούνται από 5.000 στοιχεία πυριτίου. Μόνο 4.000 από αυτά χρησιμοποιούνται οποιαδήποτε στιγμή. Κατά την διάρκεια της περιόδου περιστροφής της γης μετατοπίζεται το κέντρο της εικόνας. Το υποσύστημα VNIR εξάγει αυτόματα τα 4000 εικονοστοιχεία βασισμένα στη θέση της τροχιάς που παρέχεται από τον EOS (http://asterweb.jpl.nasa.gov/instrument.asp).


**Σχήμα 8.** Απλουστευμένο σχεδιάγραμμα της γεωμετρίας της κατά μήκος της τροχιάς λήψης εικόνας από τα κανάλια 3N και 3B.

#### Το ύποσύστημα TIR

Το υποσύστημα TIR κάνει χρήση ενός τηλεσκοπίου χωρικής διακριτικής ικανότητας 90 m × 90 m το οποίο λειτουργεί σε πέντε φασματικές περιοχές του θερμικού υπερύθρου (8.125 – 11.65 μm). Το υποσύστημα TIR έχει σαρωτή με εγκάρσια στην τροχιά διεύθυνση και για κάθε κανάλι χρησιμοποιούνται 10 ανιχνευτές. Κατά τη διάρκεια δειγματοληψίας, ο σαρωτής ταλαντώνεται στα 7 Ηz και κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης συλλέγονται δεδομένα σε μία διεύθυνση. Για την βαθμονόμηση του, ο σαρωτής περιστρέφεται 90 μοίρες από το ναδίρ και κοιτάει ένα εσωτερικό μέλαν σώμα. (http://asterweb.jpl.nasa.gov/instrument.asp)

#### Προϊοντα ASTER

Ο ASTER, εκτός από τα πρωτογενή δεδομένα παρέχει και διαθέτει κάποια προϊόντα σε διάφορα επίπεδα, όπως για παράδειγμα δεδομένα ακτινοβολίας, ανακλαστικότητας, θερμοκρασίας εδάφους, συντελεστή εκπομπής, ψηφιακά μοντέλα εδάφους και άλλα. Οι αλγόριθμοι παραγωγής των προϊόντων αυτών δημιουργήθηκαν από την Επιστημονική Ομάδα του ASTER και εφαρμόζονται από το Land Processes DAAC. (http://asterweb.jpl.nasa.gov/data\_products.asp)

Δύο τύποι δεδομένων Επιπέδου-1 είναι διαθέσιμα από τον ASTER: Επίπεδο - 1A (Level-1A) και Επίπεδο - 1B (Level-1B). Τα δεδομένα ASTER L1A ορίζονται τυπικά ως τα αναδομημένα, μη επεξεργασμένα στοιχεία οργάνων σε πλήρη ανάλυση. Αποτελούνται από τα δεδομένα εικόνας, τους ραδιομετρικούς συντελεστές, τους γεωμετρικούς συντελεστές και άλλα βοηθητικά στοιχεία χωρίς εφαρμογή των συντελεστών στα δεδομένα εικόνας, διατηρώντας κατά συνέπεια τις αρχικές τιμές των δεδομένων. Τα L1B δεδομένα παράγονται με την εφαρμογή αυτών των συντελεστών για τη ραδιομετρική βαθμονόμηση και τη γεωμετρική λήψη δείγματος. Όλα τα επίκτητα στοιχεία εικόνας υποβάλλονται σε επεξεργασία L1A. Δεδομένα ASTER επιπέδου-1A δημιουργούνται από δεδομένα επιπέδου-0, και αποτελούνται από ανεπεξέργαστες ψηφιακές αριθμήσεις οργάνων. Αυτό το προϊόν περιέχει, αποδιαυλωμένα και ευθυγραμμισμένα εκ νέου, στοιχεία εικόνας οργάνων με τους γεωμετρικούς συντελεστές διορθώσεων και τους ραδιομετρικούς συντελεστές βαθμονόμησης επισυναπτόμενους. Οι ραδιομετρικοί συντελεστές βαθμονόμησης, που αποτελούνται από την αντιστάθμιση και τις πληροφορίες ευαισθησίας, παράγονται από μία βάση δεδομένων για όλους τους ανιχνευτές, και ενημερώνονται περιοδικά. Τα δεδομένα ASTER επιπέδου-1B είναι L1A δεδομένα στα οποία έχουν εφαρμοστεί ραδιομετρικοί και γεωμετρικοί μετασχηματισμοί. Όλα αυτά τα στοιχεία αποθηκεύονται μαζί με τα μετα-δεδομένα σε ένα αρχείο.

#### Προιόν Σύντελεστή Εκπομπής

Το προϊόν Επιπέδου - 2 Συντελεστή Εκπομπής Επιφάνειας (ASTO5) περιέχει τον συντελεστή εκπομπής επιφάνειας σε χωρική ανάλυση 90 m, μόνο πάνω από χερσαίες επιφάνειες, χρησιμοποιώντας τα πέντε θερμικά κανάλια του ASTER. Το προϊόν αυτό χρησιμεύει και στον υπολογισμό της θερμοκρασίας εδάφους, το οποίο διατίθεται ως προϊόν (ASTO8), επίσης χωρικής ανάλυση 90 m. Τα πέντε κανάλια στο θερμικό υπέρυθρο του ASTER δίνουν τη δυνατότητα εκτίμησης συντελεστή εκπομπής και θερμοκρασίας εδάφους με χρήση του αλγορίθμου TES, υπερτερώντας άλλων αισθητήρων (όπως Landsat και AVHRR) λόγω φασματικής κάλυψης, χωρικής διακριτικής ικανότητας, καθώς και ραδιομετρικής ακρίβειας. Το προϊόν περιέχει το συντελεστή εκπομπής για το κάθε ένα από τα πέντε θερμικά κανάλια του ASTER και έχει γίνει έλεγχος αξιοπιστίας σε αυτό. Η ακρίβεια του εξαρτάται από την ακρίβεια της ανερχόμενης ακτινοβολίας που με τη σειρά της εξαρτάται από τα ατμοσφαιρικά προφίλ που χρησιμοποιούνται για την ατμοσφαιρική διόρθωση. Σε ιδανικές συνθήκες, το σφάλμα που οφείλεται στην ατμοσφαιρική διόρθωση ισούται με το σφάλμα μέτρησης του αισθητήρα και σφάλματα που οφείλονται στην διαφορά μέγιστης ελάχιστης τιμής

(http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\_data/01\_Data\_Products/Emissivity.pdf).

#### Προιόν Θερμοκράσιας Εδαφούς

Το προϊόν Επιπέδου - 2 Θερμοκρασίας Εδάφους (AST08) περιέχει την κινητική θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους σε χωρική ανάλυση 90 m μόνο πάνω για χερσαίες περιοχές χρησιμοποιώντας τα πέντε θερμικά κανάλια του ASTER. Η θερμοκρασία εδάφους υπολογίζεται με χρήση του νόμου του Plank χρησιμοποιώντας το συντελεστή εκπομπής από το προϊόν Συντελεστή Εκπομπής (AST05) για την κλιμάκωση των μετρήσεων ακτινοβολίας μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση. Τα πέντε κανάλια στο θερμικό υπέρυθρο του ASTER δίνουν τη δυνατότητα εκτίμησης συντελεστή εκπομπής και θερμοκρασίας εδάφους με χρήση του αλγορίθμου TES, υπερτερώντας

άλλων αισθητήρων (όπως Landsat και AVHRR) λόγω φασματικής κάλυψης, χωρικής διακριτικής ικανότητας, καθώς και ραδιομετρικής ακρίβειας. Το προϊόν περιέχει τη θερμοκρασία εδάφους για χερσαίες περιοχές και έχει γίνει έλεγχος αξιοπιστίας σε αυτό. Η ακρίβεια του εξαρτάται από την ακρίβεια της ανερχόμενης ακτινοβολίας που με τη σειρά της εξαρτάται από τα ατμοσφαιρικά προφίλ που χρησιμοποιούνται για την ατμοσφαιρική διόρθωση. Σε ιδανικές συνθήκες, το σφάλμα που οφείλεται στην ατμοσφαιρική διόρθωση ισούται με το σφάλμα μέτρησης του αισθητήρα και σφάλματα που οφείλονται στην διαφορά μέγιστης ελάχιστης τιμής

(http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\_data/01\_Data\_Products/SurfaceTemperature.pdf).

# 3. Μεθοδολογια

Μια προσέγγιση Ανάλυσης Φασματικής Ανάμιξης (ΑΦΑ) χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των στοιχείων που αποτελούν το αστικό περιβάλλον. Τα κλάσματα κάλυψης γης υπολογίστηκαν για κάθε θεμελιώδες στοιχείο της επιφάνειας του εδάφους. Στη συνέχεια, με χρήση δεδομένων από την Φασματική Βιβλιοθήκη ASTER (Baldridge et al., 2009), δημιουργήθηκαν συναρτήσεις έντασης συντελεστή εκπομπής για κάθε στοιχείο. Οι συναρτήσεις αυτές συνδυάστηκαν με τα κλάσματα που υπολογίστηκαν για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής εδάφους. Στο Σχήμα 9 φαίνεται το σχεδιάγραμμα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε. Τον κύριο πυρήνα της μεθόδου αποτελεί η ταξινόμηση υπό του εικονοστοιχείου. Μια προ-επεξεργασία των εικόνων προηγείται της ταξινόμησης. Στη συνέχεια γίνεται ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης και της πληροφορίας που εξάγεται από την Φασματική Βιβλιοθήκη ASTER για την παραγωγή της χωρικής κατανομής του συντελεστή εκπομπής και τέλος, η εκτίμηση της ακρίβειας της μεθόδου γίνεται για τον συντελεστή εκπομπής, αλλά και για παραγόμενους χάρτες θερμοκρασίας εδάφους.

## 3.1 Περιοχή Μελέτης και Δορύφορικα Δεδομένα

Περιοχή μελέτης αποτελεί η ευρύτερη περιοχή του Ηρακλείου, η μεγαλύτερη σε έκταση και πληθυσμό πόλη στο νησί της Κρήτης. Η περιοχή μελέτης φαίνεται στην Εικόνα 3 και καλύπτει μια έκταση περίπου 360 km<sup>2</sup>. Το Ηράκλειο είναι μια από τις ραγδαία αναπτυσσόμενες αστικές περιοχές της Ελλάδας και παρουσιάζει μοτίβο συγκεχυμένων χρήσεων γης, όπως κατοικημένες, εμπορικές και βιομηχανικές περιοχές σε συνδυασμό με αγροτικές. Η περιοχή επιλέχθηκε κυρίως λόγω του πολύπλοκου αστικού και αγροτικού μοτίβου κάλυψης γης και επιπλέον βάση διαθεσιμότητας δορυφορικών εικόνων και προϊόντων.



Εικόνα 3. Περιοχή μελέτης αποτελεί η ευρύτερη περιοχή του Ηρακλείου, Κρήτης.



**Σχήμα 9.** Διάγραμμα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση συντελεστή εκπομπής από δορυφορικά δεδομένα με χρήση μεθόδου ανάλυσης φασματικής

ανάμιξης.



**Εικόνα 4.** Η περιοχή μελέτης όπως φαίνεται από το Google Earth όπου φαίνεται ο πυρήνας της πόλης και σημειώνονται το ενετικό τείχος, η βιομηχανική περιοχή και τα λατομεία.

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης όπως αυτή φαίνεται από το Google Earth. Ο πυρήνας της πόλης του Ηρακλείου είναι εμφανής. Στην Εικόνα 4 σημειώνονται τα ενετικά τείχη, η βιομηχανική περιοχή του Ηρακλείου, καθώς και δύο λατομεία, γιατί είναι περιοχές που αναμένεται να παρουσιάσουν υψηλό συντελεστή εκπομπής και λόγω των ιδιαίτερων σχημάτων τους μπορούν να διακριθούν εύκολα.

Μια εικόνα ASTER (προϊόν επιπέδου 1b), η λήψη της οποία έγινε στις 10 Ιουλίου 2006 (περίπου 9:10 UTC) χρησιμοποιήθηκε για σε αυτή τη μελέτη για την εξαγωγή του συντελεστή εκπομπής. Επίσης, προϊόντα υψηλού επιπέδου ASTER συντελεστή εκπομπής (AST05) και θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους (AST08) για την δεδομένη σκηνή ήταν διαθέσιμα (LPDAAC, 2010). Τα προϊόντα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της ακρίβειας της μεθόδου. Ένας ορθοφωτοχάρτης, παραγόμενος από δορυφορικά δεδομένα πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης Ikonos, για την ίδια χρονική περίοδο (καλοκαίρι 2006) ήταν επίσης διαθέσιμος από το Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ITE). Ο ορθοφωτοχάρτης χρησιμοποιήθηκε ως βοηθητικό μέσο στην διαδικασία επιλογής των ακροστοιχείων. Τέλος, ένα προϊόν επιπέδου 2 MODIS υετίσιμου νερού (LPDAAC, 2010) χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία υπολογισμού της θερμοκρασίας εδάφους (Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2003; 2010). Η εκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους απαιτεί ατμοσφαιρική διόρθωση των δεδομένων. Η ατμοσφαιρική διόρθωση όπως αυτή γίνεται στον αλγόριθμο υπολογισμού των Jiménez-Muñoz & Sobrino (2010) απαιτεί τη γνώση της χωρικής κατανομής του υετίσιμου νερού (ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα).

### 3.2 Προ-επεξεργασία Εικονών

Μια προ-επεξεργασία των διαθέσιμων δορυφορικών εικόνων κρίθηκε απαραίτητη, πριν την εφαρμογή της μεθόδου. Στην εικόνα ASTER εφαρμόστηκε **ορθοαναγωγή** για να είναι δυνατός ο συνδυασμός της με τα δεδομένα υψηλού επιπέδου ASTER (Chrysoulakis et al., 2010). Για την ορθοαναγωγή των δεδομένων ASTER ήταν απαραίτητο ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους το οποίο ήταν διαθέσιμο από το Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (Chrysoulakis et al., 2004).

Οι ψηφιακές τιμές της εικόνας για όλα τα κανάλια του ASTER μετατράπηκαν στην συνέχεια σε τιμές ακτινοβολίας. Οι τιμές ακτινοβολίας συνδέονται με τις ψηφιακές τιμές με μια γραμμική σχέση της μορφής

$$L_{sen} = a \cdot DN + b$$

όπου  $L_{sen}$  είναι η τιμή της ακτινοβολίας,

DN είναι η ψηφιακή τιμή και

a, b είναι οι ραδιομετρικοί συντελεστές.

Από τα μετα-δεδομένα της εικόνας έγινε εξαγωγή των ραδιομετρικών συντελεστών για κάθε κανάλι της. Αρχικά έγινε η βαθμονόμηση με χρήση των ραδιομετρικών αυτών συντελεστών και στη συνέχεια έγινε διόρθωση με χρήση ραδιομετρικών συντελεστών που δόθηκαν από την μέθοδο που περιγράφουν οι Tonooka et al. (2003) για τα θερμικά κανάλια. Ο λόγος είναι ότι οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση των θερμικάν καναλιών του ASTER τα οποία επεξεργαστήκαν πριν τις 8 Φεβρουαρίου 2006 παρουσιάζουν μεγάλα σφάλματα τα οποία οφείλονται στην καθυστερημένη ενημέρωση των ραδιομετρικών συντελεστών. Οι Tonooka et al. (2003) ανέπτυξαν μια μέθοδο υπολογισμού των ραδιομετρικών συντελεστών. Οι Tonooka et al. (2003) ανέπτυξαν μια μέθοδο υπολογισμού των ραδιομετρικών συντελεστών που μειώνει το σφάλμα αυτό. Μέσω της ιστοσελίδας <u>http://tonolab.cis.ibaraki.ac.jp/ASTER/RECAL/</u> και δεδομένης της λήψης παρέχονται οι σωστοί ραδιομετρικοί συντελεστές για την βαθμονόμηση των ψηφιακών τιμών καθώς και μια εκτίμηση του σφάλματος του εκάστοτε προϊόντος. Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι ραδιομετρικοί συντελεστές που δίνονται από τους Tonooka et al. (2003) για τη δεδομένη εικόνα και χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση των ψηφιακών τιμών των θερμικών καναλιών.

**Πίνακας 2.** Ραδιομετρικοί συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για την περεταίρω βαθμονόμηση των ψηφιακών τιμών των θερμικών καναλιών και οι αντίστοιχες εκτιμήσεις σφαλμάτων.

Κανάλι	α	b	@270K	@300K	@320K	@340K
10	1.004048	-0.0200	+0.000 +0.00K	+0.018 +0.10K	+0.035 +0.15K	+0.055 +0.20K
11	1.004960	-0.0258	+0.000 +0.00K	+0.022 +0.12K	+0.042 +0.19K	+0.066 +0.24K
12	1.006507	-0.0357	+0.000 +0.00K	+0.029 +0.16K	+0.054 +0.25K	+0.084 +0.33K
13	1.004617	-0.0271	+0.000 +0.00K	+0.018 +0.12K	+0.033 +0.19K	+0.050 +0.25K
14	1.005124	-0.0299	+0.000 +0.00K	+0.018 +0.13K	+0.033 +0.21K	+0.050 +0.28K

## Σφάλματα (πάνω: ακτινοβολία, κάτω: θερμοκρασία)

Στη συνέχεια, λόγο της διαφορετικής χωρικής ανάλυσης των διάφορων καναλιών του ASTER (Πίνακας 1) ήταν απαραίτητη η δειγματοληψία για τα κανάλια του μέσου υπέρυθρου (SWIR) ώστε η χωρική τους ανάλυση να «ταιριάζει» με αυτή των καναλιών του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου (VNIR). Η δειγματοληψία έγινε χρησιμοποιώντας την μέθοδο του εγγύτερου γείτονα. Η χωρική ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε είναι 15 m × 15 m και είναι αυτή των καναλιών του ορατού και διάφορων καναλιών του ορατού και εγγύς υπερύθρου (VNIR). Η χωρική κατανομή του συντελεστή εκπομπής θα έχει συνεπώς χωρική διακριτική ικανότητα 15 m × 15 m.

Επίσης, αν και η ατμοσφαιρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων είναι απαραίτητη γενικότερα κατά την εξαγωγή γεωφυσικών παραμέτρων, στην προκειμένη περίπτωση δεν χρειάζεται να γίνει. Όπως εξηγείται παρακάτω, χρησιμοποιούνται ακροστοιχεία από την εικόνα και στην περίπτωση αυτή η επίδραση της ατμόσφαιρας δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της AΦA (Song et al., 2001).

Τέλος, παρόλο που η υδάτινη μάζα αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο της εικόνας, αφού το Ηράκλειο είναι μια παραλιακή πόλη, η θαλάσσια μάζα χρήζει διαφορετικού χειρισμού από κάθε άλλο στοιχείο. Τα σκούρα εικονοστοιχεία είναι αρκετά εκφυλισμένα για να μοντελοποιηθούν με χρήση μεθόδου ΑΦΑ (Powell et al., 2007), λόγω του ότι μπορούν να μοντελοποιηθούν επιτυχώς με ένα μεγάλο κλάσμα σκιάς και ένα μικρό κλάσμα σχεδόν οποιουδήποτε υλικού. Μια μάσκα θαλάσσιων περιοχών που βασίζεται σε τεχνικές εξαγωγής στοιχείων, εφαρμόστηκε στην εικόνα με αποτέλεσμα, τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν σε θαλάσσιες περιοχές να εξαιρεθούν από περεταίρω ανάλυση. Η προσέγγιση που περιγράφεται από τους Lipakis et al., (2008) χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των θαλάσσιων περιοχών.



**Εικόνα 5.** Οι περιοχές εκπαίδευσης (αριστερά) και η αποτύπωση της θαλάσσιας μάζας (δεξιά) με χρήση μεθόδου εξαγωγής χαρακτηριστικών.

Ο διαχωρισμός των χερσαίων και των θαλάσσιων έγινε με τη χρήση μιας μεθόδου βασισμένης σε αλγορίθμους μάθησης που παρέχει τη δυνατότητα εκμετάλλευσης και της χωρικής πληροφορίας των εικόνων πέραν της φασματικής που χρησιμοποιούν οι παραδοσιακοί ταξινομητές. Το λογισμικό Feature Analyst for ERDAS Imagine (VLS, 2007) ενσωματώνει τέτοιους αλγορίθμους μάθησης και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για το διαχωρισμό των υδάτινων από τις χερσαίες περιοχές. Όπως συνηθίζεται με τους αλγορίθμους μάθησης, κάποιες περιοχές επιλέγονται από τον χρήστη και χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τον αλγόριθμο ως δεδομένα εκπαίδευσης. Στην Εικόνα 5 φαίνονται οι περιοχές που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εκπαίδευσης (αριστερά) και το τελικό αποτέλεσμα αποτύπωσης της υδάτινης μάζας (δεξιά) το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ως μάσκα απομόνωσης της θαλάσσιας περιοχής.

### 3.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΥΠΟ ΤΟΥ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

#### 3.3.1 Γραμμική Αναλύση Φασματικής Αναμιέης

Η γραμμική προσέγγιση Ανάλυσης Φασματικής Ανάμιξης (Adams et al. 1995) χρησιμοποιήθηκε για την ταξινόμηση σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου και τον σωστό χειρισμό των μικτών εικονοστοιχείων. Στην ΑΦΑ γίνεται η υπόθεση πως η υπό μελέτη αστική περιοχή αποτελείται από μερικά θεμελιώδη στοιχεία, που ονομάζονται ακροστοιχεία (endmembers). Η γραμμική προσέγγιση της ΑΦΑ είναι μια μέθοδος που βασίζεται στις αρχές της φυσικής και υποθέτει ότι το φάσμα που μετριέται από έναν αισθητήρα είναι γραμμικός συνδυασμός του συνόλου των φασμάτων κάθε εικονοστοιχείου. Η τιμή της ακτινοβολίας  $R_i$  σε κάθε κανάλι *i* για κάθε εικονοστοιχείο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως:

$$R_i = \sum_{k=1}^n f_k R_{ik} + ER_i \tag{1}$$

όπου nείναι ο αριθμός των ακροστοιχείων ,

- $f_{\ k}$ είναι το κλάσμα του ακροστοιχείου  $\ k$  στο εικονοστοιχείο,
- $R_{\scriptscriptstyle ik}$ είναι η τιμή της ακτινοβολίας του ακροστοιχείου k στο κανάλι i και
- $ER_i$  είναι το σφάλμα για το κανάλι i.

Τα κλάσματα κάλυψης γης για κάθε εικονοστοιχείο πρέπει να αθροίζουν στη μονάδα και κάθε κλάσμα πρέπει να είναι μεγαλύτερο του μηδενός:

$$\sum_{k=1}^{n} f_k = 1 \quad \text{kal} \quad f_k \ge 0 \quad \text{yla} \quad k = 1, \dots, n \tag{2}$$

Ο υπολογισμός των κλασμάτων κάλυψης γης για κάθε στοιχείο του αστικού περιβάλλοντος γίνεται με τη λύση της εξίσωσης (1) για κάθε εικονοστοιχείο λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς (2). Η μέθοδος που συνήθως χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά και η μέθοδος των απόλυτων διαφορών (Dielman, 2005) για την λύση της εξίσωσης (1) για κάθε εικονοστοιχείο. Η μέθοδος αυτή δεν έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για παρόμοια εφαρμογή και έτσι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιήθηκε επίσης για να γίνει σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων.

#### 3.3.2 Επιλογή των Ακροστοιχείων

Το πιο σημαντικό βήμα στην ΑΦΑ είναι η επιλογή των ακροστοιχείων. Η υψηλή ποιότητα των κλασμάτων κάλυψης γης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των κατάλληλων ογογογολογία

ακροστοιχείων. Επί πρόσθετα, στην περίπτωση την εκτίμησης του συντελεστή εκπομπής, κατά τη διαδικασία επιλογής ακροστοιχείων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η συμφωνία τους με αντιπροσωπευτικέ τιμές συντελεστή εκπομπής που θεωρούνται ως τιμές αναφοράς. Μια πληθώρα από μεθόδους έχουν χρησιμοποιηθεί στον παρελθόν για την εξαγωγή των ακροστοιχείων, όπως μέθοδοι που βασίζονται σε φασματικές βιβλιοθήκες ή μετρήσεις πεδίου (Powell et al., 2007), μέθοδοι που χρησιμοποιούν ακροστοιχεία που εξάγονται από την ίδια την εικόνα (Boardman, 1995; Weng et al., 2009) ή ακόμα και ο συνδυασμός των δυο (Smith et al., 1990; Roberts et al., 1993).

Σε αυτή την εργασία η κάλυψη γης μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια παραλλαγή του μοντέλου VIS του Ridd (1995). Ο Ridd (1995) μοντελοποίησε την αστική επιφάνεια χρησιμοποιώντας τρία θεμελιώδη στοιχεία της: βλάστηση (Vegetation), μη διαπερατές επιφάνειες (Impervious) και έδαφος (Soil).

Η συνιστώσα V της βλάστησης, όπως αυτή ορίζεται στο μοντέλο VIS και χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία αναφέρεται στην πράσινη βλάστηση. Η συνιστώσα Ι των μη διαπερατών επιφανειών όταν τη σχετίζουμε με το αστικό περιβάλλον αναφέρεται κυρίως σε τεχνητές επιφάνειες. Τα τεχνητά υλικά ποικίλουν πολύ σε φασματική απόκριση. Για το λόγο αυτό ήταν απαραίτητος ο επιπλέον διαχωρισμός της συνιστώσας Ι. Δυο επιπλέον συνιστώσες χρησιμοποιήθηκαν για την απόδοση των μη διαπερατών επιφανειών: υψηλής λευκαύγειας (High-Albedo Impervious - HAI) και χαμηλής λευκαύγειας (Low-Albedo Impervious - LAI) (Lu & Weng, 2006). Ανοιχτόχρωμες (στο ορατό φάσμα) επιφάνειες περιλαμβάνονται στην HAI συνιστώσα ενώ σκούρες επιφάνειες περιλαμβάνονται στην LAI συνιστώσα.

Ακολουθώντας την προσέγγιση ΑΦΑ, σε κάθε συνιστώσα του αστικού περιβάλλοντος που ορίστηκε παραπάνω αντιστοιχίζεται ένα ακροστοιχείο. Τα ακροστοιχεία μπορούν να χαρακτηριστούν ως ακρότατα του πολυδιάστατου φασματικού χώρου μιας εικόνας. Ο δείκτης PPI (Pixel Purity Index) (Boardman et al., 1995) χρησιμοποιήθηκε αρχικά για να αναγνωριστούν τα φασματικά «αμιγή» εικονοστοιχεία. Ο PPI υπολογίζεται προβάλλοντας επανειλημμένως ν-διάστατα διαγράμματα διασποράς σε ένα τυχαίο μοναδιαίο διάνυσμα. Τα ακραία εικονοστοιχεία σε κάθε προβολή καταγράφονται και ο συνολικός αριθμός που κάθε εικονοστοιχείου αντιστοιχεί στο πόσες φορές το εικονοστοιχείο χαρακτηρίστηκε ακρότατο στο ν-διάστατα χώρο. Ο αλγόριθμος υπολογισμού του PPI δεν εφαρμόστηκε απευθείας στην εικόνα, αλλά στο μετασχηματισμό Minimum Noise Fraction (MNF) των δεδομένων ακτινοβολίας. Ο μετασχηματισμός MNF νέες συνιστώσες καναλιών στηριζόμενος στην αναλογία σήματος προς θόρυβο (Green et al., 1988).

Στη συνέχεια τα εικονοστοιχεία που χαρακτηριστήκαν ως ακραία με χρήση του PPI ταξινομήθηκαν με χρήση του αλγόριθμου κ-μέσων τιμών (ENVI, 2000) σε τέσσερις κλάσεις, μια για κάθε συνιστώσα της αστικής επιφάνειας. Διαγράμματα διασποράς των ταξινομημένων πλέον «ακραίων» εικονοστοιχείων δημιουργήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό ενός συνόλου πιθανών ακροστοιχείων.

Στη συνέχεια τα πιθανά ακροστοιχεία εξετάστηκαν με χρήση ως εικόνα αναφοράς τον υψηλότερης χωρικής ανάλυσης ορθοφωτοχάρτη Ikonos. Τα κριτήρια για να χαρακτηριστεί ένα εικονοστοιχείο ως ακροστοιχείο ήταν να είναι αντιπροσωπευτικό της κλάσης του και επίσης να είναι όσο το δυνατόν πιο ακραίο στο ν-διάστατο πολυφασματικό χώρο, δηλαδή να έχει όσο το δυνατόν υψηλότερη τιμή PPI.

## 3.4 Εκτιμήση του Σύντελέστη Εκπομπής

Έχοντας τα κλάσματα κάλυψης γης, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του συντελεστή εκπομπής επιφάνειας εδάφους. Για κάθε εικονοστοιχείο ο συντελεστής εκπομπής υπολογίζεται από τα κλάσματα κάλυψης γης και αντιπροσωπευτικές τιμές συντελεστή εκπομπής για κάθε συνιστώσα της αστικής επιφάνειας. Οι αντιπροσωπευτικές αυτές τιμές μπορούν να εκτιμηθούν με δεδομένα από φασματικές βιβλιοθήκες. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η φασματική βιβλιοθήκη ASTER (Baldridge et al., 2009).

Για κάθε εικονοστοιχείο λοιπόν, ο συντελεστής εκπομπής  $\mathcal{E}$ , υπολογίζεται συνδυάζοντας το κλάσμα κάλυψης γης  $f_k$  για κάθε συνιστώσα k με την αντιπροσωπευτική τιμή συντελεστή  $\mathcal{E}_k$  της συνιστώσας αυτής μέσω της γραμμικής σχέσης:

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^{n} \varepsilon_k \cdot f_k$$

Για τον ορισμό των αντιπροσωπευτικών τιμών συντελεστή εκπομπής για κάθε συνιστώσα χρησιμοποιήθηκε η φασματική βιβλιοθήκη ASTER (Baldridge et al., 2009). Η φασματική βιβλιοθήκη ASTER περιέχει πληροφορία για φάσματα τόσο φυσικών όσο και τεχνητών υλικών. Φασματική πληροφορία για 4 τύπου βλάστησης, 52 τύπους γήινου εδάφους (Πίνακας 3) και 56 τύπου τεχνητών υλικών (Πίνακας 4) περιλαμβάνεται στην φασματική βιβλιοθήκη ASTER. Η φασματική βιβλιοθήκη ASTER παρέχει την φασματική κατανομή της ανακλαστικότητας  $\rho_{\lambda}$  για όλα τα φασματικά κανάλια του αισθητήρα ASTER. Υποθέτοντας Λαμπερτιανή επιφάνεια στην φασματική περιοχή του θερμικού υπερύθρου, ο συντελεστής εκπομπής  $\varepsilon_i$  μπορεί να υπολογιστεί ως

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda}$$

όπου λ το φασματικό κανάλι. Για την αποφυγή της ολοκλήρωσης της συνάρτησης φασματικής απόκρισης, χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση του ενεργού μήκους κύματος. (Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2010).

Οι τέσσερις τύποι βλάστησης που περιλαμβάνονται στην φασματική βιβλιοθήκη ASTER είναι:

- στεγνό γρασίδι (ε = 0.9051)
- πράσινο γρασίδι (ε = 0.9807)
- κωνοφόρα δέντρα (ε = 0.9888)
- φυλλοβόλα δέντρα (ε = 0.9737)

Η συνιστώσα της βλάστησης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, παριστάνει την πράσινη βλάστηση και έτσι οι τύποι πράσινο γρασίδι και κωνοφόρα δέντρα θεωρούνται αντιπροσωπευτικοί. Η μέση τιμή τους 0.985 αντιστοιχίζεται ως αντιπροσωπευτική τιμή συντελεστή εκπομπής για τη συνιστώσα της βλάστησης (V).

Στην περίπτωση των τύπων εδαφών και κυρίως των τύπων τεχνητών υλικών, λόγω ποικιλίας τιμών, μια καθολική αντιπροσωπευτική τιμή συντελεστή εκπομπής δεν μπορεί να δοθεί. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνεται επιλογή των τύπων εδαφών που υπάρχουν στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, καθώς επίσης και των τεχνητών υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτή. Στους Πίνακες 3 και 4 φαίνονται οι τύποι εδαφών και τεχνητών υλικών που υπάρχουν στην φασματική βιβλιοθήκη ASTER και οι τιμές συντελεστή εκπομπής στο φασματικό κανάλι των 10.25 - 10.95 μm (Κανάλι 13 του ASTER). Επίσης στο Σχήμα 10 φαίνεται το διάγραμμα συντελεστή εκπομπής στο φασματικό κανάλι 10.25 - 10.95 μm (Κανάλι 13 του ASTER) α) των τύπων εδαφών και β) των τύπων τεχνητών υλικών που υπάρχουν στην Φασματική Βιβλιοθήκη ASTER. Αν και ο συντελεστής εκπομπής των διάφορων τύπων εδαφών που υπάρχουν στην φασματική βιβλιοθήκη, κυμαίνονται γύρω από τη μέση τιμή τους, δεν συμβαίνει το ίδιο και για τα τεχνητά υλικά, στο οποία παρατηρούνται και κάποιες ακραίες τιμές, όπως για παράδειγμα αλουμίνια, μέταλλα και μεταλλικά χρώματα.



**Σχήμα 10.** Συντελεστής εκπομπής στο φασματικό κανάλι 10.25 - 10.95 μm (Κανάλι 13 του ASTER) α) των τύπων εδαφών και β) των τύπων τεχνητών υλικών που υπάρχουν στην Φασματική Βιβλιοθήκη ASTER.

**Πίνακας 3.** Τύποι γήινων εδαφών που υπάρχουν στην Φασματική Βιβλιοθήκη του ASTER και οι τιμές συντελεστή εκπομπής στο φασματικό κανάλι των 10.25 - 10.95 μm (Κανάλι 13 του ASTER).

Τύποι γήιν	Συντελεστής	
του ASTER	Εκπομπής	
Alfisol	1. Pale brown silty loam	0.9747
	2. Brown to dark brown gravelly loam	0.9738
	3. Brown loamy fine sand	0.9619
	4. Brown fine sandy loam	0.9658
	5. Brown fine sandy loam	0.9650
	6. Reddish brown fine sandy loam	0.9633
	7. Reddish brown fine sandy loam	0.9682
	8. Brown sandy loam	0.9684
	9. Dark reddish brown fine sandy loam	0.9645
	10. Light yellowish brown interior dry gravelly loam	0.9712
Aridisol	11. Light yellowish brown loam	0.9770
	12. Brown silty loam	0.9682
	13. Light yellowish brown loamy sand	0.9578
	14. Very pale brown to brownish yellow interior dry gravelly silt loam	0.9729
	15. Brown gravelly sandy loam	0.9582
	16. Dark brown interior moist clay loam	0.9681
	17. Light yellowish brown clay	0.9781
	18. Dark yellowish brown silty clay	0.9800
	19. Very dark gravish brown loamy sand	0.9629
	42. Red-orange sandy soil.	0.9671
	43. Red-orange sandy soil	0.9749
	44. Grev calcareous silty soil	0.9633
	45. Grev calcareous silty soil	0.9696
Entisol	20. Brown to dark brown sand	0.9623
	21. White gypsum dune sand.	0.9747
	22. Brown to dark brown silt loam	0.9716
	46. Alluvial sand	0.9538
	47. Fluvial deposit	0.9710
	48. Red-orange sandy loam/alluvium	0.9715
	49. Sandy Loam/alluvium	0.9714
	50. Red-orange sandy loam	0.9759
	51. Red-orange sandy loam	0.9677
	52. Red-orange sandy loam	0.9723
Inceptisol	23. Grav/dark brown extremely stoney coarse sandy	0.9641
	24. Dark vellowish brown micaceous loam	0.9682
	25. Dark brown fine sandy loam	0.9705
	26. Brown sandy loam	0.9610
	27. Very dark gravish brown silty loam	0.9656
	28. Pale brown dry silty clay loam	0.9769
	29. Brown to dark brown gravelly fine sandy loam	0.9758
Mollisol	30. Dark gravish brown silty loam	0.9754
	31. Vary dark gravish brown loam	0.9709
	32. Very dark gravish brown silty loam	0.9724
	33. Black loam	0 9740
	34 Very dark gravish brown loam	0.9716
	35. Grav silty clav	0.9782
	36. Brown to dark brown sandy loam	0.9683
	37. Gravish brown loam	0.9724
	38. Very dark gravish brown loam	0.9706
Spodosol	39. Dark reddish brown, organic-rich silty loam	0.9706
Utisol	40. Brown to dark brown loamy sand	0.9594
Vertisol	41. Brown to dark brown clay	0.9718

**Πίνακας 4.** Τύποι τεχνητών υλικών που υπάρχουν στην Φασματική Βιβλιοθήκη του ASTER και οι τιμές συντελεστή εκπομπής στο φασματικό κανάλι των 10.25 - 10.95 μm (Κανάλι 13 του ASTER).

Τύποι τεχνητών υλικών που υπάρχουν στην Φασματική Συντελεστής				
Βιβλιοθήκη του ASTE	R	Εκπομπής		
Road Asphalts and Tar	1. Construction Asphalt	0.9660		
	2. Construction Asphalt	0.9655		
	3. Construction Asphalt	0.9567		
	4. Construction Tar	0.9580		
	5. Construction Tar	0.9314		
Concretes	6. Construction Concrete	0.9484		
	7. Construction Concrete	0.9756		
	8. Construction Concrete	0.9233		
	9. Construction Concrete	0.9578		
	10. Asphaltic concrete	0.9534		
General Construction	11. Red smooth-faced Brick	0.9318		
Materials	12. Weathered Red Brick	0.9691		
	13. Bare Red Brick	0.9672		
	14. Construction Concrete	0.9590		
	15. Cinders, ashen	0.9122		
	16. Plate Window Glass	0.8183		
	17. White Marble	0.9409		
	18. Olive green gloss paint	0.8761		
	19. Olive green gloss paint	0.9260		
	20. Black gloss paint	0.9215		
	21. Black gloss paint	0.9396		
	22. Black gloss paint	0.9467		
	23. Black paint	0.9460		
	24. Olive green paint	0.9451		
	25. Olive green paint	0.9459		
	26. Pine Wood	0.9168		
	27. Pine Wood	0.9265		
	46. Metallic Silver Paint	0.4136		
	47. Gloss Black Paint	0.9239		
	48. Flat Black Paint	0.9165		
	49. Glossy Black Paint	0.9483		
	50. Ultra Flat Black Paint	0.9524		
	51. Flat Black Paint	0.9204		
	52. Black Nextel Paint	0.9700		
	53. Flat Black Paint	0.9455		
	54. Lamp (Ebony) Black Paint	0.9209		
	55. Glossy Black Paint	0.8764		
	56. Flat Black Paint	0.8618		
Roofing Materials	28. Aluminum Metal	0.0486		
	29. Galvanized Steel Metal	0.9564		
	30. Galvanized Steel Metal	0.6151		
	31. Oxidized Galvanized Steel Metal	0.8017		
	32. Copper Metal	0.9576		
	33. Copper Metal	0.0142		
	34. Copper Metal	0.9876		
	35. Black tar paper	0.9740		
	36. Black tar paper	0.9470		
	37. white rubberized coating	0.9688		
	38. Black unspecified rubber	0.9184		
	39. White fiberglass unspecified rubber	0.9593		
	40. Asphalt Shingle	0.9618		
	41. Asphalt rooting shingle	0.9536		
	42. Reddish Asphalt roofing shingle	0.9547		
	43. Slate stone Shingle	0.8820		
	44. Reddish asphalt Shingle	0.9570		
	45. Terra cotta Tiles	0.9651		

ωγογογία

#### 3.5 Εκτιμήση της Ακριβείας της Μεθοδού

Η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου εκτιμήθηκε συγκρίνοντας τον εκτιμώμενο χάρτη συντελεστή εκπομπής με το υψηλού επιπέδου προϊόν ASTER (AST05) το οποίο υπολογίζεται με χρήση του αλγορίθμου TES (Gillespie et al. 1998). Επιπλέον, έγινε σύγκριση του εκτιμώμενου χάρτη συντελεστή εκπομπής με χάρτη παραγόμενου με χρήση του αλγορίθμου NDVI (Jiménez-Muñoz et al., 2006) ο οποίος έχει αναπτυχθεί για χρήση κυρίως σε αγροτικές περιοχές. Τα δεδομένα υψηλού επιπέδου ΑSTER είναι χωρικής ανάλυσης 90 m × 90 m και συνεπώς ο εκτιμώμενος χάρτης συντελεστή εκπομπής μετατράπηκε από 15 m × 15 m σε 90 m × 90 m, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του χωρικού μέσου.

Η διασπορά των σφαλμάτων μελετήθηκε καθώς και υπολογίστηκαν και μέτρα σφάλματος για να γίνει αποτίμηση της ακρίβειας της μεθόδου (Hyndman & Koehler, 2006). Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Square Error – MSE), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error – RMSE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error – MAE) καθώς και το απόλυτο σφάλμα διαμέσου (Median Absolute Error – MdAE) υπολογίστηκαν για όλες τις περιπτώσεις:

$$MSE = mean(e_i^2)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

$$MAE = mean(|e_i|)$$

$$MdAE = median(|e_i|)$$
(3)

όπου  $e_i$  είναι η διαφορά μεταξύ εκτιμώμενων και τιμών αναφοράς.

Επιπλέον, δημιουργήθηκαν χάρτες θερμοκρασίας εδάφους (Land Surface Temperature – LST) χρησιμοποιώντας την προσέγγιση των Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) προσαρμοσμένη στο κανάλι 13 του ASTER (Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2010) και χρησιμοποιώντας τους παραπάνω χάρτες συντελεστή εκπομπής, για να εξεταστεί η επίδραση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής στον υπολογισμό της θερμοκρασίας εδάφους (LST).

Για τον υπολογισμό του LST σύμφωνα με την προσέγγιση των Jiménez-Muñoz & Sobrino, (2010) αρχικά γίνεται μετατροπή των τιμών ακτινοβολίας σε θερμοκρασία λαμπρότητας στον αισθητήρα  $T_{sen}$  σύμφωνα με την εξίσωση:

$$T_{sen} = \frac{C_2}{\lambda_c \cdot \ln\left(\frac{C_1}{\lambda_c^5 \pi L_{sen}} + 1\right)}$$

όπου  $\lambda_c$  είναι το ενεργό μήκος κύματος (  $\lambda = 10.66 \mu m$  )

 $L_{\rm sen}$  είναι η ακτινοβολία στον αισθητήρα

 $C_1$  και  $C_2$  είναι οι σταθερές της ακτινοβολίας

Η θερμοκρασία εδάφους (LST) στη συνέχεια υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$LST = \gamma \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 \cdot L_{sen} + \psi_2) + \psi_3\right) + \delta$$

όπου ε είναι ο συντελεστής εκπομπής

 $\gamma$  και  $\delta$  είναι οι δύο παράμετροι που εξαρτώνται από την συνάρτηση του Plank:

$$\gamma \approx \frac{1}{\frac{C_2 \cdot L_{sen}}{T_{sen}^2} \cdot \left(\frac{\lambda_c^4 \cdot L_{sen}}{C_1} + \frac{1}{\lambda_c}\right)} = \frac{T_{sen}^2 C_1 \lambda_c}{L_{sen} C_2 \left(\lambda_c^5 L_{sen} + C_1\right)}$$

 $\delta = -\gamma \cdot L_{sen} + T_{sen}$  και

 $\psi_1$ ,  $\psi_2$  και  $\psi_3$  μπορούν να θεωρηθούν ατμοσφαιρικές συναρτήσεις και να δοθούν από δευτέρου βαθμού πολυώνυμα του υετίσιμου νερού (*W*):

$\left[ \psi_{1} \right]$	$C_{11}$	$C_{12}$	$c_{13}$	$\left[ w^2 \right]$
$ \psi_2  =$	<i>c</i> <sub>21</sub>	$c_{22}$	<i>c</i> <sub>23</sub>	w
$\left[ \psi_{3} \right]$	$c_{31}$	<i>c</i> <sub>32</sub>	<i>c</i> <sub>33</sub>	

Οι τιμές  $c_{i,j}$  (i, j = 1, 2, 3) δίνονται για το κανάλι 13 του ASTER από τους Jimenez-Munoz et al., 2010:

$$C = \begin{bmatrix} 0.06524 & -0.05878 & 1.06576 \\ -0.55835 & -0.75881 & 0.00327 \\ -0.00284 & 1.35633 & -0.43020 \end{bmatrix}$$

Οι παραγόμενοι χάρτες LST συγκρίθηκαν επίσης και με το προϊόν υψηλού επιπέδου ASTER (AST08). Οι κατανομές του σφάλματος εξετάστηκαν και στην περίπτωση του LST, καθώς και έγινε υπολογισμός των προαναφερθέντων μέτρων σφαλμάτων (3).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα κλάσματα κάλυψης γης εκτιμήθηκαν επίσης και με την κλασσική προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων. Οι αντίστοιχοι χάρτες συντελεστή εκπομπής και θερμοκρασίας εδάφους υπολογίστηκαν για να γίνει σύγκρισή τους με αυτούς που προέκυψαν από την μέθοδο των απόλυτων διαφορών.

# 4. Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω μεθόδου για την περιοχή μελέτης και για τα δεδομένα ASTER που ήταν διαθέσιμα. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου μέσω της Ανάλυσης Φασματικής Ανάμιξης και στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα εκτίμησης του συντελεστή εκπομπής και παρουσιάζονται και αναλύονται τα σφάλματα που υπολογίστηκαν.

## 4.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΥΠΟ ΤΟΥ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Το πιο σημαντικό βήμα για την ακριβή εκτίμηση των κλασμάτων κάλυψης γης με χρήση της Ανάλυσης Φασματικής Ανάμιξης είναι η επιλογή των ακροστοιχείων. Με χρήση του δείκτη PPI, το 3.52% του συνολικού αριθμού των εικονοστοιχείων χαρακτηριστήκαν φασματικά αμιγή.



Εικόνα 6. Ταξινομημένα με χρήση του αλγορίθμου κ-μέσων τιμών «αμιγή» εικονοστοιχεία, όπως αυτά υπολογιστήκαν με χρήση του δείκτη PPI. Το πράσινο αντιστοιχεί στη συνιστώσα της βλάστησης (V), το κυανό στη συνιστώσα των υψηλής λευκαύγειας μη-διαπερατών επιφανειών (HAI), το κίτρινο στη συνιστώσα των υψηλής λευκαύγειας μη-διαπερατών (LAI) και το κόκκινο στη συνιστώσα του εδάφους.

Μετά την ταξινόμηση με χρήση του αλγορίθμου κ-μέσων, οι κλάσεις που αντιστοιχούν στις συνιστώσες V, HAI, LAI και S είχαν 19194, 5784, 12870 και 18607 εικονοστοιχεία αντίστοιχα. Τα

εικονοστοιχεία που βρίσκονται στην ακτογραμμή, αν και από τον αλγόριθμο PPI θεωρούνται ως αμιγή, δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν ακροστοιχεία.

Μετά από προσεκτική οπτική εξέταση των αμιγών εικονοστοιχείων, επιλέχτηκαν αντιπροσωπευτικά για τις κλάσεις τους εικονοστοιχεία ως ακροστοιχεία. Για να γίνει επιλογή ενός εικονοστοιχείου ως ακροστοιχείο, αυτό θα έπρεπε να παρουσιάζεται ως ακραίο στα διαγράμματα διασποράς και επίσης να έχει τιμή PPI μεγαλύτερη του 1500. Κατά τη διάρκεια υπολογισμού του PPI, ο αριθμός των εικονοστοιχείων που χαρακτηρίζονται ως αμιγή σταματά να αυξάνεται (ή αυξάνεται ελάχιστα). Η τιμή αυτή PPI μπορεί να θεωρηθεί ως κατώφλι για να θεωρηθεί ένα εικονοστοιχείο αμιγές.

Τα εικονοστοιχεία που τελικά επιλέχτηκαν ως ακροστοιχεία για κάθε συνιστώσα της αστικής κάλυψης φαίνονται στην Εικόνα 7 και η φασματική τους υπογραφή φαίνεται στο Σχήμα 10.



Φασματικά Κανάλια ASTER

**Σχήμα 11.** Φασματική υπογραφή των εικονοστοιχείων που επιλέχτηκαν ως endmembers. Το πράσινο αντιστοιχεί στη συνιστώσα της βλάστησης (V), το κυανό στη συνιστώσα των υψηλής λευκαύγειας μηδιαπερατών επιφανειών (HAI), το κίτρινο στη συνιστώσα των υψηλής λευκαύγειας μη-διαπερατών επιφανειών (LAI) και το κόκκινο στη συνιστώσα του εδάφους.



α) V – βλάστηση



β) ΗΑΙ – υψηλής λευκαύγειας μη διαπερατών επιφανειών



γ) LAI – χαμηλής λευκαύγειας μη διαπερατών επιφανειών



δ) S – εδάφους

**Εικόνα 7. Ε**ικονοστοιχεία που επιλέχτηκαν ως ακροστοιχεία για την Ανάλυση Φασματικής Ανάμιξης για τις συνιστώσες α) V – βλάστηση β) ΗΑΙ – υψηλής λευκαύγειας μη διαπερατών επιφανειών γ) LAΙ – χαμηλής λευκαύγειας μη διαπερατών επιφανειών δ) S – εδάφους. Στα αριστερά σημειώνεται το εκάστοτε εικονοστοιχείο στην ψευδόχρωμη αποτύπωση της εικόνας ASTER και δεξιά η αντίστοιχη περιοχή όπως φαίνεται στον ορθοφωτοχάρτη Ikonos. Τα κλάσματα κάλυψης γης που υπολογίστηκαν λύνοντας το σύστημα εξισώσεων (1) - (2) με χρήση της μεθόδου των απόλυτων διαφορών φαίνονται στην Εικόνα 8. Η τιμή ενός εικονοστοιχείου στην εικόνα-κλάσμα αναπαριστά την χωρική αναλογία της εκάστοτε συνιστώσας μέσα στο εικονοστοιχείο αυτό και παίρνει τιμές από 0 (μαύρο) έως 1 (άσπρο). Για παράδειγμα, ένα εικονοστοιχείο με τιμές: V:0.5, HAI:0.0, LAI:0.2, S:0.3, αντιστοιχεί σε 50% βλάστηση, 20% μη διαπερατή επιφάνεια χαμηλής λευκαύγειας και 30% έδαφος. Η θαλάσσια περιοχή έχει εξαιρεθεί από τους υπολογισμούς και για αυτό σε όλες τις εικόνες εμφανίζεται με μαύρο χρώμα (τιμή 0).

Στην εικόνα-κλάσμα της συνιστώσας V της βλάστησης (Εικόνα 8α) οι αγροτικές περιοχές στα κεντρικά και νότια της εικόνας εμφανίζονται με ανοιχτές αποχρώσεις του γκρι όπως ήταν αναμενόμενο. Το Ηράκλειο είναι μια πόλη με ελάχιστη αστική βλάστηση και αυτό αποτυπώνεται στην εικόνα-κλάσμα της αντίστοιχης συνιστώσας. Διακρίνεται ο δημοτικός κήπος του Ηρακλείου και γενικότερα η περιοχή γύρω από τα ενετικά τείχη της πόλης, περιοχές στης οποίες υπάρχει αρκετή αστική βλάστηση μέσα στην πόλη.

Η εικόνα-κλάσμα της συνιστώσας ΗΑΙ υψηλής λευκαύγειας μη διαπερατών επιφανειών (Εικόνα 8β) είναι η σκοτεινότερη από τις τέσσερις και έχει γενικότερα χαμηλές τιμές όπως είναι αναμενόμενο. Παρόλα αυτά αποτυπώνει τις αστικές περιοχές και κυρίως κτίσματα που είναι είτε κατοικίες, είτε εμπορικά κτίρια. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι μεγαλύτερες τιμές σε αυτό το κλάσμα συναντώνται στην βιομηχανική περιοχή του Ηρακλείου, ανατολικά της πόλης, καθώς επίσης και στα λατομεία που περιλαμβάνονται στην περιοχή μελέτης.

Από το ακροστοιχείο που αντιστοιχεί στη συνιστώσα LAI χαμηλής λευκαύγειας μη διαπερατών επιφανειών αποτυπώθηκαν οι σκουρόχρωμες επιφάνειες στο ορατό φάσμα. Δρόμοι και υγρό έδαφος είναι τα κύρια χαρακτηριστικά που αποτυπώθηκαν στην εικόνα-κλάσμα που αντιστοιχεί στη συνιστώσα LAI (Εικόνα 8γ), όπως και περιοχές τις εικόνας όπου υπήρχαν σκιές ή υγρασία στο έδαφος.

Τέλος, αν και ήταν πολύ δύσκολο να βρεθεί ένα εικονοστοιχείο (χωρικής ανάλυσης 15 m × 15 m) που να αποτελείται από έδαφος και μόνο στην περιοχή μελέτης, η εικόνα-κλάσμα που αντιστοιχεί στη συνιστώσα S του εδάφους (Εικόνα 8δ) αποκαλύπτει ένα ποσοστό εδάφους στα περισσότερα εικονοστοιχεία. Οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται σε μη διαπερατές επιφάνειες, όπως πολύ έντονα φαίνεται στο οδικό δίκτυο.



**Εικόνα 8.** Το κλάσμα κάλυψης γης που αντιστοιχεί : α) στη συνιστώσα της βλάστησης (V), β) στη συνιστώσα των υψηλής λευκαύγειας μη-διαπερατών επιφανειών (HAI), γ) στη συνιστώσα των υψηλής λευκαύγειας μηδιαπερατών επιφανειών (LAI) και δ) στη συνιστώσα του εδάφους, όπως υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των απόλυτων διαφορών. Το άσπρο χρώμα αντιστοιχεί στην τιμή 1 και το μαύρο σε μηδέν. Η θάλασσα έχει εξαιρεθεί από κάθε υπολογισμό και για αυτό εμφανίζεται πάντα με μαύρο.

Επιπρόσθετα, τα κλάσματα κάλυψης γης που υπολογίστηκαν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων παρουσιάζονται στην Εικόνα 9. Οι δύο προσεγγίσεις δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, όπως είναι αναμενόμενο.



Εικόνα 9. Το κλάσμα κάλυψης γης που αντιστοιχεί : α) στη συνιστώσα της βλάστησης (V), β) στη συνιστώσα των υψηλής λευκαύγειας μη-διαπερατών επιφανειών (HAI), γ) στη συνιστώσα των υψηλής λευκαύγειας μηδιαπερατών επιφανειών (LAI) και δ) στη συνιστώσα του εδάφους, όπως υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Το άσπρο χρώμα αντιστοιχεί στην τιμή 1 και το μαύρο σε μηδέν. Η θάλασσα έχει εξαιρεθεί από κάθε υπολογισμό και για αυτό εμφανίζεται πάντα με μαύρο.



Εικόνα 10. Χωρική κατανομή σφαλμάτων υπολογισμού κλασμάτων κάλυψης γης όπως αυτά υπολογίστηκαν α)με χρήση της μεθόδου απολύτων διαφορών και β) με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Η περιοχή που αντιστοιχεί στη θάλασσα έχει εξαιρεθεί από τους υπολογισμούς και για αυτό εμφανίζεται με μαύρο χρώμα.

## 4.2 Χαρτής Εκτιμωμένου Σύντελέςτη Εκπομπής

Για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής επιφάνειας εδάφους, ακολουθώντας την προτεινόμενη μέθοδο, αντιπροσωπευτικές τιμές συντελεστή εκπομπής πρέπει να αντιστοιχιστούν σε κάθε μια συνιστώσα της αστικής επιφάνειας. Στην περίπτωση της συνιστώσας της βλάστησης (V) χρησιμοποιείται η καθολική τιμή 0.985 που αναφέρεται στην πράσινη βλάστηση.

Στην περίπτωση των τύπων εδαφών, καθώς και των τεχνητών υλικών οι αντιπροσωπευτικές τιμές συντελεστή εκπομπής είναι χαρακτηριστικές της περιοχής. Επτά τύποι εδαφών επιλέχτηκαν από την Φασματική Βιβλιοθήκη ASTER (Πίνακας 3) και θεωρούνται αντιπροσωπευτικά για την συνιστώσα της βλάστησης: κίτρινο-καφέ άργιλος, σκουρόχρωμη άμμος, σκουρόχρωμη χοντρόκοκκη άμμος, γκρι ιλυώδης άργιλος, καφέ σκουρόχρωμος άργιλος και αλουβιακή άμμος. Οι τύποι αυτοί εδάφους, έχουν μέση τιμή 0.967 στο φάσμα 10.25 - 10.95 μm (κανάλι 13 του ASTER). Η τιμή αυτή θεωρήθηκε αντιπροσωπευτική και αντιστοιχίστηκε στην συνιστώσα S του εδάφους.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, αναγνωρίστηκαν δέκα ανοιχτόχρωμα στο ορατό υλικά κατασκευών από την Φασματική Βιβλιοθήκη του ASTER (Πίνακας 4): δύο τύποι μπετόν, ένας τύπος ανοιχτόχρωμης πίσσας, γυαλί παραθύρων, κόκκινο τούβλο, μάρμαρο, τρεις τύποι βαφών κτηρίων και χάλυβας. Η μέση τιμή συντελεστή εκπομπής στο φάσμα 10.25 - 10.95 μm (κανάλι 13 του ASTER) αυτών των δέκα υλικών είναι 0.934 και χρησιμοποιήθηκε ως αντιπροσωπευτική για τη συνιστώσα της αστικής επιφάνειας HAI των υψηλής λευκαύγειας μη διαπερατών υλικών.

Πέντε σκούρα στο ορατό φάσμα τεχνητά υλικά επιλέχτηκαν από την Φασματική Βιβλιοθήκη του ASTER (Πίνακας 4) ως αντιπροσωπευτικά για τη συνιστώσα της χαμηλής λευκαύγειας μη διαπερατών επιφανειών: ένας τύπος ασφάλτου, ένας τύπος μπετόν, δύο τύποι υλικών κατασκευής στέγης και ένας τύπος βαφής κτιρίου. Η μέση τιμή συντελεστή εκπομπής στο φάσμα 10.25 - 10.95 μm (κανάλι 13 του ASTER) αυτών των υλικών είναι 0.975. Μελετώντας προσεκτικότερα την εικόνακλάσμα της συνιστώσας LAI (Εικόνα 8γ) είναι εμφανές ότι η συνιστώσα LAI αποτελεί μεγάλο ποσοστό της εικόνας. Όπως εξηγήθηκε και πιο πάνω, αυτό οφείλεται στο ότι η συνιστώσα αυτή περιλαμβάνει επίσης παρουσία νερού ή υγρασίας στην χερσαία περιοχή, υγρό έδαφος και σκιές. Η μέση τιμή συντελεστή εκπομπής των τύπων νερού που υπάρχουν στην Φασματική Βιβλιοθήκη ASTER είναι 0.990. Συνεπώς, θεωρήθηκε αναγκαίο, να αντιστοιχιστεί στην συνιστώσα LAI η τιμή συντελεστή εκπομπής 0.982, που προκύπτει από τη μέση τιμή των τεχνητών υλικών που επιλέχτηκαν αλλά και από τη μέση τιμή των τύπων νερού. Ο χάρτης συντελεστή εκπομπής που κατασκευάστηκε με τον συνδυασμό των κλασμάτων κάλυψης γης και των αντιπροσωπευτικών τιμών συντελεστή εκπομπής για κάθε συνιστώσα του αστικού περιβάλλοντος ακολουθώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία φαίνεται στην Εικόνα 11. Η περιοχή που αντιστοιχεί στη θάλασσα έχει εξαιρεθεί από κάθε υπολογισμό και για αυτό εμφανίζεται με μαύρο χρώμα. Η τοπογραφία της περιοχής σκιαγραφείται από τον εκτιμώμενο χάρτη συντελεστή εκπομπής. Χαμηλές τιμές συντελεστή εκπομπής παρατηρούνται στις κατοικημένες και εμπορικές περιοχές, στον κύριο πυρήνα της πόλης του Ηρακλείου. Οι τιμές συντελεστή εκπομπής είναι ακόμα χαμηλότερες στην βιομηχανική περιοχή του Ηρακλείου στην ανατολική πλευρά της πόλης. Τα δύο λατομεία, ανατολικά και νοτιοανατολικά της πόλης, που συμπεριλαμβάνονται στην περιοχή μελέτης επίσης παρουσιάζουν χαμηλές τιμές συντελεστή εκπομπής όπως είναι αναμενόμενο. Αν και το Ηράκλειο έχει λίγη αστική βλάστηση, οι περιοχές βλάστησης μέσα στην πόλη (γύρω από το ενετικό τείχος) παρουσιάζουν υψηλές τιμές συντελεστή εκπομπής και μάλιστα πολύ υψηλότερο από ότι οι γύρω κατοικημένες περιοχές. Επιπρόσθετα, οι αγροτικές περιοχές γύρω από την πόλη του Ηρακλείου, έχουν υψηλές τιμές συντελεστή εκπομπής όπως είναι αναμενόμενο.



**Εικόνα 11.** Χάρτης συντελεστή εκπομπής που κατασκευάστηκε ακολουθώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία. Η περιοχή που αντιστοιχεί στη θάλασσα έχει εξαιρεθεί από τους υπολογισμούς και για αυτό εμφανίζεται με μαύρο χρώμα.





**Εικόνα 12.** Χάρτης συντελεστή εκπομπής α) με χρήση της μεθοδολογία NDVI και β) από το προϊόν ASTER (AST05). Η περιοχή που αντιστοιχεί στη θάλασσα έχει εξαιρεθεί από τους υπολογισμούς και για αυτό εμφανίζεται με μαύρο χρώμα.

αμοτεγέσματα

## 4.3 Μελετή Σφαλματών

Οι Πίνακες 5, 6 και 7 παρουσιάζουν τα σφάλματα που υπολογίστηκαν για την εκτιμώμενη χωρική κατανομή του συντελεστή εκπομπής και της θερμοκρασίας εδάφους σε σύγκριση με τις χωρικές κατανομές από τα προϊόντα ASTER που θεωρήθηκαν δεδομένα αναφοράς. Τα αντίστοιχα σφάλματα υπολογίστηκαν και για τη χωρική κατανομή του συντελεστή εκπομπής που υπολογίστηκε με χρήση της μεθόδου NDVI (Jiménez-Muñoz et al. 2006) και της θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση της μεθόδου NDVI (Jiménez-Muñoz et al. 2006) και της θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του παραπάνω συντελεστή εκπομπής για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ της προτεινόμενης και της μεθόδου NDVI. Επίσης, η παρούσα μέθοδος αναπτύχθηκε για την βελτίωση της ακρίβειας του συντελεστή εκπομπής σε αστικές περιοχές και για το λόγο αυτό, τα αντίστοιχα σφάλματα υπολογίστηκαν ξεχωριστά και για την περιοχή του πυρήνα της πόλης του Ηρακλείου και παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. η αστική περιοχή όπου υπολογίστηκαν τα σφάλματα σημειώνεται στην Εικόνα 4.

Πίνακας 5. Μέτρα σφαλμάτων που υπολογίστηκαν υπολογίζοντας τη διαφορά μεταξύ συντελεστή εκπομπής από το προϊόν ASTER και α) εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής με την προσέγγιση απόλυτων διαφορών, β) εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής με την προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων και γ) συντελεστή εκπομπής από τη μέθοδο NVDI.

		Εκτιμώμενος συντελεστη		
	ASTER			Συντελεστής εκπομπής
Σφάλμ	ματα	Προσέγγιση Απόλυτων Διαφορών	Προσέγγιση Ελαχίστων Τετραγώνων	NDVI – προϊόν ASTER
չրու	MSE	0.000315	0.000320	0.000441
ιοχή Μελέ	RMSE	0.017737	0.017887	0.021005
	MAE	0.015999	0.016466	0.019367
Περ	MdAE	0.017674	0.017550	0.021657
0	MSE	0.000059	0.000061	0.000077
λστικό Κέντρ	RMSE	0.007659	0.007831	0.008792
	MAE	0.017071	0.017732	0.020100
4	MdAE	0.020026	0.020240	0.024300

**Πίνακας 6.** Μέτρα σφαλμάτων που υπολογίστηκαν από τη διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του συντελεστή εκπομπής από το προϊόν ASTER και α) θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής με την προσέγγιση απόλυτων διαφορών, β) με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής με την προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων και γ) με χρήση του συντελεστή εκπομπής από τη μέθοδο NVDI.

		LST με χρήση εκτιμώμεν	LST με χρήση συντελεστή	
		LST με χρήση συντελεστι	εκπομπής NDVI –	
Προσέγγιση Προσέγγιση Ελαχίστων <i>Σφάλματα</i> Απόλυτων Διαφορών Τετραγώνων		LST με χρήση συντελεστή εκπομπή ASTER		
Տևու	MSE	0.963446	0.978420	1.358568
Μελέ	RMSE	0.981553	0.989151	1.165576
μXοι	MAE	0.881504	0.906555	1.070245
Περ	MdAE	0.970194	0.963185	1.193036
0	MSE	0.173527	0.181408	0.230139
Κέντβ	RMSE	0.416566	0.425921	0.479728
лтко́	MAE	0.927571	0.963537	1.095377
Ac	MdAE	1.088439	1.103611	1.322885

**Πίνακας 7.** Μέτρα σφαλμάτων που υπολογίστηκαν από τη διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους από το προϊόν ASTER και α) θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής με την προσέγγιση απόλυτων διαφορών, β) με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής με την προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων και γ) με χρήση του συντελεστή εκπομπής από τη μέθοδο NVDI.

		LST με χρήση εκτιμώμεν LST από προϊόν ASTER	LST με χρήση συντελεστή εκπομπής NDVI –	
Σφάλματα		Προσέγγιση Απόλυτων Διαφορών	Προσέγγιση Ελαχίστων Τετραγώνων	LST από προϊόν ASTER
Տևո։	MSE	17.082352	17.708514	19.182518
Μελέ	RMSE	4.133080	4.208149	4.379785
μXοι	MAE	3.562619	3.707123	3.879267
Пєр	MdAE	3.842733	3.916275	4.114125
o	MSE	2.817805	2.925011	3.129166
τικό Κέντρ	RMSE	1.678632	1.710266	1.768945
	MAE	3.703577	3.839079	3.978982
Ao	MdAE	4.361001	4.427681	4.594087

Όλα τα σφάλματα που υπολογίστηκαν σε κάθε περίπτωση είναι μικρότερα από αυτά που δίνει η εκτίμηση συντελεστή εκπομπής με χρήση της μεθόδου NDVI σε σχέση με το προϊόν υψηλού επιπέδου ASTER. Η προτεινόμενη μέθοδος για τον εκτιμώμενο συντελεστή εκπομπής δίνει ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) 0.017737 έναντι του 0.021005 που είναι η αντίστοιχη τιμή του σφάλματος της μεθόδου NDVI για την περιοχή μελέτης. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για την θερμοκρασία εδάφους που υπολογίζεται από τον εκτιμώμενο συντελεστή εκπομπής δίνει ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα 0.981553 Κ έναντι του 1.165576 Κ που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία εδάφους όπως αυτή υπολογίζεται με χρήση του συντελεστή εκπομπής NDVI.

Επίσης, από τα μέτρα σφαλμάτων που υπολογίστηκαν παρατηρείται η υπεροχή της προσέγγισης των απόλυτων διαφορών σε σύγκριση με αυτή των ελαχίστων τετραγώνων.

Για να εξεταστούν καλύτερα οι κατανομές των σφαλμάτων που προέκυψαν συγκρίνοντας τα εκτιμώμενα αποτελέσματα με αυτά της μεθόδου NDVI σε σχέση με τα προϊόντα ASTER, σχεδιάστηκαν τα θηκογράμματα των παραπάνω σφαλμάτων. Τα θηκογράμματα είναι ένα γραφικός τρόπος παρουσίασης της κατανομής ενός πληθυσμού, στην προκειμένη περίπτωση του σφάλματος. Η κόκκινη γραμμή στο κέντρο του ορθογωνίου αντιστοιχεί στη διάμεσο του πληθυσμού, ενώ μέσα στο ορθογώνιο βρίσκεται το 50% των παρατηρήσεων. Το σημειωμένο διάστημα πάνω και κάτω από το ορθογώνιο περιέχει το υπόλοιπο των παρατηρήσεων, ενώ με κόκκινους σταυρούς σημειώνονται οι ακραίες παρατηρήσεις.

Η κατανομή του σφάλματος μεταξύ εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής και του θεωρούμενου ως σετ δεδομένων αναφοράς (προϊόν ASTER) φαίνεται στο Σχήμα 12α). Η τιμή της διαμέσου του σφάλματος είναι -0.017928 και το 50% των παρατηρήσεων βρίσκεται στον διάστημα [-0.020936, - 0.014602]. Οι αντίστοιχες τιμές για το σφάλμα μεταξύ συντελεστή εκπομπής υπολογιζόμενο με τη μέθοδο NDVI και του προϊόντος ASTER είναι -0.021679 και [-0.024644 -0.017372] και το αντίστοιχο θηκόγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 12β). Το αρνητικό πρόσημο και η μετατόπιση των θηκογραμμάτων στις αρνητικές τιμές φανερώνει πως οι εκτιμώμενες τιμές συντελεστή εκπομπής είναι γενικότερα μικρότερες από ότι αυτές του προϊόντος ASTER.

Αντίστοιχα, η κατανομή του σφάλματος μεταξύ της θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής και της θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του προϊόντος συντελεστή εκπομπής ASTER φαίνεται στο Σχήμα 13α). Η τιμή της διαμέσου του σφάλματος είναι 0.984428 και το 50% των παρατηρήσεων βρίσκεται στον διάστημα [0.787706, 1.161673]. Στο Σχήμα 13β) φαίνεται το αντίστοιχο θηκόγραμμα για το σφάλμα μεταξύ της θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του συντελεστή εκπομπής NDVI και της θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του προϊόντος συντελεστή εκπομπής ASTER. Η τιμή της διαμέσου του σφάλματος είναι 1.194103 και το 50% των παρατηρήσεων βρίσκεται στον διάστημα [0.934235, 1.372766]. Αυτό ουσιαστικά υποδεικνύει ότι ο εκτιμώμενος συντελεστής εκπομπής με χρήση της προτεινόμενης μεθόδου δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα στην εκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους από ότι ο συντελεστής εκπομπής NDVI, αν και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιηθεί ο ίδιος αλγόριθμος υπολογισμού της θερμοκρασίας.

Τέλος, παρουσιάζονται και οι κατανομές των σφαλμάτων που προκύπτουν από τη σύγκριση της εκτιμώμενης θερμοκρασίας εδάφους με το προϊόν θερμοκρασίας εδάφους ASTER. Τα σφάλματα αυτά εμπεριέχουν το σφάλμα που οφείλεται στον αλγόριθμο υπολογισμού της θερμοκρασίας και έτσι δεν μπορούν να θεωρηθούν ενδεικτικά. Αξίζει όμως να παρατηρηθεί ότι και σε αυτή την περίπτωση η χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής από την προτεινόμενη μέθοδο, παρουσιάζει αποτελέσματα πλησιέστερα σε αυτά του προϊόντος θερμοκρασίας εδάφους, από ότι η θερμοκρασία εδάφους που υπολογίζεται με συντελεστή εκπομπής NDVI. Η κατανομή του σφάλματος μεταξύ της θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής NDVI. Η κατανομή του σφάλματος μεταξύ της θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής NDVI. Η κατανομή του σφάλματος μεταξύ της θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής και του προϊόντος θερμοκρασίας εδάφους ΑSTER φαίνεται στο Σχήμα 14α). Η τιμή της διαμέσου του σφάλματος είναι 3.941778 και το 50% των παρατηρήσεων βρίσκεται στον διάστημα [2.619150, 5.021427]. Οι αντίστοιχες τιμές για το σφάλμα μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής και του προϊόντος θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του αφάλματος είναι 3.941778 και το 50% των παρατηρήσεων βρίσκεται στον διάστημα [2.619150, 5.021427]. Οι αντίστοιχες τιμές για το σφάλμα μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής και του προϊόντος θερμοκρασίας εδαφους που υπολογίστηκε με συταί δια το αντίστοιχες τιμές για το σφάλμα μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους που υπολογίστηκε με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής και το αντίστοιχο θηκόγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 14β).



**Σχήμα 12.** Θηκόγραμμα σφαλμάτων α) μεταξύ εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής και του θεωρούμενου ως σετ δεδομένων αναφοράς (προϊόν ASTER) και β) μεταξύ συντελεστή εκπομπής υπολογιζόμενο με τη μέθοδο NDVI και του θεωρούμενου ως σετ δεδομένων αναφοράς (προϊόν ASTER).



**Σχήμα 13.** Θηκόγραμμα σφαλμάτων α) μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους υπολογιζόμενη με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής και θερμοκρασίας εδάφους υπολογιζόμενη με χρήση του προϊόντος συντελεστή εκπομπής ASTER και β) μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους θερμοκρασίας εδάφους υπολογιζόμενη με χρήση του συντελεστή εκπομπής NDVI και θερμοκρασίας εδάφους υπολογιζόμενη με χρήση του προϊόντος συντελεστή εκπομπής ASTER. Η θερμοκρασία στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται με χρήση του αλγορίθμου Jiménez-Muñoz & Sobrino (2010).



**Σχήμα 14.** Θηκόγραμμα σφάλματος α) μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους υπολογιζόμενη με χρήση του εκτιμώμενου συντελεστή εκπομπής με χρήση του αλγορίθμου Jiménez-Muñoz & Sobrino (2010) και του προϊόντος θερμοκρασίας εδάφους του ASTER και β) μεταξύ θερμοκρασίας εδάφους υπολογιζόμενη με χρήση του συντελεστή εκπομπής NDVI και του προϊόντος θερμοκρασίας εδάφους ASTER.

Όλα τα παραπάνω υποδεικνύουν πως η προτεινόμενη μέθοδος είναι ικανή για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής σε αστικό περιβάλλον. Οι κατανομές και τα μέτρα των σφαλμάτων που υπολογίστηκαν σε όλες τις περιπτώσεις υποδεικνύουν μια βελτίωση εκτίμησης του συντελεστή εκπομπής σε αστικό περιβάλλον σε σύγκριση με την μέθοδο υπολογισμού του NDVI που εφαρμόζεται κυρίως σε μη αστικές περιοχές. Όλες οι συγκρίσεις βέβαια, γίνανε θεωρώντας ως δεδομένα αναφοράς τα προϊόντα ASTER. Δυστυχώς η μη διαθεσιμότητα in situ μετρήσεων δεν επέτρεψε τον αυστηρό έλεγχο της αξιοπιστίας της μεθόδου.

Επίσης, ένα πολύ σημαντικό βήμα κατά τη διάρκεια εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου είναι η επιλογή των ακροστοιχείων. Στην μέθοδο που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν ακροστοιχεία επιλεγμένα από την εικόνα και ένα ακροστοιχείο για κάθε συνιστώσα του αστικού περιβάλλοντος. Μια μέθοδος ανάλυσης φασματικής ανάμιξης που εμπλέκει τεχνικές χρήσης πολλαπλών ακροστοιχείων (Powell et al., 2007) θα μπορούσε να δώσει ακόμα ακριβέστερα αποτελέσματα. Μάλιστα, με συνδυασμό τεχνικών χρήσης πολλαπλών ακροστοιχείων από την εικόνα αλλά και από φασματικές βιβλιοθήκες, η σύνδεση των κλασμάτων κάλυψης γης και αντιπροσωπευτικών τιμών συντελεστή εκπομπής θα ήταν ακόμα ακριβέστερη.

# 5. Σύμπερασματά

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια **νέα μεθοδολογία για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής** που βασίζεται σε ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου. Η εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής επιφάνειας είναι **κύριας σημασίας στον υπολογισμό της θερμοκρασίας εδάφους** η οποία σχετίζεται με ισοζύγιο ενέργειας και είναι απαραίτητη παράμετρος σε πολλές μελέτες των επιστημών της Γης, καθώς και σε πρακτικές αστικού σχεδιασμού και διαχείρισης. Επιπλέον, ακριβείς χωρικές κατανομές συντελεστή εκπομπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την χαρτογράφηση των διαφόρων τύπων εδαφών.

Η μεθοδολογία που προτείνεται εδώ βασίζεται στην ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων με χρήση **Ανάλυσης Φασματικής Ανάμιξης**. Κατά την εκτίμηση συντελεστή εκπομπής από δεδομένα κάλυψης γης, ένα μεγάλο μέρος του σφάλματος οφείλεται στον μικρό αριθμό τύπων κάλυψης γης, καθώς και στην μικρή συχνότητα ενημέρωσης των χαρτών κάλυψης γης. Το κύριο πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου είναι **η μετάβαση του προβλήματος σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου**.

Σε δορυφορικά δεδομένα μεσαίας χωρικής ανάλυσης, ο συντελεστής εκπομπής ενός εικονοστοιχείου αποτελεί σύνθεση των συντελεστών εκπομπής των διαφορετικών τύπων επιφανειών που ενδεχομένως αποτελούν το εικονοστοιχείο. Κάνοντας την υπόθεση πως η αστική επιφάνεια αποτελείται από τρεις βασικές συνιστώσες: βλάστηση, μη-διαπερατή επιφάνεια και έδαφος και εκτιμώντας το ποσοστό της κάθε συνιστώσας στο εικονοστοιχείο λαμβάνεται υπόψη η πληροφορία σε επίπεδο υπό του εικονοστοιχείου και οι διάφοροι τύποι κάλυψης γης μοντελοποιούνται ως συνδυασμός των βασικών συνιστωσών. Η **τοπογραφία** λοιπόν της περιοχής συμβάλει στον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας.

Επί πρόσθετα, όπως προαναφέρθηκε η τιμή του συντελεστή εκπομπής μιας επιφάνειας μπορεί να διαφέρει σε διάφορες χρονικές στιγμές και αυτό γιατί εξαρτάται όχι μόνο από τον τύπο της επιφάνειας, αλλά και από την φυσική της κατάσταση. Η μέθοδος που προτείνεται εδώ **λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές που μπορεί να υπεισέλθουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές**. Διαφορετικά στιγμιότυπα θα δώσουν διαφορετικά κλάσματα κάλυψης γης και αυτό με τη σειρά του επηρεάζει τον συντελεστή εκπομπής όπως αυτός υπολογίζεται από την προτεινόμενη μέθοδο.

Ακόμα, στις ευρέως διαδεδομένες μεθόδους εκτίμησης του συντελεστή εκπομπής είναι απαραίτητη η ατμοσφαιρική διόρθωση των δορυφορικών δεδομένων. Η ατμοσφαιρική διόρθωση είναι μια διαδικασία που εμπλέκει συνήθως τη χρήση βοηθητικών δεδομένων και προσθέτει στην εκτίμηση φυσικών παραμέτρων που αφορούν την επιφάνεια της Γης ένα ακόμα βήμα, το οποίο συμβάλει στο συνολικό σφάλμα εκτίμησης. Με χρήση της παρούσας μεθόδου **η ατμοσφαιρική διόρθωση δεν επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα**. Η ακρίβεια της μεθόδου δεν επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική διόρθωση και επιπλέον αποφεύγεται ένα περίπλοκο βήμα στην διαδικασία εκτίμησης του συντελεστή εκπομπής.

Επίσης, η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται σε δορυφορικά δεδομένα του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου φάσματος ακτινοβολίας και αυτό **καθιστά δυνατή την εκτίμηση συντελεστή εκπομπής με χρήση δεδομένων από τους περισσότερους πολυφασματικούς αισθητήρες**. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητη η παρουσία περισσότερων του ενός θερμικών καναλιών, γεγονός που θεωρείται πλεονέκτημα σε σχέση με την μέθοδο TES. Η εκτίμηση συντελεστή εκπομπής με χρήση της μεθόδου TES προϋποθέτει δύο τουλάχιστον θερμικά κανάλια.

Επιπλέον, μοντελοποιώντας την αστική επιφάνεια όπως προτείνεται στην παρούσα μέθοδο, λαμβάνεται υπόψη το ποσοστό κάλυψης γης από μη-διαπερατές επιφάνειες. Οι μη-διαπερατές επιφάνειες είναι χαρακτηριστικό του αστικού περιβάλλοντος και χαρακτηρίζονται από έντονη ανομοιομορφία. Τα υλικά κατασκευών που χρησιμοποιούνται ποικίλουν και συνεπώς ποικίλουν και οι φυσικές ιδιότητες των επιφανειών που αποτελούν. Με τον διαχωρισμό της συνιστώσας των μηδιαπερατών επιφανειών σε μη-διαπερατές επιφάνειες υψηλής και χαμηλής λευκαύγειας, επιτυγχάνεται **ακρίβεια στο συντελεστή εκπομπής σε αστικές επιφάνειες**. Σε αυτό το σημείο η προτεινόμενη μέθοδος πλεονεκτεί της μεθόδου NDVI, η οποία έχει αναπτυχθεί για υπολογισμό συντελεστή εκπομπής σε αγροτικές περιοχές.

Τέλος, η **χρήση της προσέγγισης των απόλυτων διαφορών** για την λύση του προβλήματος φασματικής ανάμιξης δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με την κλασσική προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων, διότι η πρώτη είναι μια μέθοδος λιγότερο ευαίσθητη σε ακραίες τιμές.
## 6. Βιβλιογραφία

- Adams, J., Sabol, D., Kapos, V., Filho, R., Roberts, D., Smith, M., & Gillespie R. (1995). Classification of Multispectral Images Based on Fractions of Endmembers: Application to Land-Cover Change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment, 52*, 137-154.
- Arnfield, J.A. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology, 23,* 1–26.
- Becker, F. & Li, Z. L. (1995). Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems. *Remote Sensing Reviews*, *12*, 225-253.
- Becker, F. & Li, Z. L. (1990). Toward a local split window method over land surface. *International Journal of Remote Sensing*, *11*, 369-393.
- Baldridge, A.M., Hook, S.J., Grove, C.I., & Rivera, G. (2009). The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment, 113,* 711–715.
- Boardman, J. W., Kruse, F. A., & Green, R. O. (1995). Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Geoscience Workshop (pp. 23–26). Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory Publications.
- Calkins, H. W., & Tomlinson, R. F. (1977). Geographic Information Systems: Methods and Equipment for Land Use Planning. Ottawa, Canada: International Geographical Union, Commission of Geographical Data Sensing and Processing and U.S. Geological Survey.
- Chrysoulakis, N., Abrams, M., Feidas, H., & Arai, K. (2010). Comparison of atmospheric correction methods using aster data for the area of Crete: the ATMOSAT project. *International Journal of Remote Sensing*, *31*, 6347 6385.
- Chrysoulakis, N., Vogt, R., Young, D., Grimmond, C.S.B., Spano, D. & Marras, S. (2009). ICT for Urban Metabolism: The case of BRIDGE. In: Wohlgemuth, V. Page, B. and Voigt, K. (Eds): Proceedings of EnviroInfo2009: Environmental Informatics and Industrial Environmental Protection: Concepts, Methods and Tools. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (Vol. 2, pp. 183 – 193).
- Chrysoulakis, N., Abrams, M., Feidas, H. and Velianitis, D., (2004). Analysis of ASTER Multispectral Stereo Imagery to Produce DEM and Land Cover Databases for Greek Islands: The REALDEMS Project. In: Prastacos, P., Cortes, U. De Leon, J. L., Murillo, M. (Eds): Proceedings of e-Environment: Progress and Challege, pp. 411 - 424
- Chrysoulakis, N. (2003). Estimation of the all-wave urban surface radiation balance by use of ASTER multispectral imagery and in situ spatial data. *Journal of Geophysical Research, 108,* D18, 4582, doi:10.1029/2003JD003396.
- Clapham, W. B., Jr. (2003). Continuum-based classification of remotely sensed imagery to describe urban sprawl on a watershed scale. *Remote Sensing of Environment, 86*, 322–340.
- Coll, C., Caselles, V., Sobrino, J. A. & Valor, E. (1994). On the atmospheric dependence of the splitwindow equation for land surface temperature. *International Journal Remote Sensing*, *15*, 105-122.
- Dash, P, Gottsche, F.M. Olesen, F.S. & Fischer, H. (2002). Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 2563 2594.

Βιβλιογραφία

- Dielman, T.E., (2005). Least absolute value regression: recent contributions. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 75, 263 286.
- ENVI. (2000). ENVI user's guide. Boulder, CA: Research Systems Inc. Epstein, J., Payne, K., & Kramer, E. (2002). Techniques for mapping suburban.
- Gillespie, A., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothern, J. S., Hook, S. & Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *36*, 1113 1126.
- Green, A.A., Berman, M., Switzer, P. and Craig, M.D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26, pp. 65–74.
- Gu, D. and Gillespie, A. R. (2000). A new approach for temperature and emissivity separation. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 2127–2132.
- Hyndman, R.J, & Koehler, A.B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22, 679–688.
- Jensen, J. R. (1983). Biophysical remote sensing. *Annals of the Association of American Geographers*, 73, 111–132.
- Ji, M., & Jensen, J. R. (1999). Effectiveness of subpixel analysis in detecting and quantifying urban imperviousness from Landsat Thematic Mapper Imagery. *Geocarto International, 14,* 31–39.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Gillespie, A., Sabol, D. & Gustafson W.T. (2006). Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI. *Remote Sensing of Environment*, *103*, 474–487.
- Jiménez-Muñoz, J.C., & Sobrino, J.A., (2010). A Single-Channel Algorithm for Land-Surface Temperature Retrieval From ASTER Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7, 1.
- Jiménez-Muñoz, J. C. & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research, 108* (doi: 10.1029/ 2003JD003480).
- Katsiabani, K., Adaktilou, N. and Cartalis, C. (2009). A generalised methodology for estimating land surface temperature for non-urban areas of Greece through the combined use of NOAA– AVHRR data and ancillary information. *Advances in Space Research*, 43(6), 930-940.
- Kealy, P. S. & Gabell, A. R. (1990) Estimation of emissivity and temperature using alpha coefficients. Proceedings of second T IMS workshop (Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory), JPL Pub. 90-95.
- Koenker R. (2005) Quantile Regression. Cambridge University Press, UK.
- Lipakis, M., Chrysoulakis, N. & Kamarianakis, Y. (2008). Shoreline extraction using satellite imagery. In: Pranzini, E. and Wetzel, E. (eds): Beach Erosion Monitoring. Results from BEACHMED/e-OpTIMAL Project (Optimization des Techniques Integrées de Monitorage Appliquées aux Lottoraux) INTERREG IIIC South. (pp. 81 – 95) Nuova Grafica Fiorentina, Florence, Italy.
- LPDAAC, (2010). ASTER Land Products. Land Processes Distributed Active Archive Center: http://edcdaac.usgs.gov/aster/asterdataprod.asp.
- Lu, D. & Weng, Q. (2006). Use of impervious surface in urban land use classification. *Remote Sensing* of Environment, 102, 146–160.

- Lu, D., & Weng, Q. (2004). Spectral mixture analysis of the urban landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70, 1053–1062.
- Mather, P.M. (2004). Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction, (3rd Edition), England : John Wiley & Sons, Ltd.
- Nerry, F., Labed, J., & Stoll, M. P. (1990). Spectral properties of land surfaces in the thermal infrared 1. Laborataory measurements of absolute spectral emissivity signatures. Journal of Geophysical Research, 95, 7027 - 7043.
- Nerry, F., Labed, J. & Stoll, M. P. (1988). Emissivity signatures in the thermal infrared band for remote sensing: calibration procedure and method of measurement. Applied Optics, 1988, 27, 758 -764.
- Nichol, J. (2009). An emissivity modulation method for spatial enhancement of thermal satellite images in urban heat island analysis. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 75(5): 547-556.
- Plaza, A., Martin, G., Plaza, J., Zortea, M. & Sanchez, S., (2010). Recent Developments in Endmember **Extraction and Spectral Unmixing**
- Powell, R.L., Roberts, D.A., Dennison, P.E., & Hess L.L. (2007). Sub-pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. Remote Sensing of Environment, 106, 253-267.
- Prata, A. J. (2002). Land Surface Temperature Measurement from Space: AATSR Algorithm Theoretical Basis Document, CSIRO Atmospheric Research Aspendale, Australia.
- Prata, A. J. (1994). Land surface temperature derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer and the Along-Track Scanning Radiometer. 2. Experimental results and validation of AVHRR algorithms. Journal of Geophysical Research, 99, 13025-13058.
- Prata, A. J. (1993). Land surface temperature derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer and the Along-Track Scanning Radiometer. 1. Theory. Journal of Geophysical Research, 98, 16689-16702.
- Rashed, T., Weeks, J. R., Stow, D., & Fugate, D. (2005). Measuring temporal compositions of urban morphology through spectral mixture analysis: Towards a soft approach to change analysis in crowded cities. International Journal of Remote Sensing, 26, 699–718.
- Ridd, M.K. (1995). Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. International Journal of *Remote Sensing, 16, 2165 - 2185.*
- Roberts, D.A., M.O. Smith, & J.B. Adams, (1993). Green vegetation, non-photosynthetic vegetation, and soils in AVIRIS data, *Remote Sensing of Environment*, 44,255–269.
- Salisbury, J. W., D'Aria, D. M., & Wald, A. (1994). Measurements of thermal infrared spectral reflectance of frost, snow, and ice. Journal of Geophysics Research, 99, 24,235 - 24,240.
- Salisbury, J. W., & D'Aria, D. M. (1994). Emissivity of terrestrial materials in the 3 -5 µm atmospheric window. Remote Sensing of Environment, 47, 345 - 361.
- Salisbury, W., & D' Aria, D. M. (1992). Emissivity of terrestrial materials in the 8–14 mm atmospheric window. Remote Sensing of Environment, 42, 83–106.
- Smith, M.O., S.L. Ustin, J.B. Adams, & A.R. Gillespie, (1990). Vegetation in Deserts: I. A regional measure of abundance from multispectral images, Remote Sensing of Environment, 31, 1–26.

αγιολοαφία

- Snyder, W. C., Wan, Z., Zhang, Y. & Feng, Y. -Z. (1998). Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*, *19*, 2753-2774.
- Snyder, W. C., Wan, Z., Zhang, Y., & Feng, Y. (1997). Thermal infrared (3± 14 μm) bidirectional reflectance measurements of sands and soils. *Remote Sensing of Environment, 60,* 101 109.
- Snyder, W. C., & Wan, Z. (1998). BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared. *IEEE T ransactions on Geoscience and Remote Sensing*, *36*, 214 225.
- Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C., Sòria, S., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A., & Martínez, P. (2008). Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, *46*(2), *80*, 316-327.
- Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C. & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment, 80*, 497 515.
- Sobrino, J. A. & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring. Application to Mo-rocco. *International Journal of Remote Sensing. 21*, 353–366.
- Sobrino J. A. & Cuenca, J. (1999) Angular variation of thermal infrared emissivity for some natural surfaces from experimental measurements. *Applied Optic, 38*, 3931 3936.
- Sobrino, J. A., Li, Z. L., Stoll, M. P., & Becker, F. (1996). Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(11), 2089–2114.
- Sobrino, J. A., Caselles, V., & Becker, F. (1990). Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard. *ISPRS Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44, 343–354.
- Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenny, M.P., & Macomber, S.A. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data, when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of the Environment, 75*, 230-244.
- Stathopoulou, M., Cartalis, C. and Petrakis, M. (2007). Integrating Corine Land Cover data and Landsat TM for surface emissivity definition: application to the urban area of Athens, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, *28*, 3291 3304.
- Stathopoulou, M., Cartalis, C., Keramitsoglou, I. (2004). Mapping micro-urban heat islands using NOAA/AVHRR images and CORINE Land Cover: an application to coastal cities of Greece. *International Journal of Remote Sensing*, *25*, 2301 2316.
- Tonooka, H., Sakuma, F., Kudoh, M., & Iwafune, K. (2003). ASTER/TIR onboard calibration status and user-based recalibration. *Proceedings SPIE, 5234,* 191-201.
- Toutin, Th., (2004). Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 1893 1924
- Valor, E. & V. Casseles. (1996). Mapping Land surface emissivity from NDVI: Application to European African and South American areas. *Remote Sensing of Environment, 57,* 167 184.
- VLS (2007) Feature Analyst Version 4.1 for Imagine. Reference Manual. Visual Learning Systems Inc. Missoula, USA.
- Voogt, J. A. and Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment, 86,* 370 384.

οιφαολοιχθια

- Wan, Z. (1999). MODIS Land-Surface Temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD), Version 3.3, NAS5-31370, NASA/GSFC, Greenbelt MD, USA.
- Watson, K. (1992). Spectral ratio method for measuring emissivity. *Remote Sensing of Environment,* 42, 113–116.
- Weng, Q., (2009a). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *64*, 335 - 344.
- Weng, Q., (2009b). *Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications.* (1st ed.) New York: McGraw-Hill Professional Pub.
- Weng, Q, Hu, X., & Liu, H. (2009). Estimating impervious surfaces using linear spectral mixture analysis with multitemporal ASTER images, *International Journal of Remote Sensing*, *30* 18, 4807 4830.
- Weng, Q. (2007). Remote Sensing of Impervious Surfaces. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis.
- Wilkinson, G. G. (1996). A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10, 85–101.
- Yang, L., Huang, C., Homer, C.G., Wylie, B.K., & Coan, M.J. (2003). An approach for mapping largescale impervious surfaces: synergistic use of Landsat-7 ETM+ and high spatial resolution imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing, 29*, 230–240.
- Yu, Y., Privette, J. L. and Pinheiro, A. C. (2008). Evaluation of Split-Window Land Surface Temperature Algoritms for Genarating Climate Data Records. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46, 179 – 192.

#### Ελληνική Βιβλιογραφία

Καρτάλης, Κ. & Φείδας, Χ., (2006). *Αρχές και Εφαρμογές της Δορυφορικής Τηλεπισκόπισης*. Εκδόσεις, Β. Γκιούρδας Εκδοτική.

Βιβλιογραφία

Μερτίκας Σ., (2000). Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας. Εκδόσεις ΙΟΝ, Αθήνα.

# 7. Ακρωνύμια

АФА	Ανάλυση Φασματικής Ανάμιξης
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BRDF	Bidirectional reflectance distribution function
LST	Land Surface Temperature (Θερμοκρασία εδάφους)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης)
MAE	Mean Absolute Error (μέσο απόλυτο σφάλμα)
MdAE	Median Absolute Error (απόλυτο σφάλμα διαμέσου)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSE	Mean Square Error (μέσο τετραγωνικό σφάλμα)
PPI	Pixel Purity Index
RMSE	Root Mean Square Error (ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος)
TES	Temperature Emissivity Separation

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

#### Παραρτήμα Ι – Κωδικάς R

Στο παράρτημα αυτό παρατίθεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε σε R στα πλαίσια της ανάπτυξης της μεθοδολογίας. Το περιβάλλον R είναι κυρίως ένα στατιστικό περιβάλλον το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των κλασμάτων κάλυψης γης με βάση τη μέθοδο των απόλυτων διαφορών.

ptm <- proc.time()</pre>

# call quantreg librady
library(quantreg)

# number of lines in aster text data file (created using matlab)
numb <- 1603068
# end1 - end4 are the endmembers vectors</pre>

end1 <- c(65.832001, 35.375000, 157.746002, 15.950000, 3.272000, 2.730000, 2.656000, 1.715000, 1.060000)

end2 <- c(270.079987, 224.985001, 142.229996, 34.509998, 8.180000, 8.580000, 5.976000, 5.635000, 2.650000)

end3 <- c(70.896004, 39.619999, 37.066002, 14.210000, 4.090000, 3.510000, 2.988000, 1.225000, 0.795000)

end4 <- c(165.423996, 162.725006, 133.610001, 31.900000, 7.771000, 7.410000, 5.976000, 4.410000, 2.385000)

C <- cbind(end1,end2,end3,end4) rm(end1, end2, end3, end4)

# Constrain slope coefficients # All coefficients >=0 R1 <- c(1, 0, 0, 0)R2 <- c(0, 1, 0, 0)R3 <- c(0, 0, 1, 0)R4 <- c(0, 0, 0, 1)# All coefficients <=1 R5 <- c(-1, 0, 0, 0)R6 <- c(0, -1, 0, 0)R7 <- c(0, 0, -1, 0)R8 <- c(0, 0, 0, -1)# Coefficients sum to 1 (>=1 and <=1) R9 <- c(1, 1, 1, 1)R10 <- c(-1, -1, -1, -1)

#R <- rbind(R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7,R8,R9,R10) #r <- c(0, 0, 0, 0, -1, -1, -1, -1, 1, -1)

Ο Παραρτήματα

```
R <- rbind(R1,R2,R3,R4,R9,R10)
r <- c(0, 0, 0, 0, 1, -1)
```

#-----

```
# read the data from file created with matlab
aster <- read.table("asterimage.data")</pre>
```

# create the output matrix
zina <- array(0, dim=c(numb,4))</pre>

```
# loop for each row of the file
for (z in 1:numb)
```

{

```
# work with one line for each loop
i <- array(c(z,z,z,z,z,z,z,z,z,1:9), dim=c(9,2))
# d is the target pixel
d <- aster[i]</pre>
```

# Quantile Regression fit
 # d ~ C means linear regression and d ~ C-1 means that we have no constant in linear model

# Constrained Quantile Regression

- # The option method="fnc" enables the user to specify linear inequality constraints on the fitted coefficients;
- # in this case one needs to specify the matrix R and the vector r representing the constraints # in the form Rb>=q r.

```
fit <- rq(d~C-1,R=R,r=r,method="fnc")</pre>
```

```
# The residuals of fitting
res <- resid(fit)</pre>
```

# See the results #fit #res

```
i <- array(c(z,z,z,z,1:4), dim=c(4,2))
zina[i] <- coef(fit)
```

}

# write the results to a file
write.table(zina, file = "zina\_res.data",row.names=FALSE,col.names=FALSE)

#### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ – ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΑΤLAB

Στο παράρτημα αυτό παρατίθεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε σε Maltab για τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία. Η Matlab είναι μια μαθηματική γλώσσα προγραμματισμού και είναι ιδανική για κάθε είδους υπολογισμούς που βασίζονται σε πίνακες. Οι εικόνες είναι μεγάλοι πίνακες αριθμών.

```
%% Emissivty Estimation v2.0
% This script performs Emissivty Estimation based on an ASTER satellite
% image using Spectral Mixture Analysis
%% Matlab Functions required for script to run:
% (please include those in the same folder as this script)
% - geotiffwrite.m (used to write geotiffs)
% - pixelVIS.m
                (performs SMA to one pixel)
% - LST_SC_JMandS.m (computes LST using JM&S algorithm)
%% Input Files (images) required for script to run:
% calibrated_radiance.tif (radiances in ASTER bands 1-9)
% water_mask.tif
                                (one band raster having 1=sea, 0=no sea)
% PW.tif
                                (Water Vapor content in cm - from MODIS)
% calibrated_radiance_13.tif
                                (radiance in ASTER bands 13)
% apparent_reflectance.tif (apparent reflectance in ASTER bands 1-9)
% ast05_emissivity_ch13.tif (ASTER product 05 - emissivity in band 13)
% ast08_lst.tif
                                (ASTER product 08 - LST)
% ATTENTION: all images used must be the exact same size!
%% Output Files:
% GeoTIFFS
%
                     Fractions image (each band correspond to each endmember)
   classif
                ->
                ->
%
                      Unmixing errors (band 1: norm of residuals, band 2: RMSE)
   cerror
%
  _emiss
                ->
                      Emissivity maps (derived using the proposed method)
  _LST
%
                 ->
                     LST map derive using abovementioned emissivity and JM&S
algorithm
% _JMS
                 ->
                      LST map derive using NDVI-based emissivity and JM&S algorithm
   _diff_JMS_AST ->
                      Difference between JMS and ASTER products (band1: emissivity,
2
band 2: LST)
                      Difference between Mine and ASTER products (band1:
  _diff_mine_AST->
emissivity, band 2: LST)
% _diff_mine_JMS-> Difference between Mine and JMS derived (band1: emissivity,
band 2: LST)
% Figures
°
   1 -> Endmembers Spectral Signatures
%
    2 -> Vegetation Fraction
°
    3 -> High Albedo Fraction
   4 -> Low Albedo Fraction
%
   5 -> Soil Fraction
%
   6 -> Classification RMSE
%
%
   7 -> Emissivity map derived using the unmixing method
°
    8 -> LST derived from JM&S Algorithm using my emissivity
%
   9 -> Emissivity map derived using NVDI-based method
% 10 -> LST derived from JM&S Algorithm using NDVI emissivity
% Text Files
% _errors ->
               Validations Errors
clear
close all
```

μαραρτήματο

```
t1 = tic; % Count the time
%% USER TO DEFINE:
%% Input/output files, Bands to use and Number of endmembers
inputim = 'calibrated_radiance.tif'; %input file
waterim = 'water_mask.tif'; %water mask file (1 = sea, 0 = no sea)
water = imread(waterim); %read water mask image
% bands included
usedbands = 1:9;
% number of endmembers used
numend = 4;
outname = 'test05'; % 6 characters
r = size(outname);
txttitle = ' Least Absolute Deviations \n Water Mask on \n Veq:0.985, HA:0.934,
LA:0.982, Soil:0.968 \n old endmember for soil \n\n';
em=zeros(1,numend);
em(1) = 0.985; %Vegeteation
em(2) = 0.934; %High Albedo (Impervious)
em(3) = 0.982; %Low Albedo (Impervious)
em(4) = 0.968; %Soil
%% Definition of the Output files
% Here the name extensions to be used for output files are defined
outputim = strcat(outname,'_classif_G.tif'); %classification output
classerror = strcat(outname,'_cerror_G.tif'); %classification error output
emissivim = strcat(outname,'_emiss_G.tif'); %emissivity output
LSTim = strcat(outname,'_LST_G.tif'); %LST output
JMSim = strcat(outname, '_JMS_G.tif'); %JMS emissivity + LST
AST_JMSim = strcat(outname,'_AST_JMS_G.tif'); %JMS emissivity + LST
JMS_AST_diff = strcat(outname,'_diff_JMS_AST_G.tif'); %JMS-AST difference
mine_AST_diff = strcat(outname,'_diff_mine_AST_G.tif'); %mine-AST difference
mine_JMS_diff = strcat(outname, '_diff_mine_JMS_G.tif'); %mine-JMS difference
errorstxt = strcat(outname,'_errors.txt'); %txt
%% Read the input image
% The info from the input image are read
img = imread(inputim); %read input image
info = geotiffinfo(inputim); %read the info of input image
img = img(:,:,usedbands); %subset used image vector
[m n bands] = size(img);
% and the output tif info are copied from the input image
clear opt
opt.GTModelTypeGeoKey = 1;
opt.ModelPixelScaleTag = [info.PixelScale(1); info.PixelScale(2);
info.PixelScale(3)];
opt.ModelTiepointTag = [0; 0; 0; info.TiePoints.WorldPoints.X;
info.TiePoints.WorldPoints.Y; 0];
opt.GeographicTypeGeoKey = info.GeoTIFFCodes.GCS;
opt.GeogGeodeticDatumGeoKey = info.GeoTIFFCodes.Datum;
opt.GeogEllipsoidGeoKey = info.GeoTIFFCodes.Ellipsoid;
opt.ProjectedCSTypeGeoKey = info.GeoTIFFCodes.PCS;
%% Endmembers Definition
% The endmembers are defined manualy:
% Copy coordinates from ERDAS cross !!! Y first then X
```

```
% +1 because matlab counts from 1 while ERDAS counts from 0
end1 =[65.8320007324219, 35.375, 157.746002197266, 15.9499998092651,
3.2720000743866, 2.73000001907349, 2.65599989891052, 1.7150000333786,
1.05999994277954];
end2 = [270.079986572266, 224.985000610352, 142.229995727539, 34.5099983215332,
8.18000030517578, 8.57999992370605, 5.97599983215332, 5.63500022888184,
2.6500009536743];
end3 = [70.8960037231445, 39.6199989318848, 37.0660018920898, 14.210000038147,
4.09000015258789, 3.50999999046326, 2.98799991607666, 1.22500002384186,
0.795000016689301];
end4 = [165.423995971680, 162.725006103516, 133.610000610352, 31.8999996185303,
7.77099990844727, 7.40999984741211, 5.97599983215332, 4.40999984741211,
2.38499999046326];
C = [ end1' end2' end3' end4' ];
% Endmembers Correlation Matrix
RHO = corr(C)
% Plot spectral signatures of endmembers
ends = { 'Vegetation'
        'High Albedo'
        'Low Albedo'
        'Soil'};
figure;
plot(end1,'g*-','LineWidth',2.0,'Marker','.'); hold on
plot(end2,'c*-','LineWidth',2.0,'Marker','.'); hold on
plot(end3,'y*-','LineWidth',2.0,'Marker','.'); hold on
plot(end4,'r*-','LineWidth',2.0,'Marker','.'); hold on
title('Endmembers Spectral Signatures', 'FontName', 'arial');
endmember_ss = strcat(outname, '_Endmembers.tif');
print('-dtiff','-r300',endmember_ss);
x=zeros(numend);
tp = zeros(numend,1); % create empty target pixel
newimg = zeros(m,n,numend); % create empty vector for new classification image
errimg = zeros(m,n,2); % create empty vector for te classification error image
for i=1:m
    for j=1:n
        for k=1:bands
            tp(k) = img(i,j,k); %target pixel
        end
        if (tp==0) % pixel is in the image boarder
            x(:)=0;
            resnorm=0;
        elseif (water(i,j)==1) % pixel is masked as sea water
           x(:)=0;
           resnorm=0;
        else % classify the pixel
            % x = pixelVIS(tp,C); %classify the pixel
            [x,resnorm,residual,exitflag,output,lambda] = pixelVIS(tp,C);
        end
        for l=1:numend
           newimg(i,j,l)=x(l); % create classified image
        end
        errimg(i,j,1)=resnorm; % error image: norm of residualds
        errimg(i,j,2)=sqrt(resnorm/numend); % error image: RMSE
    end
end
% clear('i','j','k','l');
```

```
μαραρτήματα
```

```
% Write the fractions tiff image
geotiffwrite(outputim,[],newimg, 32, opt)
% Write the error tiff image ( RMSE=sqrt((norm(C*x-tp)^2)/numend) )
geotiffwrite(classerror,[],errimg, 32, opt)
% Read fractions from R results
newimg = imread('LAD_fractions_30.tif');
for i=1:m
    for j=1:n
        if
(newimg(i,j,1)<0)\&(newimg(i,j,2)<0)\&(newimg(i,j,3)>0.999)\&(newimg(i,j,4)<0)
            newimg(i,j,1)=NaN;
             newimg(i,j,2)=NaN;
            newimg(i,j,3)=NaN;
            newimg(i,j,4)=NaN;
        end
         %water mask
        if water(i,j)==1
            newimg(i,j,:)=NaN;
        end
    end
end
% Deal with Negative values of LAD
for i=1:m
    for j=1:n
        for k=1:numend
             if (newimg(i,j,k)<0)</pre>
                newimg(i,j,k)=0;
             end
        end
    end
end
\texttt{testLAD}=\texttt{newimg}(:,:,1)+\texttt{newimg}(:,:,2)+\texttt{newimg}(:,:,3)+\texttt{newimg}(:,:,4);
for i=1:m
    for j=1:n
        if (testLAD(i,j)>1)
            newimg(i,j,:)=NaN;
        end
    end
end
% % Read Fractions tif image
% newimg = imread('test00_classif.tif'); %CLS_fractions_no_water
% errimg = imread('test00_cerror.tif');
% Plot the fraction
for l=1:numend
    figure
    imagesc(newimg(:,:,1));
    % colormap(gray);
    colorbar;
    title(ends{1,1}, 'FontName', 'arial');
    namez = strcat(outname, '_', char(ends{1,1}), '.tif');
    print('-dtiff','-r300',namez); clear('namez');
end
figure
imagesc(errimg(:,:,2));
colormap(gray); colorbar('FontName','arial');
title('Classification RMSE','FontName','arial');
```

```
% Count the time
toc(t1)
%% Compute emissivity
emimg = zeros(m,n); % create empty vector for new emissivity image
for i=1:m
    for j=1:n
        sumem=0;
        for k=1:numend
            if (newimg(i,j,:)==0) % boarder
                sumem = 0;
            elseif (water(i,j)==1) % pixel is water
                sumem = 0;
            else % compute emissivity
                sumem = sumem + em(k)*newimg(i,j,k);
            end
        end
        emimg(i,j) = sumem;
    end
end
% Write the emissivity tiff image
geotiffwrite(emissivim,[],emimg, 32, opt)
% Create Matlab Figure
for i=1:m
    for j=1:n
        if (emimg(i,j)==0)
            emimg(i,j) = NaN;
        end
    end
end
figure
imagesc(emimg);
colormap(bone); colorbar('FontName', 'arial');
title('Emissivity (mine)','FontName','arial');
print('-dtiff','-r300',strcat(outname,'_emissivity.tif'));
%% Compute LST using Single Channel JM&S Algorithm
Lsen = imread('calibrated_radiance_13.tif');
wv = imread('pw.tif'); %read water vapor image (from MODIS)
wv = double(wv); wv = 0.001.*wv; %scaling
LST = zeros(m,n);
for i=1:m
    for j=1:n
        if (emimg(i,j)==0) % pixel is boarder
            LST(i,j) = 0;
        elseif (water(i,j)==1) % pixel is water
            LST(i,j) = 0;
        else % compute LST
            LST(i,j) = LST_SC_JMandS(Lsen(i,j), emimg(i,j), wv(i,j)); % 2.67);
        end
    end
end
% Write the LST tiff image
geotiffwrite(LSTim,[],LST, 32, opt)
% Create Matlab Figure
```

```
for i=1:m
    for j=1:n
        if (LST(i,j)==0)
            LST(i,j) = NaN;
        end
    end
end
figure
imagesc(LST);
colormap(hot); colorbar('FontName', 'arial'); caxis([295 326])
title('LST (mine)','FontName','arial');
print('-dtiff','-r300',strcat(outname,'_LST.tif'));
%% NDVI-based emissivity and LST (JMS)
% NDVI emissivity + LST at the same loop
reflectance = imread('apparent_reflectance.tif'); %read reflectance image
JMS=zeros(m,n,2); %band 1: emissivity, band 2: LST
for i=1:m
    for j=1:n
        if (water(i,j)==1) % pixel is water
            JMS(i, j, 1) = 0;
            JMS(i,j,2) = 0;
        else
            % emissivity
            JMS(i,j,1) =
emissivity_NDVI_JMandS(reflectance(i,j,2),reflectance(i,j,3));
            % LST
            JMS(i,j,2) = LST_SC_JMandS(Lsen(i,j), JMS(i,j,1), wv(i,j)); %2.67);
        end
    end
end
geotiffwrite(JMSim,[],JMS, 32, opt);
% Create Matlab Figure
for i=1:m
    for j=1:n
        if (JMS(i,j,1)==0)
            JMS(i,j,1) = NaN;
        end
        if (JMS(i,j,2)==0)
            JMS(i,j,2) = NaN;
        end
    end
end
figure
imagesc(JMS(:,:,1)); colormap(bone); colorbar('FontName','arial');
title('Emissivity (JM&S)','FontName','arial');
print('-dtiff','-r300',strcat(outname,'_emissivity_JMS.tif'));
figure
imagesc(JMS(:,:,2)); colormap(hot); colorbar('FontName','arial'); caxis([295 326]);
title('LST (JM&S)','FontName','arial');
print('-dtiff','-r300',strcat(outname,'_LST_JMS.tif'));
%% LST map using AST05 emissivity and JMS algorithm
% read emissivity from ASTER Product file (AST05)
AST05 = imread('ast05_emissivity_ch13.tif');
AST_JMS=zeros(m,n);
for i=1:m
```

```
87 Παραρτήματα
```

```
for j=1:n
        if (water(i,j)==1) % pixel is water
            AST_JMS(i,j) = 0;
            AST_JMS(i,j) = 0;
        else
            % LST
            AST_JMS(i,j) = LST_SC_JMandS(Lsen(i,j), AST05(i,j), wv(i,j)); %2.67);
        end
    end
end
geotiffwrite(AST_JMSim,[],AST_JMS, 32, opt);
% Create Matlab Figure
for i=1:m
    for j=1:n
        if (AST_JMS(i,j)==0)
            AST_JMS(i,j) = NaN;
        end
    end
end
%% Validation
% read LST from ASTER Product file (AST08)
AST08 = imread('ast08_lst.tif');
AST08 = AST08+273.16; % Celcius to Kelvin
%geotiffwrite('AST08_lst_K.tif',[],AST08, 32, opt);
% Create Matlab Figures for ASTER Products
for i=1:m
    for j=1:n
        if (water(i,j)==1)
            AST05(i,j) = NaN;
            AST08(i,j) = NaN;
        end
    end
end
figure
imagesc(AST05); colormap(bone); colorbar('FontName','arial'); title('Emissivity
(AST05)', 'FontName', 'arial');
print('-dtiff','-r300',strcat(outname,'_emissivity_AST.tif'));
figure
imagesc(AST08); colormap(hot); colorbar('FontName','arial'); caxis([295 326]);
title('LST (AST08)','FontName','arial');
print('-dtiff','-r300',strcat(outname,'_LST_AST.tif'));
figure
imagesc(AST_JMS); colormap(hot); colorbar('FontName', 'arial'); caxis([295 326]);
title('LST (from AST05 and JM&S)','FontName','arial');
print('-dtiff','-r300',strcat(outname,'_AST_JMS.tif'));
JMSd=zeros(m,n,3); % JMS vs ASTER products
mined=zeros(m,n,3); % mine vs ASTER products
mineJMSd=zeros(m,n,2); % mine vs JMS products
% resampling at 90x90
JMS90(:,:,1)=ASTER15x15_2_90x90(JMS(:,:,1));
JMS90(:,:,2)=ASTER15x15_2_90x90(JMS(:,:,2));
emimg90=ASTER15x15_2_90x90(emimg);
LST90=ASTER15x15_2_90x90(LST);
```

```
🚫 Παραρτήματα
```

```
for i=1:m
    for j=1:n
        if (water(i,j)==1) %pixel is sea
            % JMS vs ASTER products
            JMSd(i,j,1) = 0;
            JMSd(i,j,2) = 0;
            JMSd(i,j,3) = 0; %LST from JMS algorithm using AST05
            % mine vs ASTER products
            mined(i,j,1) = 0; %emissivity
            mined(i,j,2) = 0; %LST from AST08
            mined(i,j,3) = 0; %LST from JMS algorithm using AST05
            % mine vs JMS products
            mineJMSd(i,j,1) = 0;
            mineJMSd(i,j,2) = 0;
        else
            % JMS vs ASTER products
            JMSd(i,j,1) = JMS90(i,j,1) - AST05(i,j); %emissivity
            JMSd(i,j,2) = JMS90(i,j,2) - AST08(i,j); %LST
            JMSd(i,j,3) = JMS90(i,j,2) - AST_JMS(i,j); %LST
            % mine vs ASTER products
            mined(i,j,1) = emimg90(i,j) - AST05(i,j);
            mined(i,j,2) = LST90(i,j) - AST08(i,j);
            mined(i,j,3) = LST90(i,j) - AST_JMS(i,j); %LST
            % mine vs JMS products
            mineJMSd(i,j,1) = emimg(i,j) - JMS(i,j,1);
            mineJMSd(i,j,2) = LST(i,j) - JMS(i,j,2);
        end
    end
end
geotiffwrite(JMS_AST_diff,[],JMSd, 32, opt);
geotiffwrite(mine_AST_diff,[],mined, 32, opt);
geotiffwrite(mine_JMS_diff,[],mineJMSd, 32, opt);
% Vectors of Errors
% JMS vs ASTER products
JMSd1 = JMSd(:,:,1); JMSd1 = JMSd1(:); %emissivity
JMSd2 = JMSd(:,:,2); JMSd2 = JMSd2(:); %LST from ASTER
JMSd3 = JMSd(:,:,3); JMSd3 = JMSd3(:); &LST from JMS and AST05
% mine vs ASTER products
mined1 = mined(:,:,1); mined1 = mined1(:); %emissivity
mined2 = mined(:,:,2); mined2 = mined2(:); %LST from ASTER
mined3 = mined(:,:,3); mined3 = mined3(:); %LST from JMS and AST05
% mine vs JMS products
mineJMSd1 = mineJMSd(:,:,1); %emissivity
mineJMSd2 = mineJMSd(:,:,2); %LST from JMS and AST05
orl=ones(m,n);
or2=or1+or1;
figure;
boxplot([mined1(:);JMSd1(:)],[or1(:);or2(:)]);
title('emissivity','FontName','arial')
print('-dtiff','-r300',strcat(outname,'_box_emissiv.tif')); close;
figure;
boxplot([mined2(:);JMSd2(:)],[or1(:);or2(:)]);
title('LST (against AST)','FontName','arial')
print('-dtiff','-r300',strcat(outname,'_box_LST.tif')); close;
figure;
boxplot([mined3(:);JMSd3(:)],[or1(:);or2(:)]);
title('LST (against JMS+AST)','FontName','arial')
print('-dtiff','-r300',strcat(outname,'_box_LST_JMS.tif')); close;
clear or1 or2
```

00 Παραρτήματα

```
%
% ** Print txt files **
fid = fopen(errorstxt, 'w');
fprintf(fid,txttitle);
fprintf(fid, '\n%f %f n',endl);
fprintf(fid, '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f \n', end2);
fprintf(fid,'%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f \n',end3);
fprintf(fid,'%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f \n\n',end4);
fprintf(fid, '\n**** Fits ****');
[p1 p2 cor]=scatter_and_fit(double(JMS90_1(:)),double(AST05(:)));
fprintf(fid, '\nSlope=%f, Intr=%f, Corr=%f, R=', p1,p2,cor);
[p1 p2 cor]=scatter_and_fit(double(emimg90(:)),double(AST05(:)));
fprintf(fid,'\nSlope=%f, Intr=%f, Corr=%f', p1,p2,cor);
[p1 p2 cor]=scatter_and_fit(double(emimg90(:)),double(JMS90_1(:)));
fprintf(fid, '\nSlope=%f, Intr=%f, Corr=%f\n\n', p1,p2,cor);
fprintf(fid,'**** JMS vs. ASTER Products ****\n');
%remove NaNs
zi = isnan(JMSd1); JMSd1(zi)=0; clear zi;
zi = isnan(JMSd2); JMSd2(zi)=0; clear zi;
zi = isnan(JMSd3); JMSd3(zi)=0; clear zi;
fprintf(fid, 'Emissivity - Mean: %f \n', mean(JMSd1(:)));
fprintf(fid,'Emissivity - Std: %f \n', std(JMSd1(:)));
fprintf(fid,'Emissivity - MSE: %f \n', (norm(JMSd1)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'Emissivity - RMSE: %f \n', sqrt((norm(JMSd1)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'Emissivity - MeanAE: %f \n', mean(abs(JMSd1)));
fprintf(fid,'Emissivity - MedianAE: %f \n\n', median(abs(JMSd1)));
fprintf(fid,'LST - Mean: f \ \ (JMSd2(:)));
fprintf(fid,'LST - Std: %f \n', std(JMSd2(:)));
fprintf(fid,'LST - MSE: f \n', (norm(JMSd2)^2)/(m*n));
fprintf(fid, 'LST - RMSE: %f \n', sqrt((norm(JMSd2)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'LST - MeanAE: %f \n', mean(abs(JMSd2)));
fprintf(fid,'LST - MedianAE: %f \n\n', median(abs(JMSd2)));
fprintf(fid,'AST_LST - Mean: %f \n', mean(JMSd3(:)));
fprintf(fid,'AST_LST - Std: %f \n', std(JMSd3(:)));
fprintf(fid,'AST_LST - MSE: %f \n', (norm(JMSd3)^2)/(m*n));
fprintf(fid, 'AST_LST - RMSE: %f \n', sqrt((norm(JMSd3)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'AST_LST - MeanAE: %f \n', mean(abs(JMSd3)));
fprintf(fid, 'AST_LST - MedianAE: %f \n\n', median(abs(JMSd3)));
fprintf(fid, '\n**** mine vs. ASTER Products ****\n');
%remove NaNs
zi = isnan(mined1); mined1(zi)=0; clear zi;
zi = isnan(mined2); mined2(zi)=0; clear zi;
zi = isnan(mined3); mined3(zi)=0; clear zi;
fprintf(fid,'Emissivity - Mean: %f \n', mean(mined1));
fprintf(fid,'Emissivity - Std: %f \n', std(mined1));
fprintf(fid, 'Emissivity - MSE: %f \n', (norm(mined1)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'Emissivity - RMSE: %f \n', sqrt((norm(mined1)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'Emissivity - MeanAE: %f \n', mean(abs(mined1)));
fprintf(fid,'Emissivity - MedianAE: %f \n\n', median(abs(mined1)));
fprintf(fid,'LST - Mean: f \ \ (n', mean(mined2));
fprintf(fid,'LST - Std: %f \n', std(mined2));
fprintf(fid,'LST - MSE: %f \n', (norm(mined2)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'LST - RMSE: %f \n', sqrt((norm(mined2)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'LST - MeanAE: %f \n', mean(abs(mined2)));
fprintf(fid, LST - MedianAE: &f \n\n', median(abs(mined2)));
fprintf(fid,'AST_LST - Mean: %f \n', mean(mined3));
fprintf(fid, 'AST_LST - Std: %f \n', std(mined3));
```

ο Παραρτήματα

```
fprintf(fid, 'AST_LST - MSE: &f \n', (norm(mined3)^2)/(m*n));
fprintf(fid, 'AST_LST - RMSE: %f \n', sqrt((norm(mined3)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'AST_LST - MeanAE: %f \n', mean(abs(mined3)));
fprintf(fid, 'AST_LST - MedianAE: %f \n\n', median(abs(mined3)));
fprintf(fid, '\n**** mine vs. JMS ****\n');
%remove NaNs
zi = isnan(mineJMSd1); mineJMSd1(zi)=0; clear zi;
zi = isnan(mineJMSd2); mineJMSd2(zi)=0; clear zi;
fprintf(fid,'Emissivity - Mean: %f \n', mean(mineJMSd1(:)));
fprintf(fid,'Emissivity - Std: %f \n', std(mineJMSdl(:)));
fprintf(fid,'Emissivity - MSE: %f \n', (norm(mineJMSd1)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'Emissivity - RMSE: %f \n', sqrt((norm(mineJMSd1)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'Emissivity - MeanAE: %f \n', mean(abs(mineJMSdl(:))));
fprintf(fid,'Emissivity - MedianAE: %f \n\n', median(abs(mineJMSdl(:))));
fprintf(fid,'LST - Mean: %f \n', mean(mineJMSd2(:)));
fprintf(fid,'LST - Std: %f \n', std(mineJMSd2(:)));
fprintf(fid,'LST - MSE: %f \n', (norm(mineJMSd2)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'LST - RMSE: %f \n', sqrt((norm(mineJMSd2)^2)/(m*n)));
fprintf(fid, 'LST - MeanAE: %f \n', mean(abs(mineJMSd2(:)));
fprintf(fid, 'LST - MedianAE: %f \n\n', median(abs(mineJMSd2(:))));
%% Validation in "urban area"
% define the area
am = 1;
bm = 400;
an = 300;
bn = 900;
fprintf(fid, '\n\n\n------');
fprintf(fid, '\n**** Fits ****');
[p1 p2 cor]=scatter_and_fit(double(JMS90_1(:)),double(AST05(:)));
fprintf(fid, '\nSlope=%f, Intr=%f, Corr=%f', p1,p2,cor);
[p1 p2 cor]=scatter_and_fit(double(emimg90(:)),double(AST05(:)));
fprintf(fid, '\nSlope=%f, Intr=%f, Corr=%f', p1,p2,cor);
[p1 p2 cor]=scatter_and_fit(double(emimg90(:)),double(JMS90_1(:)));
fprintf(fid, '\nSlope=%f, Intr=%f, Corr=%f\n', p1,p2,cor);
fprintf(fid, '\n**** JMS vs. ASTER Products ****\n');
JMSd1 = JMSd(am:bm,an:bn,1); JMSd1 = JMSd1(:);
JMSd2 = JMSd(am:bm,an:bn,2); JMSd2 = JMSd2(:);
JMSd3 = JMSd(am:bm,an:bn,3); JMSd3 = JMSd3(:);
%remove NaNs
zi = isnan(JMSd1); JMSd1(zi)=0; clear zi;
zi = isnan(JMSd2); JMSd2(zi)=0; clear zi;
zi = isnan(JMSd3); JMSd3(zi)=0; clear zi;
fprintf(fid,'Emissivity - Mean: %f \n', mean(JMSd1(:)));
fprintf(fid,'Emissivity - Std: %f \n', std(JMSd1(:)));
fprintf(fid,'Emissivity - MSE: %f \n', (norm(JMSd1)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'Emissivity - RMSE: %f \n', sqrt((norm(JMSd1)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'Emissivity - MeanAE: %f \n', mean(abs(JMSd1)));
fprintf(fid,'Emissivity - MedianAE: %f \n\n', median(abs(JMSd1)));
fprintf(fid,'LST - Mean: f \ \ (JMSd2(:)));
fprintf(fid,'LST - Std: %f \n', std(JMSd2(:)));
fprintf(fid,'LST - MSE: %f \n', (norm(JMSd2)^2)/(m*n));
fprintf(fid, 'LST - RMSE: %f \n', sqrt((norm(JMSd2)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'LST - MeanAE: %f \n', mean(abs(JMSd2)));
fprintf(fid,'LST - MedianAE: %f \n\n', median(abs(JMSd2)));
```

Παραρτήματα

```
fprintf(fid,'AST_LST - Mean: %f \n', mean(JMSd3(:)));
fprintf(fid, 'AST_LST - Std: %f \n', std(JMSd3(:)));
fprintf(fid, 'AST_LST - MSE: %f \n', (norm(JMSd3)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'AST_LST - RMSE: %f \n', sqrt((norm(JMSd3)^2)/(m*n)));
fprintf(fid, 'AST_LST - MeanAE: %f \n', mean(abs(JMSd3)));
fprintf(fid, 'AST_LST - MedianAE: %f \n\n', median(abs(JMSd3)));
fprintf(fid, '\n**** mine vs. ASTER Products ****\n');
mined1 = mined(am:bm,an:bn,1); mined1 = mined1(:);
mined2 = mined(am:bm,an:bn,2); mined2 = mined2(:);
mined3 = mined(am:bm,an:bn,3); mined3 = mined3(:);
%remove NaNs
zi = isnan(mined1); mined1(zi)=0; clear zi;
zi = isnan(mined2); mined2(zi)=0; clear zi;
zi = isnan(mined3); mined3(zi)=0; clear zi;
fprintf(fid,'Emissivity - Mean: %f \n', mean(mined1));
fprintf(fid,'Emissivity - Std: %f \n', std(mined1));
fprintf(fid,'Emissivity - MSE: %f \n', (norm(mined1)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'Emissivity - RMSE: %f \n', sqrt((norm(mined1)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'Emissivity - MeanAE: %f \n', mean(abs(mined1)));
fprintf(fid, 'Emissivity - MedianAE: %f \n\n', median(abs(mined1)));
fprintf(fid,'LST - Mean: %f \n', mean(mined2));
fprintf(fid,'LST - Std: %f \n', std(mined2));
fprintf(fid,'LST - MSE: %f \n', (norm(mined2)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'LST - RMSE: %f \n', sqrt((norm(mined2)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'LST - MeanAE: %f \n', mean(abs(mined2)));
fprintf(fid,'LST - MedianAE: %f \n\n', median(abs(mined2)));
fprintf(fid,'AST_LST - Mean: %f \n', mean(mined3));
fprintf(fid, 'AST_LST - Std: %f \n', std(mined3));
fprintf(fid, 'AST_LST - MSE: %f \n', (norm(mined3)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'AST_LST - RMSE: %f \n', sqrt((norm(mined3)^2)/(m*n)));
fprintf(fid, 'AST_LST - MeanAE: %f \n', mean(abs(mined3)));
fprintf(fid, 'AST_LST - MedianAE: %f \n\n', median(abs(mined3)));
fprintf(fid, '\n**** mine vs. JMS ****\n');
mineJMSd1 = mineJMSd(am:bm,an:bn,1);
mineJMSd2 = mineJMSd(am:bm,an:bn,2);
fprintf(fid,'Emissivity - Mean: %f \n', mean(mineJMSdl(:)));
fprintf(fid, 'Emissivity - Std: %f \n', std(mineJMSd1(:)));
fprintf(fid,'Emissivity - MSE: %f \n', (norm(mineJMSd1)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'Emissivity - RMSE: %f \n', sqrt((norm(mineJMSd1)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'Emissivity - MeanAE: %f \n', mean(abs(mineJMSdl(:))));
fprintf(fid,'Emissivity - MedianAE: %f \n\n', median(abs(mineJMSdl(:))));
fprintf(fid, 'LST - Mean: f \ \ (n', mean(mineJMSd2(:)));
fprintf(fid,'LST - Std: %f \n', std(mineJMSd2(:)));
fprintf(fid,'LST - MSE: %f \n', (norm(mineJMSd2)^2)/(m*n));
fprintf(fid,'LST - RMSE: %f \n', sqrt((norm(mineJMSd2)^2)/(m*n)));
fprintf(fid,'LST - MeanAE: %f \n', mean(abs(mineJMSd2(:))));
fprintf(fid,'LST - MedianAE: %f \n\n', median(abs(mineJMSd2(:))));
```

fclose(fid);
fprintf('\nFile %s successfully created\n\n', errorstxt);

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ – ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΑΤLAB

Στο παράρτημα αυτό παρατίθεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε σε Maltab για την προσπέλαση την πληροφορίας της φασματικής βιβλιοθήκης ASTER και τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής στο φασματικό κανάλι 10.25 - 10.95 μm του ASTER.

Τα δεδομένα της Φασματικής Βιβλιοθήκης ASTER είναι προσπελάσιμα από το δικτυακό τόπο:

#### http://speclib.jpl.nasa.gov/

```
%% Reads and Plots the ASTER Spectral library data
% Reads all the .txt files from this directory, computes the emissivity
% (E=1-reflectance) using ASTER band 13 (10.25 - 1.95 µm) and prints
% statistics for all the samples (mean and std for all samples)
%% Requires to run
% read_ASTER_SL.m
%% Script
clear
Filelist = ls('*.spectrum.txt');
[m n]=size(Filelist);
for i=1:m %for all files
    ifile = Filelist(i,:);
    %read name of class
    fid = fopen(ifile);
    tline1 = fgetl(fid); tline1(1:6)=[];
    tline2 = fgetl(fid); tline2(1:6)=[];
    tline3 = fgetl(fid); tline3(1:7)=[];
    tline3=strcat(num2str(i),'.',tline3);
    TypeName = strcat(tline3, ' - ', tline1);
    fprintf('%s \n',TypeName)
    fclose(fid);
    read_ASTER_SL(ifile) %read the file
    [k l]=size(data);
    z=1;
    for j=1:k %for all data in file
        % look into the ASTER band 13: 10.25 - 10.95 μm
        if ((data(j,1)>10.25)&&(data(j,1)<10.95))
            add1(z)=data(j,2);
            z=z+1;
        end
    end
    % use the mean value in the channel
    meanch13=mean(add1);
    % compute the emissivity = 1-reflectance
    w106(i) = 1-meanch13/100;
    clear('data','textdata')
end
%% All Man-made Materials
figure;
plot(w106);
```

Ο Παραρτήματα

```
hold on
plot([1 m],[mean(w106) mean(w106)] ,'-.')
plot([1 m],[mean(w106)+std(w106) mean(w106)+std(w106)],':')
plot([1 m],[mean(w106)-std(w106) mean(w106)-std(w106)],':')
xlabel('Manmade Material Types');
ylabel('emissivity');
fprintf('\nMean: %f\n',mean(w106));
fprintf('\nStd: %f\n',std(w106));
fprintf('\nMin: %f\n',min(w106));
fprintf('\nMax: %f\n',max(w106));
%% High Albedo: Bright materials
r = [4 9 11 14 16 17 19 20 29 37];
figure;
plot(w106(r));
hold on
plot([1 size(w106(r),2)],[mean(w106(r)) mean(w106(r))],'-.')
plot([1 size(w106(r),2)],[mean(w106(r))+std(w106(r))
mean(w106(r))+std(w106(r))],':')
plot([1 size(w106(r),2)],[mean(w106(r))-std(w106(r)) mean(w106(r))-
std(w106(r))],':')
title('High Albedo Materials');
xlabel('Manmade Material Types');
ylabel('emissivity');
fprintf('\nMean: %f',mean(w106(r)));
fprintf('\nStd: %f',std(w106(r)));
fprintf('\nMin: %f',min(w106(r)));
fprintf('\nMax: %f\n',max(w106(r)));
%% Low albedo: Dark materials
r = [1 7 34 35 52];
figure;
plot(w106(r));
hold on
plot([1 size(w106(r),2)],[mean(w106(r)) mean(w106(r))],'-.')
plot([1 size(w106(r),2)],[mean(w106(r))+std(w106(r))
mean(w106(r))+std(w106(r))],':')
plot([1 size(w106(r),2)],[mean(w106(r))-std(w106(r)) mean(w106(r))-
std(w106(r))],':')
title('Low Albedo Materials');
xlabel('Manmade Material Types');
ylabel('emissivity');
fprintf('\nMean: %f',mean(w106(r)));
fprintf('\setminus nStd: &f', std(w106(r)));
fprintf('\nMin: %f',min(w106(r)));
fprintf('\nMax: &f\n',max(w106(r)));
```