

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



## Πτυχιακή εργασία

ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ  
ΧΡΗΣΕΩΝ/ΚΑΛΥΨΗΣ ΓΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ  
ΛΑΡΝΑΚΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ  
ΕΙΚΟΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Γιώργος Βάσιλας

Λεμεσός 2013

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## **Πτυχιακή εργασία**

ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ  
ΧΡΗΣΕΩΝ/ΚΑΛΥΨΗΣ ΓΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ  
ΛΑΡΝΑΚΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ  
ΥΨΗΛΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Γιώργος Βάσιλας

Σύμβουλος καθηγητής  
Δρ./κος Διόφαντος Χατζμιτσής

Λεμεσός 2013

## **Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Γιώργος Βάσιλας, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Διόφαντο Χατζιμητησί για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την περάτωση του δύσκολου αυτού εγχειρήματος, καθώς και για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του σε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Διδάκτορα κ. Άθω Αγαπίου του εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης, για τη γενικότερη βοήθειά του στην επίλυση του τηλεπισκοπικού ζητήματος κατά την εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης εικόνας.

Ευχαριστώ επίσης το Τμήμα Κτηματολογίου & Χωρομετρίας για την βοήθεια και τη συμπαράσταση κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που ήταν πάντα δίπλα μου σε αυτό το στάδιο της ζωής μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη διερευνάται η διαχρονική εξέλιξη των κύριων κατηγοριών χρήσης/κάλυψης γης της ευρύτερης περιοχής Λάρνακας, την τελευταία δεκαετία με τη βοήθεια τηλεπισκοπικών εικόνων. Η εργασία εστιάζεται κυρίως στην παρακολούθηση του αστικού και περιαστικού ιστού στην εν λόγω περιοχή.

Στο πλαίσιο εφαρμογής της τηλεπισκοπικής μεθοδολογίας, για το χρονικό διάστημα 2004 μέχρι το 2012, επιλέχθηκαν δύο δορυφορικές εικόνες των δορυφόρων QuickBird και Geoeye-1, οι οποίες και ταξινομήθηκαν με διάφορες μεθοδολογίες. Αρχικά, στη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση αν και ο αλγόριθμος διαχωρίζει την εικόνα αρχικά σε πολλές κλάσεις, οι θεματικές κατηγορίες που δημιουργήθηκαν γενικεύονται στις ακόλουθες: θάλασσα, βλάστηση, αστική δόμηση, έδαφος, δρόμοι, δεξαμενές και αλυκές. Τα αποτελέσματα δεν κρίθηκαν ικανοποιητικά για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης και ιδιαίτερα στην περίπτωση των δομημένων περιοχών αφού υπήρχε φασματική σύγχυση και επικάλυψη σε αρκετές από αυτές. Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση επιλέγονται τρεις εναλλακτικές μεθοδολογίες, όπου καλύτερα αποτελέσματα δίνει ο αλγόριθμος της Μέγιστης Πιθανοφάνειας ως ο βέλτιστος ταξινομητής. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν, θεματικοί χάρτες, με αντίστοιχες κλάσεις με εκείνες που υπαγόρευε η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Για το αποτέλεσμα της επιβλεπόμενης ταξινόμησης δημιουργήθηκε ο Πίνακας Σύγχυσης, ύστερα από την επιλογή δεδομένων ελέγχου μέσω φωτοερμηνείας. Ο δείκτης *Kappa*, για την εικόνα λήψης 2004, έδωσε αποτέλεσμα 0.78, και 0.87 για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση του 2012. Μετά το πέρας της μελέτης αυτής, συντάχθηκαν δύο χάρτες αλλαγών χρήσεων/κάλυψης γης της περιοχής της Λάρνακας για το 2004 και για το 2012.

Η κατανόηση του τρόπου ανάπτυξης μιας περιοχής είναι ύψιστης σημασίας για τους μηχανικούς και για τους μελετητές σχεδιασμού πόλεων. Για το λόγο αυτό, η διαχρονική εξέλιξη χρήσης/κάλυψης γης μελετήθηκε για δύο δορυφορικές εικόνες όπου λάμβαναν υπόψη τις χρήσεις γης.



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	iv
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....	vi
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	viii
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ</b> .....	ix
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	4
2.1. Η χαρτογράφηση χρήσης/κάλυψης γης απο δορυφορικά δεδομένα .....	4
2.2. Τεχνικές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης για την χαρτογράφηση χρήσης/κάλυψης γης.....	12
2.3. Ταξινόμηση .....	20
2.3.1. Τα στάδια της ταξινόμησης .....	23
2.3.2. Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση.....	37
2.3.3. Επιβλεπόμενη ταξινόμηση. ....	39
2.3.4. Διαφορές επιβλεπόμενης και μή επιβλεπόμενης ταξινόμησης.....	40
3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ .....	44
3.1. Περιγραφή της περιοχής μελέτης .....	44
3.2.1. Δεδομένα Quickbird .....	50
3.2.2. Δεδομένα Geoeye-1.....	53
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	56
4.1. Προεπεξεργασία δεδομένων.....	56
4.1.1. Γεωμετρική διόρθωση .....	56
4.1.2. Πειραματική διαδικασία – Γεωμετρικής διόρθωσης.....	76
4.2. ΜΕΤΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	89
4.2.1. Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση .....	89
4.2.2. Επιβλεπόμενη ταξινόμηση .....	93
5. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	117

5.1. Εντοπισμός μεταβολών - Αστικοποίηση.....	117
5.2. Εκτίμηση της έκτασης της Δομημένης Περιοχής .....	122
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	129
7. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	132
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	134



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Το σύστημα ταξινόμησης χρήσεων γης και κάλυψης γης του Anderson et al. (1976). .....	7
Πίνακας 2-2: Πίνακας πιθανότητας για πέντε τάξεις. ....	35
Πίνακας 3-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου QuickBird .....	51
Πίνακας 3-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου GEOEYE .....	54
Πίνακας 4-1: Πίνακας πιθανότητας (contingency table) των υπογραφών της επιβλεπόμενης ταξινόμησης που εφαρμόστηκε στην εικόνα. ....	99
Πίνακας 4-2: Αναφορά ακρίβειας ταξινόμησης της εκόνας του 2012. ....	110
Πίνακας 4-3: Αναφορά ακρίβειας ταξινόμησης της εκόνας του 2004. ....	111
Πίνακας 4-4: Συντελεστής Kappa για την εικόνα του 2012. ....	113
Πίνακας 4-5: Συντελεστής Kappa για την εικόνα του 2004. ....	114
Πίνακας 4-6: Χρωματική κλίμακα των τάξεων κάλυψης γης. ....	116

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Εικόνα 2.1: Η διαδικασία της φασματικής ταξινόμησης σε μια εικόνα διαστάσεων 7x7.....	21
Εικόνα 2.2: (α) Φασματικές υπογραφές για τρεις γενικές επιφάνειες: βλάστηση, έδαφος, νερό. (β) Δισδιάστατος φασματικός χώρος, στον οποίο ο οριζόντιος άξονας είναι η απόκριση στο μήκος κύματος $\lambda_1$ και ο κατακόρυφος η απόκριση στο $\lambda_2$ . (γ) Διακριτές τάξεις σε ένα δισδιάστατο φασματικό χώρο στον οποίο διακρίνεται η διασπορά των σημείων τους. (δ) Τα όρια διαχωρισμού των τάξεων (Τροποποιημένο σχήμα από Sabins, 1996). .....	21
Εικόνα 2.3: Παράδειγμα φασματικού χώρου τριών διαστάσεων των καναλιών 1,2 και 3 μιας εικόνας με τέσσερις φασματικές τάξεις καλά διαχωρισμένες (K = καλλιέργειες, E = γυμνό έδαφος, Δ = δάσος και N = νερό) (Τροποποιημένο σχήμα από Sabins, 1996). .....	23
Εικόνα 2.4: Δημιουργία εκπαιδευτικών πεδίων με τη διαδικασία της επιβλεπόμενης εκπαίδευσης. ....	24
Εικόνα 2.5: Η διαδικασία ορισμού των ορίων τεσσάρων μη παραμετρικών υπογραφών σε ένα δισδιάστατο φασματικό χώρο (Τροποποιημένο σχήμα από Erdas Field Guide, 1999). .....	26
Εικόνα 2.6: Η διαδικασία ορισμού των ορίων πέντε μη παραμετρικών υπογραφών στον δισδιάστατο φασματικό χώρο των καναλιών 1 και 2 της εικόνας Landsat TM των νοτίων προαστίων της Αθήνας. Τάξη 1 = θάλασσα, Τάξη 2 = δασική βλάστηση, Τάξη 3 = καλλιέργειες, Τάξη 4 = αραιοκατοικημένες περιοχές, Τάξη 5 πυκνοκατοικημένες περιοχές. ....	26
Εικόνα 2.7: (α) Ο κανόνας ταξινόμησης της ελάχιστης απόστασης. Ένα εικονοστοιχείο της εικόνας αποδίδεται σε μια τάξη με βάση την απόσταση του στο φασματικό χώρο από το κέντρο της αντίστοιχης υπογραφής. Εδώ το εικονοστοιχείο ταξινομείται στην τάξη 1 (Τροποποιημένο σχήμα από Erdas Field Guide, 1999). (β) Τρεις τάξεις στο φασματικό χώρο του εγγύς υπερύθρου και του κόκκινου μιας πολυφασματικής εικόνας. Το εικονοστοιχείο (x1, x2) θα ταξινομηθεί στο σκυρόδεμα, με βάση τη φασματική απόστασή του από το κέντρο της τάξης. ....	27

Εικόνα 2.8 : (α) Τα ιστογράμματα δυο φασματικών υπογραφών σε ένα κανάλι A και (β) η αναπαράστασή τους στο διδιάστατο φασματικό χώρο των καναλιών A και B, στα οποία παρουσιάζεται το φαινόμενο της αλληλοεπικάλυψης των υπογραφών. ....	29
Εικόνα 2.9: . Ο διδιάστατος φασματικός χώρος στον οποίο έχουν χαραχθεί οι καμπύλες ίσης πιθανότητας για να ανήκει ένα εικονοστοιχείο σε μια τάξη. Σύμφωνα με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας, το εικονοστοιχείο χ θα αποδοθεί στην τάξη 2 καθώς η πιθανότητα ( $P = 0.7$ ) να ανήκει σε αυτή είναι μεγαλύτερη από την πιθανότητα ( $P = 0.4$ ) να ανήκει στην τάξη 1. ....	30
Εικόνα 2.10: Ο κανόνας ταξινόμησης του παραλληλεπίπεδου για τέσσερις υπογραφές χρησιμοποιώντας δυο τυπικές αποκλίσεις για τον καθορισμό των ορίων (Τροποποιημένο σχήμα από Erdas Field Guide, 1999). ....	32
Εικόνα 2.11: Αξιολόγηση τριών υπογραφών στο διδιάστατο φασματικό χώρο των καναλιών 1 και 4 της εικόνας Landsat TM της περιοχής των νότιων Αθηνών με τη βοήθεια ελλείψεων.....	33
Εικόνα 2.12: Ιστογράμματα δυο υπογραφών στο κανάλι 5 του Landsat TM (α) Θάλασσα, (β) Καλλιέργειες. ....	35
Εικόνα 2.13: Το εκπαιδευτικό πεδίο μιας υπογραφής υπερτιθέμενο στην τελική ταξινομημένη εικόνα. Αρκετά εικονοστοιχεία του εκπαιδευτικού δείγματος έχουν αποδοθεί σε άλλη τάξη. ....	35
Εικόνα 2.14: Αλγόριθμος ISODATA (α) Αρχικό στάδιο. Ο αλγόριθμος αντιστοιχεί με τυχαίο τρόπο σε κάθε μια ομάδα ένα κέντρο στο φασματικό χώρο (όπου $\mu$ και $\sigma$ η μέση τιμή και η απόκλιση των ψηφιακών τιμών όλων των εικονοστοιχείων της εικόνας σε ένα κανάλι). (β) Πρώτο πέρασμα. Τα εικονοστοιχεία της εικόνας αποδίδονται στις ομάδες. (γ) Δεύτερο πέρασμα. Υπολογίζεται, εκ νέου, η μέση ψηφιακή τιμή και η τυπική απόκλιση της κάθε ομάδας για όλα τα φασματικά κανάλια (Πηγή: Erdas Field Guide, 1999).....	39
Εικόνα 3.1: Όρια της περιοχής μελέτης.....	44
Εικόνα 3.2: Περιοχή μελέτης.....	49
Εικόνα 3.3: Αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης (2008). ....	49
Εικόνα 3.4: Δορυφόρος QuickBird.....	50

Εικόνα 3.5: Δορυφορική εικόνα QuickBird (2004) της περιοχής μελέτης στα κανάλια 4-3-2.....	52
Εικόνα 3.6: Δορυφόρος Geoeye-1.....	53
Εικόνα 3.7: Δορυφορική εικόνα Geoeye-1 (2012) της περιοχής μελέτης στα κανάλια 4-3-2.....	55
Εικόνα 4.1: Συστηματικές γεωμετρικές παραμορφώσεις (Πηγή:Bernstein and Ferneyhough, 1975).....	59
Εικόνα 4.2: Μή συστηματικές γεωμετρικές παραμορφώσεις (Πηγή: Harris, 1988).....	59
Εικόνα 4.3: (α) Παραμόρφωση ανάγλυφου και (β) πανοραμική παραμόρφωση.....	60
Εικόνα 4.4: Το φαινόμενο της γεωμετρικής παραμόρφωσης μιας δορυφορικής εικόνας λόγω μετατόπισης ανάγλυφου. Τα σημεία A, B και Γ μετατοπίζονται στην εικόνα στα σημεία A', B' και Γ' λόγω του ανάγλυφου σε συνδυασμό με τη γεωμετρία λήψης. ....	61
Εικόνα 4.5: Επίγεια σημεία ελέγχου GCP που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία .....	65
Εικόνα 4.6: Τρόπος λειτουργίας των RPC.....	65
Εικόνα 4.7: Η διαδικασία εισαγωγής εδαφικών σημείων ελέγχου στο Erdas Imagine. ....	73
Εικόνα 4.8: Η διαδικασία απόδοσης μιας ψηφιακής τιμής στο νέο εικονοστοιχείο (x,y) της ανορθωμένης εικόνας με βάση τη ψηφιακή τιμή (x', y') του εγγύτερου γείτονα της αρχικής εικόνας. Στην περίπτωση αυτή η ψηφιακή τιμή της αρχικής εικόνας δεν αλλοιώνεται. ....	75
Εικόνα 4.9: Η διαδικασία απόδοσης μιας ψηφιακής τιμής στο νέο εικονοστοιχείο (x , y) της ανορθωμένης εικόνας με βάση τη μέση ψηφιακή τιμή των τεσσάρων κοντινότερων εικονοστοιχείων (x' , y') της αρχικής εικόνας. Στην περίπτωση αυτή η ψηφιακή τιμή της αρχικής εικόνας αλλοιώνεται.. ....	76
Εικόνα 4.10: Η επιλογή του μαθηματικού μοντέλου. ....	77
Εικόνα 4.11: Τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος LTM – CGRS93. ....	78
Εικόνα 4.12: Ο καθορισμός του προβολικού συστήματος και του συστήματος των υψομέτρων. ....	79
Εικόνα 4.13: Η εισαγωγή των RPCs της εικόνας στο project. ....	80
Εικόνα 4.14: Εδαφικά σημεία ελέγχου (GCP) όπου οι συντεταγμένες των σημείων αυτών καθορίστηκαν στο πεδίο με χρήση GPS.....	80

Εικόνα 4.15: Τα σημεία φαίνονται αναλυτικά και στο «GCP Tool», με τις συντεταγμένες τους και χρώματα. ....	83
Εικόνα 4.16: Οπτικός έλεγχος γεωμετρικής διόρθωσης με χωρομετρικά δεδομένα. ....	86
Εικόνα 4.17: Επίγειο σημείο ελέγχου .....	86
Εικόνα 4.18: Επίγειο σημείο ελέγχου .....	88
Εικόνα 4.19: Επίγειο σημείο ελέγχου .....	88
Εικόνα 4.20: Ψευδόχρωμη εικόνα κλάσεων ISODATA αλγόριθμου. ....	92
Εικόνα 4.21: Παραδείγματα επιλογής εκπαιδευτικών πεδίων στην εικόνα Quickbird .....	94
Εικόνα 4.22: Συνένωση ίδιων φασματικών υπογραφών. ....	95
Εικόνα 4.23: Κατηγορίες εδαφοκάλυψης της περιοχής .....	97
Εικόνα 4.24: Θεματικές κατηγορίες επιβλεπόμενης ταξινόμησης εικόνας 2012.....	98
Εικόνα 4.25: Δημιουργία πίνακα διαχωρισμού (Separability Cell Array). ....	100
Εικόνα 4.26: Πίνακας διαχωρισμού (Separability Cell Array). ....	101
Εικόνα 4.27: Πίνακας Separability Cell Array .....	102
Εικόνα 4.28: Στατιστικά δεδομένα για την κλάση που αφορά δρόμους .....	104
Εικόνα 4.29: Προσδιορισμός παραμέτρων για επιβλεπόμενη ταξινόμηση. ....	105
Εικόνα 4.30: Προσδιορισμός παραμέτρων για επιβλεπόμενη ταξινόμηση, επιλογή με παραμετρικό κανόνα της Μέγιστης πιθανοφάνειας.....	105
Εικόνα 4.31: Επιλογή εικονοστοιχείων αναφοράς. ....	107
Εικόνα 4.32: Πίνακας ελέγχου των σφαλμάτων της ταξινόμησης.....	108
Εικόνα 5.1: Δορυφορική λήψη της περιοχής λιμανιού Λάρνακας με τη χρήση του δορυφόρου Geoseye (Αύγουστος 2012). Η εικόνα έχει χωρική διακριτική ικανότητα του μισού μέτρου και είναι στο ορατό τμήμα του φάσματος. ....	118
Εικόνα 5.2: Τελικό αποτέλεσμα επιβλεπόμενης ταξινόμησης για την εικόνα του 2004. ....	120
Εικόνα 5.3: Τελικό αποτέλεσμα επιβλεπόμενης ταξινόμησης για την εικόνα του 2012 .....	121
Εικόνα 5.4: Διαχρονική μεταβολή στη Δομημένη Περιοχή της υπό μελέτης περιοχή. ....	123
Εικόνα 5.5: Διαχρονική μεταβολή στη Δομημένη Περιοχή στο Δήμο Αραδίππου. .	125

Εικόνα 5.6: Διαχρονική μεταβολή στη Δομημένη Περιοχή στη Νέα Βιομηχανική Περιοχή στο Δήμο Αραδίππου. ....	126
Εικόνα 5.7: Δομημένη περιοχή το 2004. ....	
Εικόνα 5.8: Δομημένη περιοχή το 2012. ....	127
Εικόνα 5.9: Δομημένη περιοχή το 2004 (κόκκινο χρώμα) μαζί με του 2012 (πορτοκαλί χρώμα). ....	128

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, όλο και πιο καινοτόμες μέθοδοι επιστρατεύονται στις υπηρεσίες της χαρτογράφησης, με αποτέλεσμα να παράγονται διάφοροι τύποι χαρτών που εξυπηρετούν ποικίλες χρήσεις. Οι χαρτογράφοι πλέον είναι εξειδικευμένοι επιστήμονες, όπου έχουν στην υπηρεσία τους μια πληθώρα τύπου δεδομένων και εργαλείων, προκειμένου να απεικονίσουν μια υφιστάμενη κατάσταση. Οι αυξημένες ανάγκες για τη λήψη ορθών διαχειριστικών μέτρων και αποφάσεων κατέστησε την δημιουργία θεματικών χαρτών ένα εργαλείο μείζονος σημασίας. Χάρτες ειδών βλάστησης, διαχειριστικοί χάρτες, υδρολογικοί, εδαφολογικοί, χάρτες χρήσης/κάλυψης γης κ.α. είναι μερικά είδη θεματικών χαρτών που βρίσκουν εφαρμογή σήμερα.

Η τεχνολογία στην υπηρεσία της επιστήμης σε συνδυασμό με τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για δεδομένα, γρήγορα ξεπέρασε τους παραδοσιακούς χάρτες που κατασκευάζονταν χρονοβόρα σε σχεδιαστήρια βάσει εκτιμήσεων, επιτόπιων μετρήσεων και αυτοψιών στο πεδίο. Ακολούθησε η εποχή της αεροφωτογραφίας, όπου για πρώτη φορά απεικονίζονταν εύκολα και μαζικά μεγάλες επιφάνειες γης. Συνεπακόλουθα, άνησε η επιστήμη της φωτογραμμετρίας, χάρη στην οποία γίνονταν ακριβείς μετρήσεις και μετατροπές των μηκών και άλλων στοιχείων από τις αεροφωτογραφίες σε πραγματικά μεγέθη, προκειμένου να αποτυπωθούν σε χαρτί, βάσει κλίμακας για τη δημιουργία χαρτών. Επιπλέον, η επιστήμη της τηλεπισκόπησης και της χρήσης των δορυφορικών δεδομένων, φάνηκε επίσης, ότι μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στη χαρτογράφηση και παρακολούθηση μιας ευρύτερης περιοχής, με τη χρήση δεδομένων που εκτείνονται πέρα από το ορατό μήκος κύματος.

Με την κατάκτηση του διαστήματος, ο άνθρωπος έθεσε δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη γη, οι οποίοι σαρώνουν επί εικοσιτετραώρου βάσεως την επιφάνεια της. Τα διαστημικά προγράμματα που καλύπτουν τα έξοδα και την υποστήριξη της λειτουργίας αυτών των δορυφόρων είναι τόσο εθνικά όσο και πολυεθνικά (Landsat, SPOT, RapidEye κ.α.). Αυτά παρέχουν ενημερωμένα δεδομένα κατά παραγγελία, με τη μορφή εικόνων (μεγάλης επιφάνειας αποτύπωσης), που καταγράφουν τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτού του τύπου τα δεδομένα είναι τα πλέον κατάλληλα διότι, σε συνδυασμό με τις μεθόδους τηλεπισκόπησης μπορούν να

παρέχουν γρήγορα και με ακρίβεια θεματικούς ψηφιακούς χάρτες διάφορων ειδών (Sifakis και Deschamps, 1992, Thomson κ.α. 1997, Rongxing, 1997, Burgan κ.α. 1998).

**Ο κύριος σκοπός της παρούσης εργασίας ήταν η χαρτογράφηση βασικών κατηγοριών χρήσης/κάλυψης γης με την χρήση των κλασσικών μεθόδων ταξινόμησης σε δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης Quickbird και Geoeye-1 για την ευρύτερη περιοχή της Λάρνακας με έμβαση στις αστικές και περιαστικές περιοχές**

Στη συνέχεια δίνεται μια περιγραφή της δομής των κεφαλαίων που ακολουθούν.

Το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις μεθόδους και τις εφαρμογές ταξινόμησης δορυφορικών δεδομένων. Αρχικά, γίνεται αναφορά σε γενικά θέματα και στην σημασία της χαρτογράφησης χρήσης/κάλυψης γης. Στη συνέχεια, γίνεται μια αναδρομή στις μεθόδους χαρτογράφησης και στην συνεισφορά της επιστήμης της τηλεπισκόπησης και των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Έπειτα, αναφέρονται κάποιες τεχνικές τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιούνται εκτενώς στη χαρτογράφηση χρήσης/κάλυψης γης. Επιπλέον, αναλύονται οι βασικές έννοιες των μεθόδων ταξινόμησης, ώστε να γίνει κατανοητή η προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην ανάπτυξη του μοντέλου της ταξινόμησης.

Το τρίτο κεφάλαιο χωρίζεται σε δυο μέρη. Στο πρώτο, γίνεται η περιγραφή και οριοθέτηση της περιοχής μελέτης. Στο δεύτερο μέρος, αναφέρονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Quickbird και Geoeye-1, και των χαρτών που χρησιμοποιήθηκαν ως επικουρικά δεδομένα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία της προ-επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο της γεωμετρικής διόρθωσης και η εφαρμογή στα δορυφορικά δεδομένα.

Ακολούθως, περιγράφεται η διαδικασία της ταξινόμησης στη περιοχή μελέτης και παρουσιάζονται οι χάρτες χρήσης/κάλυψης γης που προέκυψαν. Στο τέλος του κεφαλαίου, γίνεται η φωτοερμηνευτική σύγκριση των χαρτών αυτών με τις αντίστοιχες αεροφωτογραφίες της περιοχής.



Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται μια συζήτηση των αποτελεσμάτων, κυρίως ως προς τις διαχρονικές μεταβολές της οικιστικής περιοχής. Τέλος, στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης αναφορικά με τον κύριο και τους επιμέρους στόχους, αναπτύσσονται προβληματισμοί που προέκυψαν, και προτείνονται ιδέες για μελλοντική έρευνα.

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε τρεις ενότητες. Στην πρώτη, γίνεται εισαγωγή στη χαρτογράφηση χρήσης/κάλυψης γης από δορυφορικά δεδομένα, στη δεύτερη, παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης για την χαρτογράφηση χρήσης/κάλυψης γης και στην τρίτη και τελευταία ενότητα, γίνεται αναφορά στις μεθόδους ταξινόμησης των δορυφορικών εικόνων.

### 2.1. Η χαρτογράφηση χρήσης/κάλυψης γης από δορυφορικά δεδομένα

Οι δορυφορικές εικόνες προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για την επιφάνεια της γης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, ιδιαίτερα όταν προέρχονται από πολυφασματικούς αισθητήρες. Η παρατήρηση της γης από το διάστημα είναι πολύτιμη, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου δύσκολα εφαρμόζονται οι συμβατικές τεχνικές μέτρησης, όπως σε δυσπρόσιτες περιοχές, δίνοντας αποτελέσματα με μικρό κόστος και σε μικρο χρονικά διάστημα.

Ο όρος **χρήση γης** (land use) αναφέρεται ειδικότερα στον τρόπο χρήσης της γης από τον άνθρωπο, συνήθως με έμφαση στο λειτουργικό ρόλο της γης στις οικονομικές δραστηριότητες (Campbell, 2002). Αποτελεί μια αφηρημένη έννοια, η οποία δεν είναι πάντοτε άμεσα παρατηρήσιμη, ακόμη και όταν η παρατήρηση γίνεται από κοντά. Συνήθως, δεν μπορούμε να δούμε την πραγματική χρήση ενός τμήματος της γης, παρά μόνο τις επιδράσεις της χρήσης αυτής στα φυσικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι επιδράσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων είναι φανερές και μπορούν άμεσα να συσχετιστούν με συγκεκριμένες οικονομικές δραστηριότητες και κατηγορίες χρήσης γης, όπως π.χ. μια βιομηχανική περιοχή. Αντιθέτως, μια δασική έκταση μπορεί να δίνει ελάχιστες ή καθόλου ενδείξεις των διαφόρων χρήσεων της, όπως παραγωγή ξυλείας, τόπος αναψυχής, φυσική κάτοικιά άγριων ζώων, κ.α. Επιπλέον, μερικές περιοχές χαρακτηρίζονται από εποχιακές μεταβολές στη χρήση γης. Για παράδειγμα, ένας αγρός μπορεί να καλλιεργείται σε μια περίοδο του έτους και να χρησιμοποιείται ως βοσκότοπος σε μια άλλη.

Η **κάλυψη γης** (land cover), με την ευρεία έννοια, αφορά την κατηγοριοποίηση των διάφορων φυσικών και ανθρωπογενών στοιχείων του εδάφους με βάση τις ορατές αποδείξεις των χρήσεων γης. Έτσι, το πυκνό δάσος, η οργωμένη γη, οι καλλιέργειες, το αστικό πλέγμα και άλλα πολλά, αποτελούν κατηγορίες κάλυψης γης. Υπό την

στενότερη της έννοια, η κάλυψη γης σχετίζεται με την κατηγοριοποίηση της βλάστησης, φυσικής ή ανθρωπογενούς, στην επιφάνεια του εδάφους σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή (Campbell, 2002). Ενώ η χρήση γης αποτελεί αφηρημένη έννοια, η κάλυψη γης είναι μια έννοια με συγκεκριμένα και παρατηρήσιμα χαρακτηριστικά και συνεπώς αποτελεί αντικείμενο άμεσης παρατήρησης.

Από τα παραπάνω, φαίνεται πως η χρήση του σύνθετου όρου «χρήσης/κάλυψης» είναι περισσότερο πλήρης, καθώς εκφράζει με μεγαλύτερη σαφήνεια τα φυσικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης. Και οι δυο όροι όμως, είναι αποδεκτοί και χρησιμοποιούνται με την ίδια σημασία στην παρούσα εργασία.

Επιπλέον, ο ρόλος των οικονομικών δραστηριοτήτων δεν αποτελεί βασικό κριτήριο στην κατηγοριοποίηση σε τάξεις κάλυψης γης, σε αντίθεση με τη χρήση γης. Συνήθως, η διάκριση μεταξύ κάλυψης και χρήσης γης γίνεται πιο σημαντική όσο η χωρική κλίμακα της εφαρμογής και η χωρική ανάλυση της εικόνας, μεγαλώνει.

Με τη βοήθεια των δορυφορικών εικόνων μπορούν να παραχθούν ακριβείς διαχρονικοί χάρτες χρήσεων γης και ιδιαίτερα κάλυψης γης, καθώς η πληροφορία για την κάλυψη γης ερμηνεύεται άμεσα από τα στοιχεία που είναι ορατά στις εικόνες. Η δορυφορική τηλεπισκόπηση δίνει τη δυνατότητα καταγραφής της κάλυψης και των χρήσης γης σε διάφορες χωρικές κλίμακες.

Η χαρτογράφηση των χρήσεων/κάλυψης γης προϋποθέτει την ταξινόμησή τους σε θεματικές κατηγορίες, δηλαδή, την ομαδοποίηση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας της γης με βάση τις κοινές τους ιδιότητες, γνωρίσματα ή σχέσεις (Καρτέρης και Τσομπανίκος, 1984). Ο τρόπος και ο βαθμός ομαδοποίησης των χαρακτηριστικών ποικίλει ανάλογα με το σκοπό χαρτογράφησης και έρευνας των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης και καθορίζεται από το χρησιμοποιούμενο, κάθε φορά, σύστημα ταξινόμησης. Επίσης, κάθε αποτύπωση ορίζει διαφορετικά παρόμοιες κατηγορίες. Για παράδειγμα, σε ένα χάρτη σχεδιασμού και οικιστικής ανάπτυξης, περιοχές χωρίς δέντρα μπορούν να ταξινομηθούν ως ζώνες αστικού σχεδιασμού, ενώ αν ο χάρτης που δημιουργείται είναι για τον σχεδιασμό αναδάσωσης, οι ίδιες περιοχές μπορεί να χαρακτηριστούν ως δάσος.

Επιπλέον, η χαρτογράφηση των χρήσεων/κάλυψης της γης, που αποτελεί τη βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη επιχειρησιακών προγραμμάτων ορθολογικής διαχείρισής της, τόσο σε εθνικό, όσο και σε τοπικό επίπεδο, θα πρέπει να βασίζεται σε κάποιο σύστημα κοινά αποδεκτό (Καρτέρης και Τσομπανίκος, 1984). Για τη χαρτογράφηση της κάλυψης/χρήσης γης έχουν προταθεί διάφορα συστήματα ταξινόμησης. Όλα όμως, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πληρέστερα, περιλαμβάνοντας όλες τις υπάρχουσες χρήσεις και καλύψεις γης της κάθε περιοχής μελέτης. Επίσης, οι διαμορφούμενες κατηγορίες θα πρέπει να ορίζονται με σαφήνεια και ο διαχωρισμός τους να στηρίζεται σε λογική βάση. Έτσι, μόνο το αποτέλεσμα της φωτοερμηνείας μπορεί να έχει μεγάλη ακρίβεια, καθώς και να επαναλαμβάνεται από διαφορετικούς φωτοερμηνευτές. Οι Καρτέρης και Τσομπανίκος (1984) προτείνουν την ταξινόμηση της χρήσης/κάλυψης γης σε 6 κατηγορίες: την **αστική γη, τη δασική γη, τη γεωργική γη, το νερό και την άγονη γη**. Κάθε μία από τις κατηγορίες αυτές αναπτύσσεται στη συνέχεια σε άλλες υποκατηγορίες. Γενικά, το επίπεδο ταξινόμησης που θα χρησιμοποιηθεί στη χαρτογράφηση εξαρτάται από την ελάχιστη μονάδα χαρτογράφησης του τελικού χάρτη, το μέγεθος ανάλυσης των πρωτογενών δεδομένων, και το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας των κλάσεων.

Το πιο γνωστό και ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα ταξινόμησης των χρήσεων και της κάλυψης γης, είναι το σύστημα του Anderson et al. (1976), το οποίο χωρίζεται σε εννέα βασικές κατηγορίες (αστική περιοχή, αγροτική περιοχή, βοσκότοπος, δάσος, υδάτινη επιφάνεια, υγροβιότοπος, άγονο έδαφος, τούντρα, αιώνια χιόνια και πάγοι, βλ. Πίνακα 2.1). Κάθε βασική κατηγορία διαιρείται σε διάφορες υποκατηγορίες, που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τη χωρική κλίμακα του χάρτη. Το σύστημα αυτό έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων συστημάτων ταξινόμησης. Πρώτον, έχει σχεδιαστεί ειδικά για εφαρμογή σε δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες. Οι κατηγορίες του είναι κατάλληλες για την ταξινόμηση της πληροφορίας που εξάγεται από αυτού του είδους τα δεδομένα και έχει μια ιεραρχική δομή που σχετίζεται με τη χρήση εικόνων διαφορετικής κλίμακας και χωρικής ανάλυσης. Το επίπεδο 1, για παράδειγμα, προορίζεται για εφαρμογή σε εικόνες μεγάλης χωρικής κλίμακας και μικρής χωρικής ανάλυσης (π.χ. εικόνες Landsat TM). Το επίπεδο 2, αποτελείται από πιο λεπτομερείς τάξεις, οι οποίες μπορούν να εντοπιστούν σε εικόνες μικρής χωρικής κλίμακας και μεγάλης χωρικής ανάλυσης (π.χ. IKONOS, Quickbird).

**Πίνακας 2-1: Το σύστημα ταξινόμησης χρήσεων γης και κάλυψης γης του Anderson et al. (1976).**

Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	
2	11 Κατοικημένες	
	12 Εμπορικές και υπηρεσίες	
	13 Βιομηχανικές	
	14 Μεταφορές, επικοινωνίες και κοινοφελείς υπηρεσίες	
	15 Βιομηχανικά και εμπορικά συμπλέγματα	
	16 Μικτές αστικές ή δομημένες	
	17 Άλλες αστικές ή δομημένες	
	21 Καλλιέργειες και βοσκότοποι	
	22 Δενδρόκηποι, αλσύλλιο, αμπέλια, φυτώρια, διακοσμητικές κηπευτικές περιοχές	
	23 Επιχειρήσεις περιορισμένης τροφοδότησης	
	24 Άλλες αγροτικές περιοχές	
	3	31 Ποώδης βοσκότοπος
		32 Θαμνώδης βοσκότοπος
		33 Μικτός βοσκότοπος
	4	41 Φυλλοβόλα δάση
		42 Αειθαλή δάση
		43 Μικτή δασική περιοχή
5	51 Χείμαρροι και κανάλια	
	52 Λίμνες	
	53 Υδροφορείς	
	54 Όρμοι και δέλτα ποταμών	
6	61 Δασικοί υγροβιότοποι	
	62 Μη δασικοί υγροβιότοποι	
7	71 Ξηρή, αλμυρή πεδινή περιοχή	
	72 Ακτές	
	73 Αμμώδη εδάφη εκτός ακτών	
	74 Γυμνό εκτεθειμένο έδαφος	
	75 Ορυχεία, λατομεία, εκσκαφές	
	76 Μεταβατικές περιοχές	

	77	Μικτό άγονο έδαφος
8	Τούντρα	81 Θαμνώδης τούντρα
	82	Ποώδης τούντρα
	83	Γυμνό έδαφος τούντρας
	84	Υγρή τούντρα
	85	Μικτή τούντρα
9	Αιώνιοι πάγοι και χιονιά	91 Αιώνιες χιονοσκεπείς εκτάσεις
	92	Παγετώνες

Αξιόπιστα στοιχεία σχετικά με το είδος, την κατανομή και την έκταση των χρήσεων/κάλυψης γης μιας περιοχής πρέπει να είναι διαθέσιμα σε έναν οργανισμό ή μια υπηρεσία πριν εφαρμοστούν προγράμματα διαχείρισης και ανάπτυξης της περιοχής αυτής. Η δημιουργία ενημερωμένων χαρτών της κάλυψης γης συμβάλλει αποφασιστικά στον ορθό σχεδιασμό και τον συντονισμό των σχετικών δράσεων, στη διατήρηση των φυσικών αποθεμάτων, στην παρακολούθηση και περιορισμό των αλλαγών που οφείλονται σε φυσικές καταστροφές, όπως π.χ. πυρκαγιές, πλημμύρες, φαινόμενα διάβρωσης κ.λπ. ή στις ανθρωπογενείς επιδράσεις, όπως η οικιστική ανάπτυξη, ο τουρισμός, η μόλυνση εδάφους και υδάτινων επιφανειών κ.λπ. και στον προσανατολισμό του αστικού και περιφερειακού σχεδιασμού για τη λήψη αξιόπιστων και λειτουργικών αποφάσεων (Γήτας κ.α. 2003).

**Χρήσιμος χάρτης όμως, δεν είναι μόνο ο ακριβής χάρτης, αλλά και ο ενημερωμένος,** που περιγράφει την υπάρχουσα κατάσταση μιας περιοχής όπως αυτή είναι κατά τον χρόνο που ο χάρτης χρησιμοποιείται. Η ανάγκη για ενημέρωση του χάρτη, είναι ανάλογη της κλίμακας του. Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο στους χάρτες μεγάλης κλίμακας που αποδίδουν περιοχές με έντονη ανάπτυξη (π.χ αστικές περιοχές). Έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο, κατά το οποίο, πριν ολοκληρωθεί η χαρτογράφηση μιας περιοχής, τα παραδοτέα τμήματα του χάρτη να είναι είδη ξεπερασμένα. Εξάιρεση αυτού του κανόνα αποτελούν οι χάρτες μεγάλης κλίμακας που αποτυπώνουν φυσικά χαρακτηριστικά τα οποία μεταβάλλονται με αργούς ρυθμούς (π.χ εδαφολογικοί, αναγλύφου κλπ) (Καρτέρης και Γιαννακόπουλος, 1998).

Όλα τα παραπάνω, καθιστούν σαφή το σημαντικό ρόλο του χάρτη χρήσης/κάλυψης γης, ως διαχειριστικό εργαλείο. Η ζήτηση ενημερωμένων χαρτών αυξάνεται ολοένα

και περισσότερο, λόγω της αύξησης τόσο ποσοτικά, όσο και σε είδος των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Αντίστοιχα, γίνεται κατανοητή η ανάγκη για έρευνα στον τομέα της χαρτογράφησης, προκειμένου να βρεθούν καινούριες μέθοδοι που θα εξοικονομούν χρόνο στη σύνταξη των χαρτών, αλλά και θα βελτιώνουν την ακρίβειά τους σαν προϊόν, ώστε να αποτελούν αξιόπιστο εργαλείο σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων.

Σε παγκόσμια και περιφερειακή κλίμακα, οι αισθητήρες με χαμηλή διακριτική ικανότητα και μεγάλη χωρική κάλυψη (500 - 3000 km), όπως ο AVHRR του NOAA (1.1 x 1.1 km), ο ATSR-2 του ERS-2 (1 x 1 km), ο AATSR του ENVISAT (1 x 1 km), MODIS του EOS (0.25 x 0.25 km έως 1 x 1 km) χρησιμοποιούνται ευρέως για την καταγραφή των ειδών κάλυψης γης και των μεταβολών τους από σημαντικούς οργανισμούς και υπηρεσίες σε παγκόσμια κλίμακα (π.χ FAO κ.α).

Σε εθνικό και τοπικό επίπεδο, οι απαιτήσεις για αυξημένη χωρική ανάλυση προτρέπουν στη χρήση οπτικών αισθητήρων που φέρονται από δορυφόρους όπως ο Landsat, SPOT και αισθητήρες τύπου ραντάρ όπως ο SAR του Ευρωπαϊκού ERS-2 και του καναδικού RADARSAT. Οι τελευταίοι, έχουν τη δυνατότητα καταγραφής της επιφάνειας της γης ημέρα και νύχτα και κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες. Τέλος, η νέα σειρά δορυφόρων πολύ υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (0.6-4 μέτρα), όπως ο Quickbird και IKONOS, ενισχύει ακόμη περισσότερο τις δυνατότητες της δορυφορικής τηλεπισκόπησης στην καταγραφή των χρήσεων γης σε τοπικό επίπεδο, δημιουργώντας χάρτες κάλυψης και χρήσεων γης με μικρή χαρτογραφική κλίμάκα.

Οι χάρτες χρήσεων γης παράγονται σε διάφορες χαρτογραφικές κλίμακες, από 1:12500 έως 1:250000. Η αξιοποίηση των δορυφορικών δεδομένων για τη δημιουργία χάρτη με μεγάλη χαρτογραφική κλίμακα, περιορίζεται μόνο στη χρήση τους, ως υπόβαθρο βάσης με μεγάλη λεπτομέρεια για τη συλλογή δεδομένων από άλλες πηγές (π.χ. επιτόπιες παρατηρήσεις). Καθώς η χωρική κλίμακα της εφαρμογής μεγαλώνει, και συνεπώς η χαρτογραφική κλίμακα του απαιτούμενου χάρτη μικραίνει, η συνεισφορά των δορυφορικών εικόνων στην εξαγωγή πληροφορίας που απαιτείται για την παραγωγή ενός χάρτη χρήσεων γης μεγαλώνει, αν και εξακολουθεί να υπάρχει ακόμη ανάγκη για συμπληρωματική πληροφορία από άλλες πηγές.

Η παραδοσιακή μέθοδος χαρτογράφησης είναι η αποτύπωση της επιφάνειας της περιοχής μελέτης με επιτόπιες αυτοψίες στο πεδίο και τοπογραφικές αποτυπώσεις. Χαρτογραφήσεις υπεδάφίων χαρακτηριστικών όπως πετρωμάτων, ή σκιασμένων επιφανειών όπως η αναγέννηση του υπόροφου σε ένα δάσος, καταγράφονται μόνο με επιτόπιες αυτοψίες και συνήθως καλύπτονται μικρές εκτάσεις. Συνεπώς, η χωρική ποικιλομορφία μέσα στα χαρτογραφημένα πολύγωνα και στα όρια αυτών, τις περισσότερες φορές, αποτυπώνεται ανεπαρκώς και ιδιαίτερα στα σύνθετα περιβάλλοντα όπου παρατηρούνται επικαλύψεις κλάσεων. Επίσης, οι επισκέψεις στο πεδίο απαιτούν έξοδα, χρόνο, εντατική εργασία, προσβασιμότητα και γρήγορα χαρακτηρίζονται χρονικά ξεπερασμένες. Ο φόρτος της εργασίας μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση αεροφωτογραφιών και δορυφορικών δεδομένων για στερεοσκοπική παρατήρηση και φωτοερμηνεία.

Η μεγάλη διάδοση των αεροφωτογραφιών και της χρήσης τους άλλαξε ριζικά τον τρόπο κατασκευής των χαρτών. Νέες τεχνικές και τεχνολογίες αναπτύχθηκαν, οι οποίες, αφενός μεν, επιταχύνουν τη διαδικασία χαρτογράφησης και κατά συνέπεια, μειώνουν το κόστος, αφετέρου δε, καθιστούν δυνατή την ακριβή χαρτογράφηση απρόσιτων ορεινών περιοχών (Dickinson 1979). Η φωτοερμηνεία σε συνδυασμό με την φωτογραμμετρία, μπορούν να ερμηνεύσουν, να χαρακτηρίσουν, και να ταξινομήσουν σε κλάσεις την επιφάνεια του εδάφους, με τη χρήση αεροφωτογραφιών. Αυτού του είδους η εργασία απαιτεί σχετικά μειωμένη δουλειά πεδίου και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, αρκεί τα εξαγωγικά συμπεράσματα να επαληθεύονται στο πεδίο. Πολλές φορές όμως, δεν υπάρχουν διαθέσιμες αεροφωτογραφίες για μια δεδομένη χρονική στιγμή, οπότε και ο ειδικός αναγκάζεται να χρησιμοποιήσει αρχειακό υλικό. Το τελευταίο, όμως, συχνά είναι περιορισμένο καθώς οι πτήσεις για τη λήψη των αεροφωτογραφιών κοστίζουν ακριβά. Επίσης, δεν είναι εύκολο με το αρχειακό υλικό ή σχεδιάζοντας έκ νέου λήψη να καταγραφεί η εποχικότητα των φυτών, ούτε και να καλυφτεί μεγάλη επιφάνεια χωρίς τη χρήση μωσαϊκού από διαφορετικές ημερομηνίες πτήσης. Άλλο πρόβλημα, αποτελεί η ραδιομετρική ανάλυση των αεροφωτογραφιών, η οποία συνήθως είναι αλλοιωμένη, λόγω της εναλλαγής στην γωνία λήψης και του φωτισμού της περιοχής. Γεγονός είναι, το ότι μέχρι προσφάτως, για τη λήψη αεροφωτογραφιών, χρησιμοποιούνταν ως επί το πλείστον, φιλμ και όχι ψηφιακό μέσο αποθήκευσης, το οποίο ήταν κατά κόρον παγχρωματικό και όχι υπέρυθρο, ούτως ώστε να αποτυπώνει τη βλάστηση και τις



αλλαγές της καλύτερα. Βέβαια, η όλη διαδικασία παραγωγής χάρτη από αεροφωτογραφίες και επίγειες παρατηρήσεις δεν είναι απαλλαγμένη σφαλμάτων. Εκτός από τα σφάλματα σάρωσης της γης, παρατηρούνται και γεωμετρικές παραμορφώσεις των αεροφωτογραφιών που οφείλονται στην προοπτική προβολή της αεροφωτογραφίας και στις αλλαγές στην κλίμακα, εξαιτίας υψομετρικών μεταβολών του ανάγλυφου. Τα σφάλματα αυτά μπορεί να διορθωθούν δίνοντας τις ορθοφωτογραφίες και τους ορθοφωτοχάρτες, που είναι διορθωμένες αεροφωτογραφίες στις οποίες τα σημεία του ανάγλυφου βρίσκονται στην ορθογραφική τους θέση και έχουν όλα τα σημεία της εικόνας την ίδια κλίμακα (Καρτέρης, 1990).

Επισημαίνοντας τις αδυναμίες της εργασίας πεδίου και της χρήσης των αεροφωτογραφιών, γίνεται καταφανές πως χρειάζεται μια διαφορετική πηγή δεδομένων, ειδικά έτσι όπως διαμορφώνεται η ανάγκη για ενημερωμένα προϊόντα ακριβείας (χάρτες χρήσης/κάλυψης γης). Μια λύση στο πρόβλημα έρχονται να δώσουν τα δορυφορικά δεδομένα, τα οποία έχουν ευρύτερο πλαίσιο λήψης από τις αεροφωτογραφίες, καλύπτοντας έτσι, μεγαλύτερες επιφάνειες στο έδαφος. Επίσης, οι δορυφορικές πλατφόρμες παρέχουν εκτός από δεδομένα υψηλής ραδιομετρικής ποιότητας στο ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, δεδομένα, τόσο στο κοντινό τμήμα, όσο και στο μέσο υπέρυθρο τμήμα, τα οποία έχουν μεγαλύτερο δυναμικό εύρος και κρίνονται ως τα πλέον κατάλληλα για χαρτογράφηση χρήσεων/κάλυψης γης (Lucas κ.α. 2004). Έτσι, μπορούν να διακριθούν τα φασματικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων βλάστησης και δίνεται η δυνατότητα αναγνώρισης τους. Ο συνδυασμός των φασματικών διαύλων της εικόνας για την εξαγωγή της επιθυμητής πληροφορίας, η εφαρμογή τεχνικών οπτικής βελτίωσης της για να γίνουν πιο εμφανή τα φασματικά ή τα χωρικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων και η εφαρμογή διαφόρων αλγορίθμων αυτόματης ταξινόμησης για την εξαγωγή των επιθυμητών κατηγοριών χρήσεων γης, είναι κάποιες από τις τεχνικές μετα-επεξεργασίας μιας δορυφορικής εικόνας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δορυφορικά δεδομένα είναι πλέον σήμερα ανταγωνιστικά και όχι συμπληρωματικά των αεροφωτογραφιών, και σε κάποιο βαθμό των επίγειων μετρήσεων. Για την τελευταία παρατήρηση πρέπει να τονιστεί ότι, οι επίγειες μετρήσεις είναι απαραίτητες για μια πιο ικανοποιητική ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων αλλά, ο αριθμός των επισκέψεων και μετρήσεων και κάτ επέκταση ο

απαιτούμενος χρόνος και κόπος για την ολοκλήρωση τέτοιων διαδικασιών, περιορίζεται σημαντικά. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα πεδίου που συλλέγονται έχουν πλέον καθαρά, ρόλο βαθμονομητή, με την ικανότητα να ρυθμίζουν τις παραμέτρους του ταξινομητή ή να κρίνουν την ποιότητα της χαρτογράφησης.

Οι δορυφορικές εικόνες είναι ικανές να παρέχουν γρήγορα και με ακρίβεια θεματικά επίπεδα χαρτογράφησης. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, η συρροή διαθέσιμων ψηφιακών δεδομένων δημιούργησε νέες ανάγκες. Ο συνδυασμός, η ανάλυση, η παρουσίαση και η διαχείριση αυτών των θεματικών επιπέδων με ένα τρόπο οικονομικό, γρήγορο και ακριβή, ενσωμάτωσαν άμεσα στον τομέα της χαρτογράφησης τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π-Geographical Information Systems-G.I.S). Αυτά έδωσαν την ικανότητα στους ειδικούς για πρώτη φορά να συνδυάσουν χωρικές μεταβλητές και να μπορούν να ανακαλέσουν και να αναβαθμίσουν την χωρική πληροφορία γρήγορα και εύκολα. Έτσι, προέκυψαν τα πρώτα χαρτογραφικά μοντέλα συνδυάζοντας με ποικίλους τρόπους, διαφορετικά θεματικά επίπεδα που όλα μαζί περιέχονται στην ίδια βάση δεδομένων (Chuvieco και Congalton, 1989). Τα Γ.Σ.Π μαζί με την τηλεπισκόπηση, αποτελούν ότι πιο σύγχρονο έχει να επιδείξει η τεχνολογία στον τομέα της χαρτογράφησης. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον από επιστήμονες διαφόρων αντικειμένων και οι εφαρμογές τους, έχει αποδειχτεί ότι, είναι απεριόριστες.

Μέχρι σήμερα σε πολλές έρευνες έχουν χρησιμοποιηθεί δορυφορικά δεδομένα, και ιδιαίτερα του καταγραφέα Landsat TM, στον προσδιορισμό και καταγραφή των χρήσεων γης (Καρτέρης 1990, Fuller κ.α. 1994, Vogelmann κ.α. 1998, Muller κ.α. 1999).

## **2.2. Τεχνικές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης για την χαρτογράφηση χρήσης/κάλυψης γης.**

Γενικά, η ανίχνευση μεταβολών περιλαμβάνει τη χρήση διαχρονικών δεδομένων, ώστε να διαχωριστούν περιοχές κάλυψης γης, οι οποίες μεταβάλλονται μεταξύ των ημερομηνιών λήψης των εικόνων (Αργιαλάς, 1999). Ένας ακόμη γενικός ορισμός χαρακτηρίζει την ανίχνευση αλλαγών ως τη διαδικασία αναγνώρισης διαφορών στην κατάσταση ενός αντικειμένου ή ενός φαινομένου κατά την παρατήρησή του σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (Singh, 1989). Ο έγκαιρος και ακριβής εντοπισμός των αλλαγών στη γήινη επιφάνεια είναι πολύ σημαντικός ώστε να γίνουν κατανοητές

οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ανθρώπων και των φυσικών φαινομένων και να ληφθούν συνειδητές αποφάσεις για την διαχείριση πιθανών άσχημων συνθηκών (Luet al., 2004). Το είδος των αλλαγών που ενδιαφέρουν, ανά περίπτωση, σχετίζεται είτε με φαινόμενα μικρής διάρκειας, όπως είναι οι πλημμύρες και η χιονοκάλυψη, η εκδήλωση μιας πυρκαγιάς είτε με πιο μακροχρόνια φαινόμενα, όπως είναι η ανάπτυξη στα όρια των οικισμών αλλά και η ερημοποίηση περιοχών.

Οι τηλεπισκοπικές απεικονίσεις αποτελούν τις βασικές πηγές που χρησιμοποιούνται εκτενώς για ανίχνευση αλλαγών χρήσεων γης, προερχόμενες κυρίως τα τελευταία χρόνια από δορυφόρους όπως οι Landsat, SPOT, AVHRR, IKONOS, Quickbird κλπ. Στις περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές συνθηκών( Lu et al.,2004), αναγράφεται ότι το ιδανικό είναι, τα δεδομένα προς ανίχνευση μεταβολών να έχουν προέλθει από τον ίδιο ή παρόμοιο δέκτη με τα ίδια φασματικά κανάλια και να καταγράφουν τα δεδομένα με την ίδια χωρική διακριτική ικανότητα. Επίσης, οι γεωμετρικές συνθήκες γεωπαρατήρησης πρέπει να είναι όσο το δυνατό οι ίδιες, όπως και ο χρόνος λήψης. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται επετειακές ημερομηνίες ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι εποχιακές διαφορές αλλά και η γωνία λήψης του ηλίου. Για την αποτελεσματική ανίχνευση των μεταβολών απαιτείται ακόμα, ακριβής χωρική εγγραφή των εικόνων ή με άλλα λόγια να υπάρχει κοινή και ακριβής γεωαναφορά σε όλες τις εικόνες. Η ακρίβεια της γεωμετρικής εγγραφής που συνήθως απαιτείται είναι περίπου στο 0.25 με 0.5 του εικονοστοιχείου ή μέχρι και ένα εικονοστοιχείο. Όταν το σφάλμα της γεωμετρικής διόρθωσης είναι μεγαλύτερο από ένα εικονοστοιχείο, τότε είναι φυσικό να προκύψουν πολλά σφάλματα κατά τη σύγκριση των εικόνων.

Οι περισσότερες από τις μεθόδους ανίχνευσης αλλαγών που καταγράφονται μέχρι και το 1989 βασίζονται σε φασματικούς κανόνες και ουσιαστικά γίνεται η εκτίμηση ότι οι αλλαγές στο έδαφος συνεπάγονται και σημαντικές αλλαγές στην τιμή των εικονοστοιχείων της εικόνας. Θεωρείται επίσης, πως οι φασματικές αλλαγές, στην πλειοψηφία τους, οφείλονται στη διαφορά ανακλαστικότητας του εδάφους και όχι σε παρεμβολές από την ατμόσφαιρα ή άλλους παράγοντες (Singh, 1989). Γενικά, η ανίχνευση αλλαγής ως η χωρική, φασματική και διαχρονική ανάλυση των χαρακτηριστικών των τηλεπισκοπικών δεδομένων πρέπει να αποτελεί μια διαδικασία που να παράγονται στατιστικά που θα υποδείξουν την παρουσία ή την απουσία αλλαγών. Η βασική υπόθεση για την ύπαρξη αλλαγής είναι η διαφορά στην φασματική απόκριση για το ίδιο εικονοστοιχείο σε δύο χρονικές στιγμές, με την

προϋπόθεση γεωμετρικής διόρθωσης και στις περισσότερες περιπτώσεις της ραδιομετρικής κανονικοποίησης των εικόνων.

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι διάκρισης των μεταβολών, σύμφωνα με πιο πρόσφατη βιβλιογραφία, (Lu et al., 2004), όπως είναι η σύγκριση των εικόνων μετά την ταξινόμηση, ο σχηματισμός διαφοράς εικόνων, ο σχηματισμός κύριων συνιστωσών, κ.α. αλλά και πιο σύγχρονων, όπως η ανάλυση φασματικής σύνθεσης, τα νευρωνικά δίκτυα, τα ασαφή σύνολα και η ενσωμάτωση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών ή επιπρόσθετων τηλεπισκοπικών δεδομένων.

Στην ίδια βιβλιογραφική πηγή, καθώς και σε πολλές ακόμα πηγές αναφέρεται πως κάθε αλγόριθμος έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και καμία μέθοδος δεν είναι η βέλτιστη για όλες τις εφαρμογές. Συνήθως, για κάθε περίπτωση αντιστοιχεί και διαφορετικός αλγόριθμος που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Το ποια μέθοδος τελικά θα επιλεγεί, εξαρτάται από τις γνώσεις του χρήστη στις τεχνικές ανίχνευσης αλλαγών και στην ικανότητά του να χειρίζεται τηλεπισκοπικά δεδομένα, από τα ίδια τα δεδομένα και από τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Μια ακόμα αναφορά πρέπει να γίνει σχετικά με το εξαγόμενο αποτέλεσμα της κάθε μεθόδου. Ανάλογα με την τεχνική που θα εφαρμοστεί, τα αποτελέσματα αλλαγής μπορεί αν είναι δυαδικής μορφής (αλλαγή-μη αλλαγή) ή αναλυτικής μορφής αλλαγών 'από-προς'. Για την πρώτη περίπτωση, μερικές τέτοιες τεχνικές είναι των διαφορών, των λόγων καναλιών, του δείκτη βλάστησης (πχ. NDVI) και των κύριων συνιστωσών, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, η σύγκριση μετά την ταξινόμηση, η τεχνική ανάλυσης διανυσματικών μεταβολών (CVA) και η υβριδική μέθοδος.

Συμπερασματικά, από τηλεπισκοπική άποψη, οι τεχνικές ανίχνευσης αλλαγών χρήσεων γης πρέπει να παρέχουν τις εξής πληροφορίες (Lu et al., 2004):

- (1) περιοχή της αλλαγής και ρυθμό αλλαγής,
- (2) χωρική κατανομή των αλλαγών,
- (3) την πορεία της αλλαγής των τύπων κάλυψης γης,
- (4) αξιολόγηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Για την εφαρμογή μιας μεθοδολογίας αλλαγής χρήσεων γης τρία είναι τα βασικά

βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν:

- (1) προετοιμασία των εικόνων που περιλαμβάνει γεωμετρική διόρθωση, ραδιομετρική-ατμοσφαιρική διόρθωση (και τοπογραφική διόρθωση αν η περιοχή είναι ορεινή),
- (2) επιλογή των κατάλληλων τεχνικών για την εφαρμογή της ανάλυσης αλλαγών και
- (3) αξιολόγηση της ακρίβειας.

Η αξιολόγηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων αλλαγής χρήσεων γης, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ακριβής γεωμετρική διόρθωση σε όλες τις εικόνες, η βαθμονόμηση και η κανονικοποίηση των εικόνων, η διαθεσιμότητα ποιοτικών δεδομένων ελέγχου, η πολυπλοκότητα της περιοχής μελέτης, η επιλεγμένη μέθοδος ανίχνευσης αλλαγών, η εμπειρία του χρήστη, η εξοικείωση με την περιοχή μελέτης, και τέλος, οι περιορισμοί σε χρόνο και κόστος.

Αξίζει να αναφερθεί ότι και η τοπογραφική διόρθωση βελτιώνει το αποτέλεσμα της ταξινόμησης, αφού απομακρύνεται ο διαφορικός φωτισμός, λόγω ανάγλυφου που προκαλεί σημαντική διαφοροποίηση στις φασματικές αποκρίσεις των εκλαμβανομένων ως ομογενών ειδών κάλυψης γης (Cinco, 1989).

Οι ερευνητικές ομάδες τηλεπισκόπησης βρίσκονται μπροστά στην πρόκληση ανάπτυξης προηγμένων μεθόδων ανίχνευσης αλλαγών, οι οποίες θα εστιάζουν στο πώς μπορούν να συνδυαστούν εφαρμογές και τεχνικές ανίχνευσης αλλαγών, όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι Collins και Woodcock το 1996.

Η διερεύνηση της ανίχνευσης αλλαγών στις χρήσεις γης ξεκίνησε πριν από αρκετά χρόνια. Το 1977 αναπτύχθηκαν από τους Angelici et.al. οι πρώτες τεχνικές για την ανίχνευση αλλαγών χρήσεων γης με τη χρήση εικόνων Landsat, όπου οδήγησαν στην αποκάλυψη της φύσης της αλλαγής αλλά και σε αριθμητικά αποτελέσματα εκτάσεων χρήσης γης. Οι έρευνες, εκείνα τα χρόνια στράφηκαν κυρίως για την εύρεση αλλαγών στη βλάστηση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι των Allum και Dreisinger (1987), οι οποίοι χρησιμοποίησαν εικόνες Landsat από το 1973 και το 1983 και δημιούργησαν χάρτες μεταβολής της βλάστησης με μεθοδολογία που ενδείκνυται για την ανάδειξη απότομων και όχι σταδιακών αλλαγών.

Υπάρχουν και μεθοδολογίες ανίχνευσης αποκλειστικά χρησιμοποιώντας μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση, όπου γίνονται συσσωρεύσεις σε δύο φάσεις (Hame et al., 1998). Σε πρώτο επίπεδο, γίνεται η μη επιβλεπόμενη για κάθε εικόνα χωριστά και στη συνέχεια, στις υπάρχουσες κλάσεις της πρώτης εικόνας, γίνεται εκ νέου ταξινόμηση της δεύτερης εικόνας, δημιουργώντας νέες συσσωρεύσεις. Το μέγεθος και οι τύποι της αλλαγής αποκτώνται συγκρίνοντας τις συσσωρεύσεις της πρώτης εικόνας με τις συσσωρεύσεις της δεύτερης. Η εφαρμογή που έγινε σε εικόνες Landsat έδειξε ότι μπορούσε να γίνει η ανίχνευση αλλαγών κυρίως στη βλάστηση.

Μια ακόμα σχετική έρευνα ήταν του Zhao (2004), στην οποία, μέσα από ένα σύνολο πειραματικών δεδομένων, παράγονται οι θεματικοί χάρτες κάλυψης γης για να διαχωριστούν οι περιοχές σε τρεις βασικές κατηγορίες (βλάστηση, αδιαπέρατες επιφάνειες, έδαφος) και στη συνέχεια γίνεται συσχετισμός και ενσωμάτωση δημογραφικών δεδομένων με τηλεπισκοπικά δεδομένα, σε επίπεδο αστικού σχεδιασμού. Γενικά, ως αδιαπέρατη, θεωρείται μια επιφάνεια καλυμμένη από ανθρωπογενή υλικά, τα οποία δεν επιτρέπουν την διείσδυση νερού και σχετίζονται με ανθρωπογενείς δραστηριότητες μέσω κατασκευής κτιρίων και οδικών υποδομών (Slonecker, 2001). Η σύνδεση των δεδομένων έγινε με τη βοήθεια των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, ώστε να μοντελοποιηθεί η πληθυσμιακή ανάπτυξη από το 1996 έως το 2001 για την πόλη Mississauga στο Ontario.

Στην έρευνα των Smits et al. (1997), πάνω στη αξιολόγηση της ποιότητας σε ένα αποτέλεσμα ταξινόμησης, αποδείχθηκε ότι η δημιουργία πίνακα σύγχυσης και η ανάλυση του δείκτη Kappa αποτελεί την πιο κατάλληλη τεχνική αν κάποιος ενδιαφέρεται για τη σύγκριση ταξινομητών, δηλαδή, για εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την συμπερίληψη και την παράλειψη. Γενικά όμως, η έρευνα αναφέρει πως το θέμα της ακρίβειας σχετίζεται άμεσα με τον στόχο και το επιθυμητό κόστος. Το κόστος σχετίζεται κυρίως με τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων ελέγχου, με μετατροπές δεδομένων από διανυσματικής σε ψηφιδωτής μορφής και αντίστροφα, γεωμετρικές, ραδιομετρικές, τοπογραφικές διορθώσεις κ.α. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα είναι εκείνο της υποκειμενικότητας σε θέματα όπως η επιλογή των κατηγοριών ταξινόμησης (όσο το δυνατό λιγότερο φασματικά επικαλυπτόμενες κατηγορίες και με περιορισμένο θόρυβο), τα δεδομένα εκπαίδευσης σε περίπτωση επιβλεπόμενης ταξινόμησης, αλλά και η μέθοδος και η επιλογή των

δεδομένων ελέγχου. Μεγάλο ρόλο, επίσης, παίζει ποιος θα είναι ο τελικός χρήστης και ποιες είναι οι απαιτήσεις, ως προς το αποτέλεσμα ταξινόμησης. Ανάλογα με αυτά, παρέχεται η κατάλληλη πληροφορία και τεχνολογία. Στον αλγόριθμο της ελάχιστης απόστασης δεν υπάρχουν αταξινόμητα εικονοστοιχεία ενώ δεν λαμβάνει υπόψη την μεταβλητότητα της κάθε τάξης. Η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας λαμβάνει υπόψη την μεταβλητότητα των κατηγοριών αλλά θεωρείται ακριβή υπολογιστικά μέθοδος και υποθέτει την κανονική κατανομή των στοιχείων και συνήθως υπερταξινομεί τις υπογραφές με υψηλές τιμές στον πίνακα σύγχυσης.

Οι Yang και Lo (2002) χρησιμοποίησαν την προσέγγιση της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης, ενώ στη συνέχεια πραγματοποίησαν αναταξινόμηση βασιζόμενη σε δεδομένα Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και έπειτα σύγκριση της ταξινόμησης με επίθεση δεδομένων σε περιβάλλον ΣΓΠ, ώστε να καταγραφεί η δυναμική εξέλιξη των αστικών περιοχών στην Atlanta της Πολιτείας Georgia. Η εφαρμογή Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών λαμβάνει χώρα σε πολλές περιπτώσεις ανίχνευσης αλλαγών κυρίως σε αστικές περιοχές. Ίσως αυτό συμβαίνει επειδή οι παραδοσιακές μέθοδοι παρουσιάζουν δυσκολία ανίχνευσης αλλαγών εξαιτίας της πολυπλοκότητας μιας εικόνας στις περιοχές αυτές, ενώ αντίθετα τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι εφοδιασμένα με εργαλεία και συναρτήσεις κατάλληλες για το συνδυασμό δεδομένων από διαφορετικές πηγές. Μια από τις πρώτες μελέτες για τη χρήση και εφαρμογή βάσης γνώσης στην ανίχνευση αλλαγών κάλυψης γης σε αστικές περιοχές έγινε από τον Wang το 1993.

Οι ερευνητές Frazier και Kockelman (2004; 2005), χρησιμοποίησαν τέσσερις δορυφορικές εικόνες προερχόμενες από τους δορυφόρους Landsat 4, 5 και 7 στην περιοχή Austin του Texas. Ο χάρτης κάλυψης γης κάθε εικόνας δημιουργήθηκε με τη βοήθεια της επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Χρησιμοποιώντας ως οδηγούς τοπογραφικούς χάρτες (πηγή: USGS) και ορθοφωτογραφίες, δημιουργήθηκαν δεδομένα εκπαίδευσης, τα οποία θεωρητικά αποτελούνται από δεδομένα περιοχών με γνωστή κάλυψη γης. Αυτά χρησιμοποιήθηκαν για να παράγουν ένα σύνολο κανόνων αποφάσεων, με τους οποίους επρόκειτο να ταξινομηθεί το υπόλοιπο της εικόνας. Κάθε εικονοστοιχείο ταξινομήθηκε σε μια από τις 9 κατηγορίες: νερό, άγονη γη, δασική γη, θαμνώδης έκταση, ποώδης/χορτώδης φυσική έκταση ή ημι-φυσική, ποώδης/χορτώδης φυτεμένη ή καλλιεργημένη γη, χέρσα γη, ανεπτυγμένη οικιστική

περιοχή και τέλος ανεπτυγμένη βιομηχανική/εμπορική περιοχή ή περιοχή μεταφορών.

Η ταξινόμηση της περιοχής στις εννέα κατηγορίες πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό ERDAS Imagine's ISODATA. Σε δεύτερο επίπεδο επεξεργασίας δημιουργήθηκαν νέοι χάρτες κάλυψης γης συνδυάζοντας διαφορετικές κατηγορίες σε ενιαίες περιγραφές κάλυψης γης όπως π.χ. ανεπτυγμένη οικιστική περιοχή, ανεπτυγμένη βιομηχανική-εμπορική περιοχή ή περιοχή μεταφορών και ως τρίτη κατηγορία, οι μη ανεπτυγμένες περιοχές.

Όπως στις περιπτώσεις με μεγάλο αριθμό δεδομένων, τα λάθη στις μετρήσεις και την επεξεργασία είναι σύνηθες φαινόμενο, ιδιαίτερα κατά τη μετατροπή των ανακλώμενων τιμών φωτεινότητας σε κατηγορίες χρήσεων γης, κάτι που συνέβη και στην εφαρμογή των ερευνητών. Χαρακτηριστικά, οι Frazier και Kockelman (2004; 2005) αναφέρουν πως υπάρχουν πολλά βήματα που απαιτούνται απλώς για να είναι μια εικόνα σε χρησιμοποιήσιμη μορφή, αλλά είναι ακόμα περισσότερα τα απαραίτητα βήματα για την ανάλυση και τον καθαρισμό της εικόνας με τη χρήση φίλτρων. Χρειάζεται όμως ιδιαίτερη προσοχή, καθώς κάθε βήμα είναι δυνατό να υποβαθμίσει την ποιότητα της αρχικής εικόνας όπως επίσης και του τελικού προϊόντος.

Τα σφάλματα τα οποία προέρχονται από αυτές τις αδυναμίες μπορούν να αναλυθούν, εν μέρει, μέσω σύγκρισης του χάρτη κάλυψης γης που προέκυψε, με πραγματικές φωτογραφίες (π.χ. ορθοφωτογραφίες) ή άλλες επαληθευμένες πληροφορίες για χρήσεις γης. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να γίνει βαθμονόμηση των μοντέλων ταξινόμησης, τα οποία αναπτύχθηκαν από φασματικές πληροφορίες. Αξίζει να αναφερθεί ότι στις ταξινομήσεις δεν πραγματοποιήθηκε ποσοτικός έλεγχος για την αξιολόγηση κάθε αποτελέσματος. Οι ερευνητές αρκέστηκαν σε ποιοτικές συγκρίσεις του αποτελέσματος της κάλυψης γης με αεροφωτογραφίες. Μπορεί η ποιοτική και ευρείας κλίμακας ανάλυση του χάρτη του Austin να εισάγει ακρίβεια, όμως, σύμφωνα και με τους ίδιους τους ερευνητές, είναι προτιμότερη μια πιο αυστηρή ποσοτική ανάλυση.

Στην εργασία αυτή αναφέρεται πως στο πλαίσιο της προ επεξεργασίας των εικόνων υπάρχει η γεωμετρική και ραδιομετρική διόρθωση. Γενικά, οι μέθοδοι της αναγωγής (γεωμετρική διόρθωση) μιας Landsat εικόνας αποτελούν και οι ίδιες διαστροφές και



δεν εγγυούνται ακριβή αποτελέσματα για δεδομένη προβολή όταν εισάγονται σε λογισμικό GIS ή άλλο λογισμικό διαχείρισης εικόνων. Αναφέρεται πως η διαστρόφη της κάθε εικόνας αποδίδεται μερικώς στην κίνηση του δορυφόρου κατά τη διάρκεια της σάρωσης, αφού η σάρωση πραγματοποιείται ανά σημείο και όχι ανά σειρά (strip), καθώς και στην επικάλυψη μεμονωμένων σαρώσεων. Για τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την εφαρμογή, η κάθε εικόνα έπρεπε να μην έχει αποκλίσεις με την ψηφιακή ορθοφωτογραφία (Digital Ortho Quarter Quadrangles, DOQQ's). Γενικά, οι ορθοφωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν από τους ερευνητές, είναι αεροφωτογραφίες γεωμετρικά διορθωμένες από τον οργανισμό USGS.

Τέλος, σύμφωνα με τους ερευνητές Frazier και Kockelman (2004;2005), σφάλματα εισάγονται επίσης συγκρίνοντας εικονοστοιχεία της ίδιας εικόνας ή διαφορετικών εικόνων εξαιτίας κάλυψης από σύννεφα ή εξαιτίας της ώρας της ημέρας και της θέσης του ήλιου. Τα τελευταία σφάλματα επιδρούν στην ραδιομετρία της εικόνας και για να εξαλειφθούν είναι απαραίτητη η ραδιομετρική διόρθωση.

Η έρευνα των Petit et al. (2000), εστιάζει στην ποσοτικοποίηση των αλλαγών χρήσεων γης χρησιμοποιώντας τηλεπισκοπικές μεθόδους. Στην περιοχή μελέτης, η οποία χαρακτηρίζεται από έντονους ρυθμούς αλλαγών, εφαρμόστηκαν πρότυπα για να παραχθούν βραχυπρόθεσμες προβλέψεις αλλαγών χρήσεων γης. Η μελέτη, κυρίως εστιάζει στην υποβάθμιση του οικοσυστήματος και όχι στην ανίχνευση αλλαγών στους οικισμούς.

Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκαν πολυφασματικές εικόνες SPOT (1986, 1992, 1997), όλες σε ξηρή περίοδο. Συγκεκριμένα, οι τεχνικές τηλεπισκόπησης βοήθησαν στην ποσοτικοποίηση των αλλαγών εκφραζόμενη ως ποσοστό της περιοχής μελέτης αλλά και στον προσδιορισμό των ρυθμών αλλαγής, στον ποιοτικό προσδιορισμό της φύσης της αλλαγής και στη δημιουργία χάρτη χωρικών προτύπων αλλαγής στην κάλυψη γης. Εκτιμήθηκε πως στην περιοχή μελέτης (Zambia) από το 1986 μέχρι το 1997, το 44% της περιοχής έχει υποστεί τουλάχιστον μια μεταβολή και ο μέσος ετήσιος ρυθμός είναι στο 4%.

Πριν την επεξεργασία τους οι εικόνες διορθώθηκαν γεωμετρικά μεταξύ τους χρησιμοποιώντας 100 σημεία ως δεδομένα ελέγχου, ένα πολώνυμο δευτέρου βαθμού για τον μετασχηματισμό με μέσο τετραγωνικό σφάλμα 0.2 pixel, και αναδόμηση τιμών φωτεινότητας με εγγύτερο γείτονα. Επίσης, εφαρμόστηκαν και

ραδιομετρικές διορθώσεις. Δεδομένα αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν από αεροφωτογραφίες των 1980 και 1991, σε κλίμακα 1:30.000, ύστερα από φωτοερμηνεία.

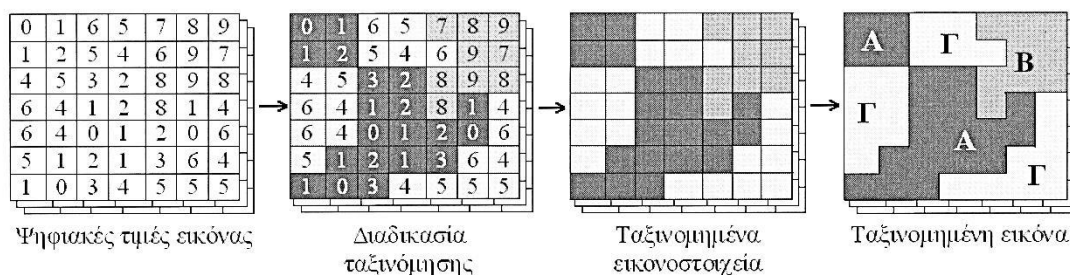
Οι ταξινομήσεις των τριών εικόνων πραγματοποιήθηκαν ανεξάρτητα και ήταν επιβλεπόμενες, με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας, και με έντεκα κατηγορίες ενδιαφέροντος με τις περισσότερες κατηγορίες να είναι τύποι βλάστησης και καλλιέργειας. Η ακρίβεια των ταξινομήσεων εκτιμήθηκε μέσω τυχαίας δειγματοληψίας 599 σημείων πάνω στις αεροφωτογραφίες με περίπου ίδιο μέγεθος δείγματος για κάθε κατηγορία.

Ο δείκτης *Kappa* της ταξινόμησης του 1992 υπολογίστηκε στο 80% λόγω των παρόμοιων φασματικών υπογραφών ορισμένων κατηγοριών αλλά και λόγω της διαφορετικής περιόδου μέσα στο χρόνο που λήφθηκαν τα δεδομένα ελέγχου μέσω της αεροφωτογραφίας του 1991, αλλά και της διαφοράς των δορυφορικών εικόνων και των αεροφωτογραφιών ως προς τη χωρική ανάλυση.

### 2.3. Ταξινόμηση

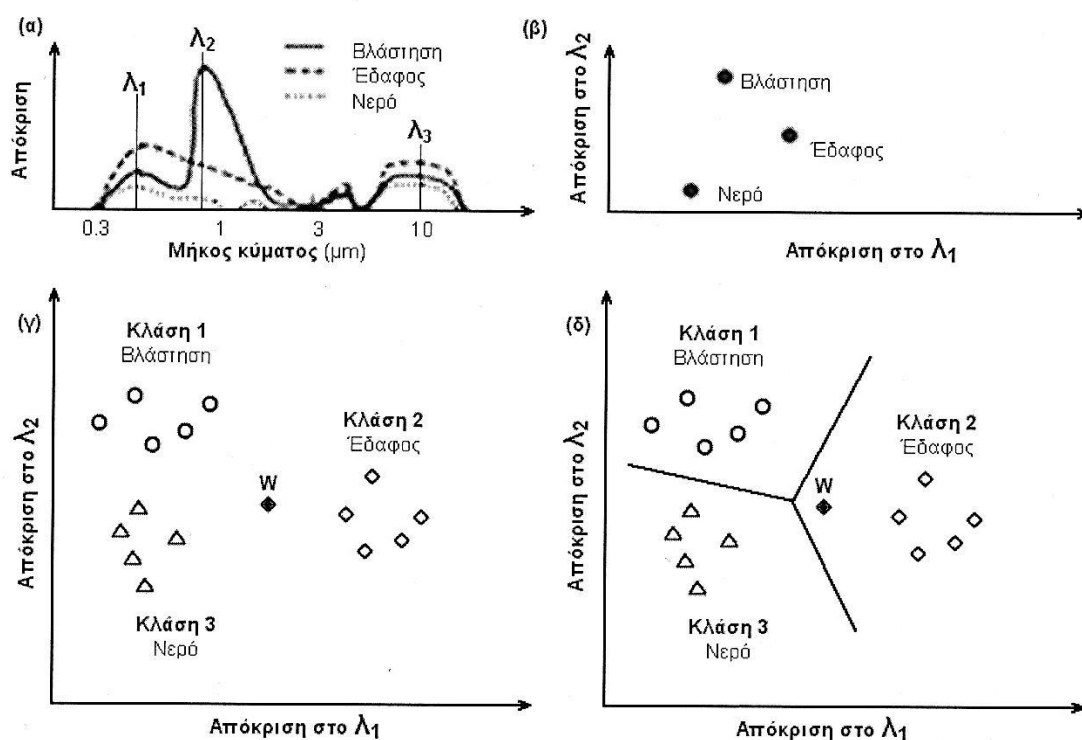
Η **φασματική ταξινόμηση** (spectral classification) μιας δορυφορικής εικόνας αποσκοπεί στην αυτοματοποίηση του εντοπισμού ομογενών επιφανειών σε μια εικόνα, παρακάμπτοντας την υποκειμενικότητα του ανθρώπινου παράγοντα. Τα εικονοστοιχεία μιας εικόνας ταξινομούνται με βάση τις ψηφιακές τιμές τους σε τάξεις ή κατηγορίες, με φυσική όμως σημασία, όπως έδαφος, θάλασσα, βλάστηση κ.ά. (Εικόνα 2.1). Η ταξινόμηση ενός εικονοστοιχείου σε μια τάξη γίνεται με βάση στατιστικούς κανόνες. Ένα παράδειγμα μιας ταξινομημένης εικόνας είναι ένας χάρτης κάλυψης γης, στον οποίο παρουσιάζεται η κατανομή της βλάστησης, του γυμνού εδάφους, των βοσκοτόπων, των αστικών περιοχών κ.ά.

Πριν εξηγήσουμε αναλυτικά τη μεθοδολογία της φασματικής ταξινόμησης θα αναφερθούμε στις βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται με τη βοήθεια του διαγράμματος της Εικόνας 2.2. Στο διάγραμμα (α) παρουσιάζονται οι φασματικές υπογραφές για τρεις γενικές επιφάνειες: βλάστηση, έδαφος, νερό. Η φασματική απόκριση στο παράδειγμα αυτό είναι η ακτινοβολία που κατέγραψε ο αισθητήρας και η οποία μετατρέπεται σε ψηφιακές τιμές (0-255).



Εικόνα 2.1: Η διαδικασία της φασματικής ταξινόμησης σε μια εικόνα διαστάσεων 7x7.

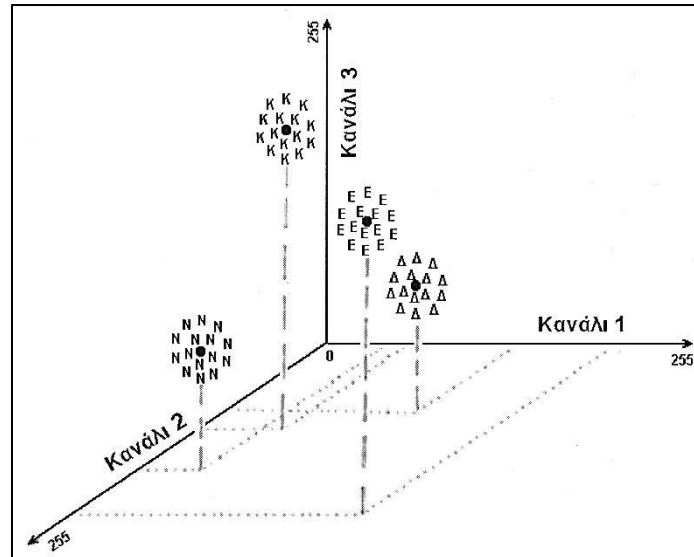
Η εικόνα ταξινομείται σε τρεις τάξεις Α, Β, Γ με βάση τις ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων (0-3, 4-6 και 7-9). Συνήθως οι τάξεις είναι περισσότερες και τα φασματικά κανάλια είναι τουλάχιστον τρία. (Καρτάλης και Φείδας).



Εικόνα 2.2: (α) Φασματικές υπογραφές για τρεις γενικές επιφάνειες: βλάστηση, έδαφος, νερό. (β) Δισδιάστατος φασματικός χώρος στον οποίο ο οριζόντιος άξονας είναι η απόκριση στο μήκος κύματος  $\lambda_1$  και ο κατακόρυφος η απόκριση στο  $\lambda_2$  (γ) Διακριτές τάξεις σε ένα δισδιάστατο φασματικό χώρο στον οποίο διακρίνεται η διασπορά των σημείων τους. (δ) Τα όρια διαχωρισμού των τάξεων (Τροποποιημένο σχήμα από Sabins, 1996).

Επιλέγοντας δυο μήκη κύματος  $\lambda_1 = 0.55 \mu\text{m}$  και  $\lambda_2 = 1 \mu\text{m}$  μπορούμε να αποδώσουμε τη φασματική απόκριση των τριών επιφανειών σε ένα δισδιάστατο διάγραμμα, στο οποίο ο οριζόντιος άξονας είναι η απόκριση στο μήκος κύματος  $\lambda_1$  και ο κατακόρυφος η απόκριση στο  $\lambda_2$  (Εικόνα 2.2β). Ένα τέτοιο διάγραμμα ονομάζεται *φασματικός χώρος (feature space)*. Είναι φανερό, ότι τα τρία σημεία που αντιστοιχούν στις τρεις επιφάνειες διαχωρίζονται σε μεγάλο βαθμό. Στην πραγματικότητα όμως, τα εικονοστοιχεία μιας εικόνας μπορεί να ανήκουν σε μια επιφάνεια με κοινά φασματικά χαρακτηριστικά (όπως βλάστηση, έδαφος, νερό), αλλά τα αντίστοιχα σημεία της κάθε επιφάνειας στο φασματικό χώρο, να διασπείρονται σε μια μεγαλύτερη έκταση (Εικόνα 2.2γ). Το σύνολο των σημείων σε ένα φασματικό χώρο που έχουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά και συνεπώς αντιστοιχούν σε εικονοστοιχεία της ίδιας επιφάνειας, ομαδοποιούνται και χαρακτηρίζονται ως φασματικές **τάξεις ή ομάδες (classes or clusters)**. Ένας αριθμός φασματικών τάξεων που ανήκουν σε μια γενικότερη κατηγορία η οποία ενδιαφέρει το χρήστη (π.χ. δάσος) καλείται **τάξη πληροφόρησης (information class)**. Είναι δυνατόν, χρησιμοποιώντας στατιστικούς κανόνες, οι οποίοι βασίζονται στον υπολογισμό μέσω τιμών, τυπικών αποκλίσεων και πιθανοτήτων, να διαχωρίσουμε με όρια τις τάξεις αυτές, έτσι ώστε οποιοδήποτε τυχαίο εικονοστοιχείο να ταξινομείται σε μια τάξη ανάλογα με τη θέση του σημείου του στον φασματικό χώρο. Έτσι, για παράδειγμα, το εικονοστοιχείο της εικόνας που αντιστοιχεί στο σημείο W του φασματικού χώρου στην Εικόνα 2.2δ, ταξινομείται στην τάξη 2 δηλ. στο έδαφος.

Ο διαχωρισμός των τάξεων γίνεται συνήθως σε φασματικό χώρο τριών ή και περισσότερων διαστάσεων δηλ. σε τρία ή και περισσότερα κανάλια. Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της θέσης των τάξεων (K = καλλιέργειες, E = γυμνό έδαφος, Δ = δάσος και N = νερό) σε ένα τρισδιάστατο φασματικό χώρο των καναλιών 1, 2 και 3 μιας εικόνας.



Εικόνα 2.3: Παράδειγμα φασματικού χώρου τριών διαστάσεων των καναλιών 1,2 και 3 μιας εικόνας με τέσσερις φασματικές τάξεις καλά διαχωρισμένες (K = καλλιέργειες, E = γυμνό έδαφος, Δ = δάσος και N = νερό) (Τροποποιημένο σχήμα από Sabins, 1996).

### 2.3.1. Τα στάδια της ταξινόμησης

Η διαδικασία της ταξινόμησης γίνεται σέ επτά στάδια:

- το στάδιο της εκπαίδευσης (training),
- το στάδιο της επιλογής του κανόνα ταξινόμησης (decision rule),
- το στάδιο της αξιολόγησης των υπογραφών,
- το στάδιο της εφαρμογής του κανόνα ταξινόμησης,
- το στάδιο της αντιστοίχισης των φασματικών τάξεων σε τάξεις πληροφόρησης,
- το στάδιο της δημιουργίας χάρτη και συμβόλων
- και το τελικό στάδιο της αξιολόγησης της ταξινόμησης

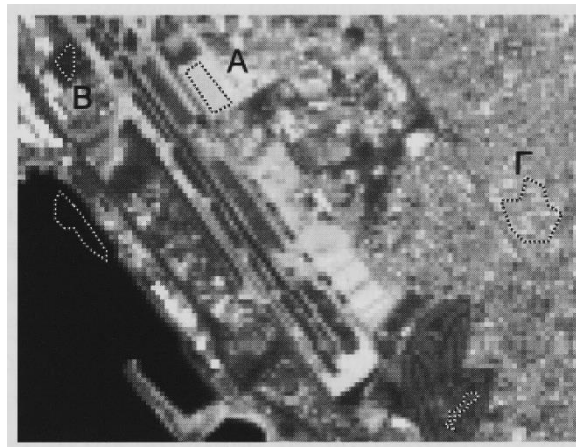
(Erdas Field Guide, 1999).

#### α. Στάδιο της εκπαίδευσης.

Αρχικά, καθορίζονται τα κριτήρια, με τα οποία αναγνωρίζονται οι δομές στην εικόνα, δηλ. τα κριτήρια με τα οποία ορίζονται οι τάξεις. Η εκπαίδευση μπορεί να γίνει είτε με την *επιβλεπόμενη μέθοδο* (supervised, είτε με τη *μη επιβλεπόμενη μέθοδο* (unsupervised).

Η *επιβλεπόμενη εκπαίδευση* αποτελεί μια διαδικασία, η οποία ελέγχεται άμεσα από τον αναλυτή. Με τη μέθοδο αυτή επιλέγονται εικονοστοιχεία τα οποία

αντιπροσωπεύουν αναγνωρίσιμες δομές στην εικόνα ή στοιχεία κάλυψης γης. Το σύνολο αυτών των εικονοστοιχείων καλείται *εκπαιδευτικό δείγμα (training sample)* και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μιας παραμετρικής υπογραφής, η οποία αντιπροσωπεύει μια τάξη στην εικόνα. Για την επιλογή ενός εκπαιδευτικού δείγματος σε μια εικόνα χρησιμοποιούνται πολύγωνα που καλούνται *εκπαιδευτικά πεδία (training sites)* (Εικόνα 2.4). Για τον εντοπισμό των εκπαιδευτικών δειγμάτων στην εικόνα χρησιμοποιούνται βοηθητικά και άλλες πηγές πληροφορίας όπως, αεροφωτογραφίες, επιτόπιες παρατηρήσεις ή χάρτες. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται η πρότερα γνώση της περιοχής ενδιαφέροντος και των τάξεων που επιθυμούμε να δημιουργήσουμε. Εφόσον έχουν καθοριστεί τα φασματικά χαρακτηριστικά των δομών που εντοπίστηκαν, αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό επεξεργασίας εικόνας για τον εντοπισμό εικονοστοιχείων στην εικόνα με παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά, τα οποία στη συνέχεια θα αποδοθούν σε μια τάξη.



**Εικόνα 2.4:** Δημιουργία εκπαιδευτικών πεδίων με τη διαδικασία της επιβλεπόμενης εκπαίδευσης.

Η **μη επιβλεπόμενη εκπαίδευση** είναι μια πιο αυτοματοποιημένη μέθοδος. Χρησιμοποιεί στατιστικούς κανόνες για τον εντοπισμό ομάδων εικονοστοιχείων με παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά και οι οποίες καλούνται *εκπαιδευτικές ομάδες (training clusters)*. Η απόδοση των ομάδων αυτών σε τάξεις με φυσική σημασία γίνεται μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της ταξινόμησης. Αυτές οι ομάδες των εικονοστοιχείων δεν έχουν απαραίτητα αναγνωρίσιμα χαρακτηριστικά στην εικόνα,

όπως π.χ. τύποι εδάφους και χρήσης γης, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πιο σημαντική η ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων με βάση τα φασματικά τους χαρακτηριστικά από την ομαδοποίησή τους σε αναγνωρίσιμες κατηγορίες.

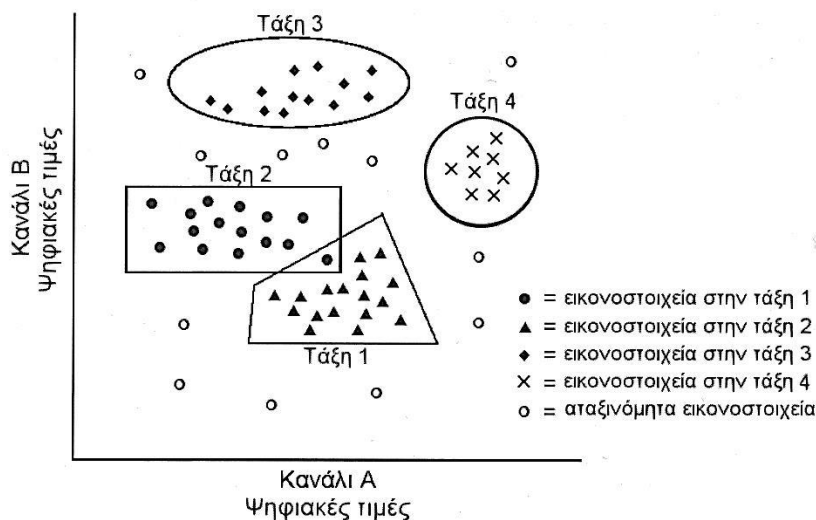
Ο εντοπισμός των τάξεων στη μη επιβλεπόμενη εκπαίδευση εξαρτάται αποκλειστικά από τα ενδογενή φασματικά χαρακτηριστικά των εικονοστοιχείων της εικόνας. Χρησιμοποιείται κυρίως, όταν η γνώση για τα δεδομένα πριν την ταξινόμηση είναι περιορισμένη.

Το στάδιο της εκπαίδευσης ολοκληρώνεται με τη δημιουργία ενός αριθμού υπογραφών που καθορίζουν τα *εκπαιδευτικά δείγματα ή ομάδες (training sample or clusters)*, δηλαδή το σύνολο εικονοστοιχείων που θεωρούμε ότι αντιπροσωπεύει μια τάξη. Κάθε υπογραφή αντιστοιχεί σε μια τάξη και χρησιμοποιείται από το κριτήριο ταξινόμησης για να αποδώσει τα εικονοστοιχεία της εικόνας στην τάξη αυτή. Οι υπογραφές μπορούν να είναι παραμετρικές ή μη παραμετρικές.

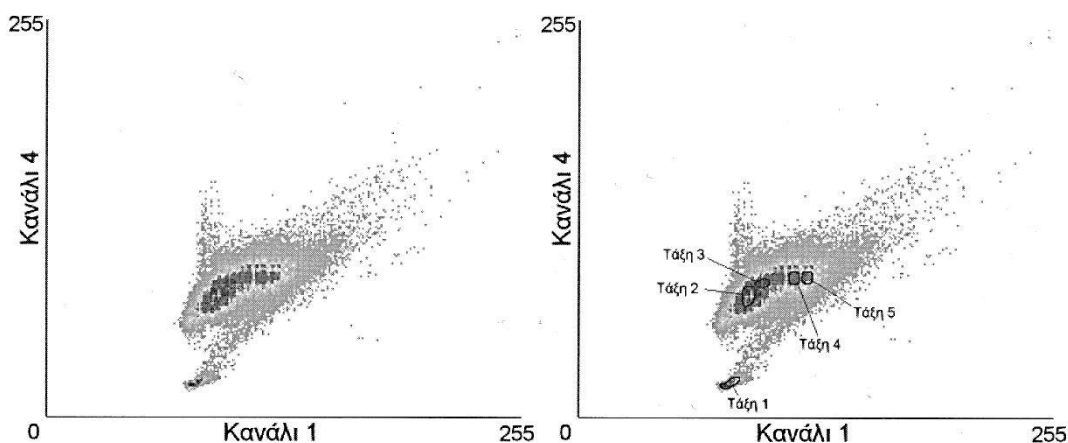
Μια *παραμετρική υπογραφή* βασίζεται στις στατιστικές παραμέτρους (π.χ. μέση τιμή, τυπική απόκλιση και πίνακας συμμεταβλητότητας) των εικονοστοιχείων που αποτελούν ένα εκπαιδευτικό δείγμα ή ομάδα. Κάθε υπογραφή χαρακτηρίζεται από την τιμή των στατιστικών αυτών παραμέτρων, η οποία και θα χρησιμοποιηθεί από τον κανόνα ταξινόμησης για την απόδοση των εικονοστοιχείων της εικόνας σε μια τάξη. Παραμετρικές υπογραφές μπορούν να αποτελούν είτε τα εκπαιδευτικά δείγματα μιας επιβλεπόμενης εκπαίδευσης είτε οι ομάδες που προήλθαν από τη μη επιβλεπόμενη εκπαίδευση. Ένα σύνολο παραμετρικών υπογραφών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση ενός ταξινομητή (π.χ. ελάχιστης απόστασης ή μέγιστης πιθανοφάνειας) ο οποίος θα ταξινομεί τα εικονοστοιχεία της εικόνας με βάση αποκλειστικά στατιστικούς κανόνες.

Μια *μη παραμετρική υπογραφή* δεν βασίζεται σε στατιστικούς κανόνες, αλλά σε διακριτές δομές που εντοπίζονται στο φασματικό χώρο της εικόνας και οι οποίες χρησιμοποιούνται για την οριοθέτηση των τάξεων (Εικονά 2.5 και Εικονά 2.6). Οι δομές αυτές επιλέγονται στο φασματικό χώρο δυο καναλιών της εικόνας με πολύγωνα ή ορθογώνια. Οι υπογραφές που δημιουργούνται με τον τρόπο αυτό χρησιμοποιούνται από ένα μη παραμετρικό ταξινομητή για την απόδοση των εικονοστοιχείων της εικόνας σε μια τάξη, με βάση τη θέση τους στο φασματικό χώρο

σε σχέση με τα όρια των υπογραφών. Μη παραμετρικές υπογραφές μπορούν να παραχθούν μόνο κατά τη διαδικασία της επιβλεπόμενης ταξινόμησης.



Εικόνα 2.5: Η διαδικασία ορισμού των ορίων τεσσάρων μη παραμετρικών υπογραφών σε ένα διδιάστατο φασματικό χώρο (Τροποποιημένο σχήμα από Erdas Field Guide, 1999).



Εικόνα 2.6: Η διαδικασία ορισμού των ορίων πέντε μη παραμετρικών υπογραφών στον διδιάστατο φασματικό χώρο των καναλιών 1 και 2 της εικόνας Landsat TM των νοτίων προαστίων της Αθήνας. Τάξη 1 = θάλασσα, Τάξη 2 = δασική βλάστηση, Τάξη 3 = καλλιέργειες, Τάξη 4 = αραιοκατοικημένες περιοχές, Τάξη 5 πυκνοκατοικημένες περιοχές.

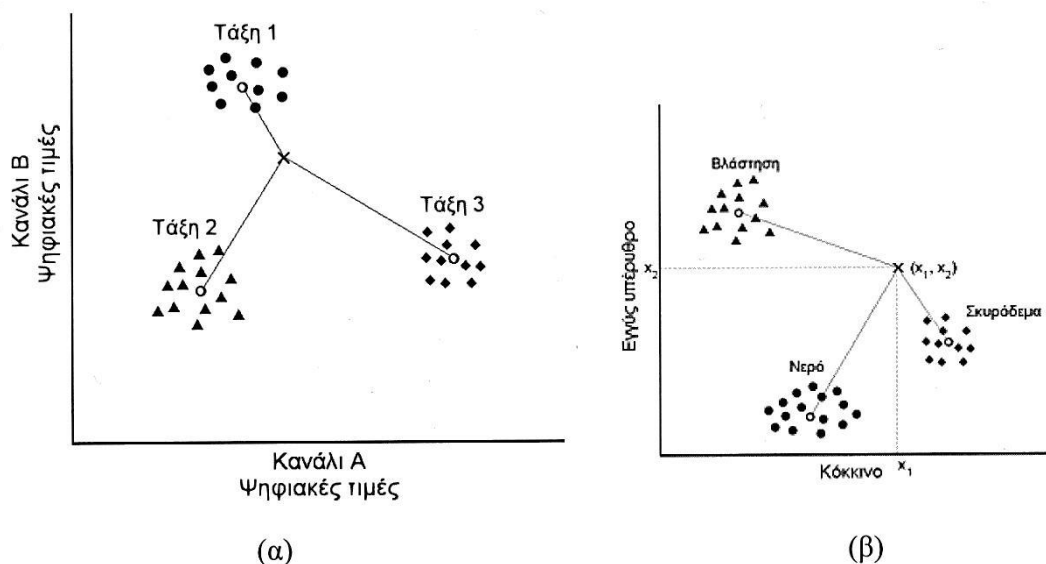
**β. Στάδιο της επιλογής του κανόνα ταξινόμησης.** Μετά τον καθορισμό των υπογραφών, τα εικονοστοιχεία της εικόνας θα πρέπει να αποδοθούν σε τάξεις με τη χρήση ενός κανόνα ταξινόμησης. Ο κανόνας ταξινόμησης (*decision rule*) αποτελεί μια μαθηματική έκφραση, η οποία ταξινομεί τα εικονοστοιχεία σε διακριτές τάξεις



χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των υπογραφών. Ανάλογα με το είδος των υπογραφών που χρησιμοποιούνται, ένας ταξινομητής μπορεί να είναι *παραμετρικός* ή *μη παραμετρικός* (Erdas Field Guide, 1999).

Ο **παραμετρικός ταξινομητής** χρησιμοποιεί παραμετρικές υπογραφές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά (μέση τιμή, τυπική απόκλιση και πίνακας συμμεταβλητότητας) των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων των υπογραφών. Με την εφαρμογή ενός παραμετρικού ταξινομητή κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας αποδίδεται σε μια τάξη. Οι πιο γνωστοί παραμετρικοί ταξινομητές βασίζονται σε τρεις κανόνες ταξινόμησης

**α. Ο κανόνας της ελάχιστης απόστασης (minimum distance decision rule)** υπολογίζει την απόσταση στο φασματικό χώρο (φασματική απόσταση) μεταξύ του σημείου που αντιστοιχεί στο υπό εξέταση εικονοστοιχείο και του κέντρου της κάθε υπογραφής (δηλ. της μέσης τιμής των εικονοστοιχείων που την αποτελούν). Στην Εικόνα 2.7, η φασματική απόσταση παριστάνεται με τις γραμμές που ενώνουν το υπό εξέταση εικονοστοιχείο με το κέντρο της κάθε υπογραφής, βάσει της οποίας αποδίδεται στην πιο κοντινή τάξη, δηλ. την τάξη 1.

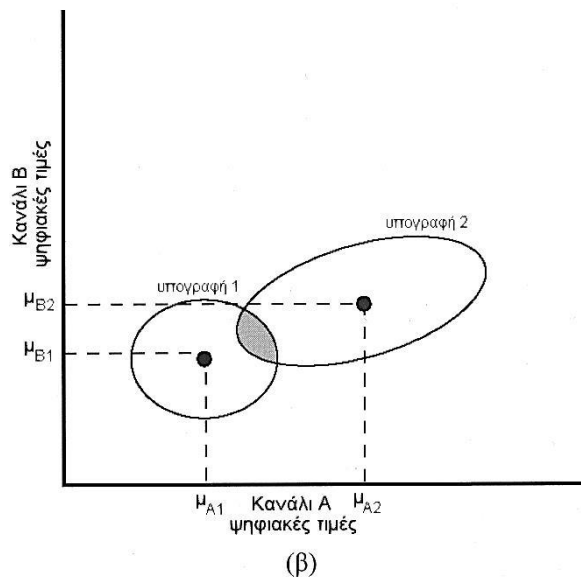
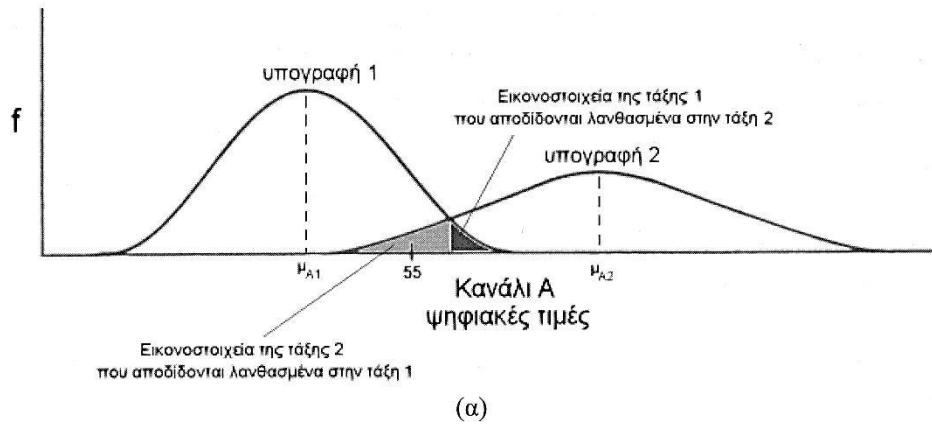


Εικόνα 2.7: (α) Ο κανόνας ταξινόμησης της ελάχιστης απόστασης. Ένα εικονοστοιχείο της εικόνας αποδίδεται σε μια τάξη με βάση την απόσταση του στο φασματικό χώρο από το κέντρο της αντίστοιχης υπογραφής. Εδώ το εικονοστοιχείο ταξινομείται στην τάξη 1 (Τροποποιημένο σχήμα από Erdas Field Guide, 1999). (β) Τρεις τάξεις στο φασματικό χώρο του εγγύς υπέρυθρου και του κόκκινου μιας πολυφασματικής εικόνας. Το εικονοστοιχείο  $(x_1, x_2)$  θα ταξινομηθεί στο σκυρόδεμα, με βάση τη φασματική απόστασή του από το κέντρο της τάξης.

Οι ταξινομητές της ελάχιστης απόστασης αν και είναι απλοί στην σύλληψη και την εφαρμογή τους, δεν είναι πάντοτε αρκετά ακριβείς και για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιούνται ευρέως. Συγκεκριμένα, με τη μέθοδο αυτή δεν ελέγχεται η ομοιογένεια της κάθε υπογραφής, με αποτέλεσμα υπογραφές με μεγάλη μεταβλητότητα όπως π.χ. αστικές περιοχές, να αποτελούνται από εικονοστοιχεία που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από το κέντρο της υπογραφής στο φασματικό χώρο. Στην περίπτωση αυτή, εικονοστοιχεία που βρίσκονται στα όρια των αστικών περιοχών μπορούν να ταξινομηθούν λανθασμένα σε άλλη τάξη με την μέθοδο της ελάχιστης απόστασης. Αντιθέτως, υπογραφές με μεγάλη ομοιογένεια και συνεπώς μικρή μεταβλητότητα στο φασματικό χώρο, όπως π.χ. η θάλασσα, τείνουν να αποδώσουν μεγαλύτερο αριθμό εικονοστοιχείων στην αντίστοιχη τάξη καθώς αυτά βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο της τάξης αυτής, παρά στα κέντρα των άλλων τάξεων. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι κανένα εικονοστοιχείο της εικόνας δεν παραμένει αταξιινόμητο.

**β. Ο κανόνας της απόστασης Mahalanobis (Mahalanobis distance decision rule)** αποτελεί μια παραλλαγή του κανόνα της ελάχιστης απόστασης, στον οποίο πέραν της φασματικής απόστασης του εικονοστοιχείου από το κέντρο της υπογραφής, λαμβάνεται υπόψη και η μεταβλητότητα της υπογραφής μέσω του πίνακα συμμεταβλητότητας (covariance matrix). Ψηφιακές υπογραφές που αποτελούνται από εικονοστοιχεία με μεγάλη διακύμανση και συνδιακύμανση στις ψηφιακές τιμές τους, δημιουργούν τάξεις με ανάλογα χαρακτηριστικά ομοιογένειας και αντίστροφα. Έτσι, για παράδειγμα τα εικονοστοιχεία μιας αστικής περιοχής (με τυπική υπογραφή με μεγάλη μεταβλητότητα) μπορούν να ταξινομούνται στην τάξη αυτή αν και βρίσκονται μακριά από το κέντρο της αντίστοιχης υπογραφής στο φασματικό χώρο. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι εξαρτάται σημαντικά από το βαθμό κανονικότητας της κατανομής των δεδομένων σε κάθε κανάλι της εικόνας.

**γ. Ο κανόνας της μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood decision rule)** βασίζεται στην πιθανότητα να ανήκει ένα εικονοστοιχείο σε μια συγκεκριμένη τάξη. Η εξίσωση που χρησιμοποιεί θεωρεί ότι οι πιθανότητες αυτές είναι ίσες για όλες τις τάξεις και ότι τα κανάλια που χρησιμοποιούνται έχουν κανονική κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι όταν τα ιστογράμματα των υπογραφών έχουν δυο και τρεις κορυφές, τότε η εφαρμογή της μεθόδου αυτής δεν ενδείκνυται.

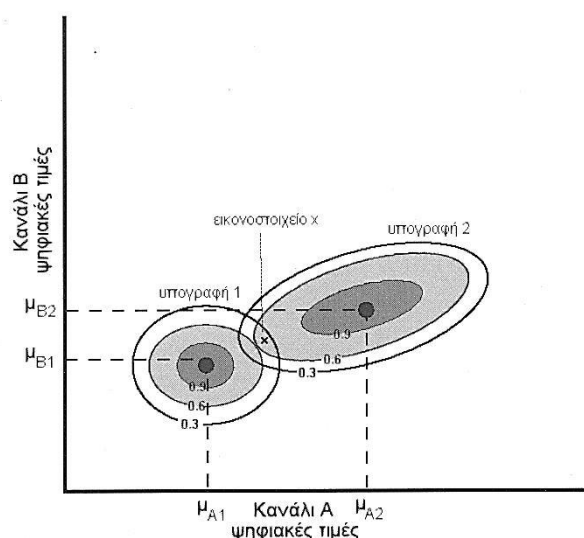


Εικόνα 2.8: (α) Τα ιστογράμματα δυο φασματικών υπογραφών σε ένα κανάλι A και (β) η αναπαράστασή τους στο δισδιάστατο φασματικό χώρο των καναλιών A και B, στα οποία παρουσιάζεται το φαινόμενο της αλληλοεπικάλυψης των υπογραφών.

Η μέθοδος αυτή προσπαθεί να επιλύσει το πρόβλημα της αλληλοεπικάλυψης των υπογραφών στο φασματικό χώρο (Εικόνα 2.7α). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8, όταν δυο υπογραφές επικαλύπτονται σε μια περιοχή του φασματικού χώρου, τότε τα εικονοστοιχεία της εικόνας που θα βρεθούν στην κοινή περιοχή αλληλοεπικάλυψης μπορούν να αποδοθούν σε λάθος τάξη. Έτσι, το εικονοστοιχείο με ψηφιακή τιμή 55 στο κανάλι A μπορεί να ταξινομηθεί λανθασμένα στην τάξη 2, ανάλογα με τον κανόνα ταξινόμησης που εφαρμόζεται. Το πρόβλημα αυτό είναι δυνατόν να επιλυθεί με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας, αποδίδοντας σε κάθε εικονοστοιχείο μια πιθανότητα να ανήκει σε μια από τις δυο τάξεις. Η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά της κάθε υπογραφής (μέση τιμή και πίνακας συμμεταβλητότητας) και λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα της κάθε υπογραφής.

Κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας αποδίδεται στην τάξη στην οποία η πιθανότητα να ανήκει είναι η μέγιστη δυνατή (Εικόνα 2.9).

Ο κανόνας της μέγιστης πιθανοφάνειας αποτελεί την πιο ακριβή μέθοδο ταξινόμησης, με την προϋπόθεση ότι οι υπογραφές που χρησιμοποιούνται έχουν οριστεί σωστά, είναι αντιπροσωπευτικές των αντίστοιχων τάξεων και έχουν κανονική κατανομή, καθώς λαμβάνει υπόψη πολλές στατιστικές παραμέτρους και ιδιαίτερα την ομοιογένεια των υπογραφών. Απαιτείται ο έλεγχος του ιστογράμματος της κάθε υπογραφής, ώστε να αποφευχθούν μεγάλες αποκλίσεις από την κανονική κατανομή.



Εικόνα 2.9: . Ο διδιάστατος φασματικός χώρος στον οποίο έχουν χαραχθεί οι καμπύλες ίσης πιθανότητας για να ανήκει ένα εικονοστοιχείο σε μια τάξη. Σύμφωνα με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας, το εικονοστοιχείο  $x$  θα αποδοθεί στην τάξη 2 καθώς η πιθανότητα ( $P = 0.7$ ) να ανήκει σε αυτή είναι μεγαλύτερη από την πιθανότητα ( $P = 0.4$ ) να ανήκει στην τάξη 1.

Ο μη παραμετρικός ταξινομητής δεν βασίζεται σε στατιστικά στοιχεία και για το λόγο αυτό δεν εξαρτάται από τις ενδογενείς ιδιότητες των δεδομένων. Το γεγονός αυτό βοηθάει στη βελτίωση της ακρίβειας της ταξινόμησης για συγκεκριμένες τάξεις, οι οποίες δεν έχουν κανονική κατανομή, όπως οι αστικές περιοχές και το γυμνό πετρώδες έδαφος. Στην περίπτωση αυτή, ένα εικονοστοιχείο αποδίδεται σε μια τάξη αν βρίσκεται μέσα στα όρια μιας μη παραμετρικής υπογραφής στο φασματικό χώρο (Εικόνα 2.5). Ουσιαστικά, ο ταξινομητής στην περίπτωση αυτή, εξετάζει εάν το εικονοστοιχείο βρίσκεται μέσα στα όρια μιας μη παραμετρικής υπογραφής για να το κατατάξει στην αντίστοιχη τάξη. Τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται εκτός ορίων κάθε υπογραφής ή ανήκουν σε δυο υπογραφές είτε παραμένουν αταξινομήτα είτε

κατατάσσονται σε μια από τις τάξεις με βάση παραμετρικούς κανόνες (π.χ. ελάχιστης απόστασης, μέγιστης πιθανοφάνειας κ.α.) αφού πρώτα υπολογιστούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά κάθε τάξης (μέση τιμή και πίνακας συμμεταβλητότητας). Τα όρια των μη παραμετρικών υπογραφών, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν από το μη παραμετρικό ταξινομητή, ορίζονται με δυο τρόπους:

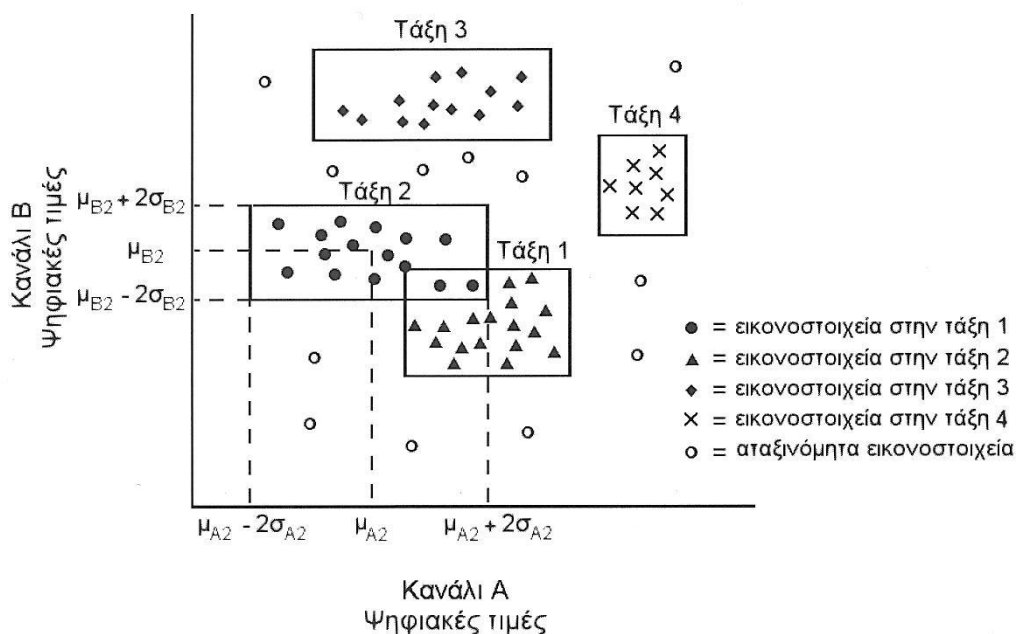
**α. Ο κανόνας του φασματικού χώρου.** Στην περίπτωση αυτή τα όρια των υπογραφών ορίζονται απευθείας στο φασματικό χώρο δυο καναλιών με τη χρήση διαφόρων σχημάτων (ελλείψεις, ορθογώνια, πολύγωνα) (βλ. Εικόνα 2.5 και Εικόνα 2.6). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για μια πρώτη, γενική ταξινόμηση και αποτελεί έναν ακριβή τρόπο για την ταξινόμηση τάξεων με μη κανονική κατανομή (π.χ. αστικές περιοχές). Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η πιθανότητα αλληλοεπικάλυψης των υπογραφών και η παραγωγή αταξινομητων εικονοστοιχείων στην τελική ταξινομημένη εικόνα.

**β. Ο κανόνας του παραλληλεπιπέδου.** Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στα εκπαιδευτικά πεδία που έχουν προέρθει από την εφαρμογή της διαδικασίας της επιβλεπόμενης εκπαίδευσης στην εικόνα. Για κάθε υπογραφή καθορίζονται ανώτερα και κατώτερα όρια σε κάθε κανάλι, μέσα στα οποία πρέπει να βρεθούν οι ψηφιακές τιμές ενός εικονοστοιχείου για να αποδοθούν στην αντίστοιχη τάξη. Ουσιαστικά, τα όρια της παραμετρικής υπογραφής που θα δημιουργηθεί αποτυπώνονται με ένα παραλληλόγραμμο στο φασματικό χώρο δυο διαστάσεων (Εικόνα 2.10). Τα όρια αυτά μπορούν να είναι:

- είτε η ελάχιστη και μέγιστη ψηφιακή τιμή των εικονοστοιχείων που ανήκουν σε ένα εκπαιδευτικό δείγμα,
- είτε η μέση τιμή συν-πλην έναν αριθμό τυπικών αποκλίσεων (π.χ.  $\mu \pm 2\sigma$ ) των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων που ανήκουν σε ένα εκπαιδευτικό δείγμα,
- είτε όρια ορισμένα από τον αναλυτή με βάση τη πρότερα γνώση των χαρακτηριστικών εκπαιδευτικών δειγμάτων.

Η μέθοδος του παραλληλεπιπέδου είναι απλή και γρήγορη στην εφαρμογή της, καθώς χρησιμοποιεί σταθερά όρια για τον ορισμό των υπογραφών και δεν επηρεάζεται από την κανονικότητα της κατανομής των ψηφιακών τιμών στις υπογραφές. Χρησιμοποιείται συνήθως, για μια πρώτη γενική ταξινόμηση, στην οποία περιορίζεται ο αριθμός των τάξεων στις οποίες μπορεί να αποδοθεί ένα

εικονοστοιχείο πριν εφαρμοστεί μια πιο ακριβής και σύνθετη μέθοδος (π.χ. της μέγιστης πιθανοφάνειας). Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται στις γωνίες του παραλληλογράμμου αποδίδονται στην αντίστοιχη τάξη, αν και η φασματική τους απόσταση από το κέντρο της υπογραφής είναι μεγάλη.



Εικόνα 2.10: Ο κανόνας ταξινόμησης του παραλληλεπίπεδου για τέσσερις υπογραφές χρησιμοποιώντας δυο τυπικές αποκλίσεις για τον καθορισμό των ορίων (Τροποποιημένο σχήμα από Erdas Field Guide, 1999).

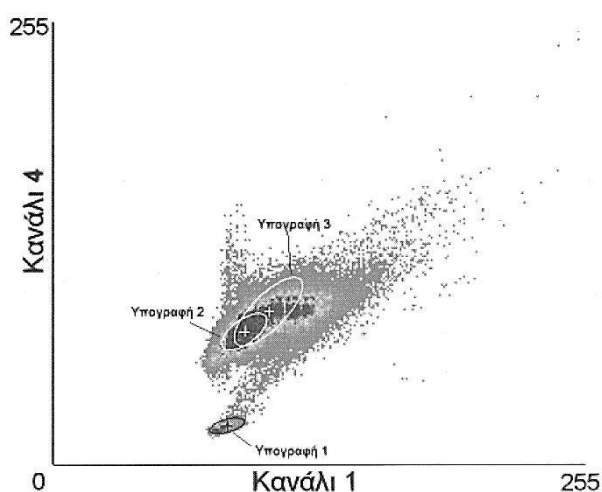
**γ. Στάδιο της αξιολόγησης των υπογραφών.** Πριν την εφαρμογή του κανόνα ταξινόμησης, οι υπογραφές που παράχθηκαν από τη διαδικασία εκπαίδευσης μπορούν να αξιολογηθούν, απαλειφθούν, ακόμη και να συγχωνευτούν με υπογραφές που προέκυψαν από άλλη διαδικασία εκπαίδευσης. Η συγχώνευση των υπογραφών επιτρέπει την εκτέλεση σύνθετων ταξινομήσεων με τη χρήση υπογραφών που προέρχονται από περισσότερες από μια διαδικασίες εκπαίδευσης (επιβλεπόμενες ή μη, παραμετρικές ή μη).

Υπάρχουν έλεγχοι που βοηθούν στην εκτίμηση της αντιπροσωπευτικότητας των υπογραφών σε σχέση με την τάξη που τους αντιστοιχεί. Η αξιολόγηση των υπογραφών είτε αυτές προέρχονται από επιβλεπόμενη είτε από μη επιβλεπόμενη εκπαίδευση, μπορεί να γίνει με τις ακόλουθες μεθόδους:

**Σύγκριση με την αρχική εικόνα.** Πρόκειται για μια μέθοδο, η οποία βασίζεται στην ικανότητα του αναλυτή να αναγνωρίζει πρότυπα στην εικόνα. Οι υπογραφές αξιολογούνται, συγκρίνοντας τα ταξινομημένα εικονοστοιχεία με την αρχική εικόνα.

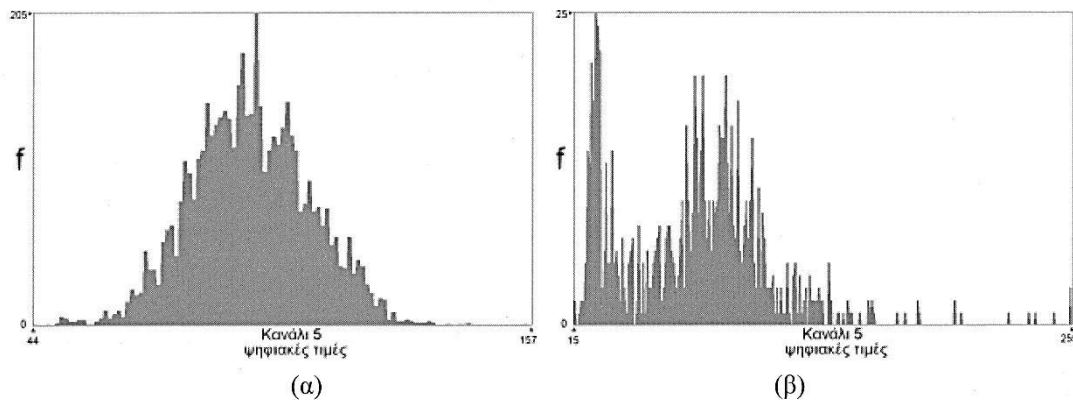
Ανάλογα με τις δυνατότητες του λογισμικού επεξεργασίας εικόνας η σύγκριση γίνεται είτε για κάθε υπογραφή ξεχωριστά είτε για όλες τις υπογραφές ταυτόχρονα. Στην πρώτη περίπτωση, για κάθε μια υπογραφή εμφανίζονται στην οθόνη τα αντίστοιχα ταξινομημένα εικονοστοιχεία, χρησιμοποιώντας ένα απλό κανόνα ταξινόμησης όπως αυτό του παραλληλεπίπεδου και συγκρίνονται με τα πρότυπα που αναγνωρίζονται στην πρωτότυπη εικόνα. Στη δεύτερη περίπτωση, κάθε υπογραφή αξιολογείται συγκρίνοντας την τελική ταξινομημένη εικόνα με την αρχική εικόνα.

**Αξιολόγηση στο φασματικό χώρο.** Με τη μέθοδο αυτή, κάθε υπογραφή αναπαρίσταται στο δισδιάστατο φασματικό χώρο δυο καναλιών της εικόνας, με σχήματα όπως ελλείψεις και παραλληλόγραμμα με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά της υπογραφής (μέση τιμή και τυπική απόκλιση). Στην Εικόνα 2.11 οι τρεις υπογραφές που προήλθαν από επιβλεπόμενη εκπαίδευση αναπαρίστανται στο δισδιάστατο φασματικό χώρο με τη μορφή ελλείψεων, το κέντρο των οποίων αντιστοιχεί στο κέντρο της υπογραφής και το μέγεθος της έλλειψης αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση της υπογραφής. Η υπογραφή 1 αντιστοιχεί σε θάλασσα, είναι αρκετά ομοιογενής και διακριτή. Η υπογραφή 2 αντιστοιχεί σε δασική βλάστηση, η οποία, αν και αρκετά ομοιογενής, δεν διαχωρίζεται αρκετά από την υπογραφή 3 που αναπαριστά εικονοστοιχεία με καλλιέργειες.



Εικόνα 2.11: Αξιολόγηση τριών υπογραφών στο δισδιάστατο φασματικό χώρο των καναλιών 1 και 4 της εικόνας Landsat TM της περιοχής των νότιων Αθηνών με τη βοήθεια ελλείψεων.

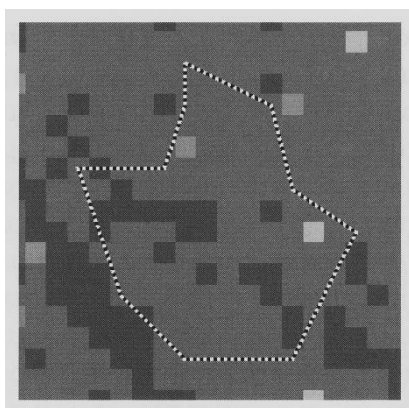
**Ιστογράμματα υπογραφών.** Τα εικονοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό κάθε υπογραφής είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία ιστογραμμάτων με την κατανομή των συχνοτήτων εμφάνισης των ψηφιακών τιμών τους σε ένα κανάλι. Ιδανικές υπογραφές αποτελούν αυτές με κανονική κατανομή συχνοτήτων (Εικόνα 2.12α), ενώ υπογραφές με διπλές ή τριπλές κορυφές χαρακτηρίζονται από μεγάλη ανομοιογένεια (Εικόνα 2.12β).



Εικόνα 2.12: Ιστογράμματα δυο υπογραφών στο κανάλι 5 του Landsat TM (α) Θάλασσα, (β) Καλλιέργειες.

**Πίνακας πιθανότητας (contingency matrix).** Τα εικονοστοιχεία ενός εκπαιδευτικού δείγματος, που προήλθε από επιβλεπόμενη εκπαίδευση, δεν είναι πάντοτε τόσο ομοιογενή, ώστε κάθε εικονοστοιχείο του δείγματος να ταξινομείται στην τελική ταξινομημένη εικόνα στην αντίστοιχη τάξη (Εικόνα 2.13). Εάν η υπογραφή που δημιουργείται είναι αρκετά διακριτή από τις υπόλοιπες υπογραφές, τότε ένα μεγάλο ποσοστό των εικονοστοιχείων που την αποτελούν θα αποδοθεί στην τελική ταξινομημένη εικόνα στη σωστή τάξη. Για να γίνει ο έλεγχος αυτός, εκτελείται μια γρήγορη ταξινόμηση των εικονοστοιχείων των εκπαιδευτικών δειγμάτων, χρησιμοποιώντας κανόνες ταξινόμησης, όπως της ελάχιστης απόστασης και της μέγιστης πιθανοφάνειας. Ακολούθως, δημιουργείται ο πίνακας πιθανότητας, (contingency matrix) στον οποίο παρατίθενται τα ποσοστά των εικονοστοιχείων που ταξινομήθηκαν στη σωστή τάξη. Για παράδειγμα, στον Πίνακα 2.2, τα εικονοστοιχεία της υπογραφής 1, ταξινομήθηκαν όλα (100%) στην αντίστοιχη τάξη 1. Τα εικονοστοιχεία όμως, της υπογραφής 2, ταξινομήθηκαν σωστά μόνο κατά 56.3%, ενώ 35.9% και 7.8% από αυτά αποδόθηκαν λανθασμένα στις τάξεις 3 και 4, αντίστοιχα.





Εικόνα 2.13: Το εκπαιδευτικό πεδίο μιας υπογραφής υπερτιθέμενο στην τελική ταξινομημένη εικόνα. Αρκετά εικονοστοιχεία του εκπαιδευτικού δείγματος έχουν αποδοθεί σε άλλη τάξη.

Πίνακας 2-2: Πίνακας πιθανότητας για πέντε τάξεις.

	Υπογραφή 1	Υπογραφή 2	Υπογραφή 3	Υπογραφή 4	Υπογραφή 5
Τάξη 1	100	0	0	0	0
Τάξη 2	0	56.3	22.3	6.6	0
Τάξη 3	0	35.9	67.3	7.1	0
Τάξη 4	0	7.8	10.4	86.3	0
Τάξη 5	0	0	0	0	100

**Διαχωριστικότητα (separability).** Η διαχωριστικότητα των υπογραφών αποτελεί ένα στατιστικό μέτρο της απόστασης δυο υπογραφών στο φασματικό χώρο. Η διαχωριστικότητα μπορεί να υπολογιστεί για κάθε δυνατό συνδυασμό των καναλιών που χρησιμοποιούνται στην ταξινόμηση και δίνει τη δυνατότητα να εντοπίσουμε τα κανάλια που δεν είναι χρήσιμα στην ταξινόμηση.

Για την αξιολόγηση των υπογραφών υπολογίζεται η φασματική απόσταση των κέντρων κάθε δυνατού ζεύγους υπογραφών. Εάν η φασματική απόσταση μεταξύ δυο υπογραφών δεν είναι στατιστικώς σημαντική σε κανένα δισδιάστατο φασματικό χώρο, τότε οι δυο αυτές υπογραφές δεν είναι αρκετά διακριτές μεταξύ τους και θα πρέπει να συγχωνευθούν.

Για τη διαχωριστικότητα των υπογραφών χρησιμοποιούνται οι πίνακες συμμεταβλητότητας και τα κέντρα των υπογραφών στα κανάλια που συγκρίνονται. Ένας έλεγχος διαχωριστικότητας που χρησιμοποιείται συχνά είναι η *απόκλιση (divergence) (Dij)*, η οποία παίρνει τιμές από 0 έως 2000. Γενικά, αν το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο από 1900, τότε οι υπογραφές διαχωρίζονται. Αν είναι μεταξύ 1700

και 1900, τότε ο διαχωρισμός τους είναι ικανοποιητικός, ενώ για τιμές κάτω από 1700 οι υπογραφές διαχωρίζονται ελάχιστα (Erdas Field Guide, 1999).

#### **δ. Αντιστοίχιση των φασματικών τάξεων σε τάξεις πληροφόρησης.**

Μετά την αξιολόγηση των υπογραφών, και την επιλογή του κατάλληλου κανόνα ταξινόμησης, γίνεται εφαρμογή του ταξινομητή σε όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας, για την απόδοσή τους σε τάξεις. Η διαδικασία της ταξινόμησης μπορεί να παράξει ένα μεγάλο αριθμό φασματικών τάξεων, οι οποίες ανήκουν σε μια γενικότερη κατηγορία. Στην περίπτωση αυτή, στις τάξεις αυτές αποδίδεται μια τάξη πληροφόρησης. Τάξη πληροφόρησης (information class) είναι ένας αριθμός φασματικών τάξεων που ανήκουν σε μια γενικότερη κατηγορία, η οποία ενδιαφέρει το χρήστη. Για παράδειγμα, η τάξη πληροφόρησης "ελαιώνες" μπορεί να αποτελείται από αρκετές φασματικές τάξεις με διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά, όπως αρκετά αραιοί, αραιοί, και πυκνοί ελαιώνες. Επιπλέον, άλλοι παράγοντες, όπως η ποικιλομορφία στις συνθήκες φωτισμού και σκίασης, μπορούν να επιφέρουν επιπρόσθετες διαφοροποιήσεις μεταξύ των φασματικών τάξεων της ίδιας τάξης πληροφόρησης. Όταν η ταξινόμηση της εικόνας ολοκληρωθεί, στις «υπο-τάξεις» αυτές θα πρέπει να αποδοθεί το ίδιο χρώμα που θα αντιστοιχεί σε μια τάξη πληροφόρησης, αυτή των ελαιώνων.

**ε. Δημιουργία χάρτη και συμβόλων.** Όταν η ταξινόμηση της εικόνας ολοκληρωθεί, παράγεται μια νέα εικόνα, η οποία για να αποκτήσει τα χαρακτηριστικά ενός θεματικού χάρτη, θα πρέπει να συνοδεύεται από μια χρωματική κλίμακα, στην οποία κάθε τάξη θα χρωματίζεται και θα ονοματίζεται κατάλληλα. Συνιστάται η απόδοση των τάξεων σε χρώματα να γίνεται με παλέτες χρωμάτων που χρησιμοποιούνται συνήθως στους αντίστοιχους θεματικούς χάρτες διεθνώς, έτσι ώστε ο χρήστης να αντιλαμβάνεται την πληροφορία του χάρτη χωρίς να χρειάζεται λεπτομερή εξέταση της χρωματικής κλίμακας. Βασικά χρώματα αποδίδονται στις βασικές τάξεις, ενώ οι διάφορες υποτάξεις αποδίδονται με τις αποχρώσεις του αντίστοιχου βασικού χρώματος π.χ τα διάφορα είδη καλλιεργειών αναπαρίστανται με αποχρώσεις του καφέ.

**στ. Στάδιο της αξιολόγησης της ταξινόμησης.** Η τελική ταξινομημένη εικόνα περιέχει σημαντική πληροφορία, η οποία, όμως, θα πρέπει να αξιολογηθεί ως προς την αξιοπιστία της. Για το σκοπο αυτό απαιτούνται δεδομένα για το είδος της τάξης

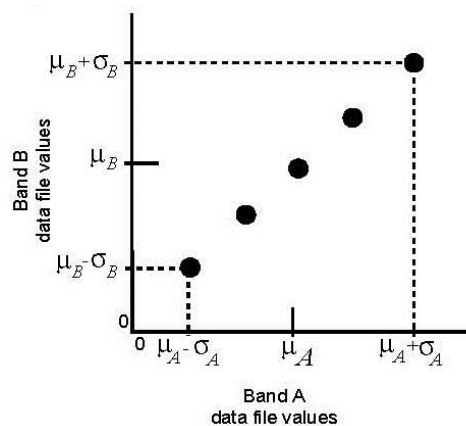
ενός αριθμού εικονοστοιχείων της εικόνας μας. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να προέλθουν είτε από επιτόπια έρευνα είτε από δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες υψηλής χωρικής ανάλυσης είτε ακόμη από άλλους θεματικούς χάρτες, οι οποίοι θεωρούνται αξιόπιστοι. Αυτά τα δεδομένα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της ταξινόμησης βάσει των οποίων υπολογίζεται το ποσοστό των εικονοστοιχείων που ταξινομήθηκαν σωστά σε κάθε τάξη και τελικά αποδίδεται στην ταξινόμηση ένα συνολικό ποσοστό ακρίβειας.

### 2.3.2. Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

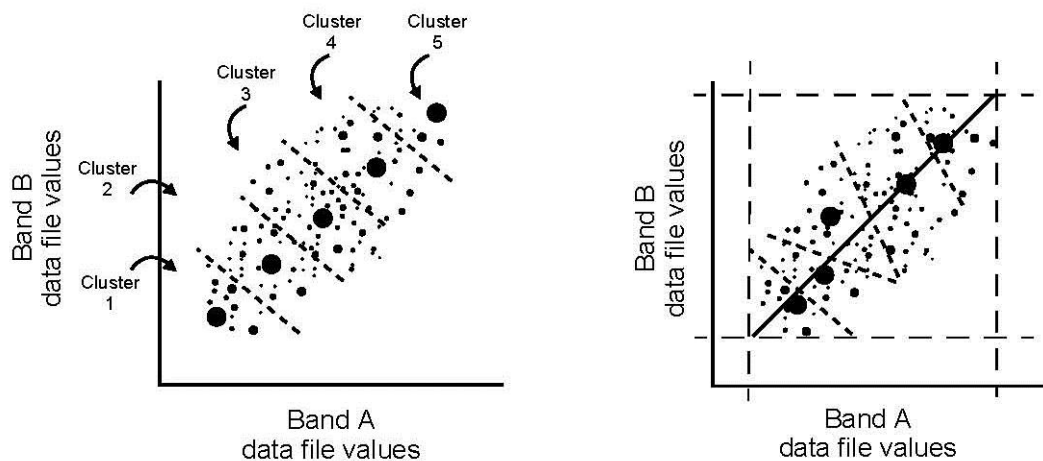
Σκοπός της **μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης** (unsupervised classification) είναι η ομαδοποίηση όλων των εικονοστοιχείων μιας εικόνας σε ομάδες (clusters), με βάση τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά (μέση ψηφιακή τιμή, τυπική απόκλιση, πίνακας συμμεταβλητότητας). Στην περίπτωση αυτή οι ομάδες που δημιουργούνται περιλαμβάνουν όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας και συνεπώς αποτελούν ταυτόχρονα και τις τάξεις της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Τα εικονοστοιχεία της εικόνας συνήθως αποδίδονται σε μια ομάδα δηλ. σε μια τάξη, όταν οι ψηφιακές τους τιμές βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο της συγκεκριμένης τάξης, σύμφωνα με τον κανόνα της ελάχιστης απόστασης. Η δημιουργία μιας τάξης εικονοστοιχείων γίνεται αποκλειστικά με κριτήρια που βασίζονται στις ψηφιακές τιμές και δεν έχει πρακτική αξία αν δεν γίνει αντιστοίχιση της τάξης αυτής σε κάποιο συγκεκριμένο είδος επιφάνειας του εδάφους που απεικονίζει η εικόνα, όπως θάλασσα, είδη εδάφους, είδη βλάστησης κ.α. Ας σημειωθεί ότι ορισμένες από τις ομάδες που δημιουργούνται από τη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση μπορούν να επιλεγούν για να συνδυαστούν με τα εκπαιδευτικά πεδία μιας επιβλεπόμενης εκπαίδευσης και να δημιουργήσουν ένα σύνολο υπογραφών το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την τελική ταξινόμηση της εικόνας.

Οι ομάδες των εικονοστοιχείων καθορίζονται με βάση στατιστικούς κανόνες εφαρμόζοντας αλγόριθμους ταξινόμησης, όπως ο **ISODATA** (Ball and Hall, 1965) ο οποίος βασίζεται στον κανόνα της ελάχιστης απόστασης και εκτελείται στα ακόλουθα στάδια:

- 1) Αρχικά επιλέγεται το επιθυμητό πλήθος των ομάδων (N). Καθώς κάθε ομάδα αποτελεί τη βάση για τη δημιουργία μιας τάξης, ο αριθμός αυτός αποτελεί και το μέγιστο αριθμό τάξεων που θα σχηματιστούν.
- 2) Ο αλγόριθμος αντιστοιχεί με τυχαίο τρόπο σε κάθε μια ομάδα ένα κέντρο στο φασματικό χώρο, δηλ. μία ψηφιακή τιμή σε κάθε φασματικό κανάλι της εικόνας. Συνήθως τα κέντρα αυτά μοιράζονται ομοιόμορφα στο φασματικό χώρο (Εικόνα 2.14α).
- 3) Καταρτίζονται οι ομάδες. Τα εικονοστοιχεία της εικόνας αποδίδονται σε μια ομάδα, όταν οι ψηφιακές τους τιμές βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο της συγκεκριμένης ομάδας με βάση τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (Εικόνα 2.14β). Σ' αυτή την φάση, αν ο αριθμός των εικονοστοιχείων της ομάδας γίνει πολύ μικρός, τότε η ομάδα αυτή αφαιρείται από το σύνολο N.
- 4) Υπολογίζεται εκ νέου, η μέση ψηφιακή τιμή και η τυπική απόκλιση της κάθε ομάδας για όλα τα φασματικά κανάλια με αποτέλεσμα τα κέντρα των ομάδων να μετατοπιστούν στο φασματικό χώρο (Εικόνα 2.80γ).
- 5) Αρχίζει ένας καινούργιος κύκλος από το βήμα 3.



(α)



**Εικόνα 2.14:** Αλγόριθμος ISODATA (α) Αρχικό στάδιο. Ο αλγόριθμος αντιστοιχεί με τυχαίο τρόπο σε κάθε μια ομάδα ένα κέντρο στο φασματικό χώρο (όπου  $\mu$  και  $\sigma$  η μέση τιμή και η απόκλιση των ψηφιακών τιμών όλων των εικονοστοιχείων της εικόνας σε ένα κανάλι). (β) Πρώτο πέρασμα. Τα εικονοστοιχεία της εικόνας αποδίδονται στις ομάδες. (γ) Δεύτερο πέρασμα. Υπολογίζεται, εκ νέου, η μέση ψηφιακή τιμή και η τυπική απόκλιση της κάθε ομάδας για όλα τα φασματικά κανάλια (Πηγή: Erdas Fie/d Guide, 1999).

Ο προηγούμενος κύκλος επαναλαμβάνεται μέχρι το σημείο όπου το μεγαλύτερο ποσοστό των εικονοστοιχείων (συνήθως 95%) να αποδίδεται στην ίδια ομάδα. Ο αριθμός των τάξεων επιλέγεται από την αρχή, έχοντας υπόψη ότι μικρός αριθμός τάξεων θα έχει ως αποτέλεσμα να αποδίδονται στην ίδια τάξη εικονοστοιχεία διαφορετικών επιφανειών π.χ. εικονοστοιχεία δομημένων περιοχών και γυμνού βραχώδους εδάφους. Αντιθέτως, μεγάλος αριθμός τάξεων έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται διαφορετικές τάξεις που όμως τελικά αντιπροσωπεύουν το ίδιο είδος επιφάνειας. Στην περίπτωση αυτή είναι πολύ δύσκολη η αντιστοίχιση των τάξεων σε πραγματικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους. Για παράδειγμα, εικονοστοιχεία της επιφάνειας του εδάφους μπορεί να κατατάσσονται σε ξεχωριστές μικρές τάξεις επειδή η διαφορετική κλίση του εδάφους προσδίδει σε αυτά διαφορετική ανακλαστικότητα, παρότι αντιπροσωπεύουν την ίδια επιφάνεια. Ο βέλτιστος αριθμός των τάξεων καθορίζεται με διαδοχικές δοκιμές.

### 2.3.3. Επιβλεπόμενη ταξινόμηση.

Η μέθοδος της **επιβλεπόμενης ταξινόμησης** (supervised classification) είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όσον αφορά στην ακρίβεια στον εντοπισμό των τάξεων. Η μεθοδολογία είναι απλή: γνωστές και αναγνωρίσιμες τάξεις εντοπίζονται στην εικόνα από τον αναλυτή με βάση την εμπειρία του ή με βάση πραγματικά δεδομένα (π.χ.

παρατηρήσεις πεδίου, χάρτες). Μια περιοχή στην εικόνα η οποία εμφανίζεται αρκετά ομογενής με βάση τους τόνους των χρωμάτων εντοπίζεται και απομονώνεται σε ένα πολύγωνο στην οθόνη που καλείται *εκπαιδευτικό πεδίο (training site)*. Το λογισμικό υπολογίζει όλα τα στατιστικά των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων που ανήκουν σε μια εκπαιδευτική περιοχή (μέση τιμή, τυπική απόκλιση της μέσης τιμής, πίνακας συμμεταβλητότητας κ.α.), τα οποία αποτελούν τη φασματική υπογραφή (spectral signature) της τάξης. Στο επόμενο στάδιο της ταξινόμησης γίνεται απόδοση των εικονοστοιχείων της εικόνας σε τάξεις με βάση τις ψηφιακές τιμές τους και τις υπογραφές που καθορίστηκαν στο στάδιο της εκπαίδευσης εφαρμόζοντας ένα κανόνα ταξινόμησης (π.χ. ελάχιστης απόστασης, μέγιστης πιθανοφάνειας κ.α.).

Με την επιβλεπόμενη ταξινόμηση γίνεται καλύτερη αναπαράσταση της κάλυψης γης η οποία οφείλεται κυρίως στον τρόπο επιλογής των περιοχών εκπαίδευσης. Τα αποτελέσματα στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι πιο ακριβή, όσο καλύτερη γνώση της υπό μελέτη περιοχής έχουμε ή οποία επιτυγχάνεται είτε με παρατήρηση πεδίου είτε μέσω έγκυρων χαρτογραφικών πηγών της περιοχής.

#### **2.3.4. Διαφορές επιβλεπόμενης και μή επιβλεπόμενης ταξινόμησης.**

Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση, ο χρήστης στηρίζεται στην ικανότητα αναγνώρισης των εκπαιδευτικών πεδίων και την αριστερή γνώση των στοιχείων τους και όχι σε στατιστικές διαδικασίες, για να βοηθήσει το σύστημα να καθορίσει τις φασματικές υπογραφές που θα χρησιμοποιηθούν για τη ταξινόμηση των εικονοστοιχείων της εικόνας. Συνήθως, αυτή η γνώση αποκτάται είτε από την επιτόπια έρευνα στην περιοχή μελέτης και τη χρήση GPS είτε μέσω έγκυρων χαρτογραφικών πηγών της περιοχής. Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι καλύτερα ο αναλυτής να έχει κατά νου ένα σετ από επιθυμητές υπογραφές δηλ. να έχει καθορίσει εκ των προτέρων ένα σχήμα ταξινόμησης και μετά να δημιουργήσει τις υπογραφές επιλέγοντας τα κατάλληλα εκπαιδευτικά πεδία στην εικόνα. Η μέθοδος ταξινόμησης αυτή είναι κατάλληλη όταν θέλουμε να εντοπίσουμε ένα σχετικά μικρό αριθμό τάξεων, όταν έχουμε επιλέξει εκπαιδευτικά πεδία με βάση παρατηρήσεις πεδίου ή όταν υπάρχει η δυνατότητα επιλογής διακριτών και ομογενών περιοχών στην εικόνα ως εκπαιδευτικές περιοχές. Με την επιβλεπόμενη ταξινόμηση γίνεται καλύτερη αναπαράσταση της κάλυψης γης, η οποία οφείλεται κυρίως στον τρόπο επιλογής των

πεδίων εκπαίδευσης. Τα αποτελέσματα στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι τόσο πιο ακριβή όσο καλύτερη γνώση της υπό μελέτη περιοχής έχουμε.

Η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση έχει ελάχιστες απαιτήσεις από τον αναλυτή σχετικά με τον καθορισμό των τάξεων που πρόκειται να δημιουργηθούν και την επιλογή του αλγόριθμου ταξινόμησης (K-μέσων όρων, ISODATA). Οι τάξεις δημιουργούνται με βάση τις εγγενείς διαφοροποιήσεις των φασματικών χαρακτηριστικών των εικονοστοιχείων χρησιμοποιώντας στατιστικές διαδικασίες. Η επιλογή των τάξεων που θα χρησιμοποιηθούν στην τελική ταξινόμηση γίνεται αργότερα. Η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση επιτρέπει τον εύκολο καθορισμό πολλών τάξεων, οι οποίες δεν αντιστοιχούν απαραίτητα σε συνεχόμενες και εύκολα αναγνωρίσιμες περιοχές στην εικόνα.

### **2.3.5. Εντοπισμός μεταβολών**

Δορυφορικές εικόνες της ίδιας περιοχής που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση μεταβολών στα χαρακτηριστικά της σκηνής όπως η κάλυψη και οι χρήσεις γης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στις πολυχρονικές εικόνες, η χρονική διαφορά λήψης των εικόνων επιλέγεται έτσι ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση δυναμικών γεγονότων και μπορεί να είναι ημέρες, εβδομάδες, μήνες ακόμη και έτη. Στην περίπτωση αυτή, τα δεδομένα θα πρέπει να είναι συγκρίσιμα, για αυτό το λόγο ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δίνεται στη γεωμετρική εγγραφή των εικόνων στο ίδιο προβολικό σύστημα και με την ίδια χωρική, φασματική και ραδιομετρική ανάλυση. Οι εικόνες θα πρέπει επίσης, να έχουν ληφθεί την ίδια εποχή, αλλά διαφορετικά έτη, εκτός κι αν ο σκοπός είναι ο εντοπισμός μεταβολών που οφείλονται στις διαφορετικές εποχές.

Για τον εντοπισμό των μεταβολών (change detection) σε δυο εικόνες είναι δυνατό να εφαρμοστούν τρεις μέθοδοι.

**α. Αφαίρεση ή λόγος των δυο εικόνων.** Στην πρώτη γίνεται σύγκριση δύο εικόνων που ελήφθησαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές με βάση τις ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων τους. Στην περίπτωση αυτή τα δεδομένα θα πρέπει να είναι συγκρίσιμα, για αυτό το λόγο ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δίνεται στην ακρίβεια της ραδιομετρικής βαθμονόμησης των δορυφορικών δεδομένων δηλ. στη διαδικασία μετατροπής των ραδιομετρικών τιμών σε ψηφιακές τιμές και αντίστροφα καθώς

επίσης και στη σταθερότητα των συνθηκών φωτισμού και παρατήρησης (ηλιακής γωνίας, γωνία κατόπτρευσης δορυφόρου).

Αρχικά, γίνεται συνόρθωση ή γεωαναφορά και των δυο εικόνων στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων και με την ίδια χωρική ανάλυση. Εάν η σκηνή χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο, απαιτείται ορθοκανονικοποίηση των δυο εικόνων. Ακολουθώντας, αφαιρούνται οι ψηφιακές τιμές της μιας εικόνας από τις ψηφιακές τιμές των αντίστοιχων εικονοστοιχείων της δεύτερης εικόνας. Τα αποτελέσματα είναι μια νέα εικόνα με θετικές και αρνητικές τιμές για τις μεταβληθείσες περιοχές και με μηδενικές τιμές για τις αμετάβλητες. Η προβολή της εικόνας αυτής, αποδίδοντας ένα επίπεδο του γκρι στις μηδενικές τιμές, θα προσδώσει στις αρνητικές ψηφιακές τιμές σκούρες αποχρώσεις και στις θετικές τιμές ανοικτές αποχρώσεις. Συνήθως, προστίθεται και μια σταθερή τιμή στις ψηφιακές τιμές όλων των εικονοστοιχείων για να εξαλειφθούν οι αρνητικές τιμές και μετά εφαρμόζεται μια ενίσχυση της αντίθεσης για να ενισχυθούν οι διαφορές. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται σε ένα κανάλι πολυφασματικών εικόνων. Ο αναλυτής θα πρέπει να δοκιμάζει διάφορα κατώφλια για να διαχωρίσει τα εικονοστοιχεία που έχουν υποστεί μεταβολές από εκείνα που δεν έχουν υποστεί μεταβολές αλλά παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις στα φασματικά τους χαρακτηριστικά για άλλους λόγους. Η σύγκριση των εικόνων μπορεί να γίνει και με τον υπολογισμό του λόγου των ψηφιακών τιμών των δυο εικόνων, μεθοδολογία η οποία έχει το πλεονέκτημα ότι δεν επηρεάζεται από τις διαφορετικές συνθήκες φωτισμού.

**β. Σύγκριση ταξινομημένων εικόνων.** Στη δεύτερη μέθοδο γίνεται ποιοτική και ποσοτική σύγκριση των ταξινομημένων εικόνων που παρήχθησαν με τη χρήση του ίδιου σχήματος και μεθοδολογίας ταξινόμησης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όταν τα δορυφορικά δεδομένα δεν είναι βαθμονομημένα και συνεπώς δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα, οπότε η σύγκριση γίνεται μεταξύ των ταξινομημένων εικόνων εντοπίζοντας τις μεταβολές των ορίων των αντίστοιχων τάξεων. Οι δυο ταξινομημένες εικόνες συγκρίνονται εικονοστοιχείο προς εικονοστοιχείο για την δημιουργία μιας νέας εικόνας η οποία δείχνει τα εικονοστοιχεία τα οποία αποδόθηκαν σε διαφορετικές τάξεις στις δυο ταξινομημένες εικόνες. Η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται από την ακρίβεια της ταξινόμησης. Τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής πλεονεκτούν σε σχέση με την αφαίρεση των εικόνων καθώς περιέχουν και την



πληροφορία για το είδος των τάξεων που ανήκουν τα εικονοστοιχεία τα οποία παρουσίασαν μεταβολές.

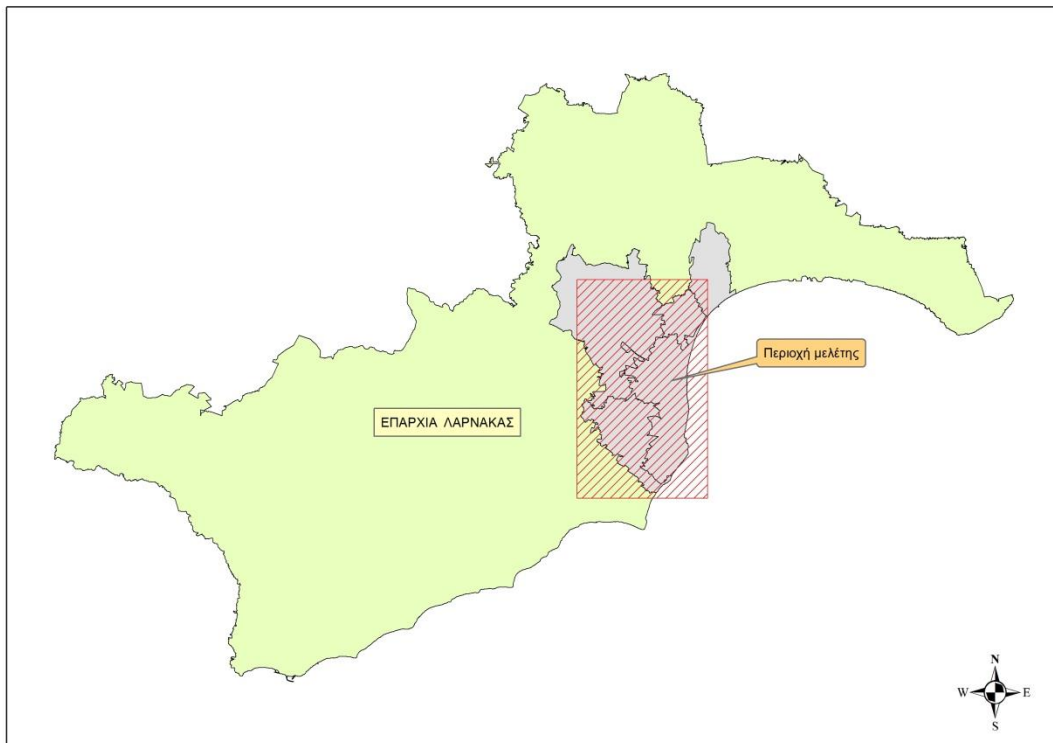
γ. Πολυχρονικές εικόνες. Στην περίπτωση αυτή, τα κανάλια των δυο εικόνων συντίθενται για τη δημιουργία μιας νέας πολυφασματικής εικόνας. Για παράδειγμα, αν οι εικόνες είναι Landsat TM, με έξι κανάλια η κάθε μια (αφαιρείται το θερμικό κανάλι), η νέα σύνθεση θα αποτελείται από δώδεκα κανάλια. Η νέα πολυφασματική εικόνα μπορεί να εξεταστεί με τη χρήση των μεθόδων της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες και της φασματικής ταξινόμησης. Η ταξινόμηση της σύνθεσης δεν εντοπίζει μόνο τις τάξεις κάλυψης και χρήσης γης αλλά και τάξεις οι οποίες αποτελούνται από εικονοστοιχεία τα οποία έχουν υποστεί μεταβολές.

### 3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ

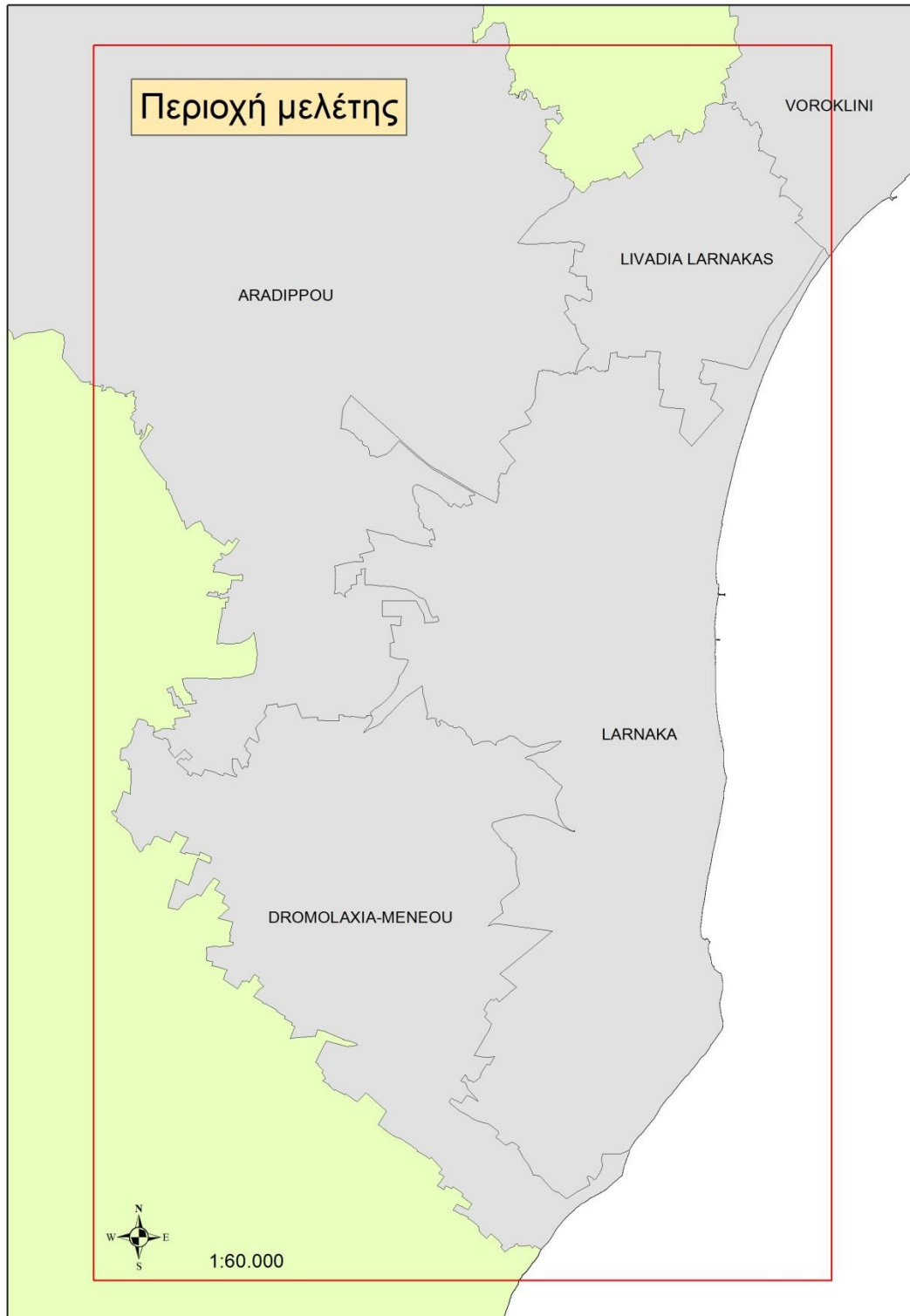
#### 3.1. Περιγραφή της περιοχής μελέτης

Στην παρούσα έρευνα γίνεται μια προσπάθεια παρακολούθησης των αλλαγών χρήσης/κάλυψης γης που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια στην ευρύτερη περιοχή της πόλης της Λάρνακας, η οποία παρουσιάζει μια σημαντική μεταβολή πληθυσμού με βάση τα επίσημα στοιχεία της στατιστικής υπηρεσίας Κύπρου.

Η περιοχή οριοθετήθηκε σύμφωνα με τα πλαίσια λήψης των διαθέσιμων δορυφορικών εικόνων. Επίσης, ένα άλλο κριτήριο για την επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής, είναι η πολύ καλή γνώση της επι τόπου κατάστασης όπως το γεωλογικό υπόβαθρο, οι κλιματικές συνθήκες και τα είδη βλάστησης που επικρατούν.



Εικόνα 3.1: Όρια της περιοχής μελέτης



Εικόνα 3.2: Περιοχή μελέτης

Η αστικοποίηση συχνά θεωρείται ως ένα σημάδι ζωτικότητας των τοπικών οικονομιών, αλλά πολύ σπάνια σχεδιάζεται με προσοχή, γεγονός που προκαλεί

ανησυχίες για την υποβάθμιση του περιβάλλοντος και του πλανήτη. Η παρακολούθηση των αλλαγών σε σχέση με την αστικοποίηση των περιοχών είναι ύψιστης σημασίας για αυτούς που μελετούν την δυναμικότητα των αστικών περιοχών και για αυτούς που πρέπει να διαχειριστούν φυσικούς πόρους. Η τηλεπισκόπηση αποτελεί μια οικονομική και τεχνολογικά ορθή τεχνική για τον χαρακτηρισμό αστικών περιοχών, αλλά και για την επίβλεψη αστικών επεκτάσεων. Πριν διερευνηθεί το θέμα τηλεπισκοπικά, κρίνεται απαραίτητη μια σύντομη αναδρομή στην πορεία της περιοχής μελέτης τα τελευταία χρόνια σε κοινωνικοοικονομική διάσταση.

Στην Λάρνακα, κατά την μεταπολεμική περίοδο, η ταχεία αστικοποίηση έγινε ταυτόχρονα με την ανάπτυξη των αστικών κέντρων. Σήμερα στην Λάρνακα έχει προκληθεί ένα νέο κύμα αστικής εξάπλωσης λόγω της Τουρκικής εισβολής, με ήδη εμφανείς τις κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό συνεπάγεται με τη σειρά του σε αλλαγές στις αρχές του χωρικού σχεδιασμού ώστε να προάγεται η ανταγωνιστικότητα της τοπικής οικονομίας.

Η αστική επέκταση είναι ένα επίσης σημαντικό ζήτημα στην περιοχή. Πρόκειται για φαινόμενο που παρατηρείται κυρίως σε πόλεις με μέτρια στο σύνολο πληθυσμιακή αύξηση, αλλά σημαντική πληθυσμιακή ανακατανομή στον αστικό χώρο.

Γενικά, υπάρχουν διάφορες μορφές οικιστικής εξάπλωσης, όπως:

- η 'προαστιακή' ανάπτυξη, ή συνεχόμενη επέκταση της υφιστάμενης ανάπτυξης μακριά από τον αστικό πυρήνα
- η ανάπτυξη σε 'σειρά', όπου αναφέρεται στην παρατηρούμενη ανάπτυξη κατά μήκος ενός κύριου οδικού άξονα
- η 'διάσπαρτη', ή ασυνεχής ανάπτυξη με χωροθέτηση εκτός των κεντρικών περιοχών μιας πόλης
- και η 'ασυνεχής' ανάπτυξη όπου χωροθετείται εκτός της μονοκεντρικής πόλης.

Το ζήτημα της βιώσιμης ανάπτυξης στην περίπτωση της επέκτασης αστικών περιοχών, λαμβάνει την σημασία της 'έξυπνης ανάπτυξης'. Η στρατηγική αυτή αποτελείται από ελέγχους στη χρήση γης ικανούς να ανιχνεύσουν την ποικιλία των

οικισμών, την συμφόρηση της κυκλοφορίας και την περιβαλλοντική υποβάθμιση. Η ικανότητα του σχεδιασμού των χρήσεων γης στην επιρροή της αστικής επέκτασης μέσω έξυπνων πολιτικών ανάπτυξης, ωστόσο, προϋποθέτει ότι οι στόχοι των πολιτικών που ακολουθούνται αντικατοπτρίζουν τις βασικές θεωρήσεις περί ελέγχου ανάπτυξης.

Από το 2001 μέχρι το 2011, ο πληθυσμός της Λάρνακας αυξήθηκε σχεδόν κατά 25%. Παρατηρήθηκαν εσωτερικές μετακινήσεις κυρίως προς τις λιγότερο συνωστισμένες περιοχές, κυρίως προς το βόρειο και δυτικό τμήμα της πόλης. Επίσης, η ομαδοποίηση των σπιτιών και οι ζώνες οικονομικής δραστηριότητας δημιούργησαν έναν τύπο επέκτασης κατά μήκος των παραθαλάσσιων περιοχών.

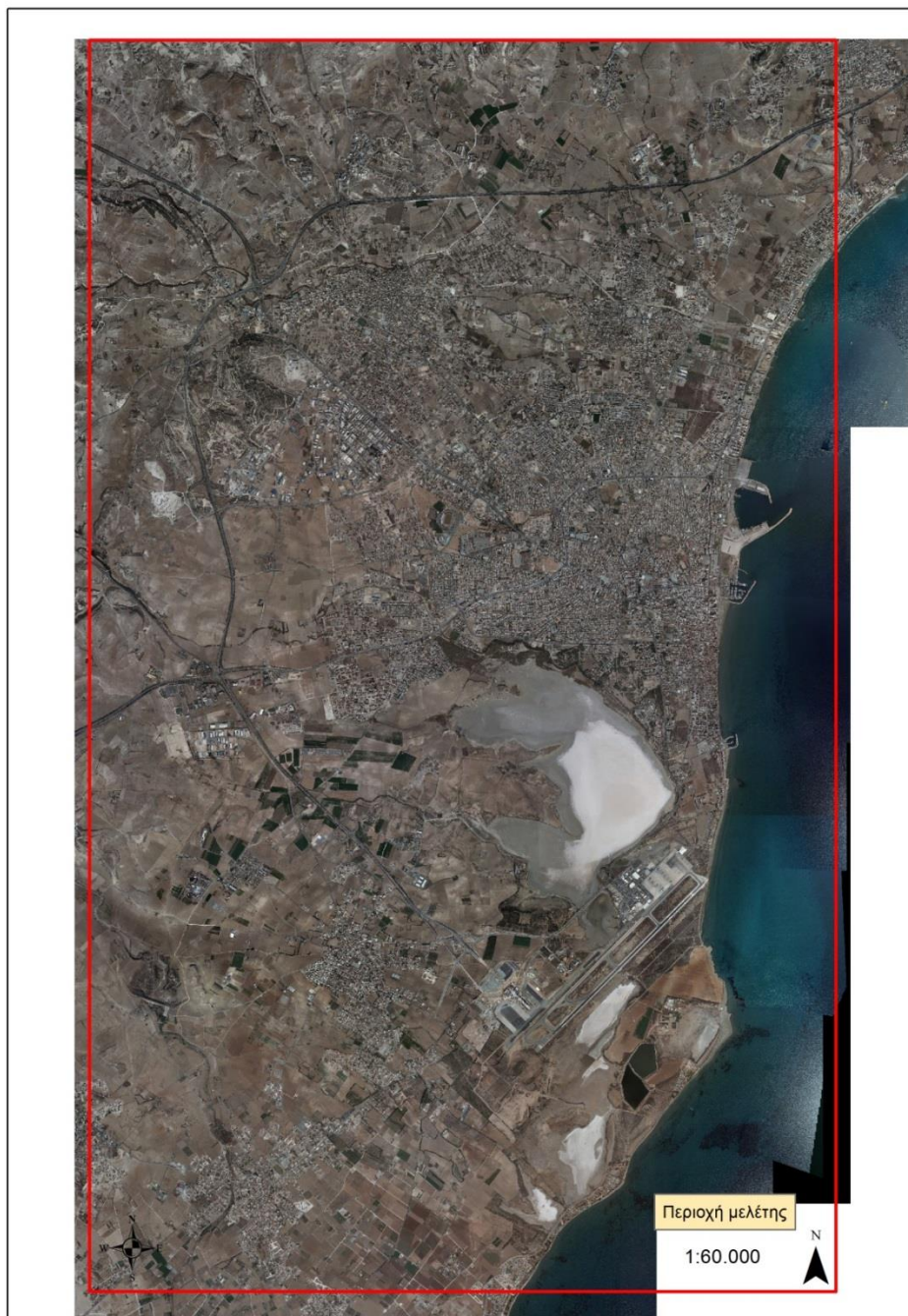
Το 1990 είχε θεσπιστεί το Τοπικό Σχέδιο Λάρνακας, με έμφαση στην περιβαλλοντική προστασία και στην ελεγχόμενη περιαστική ανάπτυξη και είχε ως στόχο την αντιμετώπιση των διαρθρωτικών προβλημάτων του πολεοδομικού συγκροτήματος όσο γίνεται πιο ολοκληρωμένα. Ο κεντρικός κυβερνητικός οργανισμός Τμήματος Πολεοδομίας και Οικήσεως, επέβλεπε τις εφαρμογές του και λειτουργούσε υπό την εποπτεία του Υπουργείου Εσωτερικού και της Επαρχιακής Διοίκησης, χωρίς να καταφέρει όμως να αποδώσει τους λόγους αυτής της άναρχης δόμησης. Πολλοί συγγραφείς θεωρούν πως η μη ελέγξιμη ανάπτυξη αποτελεί ένα παράδειγμα σιωπηρής βραχυπρόθεσμης προσπάθειας ενίσχυσης της οικονομικής ανάπτυξης.

Την τελευταία δεκαετία στην περιοχή της Λάρνακας υπήρξε μια αλματώδης αλλαγή στις αξίες ακινήτων όπου και αποτελεί την κύρια περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η περιοχή της Λάρνακας παρουσιάζει τα χαμηλότερα επίπεδα ανάπτυξης, σε σχέση με τις άλλες πόλεις. Η περιοχή διατήρησε τον χαρακτήρα της μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '80, μέχρι που ξεκίνησε η σημαντική αύξηση του πληθυσμού. Όμως, η περιοχή εξακολουθεί να υστερεί από σημαντικό κέντρο οικονομικής ανάπτυξης. Το οικιστικό πρότυπο αποτελείται από διάφορες μονοκατοικίες διασκορπισμένες στην περιοχή, αλλά και από μερικά παραθαλάσσια θέρετρα στα ανατολικά, τα οποία συνήθως αναπτύχθηκαν λειτουργώντας ως κατοικίες ντόπιων και ξένων κατοίκων. Η αλλαγή της Λάρνακας ξεκίνησε από τότε που λήφθηκε η απόφαση κατασκευής του νέου Διεθνούς Αερολιμένα στην περιοχή και η εγκατάσταση των προσφυγικών συνοικισμών στα Βόρεια, Δυτικά και Νότια της πόλης της Λάρνακας. Μόνο και μόνο

αυτές οι αποφάσεις αναιρούσαν τις αρχικές κατευθύνσεις του σχεδιασμού. Η κατασκευή ενός αεροδρομίου στην περιοχή συνεπάγεται αυτόματα περαιτέρω επενδύσεις σε υποδομές. Η προσβασιμότητα της περιοχής είναι κάτι που άλλαξε ριζικά εξαιτίας του νέου οδικού δικτύου.

Συνοψίζοντας, οι αστικές περιοχές ανήκουν στα πιο δυναμικά συστήματα του πλανήτη. Είναι γεγονός πως σε αυτά κατοικεί περίπου ο μισός πληθυσμός της γης. Η κατανόηση της εξέλιξης τέτοιων περιοχών εξαιτίας της αστικοποίησης είναι σημαντική για τον αστικό σχεδιασμό, για τις περιβαλλοντικές μελέτες και για τη διαχείριση των πόρων. Η χρήση δορυφορικών διαχρονικών και πολυφασματικών απεικονίσεων (κυρίως εικόνων Landsat) είναι αρκετά διευρυμένη για την προτυποποίηση της αύξησης του πληθυσμού στις πόλεις. Το ενδιαφέρον εστιάζεται σε δυο σημεία, αρχικά στην ανίχνευση των αλλαγών στην κάλυψη γης και στην ανάπτυξη προτύπων χρήσεων γης αλλά και πρόβλεψης πληθυσμού σχετιζόμενα με την αστική επέκταση. Λόγω των παραπάνω αλλαγών που έχουν συμβεί τα τελευταία χρόνια στη Λάρνακα, η μελέτη αλλαγών στις χρήσεις γης, μέσω τηλεπισκοπικών απεικονίσεων για αρκετές χρονιές στην περιοχή αυτή, και η προσπάθεια εξαγωγής προτύπων αποτελούν από μόνα τους μια πρόκληση.



Εικόνα 3.3: Αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης (2008).

### 3.2. Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα μελέτη είναι τα εξής:

- Δυο δορυφορικές εικόνες στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο – VNIR των δορυφόρων Quickbird και Geosy-1. Η πρώτη λήφθηκε το 2004 με χωρική διακριτική ικανότητα 60cm, ενώ η δεύτερη το 2012 με χωρική διακριτική ικανότητα 50cm και καλύπτουν

την ίδια περιοχή μελέτης αντίστοιχα.

- Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model - DEM) των περιοχών μελέτης με μέγεθος κελιού 30m χρησιμοποιήθηκε για την ορθοδιόρθωση των εικόνων.
- Ο χάρτης χρήσης/κάλυψης γης CORINE (COoRdination of INformation ou the Environment) του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (Ε.σπ), ο οποίος συντάχθηκε το 2000. Χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη προκειμένου να βοηθείσει να ορισθούν οι κλάσεις.
- Αεροφωτογραφίες της περιοχής που λήφθηκαν το 2008 που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ακρίβειας των τελικών χαρτών.

### 3.2.1. Δεδομένα Quickbird.

Ο δορυφόρος QuickBird είναι ένας υψηλής ανάλυσης εμπορικός δορυφόρος που εκτοξεύθηκε στο διάστημα για πρώτη φορά το 2001 και χρησιμοποιεί το σύστημα λήψης εικόνων BGIS 2000 (Ball Aerospace's Global Imaging System 2000) το οποίο αποτελείται από μία σταθερή, ευέλικτη και υψηλής ακρίβειας τηλεπισκοπική πλατφόρμα, η οποία συλλέγει εμπορικά τηλεπισκοπικά δεδομένα.

Η ακρίβεια του πανχρωματικού δέκτη είναι 60 εκατοστά ενώ του πολυφασματικού 2.4 μέτρα. Το φασματικό εύρος των καναλιών είναι στο μπλε κανάλι 450-520 nm, στο πράσινο κανάλι 520-600 nm, στο κόκκινο κανάλι 630-690 nm και στο εγγύς υπέρυθρο 760-900 nm. Στην εικόνα 2-1 παρουσιάζονται τα τέσσερα επίπεδα των καναλιών αυτών και η σύμπτυξη της πληροφορίας κάθε εικονοστοιχείου αυτών στο πανχρωματικό επίπεδο.



Εικόνα 3.4: Δορυφόρος QuickBird.



Πίνακας 3-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου QuickBird

	QuickBird Pan	QuickBird MS
Αριθμός Φασματικών ζωνών	1	4
Χωρική Διακριτική Ικανότητα	0,6 m	2,4 m
Εκταση κάλυψης μίας πλήρους εικόνας	16,5 km x 16,5 km	16,5 km x 16,5 km
Εύρος φάσματος	0,45 - 0,90 μm	0,45 - 0,53 μm 0,52 - 0,60 μm 0,63 - 0,69 μm 0,76 - 0,90 μm
Ραδιομετρική Διακριτική Ικανότητα	11 bit	11 bit
Στοιχεία τροχιάς	Πολική, μέσο ύψος 450 km	Πολική, μέσο ύψος 450 km
Δυνατότητα λήψης υπό γωνία - παραγωγής στερεοζεύγους	Ναι	Ναι
Διάρκεια λειτουργίας δορυφόρων	2001 - σήμερα	2001 - σήμερα



**Εικόνα 3.5:** Δορυφορική εικόνα QuickBird (2004) της περιοχής μελέτης στα κανάλια 4-3-2

### 3.2.2. Δεδομένα Geoeye-1.

Ο δορυφόρος Geoeye εκτοξεύθηκε την 6η Σεπτεμβρίου 2008 αποτελώντας την εξέλιξη του δορυφόρου IKONOS. Διαθέτει μία σειρά από χαρακτηριστικά που τον καθιστούν ως τον κορυφαίο δορυφορικό δέκτη. Λαμβάνει παγχρωματικές εικόνες με χωρική διακριτική ικανότητα 41 εκατοστά και πολυφασματικές με χωρική διακριτική ικανότητα 1,65 μέτρα. Ο δέκτης μπορεί να λαμβάνει έως 700 000 km<sup>2</sup> παγχρωματικών εικόνων ή 350000 km<sup>2</sup> συγχωνευμένων πολυφασματικών εικόνων ανά ημέρα. Ο δέκτης στρέφεται έως και 60 μοίρες, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει επαναληπτική λήψη πάνω από την ίδια περιοχή σε λιγότερο από τρεις ημέρες. Μπορεί να λαμβάνει στερεοζεύγη εικόνων κατά μήκος της τροχιάς. Μπορεί και λαμβάνει στερεοζεύγη είτε παγχρωματικών εικόνων είτε πολυφασματικών. Η χωρική διακριτική ικανότητα και το εύρος της σκηνής μεταβάλλεται ανάλογα με τη γωνία λήψης.



Εικόνα 3.6: Δορυφόρος Geoeye-1.

Πίνακας 3-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου GEOEYE

	GEOEYE Pan	GEOEYE MS
Αριθμός Φασματικών ζωνών	1	4
Χωρική Διακριτική ικανότητα	0,41 m στις 10'	1,65 m στις 10'
	0,5 m στις 28'	2,0 m στις 28'
	0,059 m στις 35'	2,4 m στις 35'
Εκταση κάλυψης μίας πλήρους εικόνας	15 km x 15 km ανά τυπική σκηνή	15 km x 15 km ανά τυπική σκηνή
	15,2 km στο ναδίρ	15,2 km στο ναδίρ
	300 km x 50 km συνεχούς λήψης	300 km x 50 km συνεχούς λήψης
	224 km x 28 km συνεχούς λήψης στερεοζεύγους	224 km x 28 km συνεχούς λήψης στερεοζεύγους
Εύρος φάσματος	0,50 - 0,90 μm	0,45 - 0,52 μm
		0,52 - 0,60 μm
		0,625 - 0,695 μm
		0,76 - 0,90 μm
Ραδιομετρική Διακριτική ικανότητα	11 bit	11 bit
Στοιχεία τροχιάς	πολική, μέσο ύψος 681 km	Πολική, μέσο ύψος 681 km
Δυνατότητα λήψης υπό γωνία - παραγωγής στερεοζεύγους	Ναι	Ναι
Διάρκεια λειτουργίας δορυφόρων	2008 - σήμερα	2008 - σήμερα



Εικόνα 3.7: Δορυφορική εικόνα Geoeye-1 (2012) της περιοχής μελέτης στα κανάλια 4-3-2.

## 4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι εργασίες που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της προ επεξεργασίας, σκοπό έχουν να διορθώσουν τις ραδιομετρικές και γεωμετρικές παραμορφώσεις των δεδομένων που οφείλονται στον αισθητήρα που τα συλλέγει. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο που ερμηνεύει την φύση των σφαλμάτων αυτών, καθώς και οι μέθοδοι που ακολουθούνται για τη διόρθωσή τους. Συγκεκριμένα η παράγραφος 4.1 περιγράφει το θεωρητικό υπόβαθρο των γεωμετρικών σφαλμάτων και την εφαρμογή της μεθόδου διόρθωσης αυτών, στις εικόνες.

### 4.1. Προεπεξεργασία δεδομένων

#### 4.1.1. Γεωμετρική διόρθωση

Η πρωτογενής δορυφορική εικόνα εμφανίζει γεωμετρικές παραμορφώσεις, οι οποίες διακρίνονται σε συστηματικές και μη συστηματικές παραμορφώσεις (Jensen, 1986):

Οι *συστηματικές παραμορφώσεις* είναι σταθερές και προβλέψιμες. Οι παραμορφώσεις της κατηγορίας αυτής μπορεί να έχουν τις παρακάτω αιτίες (Εικόνα 4.1)

- *Στρέβλωση σάρωσης (skan skew)*. Προκαλείται από την προς τα εμπρός κίνηση του δορυφόρου κατά το χρόνο που απαιτείται για τη σάρωση μιας γραμμής από το κάτοπτρο του αισθητήρα. Προκαλείται έτσι, στρέβλωση στην εικόνα καθώς η σάρωση δεν είναι κάθετη στην τροχιά, αλλά ελαφρώς στρεβλωμένη.
- *Ταχύτητα του κατόπτρου σάρωσης (mirror scan velocity)*. Αν η ταχύτητα περιστροφής του κατόπτρου σάρωσης δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια σάρωσης μιας γραμμής, τότε προκαλείται παραμόρφωση κατά μήκος της γραμμής σάρωσης. Εάν οι μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής του κατόπτρου είναι γνωστές, τότε αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διόρθωση της παραμόρφωσης της εικόνας.
- *Πανοραμική παραμόρφωση (panoramic distortion)*. Καθώς ο αισθητήρας σαρώνει τα άκρα μιας γραμμής, η στιγμιαία γωνία σάρωσης καταγράφει μεγαλύτερη έκταση στην επιφάνεια της γης, με αποτέλεσμα να προκαλείται παραμόρφωση κατά

μήκος της γραμμής σάρωσης η οποία μεγαλώνει από το κέντρο προς τα άκρα της (Εικόνα 4.3β).

- *Ταχύτητα του δορυφόρου (platform velocity).* Αν η ταχύτητα κίνησης του δορυφόρου μεταβληθεί, το μέγεθος της περιοχής που καταγράφεται σε κάθε γραμμή σάρωσης αλλάζει, με αποτέλεσμα να προκαλείται παραμόρφωση της εικόνας κατά μήκος της τροχιάς. Οι παραμορφώσεις αυτού του είδους που προκαλούνται είναι συνάρτηση μόνο της ταχύτητας και κατά συνέπεια μπορούν να υπολογιστούν με βάση τα δεδομένα της τροχιάς.
- *Περιστροφή της γης (earth rotation).* Η περιστροφή της γης κατά τη διάρκεια σάρωσης μιας γραμμής έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση του εύρους σάρωσης και τη δημιουργία παραμόρφωσης της εικόνας κατά μήκος της γραμμής σάρωσης, η οποία είναι συνάρτηση της θέσης και της τροχιάς του δορυφόρου. Κατά τη διαδικασία διόρθωσης, διαδοχικές ομάδες γραμμών της εικόνας (16 για τον Landsat TM) μετατοπίζονται δυτικά για να αντισταθμίσουν την επίδραση της περιστροφής της γης.
- *Προοπτική (perspective).* Σε μερικές εφαρμογές απαιτείται η εικόνα να αποτελεί προβολή της σφαιρικής επιφάνειας της γης σε ένα επίπεδο εφαπτόμενο στην επιφάνειά της με όλες τις γραμμές προβολής να είναι κάθετες στο επίπεδο αυτό. Αυτό εισάγει μια παραμόρφωση κατά μήκος της γραμμής σάρωσης.
- *Ανάγλυφο.* Τα αντικείμενα τα οποία βρίσκονται ακριβώς κάτω από το φακό της κάμερας (στο ίχνος του δορυφόρου δηλ. στο ναδίρ) θα έχουν ορατές μόνο τις κορυφές τους ενώ όλα τα άλλα αντικείμενα θα φαίνονται υπό γωνία δηλ. με κλίση προς τα άκρα της εικόνας έτσι ώστε να είναι ορατή εκτός από την κορυφή τους και η μια πλευρά τους (Εικόνα 4.3α). 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.

Οι **μη συστηματικές παραμορφώσεις** οφείλονται σε αστάθειες της τροχιάς του δορυφόρου, δεν είναι σταθερές και συνεπώς δεν είναι προβλέψιμες. Οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται από μεταβολές στην τροχιά του δορυφόρου

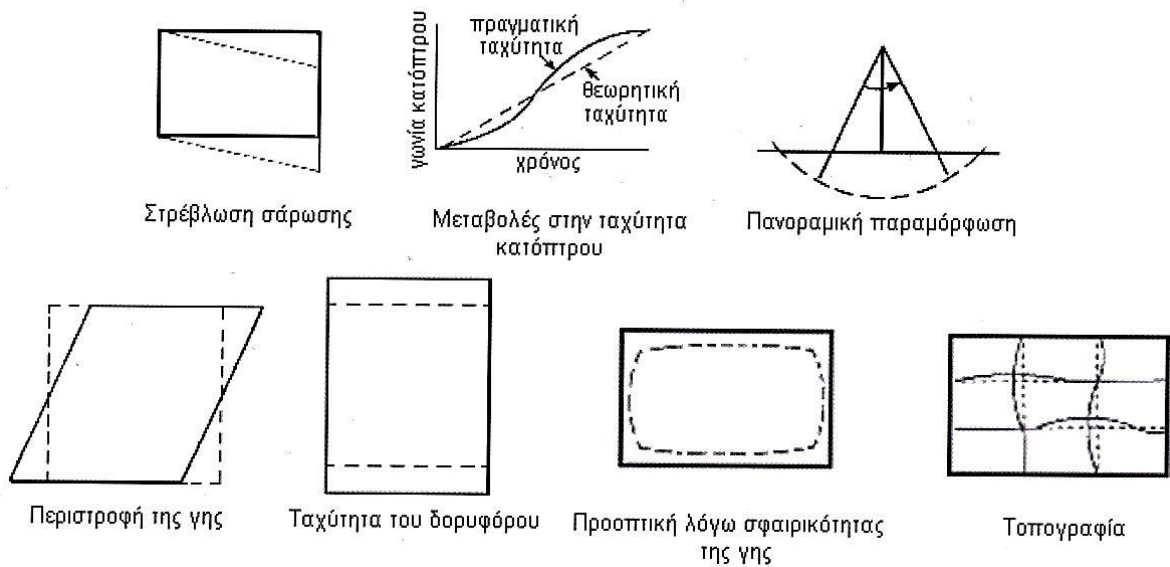
μπορούν να εκτιμηθούν είτε από τα δεδομένα της τροχιάς του δορυφόρου είτε με τη χρήση εδαφικών σημείων ελέγχου (ground-control points). Οι δυο κύριες αιτίες αστάθειας της τροχιάς του δορυφόρου αφορούν στο (Εικόνα 4.2):

- *Ύψος τροχιάς (altitude)*. Μεταβολές στο ύψος της τροχιάς του δορυφόρου προκαλούν παραμορφώσεις στη χωρική διακριτική του ικανότητα και συνεπώς στην κλίμακα της εικόνας.
- *Προσανατολισμό του άξονα του δορυφόρου (attitude)*. Ο ένας άξονας του καταγραφικού συστήματος ενός δορυφόρου συνήθως διατηρείται κάθετος στην επιφάνεια της γης και ο άλλος παράλληλος με τη διεύθυνση κίνησης του δορυφόρου. Η απόκλιση της επιφάνειας του αισθητήρα από αυτόν τον προσανατολισμό δημιουργεί γεωμετρική παραμόρφωση στην εικόνα.

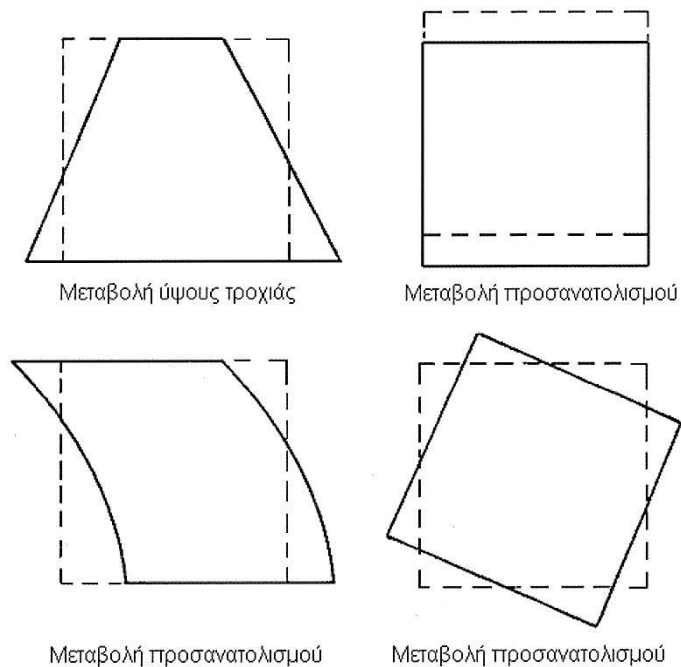
Όλες οι προηγούμενες γεωμετρικές παραμορφώσεις μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες: αυτές που μπορούν να διορθωθούν χρησιμοποιώντας δεδομένα της τροχιάς του δορυφόρου και τη γνώση των εσωτερικών παραμορφώσεων του αισθητήρα, και αυτές οι οποίες δεν είναι δυνατόν να διορθωθούν με ικανοποιητική ακρίβεια χωρίς τη χρήση εδαφικών σημείων ελέγχου. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν όλες οι συστηματικές παραμορφώσεις ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν όλες οι μη συστηματικές παραμορφώσεις. Το *εδαφικό σημείο ελέγχου* (ground-control point, GCP) είναι ένα σημείο στην επιφάνεια της γης, το οποίο μπορεί να εντοπιστεί με ακρίβεια τόσο στην εικόνα όσο και στο χάρτη. Διασταυρώσεις δρόμων, συμβολές ρεμάτων και ποταμών, κτίσματα, αποτελούν τυπικά σημεία ελέγχου.

Όλες οι συστηματικές παραμορφώσεις των εικόνων Landsat TM διορθώνονται από την εταιρεία ή την υπηρεσία που τις διαχειρίζεται. Τα μη συστηματικά όμως σφάλματα παραμένουν στην εικόνα καθιστώντας την μη πλανιμετρική. Η γεωμετρική διόρθωση των σφαλμάτων αυτών μπορεί να γίνει με δυο διαδικασίες: *τη γεωμετρική ανόρθωση και τη γεωμετρική εγγραφή*.





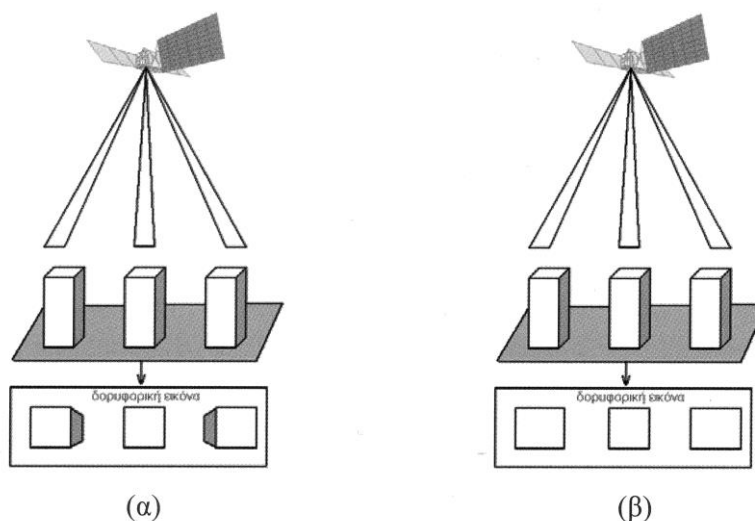
Εικόνα 4.1: Συστηματικές γεωμετρικές παραμορφώσεις (Πηγή: Bernstein and Ferneyhough, 1975).



Εικόνα 4.2: Μή συστηματικές γεωμετρικές παραμορφώσεις (Πηγή: Harris, 1988).

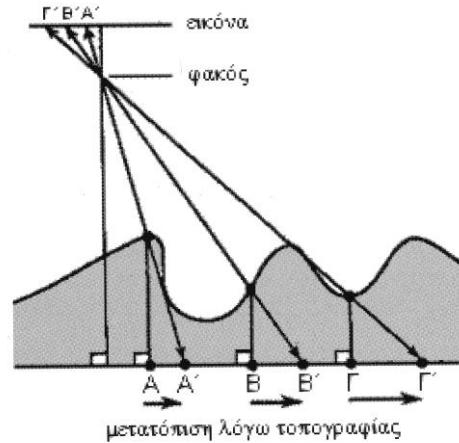
- Η γεωμετρική ανόρθωση ή γεωαναφορά (**geometric rectification or georeferencing**) έχει ως στόχο το μετασχηματισμό του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας, το οποίο έχει παραμορφώσεις, σε ένα συγκεκριμένο σύστημα χαρτογραφικής προβολής με τη χρήση εδαφικών σημείων ελέγχου. Όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας 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 (π.χ. μέτρα σε Μερκατορική προβολή). Με τη διαδικασία αυτή η δορυφορική εικόνα αποκτά την κλίμακα και τις ιδιότητες προβολής του χάρτη επιτρέποντας έτσι την εισαγωγή της σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών και την ταυτόχρονη χρήση της με άλλα θεματικά πεδία πληροφορίας. Η γεωμετρική ανόρθωση όμως δεν μπορεί να απαλείψει τα σφάλματα που εισάγονται στην εικόνα από την τοπογραφία και το ανάγλυφο.



Εικόνα 4.3: (α) Παραμόρφωση ανάγλυφου και (β) πανοραμική παραμόρφωση.

Με την **ορθοκανονικοποίηση (orthorectification)** διορθώνονται οι παραμορφώσεις που εισάγονται στην εικόνα λόγω του υψομέτρου του αναγλύφου (layover)(Εικόνα 4.4). Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model, DEM) και πληροφορίες για τον αισθητήρα του καταγραφικού συστήματος. Οι συντεταγμένες των εδαφικών σημείων ελέγχου που χρησιμοποιούνται στην ορθοκανονικοποίηση είναι στις τρεις διαστάσεις (x, y, z).



Εικόνα 4.4: Το φαινόμενο της γεωμετρικής παραμόρφωσης μιας δορυφορικής εικόνας λόγω μετατόπισης αναγλύφου. Τα σημεία A, B και Γ μετατοπίζονται στην εικόνα στα σημεία A', B' και Γ' λόγω του αναγλύφου σε συνδυασμό με τη γεωμετρία λήψης.

- Η γεωμετρική εγγραφή ή συνόρθωση (**geometric registration**) στοχεύει στο μετασχηματισμό του συστήματος συντεταγμένων μιας εικόνας σε κάποιο άλλο σύστημα μιας άλλης εικόνας αναφοράς, η οποία απεικονίζει την ίδια περιοχή. Στην τελική συνορθωμένη εικόνα όλα τα στοιχεία του εδάφους φαίνονται στην ίδια θέση με την εικόνα αναφοράς. Η εικόνα αναφοράς μπορεί να είναι ή να μην είναι γεωμετρικά ανορθωμένη σε ένα συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων. Με τη διαδικασία αυτή, όλες οι τυχόν γεωμετρικές παραμορφώσεις της εικόνας αναφοράς μεταφέρονται στη μετασχηματισμένη εικόνα. Για το λόγο αυτό, η πιο συνηθής διαδικασία γεωμετρικής διόρθωσης των μη συστηματικών γεωμετρικών σφαλμάτων μιας εικόνας βασίζεται στη μέθοδο της γεωμετρικής ανόρθωσης με βάση ένα ψηφιακό χάρτη, και σε αυτή τη διαδικασία θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας παρακάτω.

Η γεωμετρική ανόρθωση μιας δορυφορικής εικόνας γίνεται σε πέντε στάδια:

**α. Επιλογή του συστήματος χαρτογραφικών συντεταγμένων.**

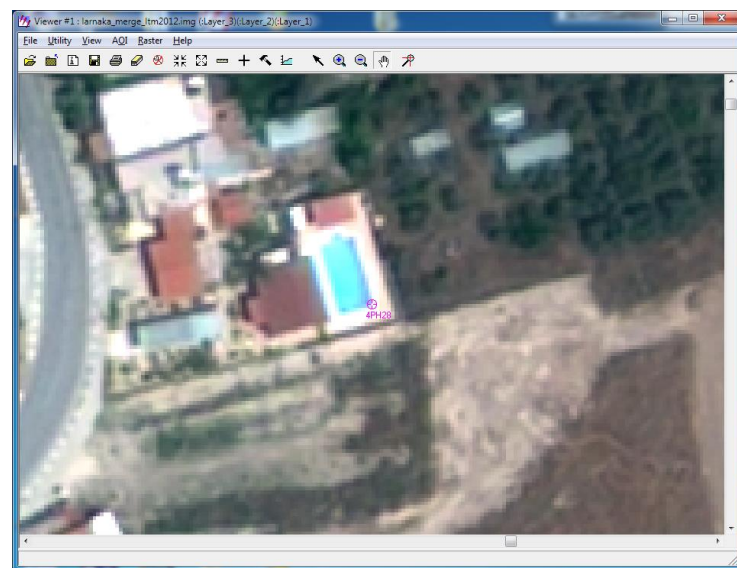
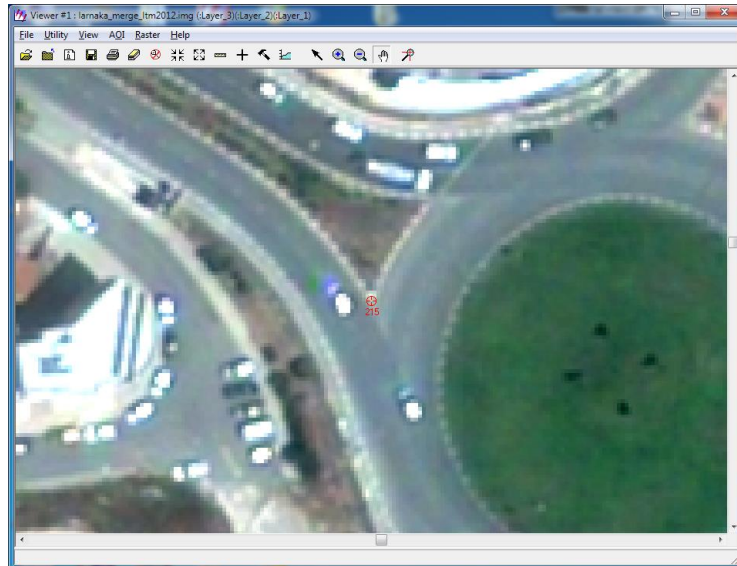
Αρχικά, επιλέγεται το κατάλληλο σύστημα χαρτογραφικών συντεταγμένων με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής. Ο επιλεγμένος χάρτης μπορεί να ψηφιοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως εικόνα ή τα σημεία ελέγχου να εντοπιστούν στο χάρτη και οι συντεταγμένες τους να εισαχθούν με το πληκτρολόγιο στο λογισμικό επεξεργασίας εικόνας.

### *β. Επιλογή των εδαφικών σημείων ελέγχου (GCP).*

Ο αριθμός και η κατανομή των GCP's αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ακρίβεια της γεωμετρικής ανόρθωσης. Ο αριθμός των σημείων ελέγχου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των αγνώστων παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$  της σχέσης μετασχηματισμού που ορίστηκε στο προηγούμενο στάδιο. Ο ελάχιστος αριθμός σημείων για να μετασχηματισμό  $a$  βαθμού είναι  $(a + 1)(a + 2)/2$ . Έτσι, για την εφαρμογή ενός πρωτοβάθμιου μετασχηματισμού απαιτούνται κατ' ελάχιστο 3 σημεία ελέγχου ενώ για δευτεροβάθμιο μετασχηματισμό απαιτούνται τουλάχιστον 6 σημεία. Η κατανομή των GCP's στο χώρο θα πρέπει να είναι τυχαία με κανονική διασπορά σε όλη την εικόνα. Ως σημεία ελέγχου επιλέγονται συνήθως διασταυρώσεις δρόμων, συμβολές ρεμάτων και ποταμών, κτίσματα και γενικά σημεία που αναγνωρίζονται εύκολα στην εικόνα και το χάρτη (Εικόνα 4.5). Οι συντεταγμένες των σημείων αυτών μπορούν να καθοριστούν και στο πεδίο με τη χρήση GPS όπως έγινε στη παρούσα εργασία.

Κάθε εικόνα στο Erdas Imagine μπορεί να έχει 1 GCP αμετάβλητο συνδεδεμένο με αυτό. Το αμετάβλητο GCP αποθηκεύεται στην εικόνα κατά μήκος με το raster layer. Εάν το GCP υπάρχει για το ανώτατο αρχείο, όπου φαίνεται στο viewer, τότε το GCP μπορεί και φαίνεται όταν η εργαλειοθήκη του GCP ανοίγει. Στο cellarray στα δεδομένα GCP, φανερώνεται το GCP Tool, όπου μια στήλη δείχνει το ID από κάθε GCP. Το σημείο ID είναι το όνομα που δίνεται στο GCP σε διακοπτόμενα αρχεία που απεικονίζουν όμοιες γεωγραφικές τοποθεσίες. Η αλληλουχία προκαθορισμένων σημείων ID εξασφαλίζεται, αλλά μπορείς να δημιουργήσεις και δικιά σου.

Ακριβή GCP είναι απαραίτητα για σωστή και ακριβή διόρθωση. Από GCP, οι διορθωμένες συντεταγμένες για διαφορετικά σημεία μας βοηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Όσο περισσότερα και πιο διασκορπισμένα είναι τα GCP στην εικόνα τόσο πιο αξιόπιστη θα είναι η διόρθωση. Σαν GCP μπορεί να είναι διατομές από δύο δρόμους, διαδρόμους αεροσκαφών, πύργους ή κτίρια για μεγάλη κλίμακα.



**Εικόνα 4.4:** Επίγεια σημεία ελέγχου GCP που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία.

*γ. Επιλογή της σχέσης μετασχηματισμού.*

Η σχέση μετασχηματισμού μεταξύ των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων στην εικόνα ( $x'$ ,  $y'$ ) και των συντεταγμένων ( $x$ ,  $y$ ) των αντίστοιχων σημείων στο χάρτη που θα χρησιμοποιηθεί για την ανόρθωση της εικόνας είναι συνήθως ένα πολυώνυμο, οι συντελεστές του οποίου καθορίζονται με τη μέθοδο της παλινδρόμησης μεταξύ των συντεταγμένων ( $x'$ ,  $y'$ ) και ( $x$ ,  $y$ ) των εδαφικών σημείων ελέγχου. Ανάλογα με τις γεωμετρικές παραμορφώσεις της εικόνας, ορίζεται εξ αρχής ο βαθμός του πολυωνύμου που θα χρησιμοποιηθεί στην παλινδρόμηση. Για μέτριου βαθμού

παραμορφώσεις σε μια σχετικά μικρή περιοχή της εικόνας, δυο πρωτοβάθμια πολυώνυμα με συνολικά έξι παραμέτρους προς υπολογισμό, είναι συνήθως αρκετά:

$$\begin{aligned}x' &= a_0 + a_1x + a_2y \\y' &= b_0 + b_1x + b_2y\end{aligned}\quad (4.1)$$

όπου  $x$  και  $y$  είναι οι συντεταγμένες της τελικής ανορθωμένης εικόνας,  $x'$  και  $y'$  οι αντίστοιχες συντεταγμένες στην αρχική εικόνα και  $a_i$  και  $b_i$  οι παράμετροι προς υπολογισμό. Για μεγαλύτερες παραμορφώσεις είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μέχρι και τριτοβάθμια πολυώνυμα.

### **Πολυωνυμικός Μετασχηματισμός**

Πολυωνυμικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό των συντεταγμένων για διόρθωση του χάρτη. Ο βαθμός μετασχηματισμού είναι ο βαθμός του πολυωνύμου που χρησιμοποιείται στον μετασχηματισμό. Το Erdas Imagine επιτρέπει τον 1- $n$  βαθμό μετασχηματισμού, συνήθως όμως χρησιμοποιείται ο 2<sup>ος</sup> ανάλογα με τις ανάγκες και τις ακρίβειες που απαιτούνται.

Μετασχηματισμοί 2ου βαθμού ή υψηλότερου είναι μη γραμμικοί. Η διαδικασία αυτής της διόρθωσης είναι επίσης γνωστή και ως rubber sheeting. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει τα αποτελέσματα από μερικούς μη γραμμικούς μετασχηματισμούς.

Οι 2ου βαθμού μετασχηματισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετατροπή γεωγραφικού πλάτους / γεωγραφικού μήκους στα δεδομένα με επίπεδη σχεδίαση, που καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή και μαζί με στραμμένα δεδομένα (π.χ λόγω στροφής φακού κάμερας). Οι 3ου βαθμού μετασχηματισμοί χρησιμοποιούνται μαζί με στραμμένες αεροφωτογραφίες, όπου έχουν αναλυθεί από χάρτες και εικόνα radar. Οι 4ου βαθμοί μετασχηματισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αεροφωτογραφίες που έχουν υποστεί σε μεγάλο βαθμό στροφή.

Η βάση του μετασχηματισμού για ένα μετασχηματισμό  $t$ , περιέχει βαθμό από συντελεστές :

$$2 \sum_{i=1}^{t+1} i \quad (4.2)$$

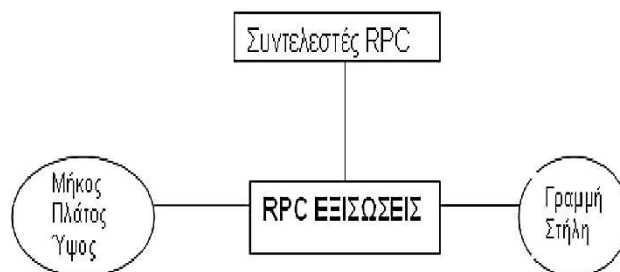
Είναι πολλαπλασιασμός από 2 ομάδες συντελεστών για X και Y. Ένας ευκολότερος τρόπος να φτάσεις στο ίδιο αποτέλεσμα είναι :

$$(t+1)*(t+2) \quad (4.3)$$

### Μοντέλο Κλασματικών Πολυωνύμων

Το μοντέλο των Κλασματικών Πολυωνύμων είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο από τα προσεγγιστικά μοντέλα, λόγω του γεγονότος ότι τα τελικά αποτελέσματα που δίνει είναι και τα πλέον ακριβή.

Η ιδέα των Κλασματικών Πολυωνύμων προήλθε ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης χρήσης προϊόντων από ποικιλία αερομηχανών και δορυφορικών δεκτών. Γεννήθηκε δηλαδή, η ανάγκη για την δημιουργία γενικών μαθηματικών σχέσεων, ικανών να περιγράψουν την σχέση εικόνας και πραγματικού χώρου με επαρκή ακρίβεια και για το σύνολο των διαφόρων δεκτών, ιδανικά μόνο με την μεταβολή ορισμένων συντελεστών. Αυτοί οι συντελεστές ονομάζονται RPC (Rational Polynomial Coefficients), και συνδέουν τις συντεταγμένες της εικόνας (γραμμή, στήλη) με εκείνες του χώρου (γεωγρ. Μήκος, γεωγρ. Πλάτος, υψόμετρο) όπως φαίνεται σχηματικά παρακάτω:



Εικόνα 4.5: Τρόπος λειτουργίας των RPC

Το ίδιο το μοντέλο δεν είναι τίποτε άλλο από ρητές συναρτήσεις (πολυώνυμα ή κλάσματα πολυωνύμων) που περιλαμβάνουν όλη την πληροφορία για τον προσανατολισμό των εικόνων. Οι παράμετροι που περιλαμβάνονται είναι προφανώς περισσότεροι από εκείνους των άλλων μετασχηματισμών (DLT και Αφινικού).

Οι εξισώσεις μετασχηματισμού ανάμεσα στις εικονοσυντεταγμένες σημείων της δορυφορικής απεικόνισης και στις επίγειες συντεταγμένες τους είναι της μορφής (Samadzadegan et al 2005):

$$r_n = x_n = \frac{P_A(X_n, Y_n, Z_n)}{P_B(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{I_A} \sum_{j=0}^{J_A} \sum_{k=0}^{K_A} a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{I_B} \sum_{j=0}^{J_B} \sum_{k=0}^{K_B} b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad (4.4)$$

$$c_n = y_n = \frac{P_C(X_n, Y_n, Z_n)}{P_D(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{I_C} \sum_{j=0}^{J_C} \sum_{k=0}^{K_C} c_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{I_D} \sum_{j=0}^{J_D} \sum_{k=0}^{K_D} d_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad (4.5)$$

$I_{(\cdot)}, J_{(\cdot)}, K_{(\cdot)}$ : οι μέγιστοι βαθμοί των  $X, Y, Z$ , αντίστοιχα, για κάθε πολυώνυμο,  
 $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}, d_{ijk}$ : οι παράμετροι μετασχηματισμού-συντελεστές των πολυωνύμων, και τέλος,  
 $(r_n, c_n)$  ή  $(x_n, y_n)$  και  $(X_n, Y_n, Z_n)$ : οι κανονικοποιημένες εικονοσυντεταγμένες (σε στήλες και γραμμές-pixels) και γεωδαιτικές συντεταγμένες, αντίστοιχα, των σημείων της δορυφορικής απεικόνισης, που προκύπτουν από τους ακόλουθους τύπους:

$$x_n = \frac{x - x_{offset}}{x_{scale}}, \quad y_n = \frac{y - y_{offset}}{y_{scale}}$$

$$\text{και } X_n = \frac{X - X_{offset}}{X_{scale}}, \quad Y_n = \frac{Y - Y_{offset}}{Y_{scale}}, \quad Z_n = \frac{Z - Z_{offset}}{Z_{scale}}$$

(4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10)

Οι τιμές scale και offset είναι διαφορετικές για κάθε δορυφορική εικόνα και περιλαμβάνονται στα μεταδεδομένα της εικόνας (βοηθητικά αρχεία των εικόνων). Η κανονικοποίηση γίνεται συνήθως μεταξύ των διαστημάτων (-1, 1) ή (-0,5, 0,5) και πραγματοποιείται για λόγους σταθερότητας της συνόρθωσης, η οποία ακολουθεί για τον προσδιορισμό των συντελεστών (Κατσιγιάννης 2005).



Τα πολυώνυμα 3ου συνήθως βαθμού, που χρησιμοποιούνται στον αριθμητή και στον παρονομαστή των κλασματικών πολυωνύμων, έχουν από 20 όρους το καθένα και είναι της μορφής:

$$\begin{aligned}
 P(X, Y, Z) = & a_1 + a_2 Y + a_3 X + a_4 Z + a_5 YX + a_6 YZ + a_7 XZ + a_8 Y^2 + a_9 X^2 + a_{10} Z^2 \\
 & + a_{11} XYZ + a_{12} Y^3 + a_{13} YX^2 + a_{14} YZ^2 + a_{15} Y^2 X + a_{16} X^3 + a_{17} XZ^2 \\
 & + a_{18} Y^2 Z + a_{19} X^2 Z + a_{20} Z^3
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

όπου  $X, Y, Z$  είναι οι κανονικοποιημένες γεωδαιτικές συντεταγμένες.

Πρέπει να τονιστεί ότι οι 80 συντελεστές των κλασματικών πολυωνύμων (Rational Polynomial Coefficients, RPCs) (40 για το  $X$  και 40 για το  $Y$ ) δεν έχουν κάποια φυσική σημασία. Έτσι, συνήθως οι RPCs, που υπολογίζονται από την εταιρεία διαχείρισης του εκάστοτε δορυφόρου με βάση το φυσικό μοντέλο του αισθητήρα, παρέχονται μαζί με τις δορυφορικές εικόνες στα μεταδεδομένα τους, όπως στην προκειμένη περίπτωση, και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τους βελτιώσει. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις φωτοσταθερών (GCPs) στην περιοχή που καλύπτεται από την εικόνα. Με κατάλληλη επεξεργασία επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή προσαρμογή του μοντέλου των Rational Functions στην περιοχή ενδιαφέροντος.

LINE\_OFF: +004027.00 pixels

SAMP\_OFF: +002395.00 pixels

LAT\_OFF: +34.90860000 degrees

LONG\_OFF: +033.60160000 degrees

HEIGHT\_OFF: +0231.000 meters

LINE\_SCALE: +004028.00 pixels

SAMP\_SCALE: +002395.00 pixels

LAT\_SCALE: +00.07300000 degrees

LONG\_SCALE: +000.05300000 degrees

HEIGHT\_SCALE: +0644.000 meters

## RPC αρχείο

LINE\_NUM\_COEFF\_1: -2.671099621563766E-04

LINE\_NUM\_COEFF\_2: -3.516416023843225E-03

LINE\_NUM\_COEFF\_3: -1.004999409209267E+00

LINE\_NUM\_COEFF\_4: -2.627862114308285E-03  
LINE\_NUM\_COEFF\_5: +1.779067276681075E-02  
LINE\_NUM\_COEFF\_6: +9.925579871881743E-04  
LINE\_NUM\_COEFF\_7: +2.638278383082652E-03  
LINE\_NUM\_COEFF\_8: -9.695846846472029E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_9: +4.374773551208969E-03  
LINE\_NUM\_COEFF\_10: +4.186667841108142E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_11: -1.336656261332714E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_12: +2.701589301949270E-06  
LINE\_NUM\_COEFF\_13: -2.403878491505969E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_14: -2.660427511871948E-06  
LINE\_NUM\_COEFF\_15: -3.229719109881768E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_16: +2.342163147904621E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_17: -7.101566834057220E-07  
LINE\_NUM\_COEFF\_18: -1.737793925833070E-05  
LINE\_NUM\_COEFF\_19: -3.669179120332250E-06  
LINE\_NUM\_COEFF\_20: -7.861709200311463E-08  
LINE\_DEN\_COEFF\_1: +1.000000000000000E+00  
LINE\_DEN\_COEFF\_2: -1.768976539403119E-02  
LINE\_DEN\_COEFF\_3: -4.358990030334123E-03  
LINE\_DEN\_COEFF\_4: -3.670660092675414E-03  
LINE\_DEN\_COEFF\_5: +2.414419770561006E-05  
LINE\_DEN\_COEFF\_6: +3.309181073792660E-05  
LINE\_DEN\_COEFF\_7: +7.883733424084613E-06  
LINE\_DEN\_COEFF\_8: +3.265179392014916E-05  
LINE\_DEN\_COEFF\_9: -2.328035204463919E-05  
LINE\_DEN\_COEFF\_10: +3.650854569431022E-06  
LINE\_DEN\_COEFF\_11: -9.480467288147259E-09  
LINE\_DEN\_COEFF\_12: -6.393665832532236E-11  
LINE\_DEN\_COEFF\_13: +3.911424896890464E-09  
LINE\_DEN\_COEFF\_14: -1.967439021540086E-08  
LINE\_DEN\_COEFF\_15: +1.627466632110921E-08  
LINE\_DEN\_COEFF\_16: -1.418642265803691E-08  
LINE\_DEN\_COEFF\_17: -4.153666077254339E-09

## RPC αρχείο

LINE\_DEN\_COEFF\_18: -3.724228764434997E-08  
LINE\_DEN\_COEFF\_19: +1.903507091032095E-08  
LINE\_DEN\_COEFF\_20: -1.308495968097044E-09  
SAMP\_NUM\_COEFF\_1: +3.537796649021847E-03  
SAMP\_NUM\_COEFF\_2: +1.010816817953669E+00  
SAMP\_NUM\_COEFF\_3: -1.017125449534046E-02  
SAMP\_NUM\_COEFF\_4: +3.743587506192102E-02  
SAMP\_NUM\_COEFF\_5: -5.121834122247671E-03  
SAMP\_NUM\_COEFF\_6: -3.704593817093882E-03  
SAMP\_NUM\_COEFF\_7: -1.279042259509845E-04  
SAMP\_NUM\_COEFF\_8: -1.788031236976323E-02  
SAMP\_NUM\_COEFF\_9: +3.489747758280954E-05  
SAMP\_NUM\_COEFF\_10: -1.166053614934858E-04  
SAMP\_NUM\_COEFF\_11: +5.283995550155761E-06  
SAMP\_NUM\_COEFF\_12: +3.302954357510275E-05  
SAMP\_NUM\_COEFF\_13: -2.053295611902439E-05  
SAMP\_NUM\_COEFF\_14: +2.530803170216502E-06  
SAMP\_NUM\_COEFF\_15: +3.989826379869262E-05  
SAMP\_NUM\_COEFF\_16: +2.759673438999609E-07  
SAMP\_NUM\_COEFF\_17: +6.514328071954426E-08  
SAMP\_NUM\_COEFF\_18: +2.374494422165209E-05  
SAMP\_NUM\_COEFF\_19: -4.435496359525404E-07  
SAMP\_NUM\_COEFF\_20: +7.234477278108563E-08  
SAMP\_DEN\_COEFF\_1: +1.000000000000000E+00  
SAMP\_DEN\_COEFF\_2: -1.768976539403119E-02  
SAMP\_DEN\_COEFF\_3: -4.35899030334123E-03  
SAMP\_DEN\_COEFF\_4: -3.670660092675414E-03  
SAMP\_DEN\_COEFF\_5: +2.414419770561006E-05  
SAMP\_DEN\_COEFF\_6: +3.309181073792660E-05  
SAMP\_DEN\_COEFF\_7: +7.883733424084613E-06  
SAMP\_DEN\_COEFF\_8: +3.265179392014916E-05  
SAMP\_DEN\_COEFF\_9: -2.328035204463919E-05  
SAMP\_DEN\_COEFF\_10: +3.650854569431022E-06  
SAMP\_DEN\_COEFF\_11: -9.480467288147259E-09

## RPC αρχείο

SAMP\_DEN\_COEFF\_12: -6.393665832532236E-11  
SAMP\_DEN\_COEFF\_13: +3.911424896890464E-09  
SAMP\_DEN\_COEFF\_14: -1.967439021540086E-08  
SAMP\_DEN\_COEFF\_15: +1.627466632110921E-08  
SAMP\_DEN\_COEFF\_16: -1.418642265803691E-08  
SAMP\_DEN\_COEFF\_17: -4.153666077254339E-09  
SAMP\_DEN\_COEFF\_18: -3.724228764434997E-08  
SAMP\_DEN\_COEFF\_19: +1.903507091032095E-08  
SAMP\_DEN\_COEFF\_20: -1.308495968097044E-09  
ERR\_BIAS: 0001.25 meters  
ERR\_RAND: 0001.00 meters

Πιο συγκεκριμένα, για τη βελτίωση των RPCs χρησιμοποιείται η Μέθοδος Terrain Dependent, η οποία στηρίζεται στη γνώση των γεωδαιτικών συντεταγμένων ενός αριθμού GCPs, ομοιόμορφα κατανεμημένων σε όλη την έκταση της δορυφορικής σκηνής. Τα σημεία αυτά, πέρα από το ότι πρέπει να καλύπτουν επαρκώς οριζοντιογραφικά την περιοχή κατόπτευσης, πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά του ανάγλυφου της. Για τη βελτιστοποίηση του μοντέλου των RF πραγματοποιείται συνόρθωση με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων, εισάγοντας στις Σχέσεις (4.4) και (4.5), που αποτελούν τις εξισώσεις παρατήρησης, τις εικονοσυντεταγμένες και τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των GCPs. (Κατσιγιάννης 2005). Τα GCPs, που τελικά θα χρησιμοποιηθούν στη συνόρθωση για τη βελτίωση των 80 συντελεστών, επιλέγονται με διάφορες τεχνικές. Πρέπει να αναφερθεί ότι η λύση που προκύπτει μεταβάλλεται όταν χρησιμοποιηθούν διαφορετικά GCPs.

Μετά τη βελτιστοποίηση του μοντέλου των RF και την προσαρμογή του στην περιοχή μελέτης, είναι δυνατός ο υπολογισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων οποιουδήποτε σημείου της δορυφορικής απεικόνισης, ένδειξη της ακρίβειας των οποίων αποτελεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των GCPs, που εξαρτάται από την ακρίβεια επαναπροσδιορισμού των συντελεστών.

Για την εκτίμηση της ακρίβειας αυτής ακολουθείται η εξής διαδικασία. Αρχικά, δημιουργείται ένα δίκτυο σημείων ελέγχου (Check Points) στο χώρο του αντικειμένου, με πυκνότητα πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των GCPs. Στη συνέχεια,

χρησιμοποιώντας τις νέες τιμές των συντελεστών που υπολογίστηκαν και με γνωστές τις εικονοσυντεταγμένες των Check Points, από τις Σχέσεις (4.4) και (4.5) προσδιορίζονται οι επίγειες συντεταγμένες τους. Από τις αποκλίσεις των επίγειων αυτών συντεταγμένων, από τις πραγματικές γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων ελέγχου, εκτιμάται η ακρίβεια προσαρμογής του μοντέλου που βελτιστοποιήθηκε, στην περιοχή μελέτης.

Τα μοντέλα κλασματικών πολυώνυμων παρουσιάζουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα, που δικαιολογούν την πιο διαδεδομένη χρήση τους σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα γεωαναφοράς:

Τα κλασματικά πολυώνυμα έχουν τη ιδιότητα να προσομοιάζουν ικανοποιητικά τις προοπτικές εξισώσεις.

Με χρήση επαρκούς αριθμού φωτοσταθερών, μπορούν να επιτύχουν πολύ υψηλή ακρίβεια προσαρμογής. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος για τον οποίο τα κλασματικά πολυώνυμα μπορούν να υποκαταστήσουν ικανοποιητικά τα φυσικά μοντέλα αισθητήρων. Συνεπώς, θεωρούνται κατάλληλα για τη γεωαναφορά ενός μεγάλου φάσματος δορυφορικών εικόνων διαφορετικής γεωμετρίας, προερχόμενων από διαφορετικούς δέκτες, καθώς δεν είναι απαραίτητη η γνώση στοιχείων για το φυσικό μοντέλο του δέκτη και για την εφημερίδα του δορυφόρου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση ακόμα και πολύπλοκων γεωμετρικών δομών, λόγω των καλών δυνατοτήτων υπολογισμού που έχουν (Samadzadegan et al, 2005).

Τα κλασματικά πολυώνυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση φωτογραμμετρικών διαδικασιών, όπως ορθοαναγωγή, στερεοαπόδοση και δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM), διατηρώντας την ακρίβεια του δέκτη, χωρίς σημαντική απώλεια ακρίβειας, παρόλο που δεν εμπλέκονται σε αυτά οι παράμετροι του φυσικού μοντέλου του αισθητήρα.

Τέλος, τα κλασματικά πολυώνυμα έχουν μεγάλη ευελιξία στη χρήση συστημάτων αναφοράς, καθώς μπορούν να παρέχουν συντεταγμένες αντικειμένου σε κάθε σύστημα, όπως γεωκεντρικό, γεωγραφικό ή σύστημα που αναφέρεται σε συγκεκριμένη χαρτογραφική προβολή.

Παρόλα αυτά όμως, εμφανίζουν και ορισμένα βασικά μειονεκτήματα (Samadzadegan et al 2005), (Ιωαννίδης 2006)):

Με την εφαρμογή των κλασματικών πολυωνύμων δε μοντελοποιούνται οι τοπικές διαστροφές της δορυφορικής εικόνας.

Οι ενσωματωμένοι όροι τους, όπως και ο βαθμός των πολυωνύμων στον αριθμητή και τον παρονομαστή τους, δεν έχουν κάποια φυσική σημασία, γεγονός που κάνει δύσκολη την ερμηνεία και την εμπέδωση της σημασίας τους. Η επιπλέον συνόρθωση που γίνεται για τον υπολογισμό των συντελεστών των πολυωνύμων, έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή θορύβου στα δεδομένα.

Αν στον αριθμητή και τον παρονομαστή χρησιμοποιούνται πολώνυμα με όλους τους όρους (πλήρη πολώνυμα), για τους αισθητήρες που δεν απαιτούν πλήρη πολώνυμα (όπως π.χ. αισθητήρες με υψηλή γεωμετρική σταθερότητα) θα πρέπει να πραγματοποιηθεί περαιτέρω παραμετρικοποίηση. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα οι πρόσθετοι όροι να εμφανίζουν συσχέτιση σε μεγάλο βαθμό, γεγονός που θα οδηγήσει σε ασταθή λύση.

Τέλος, δεν επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια γεωαναφοράς με την εφαρμογή τους, καθώς δεν εμπλέκεται πουθενά το φυσικό μοντέλο του δέκτη.

#### *δ. Ακρίβεια της γεωμετρικής ανόρθωσης.*

Πριν την εφαρμογή της σχέσης μετασχηματισμού στην εικόνα, είναι σημαντικό να εκτιμηθεί η ακρίβεια της. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται η σχέση αυτή σε όλες τις χαρτογραφικές συντεταγμένες (x, y) των σημείων ελέγχου και οι προκύπτουσες συντεταγμένες (x', y') συγκρίνονται με τις πραγματικές συντεταγμένες (X<sub>orig</sub>, Y<sub>orig</sub>) των σημείων στην αρχική εικόνα με τη βοήθεια του στατιστικού μέτρου RMSE (root mean square error) που ορίζεται ως εξής:

$$\text{RMSE} = \sqrt{(x' - x_{\text{orig}})^2 + (y' - y_{\text{orig}})^2} \quad (4.12)$$

Το RMSE αποτελεί ένα μέτρο της ακρίβειας της γεωμετρικής ανόρθωσης (Εικόνα 4.7). Η ακρίβεια της διόρθωσης θα πρέπει να είναι μικρότερη από ±1 εικονοστοιχείο. Εάν το σφάλμα είναι μεγαλύτερο, τότε η θέση του σημείου ελέγχου στην εικόνα θα πρέπει να επανεξεταστεί και να επανακαθοριστεί η σχέση μετασχηματισμού μέχρι να

επιτευχθεί το επιθυμητό σφάλμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται ακόμη και η διαγραφή του αντίστοιχου σημείου.

Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	X Ref.	Y Ref.	Z Ref.	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.	Match
1	GCP #1							Control					
2	4PH53		257805.670	359296.491	257846.680	359296.893	2.312	Control	0.280	-0.659	0.716	1.325	
3	4PH44		250530.866	358232.300	250561.551	358233.903	33.565	Control	0.305	0.141	0.336	0.622	
4	4PH98		255874.855	359100.932	255715.334	359101.542	0.656	Control	-0.638	0.107	0.647	1.198	
5	215		255117.562	366521.874	255150.055	366534.436	27.294	Check					
6	4PH80		250417.220	365016.932	250436.396	365018.444	75.849	Check					
7	4PH01ADD		257323.932	362174.412	257363.163	362175.060	8.488	Control	0.332	0.384	0.508	0.940	
8	4PH28		256961.252	372043.947	256993.079	372045.050	34.881	Control	0.179	0.363	0.405	0.750	
9	216		250890.259	372209.966	250893.108	372209.012	134.889	Control	-0.373	-0.621	0.725	1.341	
10	4PH60		258418.846	366811.000	258459.851	366812.844	2.005	Control	-0.447	-0.258	0.516	0.955	
11	4PH75		254155.082	370059.360	254183.054	370061.457	47.038	Control	0.452	0.343	0.567	1.050	
12	4PH84		252096.359	363358.367	252127.195	363360.443	34.019	Control	-0.090	0.200	0.220	0.407	
13	GCP #2							Control					

X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.	Match
0.280	-0.659	0.716	1.325	
0.305	0.141	0.336	0.622	
-0.638	0.107	0.647	1.198	
0.332	0.384	0.508	0.940	
0.179	0.363	0.405	0.750	
-0.373	-0.621	0.725	1.341	
-0.447	-0.258	0.516	0.955	
0.452	0.343	0.567	1.050	
-0.090	0.200	0.220	0.407	

Εικόνα 4.6: Η διαδικασία εισαγωγής εδαφικών σημείων ελέγχου στο Erdas Imagine.

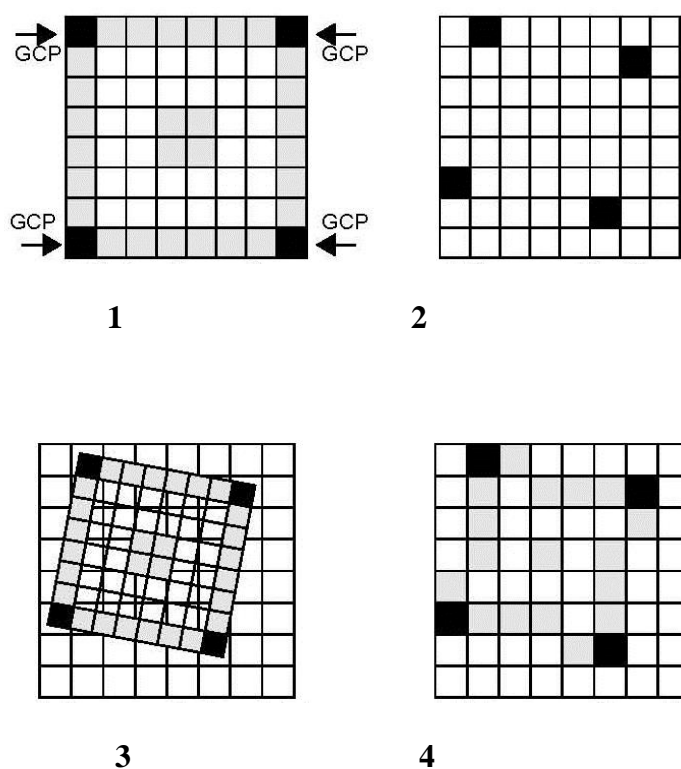
Στην τελευταία στήλη του πίνακα στο κάτω τμήμα της εικόνας διακρίνονται τα σφάλματα της εφαρμογής της σχέσης μετασχηματισμού στα σημεία ελέγχου.

*ε. Εφαρμογή της σχέσης μετασχηματισμού.*

Μετά τον προσδιορισμό των παραμέτρων της σχέσης μετασχηματισμού των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων της εικόνας, ακολουθεί η εφαρμογή της σχέσης αυτής σε όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας και ο υπολογισμός των νέων ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων της ανορθωμένης εικόνας. Για κάθε νέο εικονοστοιχείο (x, y) της ανορθωμένης εικόνας υπολογίζονται με βάση τη σχέση μετασχηματισμού (4.1) οι αντίστοιχες συντεταγμένες (x', y') στην αρχική εικόνα. Οι συντεταγμένες αυτές όμως δεν θα είναι απαραίτητα ακέραιοι αριθμοί και κατά συνέπεια δεν θα αντιστοιχούν ακριβώς στο κέντρο ενός εικονοστοιχείου της αρχικής εικόνας. Δεν υπάρχει λοιπόν μια συγκεκριμένη ψηφιακή τιμή για να αποδοθεί στο νέο εικονοστοιχείο (x, y) της ανορθωμένης εικόνας. Η τιμή αυτή θα πρέπει να

υπολογιστεί με παρεμβολή των ψηφιακών τιμών των γειτονικών εικονοστοιχείων του σημείου  $(x', y')$  της αρχικής εικόνας.

Ενώ γίνεται η διαδικασία του μετασχηματισμού, εσείς έχετε την εντύπωση ότι κάθε κελί της εικόνας σας μετασχηματίζεται στην νέα του θέση στον χάρτη. Στην πραγματικότητα, κατά την διάρκεια της γεωαναφοράς, δημιουργείται ένας πίνακας άδειων κελιών και μετά κάθε κελί παίρνει μία τιμή με μία διαδικασία, η οποία καλείται επαναδειγματοληψία (resampling). Το πλέγμα με τα pixel της εικόνας σπάνια ταιριάζει με το πλέγμα της καθορισμένης εικόνας.



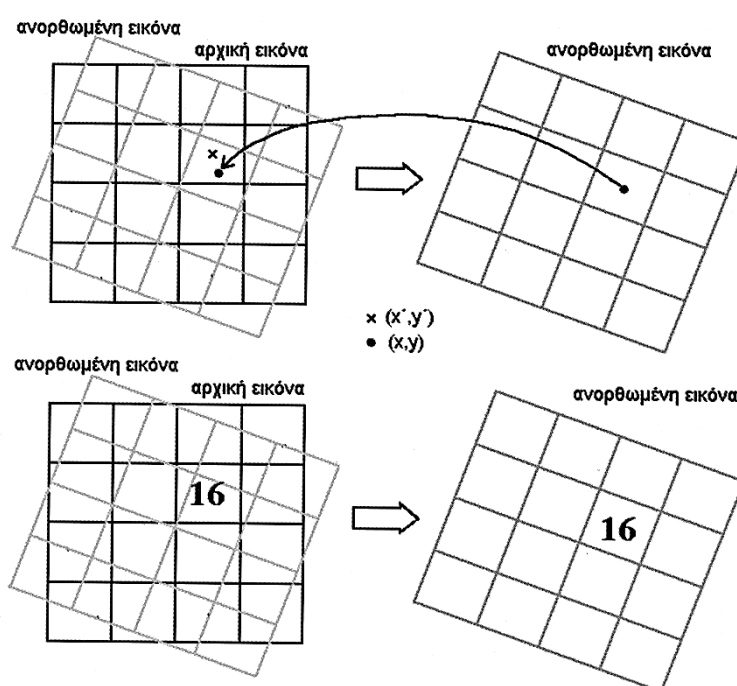
1. Εισερχόμενη εικόνα με GCP
2. Πλέγμα στην έξοδο με γνώσεις GCP
3. Σύγκριση δύο πλεγμάτων, η εισερχόμενη εικόνα είναι με γραμμές γύρω από το πλέγμα εξόδου, επίσης GCP των δύο πλεγμάτων.
4. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Resampling, οι τιμές των pixel της εισερχόμενης εικόνας είναι προσδιορισμένα από τα pixel των εξερχόμενων pixel.



Οι κυριότερες τεχνικές resampling είναι τρεις:

- **Εγγύτερου γείτονα**

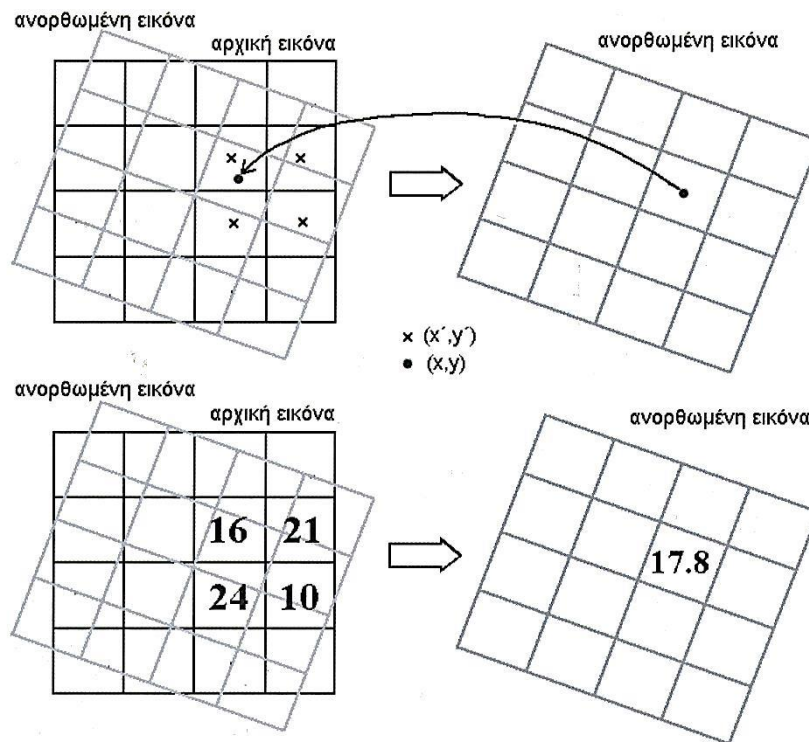
Μέθοδος του εγγύτερου γείτονα (nearest-neighbor). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, στο νέο εικονοστοιχείο  $(X, Y)$  της ανορθωμένης εικόνας, αποδίδεται η ψηφιακή τιμή του πλησιέστερου εικονοστοιχείου της αρχικής εικόνας (Εικόνα 4.8). Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι απλή και ότι στην ανορθωμένη εικόνα διατηρούνται οι ψηφιακές τιμές της αρχικής εικόνας. Μπορεί όμως να δημιουργηθούν σφάλματα σε γραμμικά στοιχεία της εικόνας.



Εικόνα 4.8: Η διαδικασία απόδοσης μιας ψηφιακής τιμής στο νέο εικονοστοιχείο  $(x, y)$  της ανορθωμένης εικόνας με βάση τη ψηφιακή τιμή  $(x', y')$  του εγγύτερου γείτονα της αρχικής εικόνας. Στην περίπτωση αυτή η ψηφιακή τιμή της αρχικής εικόνας δεν αλλοιώνεται.

- **Διγραμμική παρεμβολή**

Μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής (bilinear interpolation). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των ψηφιακών τιμών των τεσσάρων κοντινότερων εικονοστοιχείων για να αποδοθεί ψηφιακή τιμή στο νέο εικονοστοιχείο της ανορθωμένης εικόνας (Εικόνα 4.9). Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί της προηγούμενης, καθώς λαμβάνει υπόψη περισσότερα εικονοστοιχεία, αλλά οι προκύπτουσες νέες τιμές είναι διαφορετικές από αυτές της αρχικής εικόνας.



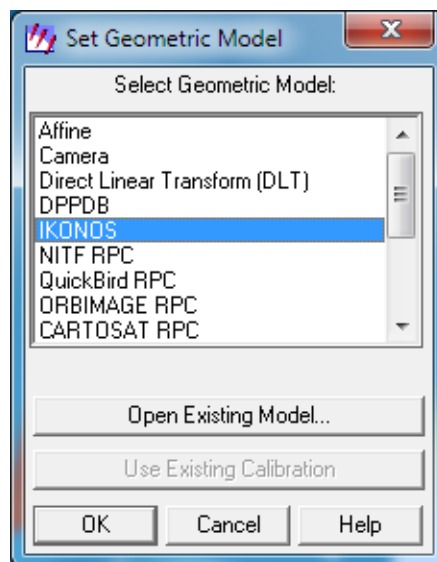
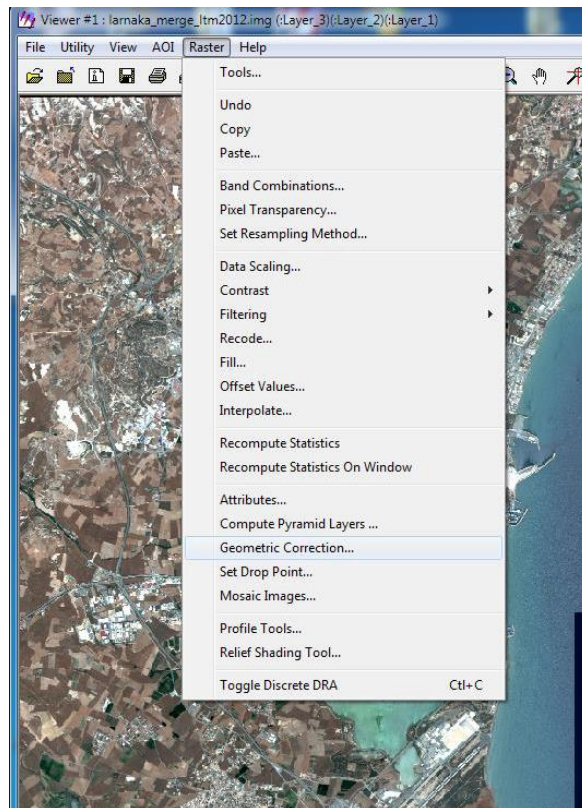
**Εικόνα 4.9:** Η διαδικασία απόδοσης μιας ψηφιακής τιμής στο νέο εικονοστοιχείο  $(x, y)$  της ανορθωμένης εικόνας με βάση τη μέση ψηφιακή τιμή των τεσσάρων κοντινότερων εικονοστοιχείων  $(x', y')$  της αρχικής εικόνας. Στην περίπτωση αυτή η ψηφιακή τιμή της αρχικής εικόνας αλλοιώνεται.

- **Κυβική παρεμβολή**

Μέθοδος της κυβικής παρεμβολής (cubic convolution). Χρησιμοποιεί το μέσο όρο των 16 κοντινότερων εικονοστοιχείων. Είναι μια πολύπλοκη και σύνθετη μέθοδος, και προκαλεί αλλοιώσεις στη νέα εικόνα, αν και η αισθητική της είναι καλή.

#### 4.1.2. Πειραματική διαδικασία – Γεωμετρικής διόρθωσης

Το ERDAS παρέχει στο χρήστη πολλές δυνατότητες, καθώς εκτός από αεροφωτογραφίες και αναλογικές και ψηφιακές κάμερες, μπορεί να διαχειριστεί εικόνες προερχόμενες από πολλούς δορυφόρους (IKONOS, QuickBird, κ.λ.π.) μεταξύ των οποίων είναι και ο Geoeye-1. Στην προκειμένη περίπτωση, από την κατηγορία των Rational Functions επιλέχθηκε το μοντέλο IKONOS (Εικόνα 4.10).

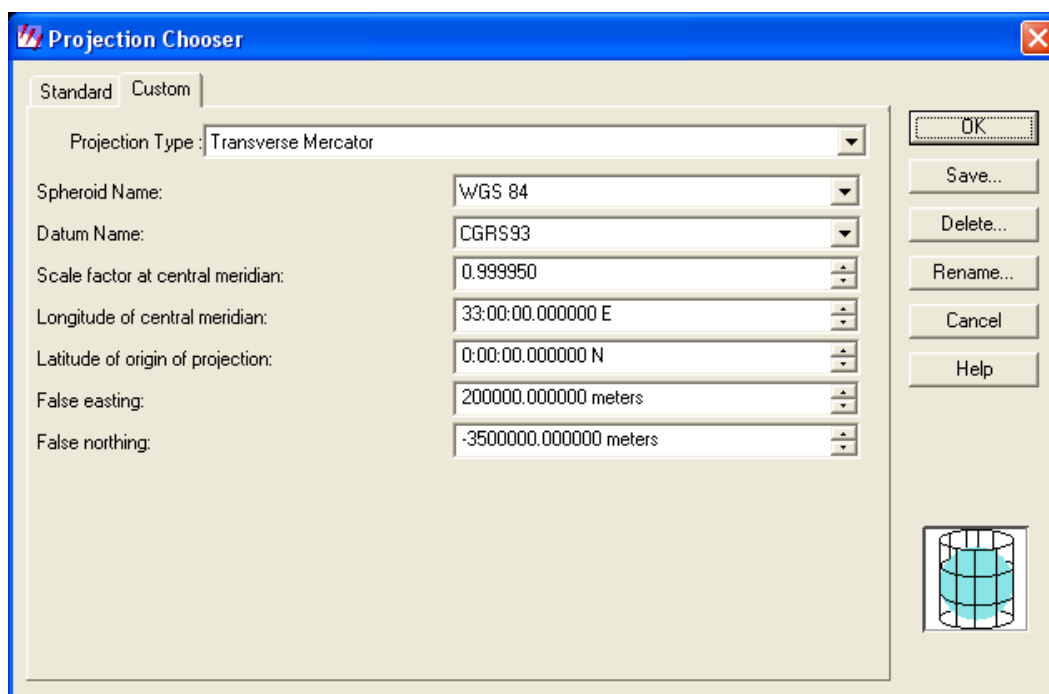


**Εικόνα 4.10: Η επιλογή του μαθηματικού μοντέλου.**

Το μοντέλο αυτό κάνει χρήση κάποιων βοηθητικών δεδομένων, τα οποία διατίθενται μαζί με την εικόνα όπως π.χ η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle). Λαμβάνει υπόψη του την καμπυλότητα της γης, τον τύπο του απεικονιστή, και σε συνδυασμό με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, πραγματοποιεί ορθοδιόρθωση στην εικόνα. Στην

περίπτωση της παρούσης μελέτης το ψηφιακό μοντέλο εδάφους ήταν διαθέσιμο και για την περιοχή μελέτης, οπότε διορθώθηκαν και τυχόν μετατοπίσεις στις εικόνες λόγω ανάγλυφου.

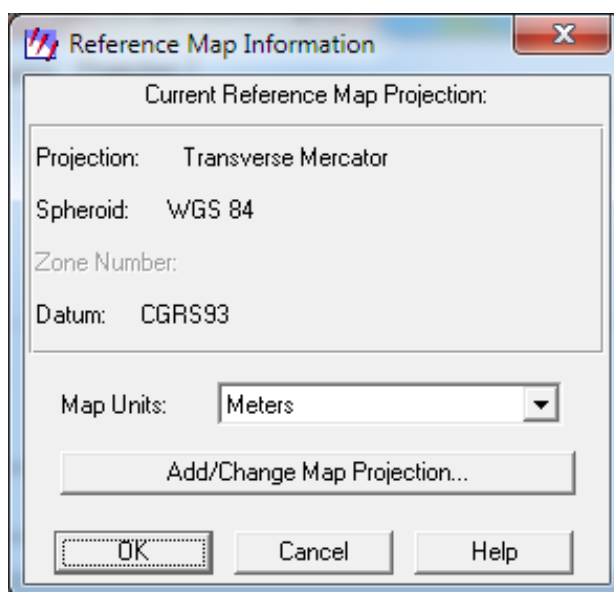
Ακολούθησε ο ορισμός του συστήματος αναφοράς των συντεταγμένων των φωτοσταθερών που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν, η σωστή επιλογή του οποίου είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή γεωαναφορά των εικόνων. Όσον αφορά την οριζοντιογραφία, ως προβολικό σύστημα επιλέχθηκε το Τοπικό σύστημα LTM - CGRS93, που χρησιμοποιεί την Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή και εφαρμόζεται σήμερα στην Κύπρο. Τα βασικά του χαρακτηριστικά, δηλαδή το σφαιροειδές, το datum, ο συντελεστής κλίμακας (k) στον κεντρικό μεσημβρινό, το γεωγραφικό μήκος του κεντρικού μεσημβρινού κ.λ.π., παρουσιάζονται στη πιο κάτω εικόνα και καταχωρήθηκαν στο λογισμικό.



Εικόνα 4.11: Τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος LTM – CGRS93.

Σχετικά με τα υψόμετρα, ως σφαιροειδές και datum επιλέχθηκε από μία μεγάλη λίστα το WGS84, αντί του GRS 1980, καθώς το επιλεγμένο σφαιροειδές είναι καλύτερα ενημερωμένο για το μοντέλο του γεωειδούς.

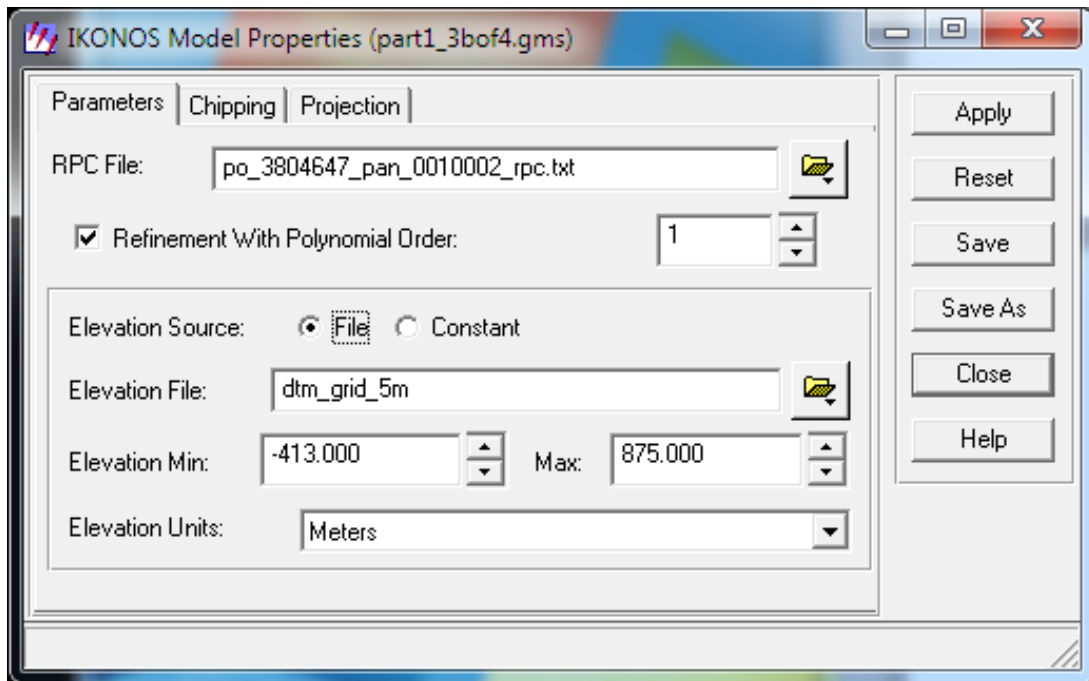
Οι μονάδες τόσο των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων, όσο και των υψομέτρων, καθορίστηκαν να είναι σε m.



**Εικόνα 4.12:** Ο καθορισμός του προβολικού συστήματος και του συστήματος των υψομέτρων.

Επόμενο βήμα ήταν η εισαγωγή της δορυφορικής εικόνας στο project, και η δημιουργία πυραμίδων. Στόχος της δημιουργίας πυραμίδων είναι να διευκολύνουν τη συσχέτιση των ομόλογων σημείων σε όποιες φωτογραμμετρικές εφαρμογές απαιτείται, όπως στον αυτόματο εντοπισμό σημείων σύνδεσης και στην παραγωγή αυτόματου DEM.

Κατόπιν, σειρά είχε η εισαγωγή των συντελεστών των μοντέλων κλασματικών πολυωνύμων (RPCs) για κάθε δορυφορική εικόνα, οι οποίοι περιλαμβάνονταν στα μεταδεδομένα που τις συνόδευαν.



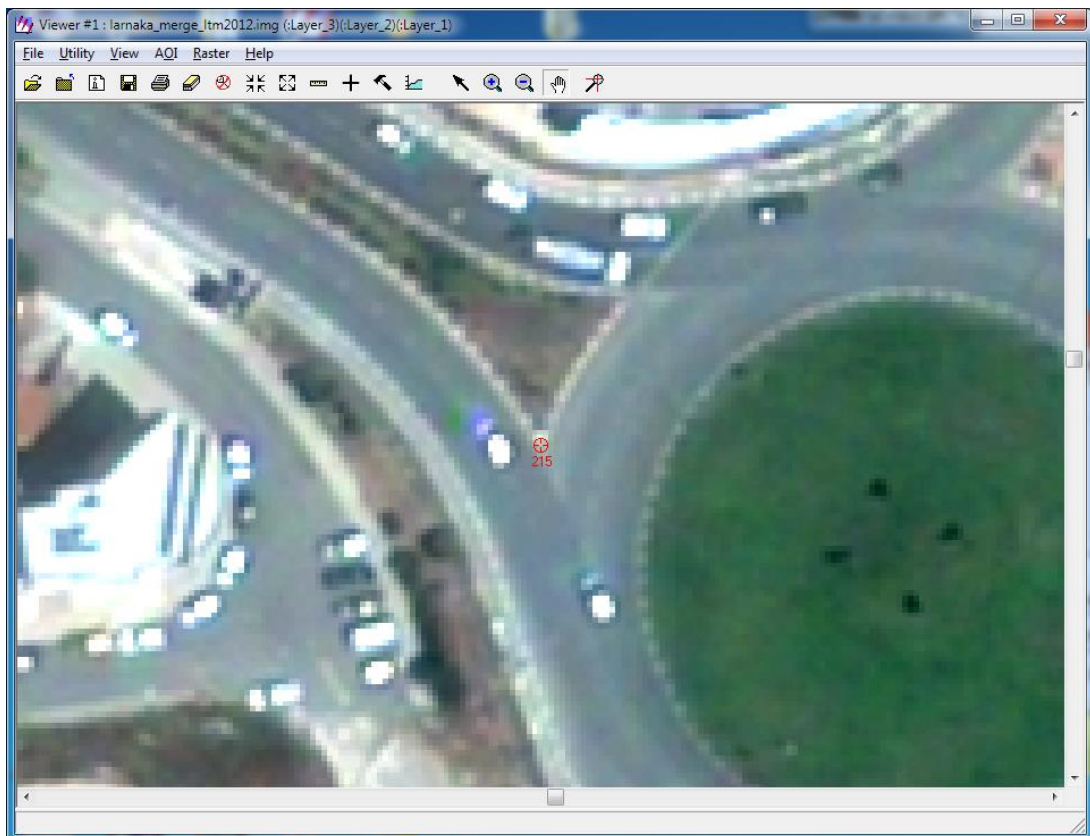
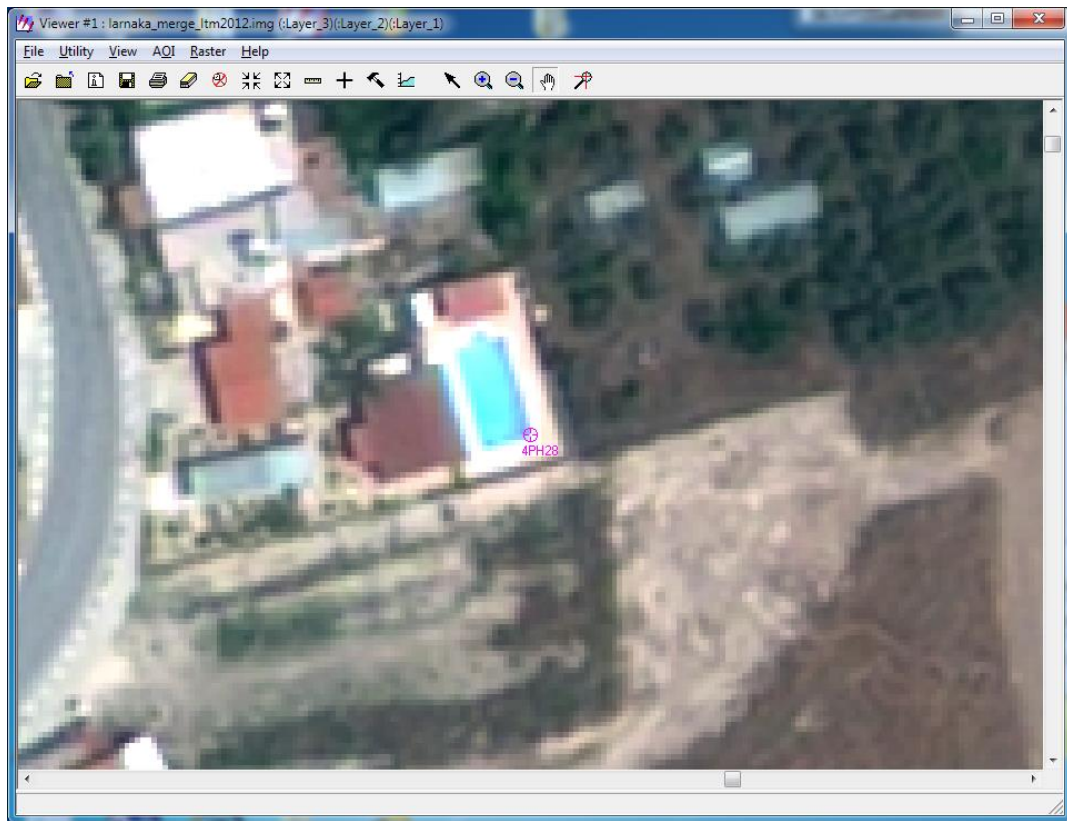
Εικόνα 4.13: Η εισαγωγή των RPCs της εικόνας στο project.

Τελευταίο στάδιο πριν την πραγματοποίηση της συνόρθωσης για τη βελτίωση των τιμών των RPCs από το πρόγραμμα, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου των RF στην περιοχή μελέτης, ήταν η εισαγωγή στο project, με ένα αρχείο txt, των γεωδαιτικών συντεταγμένων των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου (σε LTM-CGRS93), και η σκόπευσή τους στη δορυφορική εικόνα.

Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η ακρίβεια επαναπροσδιορισμού των συντελεστών των πολυωνύμων με χρήση 13 GCPs και αντίστοιχα 7 ανεξάρτητων σημείων ελέγχου (Independent Check Points, ICPs).

Κατά την επιλογή των σημείων ελέγχου έγινε προσπάθεια ώστε αυτά να είναι διάσπαρτα σε όλη την εικόνα ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της διόρθωσης. Παράλληλα, για σημεία ελέγχου επιλέχθηκαν σημεία που αναγνωρίζονται εύκολα στην εικόνα. Η προσεκτική επιλογή των σημείων αυτών εξασφαλίζει την εγκυρότητα της όλης διαδικασίας.





**Εικόνα 4.14:** Εδαφικά σημεία ελέγχου (GCP) όπου οι συντεταγμένες των σημείων αυτών καθορίστηκαν στο πεδίο με χρήση GPS



Δεκατρία τέτοια σημεία επιλέχθηκαν για την κάθε εικόνα χωριστά και 7 σημεία ελέγχου. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα σε καμία από τις δυο περιπτώσεις δεν ξεπέρασε την τιμή 0,4 ( $RMS < 0,4$ ).

Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	X Ref.	Y Ref.	Z Ref.	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.	Match
1	4PH53	Red	257805.670	359296.491	257846.690	359296.893	2.312	Control	0.280	-0.659	0.716	1.325	
2	4PH44	Red	250530.866	359232.300	250561.551	359233.903	33.585	Control	0.305	0.141	0.336	0.622	
3	4PH98	Red	255674.856	358100.933	255715.334	358101.542	0.656	Control	-0.638	0.107	0.647	1.198	
4	215	Yellow	255117.562	365631.574	255150.566	365634.498	27.284	Check					
5	4PH80	Yellow	250417.220	366016.932	250436.996	366019.444	75.849	Check					
6	4PH01ADD	Red	257323.932	362174.412	257363.163	362175.060	8.488	Control	0.332	0.384	0.508	0.940	
7	4PH28	Red	256961.252	372043.947	256993.079	372046.050	34.881	Control	0.179	0.363	0.405	0.750	
8	216	Red	250890.259	372209.966	250893.108	372209.012	134.889	Control	-0.373	-0.621	0.725	1.341	
9	4PH60	Red	258418.846	366811.000	258459.851	366812.844	2.005	Control	-0.447	-0.258	0.516	0.955	
10	4PH76	Red	254155.082	370059.360	254183.054	370061.457	47.038	Control	0.452	0.343	0.567	1.050	
11	4PH84	Red	252096.958	363358.367	252127.195	363360.443	34.019	Control	-0.090	0.200	0.220	0.407	
12	GCP #2	Yellow						Control					
13													

X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.	Match
0.280	-0.659	0.716	1.325	
0.305	0.141	0.336	0.622	
-0.638	0.107	0.647	1.198	
0.332	0.384	0.508	0.940	
0.179	0.363	0.405	0.750	
-0.373	-0.621	0.725	1.341	
-0.447	-0.258	0.516	0.955	
0.452	0.343	0.567	1.050	
-0.090	0.200	0.220	0.407	

Εικόνα 4.15: Τα σημεία φαίνονται αναλυτικά και στο «GCP Tool», με τις συντεταγμένες τους και χρώματα.

Στην τελευταία στήλη του πίνακα στο κάτω τμήμα της εικόνας διακρίνονται τα σφάλματα της εφαρμογής της σχέσης μετασχηματισμού στα σημεία ελέγχου.

Στο πάνω μέρος του «**GCP Tool**» εμφανίζεται το ολικό σφάλμα των σημείων κατα X και κατά Y.

Control Point Error: (X) 0.3758 (Y) 0.3881 (Total) 0.5402
---

**Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της αμερικάνικης γεωγραφικής υπηρεσίας στρατού (NIMA) το αποδεκτό τετραγωνικό σφάλμα πρέπει να είναι μικρότερο απο το ½ της διακριτικής ικανότητας της δορυφορικής φωτογραφίας (μέγεθος του εικονοστοιχείου).**

Συγκεκριμένα, στη λήψη της εικόνας Geoeye του 2012 το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ήταν 0,54m. Δεδομένου της χωρικής διακριτικής ικανότητας της εικόνας Geoeye (2m.), των σημείων ελέγχου, των συμπληρωματικών δεδομένων, και της χρήσης των εικόνων, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και των δυο κρίθηκε αρκετά ικανοποιητικό.

Στη συνέχεια, η αναδειγματοληψία <resample> έγινε με τη μέθοδο εγγύτερου γείτονα, ώστε να διατηρηθούν αναλλοίωτες οι τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων και να αποφευχθούν τυχόν δυσκολίες στην ταξινόμηση που θα ακολουθήσει.

Το προβολικό σύστημα συντεταγμένων στο οποίο γεωαναφέρθηκαν οι εικόνες είναι το Κυπριακό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς LTM (CGRS93).

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας έγινε έλεγχος με δεδομένα απο το Κτηματολόγιο, απο τη χωρομετρική βάση δεδομένων, δηλαδή μετρήσεις ακριβείας πεδίου, σε περιβάλλο GIS (εικόνα 4.16).



Εικόνα 4.16: Οπτικός έλεγχος γεωμετρικής διόρθωσης με χωρομετρικά δεδομένα.

Τα **σημεία επίγειου ελέγχου GCP(Ground control Points)** και η θέση τους στην επιφάνεια της γης υπολογίστηκε με επιτόπου μετρήσεις με GPS. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται σημεία όπου έγιναν μετρήσεις για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας στην περιοχή της γεωμετρικής διόρθωσης της δορυφορικής εικόνας.



**Εικόνα 4.17: Επίγειο σημείο ελέγχου**

**CONTROL 28**



**X,Y=256991.59, 372047.709**

**PHOTO 0447 RUN 51**

**Γωνια πισινας, Περιοχη ΚΕΛΛΙΑ**

**SHEET PLAN 40/32**

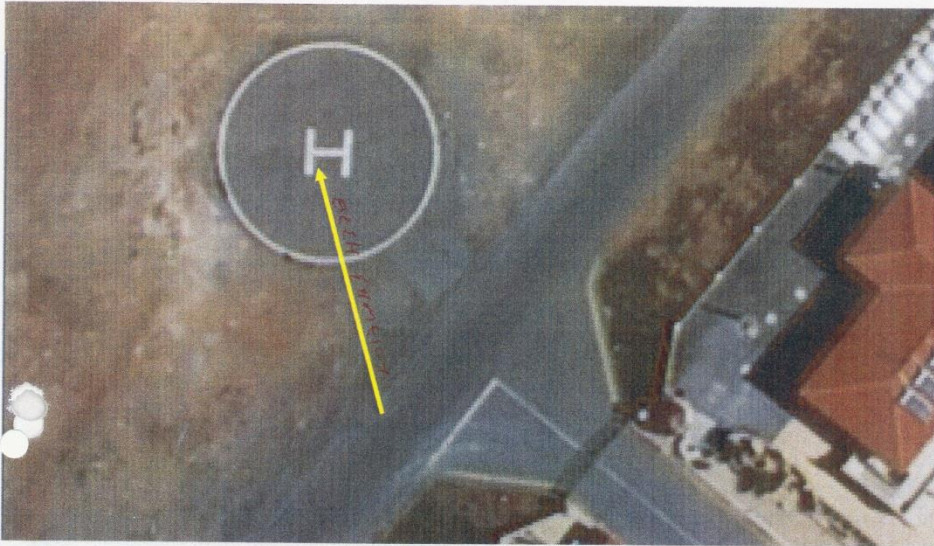
**Εικόνα 4.18: Επίγειο σημείο ελέγχου**

Σημειώνεται με κόκκινο χρώμα ο αριθμός του σημείου όπου θα γίνουν επιτόπου μετρήσεις.

ΣΡΣ

23/11/10  
24/11/10

CONTROL 53



X,Y=257846, 359296

PHOTO 2133 RUN 82

Γωνία ελικοδρομίου ,Περιοχη Λαρνακας

Εικόνα 4.19: Επίγειο σημείο ελέγχου

## 4.2. ΜΕΤΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

### 4.2.1. Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ERDAS Imagine και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τη μέθοδο μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης ήταν ο ISODATA. Αρχικά, επισημαίνεται ότι σε όλες τις μη επιβλεπόμενες ταξινομήσεις χρησιμοποιήθηκαν και τα τέσσερα κανάλια των δορυφόρων Quickbird και Geoeye-1, χωρίς να απορριφθεί το κοντινό υπέρυθρο, αφού η φασματική πληροφορία που παρέχει κρίνεται σημαντική. Αναφέρεται επίσης, ότι ο αριθμός των επαναλήψεων των συσσωρεύσεων του αλγορίθμου ορίστηκε στις 50 ως ο μέγιστος δυνατός, ενώ ο αλγόριθμος σταματούσε τις επαναλήψεις όταν είχε δημιουργηθεί ο αριθμός των κατηγοριών και το 98% των συσσωρεύσεων παρέμενε αμετάβλητο. Ως καταλληλότερες θεωρήθηκαν εκείνες που το αποτέλεσμα έδινε τον καλύτερο δυνατό διαχωρισμό των κατηγοριών.

Ο μέγιστος αριθμός δίνει την εντολή να συσσωρευτούν τα δεδομένα της εικόνας το πολύ σε όσες κατηγορίες ορίζονται. Για τις δορυφορικές εικόνες του 2012 και 2004, οι είκοσι ομαδοποιήσεις ήταν ο κρίσιμος αριθμός κατηγοριών κάλυψης γης που βρέθηκε να αντιπροσωπεύουν την απεικόνιση. Η μέγιστη τυπική απόκλιση κάθε κατηγορίας, ουσιαστικά καθορίζει την αυστηρότητα του αλγορίθμου στη συσσώρευση και για το λόγο αυτό επιλέχθηκε για όλες τις ταξινομήσεις χαμηλή τιμή. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των μέσων δυο τάξεων σχετίζεται επίσης με την αυστηρότητα του αλγορίθμου στο διαχωρισμό μεταξύ των φασματικών τάξεων. Όσο περισσότερες είναι οι κατηγορίες τόσο μικρότερη επιτρέπεται να είναι η παράμετρος αυτή, διότι είναι πιθανόν οι κατηγορίες να μην διαφέρουν πολύ φασματικά (π.χ. είδη βλάστησης). Για λιγότερες κατηγορίες όμως, ενδείκνυται η χρήση μεγαλύτερης απόστασης διότι ο κίνδυνος σύγχυσης δύο κατηγοριών είναι μικρότερος.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ομαδοποίηση και χρωματική αντιστοίχιση των κατηγοριών σε θεματικές τάξεις αντικειμένων/εμφανίσεων της γήινης επιφάνειας. Η φωτοερμηνεία για την πιο πρόσφατη απεικόνιση έγινε με τη βοήθεια των προτύπων του εγχειριδίου του Anderson et al. (1976) , καθώς και με τη βοήθεια από τις αεροφωτογραφίες της περιοχής μελέτης του 2008. Στη φωτοερμηνεία των απεικονίσεων του 2000 και του 2003 επίσης βοήθησε και το CORINE 2000.

Ύστερα από τη φωτοερμηνεία, οι συσσωρεύσεις ονοματίστηκαν και χρωματίστηκαν κατάλληλα και πλέον οι φασματικές τάξεις αντιστοιχούν σε πραγματικές τάξεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.20. Η ονοματολογία που χρησιμοποιήθηκε πλησιάζει όσο το δυνατό, τις κατηγορίες που προτείνει το σύστημα ταξινόμησης χρήσεων γης του Anderson (1976). Σε ορισμένες περιπτώσεις ο χρωματισμός μερικών συσσωρεύσεων ήταν κοινός επειδή αντιπροσώπευαν ουσιαστικά την ίδια κατηγορία. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως θα μπορούσε στις παραμέτρους των κατηγοριών να επιλεγεί μικρότερος αριθμός με πιθανό κίνδυνο όμως συνένωσης άλλων κατηγοριών. Συμπερασματικά, ήταν προτιμότερο να εξαχθούν δύο συσσωρεύσεις, που παρά τη μικρή φασματική διαφοροποίηση, αντιπροσωπεύουν την ίδια θεματική κατηγορία παρά να συγχωνευτούν δύο ξεχωριστές τάξεις.

Από τις εικόνες προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Δεν είναι δυνατή η απόλυτη διάκριση συνεχούς αστικής και μη συνεχούς αστικής δόμησης. Η ενιαία κατηγοριοποίησή τους δεν δίνει πολύ καλή εκτίμηση της ανεπτυγμένης περιοχής.
- Όπως φαίνεται στις εικόνες, ο αλγόριθμος διαχωρίζει ικανοποιητικά τα είδη βλάστησης. Αυτό σημαίνει ότι φασματικά είναι δυνατόν να διαχωριστεί η πυκνή βλάστηση (που ως επί τω πλείστον αποτελείται από πολύ μικρές περιοχές δασών) από τα μεταβατικά είδη βλάστησης και τη σκληροφυλλική βλάστηση.
- Η μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη αντιστοιχεί ουσιαστικά στο γυμνό έδαφος και διαχωρίζεται επιτυχώς στην εικόνα.
- Υπάρχει σοβαρό πρόβλημα με τις σκιές των κτιρίων, όπου υπάρχει σύγχυση με τμήματα του οδικού δικτύου και της βλάστησης.
- Σημαντικό τμήμα αυτοκινητοδρόμων ταξινομείται ως αστικές περιοχές.
- Τα λατομεία δεν είναι δυνατό να διαχωριστούν από τα μεγάλα και συνεχή κτίρια με άσπρη οροφή τα οποία παρουσιάζουν υψηλή ανακλαστικότητα (π.χ. βιομηχανική περιοχή πλησίον της Αραδίππου). Σύγχυση υπάρχει σε ορισμένες περιπτώσεις αυτής της κατηγορίας, με την περίπτωση γυμνού εδάφους επίσης με υψηλή ανακλαστικότητα στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (περιοχή Νότια της Αραδίππου, περιοχή Πελέτικο).



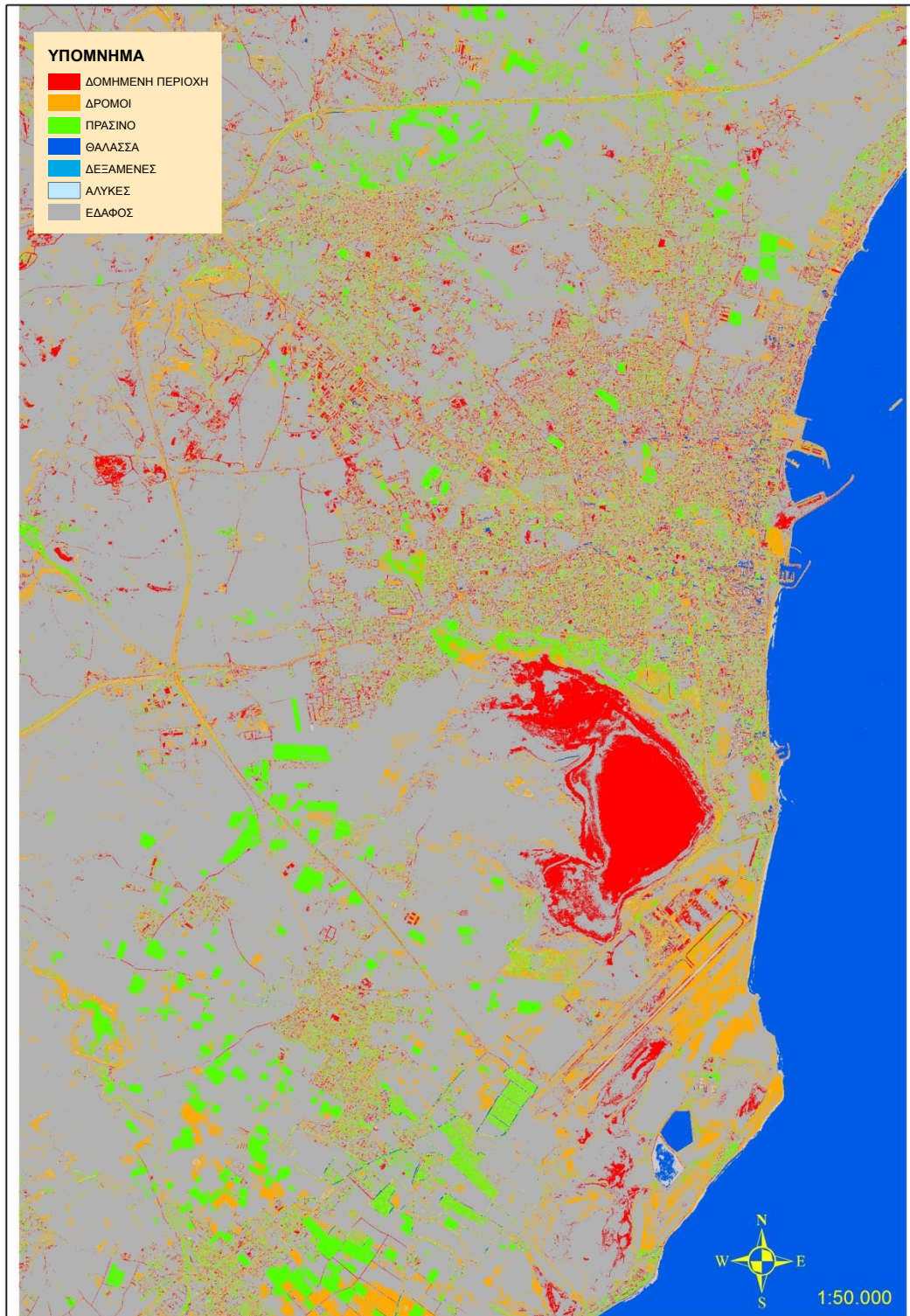
- Η θάλασσα διαχωρίζεται φασματικά σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη αντιστοιχεί στην ακτογραμμή, δηλαδή στα ύδατα πλησίον της ακτής και σε δύο ακόμα κατηγορίες ανάλογα με τις φασματικές υπόγραφές που διαμορφώνονται και από τον πυθμένα αλλά και από τα θαλάσσια ρεύματα. Ο αλγόριθμος της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης ταξινομεί ως 'θάλασσα' επίσης μερικά εικονοστοιχεία του αεροδιαδρόμου ή εικονοστοιχεία όπου κανονικά υπάρχει δρόμος ή σκιά κτιρίων. Αυτό συμβαίνει λόγω της επικάλυψης των φασματικών υπογραφών.
- Τέλος, η περιοχή της αλυκής παρουσιάζεται ως οικιστική περιοχή λόγω του ότι την καλοκαιρινή περίοδο λόγω αποστράγγισης της λίμνης, παίρνει αυτό το γκριζό χρώμα που αντιστοιχεί με ένα μεγάλο αριθμό ταρατσών.

Στη συνέχεια, σκεπτόμενοι το βασικό στόχο, που είναι η εξαγωγή περιοχών με πυκνότερη ή πιο αραιή δόμηση, συνενώθηκαν όσες συσσωρεύσεις σχετίζονται με τη δόμηση σε μια κατηγορία, ενώ αντίστοιχα ενοποιήθηκαν κατηγορίες της βλάστησης, της θάλασσας, μη αρδεύσιμης αρόσιμης γης και οδικού δικτύου.

Τελικά, ορίστηκε μέγιστος αριθμός κατηγοριών ίσος με πέντε και παρήχθη η ψευδέχρωμη εικόνα με τις διαφορετικές κλάσεις που υπολόγισε ο αλγόριθμος, για την εικόνα του 2004. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται πιο κάτω.

Η αναγνώριση εκ των υστέρων, σε συνδυασμό με παρατηρήσεις από την αεροφωτογραφία, των θεματικών τάξεων στη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση, διαφάνηκε ότι δεν ήταν αποτελεσματική όσο η επιβλεπόμενη και για το λόγο αυτό δεν αξιοποιήθηκε.

Ένα άλλο συμπέρασμα που διαφάνηκε είναι ο υπερβολικός αριθμός υποκατηγοριών, που όπως αποδείχτηκε εμπεριέχει επικαλύψεις φασματικών υπογραφών (επικαλυπτόμενες ελλείψεις στο δισδιάστατο φασματικό χώρο προτύπων). Συνεπώς, το αποτέλεσμα σε περίπτωση ορισμού πολλών και σε μεγάλο βαθμό επικαλυπτόμενων κατηγοριών αντί να βελτιώνεται, χειροτερεύει. Άρα, τα δεδομένα συνίσταται να επαναπροσδιορίζονται μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική φασματική διαχωριστικότητα.



Εικόνα 4. 20: Ψευδόχρωμη εικόνα κλάσεων ISODATA αλγόριθμου.

#### 4.2.2. Επιβλεπόμενη ταξινόμηση

##### 4.2.2.1. Πειραματική διαδικασία στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο – VNIR.

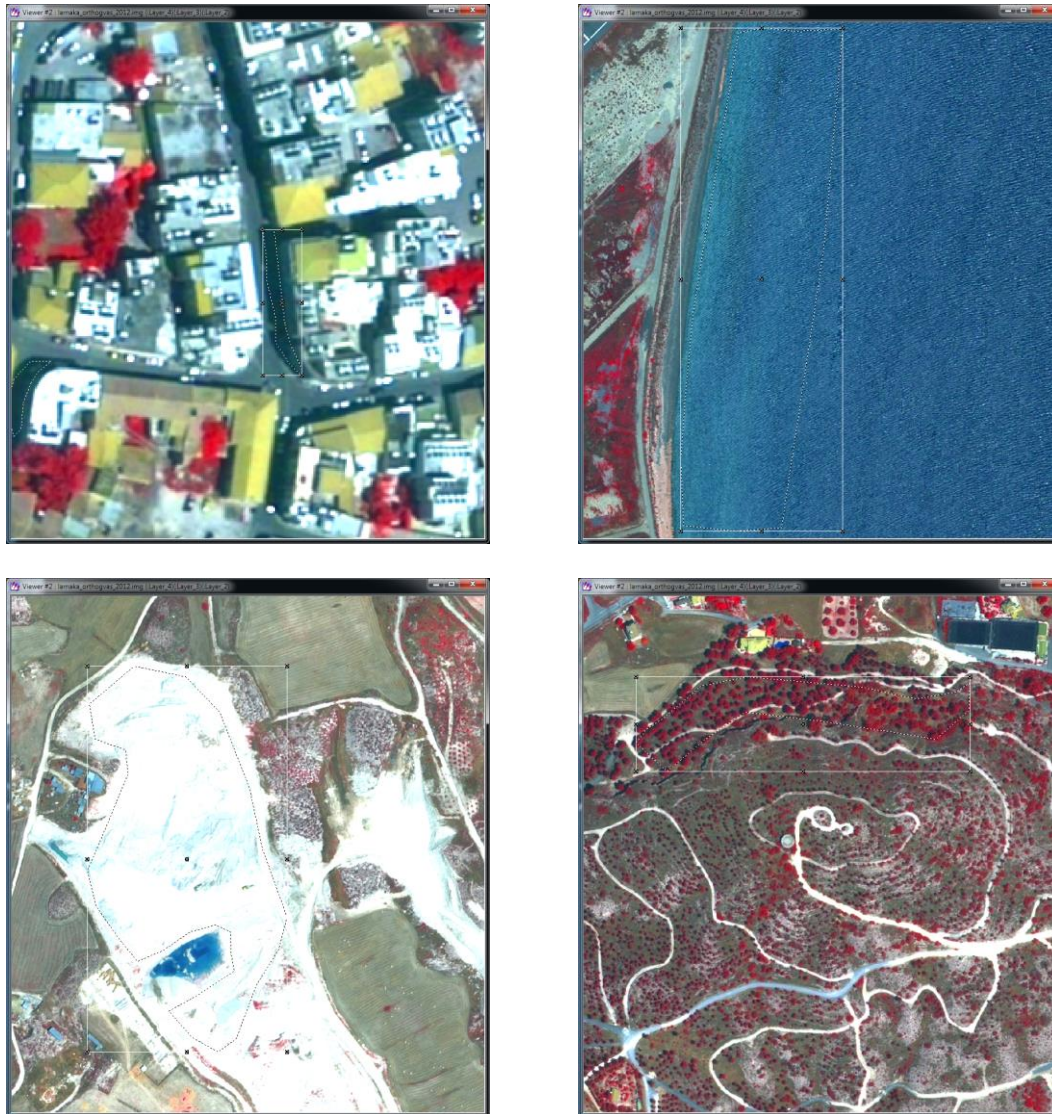
Η επιλογή της μεθόδου ταξινόμησης, εξαρτάται από την γνώση της περιοχής μελέτης, τον αριθμό και τα χαρακτηριστικά των τάξεων που θα δημιουργηθούν.

Αρχικά, αναφέρεται ότι επειδή έχει προηγηθεί η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση, υπάρχει ήδη μια εκτίμηση του αριθμού και του τύπου των φασματικών προτύπων που είναι δυνατό να διαχωριστούν σε κάθε απεικόνιση λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις φασματικές υπογραφές.

Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση, ο χρήστης στηρίζεται στην ικανότητα αναγνώρισης των περιοχών εκπαίδευσης (training sites) και την a-priori γνώση των στοιχείων τους για να βοηθήσει το σύστημα να καθορίσει τα στατιστικά κριτήρια (υπογραφές) για την ταξινόμηση των εικονοστοιχείων. Συνήθως, αυτή η γνώση αποκτάται είτε από την επιτόπια έρευνα στην περιοχή μελέτης και τη χρήση GPS είτε μέσω έγκυρων χαρτογραφικών πηγών της περιοχής. Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι καλύτερα ο αναλυτής να έχει στο μυαλό του ένα σύνολο από επιθυμητές υπογραφές και μετά να δημιουργήσει τις υπογραφές επιλέγοντας τις κατάλληλες περιοχές εκπαίδευσης στην εικόνα. Με την επιβλεπόμενη ταξινόμηση γίνεται καλύτερη αναπαράσταση της κάλυψης γης η οποία οφείλεται κυρίως στον τρόπο επιλογής των περιοχών εκπαίδευσης για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Τα αποτελέσματα στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι τόσο πιο καλά όσο καλύτερη γνώση της υπό μελέτη περιοχής έχουμε.

Το στάδιο της εκπαίδευσης αφορά τη δημιουργία ενός αριθμού φασματικών υπογραφών βάση των οποίων θα γίνει η απόδοση των εικονοστοιχείων της εικόνας σε τύπους κάλυψης γης. Κάθε υπογραφή αντιστοιχεί σε ένα τύπο κάλυψης γης και χρησιμοποιείται από τον κανόνα ταξινόμησης για να αποδώσει τα εικονοστοιχεία της εικόνας στον τύπο αυτόν.

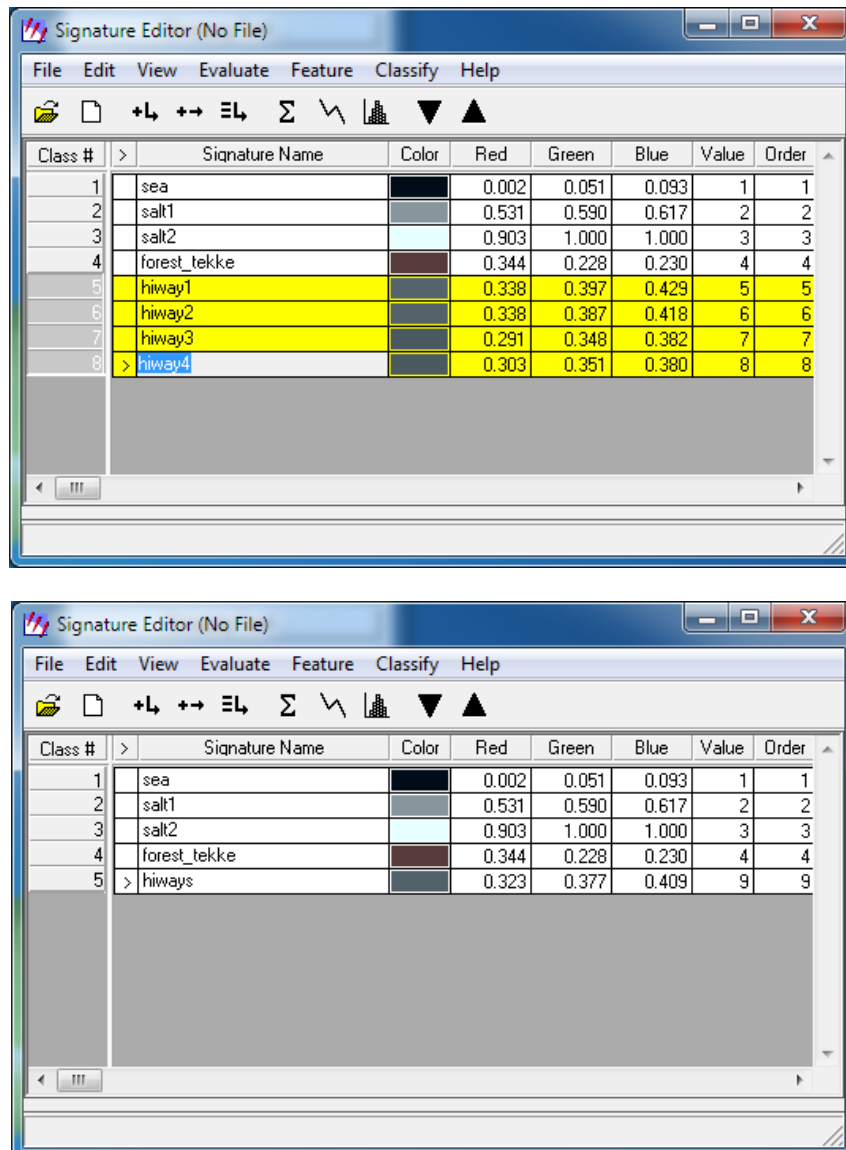
Με την επιβλεπόμενη μέθοδο επιλέγονται εικονοστοιχεία, τα οποία αντιπροσωπεύουν αναγνωρίσιμες δομές στην εικόνα ή στοιχεία κάλυψης γης. Για την επιλογή περιοχών εκπαίδευσης σε μια εικόνα χρησιμοποιούνται πολύγωνα (περιοχές εκπαίδευσης) (Εικόνα 4.21).






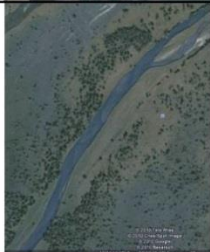


**Εικόνα 4.21 : Παραδείγματα επιλογής εκπαιδευτικών πεδίων στην εικόνα Quickbird**





Για τον εντοπισμό των περιοχών εκπαίδευσης στην εικόνα μας χρησιμοποιήσαμε βοηθητικά και άλλες πηγές πληροφορίας όπως αεροφωτογραφίες. Η επιλογή των κατάλληλων περιοχών εκπαίδευσης είναι πολύ σημαντική για μια επιτυχή επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Τα εκπαιδευτικά πεδία θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά της τάξης που θα δημιουργήσουν. Αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι θα πρέπει να περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό εικονοστοιχείων ή να είναι διάσπαρτα σε μια μεγάλη περιοχή της εικόνας. Θα πρέπει όμως να καταλαμβάνουν ομοιογενείς περιοχές στην εικόνα όπως φαίνεται στην εικόνα 4.23

Κάποιες από τις φασματικές υπογραφές που δημιουργούνται μπορούν να απαλειφθούν, αν ταξινομήσουν μικρο αριθμό εικονοστοιχείων στην εικόνα, ή να συνενωθούν με άλλες, αν κριθεί ότι επικαλύπτονται σημαντικά στο φασματικό χώρο (Εικόνα 4.22).



Εικόνα 4.22: Συνένωση ίδιων φασματικών υπογραφών

A/A	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ	ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡ/ΚΑ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ CORINE
1	Αστικό	πυκνή ή αραιή δόμηση, εμφανές οδικό δίκτυο, οικοδομικά τετράγωνα.		Κτήρια, δρόμοι και ζώνες τεχνητής επιφάνειας καλύπτουν σχεδόν όλο το έδαφος. Οι μη γραμμικές ζώνες βλάστησης και το γυμνό έδαφος αποτελούν εξαίρεση.
2	Δασική έκταση	πυκνή βλάστηση, μεγάλη έκταση, πράσινο έντονο χρώμα, μακριά από αστικό ιστό.		Βλάστησης που αποτελείται κυρίως από δέντρα, συμπεριλαμβανομένων υποσορόφων με θάμνους και άλλη χαμηλή βλάστηση, όπου τα πλατύφυλλα και τα κωνοφόρα είδη επικρατούν.
3	Αρόσιμη έκταση	<b>σχήμα κανονικό</b> τετράπλευρο, <b>υφή λεία</b> , χρώμα <b>ανοιχτό καφέ, γκρι ή πράσινο.</b>		Καλλιεργήσιμες περιοχές τακτικά αρόσιμες και γενικά υπό ένα σύστημα εναλλαγής καλλιέργειας.
4	Ποτάμι	μπλέ χρώμα, στενόμακρο σχήμα		Φυσικά ή τεχνητά υδάτινα ρεύματα που λειτουργούν ως διάλυοι αποστράγγισης υδάτων. Περιλαμβάνονται οι τάφροι.
5	Δρόμος	υλικό ασφαλτος, μακρόστενο σχήμα		
6	Αγροτικός Δρόμος	χωματόδρομος, <b>μήκος μέτριο, πλάτος</b> έως 5 μέτρα, <b>περιβάλλεται από αγροτεμάχια.</b>		

7	Μόνιμη καλλιέργεια /Θερμοκήπια	Καλλιέργειες δέντρων σε <b>διάταξη</b> που δεν είναι ελαιώνες ή αμπελώνες, όπως οπωροφόρα δέντρα. <b>κανονική γεωμετρική κατανομή. τραχεία υφή.</b> πιο ανοιχτός τόνος του πράσινου από ελαιώνες. Το θερμοκήπιο είναι μια τεχνητή κατασκευή από γυαλί ή πλαστικό. Η Υφή είναι <b>λεία</b> , το χρώμα <b>ανοιχτό λευκό</b> και βρίσκεται σε <b>αγροτικές περιοχές.</b>		Καλλιέργειες, χωρίς σύστημα εναλλαγής καλλιέργειας, που παρέχουν επαναλαμβανόμενη συγκομιδή και καταλαμβάνουν το έδαφος για μια μεγάλη περίοδο προτού να οργωθεί και να ξαναφυτευτεί: κυρίως φυτείες των ξυλωδών ειδών. Αποκλείονται τα λιβάδια, τα εδάφη για βοσκή και τα δάση.
8	Αμπελώνας	<b>γραμμική διάταξη</b> αμπελιών, <b>λεία υφή</b> (κατά τη διεύθυνση της γραμμικής διάταξης), <b>ομοιόμορφη εναλλαγή των τόνων</b> γκριζοπράσινου και καφέ (χώμα).		Περιοχές φυτεμένες με αμπέλια.
9	Ελαιώνας	<b>γκριζοπράσινος τόνος</b> των δέντρων, σε <b>διάταξη, τραχεία υφή</b> , Την σχεδόν πάντα <b>σταθερή απόσταση</b> των ελαιόδεντρων (5-7m)		Περιοχές φυτεμένες με ελαιόδεντρα, συμπεριλαμβάνοντας μικτή εμφάνιση ελαιόδέντρων και αμπελώνων στο ίδιο αγροτεμάχιο.
10	Βοσκότοπος (λιβάδι)	μεγάλη επιφάνεια, <b>καφέ χρώμα</b> ή <b>ανοιχτό πράσινο</b> , σκόρπια δέντρα, <b>χαμηλή υπόλοιπη βλάστηση, τραχεία υφή</b> συνήθως (όταν υπάρχουν δέντρα), <b>μακριά από αστική περιοχή.</b>		Πυκνή, κάλυψη κυρίως από ποώδη βλάστηση, όχι στο πλαίσιο ενός συστήματος εναλλαγής καλλιέργειας. Χρησιμοποιείται κυρίως για βοσκή, αλλά η ζωτροφή μπορεί να συγκομιστεί μηχανικά. Περιλαμβάνει και τις περιοχές με φυτά φράκτες. Επίσης, στην κατηγορία «βοσκότοποι» υπάγονται και οι θάμνοι και χερσότοποι : Βλάστηση με χαμηλή και κλειστή φωτοκάλυψη, όπου κυριαρχούν οι θάμνοι, η έρπουσα και ποώδης βλάστηση

Εικόνα 4.23 :Κατηγορίες εδαφοκάλυψης της περιοχής

Όταν επιλέξουμε όλες τις περιοχές που μας ενδιαφέρουν τότε ο πίνακας Signature Editor θα έχει την παρακάτω μορφή.

Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order	Count	Prob.	P	I	H	A	FS
1	grass	Red	1.000	0.000	0.103	1	1	18056	1.000	X	X	X	X	
2	hiway	Blue	0.346	0.496	0.568	6	6	3479	1.000	X	X	X	X	
3	forest1_tekkes	Red	0.528	0.099	0.184	2	7	33697	1.000	X	X	X	X	
4	industry	Blue	0.665	0.796	0.877	3	8	1271027	1.000	X	X	X	X	
5	salllake	Blue	0.197	0.454	0.731	4	9	1773709	1.000	X	X	X	X	
6	vlastisi	Red	0.826	0.102	0.223	10	14	393142	1.000	X	X	X	X	
7	keramoskepess	Yellow	0.799	0.805	0.489	14	22	2532	1.000	X	X	X	X	
8	taratsa1	Blue	1.000	1.000	1.000	12	28	3413	1.000	X	X	X	X	
9	taratsa2	Blue	0.634	0.844	0.943	13	34	4594	1.000	X	X	X	X	
10	xomatodromos	Blue	1.000	1.000	1.000	11	39	6193	1.000	X	X	X	X	
11	skia	Dark Blue	0.095	0.241	0.294	8	42	1332	1.000	X	X	X	X	
12	arosimi_ektasi	Dark Blue	0.512	0.506	0.429	15	46	4473093	1.000	X	X	X	X	
13	city_road	Blue	0.418	0.566	0.631	18	52	8396	1.000	X	X	X	X	
14	sea_deep	Blue	0.132	0.308	0.425	5	53	3000324	1.000	X	X	X	X	
15	sea_1	Blue	0.170	0.398	0.576	16	56	611143	1.000	X	X	X	X	
16	salt1	Blue	0.235	0.497	0.684	7	57	615512	1.000	X	X	X	X	
17	salt2	Blue	0.258	0.604	0.899	9	58	858952	1.000	X	X	X	X	
18	latomio	Blue	1.000	1.000	1.000	17	59	180244	1.000	X	X	X	X	
19	rizoelia	Red	0.442	0.247	0.290	19	60	54576	1.000	X	X	X	X	
20	valtos	Red	0.620	0.087	0.193	20	61	187919	1.000	X	X	X	X	
21	xavouza	Blue	0.170	0.368	0.461	21	62	412967	1.000	X	X	X	X	
22	salllake1	Blue	0.201	0.471	0.726	22	63	15238355	1.000	X	X	X	X	

Εικόνα 4.24 : Θεματικές κατηγορίες επιβλεπόμενης ταξινόμησης εικόνας 2012.

Μεταξύ αυτών επιλέχθηκαν εκείνες που αφενός καλύπτουν σε σημαντικό βαθμό την υπό μελέτη περιοχή, αλλά ακόμα παρουσιάζουν κατά το δυνατό μεγαλύτερη φασματική διαφοροποίηση. Η επιλογή όμως των τελικών κατηγοριών και των δειγμάτων που τις αντιπροσωπεύουν δεν είναι τόσο απλή για την εικόνα της συγκεκριμένης περιοχής, διότι σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχει επικάλυψη των φασματικών τους υπογραφών. Στην Εικόνα 4.24 πιο πάνω παρουσιάζονται οι θεματικές τάξεις που εμφανίζονται στην δορυφορική εικόνα του 2012. Οι τάξεις αυτές προήλθαν ύστερα από εκτενή πειραματισμό και επαναλήψεις ως προς το φασματικό διαχωρισμό τους.

Για να βρεθεί ο βαθμός της επικάλυψης των φασματικών υπογραφών τους, γίνεται αξιολόγηση τους, με τη δημιουργία του πίνακα διαχωρισμού (Separability Cell Array).

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, γίνεται μια γρήγορη ταξινόμηση των εικονοστοιχείων της εικόνας και καταμετρώνται τα ποσοστά των εικονοστοιχείων του κάθε

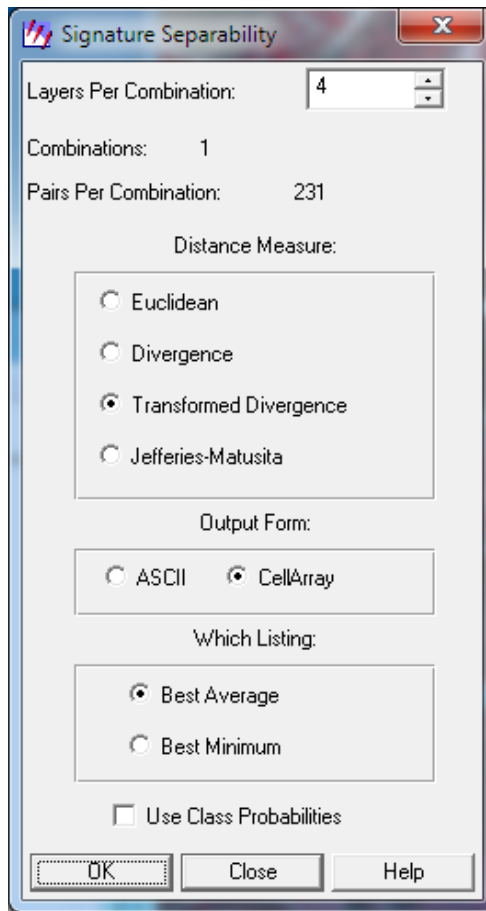


εκπαιδευτικού πεδίου που ταξινομήθηκαν σε κάθε μια τάξη. Τα ποσοστά αυτά παρουσιάζονται στη μορφή του Πίνακα 4.1.

**Πίνακας 4-1: Πίνακας πιθανότητας (contingency table) των υπογραφών της επιβλεπόμενης ταξινόμησης που εφαρμόστηκε στην εικόνα.**

Signature Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
sea_1	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
sah_2	2000	0	2000	2000	1946.05	2000	1989.63	1993.34	1999.13	2000	1989.1	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1999.29	1999.7
sh2_3	2000	2000	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1702.46	2000	1757.16	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1996.22	2000	2000	1707.17
loret_4	2000	2000	2000	0	2000	1075.94	2000	1993.99	2000	2000	1979.49	1999.99	2000	2000	2000	2000	1991.91	2000	2000	2000	2000	2000
hmgz_5	2000	1946.05	2000	2000	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1989.98	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1999.99
roa_6	2000	2000	2000	1075.94	2000	0	2000	2000	2000	2000	1946.05	1996.63	2000	786.152	1932.06	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1999.99
anous_7	2000	1999.63	2000	2000	2000	2000	0	1161.9	793.153	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
anous_8	2000	1999.24	2000	1999.99	2000	2000	2000	1161.9	0	1125.52	2000	1999.17	2000	1999.66	2000	1999.99	2000	1999.61	2000	1999.99	2000	1999.25
anous_9	2000	1999.13	2000	2000	2000	2000	2000	793.153	1125.52	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1996.62	2000	2000	2000
hmgz_10	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0	1999.79	2000	1994.46	2000	2000	2000	2000	1999.99	2000	2000	1999.94
hmgz_11	2000	1999.1	1702.46	2000	2000	2000	2000	1999.17	2000	1999.79	0	2000	1665.33	2000	1999.75	2000	2000	1999.28	2000	2000	2000	653.699
gras_12	2000	2000	2000	1979.49	2000	1946.05	2000	2000	2000	2000	2000	0	2000	0	2000	1997.61	1751.92	2000	2000	2000	2000	2000
indus_13	2000	2000	1979.16	1999.99	1999.99	1996.62	2000	1999.66	2000	1994.46	1665.33	2000	0	2000	1947.63	2000	2000	1999.99	2000	2000	2000	999.19
sha_14	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000
loret_15	2000	2000	2000	711.96	2000	786.152	2000	1999.99	2000	2000	1999.79	1997.61	1947.63	2000	0	1992.04	2000	2000	2000	2000	2000	1996.01
hmgz_16	2000	2000	2000	1999.99	2000	1932.06	2000	2000	2000	2000	2000	1751.92	2000	2000	1992.04	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000
roch_17	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000	2000	2000
anous_18	2000	2000	1996.22	2000	2000	2000	2000	1999.61	2000	1999.99	1999.28	2000	1999.99	2000	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000	1924.01
anous_19	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1999.99	2000	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000
anous_20	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1999.99	1999.62	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0	2000	2000
cpu_21	2000	1999.25	2000	2000	653.699	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0	2000
lakno_22	2000	1999.7	1707.17	2000	1999.99	1999.99	2000	1999.25	2000	1999.94	653.699	2000	999.19	2000	1996.01	2000	2000	1924.01	2000	2000	2000	0

Ο πίνακας αυτός δείχνει τη διαχωριστικότητα μεταξύ των διαφορετικών τάξεων των πληροφοριών. Το μηδέν δείχνει ότι δεν είναι καλή η διαχωριστικότητα, το 2000 σημαίνει ότι οι τάξεις έχουν τέλεια διαχωριστικότητα, πάνω απο το 1900 η διαχωριστικότητα είναι καλή, ενώ κάτω απο 1700 είναι αδύναμη διαχωριστικότητα.



Εικόνα 4.25: Δημιουργία πίνακα διαχωρισμού (Separability Cell Array).

### Αλγόριθμος Transformed Divergence:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr}((C_i - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1})) + \frac{1}{2} \text{tr}((C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)^T) \quad (4.13)$$

$$TD_{ij} = 2000 \left( 1 - \exp\left(\frac{-D_{ij}}{8}\right) \right) \quad (4.14)$$

Όπου  $i$  και  $j$  είναι οι φασματικές Υπογραφές οι οποίες συγκρίνονται μεταξύ τους,  $C$  είναι πίνακας συνδιακύμανσης,  $\mu$  είναι το μέσο διάνυσμα της φασματικής υπογραφής και  $\text{tr}$  είναι το ίχνος του τετραγωνικού πίνακα (άθροισμα των στοιχείων της κύριας διαγωνίου ενός πίνακα).

Separability CellArray

Distance Measure: Transformed Divergence  
 Using Layers: 1 2 3 4  
 Taken 4 at a time  
 Best Average Separability: 1945.1  
 Combination: 1 2 3 4

Signature Name	1	2	3	4	
sea 1	0	2000	2000	2000	
salt1 2	2000	0	2000	2000	1:
salt2 3	2000	2000	0	2000	
forest_tekke 4	2000	2000	2000	0	
hiways 5	2000	1946.05	2000	2000	
road_trees 6	2000	2000	2000	1075.34	
arosimi_ektasi1 7	2000	1998.63	2000	2000	
arosimi_ektasi2 8	2000	1999.34	2000	1999.99	
arosimi_ektasi3 9	2000	1999.13	2000	2000	
keromoskepes 10	2000	2000	2000	2000	
terrace 11	2000	1999.1	1702.46	2000	
grass 12	2000	2000	2000	1979.49	
industrial_area 13	2000	2000	1757.16	1999.38	1:
skia 14	2000	2000	2000	2000	
forest_rizoelia 15	2000	2000	2000	711.06	
kalergies 16	2000	2000	2000	1991.91	
pools 17	2000	2000	2000	2000	
xomatodromos 18	2000	2000	1996.22	2000	
apocheteutiko 19	2000	2000	2000	2000	
arosimi_ektasi4 20	2000	2000	2000	2000	
city_roads 21	2000	1999.29	2000	2000	5:
latomio 22	2000	1999.7	1707.17	2000	1:

Close

Εικόνα 4.26: Πίνακας διαχωρισμού (Separability Cell Array).

Separability Cell Array

Distance Measure: Transformed Divergence  
Using Layers: 1 2 3 4  
Taken 4 at a time  
Best Average Separability: 1945.1  
Combination: 1 2 3 4

Signature Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
sea	1	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
sak1	2	2000	0	2000	1946.05	2000	1988.63	1993.34	1989.13	2000	1993.1	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1989.29
sak2	3	2000	2000	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1702.46	2000	1757.16	2000	2000	2000	2000	1986.22	2000	2000	2000	1707.17
forest_lectre	4	2000	2000	2000	0	2000	1075.34	2000	1993.99	2000	2000	1979.43	1993.38	2000	711.06	1991.91	2000	2000	2000	2000	2000	2000
highways	5	2000	1946.05	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	553.628
road_trees	6	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1946.05	1988.63	2000	766.152	1932.06	2000	2000	2000	2000	2000	1998.99
arosim_ektasi1	7	2000	1988.63	2000	2000	2000	2000	1161.9	793.163	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
arosim_ektasi2	8	2000	1993.34	2000	2000	2000	2000	0	1125.52	0	1993.17	2000	1993.66	2000	1993.99	2000	2000	1993.61	2000	2000	2000	1999.25
arosim_ektasi3	9	2000	1999.13	2000	2000	2000	2000	793.163	1125.52	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
keromskenes	10	2000	1993.34	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1993.78	2000	1984.96	2000	1993.76	2000	2000	1998.99	2000	2000	2000	1999.94
terrace	11	2000	1993.1	1702.46	2000	2000	2000	2000	1993.17	2000	1993.78	0	1665.33	2000	1993.76	2000	2000	1386.28	2000	2000	2000	653.699
grass	12	2000	2000	2000	1946.05	2000	1946.05	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1997.61	1751.92	2000	2000	2000	2000	2000	2000
industrial_area	13	2000	2000	1757.16	1993.98	1993.98	1993.98	2000	1993.66	2000	1993.66	1665.33	2000	2000	1847.83	2000	2000	1999.98	2000	2000	2000	995.179
skia	14	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000	1999.98	2000	2000	2000
forest_rozella	15	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1993.76	1997.61	1847.83	2000	0	1982.04	2000	2000	2000	2000	2000	1996.01
kallergies	16	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1751.92	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
pools	17	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
komatodromos	18	2000	2000	1996.22	2000	2000	2000	2000	1993.61	2000	1993.99	1386.28	2000	2000	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000	1924.01
apocheteuliko	19	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0	2000	2000	2000
arosim_ektasi4	20	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1993.99	1993.62	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
city_loads	21	2000	1999.29	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0
latomio	22	2000	1993.7	1707.17	2000	1993.99	1993.99	2000	1993.25	2000	1993.94	653.699	995.179	2000	1996.01	2000	2000	1924.01	2000	2000	2000	0

Close

Εικόνα 4.27: Πίνακας Separability Cell Array

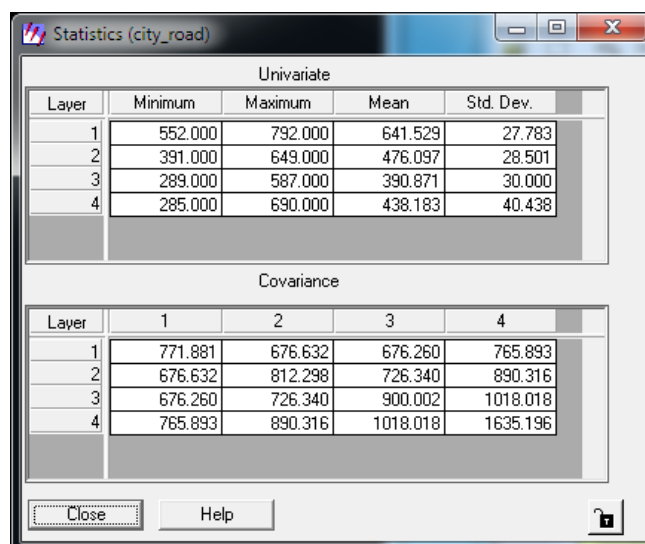
Με τη διαδικασία της ταξινόμησης είναι δυνατόν να παραχθεί ένας μεγάλος αριθμός φασματικών τάξεων, οι οποίες ανήκουν σε μια γενικότερη κατηγορία. Στην περίπτωση αυτή, στις τάξεις αυτές, αποδίδεται μια τάξη πληροφόρησης. Για παράδειγμα, η ακριβής ταξινόμηση των εδαφών χρειάστηκε αρκετές φασματικές "υπο-τάξεις", το ίδιο και η βλάστηση. Όταν η ταξινόμηση της εικόνας ολοκληρωθεί, στις "υπο-τάξεις" αυτές θα πρέπει να αποδοθεί το ίδιο σύμβολο που θα αντιστοιχηθεί σε μια τάξη πληροφόρησης.

Απο τον πίνακα παρατηρούμε ότι οι φασματικές υπογραφές της κατηγορίας λατομεία, εμφανίζουν μικρή επικάλυψη με την κατηγορία που αντιστοιχεί στα μεγάλα κτίρια κυρίως βιομηχανικών περιοχών στις ταράτσες κτιρίων και στους χωματόδρομους. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της υψηλής ανακλαστικότητας τόσο των λατομείων όσο και ορισμένων εκτεταμένων οικοδομημάτων, π.χ. το αεροδρόμιο. Όπως είναι αναμενόμενο, τα κτίρια αυτά έχουν επικάλυψη φασματικών υπογραφών με τα συνεχή αστικά τμήματα.

Ο πλήρης διαχωρισμός μπορεί να επιτευχθεί μόνο με απόρριψη κάποιων κατηγοριών και μετα-επεξεργασία του θεματικού χάρτη ή και βάση άλλων κανόνων και τεχνικών ταξινόμησης. Προτιμάται όμως η μη απόρριψή τους, αλλά η ενδεχόμενη μελλοντική συνένωσή τους.

Για τον προσδιορισμό των φασματικών υπογραφών κάθε θεματικής τάξης, που χρειάζονται για την πραγματοποίηση της ταξινόμησης, είναι αναγκαίο να υπολογιστούν τα στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή, ελάχιστη και μέγιστη τιμή, τυπική απόκλιση, πίνακας συμμεταβλητότητας) των περιοχών εκπαίδευσης, και κατ' επέκταση των κατηγοριών στις οποίες αυτές αντιστοιχούν, σε κάθε φασματικό κανάλι. Η μέση τιμή μιας κατηγορίας εκφράζει το μέσο όρο της ψηφιακής τιμής για το κάθε κανάλι και η τυπική απόκλιση αποτελεί το εύρος των ψηφιακών τιμών της κάθε κατηγορίας στο κανάλι που αντιστοιχεί. Πιο κάτω στην εικόνα 4.28 παρουσιάζεται ο Πίνακας που περιλαμβάνει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της κατηγορίας των δρόμων σε κάθε φασματικό κανάλι. Παρατηρώντας προσεκτικά όλες τις κατηγορίες, προκύπτει ότι σχεδόν σε όλα τα κανάλια υπάρχουν μικρές ή μεγάλες επικαλύψεις μεταξύ των διάφορων κατηγοριών, που είναι αποτέλεσμα των παρόμοιων φασματικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν. Το γεγονός αυτό καθιστά αρκετά δύσκολο ή και αδύνατο το διαχωρισμό των θεματικών κατηγοριών που έχουν επιλεγεί για την ταξινόμηση και με τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται πως ο

αλγόριθμος της ταξινόμησης που θα επιλεγεί θα καθορίσει την ποιότητα του αποτελέσματος της ταξινόμησης.



The screenshot shows a window titled 'Statistics (city\_road)' with two tables. The first table, 'Univariate', shows statistics for four layers. The second table, 'Covariance', shows the covariance matrix for the same four layers.

Univariate				
Layer	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.
1	552.000	792.000	641.529	27.783
2	391.000	649.000	476.097	28.501
3	289.000	587.000	390.871	30.000
4	285.000	690.000	438.183	40.438

Covariance				
Layer	1	2	3	4
1	771.881	676.632	676.260	765.893
2	676.632	812.298	726.340	890.316
3	676.260	726.340	900.002	1018.018
4	765.893	890.316	1018.018	1635.196

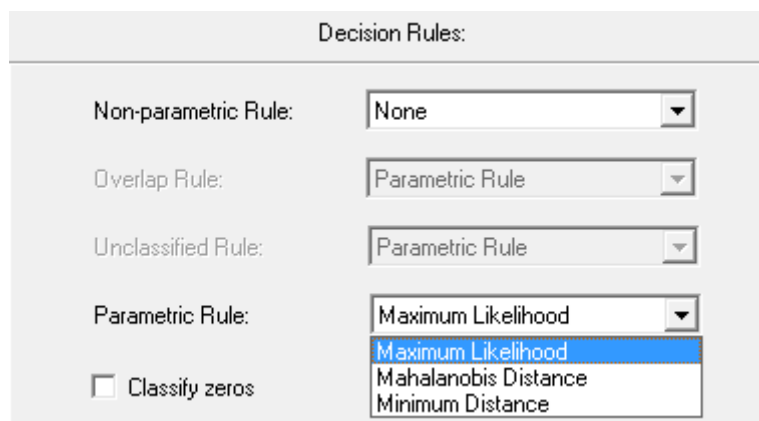
Εικόνα 4.28: Στατιστικά δεδομένα για την κλάση που αφορά δρόμους.

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του θεματικού χάρτη της κάλυψης γης με την τελική ταξινόμηση όλων των εικονοστοιχείων της εικόνας. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται ένας κανόνας ταξινόμησης που είναι είτε παραμετρικός, όπως ο κανόνας της ελάχιστης απόστασης, της απόστασης Mahalanobis, και της μέγιστης πιθανοφάνειας ή μη παραμετρικός, όπως ο κανόνας του παραλληλεπίεδου. Ένας παραμετρικός κανόνας ταξινόμησης μπορεί να εφαρμοστεί είτε στις περιοχές εκπαίδευσης μιας επιβλεπόμενης ταξινόμησης είτε στις ομάδες που προήλθαν από τη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Αντιθέτως, ένας μη παραμετρικός κανόνας ταξινόμησης εφαρμόζεται μόνο στα εκπαιδευτικά δείγματα μιας επιβλεπόμενης ταξινόμησης.



**Εικόνα 4.29: Προσδιορισμός παραμέτρων για επιβλεπόμενη ταξινόμηση.**

Προσπάθεια καταβλήθηκε στην εξάντληση των βασικών δυνατοτήτων του λογισμικού ERDAS Imagine στην ανάλυση των δεδομένων, στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος με περιορισμούς βέβαια τα διατιθέμενα δεδομένα και τις γνώσεις του συντάκτη. Συνεπώς, για την χαρτογράφηση-ταξινόμηση των τελικών κατηγοριών δοκιμάστηκαν όλοι οι διατιθέμενοι αλγόριθμοι που υπάρχουν στο κεντρικό μενού στην κατηγορία Supervised Classification, όπως φαίνεται πιο κάτω και για τις δύο εικόνες.



**Εικόνα 4.30: Προσδιορισμός παραμέτρων για επιβλεπόμενη ταξινόμηση, επιλογή με παραμετρικό κανόνα της Μέγιστης πιθανοφάνειας.**

Οι αλγόριθμοι που απέδωσαν καλύτερα και επιλέχτηκε να παρουσιαστούν τα στατιστικά τους στοιχεία ήταν τρεις: ο αλγόριθμος της Μέγιστης Πιθανοφάνειας ή Maximum Likelihood, ο αλγόριθμος της Ελάχιστης Απόστασης ή Minimum Distance και ο Mahalanobis Distance και για τις δύο εικόνες.

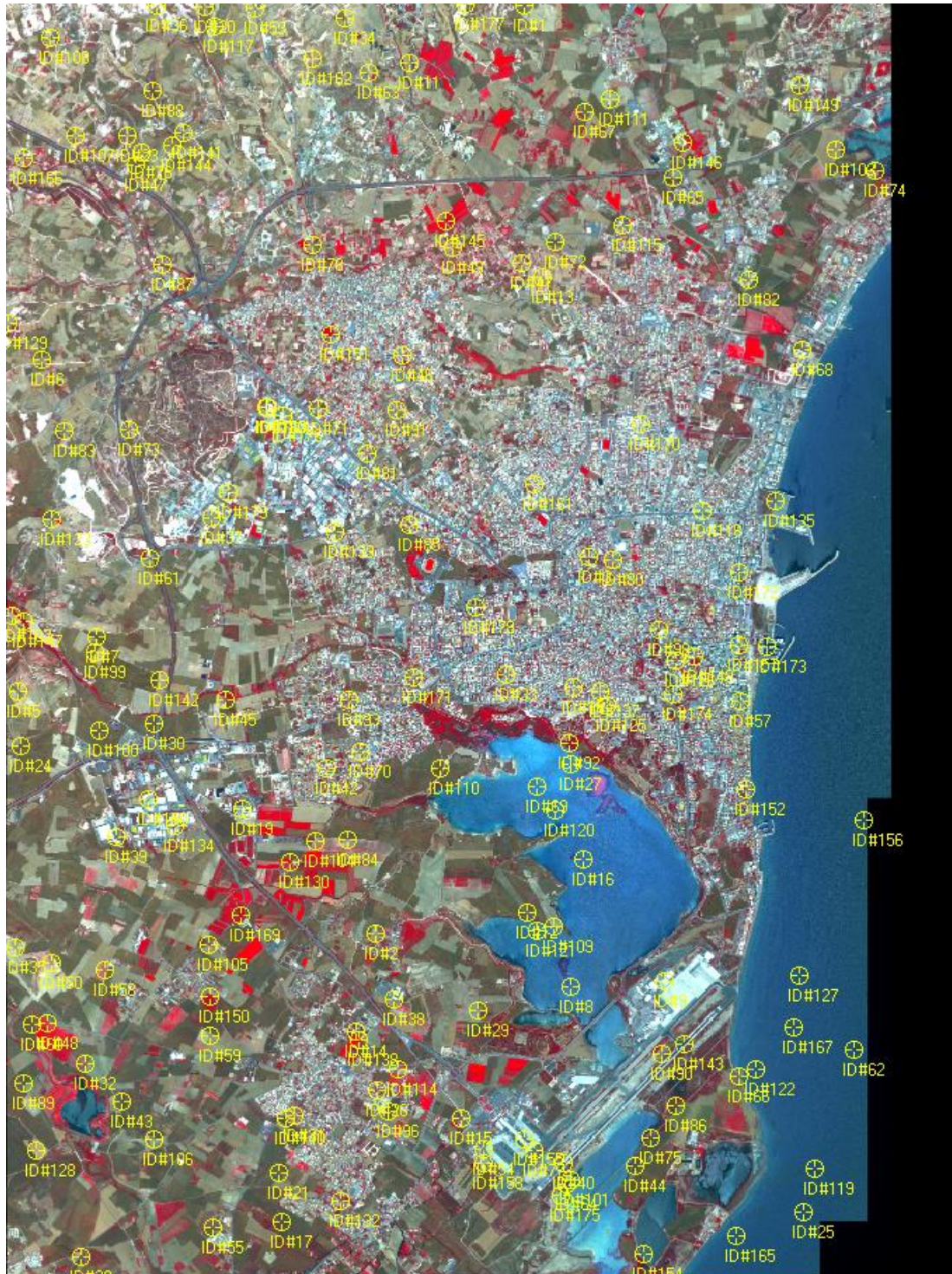
Κάτι άλλο που πρέπει να τονιστεί είναι ότι κατά την εφαρμογή των αλγορίθμων ταξινόμησης επιλέχτηκε η μη συμπλήρωση της βασικής παραμέτρου για κάθε έναν απ' αυτούς. Στο παράθυρο του αλγορίθμου της Μέγιστης Πιθανοφάνειας υπάρχει η παράμετρος "Use Probability". Για όλα επιλέχτηκε η τιμή "none".

Ο λόγος για την τοποθέτηση της τιμής "none" στις παραπάνω παραμέτρους είναι ο εξής: η συμπλήρωση των παραμέτρων λειτουργεί καλύτερα είτε στη χαρτογράφηση μιας αστικής κατηγορίας ξεχωριστά είτε στη χαρτογράφηση ενός μικρού αριθμού κατηγοριών, πράγμα που είναι εφικτό με πολλές δοκιμές στην τιμή της κάθε παραμέτρου (σε συνδυασμό με μελέτη των στατιστικών στοιχείων και της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  για κάθε κατηγορία) και επίθεση του αποτελέσματος στην απεικόνιση για τον έλεγχο των ταξινομημένων εικονοστοιχείων. Η διαδικασία όμως αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα όταν αφορά αστικές περιοχές με πολλά δεδομένα εκπαίδευσης ενώ και η τοποθέτηση μίας μόνο τιμής για όλες τις κατηγορίες δεν έχει κανένα αποτέλεσμα λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών (φασματικών και στατιστικών) των εξεταζόμενων αστικών κατηγοριών. Για το λόγο αυτό, προτιμήθηκε να εξεταστεί η λειτουργία των αλγορίθμων με τα "εκ φύσεως" χαρακτηριστικά τους και χωρίς παρέμβαση. Η επιλογή αυτή είχε αντίκτυπο στην κατηγορία των αταξινομητων εικονοστοιχείων, που ήταν μηδαμινά.

#### **4.2.2.2. Αξιολόγηση της ταξινόμησης - εκτίμηση ακρίβειας**

Η εκτίμηση της ακρίβειας της ταξινόμησης υλοποιείται με τη χρήση εικονοστοιχείων αναφοράς (reference pixels) που επιλέγονται τυχαία σε όλη την περιοχή μελέτης, γι' αυτό ο αναλυτής χρειάζεται να έχει αξιόπιστα στοιχεία πεδίου, ακολουθώντας ένα σχήμα δειγματοληψίας. Αυτά τα στοιχεία με βάση τις παραδοσιακές μεθόδους αποκτούνται από την επιτόπια παρουσία του αναλυτή στην περιοχή μελέτης και τις μετρήσεις που πραγματοποιεί, με τη χρήση GPS. Αυτή η διαδικασία είναι χρονοβόρα, πολυδάπανη και απαιτεί ότι ο αναλυτής είναι σε θέση να επισκεφτεί όλη την περιοχή μελέτης. Με την παρούσα εργασία αντικαθίσταται η επιτόπια έρευνα, με την χρησιμοποίηση αεροφωτογραφιών.





Εικόνα 4.31: Επιλογή εικονοστοιχείων αναφοράς.

Για τη δημιουργία της εκτίμησης ακρίβειας επιλέγηκαν τυχαία σε όλη την περιοχή μελέτης εκατοντηντά εικονοστοιχεία αναφοράς και στις δύο εικόνες που καταλήξαμε.

Accuracy Assessment (supervised2012\_maxlik.img) - Viewer# 1

File Edit View Report Help

Point #	Name	X	Y	Class	Reference
1	ID#1	255834.331	372385.144	13	13
2	ID#2	254230.998	362297.550	11	11
3	ID#3	256546.479	366399.902	28	3
4	ID#4	253549.857	356740.396	18	18
5	ID#5	250340.691	364928.096	15	15
6	ID#6	250605.245	368536.845	16	16
7	ID#7	251196.868	365519.219	13	13
8	ID#8	256335.935	361721.430	22	22
9	ID#9	257361.148	361781.943	28	30
10	ID#10	256376.944	364981.607	7	7
11	ID#11	254598.574	371772.017	14	14
12	ID#12	255873.839	362529.098	15	15
13	ID#13	256039.874	369432.531	14	14
14	ID#14	254008.952	361230.829	10	7
15	ID#15	255154.690	360288.133	29	29
16	ID#16	256483.966	363099.216	22	22
17	ID#17	253209.286	359164.900	1	1
18	ID#18	251027.333	357335.020	1	1
19	ID#19	252784.698	363656.332	23	6
20	ID#20	252363.611	372383.644	11	11
21	ID#21	253173.779	359690.009	1	1
22	ID#22	254361.525	358071.173	11	11
23	ID#23	251534.938	370975.352	23	23
24	ID#24	250381.199	364340.474	8	8
25	ID#25	258864.960	359268.921	5	5
26	ID#26	254245.001	360589.195	24	24
27	ID#27	256341.436	364146.434	22	22
28	ID#28	251023.332	358782.320	30	7
29	ID#29	255343.229	361466.377	12	12
30	ID#30	251817.497	364590.026	13	13
31	ID#31	253350.315	360317.139	28	28
32	ID#32	251080.844	360887.257	18	18
33	ID#33	255642.791	365117.635	10	10
34	ID#34	253889.427	372260.118	15	15
35	ID#35	250319.186	362142.518	2	2
36	ID#36	251843.503	372395.646	28	28
37	ID#37	252437.126	366822.990	15	15
38	ID#38	254421.538	361579.401	30	14
39	ID#39	251409.913	363352.269	4	4
40	ID#40	256264.420	359800.532	6	6
41	ID#41	255803.825	369589.564	16	16
42	ID#42	253687.385	364096.924	28	6
43	ID#43	251472.926	360468.670	13	13
44	ID#44	257043.582	359775.026	15	15
45	ID#45	252595.159	364845.079	3	3
46	ID#46	254522.559	368590.857	28	28
47	ID#47	251621.456	370662.287	13	13
48	ID#48	250668.259	361323.848	32	32
49	ID#49	255065.171	369755.598	26	26
50	ID#50	250701.766	361972.483	16	16

Εικόνα 4.32: Πίνακας ελέγχου των σφαλμάτων της ταξινόμησης.

Κατά τη δημιουργία της εκτίμησης ακρίβειας παράγονται:

- ο πίνακας σφάλματος ή σύγχυσης (error matrix)
- η αναφορά ακρίβειας (accuracy report) και
- ο συντελεστής κάπα (*Kappa* coefficient)

Πάρακάτω παρουσιάζονται τα πιο πάνω στοιχεία και οι διάφοροι δείκτες αξιολόγησης των αλγορίθμων που εφαρμόστηκαν πάνω σε διάφορα δεδομένα με ταυτόχρονη επεξήγησή τους. Στους Πίνακες 4-2 και 4-3 σημειώνονται η συνολική ακρίβεια και ο παράγοντας  $k$ , για τους τρεις αλγόριθμους ταξινόμησης.

#### (α) Πίνακας σφάλματος ή Πίνακας ασάφειας (error matrix, or confusion matrix)

Στον Παράρτημα Α φαίνεται ο πίνακας σφάλματος για τις δυο επικρατούσες εικόνες όπου γίνεται σύγκριση των σημείων αναφοράς με τα ταξινομημένα σημεία.

#### (β) Αναφορά ακρίβειας

Η **συνολική ακρίβεια** μιας ταξινόμησης, που αφορά όλες τις τάξεις και προκύπτει από το άθροισμα των εικονοστοιχείων αναφοράς που ταξινομήθηκαν στην σωστή τάξη (το άθροισμα της διαγωνίου του πίνακα) προς το συνολικό αριθμό τους. Στην περίπτωση μας, είχαμε για την εικόνα Geoeye του 2012, 88% συνολική ακρίβεια.

Πίνακας 4-2: Αναφορά ακριβείας ταξινόμησης της εικόνας του 2012.

ACCURACY TOTALS

Class Name Accuracy	Reference Totals	Classified Totals	Number Producers Correct	Producers Accuracy	Users Accuracy
Unclassified	0	0	0	---	---
1	6	6	6	100.00%	100.00%
1	5	5	5	100.00%	100.00%
2	7	6	6	85.71%	100.00%
3	8	5	5	62.50%	100.00%
4	11	7	7	63.64%	100.00%
5	10	6	6	60.00%	100.00%
3	12	5	4	33.33%	80.00%
1	6	6	6	100.00%	100.00%
5	3	6	2	66.67%	33.33%
5	5	6	4	80.00%	66.67%
1	6	6	6	100.00%	100.00%
1	6	6	6	100.00%	100.00%
1	6	6	6	100.00%	100.00%
1	7	6	6	85.71%	100.00%
1	6	6	6	100.00%	100.00%
1	5	5	5	100.00%	100.00%
1	6	6	6	100.00%	100.00%
2	6	6	6	100.00%	100.00%
6	4	5	3	75.00%	60.00%
1	0	5	0	---	---
5	5	5	5	100.00%	100.00%
7	7	6	6	85.71%	100.00%
1	2	5	2	100.00%	40.00%
2	5	5	5	100.00%	100.00%
5	3	5	3	100.00%	60.00%
1	4	5	4	100.00%	80.00%
1	3	5	3	100.00%	60.00%
1	3	6	3	100.00%	50.00%
1	6	6	6	100.00%	100.00%
1	4	5	0	0.00%	0.00%
2	6	6	6	100.00%	100.00%
2	7	6	6	85.71%	100.00%
Totals	180	180	150		

Overall Classification Accuracy = 83.33%

----- End of Accuracy Totals -----

Πίνακας 4-3: Αναφορά ακρίβειας ταξινόμησης της εκόνας του 2004.

ACCURACY TOTALS

Class Name Accuracy	Reference Totals	Classified Totals	Number Producers Correct	Users Accuracy
Unclassified	0	0	0	---
salt	3	5	3	100.00%
trees	5	5	5	100.00%
forest1	2	5	2	100.00%
edafos2	8	5	5	62.50%
hiway	4	5	4	100.00%
sea	10	5	5	50.00%
edafos1	6	5	5	83.33%
saltlake1	4	5	2	50.00%
ter_white	2	5	2	100.00%
ter_griza	6	5	3	50.00%
edafos3	6	5	5	83.33%
edafos4	6	5	5	83.33%
edafos5	6	5	5	83.33%
ter_keramidi	6	5	5	83.33%
ter_industry2	1	5	1	100.00%
grass_field	6	5	5	83.33%
limata	5	5	5	100.00%
ter_industry	4	5	4	100.00%
kaliergies	5	5	5	100.00%
skia_ktiriou	5	5	4	80.00%
xomatodromos	5	5	5	100.00%
latomio	5	5	4	80.00%
road_vil2	4	5	1	25.00%
edafos6	7	5	5	71.43%
road_vil	5	5	5	100.00%
edafos7_gipedo	5	5	5	100.00%
pefka	4	5	4	100.00%
edafos_stratope	4	5	4	100.00%
Totals	139	140	113	

Overall Classification Accuracy = 80.71%

----- End of Accuracy Totals -----

Η ακρίβεια χρήστη (Users Accuracy), δείχνει πόσα από το σύνολο των ταξινομηθέντων εικονοστοιχείων αναφοράς μιας τάξης αποδόθηκαν (αναγνωρίστηκαν) από το χρήστη στην τάξη που ταξινομήθηκαν (Πίνακας-4.2,4.3,  $(\text{Number Correct} / \text{Classified}) * 100$ ).

Η **ακρίβεια αναλυτή** (Producers Accuracy) που υπολογίζει από το σύνολο των εικονοστοιχείων αναφοράς που αναγνωρίστηκαν κατά τον έλεγχο και αποδόθηκαν σε μία τάξη, από όλες τις κατηγορίες και του εαυτού της (Πίνακας 4.2,4.3, (Number Correct/Reference) \* 1 00).

(γ) Ο συντελεστής *Kappa* (*Kappa coefficient*)

Η τιμή του συντελεστή *Kappa* δηλώνει το ποσοστό σφαλμάτων που απέφυγε η διαδικασία της ταξινόμησης σε σχέση με τα σφάλματα μιας τυχαίας ταξινόμησης. Ο συντελεστής *Kappa* αναφέρεται σε κάθε τάξη χωριστά ,αλλά και στο σύνολο της ταξινόμησης.

Υπολογίζεται από τον τύπο

$$K = \frac{N * \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} * X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} * X_{+i})}$$

Όπου

i = αριθμός τάξεων

r = αριθμός γραμμών

N= αριθμός εικονοστοιχείων

$X_{ii}$  = στοιχεία της κύριας διαγωνίου

$X_{+i}, X_{i+}$  = μερικά αθροίσματα κατά γραμμή και κατά στήλη αντίστοιχα

(4.15)

Πίνακας 4-4: Συντελεστής Kappa για την εικόνα του 2012.

KAPPA (K^) STATISTICS

-----  
Overall Kappa Statistics = 0.8279

Conditional Kappa for each Category.  
-----

Class Name	Kappa
-----	-----
Unclassified	0.0000
1	1.0000
1	1.0000
2	1.0000
3	1.0000
4	1.0000
5	1.0000
3	0.7857
1	1.0000
5	0.3220
5	0.6571
1	1.0000
1	1.0000
1	1.0000
1	1.0000
1	1.0000
1	1.0000
1	1.0000
2	1.0000
6	0.5909
1	0.0000
5	1.0000
7	1.0000
1	0.3933
2	1.0000
5	0.5932
1	0.7955
1	0.5932
1	0.4915
1	1.0000
1	-0.0227
2	1.0000
2	1.0000

----- End of Kappa Statistics -----

Από τον Πίνακα 4.4 προκύπτει ότι η συνολική τιμή του συντελεστή Kappa (K) είναι 0.83 που ερμηνεύεται σε **αποφυγή σφαλμάτων της τάξης του 83 %**. Αν η τιμή του συντελεστή Kappa για κάποια τάξη είναι 1, σημαίνει ότι η διαδικασία ταξινόμησης απέφυγε το 100% των σφαλμάτων που θα είχε μια τυχαία ταξινόμηση.

Πίνακας 4-5: Συντελεστής Kappa για την εικόνα του 2004.

```

KAPPA (K^) STATISTICS
-----

Overall Kappa Statistics = 0.8001

Conditional Kappa for each Category.
-----

Class Name          Kappa
-----
Unclassified        0.0000
  salt               0.5912
  trees              1.0000
  forest1            0.3913
  edafos2             1.0000
  hiway              0.7941
  sea                1.0000
  edafos1            1.0000
  saltlake1          0.3824
  ter_white           0.3913
  ter_griza           0.5821
  edafos3             1.0000
  edafos4             1.0000
  edafos5             1.0000
  ter_keramidi        1.0000
  ter_industry2       0.1942
  grass_field         1.0000
  limata              1.0000
  ter_industry        0.7941
  kaliergies          1.0000
  skia_ktiriou        0.7926
  xomatodromos        1.0000
  latomio             0.7926
  road_vil2           0.1765
  edafos6             1.0000
  road_vil            1.0000
  edafos7_gipedo     1.0000
  pefka               0.7941
  edafos_stratopedou 0.7941

----- End of Kappa Statistics -----

```

Από τον Πίνακα 4.5 προκύπτει ότι η συνολική τιμή του συντελεστή Kappa (K) είναι 0.80 που ερμηνεύεται σε **αποφυγή σφαλμάτων της τάξης του 80 %**.

Η αξιολόγηση με τους δύο κυριότερους δείκτες, της συνολικής ακρίβειας και του παράγοντα κάπα, φανέρωσε την υπεροχή του αλγόριθμου ταξινόμησης της Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood) και για τις δύο εικόνες. Για την εικόνα Geoeye του 2012 με συντελεστή K=83% που θεωρείται καλή και για την εικόνα του 2004 QuickBird με συντελεστή K=80% που θεωρείται σχετικά καλή.



Ο αλγόριθμος της ελάχιστης απόστασης ταξινομεί λαμβάνοντας υπόψη μόνο το διάλυμα των μέσων τιμών κάθε κατηγορίας στα φασματικά κανάλια, ενώ η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας λαμβάνει υπόψη και τη συνδυασπορά κάθε πολυγώνου εκπαίδευσης. Προέκυψε, όπως αναμενόταν, πως το αποτέλεσμα του δεύτερου αλγορίθμου είναι πιο ομοιογενές.

Λόγω του πιο ομοιογενούς αποτελέσματος, η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας υπερεκτιμά σε σχέση με την πραγματικότητα, κάποιες κατηγορίες. Αντίθετα, ο αλγόριθμος της ελάχιστης απόστασης, υποτιμά την πραγματικότητα. Η συμμετοχή της συμμεταβλητότητας, που εξηγεί αυτήν την ομογενοποίηση, δίνει σε πολλές κατηγορίες καλύτερα αποτελέσματα. Οι περιοχές αστικής δόμησης, τόσο συνεχείς όσο και διακεκομμένες, που αποτελούν τη βασική θεματική κατηγορία μελέτης στην εργασία αυτή, εκτιμώνται καλύτερα με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας παρά την μικρή υπερεκτίμηση. Το φαινόμενο αυτό, προφανώς θα παρατηρείται και στις απεικονίσεις των προηγούμενων χρόνων, συνεπώς θα είναι δυνατή η ανίχνευση των αλλαγών.

Επειδή η αξιολόγηση της ταξινόμησης έγινε με τις εικόνες του δορυφόρου QuickBird και Geoeye και όχι στο πεδίο, αυτό έχει κάποιους περιορισμούς και δυσκολίες όπως ότι δεν είναι εύκολο κάθε φορά, να διακρίνονται οι διαφορές μεταξύ ομοειδών τύπων βλάστησης ή ομοειδών τύπων χρήσης γης. Για παράδειγμα, στη περίπτωση μας, ενώ μπορεί να διακρίνεται ότι το σημείο που ελέγχεται είναι έδαφος δεν είμαστε σε θέση να διακρίνουμε τον τύπο του εδάφους (έδαφος 1 ή έδαφος 2, κλπ). Γι' αυτό το λόγο, έγινε ομαδοποίηση των τάξεων σε κατηγορίες ομοειδών τύπων χρήσης γης και βλάστησης. Η ομαδοποίηση αυτή κάνει πιο ισχυρά τα αποτελέσματα του ελέγχου ακρίβειας της ταξινόμησης αφού, ο έλεγχος πλέον γίνεται με απόλυτη αυστηρότητα σε επίπεδο ομάδας και όχι τάξης.

Οι έξι (6) κατηγορίες που δημιουργήθηκαν μετά την ομαδοποίηση είναι:








- 1-Αστικές περιοχές
- 2-Πράσινο -Δασικές περιοχές και καλλιέργειες
- 3-Έδαφος
- 4- Αλυκή

5- Θάλασα

6- Οδικό δίκτυο

Συνιστάται η απόδοση των τάξεων κάλυψης γης σε χρώματα να γίνεται με παλέτες χρωμάτων που συνήθως χρησιμοποιούνται διεθνώς στους χάρτες κάλυψης γης έτσι ώστε ο χρήστης να αντιλαμβάνεται την πληροφορία του χάρτη χωρίς να χρειάζεται λεπτομερή εξέταση της χρωματικής κλίμακας. Βασικά χρώματα αποδίδονται στις βασικές τάξεις (Πίνακας 4.6) ενώ οι διάφορες υποτάξεις αποδίδονται με τις αποχρώσεις του αντίστοιχου βασικού χρώματος.

Πίνακας 4-6: Χρωματική κλίμακα των τάξεων κάλυψης γης.

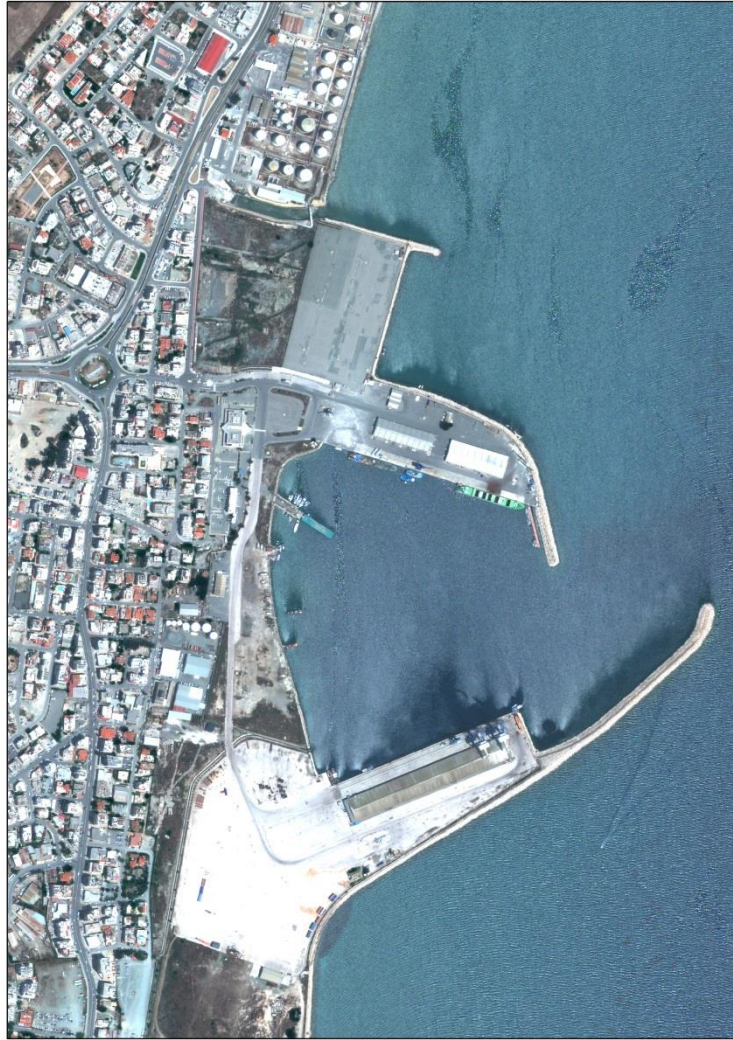
ΥΠΟΜΝΗΜΑ	
	ΔΟΜΗΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ
	ΔΡΟΜΟΙ
	ΠΡΑΣΙΝΟ
	ΘΑΛΑΣΣΑ
	ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ
	ΑΛΥΚΕΣ
	ΕΔΑΦΟΣ

Ο τελικός χάρτης θα πρέπει να αξιολογηθεί ως προς την αξιοπιστία του. Για το σκοπό αυτό απαιτούνται δεδομένα για το είδος του τύπου κάλυψης ενός αριθμού εικονοστοιχείων αναφοράς στην εικόνα μας. Τα δεδομένα για τα εικονοστοιχεία αυτά αναφοράς μπορούν να προέλθουν είτε από επιτόπια έρευνα με χρήση συσκευής εντοπισμού θέσης (GPS) είτε από δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες υψηλής χωρικής ανάλυσης, όπως έγινε στη δική μας περίπτωση, είτε ακόμη από άλλους θεματικούς χάρτες τους οποίους θεωρούμε αξιόπιστους.

## 5. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 5.1. Εντοπισμός μεταβολών - Αστικοποίηση

Μία από τις βασικές εφαρμογές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης στο αστικό περιβάλλον είναι ο προσδιορισμός των χρήσεων και της κάλυψης γης (land use και land cover αντίστοιχα) με τη χρήση δορυφορικών εικόνων υψηλής ευκρίνειας. Οι πρόσφατες δορυφορικές αποστολές των IKONOS, Quickbird και Geoeye βελτίωσαν ακόμη περισσότερο το δυναμικό της δορυφορικής τηλεπισκόπησης σε ότι αφορά στον προσδιορισμό των χρήσεων και της κάλυψης γης, προσφέροντας εικόνες με χωρικές διακριτικές ικανότητες της τάξης μισού μέτρου. Στην εικόνα 5.1 αποτυπώνεται η περιοχή του λιμανιού Λάρνακας όπως λήφθηκε από το δορυφόρο Geoeye (2012). Η ευκρίνεια στην αποτύπωση των λεπτομερειών, φυσικής και ανθρωπογενούς προέλευσης, επί του παράκτιου μετώπου της Λάρνακας - αλλά και στο θαλάσσιο περιβάλλον του - είναι ικανοποιητική για μεγάλης ακριβείας χαρτογραφήσεις.



**Εικόνα 5.1:** Δορυφορική λήψη της περιοχής λιμανιού Λάρνακας με τη χρήση του δορυφόρου Geoeye (Αύγουστος 2012). Η εικόνα έχει χωρική διακριτική ικανότητα του μισού μέτρου και είναι στο ορατό τμήμα του φάσματος.

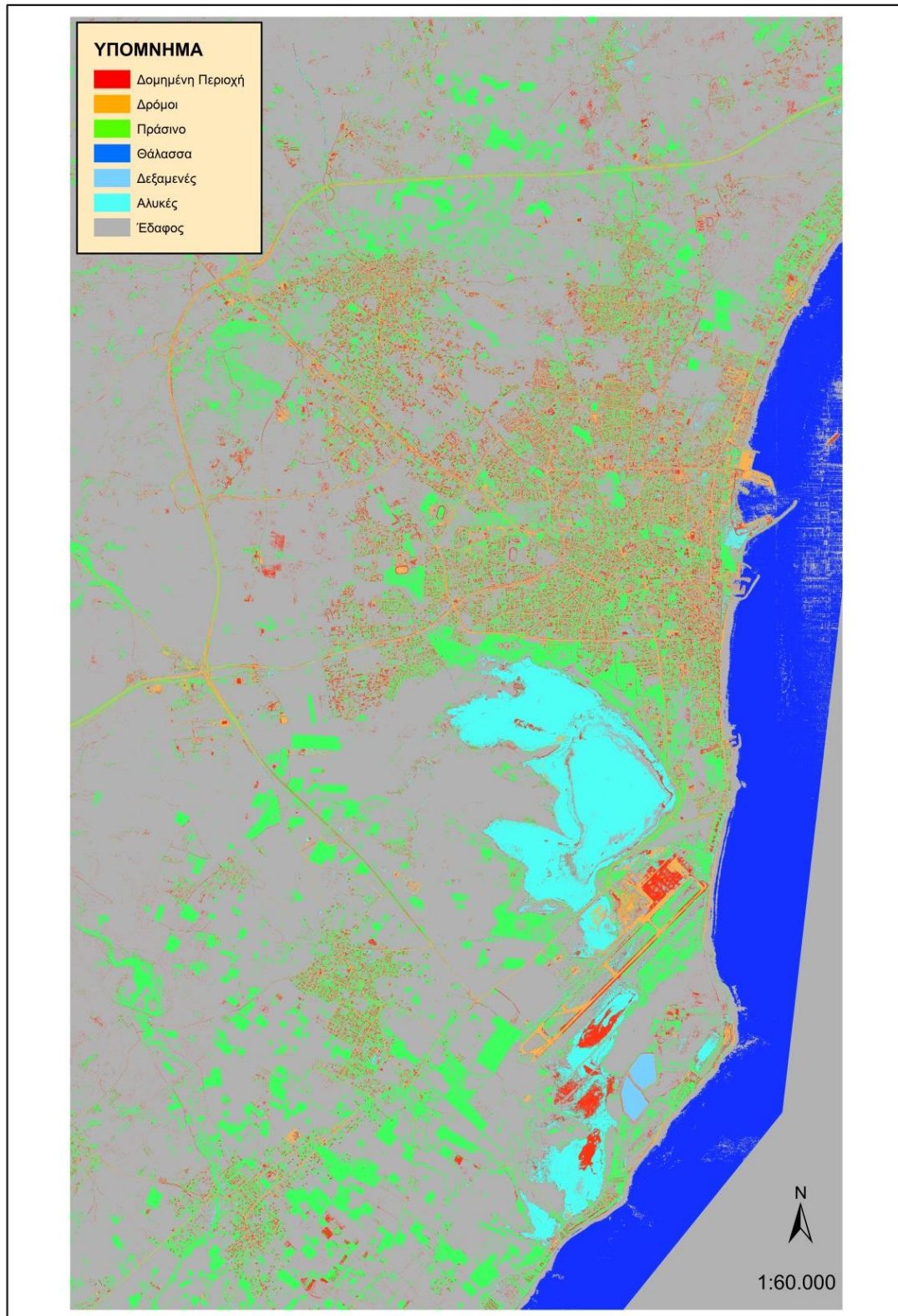
Η παρακολούθηση των αλλαγών κάλυψης/χρήσεων γης, ιδίως στα όρια αλλά και στις ευρύτερες περιοχές μείζονων πολεοδομικών συγκροτημάτων, συνδέεται άμεσα με το χωροταξικό και πολεοδομικό σχεδιασμό. Παράλληλα, δίνεται η δυνατότητα για την αξιολόγηση μέτρων χωρικής πολιτικής που εφαρμόστηκαν αλλά και υποστηρίζεται η κατάρτιση χωροταξικών σχεδίων και μέτρων προστασίας του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος. Ιδιαίτερη σημασία έχει η δυνατότητα για τη σύνδεση των αλλαγών στις χρήσεις γης με αλλαγές στο αστικό μικροκλίμα.

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, η παρακολούθηση των αλλαγών στις χρήσεις γης γίνεται στα πλαίσια του προγράμματος CORINE (Co-ordination of Information on the Environment). Στην ουσία, είναι μία γεωγραφική βάση δεδομένων η οποία βασίζεται σε δορυφορικά δεδομένα Landsat και παρέχει τη δυνατότητα για τη δημιουργία

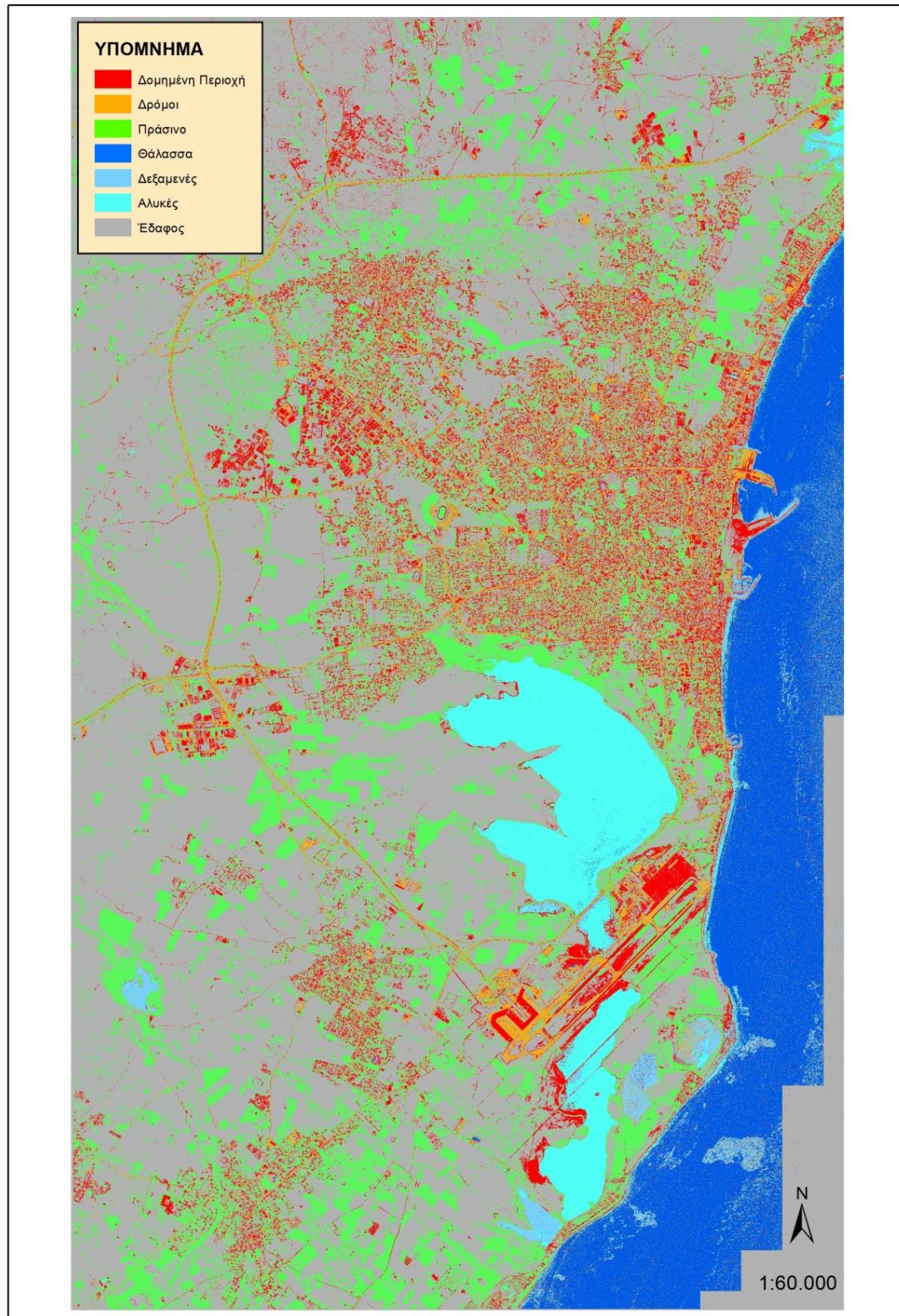
θεματικών χαρτών σε κλίμακα 1: 100 000 για την κάλυψη και τις χρήσεις γης στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης.

Ο εντοπισμός μεταβολών σε μια αστική περιοχή με τη βοήθεια δορυφορικών εικόνων αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για τους σχεδιαστές του χώρου καθώς και για την εκτίμηση της μεταβολής του πληθυσμού. Για τον **εντοπισμό των μεταβολών (change detection)** στην εικόνα, στην παρούσα εργασία εφαρμόσαμε την πιο κάτω μέθοδο.

Σε αυτή τη μέθοδο κάναμε ποιοτική και ποσοτική σύγκριση θεματικών χαρτών που παρήχθησαν από φασματική ταξινόμηση εικόνων που ελήφθησαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές με βάση τις τάξεις που αφορούν στις αστικές περιοχές. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όταν τα δορυφορικά δεδομένα δεν είναι βαθμονομημένα και συνεπώς δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα, οπότε η σύγκριση γίνεται μεταξύ των ταξινομημένων εικόνων, εντοπίζοντας τις μεταβολές των ορίων των αντίστοιχων τάξεων.



Εικόνα 5.2: Τελικό αποτέλεσμα επιβλεπόμενης ταξινόμησης για την εικόνα του 2004.



Εικόνα 5.3: Τελικό αποτέλεσμα επιβλεπόμενης ταξινόμησης για την εικόνα του 2012.

## 5.2. Εκτίμηση της έκτασης της Δομημένης Περιοχής

Δεχόμενοι τα παραπάνω αποτελέσματα, για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε την έκταση της Δομημένης Περιοχής θα πρέπει να μετατραπούν τα εικονοστοιχεία σε εμβαδόν. Η μετατροπή επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των εικονοστοιχείων με το 0.36sqm στην εικόνα του 2004 (το μέγεθος του εικονοστοιχείου της εικόνας Quickbird είναι 60\*60cm=3600sqcm) και με το 0.25sqm στην εικόνα του 2012 (το μέγεθος του εικονοστοιχείου της εικόνας Geoeye-1 είναι 50\*50cm=2500sqcm).

Ο υπολογισμός των εικονοστοιχείων έγινε με χρήση του λογισμικού ArcGis.

Για την εικόνα του **2004** έχουμε:

reclass\_super2004new

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

	OID	Value	Count
	0	1	22618699
	1	2	51190382
	2	3	285296763
	3	4	13330425
	4	5	36908397
▶	5	6	20846372
	6	7	594856

Απο το σύνολο των 20846372 εικονοστοιχεία που έχουν ταξινομηθεί σε Δομημένη Περιοχή, για να μετατραπούν σε εμβαδό, τα πολλαπλασιάζουμε με 0.36sqm και έχουμε συνολικά **7,50** τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Για την εικόνα του **2012** έχουμε:

reclass\_super2012

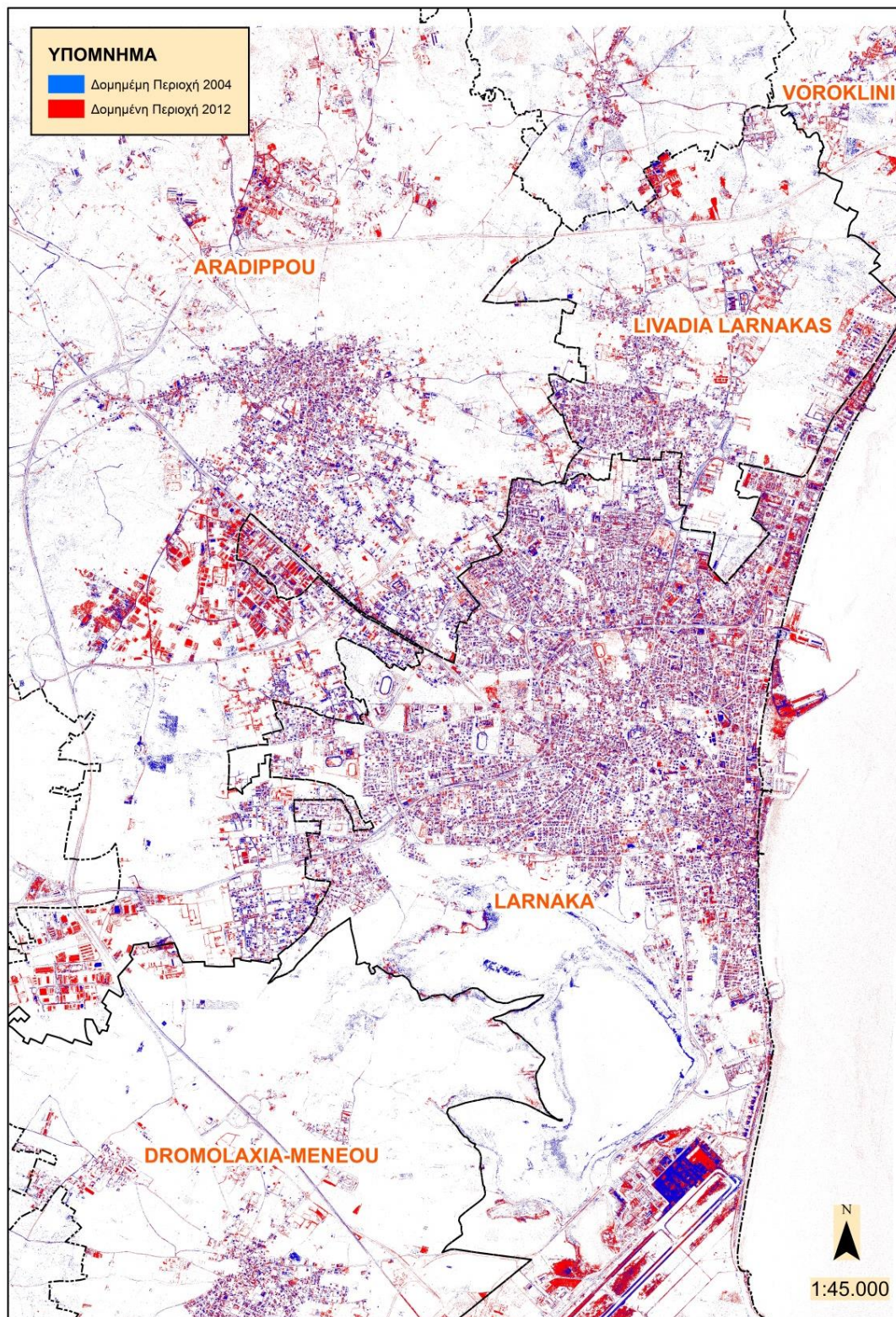
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

	OID	Value	Count
	0	1	356254623
	1	2	100775555
	2	3	20720904
	3	4	61279826
▶	4	5	43440141
	5	6	11716941
	6	7	25930199

Απο το σύνολο των 43440141 εικονοστοιχείων που έχουν ταξινομηθεί σαν Δομημένη Περιοχή στην εικόνα του 2012, για να μετατραπούν σε εμβαδό, τα πολλαπλασιάζουμε με 0.25sqm και έχουμε συνολικά **10,86** τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Απο τα αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι έχουμε μια αύξηση το 2012, συγκρινόμενο με το 2004 στα 3,36 τετραγωνικά χιλιόμετρα που αντιστοιχεί σε μία αύξηση του 31%.





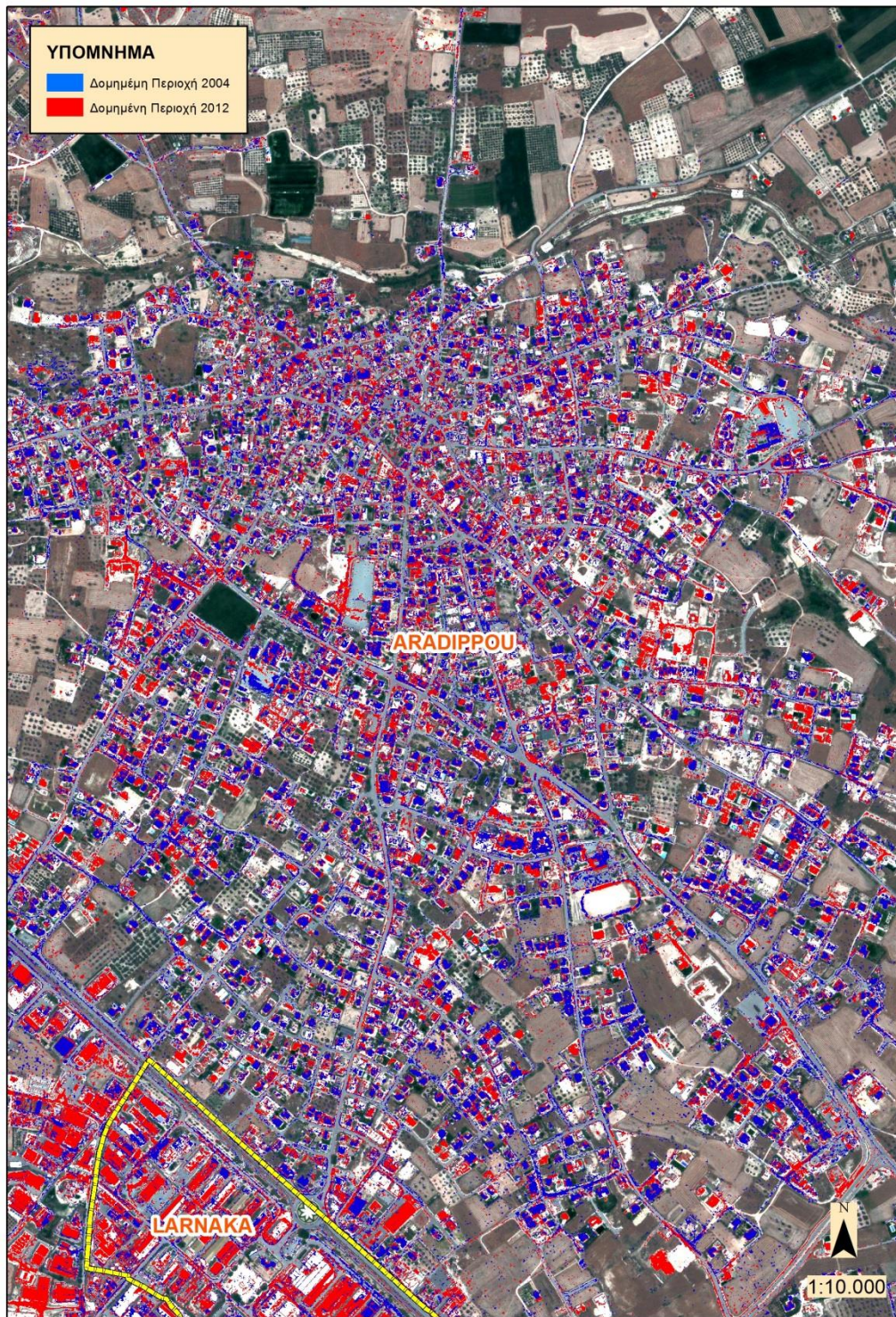
Εικόνα 5.4: Διαχρονική μεταβολή στη Δομημένη Περιοχή της υπο μελέτης περιοχή.

Μετά από μελέτη όλων των παραπάνω αποτελεσμάτων, χαρτών και πινάκων, εμφανίστηκαν αξιόλογα στοιχεία για την περιοχή μελέτης. Κατά κύριο λόγο, στην περιοχή της Λάρνακας, όσον αφορά την πολεοδομική και κατασκευαστική αύξηση της περιοχής, παρατηρήθηκε ότι πραγματοποιήθηκε μια αύξηση κατασκευών, στη περιοχή του Δήμου Αραδίππου σε τέτοιο βαθμό, που θα έλεγε κάποιος ότι βρίσκεται η περιοχή αυτή σε εποχή έντονης πολεοδομικής ανάπτυξης. Οι υπόλοιπες περιοχές ήταν μέσα στα όρια της φυσιολογικής ανάπτυξης μιας επαρχιακής πόλης, η οποία παραμένει κατοικήσιμη και ζωντανή. Σε αυτό το σημείο, αντλώντας στοιχεία από τον χάρτη κλάσεων είναι φανερό μια έντονη ανάπτυξη των τεχνητών επιφανειών κοντά στη θάλασσα, πράγμα που σημαίνει ότι τα περισσότερα νέα κτίρια έχουν ως στόχο τις τουριστικές εκμεταλλεύσεις.

Τέλος, η διαχρονική μελέτη έδειξε μία αύξηση στη νέα Βιομηχανική περιοχή Αραδίππου και αυτό δικαιολογείται από την αλλαγή του καθεστώτος διαχείρισης της βιομηχανικής περιοχής. Από ζώνη ελεύθερου εμπορίου έγινε βιομηχανική περιοχή και έτσι προσέλκυσε νέες βιομηχανίες.

Επίσης, φάνηκε η αύξηση στη δόμηση που έγινε με την επέκταση του νέου αεροδρομίου.

Γενικά, οι διαχρονικές αλλαγές ήταν ήπιες και ομαλές, μεταξύ των 8 χρόνων που μεσολάβησαν από τις 2 δορυφορικές εικόνες με εξαίρεση τα πιο πάνω.



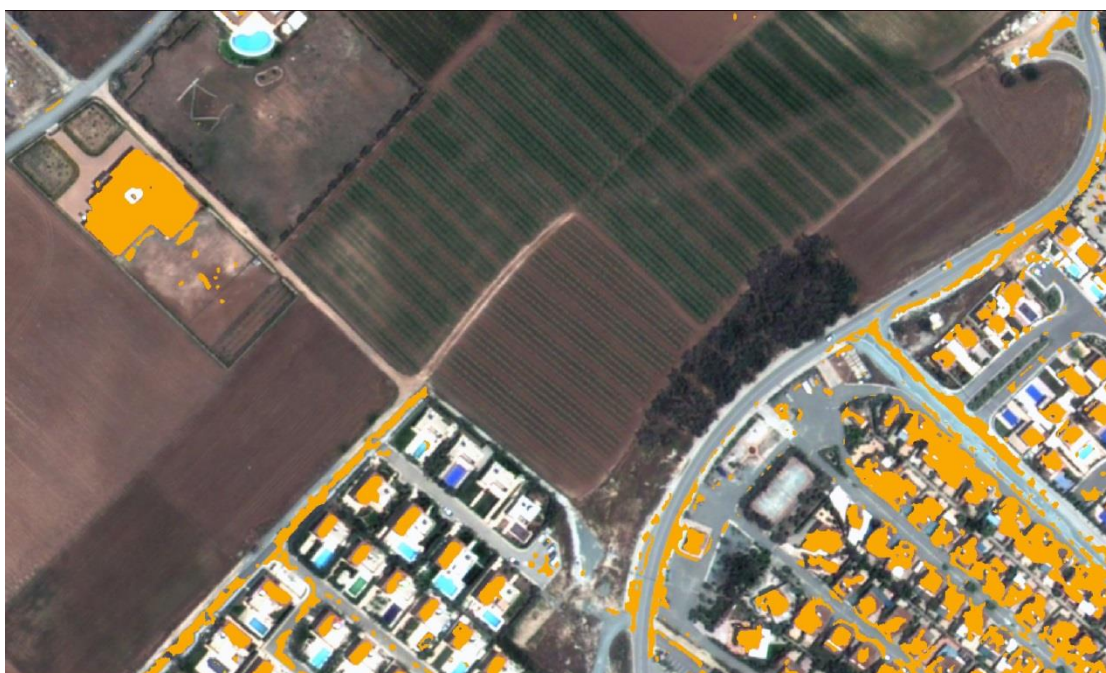
Εικόνα 5.5: Διαχρονική μεταβολή στη Δομημένη Περιοχή στο Δήμο Αραδίππου.



Εικόνα 5.6: Διαχρονική μεταβολή στη Δομημένη Περιοχή στη Νέα Βιομηχανική Περιοχή στο Δήμο Αραδίππου.



**Εικόνα 5.7: Δομημένη περιοχή το 2004.**



**Εικόνα 5.8: Δομημένη περιοχή το 2012.**



Εικόνα 5.9: Δομημένη περιοχή το 2004 (κόκκινο χρώμα) μαζί με του 2012 (πορτοκαλί χρώμα).

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας, όπως έχει προαναφερθεί, είναι η διερεύνηση εξέλιξης της αστικοποίησης της ευρύτερης περιοχής της Λάρνακας την τελευταία δεκαετία.

Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκαν δύο δορυφορικές εικόνες σε χρονικό διάστημα οκτώ περίπου χρόνων και συγκεκριμένα τις χρονιές 2004 και 2012, υψηλής χωρικής ανάλυσης των δεκτών Quickbird και Geoeye-1. Στο πλαίσιο της εργασίας, ο στόχος ήταν να ερευνηθούν τα αποτελέσματα των ταξινομήσεων με διάφορες παραδοσιακές μεθόδους που διαθέτει το λογισμικό ERDAS Imagine, με χωρική μονάδα ανάλυσης το εικονοστοιχείο. Καθώς επίσης, να εντοπιστούν και να αιτιολογηθούν οι διαφορές των αποτελεσμάτων και να τεκμηριωθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μέθοδου.

Οι αστικές περιοχές αποτελούν πράγματι ένα πολύ δύσκολο πεδίο έρευνας για την τηλεπισκόπηση, παρότι οι τεχνικές και οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια είναι ισχυροί, και ο χρήστης είναι σε θέση πλέον να διαχειριστεί δεδομένα υψηλής φασματικής και χωρικής ανάλυσης. Εν τούτοις, τα υλικά κατασκευής, το αστικό τοπίο, οι μεταβολές σε σύντομο σχετικά διάστημα, οι φασματικές ομοιότητες πολλών αντικειμένων, οι σκιασμένες περιοχές και μία σειρά άλλων ζητημάτων αποτελούν θέματα που είναι ακόμη υπό διερεύνηση. Ο λόγος, αφορά την αποτελεσματικότερη απόδοση των αλγορίθμων που εφαρμόζονται σε όλα τα βήματα της Ανάλυσης και φυσικά στην ακριβέστερη καταγραφή-χαρτογράφηση των αστικών κατηγοριών γης.

Σε αυτή την εργασία έγινε προσπάθεια εξέτασης πολλών παραδοσιακών μεθόδων που περιέχονται στο λογισμικό του ERDAS Imagine και αφορούν τα βήματα της επεξεργασίας δεδομένων στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος, για την καταγραφή γενικών αστικών κατηγοριών. Σχόλια και αξιολογήσεις αποτελεσμάτων υπήρξαν κατά τη διάρκεια της εργασίας και εντός κεφαλαίων, αξίζει όμως να τονιστούν κάποια θέματα.

- Από τις τηλεπισκοπικές μεθόδους ταξινομήσεων για ανίχνευση αλλαγών χρήσης/κάλυψης γης επιλέχθηκε η μέθοδος των ανεξάρτητων ταξινομήσεων όπως έγινε σε ανάλογες μελέτες για την αντιμετώπιση παρόμοιων ζητημάτων. Για

παράδειγμα, αναφέρονται οι έρευνες των Frazier και Kockelman (2005), και των Petit et.al. (2000),

- Η μέθοδος των ανεξάρτητων ταξινομήσεων δεν υπαγορεύει τη ραδιομετρική διόρθωση των εικόνων, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία
- Η μέθοδος της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης απετέλεσε μια ικανοποιητική πρώτη ένδειξη των βασικότερων φασματικών κατηγοριών που μπορούν να διακριθούν στις εικόνες μελέτης. Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση εφαρμόστηκε και σε μελέτες παρόμοιου ενδιαφέροντος (Yang και Liu 2005), (Yang and Lo, 2002), (Ward et al, 2000),
- Στη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση, το φαινόμενο της μερικής υποτίμησης των αστικών περιοχών εμφανίζεται αναλογικά και στις δύο εικόνες, μιας και έχουν εφαρμοστεί οι ίδιες παράμετροι στον αλγόριθμο και το αποτέλεσμα του διαχωρισμού σε τριάντα βασικές θεματικές κατηγορίες κρίθηκε ικανοποιητικό. Εντούτοις, το αποτέλεσμα δεν μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί, γιατί δεν ικανοποιούσε την υλοποίηση του σκοπού της εργασίας
- Το αστικό περιβάλλον εμφανίζει έντονη πολυπλοκότητα
- Πολλές αστικές κατηγορίες αποτελούνται από κοινά υλικά κατασκευής που προκαλούν φασματικές ομοιότητες όπως συμβαίνει με τις κατηγορίες του οδοστρώματος και των οροφών
- Η διαφορά στην ανακλώμενη ακτινοβολία ομοειδών αστικών αντικειμένων εξαιτίας της παλαιότητας κατασκευής δημιουργεί την ανάγκη διαχωρισμού ομοειδών κατηγοριών (διαχωρισμός οροφών κτιρίων)
- Υπάρχουν αρκετά σκιασμένα εικονοστοιχεία που δεν επιτρέπουν την εξαγωγή πληροφορίας από μέρος των εικόνων και απαιτούν άλλη προεπεξεργασία.
- Οι πυκνοδομημένες περιοχές δημιουργούν πρόβλημα στην οπτική ποιότητα των εικόνων που προκύπτουν από τους μετασχηματισμούς
- Πριν την επιλογή των Κύριων Συνιστωσών που θα αξιοποιηθούν περαιτέρω πρέπει να υλοποιηθούν δοκιμές για να διαπιστωθεί ο αριθμός των Συνιστωσών που διαχωρίζουν καλά τις αστικές κατηγορίες που αποτελούν το φάσμα αναφοράς
- Οι Λόγοι Καναλιών αποτελούν εξαιρετική περίπτωση μείωσης των δεδομένων, ενώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής του αριθμού των Λόγων που θα σχηματίσει ώστε ο φασματικός διαχωρισμός των κατηγοριών να είναι καλός για τη διαδικασία της ταξινόμησης



- Μόνο ο αλγόριθμος ISODATA απέδωσε στη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση χαρτογραφώντας τις βασικές κατηγορίες. Οι τέσσερις κατηγορίες της βλάστησης που ανιχνεύθηκαν στην εικόνα(γρασίδι, θάμνοι, δέντρα, καλλιέργειες) εμφανίζονται ως μία φασματική κατηγορία
- Στη μέθοδο της επιβλεπόμενης ταξινόμησης, ο αλγόριθμος της Μέγιστης Πιθανοφάνειας αποδείχθηκε πιο αξιόπιστος από αυτόν της Ελάχιστης Απόστασης. Οι περισσότερες έρευνες που εφάρμοσαν επιβλεπόμενη ταξινόμηση επέλεξαν επίσης τον συγκεκριμένο ταξινομητή.
- Η Μέγιστη Πιθανοφάνεια με δεδομένα εισαγωγής που προέκυψαν από 22 Λόγους Καναλιών έδωσαν συντελεστή K, δηλαδή αποφυγή σφαλμάτων της τάξης του 87%, για την εικόνα του 2012 και 78% για την εικόνα του 2004
- Η μέθοδος της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης πετυχαίνει την διαβάθμιση της οικοδομικής εξέλιξης με μερική υποβάθμιση του αποτελέσματος, ενώ η μέθοδος της επιβλεπόμενης ταξινόμησης, με υπερτίμηση. Το φαινόμενο της υπερτίμησης από την μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας έχει αναφερθεί και σε άλλες έρευνες όπως των Lu et al., (2010),
- Τα σφάλματα παράλειψης και συμπερίληψης έδειξαν μεγάλη σύγχυση μεταξύ των κατηγοριών του οδοστρώματος και των οροφών κτιρίων
- Διαφορετικές αστικές κατηγορίες/χρήσεις γης που αποτελούνται από τα ίδια υλικά κατασκευής δεν είναι δυνατό να διαχωριστούν μόνο φασματικά

## 7. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Ακολούθως, παρουσιάζονται μερικές από τις προτάσεις τόσο για τη μελλοντική αντιμετώπιση παρόμοιων ζητημάτων όσο και για περαιτέρω αξιοποίηση του αποτελέσματος της παρούσας εργασίας.

Η απόκτηση επίγειων δεδομένων (ground truth data) μαζί με τη λήψη των απεικονίσεων αν είναι εφικτό, δίνει τη δυνατότητα σωστής καταγραφής των περιοχών εκπαίδευσης και καλής ανίχνευσης των στόχων. Εκτός αυτού, οι αστικές περιοχές αποτελούν ένα περιβάλλον που η ανάγκη δημιουργίας βάσης φασματικών δεδομένων μέσω φασματικών βιβλιοθηκών και η σύγκριση των φασματικών υπογραφών μέσω αυτών είναι επιβεβλημένη.

Όσον αφορά τα σκιασμένα εικονοστοιχεία εντός των εικόνων, αξίζει να πούμε πως η χρήση μασκών για τον αποκλεισμό αυτών από τις διαδικασίες της φασματικής ανάλυσης πρέπει να αποτελεί λύση ανάγκης.

Σχετικά με την κατάλληλη χωρική ανάλυση που πρέπει να διαθέτει ένας σαρωτής για τη βελτίωση της φασματικής ανάλυσης πάνω σε αστική περιοχή, οι απόψεις διαφέρουν. Αν η χωρική ανάλυση είναι αρκετά χαμηλή, τότε είναι πιθανό κοντινά εικονοστοιχεία να καταλαμβάνουν μαζί ένα μοναδικό εικονοστοιχείο. Από την άλλη πλευρά, οι αστικές επιφάνειες περιέχουν υλικά και αντικείμενα που συνδυάζονται σε ομογενή μίξη ανεξαρτήτως χωρικής ανάλυσης.

Συνεπώς, ένας μελετητής πρέπει να βρει μία ισορροπία μεταξύ των δεδομένων που θα αποκτήσει και των μεθόδων που θα εφαρμόσει για την πληρέστερη καταγραφή των κατηγοριών γης και των εικονοστοιχείων-στόχων. Οι μέθοδοι που βασίζονται στις φασματικές υπογραφές των pixels(pixel-based) ίσως να απαιτούν καλύτερη φασματική ανάλυση απ' ότι χωρική, σε αντίθεση με τις αντικειμενοστραφείς μεθόδους (object-oriented) που στηρίζονται σε φωτοαναγνωριστικά και γεωμετρικά στοιχεία.

Με τις περιοχές όπου οι χρήσεις γης ποικίλουν σημαντικά, όπως στα Μεσογειακά οικοσυστήματα, υπάρχει συχνά φασματική επικάλυψη (spectral overlap) μεταξύ διαφόρων κλάσεων, καθιστώντας το έργο της ταξινόμησης ακόμα πιο δύσκολο.

Η χρήση δορυφορικών εικόνων με μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα (< 5m) επιτρέπει την καλύτερη απόδοση των στοιχείων του αστικού ιστού της πόλης, όπως

το οδικό δίκτυο, τα κτίρια, οι υποδομές και η ρυμοτομία της πόλης. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται τεχνικές ταξινόμησης εικόνας που βασίζονται στην **ασαφή λογική (fuzzy-logic)** και οι οποίες παρουσιάζουν μοναδικά πλεονεκτήματα στην επεξεργασία και αξιοποίηση των δορυφορικών δεδομένων πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης, όπως αυτά του Geoeye και Quickbird. Η τεχνική της ασαφούς λογικής προσπαθεί να μιμηθεί τη γνωστική διαδικασία που χρησιμοποιεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος για την αναγνώριση των στοιχείων του περιβάλλοντός του, συνθέτοντας και αξιοποιώντας ένα πλήθος παραμέτρων (π.χ. υφή, σύνδεση, σχήμα) πέραν της φασματικής απόκρισης των αντικειμένων. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί η ασάφεια στο διαχωρισμό των τάξεων μιας ταξινόμησης, η οποία βασίζεται μόνο στα φασματικά χαρακτηριστικά των στοιχείων της σκηνής.

Είναι γνωστό ότι, με βάση μόνο τα φασματικά του χαρακτηριστικά, ένα ένα εικονοστοιχείο μπορεί να ανήκει σε περισσότερες από μια τάξεις. Ο κανόνας ταξινόμησης της ασαφούς λογικής χρησιμοποιεί επιπλέον και υπογραφές που βασίζονται στα χωρικά χαρακτηριστικά των εικονοστοιχείων, όπως η υφή, το σχήμα και η κατευθυνσιακή ομοιότητα (directional similarity) για τον περαιτέρω διαχωρισμό των φασματικών τάξεων.

Εν κατακλείδι, είναι γεγονός ότι οι δορυφόροι παρέχουν πάρα πολλές πληροφορίες για τους σχεδιαστές χρήσεων γης. Αν και μέχρι στιγμής είναι δύσκολο να αντληθούν όλες, εξαιτίας του μεγέθους και της πολυπλοκότητας, τα δορυφορικά δεδομένα συνδυασμένα με παραδοσιακά τοπογραφικά δεδομένα, με δημογραφικά δεδομένα και με χωρικές πληροφορίες επεξεργασμένες με τη βοήθεια Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών αναγγέλλουν μια νέα εποχή στις χωρικές προβλέψεις.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Allum .I. A, K, and Dreisinger, R, (1987), Remote sensing of vegetation change near Inco's Sudbury mining complexes, *International Journal of Remote Sensing*, 8, pp, 399- 416.

Angelici O" Brynt N" and Friendman S, (1977), Techniques for land use change detection using Landsat imagery, *Proceedings of the 43rd Annual Meeting of the American Society of Photogrammetry and Joint Symposium on Land Data Systems*, Falls Church, VA, USA (Bethesda, MD: American Society of Photogrammetry), pp, 217-228.

Anderson, J.R., E.E Hardy, J.T Roach, and R.E. Witmer, 1976. *A land use and land cover classification for use with remote sensing data*. USGS professional paper 964. Washington, DC:U.S. Government Printing Office.

Αργιαλάς Δ. (1998). Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση, ΕΜΠ, Αθήνα.

Αργιαλάς Δ. (1999). Φωτοερμηνεία - Τηλεπισκόπηση, ΕΜΠ, Αθήνα.

Burgan R.E., Klaver R.W., Klaver J.M., 1998. Fuel Models and Fire Potential From Satellite and Surface Observations .*International Journal of Wildland Fire* 8 (3), pp. 159-170.

Campell B.J., 2002. *Introduction to Remote Sensing*. 3<sup>rd</sup> edition. Virginia Polytechnic Institute and State University. The Guilford Publications Press, New York.

Chuvieco E. and Congalton R. G., 1989. Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping. *Remote Sensing of Environment* 29, pp. 147-159.

Civco I). (1989), Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55, pp, 1303-1309.

Collins .I. B" and Woodcock C, E, (1996), An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data, *Remote Sensing of Environment*, 56, pp, 66-77.

Dickinson G.C., 1979. *Maps and Aerial Photographs*. 2nd edit. J. Wiley and Sons, New York, pp. 348.

Field Guide, Erdas Imagine 8.6

Frazier C" and Kockelman K (2004), Cities and Satellite Imagery: Models for regional change, *83th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Conference Proceedings*, Washington, D,C, (CD-ROM-).

Fuller R.M., Groom G.B., Jones A.R., 1994. Land cover map of Great Βritáινι. An automated classification of Landsat Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60 (5), pp. 553-562.

Gitas IZ., Karydas C.G. and Kazakis G.V., 2003. Land cover mapping of Mediterranean landscapes using SPOT4 Χί and IKONOS imagery; A preliminary investigation. *Options Mediterraneennes, Serie B*, τιο 46.

Hame T" Heiler I, Miguel-Ayanz, J, S, (1998), An unsupervised change detection and recognition system for forestry, *International Journal of Remote Sensing*, 19, pp, 1079- 1099.

Καρτέρης, Μ.Α. & Τσομπανίκος Δ., 1984. Σύστημα ταξινόμησης χρήσεων/κάλυψης της γης. Πρακτικά Συνεδρίου "Ολοκληρωμένες Πληροφορίες Γης-Θεμέλιο για Ανάπτυξη", Τομέας Κτηματολογίου και Φωτογραμμετρίας, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη, σελ. 583-603.

Καρτέρης Μ.Α., & Γιαννακόπουλος Β.1., 1998. Περιβαλλοντική Χαρτογραφία Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.

Καρτέρης, Μ.Α., 1990. Δασική Αεροφωτογραφία. Β' έκδοση. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

Καρτάλης Κωνσταντίνος – Φείδας Χαράλαμπος, Αρχές & εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Εκδόσεις Γκιούρδας.

Lu D., Mausel P., Brondizios E., and Moran E. (2004). Change Detection Techniques, *International Journal of Remote Sensing*, Vo1.25, No 12,2365-2407.

Lucas R.M., Rowlands A., Niemann O., Merton R., 2004. Hyperspectral sensors: past, present and future. In: Varshney ρ.κ., Arora Μ.κ.(Eds.), *Advanced Image Processing Techniques for Remotely Sensed Hyperspectral Data*. Springer Verlag, Berlin, pp. 11-40.

Μερτίκας, Σ (1999), Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.

Muller S.V., Racoviteanu A.E., walker D.A., 1999. Landsat MSS-derived land-cover map of northern Alaska: extrapolation methods and a comparison with photo-interpreted and AVHRR-derived maps. *International Journal for Remote Sensing* 20 (15-16), pp. 2921-2946.

Petit C., Scudder T., and Lambin E, (2000), Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: resettlement and rapid land-cover changes in south-eastern Zambia.

Rongxing R.L, 1997. Potential of High-Resolution Satellite Imagery for National Mapping Products. Paper submitted and accepted to the journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Sept. 1997.

Sifakis N., Deschamps P.Y., 1992. Mapping of Air Pollution Using Spot Satellite Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58 (10), pp. 1433-1437.

Singh A, (1989), Digital change detection techniques using remotely sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, 10, pp,989-1003.

Smits P, C" Dellepiane, S, 0" and Schowengerdt, R, A, (1999), Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: a review and a proposal for a cost-based approach, *International Journal Of Remote Sensing*, 20, 1461 1486,

Thomson M.C., Connor S.J., Milligan P., Flasse S.P., 1997. Mapping malaria risk in Africa: What can satellite data contribute? *Parasitology Today* 13 (8), pp. 313-318.

Tour Guide, Erdas Imagine 8.6

Wang P, (1993), A knowledge-based vision system for detecting land change at urban fringes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31, pp, 136-145.

Yang X" and Lo C, P, (2002), Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area, *International Journal of Remote Sensing*, 23, pp, 1775-1798.

Zhao Hongmei, (2004), Urban change detection and population prediction modeling using multitemporal Landsat TM images, Ryerson University - Canada, 111 pages; publication number: EC53470.

Vogelmann J.E., Sohl T.L., Campell P.V., Shaw D.M., 1998. Regional Land Cover Characterization Using Landsat Thematic Mapper Data and Ancillary Data Sources. *Environmental Monitoring and Assessment* 51, pp. 415-428.

Χατζόπουλος Ν. Ιωάννης, Τοπογραφία, Εκδόσεις Γκιούρδας