

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

# Τηλεπισκόπηση

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Νίκος Κούτσιας  
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΓΡΙΝΙΟ 2018

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

# **Τηλεπισκόπηση**

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Νίκος Κούτσιας  
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΓΡΙΝΙΟ 2018

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΈΝΝΟΙΕΣ.....</b>	<b>6</b>
1.1	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	6
1.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ.....	6
1.3	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	9
1.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ.....	10
1.5	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ.....	10
<b>2</b>	<b>ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ.....</b>	<b>11</b>
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
2.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	11
2.2.1	<i>Χωρική διακριτική ικανότητα.....</i>	<i>11</i>
2.2.2	<i>Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα.....</i>	<i>12</i>
2.2.3	<i>Φασματική διακριτική ικανότητα.....</i>	<i>12</i>
2.2.4	<i>Χρονική διακριτική ικανότητα.....</i>	<i>13</i>
<b>3</b>	<b>ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ.....</b>	<b>14</b>
3.1	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	14
3.1.1	<i>Εισαγωγή.....</i>	<i>14</i>
3.1.2	<i>Ραδιομετρική προσαρμογή.....</i>	<i>15</i>
3.1.2.1	<i>Ραδιομετρικά σφάλματα.....</i>	<i>15</i>
3.1.2.2	<i>Διόρθωση ραδιομετρικών σφαλμάτων.....</i>	<i>15</i>
3.1.3	<i>Γεωμετρική προσαρμογή.....</i>	<i>16</i>
3.1.3.1	<i>Γεωμετρικά σφάλματα.....</i>	<i>16</i>
3.1.3.2	<i>Διόρθωση γεωμετρικών σφαλμάτων.....</i>	<i>18</i>
3.2	ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ.....	20
3.2.1	<i>Εισαγωγή.....</i>	<i>20</i>
3.2.2	<i>Φασματική ενίσχυση.....</i>	<i>20</i>
3.2.3	<i>Χωρική ενίσχυση.....</i>	<i>22</i>
3.2.4	<i>Πολυφασματικοί μετασχηματισμοί.....</i>	<i>22</i>
3.2.4.1	<i>Ανάλυση κυρίων συνιστωσών.....</i>	<i>22</i>
3.2.4.2	<i>Δείκτες βλάβστησης.....</i>	<i>24</i>
<b>4</b>	<b>ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>24</b>
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	24
4.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΈΝΝΟΙΕΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ.....	25
4.3	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ.....	25
4.4	ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ.....	26
4.4.1	<i>Επιβλεπόμενη ταξινόμηση.....</i>	<i>26</i>
4.4.1.1	<i>Πλεονεκτήματα.....</i>	<i>27</i>
4.4.1.2	<i>Μειονεκτήματα και περιορισμοί.....</i>	<i>27</i>
4.4.2	<i>Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση.....</i>	<i>27</i>
4.4.2.1	<i>Πλεονεκτήματα.....</i>	<i>28</i>
4.4.2.2	<i>Μειονεκτήματα και περιορισμοί.....</i>	<i>28</i>
4.4.3	<i>Υβριδική ταξινόμηση.....</i>	<i>28</i>
4.5	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ.....	29
4.6	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	29
<b>5</b>	<b>ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΤΟΥ ΤΟΠΙΟΥ.....</b>	<b>30</b>
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	30
5.2	ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΛ΄ΑΣΤΗΣΗΣ.....	30
5.3	ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΔΆΦΟΥΣ.....	32
5.4	ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΆΤΙΝΩΝ ΜΑΖΩΝ.....	34
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>36</b>

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1	Οι ανιχνευτές των δορυφόρων είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν και να καταγράφουν την ανακλώμενη ενέργεια σε συγκεκριμένα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η καταγεγραμμένη ακτινοβολία είναι το αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας-αντικειμένων. Στο γράφημα παρουσιάζονται επίσης οι καμπύλες των μέσων τιμών της ανακλαστικότητας (1) των καθαρών υδάτινων μαζών, (2) του στεγνού γυμνού εδάφους και (3) της πράσινης υγιούς βλάστησης. Γενικά οι καμπύλες αυτές οι οποίες ονομάζονται φασματικές υπογραφές παρουσιάζουν μερικά χαρακτηριστικά σημεία αναφορικά με τη φασματική ανάκλαση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που αντιπροσωπεύουν (τροποποιημένο από RICHARDS 1986).....	7
Σχήμα 1-2	Τα δορυφορικά συστήματα καταγραφής σχεδιάζονται έτσι, ώστε να λειτουργούν μακριά από τις περιοχές στις οποίες τα φαινόμενα απορρόφησης είναι έντονα (τροποποιημένο από SABINS 1996).....	8
Σχήμα 1-3	Η ατμοσφαιρική σκέδαση είναι συνάρτηση του μήκους κύματος. Η σκιαζόμενη περιοχή υποδεικνύει το εύρος της σκέδασης που προκαλείται από την ατμόσφαιρα (τροποποιημένο από SABINS 1996).....	8
Σχήμα 1-4	Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην καταγεγραμμένη από τον δορυφόρο ακτινοβολία (τροποποιημένο από RICHARDS 1986).....	9
Σχήμα 1-5	Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και ύλης (τροποποιημένο από SABINS 1996).....	9
Σχήμα 3-1	Ιστογράμματα των δεδομένων των φασματικών διαύλων μιας δορυφορικής εικόνας του Θεματικού Χαρτογράφου. Η ατμοσφαιρική σκέδαση έχει αυξήσει την ελάχιστη ραδιομετρική τιμή ιδιαίτερα στα μικρότερα μήκη κύματος, με αποτέλεσμα τη μετατόπιση των ιστογραμμάτων από την αρχή των αξόνων. ....	14
Σχήμα 3-2	Γράφημα διασποράς του φασματικού διαύλου 7 έναντι του φασματικού διαύλου 4. Η γραμμή παλινδρόμησης δεν περνάει από την αρχή των αξόνων εξαιτίας της ατμοσφαιρικής σκέδασης (τροποποιημένο από SABINS 1996).....	16
Σχήμα 3-3	Η τιμή μετατόπισης του ιστογράμματος από την αρχή των αξόνων θα πρέπει να αφαιρεθεί από την τιμή φωτεινότητας καθενός εικονοστοιχείου σε κάθε φασματικό δίαυλο (τροποποιημένο από SABINS 1996).....	16
Σχήμα 3-4	Κατά τη διάρκεια του χρόνου καταγραφής η γη περιστρέφεται από τη δύση προς την ανατολή με αποτέλεσμα τη μετατόπιση του σημείου που φωτογραφίζεται στο τέλος του πλαισίου προς τη δύση (τροποποιημένο από RICHARDS 1986).....	17
Σχήμα 3-5	Το σταθερό στιγμιαίο γωνιακό πεδίο όρασης των δορυφορικών συστημάτων συντελεί στην αύξηση του πραγματικού μεγέθους ενός στοιχείου εικόνας όσο προχωρούμε προς τα άκρα του πλαισίου. Το στιγμιαίο γωνιακό πεδίο όρασης και η καμπυλότητα της γης επηρεάζουν σημαντικά τη γεωμετρία της εικόνας μόνο σε περιπτώσεις που το εύρος των γραμμών σάρωσης είναι πολύ μεγάλο όπως είναι του δορυφορικού συστήματος NOAA με εύρος 2700 Km (τροποποιημένο από RICHARDS 1986).....	18
Σχήμα 3-6	Οι πανοραμικές επιδράσεις συντελούν στη συμπίεση της γραμμής σάρωσης (τροποπ. από RICHARDS 1986).....	18
Σχήμα 3-7	Η επίδραση της καμπυλότητας της γης στη διάσταση του στοιχείου εικόνας (τροποποιημένο από RICHARDS 1986).....	18
Σχήμα 3-8	Πιθανές αλλαγές στη γεωμετρική θέση των στοιχείων της δορυφορικής εικόνας μετά την εφαρμογή του γραμμικού γεωμετρικού μετασχηματισμού (τροποποιημένο από ERDAS Inc. 1991).....	19
Σχήμα 3-9	Πιθανές αλλαγές στη γεωμετρική θέση των στοιχείων της δορυφορικής εικόνας μετά την εφαρμογή του μη-γραμμικού γεωμετρικού μετασχηματισμού (τροποποιημένο από ERDAS Inc. 1991).....	19
Σχήμα 5-1	Τυπική καμπύλη φασματικής απόκρισης της πράσινης υγιούς βλάστησης, όπου παρουσιάζονται ο κύριος και ο δευτερεύων παράγοντας διαμόρφωσής της. Η καμπύλη ανακλαστικότητας της βλάστησης παρουσιάζει δυο ελάχιστα στο κόκκινο και μπλε μήκος κύματος,	

	που αντιστοιχεί στις ζώνες απορρόφησης της χλωροφύλλης. Επίσης, παρουσιάζει τρία ελάχιστα στις ζώνες απορρόφησης του νερού (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	31
Σχήμα 5-2	Ανάκλαση, μετάδοση και απορρόφηση ενός φύλλου συναρτήσει του μήκους κύματος (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	31
Σχήμα 5-3	Επίδραση των χρωστικών στη φασματική απόκριση της βλάστησης (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	31
Σχήμα 5-4	Διαφορετικοί τύποι βλάστησης είναι πιο διακριτοί στο κοντινό υπέρυθρο απ' ότι στο ορατό τμήμα (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	32
Σχήμα 5-5	Η αντίστροφη σχέση μεταξύ της ανάκλασης του φύλλου και της απορρόφησης του νερού (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	32
Σχήμα 5-6	Φασματική απόκριση τριών τύπων εδάφους (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	33
Σχήμα 5-7	Τυπικές φασματικές καμπύλες για ένα αμμώδες έδαφος σε 3 διαφορετικά επίπεδα υγρασίας (τροποπ. από SWAIN και DAVIS 1978). .....	34
Σχήμα 5-8	Τυπικές φασματικές καμπύλες για ένα ιλυώδες έδαφος σε διάφορα επίπεδα υγρασίας (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	34
Σχήμα 5-9	Τυπικές φασματικές καμπύλες για ένα αργιλώδες έδαφος σε 2 διαφορετικά επίπεδα υγρασίας (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	34
Σχήμα 5-10	Φασματική ταυτότητα του νερού, της βλάστησης και του εδάφους (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	35
Σχήμα 5-11	Απορρόφηση και διάχυση του απεσταγμένου νερού (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	35
Σχήμα 5-12	Απορρόφηση διαφόρων τύπων νερού (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978). .....	35
Σχήμα 5-13	Φασματική ανάκλαση υδάτινων μαζών με διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης χλωροφύλλης (από SWAIN και DAVIS 1978). .....	35

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1	Η επίδραση της χωρικής διακριτικής ικανότητας στην απόδοση της πληροφορίας. Η ίδια εικόνα έχει σαρωθεί με υψηλή και χαμηλή χωρική διακριτική ανάλυση, δημιουργώντας μια υψηλής ευκρίνειας (αριστερή εικόνα) και μια χαμηλής ευκρίνειας εικόνα (δεξιά εικόνα), αντίστοιχα.....	12
Εικόνα 2-2	Η επίδραση της ραδιομετρικής διακριτικής ικανότητας στην απόδοση της καταγεγραμμένης πληροφορίας. Η ίδια εικόνα έχει σαρωθεί με υψηλή και χαμηλή ραδιομετρική διακριτική ανάλυση δημιουργώντας μια λεπτομερειακή (αριστερή εικόνα) και μια λιγότερο λεπτομερειακή εικόνα (δεξιά εικόνα), αντίστοιχα. ....	12
Εικόνα 2-3	Το γήπεδο ποδοσφαίρου ενώ στην εικόνα του ορατού φάσματος (αριστερή εικόνα) παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα όπως ακριβώς και της γύρω βλάστησης και δίνει την αίσθηση ότι ο τάπητας του είναι από φυσικό χόρτο, στην υπέρυθρη απεικόνιση (δεξιά εικόνα) παρουσιάζεται με διαφορετική χρωματική απόχρωση από το οποίο συμπεραίνεται ότι ο χλοοτάπητας είναι τεχνητός. Η ανακλαστικότητα του στο κοντινό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος είναι μικρή σε αντίθεση με τη βλάστηση η οποία παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα σε αυτό το τμήμα του φάσματος (από LILLESAND και KIEFER 1994).....	13
Εικόνα 2-4	Η χρονική διακριτική ικανότητα διαμορφώνεται από τα τροχιακά χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος, τη ζώνη σάρωσης, τη χωρική διακριτική ικανότητα, του αριθμού των δορυφόρων κ.ά. Είναι ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις διαχρονικών μελετών ή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται συχνή και επαναλαμβανόμενη κάλυψη όπως στην περίπτωση παρακολούθησης της εξέλιξης των δασικών πυρκαγιών (τροποποιημένο από FUEGO: <a href="http://www.insa.es/fuego/default.htm">www.insa.es/fuego/default.htm</a> ).....	13
Εικόνα 3-1	Ένα παράδειγμα γεωμετρικής διόρθωσης και ταυτόχρονα γρήγορου ελέγχου όπου τα γεωγραφικά όρια του Νομού Χαλκιδικής συμπίπτουν με τα όρια της διορθωμένης δορυφορικής εικόνας. ....	19
Εικόνα 3-2	Δορυφορικά δεδομένα του NOAA AVHRR πριν (αριστερή εικόνα) και μετά τη γεωμετρική διόρθωση. Σε τέτοιου είδους δεδομένα η γεωμετρική παραμόρφωση των δεδομένων είναι πολύ έντονη.....	20
Εικόνα 3-3	Γραφική απεικόνιση των ραδιομετρικών ενισχύσεων α) αρχικά μη επεξεργασμένα δεδομένα β) γραμμική ενίσχυση αντίθεσης γ) γραμμική ενίσχυση αντίθεσης με κορεσμό και δ) εξίσωση ιστογράμματος.....	21

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1	Δείκτες βλάστησης.....	23
Πίνακας 4-1	Παράδειγμα πίνακα συνάφειας ακρίβειας ταξινόμησης. Τα σφάλματα παράλειψης αναπαριστώνται στη στήλη του πίνακα ενώ τα σφάλματα πρόσθεσης στη γραμμή. Η συνολική ακρίβεια του δείγματος προκύπτει από το σταθμισμένο μέσο των στοιχείων της διαγωνίου .....	29

# 1 Εισαγωγικές έννοιες

## 1.1 Ορισμός τηλεπισκόπησης

Η *Τηλεπισκόπηση* ορίζεται με τη γενική και ευρεία της έννοια ως η, χωρίς τη φυσική επαφή, απόκτηση δεδομένων και πληροφοριών για επιφάνειες και αντικείμενα της γης. Ο ακριβής ορισμός της είναι δύσκολο να δοθεί και ορισμοί όπως ο παραπάνω θεωρούνται συνήθως πολύ γενικοί (HARRIS 1987). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί τρόποι απόδοσης του ορισμού της τηλεπισκόπησης. Σε όλους υπάρχουν δύο κοινά σημεία τα οποία χαρακτηρίζουν το επιστημονικό αυτό πεδίο, η έννοια της «*συλλογής πληροφοριών*» και η έννοια της «*παρατήρησης από απόσταση*».

Για παράδειγμα, οι LINTZ και SIMONETT (1976) όρισαν ότι «*η τηλεπισκόπηση είναι η χωρίς επαφή απόκτηση φυσικών δεδομένων των αντικειμένων*», και επίσης οι BARET και CURTIS (1977) δήλωσαν ότι «*η τηλεπισκόπηση είναι η παρατήρηση ενός στόχου με κάποια συσκευή από απόσταση*». Ακόμη, ο SLATER (1975) όρισε τα όργανα της τηλεπισκόπησης ως «*κάθε οπτικό σύστημα το οποίο σαρώνει επιφάνειες αντικειμένων ή εικόνων ηλεκτρομηχανικά ή ηλεκτρονικά σε περισσότερα από ένα μήκη κύματος*». Έτσι, φωτογραφικές μηχανές και κάποια φασματοραδιόμετρα δε συμπεριλαμβάνονται στα όργανα καταγραφής (MATHER 1987). Επιπρόσθετα, υπάρχουν πολύ πιο σύνθετοι τρόποι απόδοσης του όρου της τηλεπισκόπησης. Για παράδειγμα, ο SHORT (1982) πρότεινε έναν πιο ολοκληρωμένο αλλά εκτενή ορισμό. Σύμφωνα με αυτόν, η τηλεπισκόπηση ορίζεται ως «*η απόκτηση δεδομένων και παράγωγων πληροφοριών για αντικείμενα ή υλικά (στόχοι), τα οποία βρίσκονται στη Γήινη επιφάνεια ή στην ατμόσφαιρα, με τη χρησιμοποίηση αισθητήρων ανίχνευσης τοποθετημένων σε πλατφόρμες που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από το στόχο για να καταγράψουν μετρήσεις (συνήθως πολυφασματικές) των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των αντικειμένων στόχων και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας*»<sup>1</sup>.

Τέλος, σύμφωνα με την American Society of Photogrammetry, η τηλεπισκόπηση ορίζεται στην ευρεία της έννοια ως «*η μέτρηση κάποιας ιδιότητας ή η απόκτηση πληροφοριών σχετικά με κάποια ιδιότητα ενός αντικειμένου ή φαινομένου, με τη χρήση συσκευής καταγραφής η οποία δε βρίσκεται σε φυσική ή πολύ στενή επαφή με το υπό μελέτη αντικείμενο ή φαινόμενο*» (COLWELL 1975).

## 1.2 Βασικές αρχές

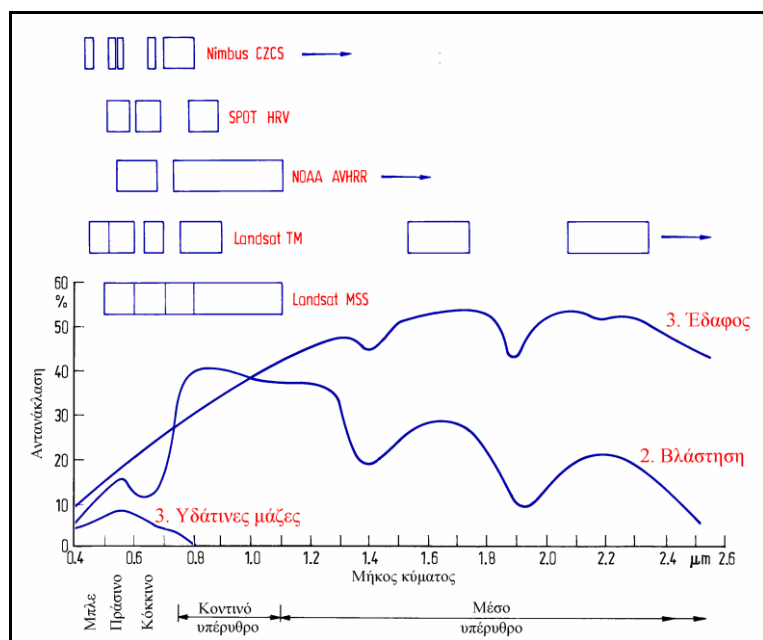
«*Η ενέργεια η οποία διαδίδεται μέσω της ύλης με τη μορφή αλληλεπιδρόμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, κάθετα μεταξύ τους, ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ΗΜΑ)*» (COLWELL 1975). Αποτελεί μια κύρια συνιστώσα του τρόπου σχηματισμού των εικόνων και βάση των ιδιοτήτων της, καθώς και της συμπεριφοράς των αντικειμένων ως προς αυτήν, επεξεργαζόμαστε τα δεδομένα των εικόνων για την απόσπαση της επιθυμητής πληροφορίας. Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και των αντικειμένων παρέχουν πληροφορίες για τα ίδια τα αντικείμενα. Η καταγραφόμενη, από τον ανιχνευτή του δορυφόρου, ακτινοβολία είναι το αποτέλεσμα αυτών των μηχανισμών αλληλεπίδρασης, γι' αυτό η καλύτερη κατανόηση τους συνεπάγεται με την καλύτερη κατανόηση των δορυφορικών εικόνων και την πιστότερη και πιο αποδοτική φωτοερμηνεία.

Η ΗΜΑ μεταφέρεται μέσω του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, στο οποίο διακρίνουμε τις παρακάτω ιδιότητες :

- i. **Ταχύτητα (c)** : Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, η οποία στο κενό είναι 300000 Km/sec.
- ii. **Μήκος κύματος (λ)** : Ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μεγίστων της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, εκφραζόμενο σε μονάδες μήκους. Η ΗΜΑ βάση του μήκους κύματος διακρίνεται σε επιμέρους ακτινοβολίες όπως ορατή, υπέρυθη, θερμική, μικροκύματα, κ.ά.
- iii. **Συχνότητα (ν)** : Εκφράζει τον αριθμό των μεγίστων του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που περνάει από συγκεκριμένο σημείο στη μονάδα του χρόνου.

<sup>1</sup> Όπως είναι φανερό, η τηλεπισκόπηση περιορίζεται σε μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια ως το μέσο ανίχνευσης και μέτρησης των χαρακτηριστικών του στόχου (SABINS 1996). Έτσι, μαγνητικές και ηλεκτρικές αποτυπώσεις οι οποίες γίνονται συχνά από αεροσκάφη θεωρούνται αεροπορικές γεωφυσικές αποτυπώσεις και όχι τηλεπισκόπηση.

Το μήκος κύματος, το οποίο αποτελεί ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της ΗΜΑ, ορίζει το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και διακρίνει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε επιμέρους τμήματα. «Ως ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ορίζεται η διατεταγμένη παράταξη γνωστών ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών, εκτεινόμενη από τη μικρότερη κοσμική ακτινοβολία, περνώντας από τις ακτίνες γάμμα, την υπεριώδες, ορατή και υπέρυθρη ακτινοβολία και φθάνοντας στα μικροκύματα και άλλα ραδιοκύματα» (COLWELL 1975). Τα πιο σημαντικά τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για την τηλεπισκόπηση είναι το ορατό και υπέρυθρο. Οι ανιχνευτές των δορυφόρων είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν και να καταγράφουν την ανακλώμενη ενέργεια σε συγκεκριμένα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, σύμφωνα με τα επιχειρησιακά χαρακτηριστικά τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1.



**Σχήμα 1-1** Οι ανιχνευτές των δορυφόρων είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν και να καταγράφουν την ανακλώμενη ενέργεια σε συγκεκριμένα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η καταγεγραμμένη ακτινοβολία είναι το αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας-αντικειμένων. Στο γράφημα παρουσιάζονται επίσης οι καμπύλες των μέσων τιμών της ανακλαστικότητα (1) των καθαρών υδάτινων μαζών, (2) του στεγνού γυμνού εδάφους και (3) της πράσινης υγιούς βλάστησης. Γενικά οι καμπύλες αυτές οι οποίες ονομάζονται φασματικές υπογραφές παρουσιάζουν μερικά χαρακτηριστικά σημεία αναφορικά με τη φασματική ανάκλαση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που αντιπροσωπεύουν (τροποποιημένο από RICHARDS 1986).

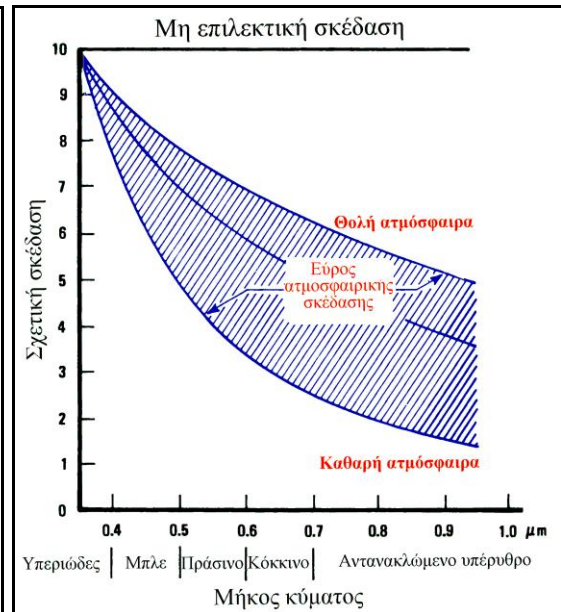
Τα παθητικά δορυφορικά συστήματα καταγράφουν την ακτινοβολία, της οποίας πηγή είναι ο ήλιος. Έτσι, η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια θα πρέπει να περάσει δύο φορές μέσω της ατμόσφαιρας για να καταγραφεί τελικώς από τον ανιχνευτή του δορυφόρου. Στη θεωρητική περίπτωση μη ύπαρξης της ατμόσφαιρας η καταγεγραμμένη από το δορυφόρο ακτινοβολία θα συσχετιζόταν μόνο με τα επίπεδα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας καθώς και τις ανακλαστικές ιδιότητες των αντικειμένων. Όμως, η ύπαρξη της ατμόσφαιρας διαφοροποιεί αυτή τη θεώρηση, εξαιτίας πολύπλοκων μηχανισμών αλληλεπίδρασης που συμβαίνουν μεταξύ της ΗΜΑ και των σωματιδίων που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Οι μηχανισμοί αυτοί εξηγούνται βάσει των διαδικασιών της «σκέδασης» και της «απορρόφησης». Η σκέδαση συμβαίνει όταν η ΗΜΑ εκτρέπεται ή διαθλάται από τα ατμοσφαιρικά σωματίδια, ενώ η απορρόφηση όταν η ακτινοβολία απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα. Επειδή τα δορυφορικά συστήματα είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν μακριά από τις περιοχές του φάσματος στις οποίες το φαινόμενο της απορρόφησης μεγιστοποιείται (Σχήμα 1-2), η σκέδαση αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό δημιουργίας ραδιομετρικών αποκλίσεων επί των δορυφορικών δεδομένων (RICHARDS 1986). Η μη κανονική χωρική κατανομή των ατμοσφαιρικών επιδράσεων κάνει δύσκολη τη ραδιομετρική διόρθωση των εικόνων, η οποία σε μερικές περιπτώσεις επιδρά σημαντικά στην τελική ποιότητα των δεδομένων (SWAIN και DAVIS 1978). Η σκέδαση διακρίνεται σε «επιλεκτική» και «μη-επιλεκτική» ανάλογα εάν επηρεάζονται συγκεκριμένα τμήματα του φάσματος ή όχι. Επιπρόσθετα, η επιλεκτική σκέδαση διακρίνεται σε σκέδαση Rayleigh και σε σκέδαση Mie. Η σκέδαση



Rayleigh συμβαίνει όταν το μήκος κύματος είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέγεθος των σωματιδίων που προκαλούν τη σκέδαση, ενώ η σκέδαση Mie όταν τα μεγέθη αυτών είναι παρόμοια. Το αποτέλεσμα της επίδρασης της σκέδασης, επιλεκτικής και μη επιλεκτικής, στα δορυφορικά δεδομένα είναι η αύξηση της ομίχλης και συνεπώς η ελάττωση της αντίθεσης, η οποία σχετίζεται άμεσα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-3. Πιο αναλυτικά, η παραμόρφωση που υφίσταται η HMA λόγω της παρουσίας της ατμόσφαιρας περιγράφεται στο Σχήμα 1-4.



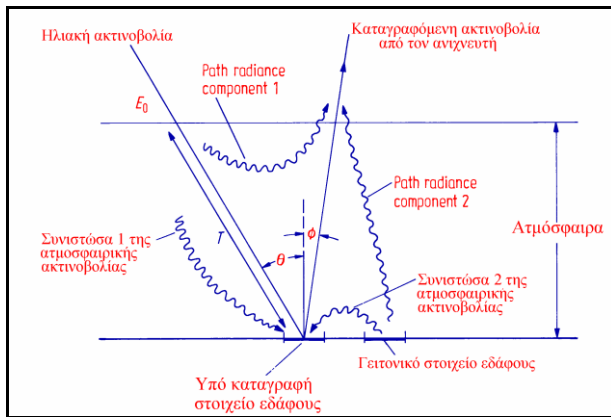
**Σχήμα 1-2 Τα δορυφορικά συστήματα καταγραφής σχεδιάζονται έτσι, ώστε να λειτουργούν μακριά από τις περιοχές στις οποίες τα φαινόμενα απορρόφησης είναι έντονα (τροποποιημένο από SABINS 1996).**



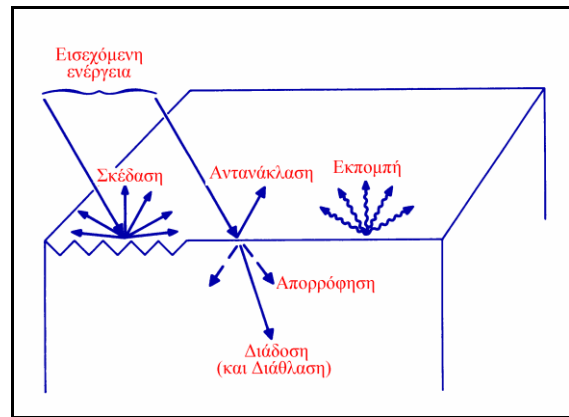
**Σχήμα 1-3 Η ατμοσφαιρική σκέδαση είναι συνάρτηση του μήκους κύματος. Η σκιαζόμενη περιοχή υποδεικνύει το εύρος της σκέδασης που προκαλείται από την ατμόσφαιρα (τροποποιημένο από SABINS 1996).**

Η εισερχόμενη HMA υφίσταται αλλαγές όσον αφορά τις ιδιότητές της, όπως ένταση, διεύθυνση, μήκος κύματος, κ.ά. όταν έρχεται σε αλληλεπίδραση με τα αντικείμενα (SABINS 1996). Στο Σχήμα 1-5 απεικονίζονται πέντε από τους πιο συχνούς μηχανισμούς αλληλεπίδρασης της HMA με την ύλη και οι οποίοι είναι οι παρακάτω:

- i. **Μετάδοση**, η οποία είναι το πέρασμα μέσω του περιεχομένου του αντικειμένου χωρίς καμιά αλληλεπίδραση με αυτό,
- ii. **Απορρόφηση**, η οποία εκφράζει την προσφερόμενη ενέργεια για τη θέρμανση της ύλης όπως επίσης και ενέργεια που χρησιμοποιείται στη διαδικασία του μεταβολισμού για την περίπτωση της βλάστησης,
- iii. **Εκπομπή**, από το αντικείμενο συνήθως σε μεγάλα μήκη κύματος ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών και της θερμοκρασίας του αντικειμένου,
- iv. **Σκέδαση**, η οποία προκαλείται από επιφάνειες με ανάγλυφο ή από τραχείες επιφάνειες σε σχέση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας,
- v. **Ανάκλαση**, η οποία εκφράζει το ποσό της HMA που επιστρέφεται από το αντικείμενο με μια γωνία ίση και αντίθετη με τη γωνία προσπτώσεως.



**Σχήμα 1-4** Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην καταγεγραμμένη από τον δορυφόρο ακτινοβολία (τροποποιημένο από RICHARDS 1986).



**Σχήμα 1-5** Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και ύλης (τροποποιημένο από SAVINS 1996).

### 1.3 Ιστορική αναδρομή

Η τηλεπισκόπηση έχει περάσει από πολλά στάδια μέχρι να φτάσει στο σημερινό της επίπεδο. Αποτελεί ένα αρκετά εξελικτικό επιστημονικό πεδίο το οποίο βασίζεται σε διάφορα άλλα επιστημονικά αντικείμενα όπως μαθηματικά, φυσική, επιστήμη της πληροφορικής κ.ά. Από την περίοδο ανακάλυψης της φωτογραφίας τον 19<sup>ο</sup> αιώνα αρκετή πρόοδος έχει επιτευχθεί στην τηλεπισκόπηση του περιβάλλοντος. Αν και είναι αρκετά δύσκολο να οριοθετηθεί χρονικά η αφετηρία της τηλεπισκόπησης και να οριστούν επακριβώς οι χρονικές φάσεις εξέλιξής της (SWAIN και DAVIS 1978), πέντε βασικά στάδια διακρίνονται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της (BARRET και CURTIS 1977, HARRIS 1987).

- Στάδιο 1<sup>ο</sup>:** Πριν το 1925. Ήταν μια περίοδος που χαρακτηρίζεται από τον πειραματισμό για εφαρμογές της φωτογράφισης από αερόστατα και αεροπλάνα σε θέματα τοπογραφικής χαρτογράφησης. Από την αρχή οι φωτογραφίες αυτές ανέδειξαν την αξία της αεροφωτογραφίας και ειδικότερα στον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο όταν χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό και χαρτογράφηση στρατηγικών θέσεων.
- Στάδιο 2<sup>ο</sup>:** 1925-45. Ήταν μια περίοδος εκτενούς χρησιμοποίησης της αεροφωτογραφίας, κυρίως για τοπογραφικές χαρτογραφήσεις, χρησιμοποιώντας στερεοσκοπικές αεροφωτογραφίες. Ο Δεύτερος Παγκόσμιος Πόλεμος έδωσε μεγάλη ώθηση στη βελτίωση της τεχνολογίας της αεροφωτογραφίας.
- Στάδιο 3<sup>ο</sup>:** 1945-55. Ήταν μια περίοδος που χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών φωτοερμηνείας. Έμφαση έχει δοθεί στις μεθόδους ανάλυσης και φωτοερμηνείας παρά στις εφαρμογές αυτών.
- Στάδιο 4<sup>ο</sup>:** 1955-60. Οι αεροφωτογραφίες έγιναν περισσότερο δημοφιλείς, και οι εφαρμογές αυτών εκτός από την τοπογραφική χαρτογράφηση συμπεριλάμβαναν εφαρμογές για τη γεωλογία, τη γεωπονία, το περιβάλλον, τη δασολογία, την αρχαιολογία, κ.ά.
- Στάδιο 5<sup>ο</sup>:** 1960-Σήμερα. Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται ως η περίοδος της πιο ενεργής ανάπτυξης δορυφόρων και ανιχνευτών. Το 1960 εκτοξεύθηκε ο πρώτος μετεωρολογικός δορυφόρος, οριστικοποιώντας έτσι μια καινούργια εποχή έντονης δραστηριότητας και έρευνας στο πεδίο της Τηλεπισκόπησης. Παράλληλα, κατά το διάστημα αυτό μερικά δορυφορικά συστήματα καταγραφής, τα οποία καταρχήν αναπτύχθηκαν αποκλειστικά για στρατιωτικούς σκοπούς, άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως, αφού άλλα πιο εξελιγμένα συστήματα αναπτύχθηκαν για στρατιωτικές εφαρμογές. Ταυτόχρονα, η καταγραφή της Γήινης επιφάνειας από το ορατό τμήμα του φάσματος επεκτάθηκε στο υπέρυθρο και στα μικροκύματα, ανοίγοντας έτσι νέους ορίζοντες για τη χρήση της Τηλεπισκόπησης. Νέα δορυφορικά συστήματα με μεγαλύτερη χωρική, φασματική και ραδιομετρική διακριτική

ικανότητα, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της πληροφορικής και του αυτοματισμού στην επεξεργασία εικόνων έδωσαν νέα ώθηση και δυναμική στην επιστήμη της Τηλεπισκόπησης. Σταθμός κατά τη διάρκεια του τελευταίου σταδίου θεωρείται το έτος 1972, όταν η NASA εκτόξευσε τον πρώτο δορυφόρο με την ονομασία ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite-1), ορίζοντας έτσι την αρχή μιας νέας εποχής στην απόκτηση δορυφορικών δεδομένων για την επιφάνεια της Γης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε νέα επιστημονικά πεδία, όπως παρατήρησης και απογραφής καλλιεργειών, διαχείρισης και προστασίας χερσαίων και υδατικών οικοσυστημάτων.

#### 1.4 Πλεονεκτήματα – Δυνατότητες

Όπως φαίνεται από την ιστορική αναδρομή, η τηλεπισκόπηση έχει βελτιωθεί αισθητά αναφορικά με την καταγραφή των δεδομένων όσον αφορά το χώρο, το χρόνο και την ακτινοβολία. Αυτό σημαίνει, ότι η Γήινη επιφάνεια καταγράφεται πιο συχνά, με υψηλότερες χωρικές αναλύσεις και σε περισσότερα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (HARRIS 1987). Η τηλεπισκόπηση θεωρείται ως ένα σύγχρονο διαχειριστικό εργαλείο το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε πολλά επιστημονικά αντικείμενα, μεταξύ των οποίων διακρίνονται οι περιβαλλοντικές επιστήμες, η δασολογία, γεωλογία, αρχαιολογία, ωκεανογραφία κ.ά. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων που δικαιολογούν τη χρησιμότητα της τηλεπισκόπησης για την απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων του πλανήτη μας, τα παρακάτω θεωρούνται πολύ σημαντικά (HARRIS 1987, ΚΑΡΤΕΡΗΣ 1993).

- i. **Συνοπτική κάλυψη.** Μια δορυφορική εικόνα καταλαμβάνει μια μεγάλη σε έκταση περιοχή για την οποία απαιτούνται εκατοντάδες αεροφωτογραφιών και ακόμη περισσότερο χιλιάδες ωρών δειγματοληψίας.
- ii. **Επαναλαμβανόμενη κάλυψη.** Η συχνότητα καταγραφής είναι πολύ σημαντική ιδιαίτερα σε αναλύσεις χρονικών σειρών. Η συχνότητα, αναλόγως του δορυφορικού συστήματος, ποικίλει από λίγες ώρες μέχρι αρκετές ημέρες.
- iii. **Προσβασιμότητα.** Σε περιοχές με μικρή ή και καθόλου προσβασιμότητα, όπως για παράδειγμα απομακρυσμένες περιοχές, ωκεανοί, τροπικά δάση κ.ά., η τηλεπισκόπηση παρέχει τη δυνατότητα συλλογής και ανάλυσης δεδομένων.
- iv. **Ομοιογένεια δεδομένων.** Πληροφορίες και δεδομένα που καταγράφονται από δορυφορικά συστήματα παρέχουν ομοιόμορφα δεδομένα σε ότι αφορά τη φασματική και χωρική απόδοση των υπό καταγραφή αντικειμένων και δεδομένων.
- v. **Πολυφασματικός χαρακτήρας δεδομένων.** Δεδομένα που καταγράφονται σε διάφορα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος παρέχουν περισσότερες δυνατότητες για απόσπαση της επιθυμητής πληροφορίας.
- vi. **Ψηφιακή μορφή δεδομένων.** Παρέχεται η δυνατότητα ψηφιακής ανάλυσης με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού με όλα τα πλεονεκτήματα που αυτή συνεπάγεται.
- vii. **Χρονική διάρκεια καταγραφής.** Ο απαιτούμενος χρόνος καταγραφής είναι πολύ μικρός το οποίο συνεπάγεται ελαχιστοποίηση των φασματικών και χωρικών αλλαγών που μπορεί να προκύψουν σε μεταβλητές του περιβάλλοντος.
- viii. **Κόστος δεδομένων.** Το σχετικά μικρό κόστος καταγραφής των δεδομένων συνδυαζόμενο με τις δυνατότητες που αυτά προσφέρουν αποτελεί σημαντικό επίσης πλεονέκτημα.

#### 1.5 Μειονεκτήματα – Αδυναμίες

Αν και αρκετή πρόοδος έχει επιτευχθεί από την εμφάνιση της τηλεπισκόπησης, ωστόσο κάποια προβλήματα αναφορικά με την εφαρμογή της σε θέματα του περιβάλλοντος παραμένουν άλυτα. Ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα σχετίζεται με τα καταγεγραμμένα δεδομένα, τα οποία περιέχουν σφάλματα λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών, της τοπογραφίας της περιοχής και του τρόπου λειτουργίας του δορυφορικού συστήματος. Τα σφάλματα αυτά σχετίζονται με διαφορές μεταξύ της πραγματικής και της καταγεγραμμένης από το δορυφόρο ανακλώμενης ακτινοβολίας. Είναι πολύ σημαντικό για την

περαιτέρω επιτυχή εφαρμογή αυτών των δεδομένων η όσο το δυνατόν καλύτερη προσαρμογή των δεδομένων στις πραγματικές τιμές, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η ανάλυση αφορά διαχρονικές μελέτες (BARRET και CURTIS 1977, RICHARDS 1986).

Ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάζεται στους επιστήμονες είναι η δυσκολία κατανόησης της φύσης και του μηχανισμού ακόμη και πολύ απλών σχέσεων και επιδράσεων μεταξύ της ακτινοβολίας που καταγράφεται από το δορυφόρο και των αντικειμένων στόχων. Οι μεταβολές που συμβαίνουν στις συνθήκες της ατμόσφαιρας, λιθόσφαιρας και υδρόσφαιρας είναι τόσο μεγάλες σε χωρική και χρονική διάσταση (BARRET και CURTIS 1977) και οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης μεταξύ ενέργειας και ύλης είναι τόσο πολύπλοκοι (SABINS 1996), ώστε απλές σχέσεις αντικειμένου-ανιχνευτή είναι δύσκολο να προσδιοριστούν.

## **2 Δορυφορικά συστήματα καταγραφής**

### **2.1 Εισαγωγή**

Από την περίοδο της εκτόξευσης του πρώτου δορυφορικού συστήματος το 1960, διάφορα δορυφορικά συστήματα τέθηκαν σε τροχιά και ήταν ή συνεχίζουν να βρίσκονται ακόμη σε επιχειρησιακή χρήση. Μετεωρολογικές μελέτες, χαρτογράφηση της βλάστησης, χαρτογράφηση χρήσεων και κάλυψης γης, ωκεανογραφία, γεωλογία, κ.ά. αποτελούν μερικά επιστημονικά πεδία ευρείας εφαρμογής δορυφορικών δεδομένων και τεχνικών τηλεπισκόπησης. Στις περισσότερες των περιπτώσεων κάθε δορυφορικό σύστημα είναι σχεδιασμένο, έτσι ώστε να ταιριάζει με τις ανάγκες του επιστημονικού πεδίου για το οποίο σχεδιάστηκε.

### **2.2 Χαρακτηριστικά δορυφορικών δεδομένων**

Μεταξύ των ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τον τρόπο καταγραφής των δεδομένων από τα όργανα των δορυφορικών συστημάτων, τέσσερις είναι οι πιο σημαντικές και προσδίδουν στα καταγεγραμμένα δεδομένα έναν ιδιαίτερο χαρακτήρα: η χωρική, ραδιομετρική, φασματική και χρονική διακριτική ικανότητα. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι ο τρόπος λειτουργίας του δορυφόρου (ηλεκτρομηχανικός ή ηλεκτρονικός) και οι γεωμετρικές του ιδιότητες (MATHER 1987).

#### **2.2.1 Χωρική διακριτική ικανότητα**

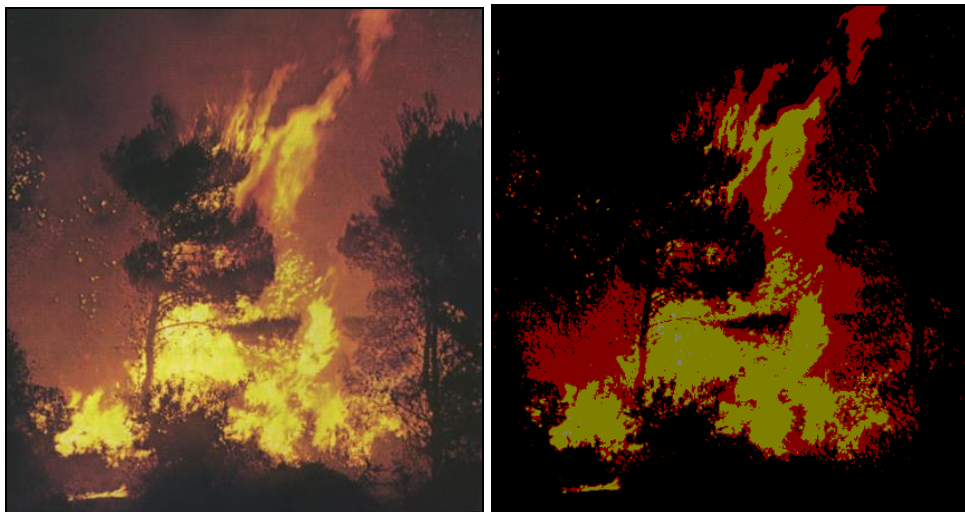
Η χωρική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στο μέγεθος του μικρότερου αντικειμένου το οποίο καταγράφεται από το δορυφόρο ή στην περιοχή του εδάφους η οποία αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο εικόνας (Erdas Inc. 1991). Ο πιο συνηθισμένος τρόπος να οριστεί η χωρική διακριτική ικανότητα είναι το στιγμιαίο γωνιακό πεδίο όρασης (IFOV) του ανιχνευτή, εκφραζόμενο σε  $\mu\text{rad}$ . Το στιγμιαίο γωνιακό πεδίο όρασης αντιστοιχεί στην περιοχή του εδάφους, η οποία θεωρητικά παρατηρείται από τον ανιχνευτή σε δεδομένο υψόμετρο. Μπορεί να εκφραστεί με δύο τρόπους, είτε ως γωνία εκφραζόμενη σε  $\mu\text{rad}$ , είτε ως την αντίστοιχη περιοχή του εδάφους εκφραζόμενη σε μέτρα. Γραφικά η επίδραση της χωρικής διακριτικής ικανότητας στη απόδοση της καταγεγραμμένης δορυφορικής πληροφορίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-1.



**Εικόνα 2-1** Η επίδραση της χωρικής διακριτικής ικανότητας στην απόδοση της πληροφορίας. Η ίδια εικόνα έχει σαρωθεί με υψηλή και χαμηλή χωρική διακριτική ανάλυση, δημιουργώντας μια υψηλής ευκρίνειας (αριστερή εικόνα) και μια χαμηλής ευκρίνειας εικόνα (δεξιά εικόνα), αντίστοιχα.

### 2.2.2 Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα

Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα, εκφραζόμενη σε bits, αναφέρεται στον αριθμό των διακριτών χρωματικών επιπέδων που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των δεδομένων από τον ανιχνευτή ή στον αριθμό των επιπέδων στα οποία κωδικοποιείται το σήμα. Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα αναφέρεται επίσης και ως δυναμικό εύρος. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ραδιομετρική ανάλυση τόσο μεγαλύτερη είναι η λεπτομέρεια της καταγεγραμμένης πληροφορίας (Εικόνα 2-2).

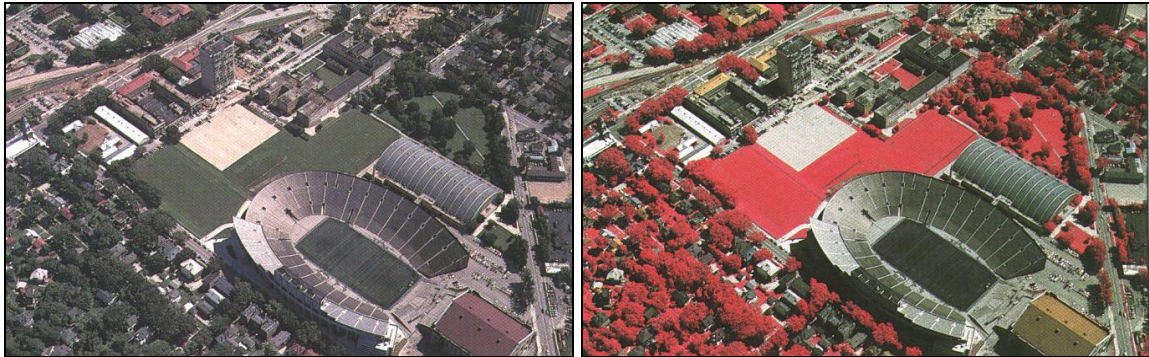


**Εικόνα 2-2** Η επίδραση της ραδιομετρικής διακριτικής ικανότητας στην απόδοση της καταγεγραμμένης πληροφορίας. Η ίδια εικόνα έχει σαρωθεί με υψηλή και χαμηλή ραδιομετρική διακριτική ανάλυση δημιουργώντας μια λεπτομερειακή (αριστερή εικόνα) και μια λιγότερο λεπτομερειακή εικόνα (δεξιά εικόνα), αντίστοιχα.

### 2.2.3 Φασματική διακριτική ικανότητα

Η φασματική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στο πλάτος του διαστήματος του μήκος κύματος ή του διαύλου στο οποίο καταγράφει την πληροφορία ο ανιχνευτής του δορυφόρου καθώς και στον αριθμό αυτών των διαύλων (Erdas Inc. 1991). Μεγάλο εύρος διαστημάτων ισοδυναμούν με μικρή φασματική διακριτική ικανότητα η οποία είναι λιγότερο αποτελεσματική στην ανίχνευση και καταγραφή λεπτομερειών και μικρών διαφορών μεταξύ των αντικειμένων. Αντίθετα μικρά διαστήματα

ισοδυναμούν με καλύτερη διακριτότητα και απόδοση λεπτομερειών του τοπίου. Στην Εικόνα 2-3 παρουσιάζεται ένα σκηνικό της ευρύτερης περιοχής του πανεπιστημίου του Wisconsin. Το γήπεδο ποδοσφαίρου, ενώ στην εικόνα του ορατού φάσματος (αριστερή εικόνα) παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα όπως ακριβώς και της γύρω βλάστησης και δίνει την αίσθηση ότι ο τάπητας του είναι από φυσικό χόρτο, στην υπέρυθρη απεικόνιση (δεξιά εικόνα) παρουσιάζεται με διαφορετική χρωματική απόχρωση, από το οποίο συμπεραίνεται ότι ο χλοοτάπητας είναι τεχνητός. Η ανακλαστικότητα του στο κοντινό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος είναι μικρή σε αντίθεση με τη βλάστηση η οποία παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα σε αυτό το τμήμα του φάσματος (από LILLESAND και KIEFER 1994).



**Εικόνα 2-3** Το γήπεδο ποδοσφαίρου ενώ στην εικόνα του ορατού φάσματος (αριστερή εικόνα) παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα όπως ακριβώς και της γύρω βλάστησης και δίνει την αίσθηση ότι ο τάπητας του είναι από φυσικό χόρτο, στην υπέρυθρη απεικόνιση (δεξιά εικόνα) παρουσιάζεται με διαφορετική χρωματική απόχρωση από το οποίο συμπεραίνεται ότι ο χλοοτάπητας είναι τεχνητός. Η ανακλαστικότητά του στο κοντινό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος είναι μικρή σε αντίθεση με τη βλάστηση η οποία παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα σε αυτό το τμήμα του φάσματος (από LILLESAND και KIEFER 1994).

## 2.2.4 Χρονική διακριτική ικανότητα

Η χρονική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στη συχνότητα κάλυψης της επιφανείας από το δορυφορικό σύστημα. Είναι ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις διαχρονικών μελετών ή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται συχνή και επαναλαμβανόμενη κάλυψη όπως στην περίπτωση παρακολούθησης της εξέλιξης των δασικών πυρκαγιών. Η χρονική διακριτική ικανότητα διαμορφώνεται από τα τροχιακά χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος, τη ζώνη σάρωσης, τη χωρική διακριτική ικανότητα, του αριθμού των δορυφόρων κ.ά. (Εικόνα 2-4).



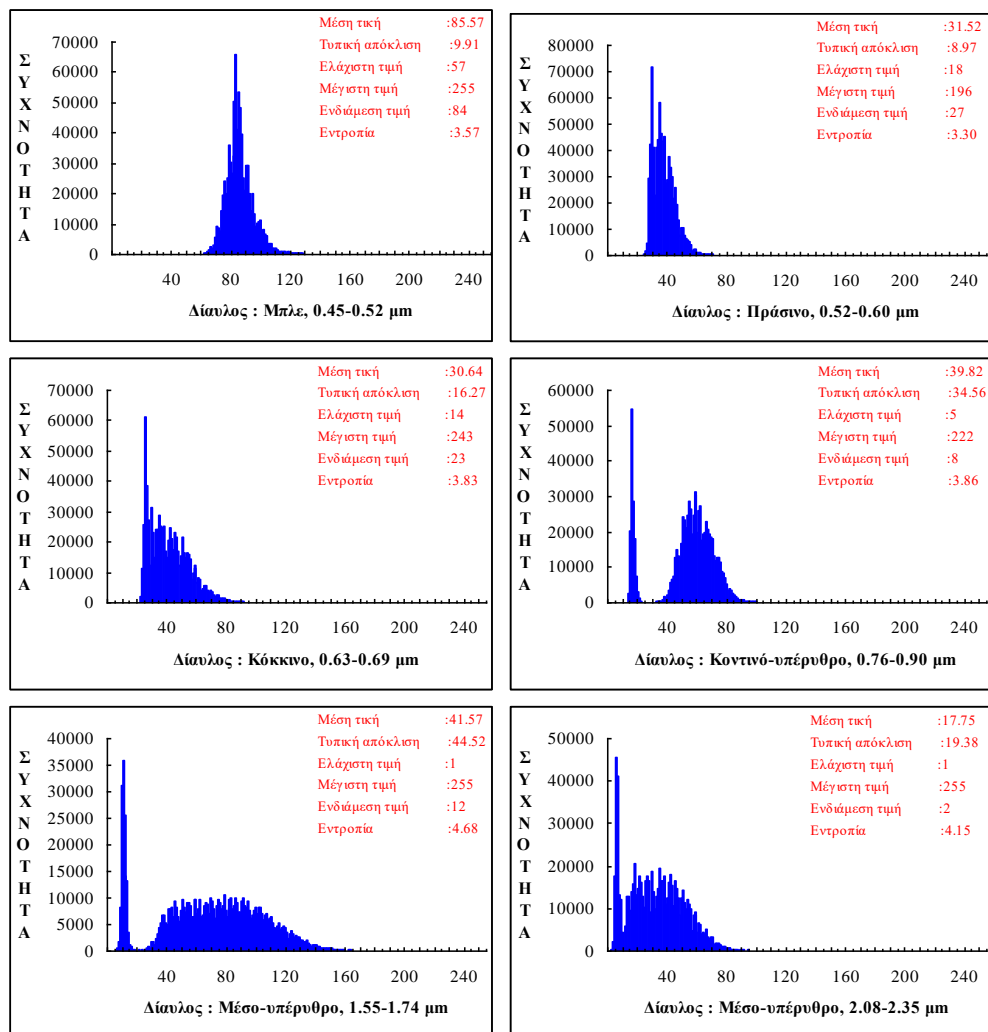
**Εικόνα 2-4** Η χρονική διακριτική ικανότητα διαμορφώνεται από τα τροχιακά χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος, τη ζώνη σάρωσης, τη χωρική διακριτική ικανότητα, του αριθμού των δορυφόρων κ.ά. Είναι ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις διαχρονικών μελετών ή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται συχνή και επαναλαμβανόμενη κάλυψη όπως στην περίπτωση παρακολούθησης της εξέλιξης των δασικών πυρκαγιών (τροποποιημένο από FUEGO: [www.insa.es/fuego/default.htm](http://www.insa.es/fuego/default.htm)).

### 3 Βασικές επεξεργασίες

#### 3.1 Προσαρμογή δορυφορικών δεδομένων

##### 3.1.1 Εισαγωγή

Τα δορυφορικά δεδομένα περιέχουν σφάλματα, τα οποία σχετίζονται με τη γεωμετρική και ραδιομετρική απεικόνιση της πληροφορίας των στοιχείων εδάφους, εξαιτίας πολύπλοκων διαδικασιών που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα, του ανάγλυφου του εδάφους, των οργάνων καταγραφής της ακτινοβολίας κ.ά. Στις δορυφορικές εικόνες είναι αναγκαίο να γίνει προσαρμογή των δεδομένων στις πραγματικές τιμές. Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή και τα διαθέσιμα μέσα, η προσαρμογή γίνεται άλλες φορές μόνο για τα βασικά σφάλματα, ενώ σε άλλες περιπτώσεις κρίνονται αναγκαίες πιο λεπτομερείς και ακριβείς διορθώσεις (RICHARDS 1986). Η προσαρμογή των δορυφορικών εικόνων αναφέρεται στην απαλοιφή σφαλμάτων και θορύβου, δημιουργώντας μια καινούργια διορθωμένη εικόνα, η οποία τείνει να μοιάζει περισσότερο, γεωμετρικά και ραδιομετρικά, με το υπό καταγραφή σκηνικό του εδάφους (SABINS 1996, ESTES κ.ά. 1983). Τα σφάλματα που περιέχονται στα δορυφορικά δεδομένα διακρίνονται σε «εσωτερικά» και «εξωτερικά» σφάλματα, ανάλογα με την αιτία δημιουργίας της παραμόρφωσης. Τα εσωτερικά σφάλματα οφείλονται στον ίδιο τον αισθητήρα ανίχνευσης και είναι συστηματικά και σταθερά, το οποίο σημαίνει ότι είναι προβλέψιμα. Αντίθετα, τα εξωτερικά σφάλματα οφείλονται σε εκτροπές θέσεων των πλατφόρμων και αλλαγές των χαρακτηριστικών του σκηνικού, οι οποίες ποικίλουν στη φύση, και συνεπώς είναι μη προβλέψιμα (JENSEN 1986).



Σχήμα 3-1 Ιστογράμματα των δεδομένων των φασματικών διαύλων μιας δορυφορικής εικόνας του Θεματικού Χαρτογράφου. Η ατμοσφαιρική σκέδαση έχει αυξήσει την ελάχιστη ραδιομετρική τιμή ιδιαίτερα στα μικρότερα μήκη κύματος, με αποτέλεσμα τη μετατόπιση των ιστογραμμάτων από την αρχή των αξόνων.

### 3.1.2 Ραδιομετρική προσαρμογή

#### 3.1.2.1 Ραδιομετρικά σφάλματα

Οι μηχανισμοί που επηρεάζουν ραδιομετρικά την δορυφορική εικόνα δημιουργούν σφάλματα, τα οποία ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες (RICHARDS, 1986). Πρώτον, η σχετική κατανομή των ραδιομετρικών τιμών μιας εικόνας σε ένα συγκεκριμένο φασματικό διάυλο είναι διαφορετική από αυτήν στο αντίστοιχο τοπίο εδάφους. Δεύτερον, η σχετική ραδιομετρική τιμή ενός συγκεκριμένου στοιχείου στους διαύλους της δορυφορικής εικόνας είναι διαφορετική από τα φασματικά χαρακτηριστικά του αντίστοιχου τμήματος εδάφους. Και οι δύο τύποι σφαλμάτων οφείλονται στην παρουσία της ατμόσφαιρας, μέσω της οποίας διέρχεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, καθώς επίσης και στην επίδραση των μη ιδανικών οργάνων καταγραφής (RICHARDS, 1986).

Στη θεωρητική περίπτωση απουσίας της ατμόσφαιρας, η καταγεγραμμένη από το δορυφόρο ακτινοβολία θα ήταν συνάρτηση μόνο της εκπεμπόμενης από τον ήλιο ενέργειας και των φασματικών ιδιοτήτων των αντικειμένων. Όμως, η παρουσία της ατμόσφαιρας τροποποιεί σημαντικά αυτή τη θεώρηση, κυρίως λόγω των φαινομένων της σκέδασης, εξαιτίας των οποίων ο στόχος δέχεται ένα μέρος διάχυτης ακτινοβολίας και ο δέκτης καταγράφει επίσης ένα αντίστοιχο μέρος. Το αποτέλεσμα της σκέδασης είναι ο αφανισμός της τελικής λεπτομέρειας των δεδομένων εικόνας. Επειδή η σκέδαση σχετίζεται με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και ισχύει ότι όσο μικραίνει το μήκος κύματος τόσο αυτή ενισχύεται, οι επιδράσεις στη ραδιομετρική τιμή των στοιχείων εικόνων θα είναι πιο αισθητές σε διαύλους με μικρότερο μήκος κύματος. Το αποτέλεσμα της σκέδασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-1, στο οποίο το ιστόγραμμα των δεδομένων είναι, για τα μικρότερα μήκη κύματος, περισσότερο μετατοπισμένο από την αρχή των αξόνων.

Ραδιομετρικά σφάλματα μέσα σε κάποιο διάυλο ή και μεταξύ διαύλων δημιουργούνται επίσης και από τη μη ιδανική λειτουργία των ανιχνευτών. Το πιο σημαντικό από αυτά τα σφάλματα σχετίζεται με τον τρόπο λειτουργίας του ανιχνευτή καθώς και με τον αριθμό των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται εκ των οποίων ο καθένας έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά μετατροπής της ακτινοβολίας εισόδου σε σήμα εξόδου.

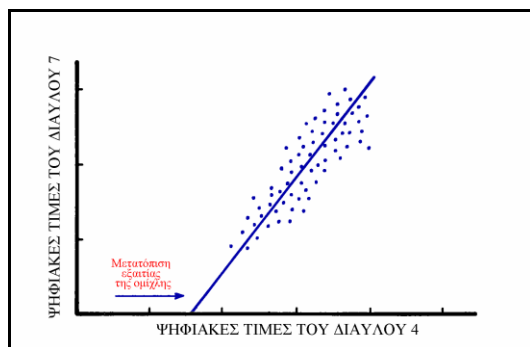
#### 3.1.2.2 Διόρθωση ραδιομετρικών σφαλμάτων

Η απαλοιφή των σφαλμάτων εξαιτίας του φαινομένου της ατμοσφαιρικής σκέδασης προϋποθέτει την εκτίμηση της ποσότητας της διάχυτης ακτινοβολίας που καταγράφει ο δέκτης και εξαιτίας της οποίας μετατοπίζεται η ελάχιστη τιμή σε κάθε φασματικό διάυλο. Η διόρθωση του σφάλματος αυτού επικεντρώνεται πρώτον, στην προσπάθεια της κατά προσέγγιση εκτίμησης της μετατόπισης αυτής και δεύτερον, με κατάλληλες υπολογιστικές διαδικασίες, της επαναφοράς στην πραγματική κατάσταση. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο τεχνικές, οι οποίες βασίζονται στην υπόθεση ότι οι φασματικοί διάυλοι που αντιστοιχούν σε μεγάλα μήκη κύματος είναι απαλλαγμένοι από τέτοιου είδους ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Στην περίπτωση του Θεματικού Χαρτογράφου, ο φασματικός διάυλος 7 χρησιμοποιείται ως διάυλος αναφοράς. Οι δύο προαναφερόμενες τεχνικές απαιτούν την ύπαρξη περιοχών στο έδαφος με ελάχιστη ακτινοβολία όπως είναι οι περιοχές που αντιστοιχούν είτε σε σκιές ή σε ομοιογενείς βαθιές και καθαρές υδάτινες μάζες. Η προϋπόθεση αυτή είναι απαραίτητη γιατί οι ραδιομετρικές τιμές αυτών στο διάυλο 7 του Θεματικού Χαρτογράφου είναι συνήθως 0 ή 1 (JENSEN 1986, SABINS 1996). Η απομάκρυνση των ραδιομετρικών σφαλμάτων που οφείλονται σε μηχανισμούς σκέδασης ονομάζεται «απομάκρυνση ομίχλης».

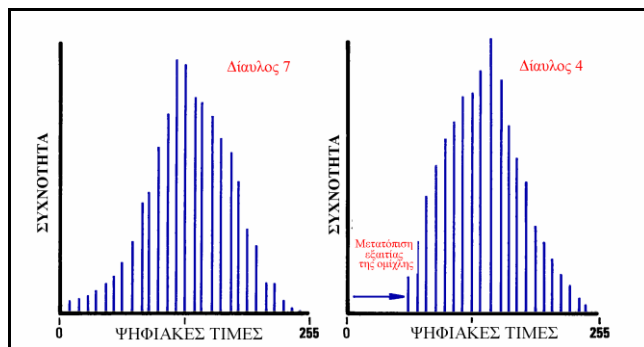
Η αναλυτική διαδικασία για την πρώτη τεχνική περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση των γραφημάτων διασποράς μεταξύ του διαύλου 7 και καθενός από τους υπολοίπους προς διόρθωση διαύλους καθώς και τον υπολογισμό των συντελεστών της γραμμής παλινδρόμησης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (Σχήμα 3-2). Στην περίπτωση όπου η επίδραση της ατμοσφαιρικής σκέδασης ήταν αμελητέα, η γραμμή παλινδρόμησης θα έπρεπε να περνάει από την αρχή των αξόνων. Εξαιτίας όμως των φαινομένων της σκέδασης, η γραμμή παλινδρόμησης είναι μετατοπισμένη από την αρχή των αξόνων σε μια απόσταση ίση με το συντελεστή της και η οποία αντιστοιχεί στην πρόσθετη διάχυτη ακτινοβολία. Για τη διόρθωση αφαιρείται από κάθε διάυλο η σταθερά της γραμμής παλινδρόμησης. Η αναλυτική διαδικασία για τη δεύτερη τεχνική περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση των ιστογραμμάτων για κάθε φασματικό διάυλο με την προϋπόθεση ότι η ελάχιστη ραδιομετρική τιμή του διαύλου 7 είναι 0 ή 1. Στην περίπτωση μη ύπαρξης φαινομένων σκέδασης οι ελάχιστες τιμές των υπολοίπων φασματικών



διαύλων θα έπρεπε να είναι επίσης 0 ή 1. Εξαιτίας όμως των φαινομένων της σκέδασης η ελάχιστη τιμή καθενός διαύλου είναι μετατοπισμένη από την αρχή των αξόνων με μια τιμή ανάλογη του βαθμού της σκέδασης όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-2 και Σχήμα 3-3. Για τη διόρθωση αφαιρείται από κάθε δίαυλο η ελάχιστη τιμή από τις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων του κάθε διαύλου.



**Σχήμα 3-2** Γράφημα διασποράς του φασματικού διαύλου 7 έναντι του φασματικού διαύλου 4. Η γραμμή παλινδρόμησης δεν περνάει από την αρχή των αξόνων εξαιτίας της ατμοσφαιρικής σκέδασης (τροποποιημένο από SABINS 1996).



**Σχήμα 3-3** Η τιμή μετατόπισης του ιστογράμματος από την αρχή των αξόνων θα πρέπει να αφαιρεθεί από την τιμή φωτεινότητας καθενός εικονοστοιχείου σε κάθε φασματικό δίαυλο (τροποποιημένο από SABINS 1996).

Σε μερικές περιπτώσεις, εξαιτίας προβλημάτων που εμφανίζονται στους ανιχνευτές, οι δορυφορικές εικόνες περιέχουν κενές γραμμές δεδομένων οι οποίες αναφέρονται ως «ενδογενής θόρυβος περιοδικών γραμμώσεων» (SABINS 1996). Η εκτίμηση των δεδομένων των κενών γραμμών γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των δεδομένων των γραμμών που βρίσκονται πάνω ή κάτω από αυτές. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο φαινόμενο της χωρικής αυτο-συσχέτισης το οποίο περιληπτικά είναι η σχέση μεταξύ μιας τιμής σε μια σειρά δεδομένων με μια γειτονική τιμή ή σειρά τιμών. Η νέα τιμή του στοιχείου εικόνας για κάθε ελλειπή γραμμή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας α) την τιμή του αντίστοιχου στοιχείου εικόνας στην αμέσως παρακάτω γραμμή β) τη μέση τιμή του αντίστοιχου στοιχείου εικόνας από τις δύο διπλανές γραμμές σάρωσης και γ) τις τιμές αντίστοιχων στοιχείων εικόνων από άλλους υψηλά συσχετιζόμενους διαύλους και επίσης από γειτονικά στοιχεία εικόνας του ίδιου διαύλου. Μερικές φορές, αντί της πλήρους αποτυχίας σάρωσης μιας γραμμής, οι ανιχνευτές απλά τίθενται εκτός βαθμονόμησης το οποίο σημαίνει ότι ο μετασχηματιστής χαρακτηριστικών κάποιου ανιχνευτή διαφοροποιείται μέσα σε κάποιο δίαυλο. Το αποτέλεσμα από αυτή τη μη σωστή λειτουργία αναφέρεται ως «θόρυβος περιοδικών γραμμώσεων». Οι μέθοδοι διόρθωσης αυτών των σφαλμάτων περιλαμβάνουν τον υπολογισμό του ιστογράμματος καθενός ανιχνευτή ξεχωριστά και την προσαρμογή αυτών με βάση έναν δίαυλο αναφοράς (MATHER 1987).

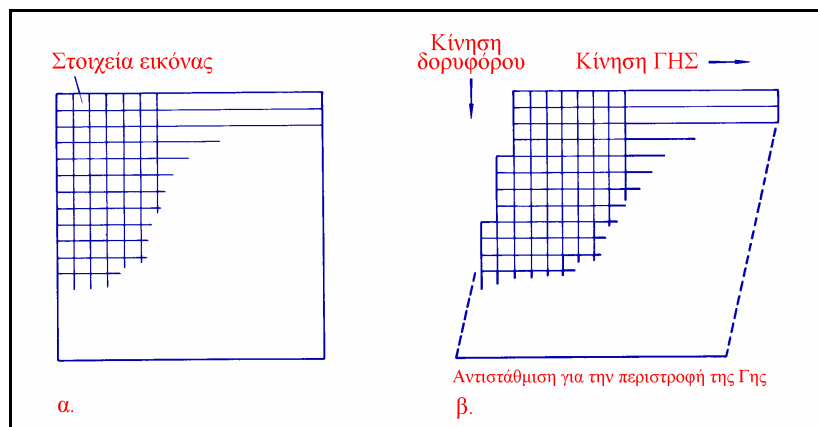
### 3.1.3 Γεωμετρική προσαρμογή

#### 3.1.3.1 Γεωμετρικά σφάλματα

Τα γεωμετρικά σφάλματα, σε αντίθεση με τα ραδιομετρικά, δημιουργούνται από περισσότερες αιτίες και οι συνέπειες τους θεωρούνται πιο σημαντικές. Όμως, οι τεχνικές της γεωμετρικής προσαρμογής έχουν αναπτυχθεί πολύ περισσότερο από αυτές της ραδιομετρικής. Συστηματικές και μη συστηματικές αποκλίσεις συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της σάρωσης και συντελούν στη γεωμετρική παραμόρφωση της δορυφορικής εικόνας. Γενικά, οι γεωμετρικές αποκλίσεις σχετίζονται με α) την περιστροφή της γης β) τον πεπερασμένο χρόνο σάρωσης γ) το ευρύ πεδίο όρασης δ) την καμπυλότητα της γης ε) τους μη ιδανικούς ανιχνευτές κ.ά. Οι γεωμετρικές αποκλίσεις διακρίνονται στις «συστηματικές» και στις «μη συστηματικές αποκλίσεις» (JENSEN 1986, SABINS 1996). Στις μη συστηματικές αποκλίσεις ανήκουν εκείνα τα σφάλματα που χαρακτηρίζονται ως μη σταθερά και προκύπτουν από αποκλίσεις του υψομέτρου, της ταχύτητας και της θέσης της πλατφόρμας των δορυφόρων και γι' αυτό είναι μη προβλέψιμα (JENSEN 1986, RICHARDS 1986). Στις συστηματικές αποκλίσεις ανήκουν εκείνα τα σφάλματα που χαρακτηρίζονται ως σταθερά και προκύπτουν από την περιστροφή της γης, την πεπερασμένη

αναλογία σάρωσης, την καμπυλότητα της γης κ.ά. (JENSEN 1986, RICHARDS 1986).

Οι ανιχνευτές που σαρώνουν τη Γήινη επιφάνεια γραμμή προς γραμμή, όπως είναι ο LANDSAT MSS και TM, ο NOAA AVHRR, ο SPOT HRV κ.ά. χρειάζονται ένα πεπερασμένο χρόνο σάρωσης για την απόκτηση ενός πλαισίου δεδομένων εικόνας. Κατά τη διάρκεια του χρόνου καταγραφής η Γη περιστρέφεται από τη δύση προς την ανατολή, μια κίνηση που έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση του σημείου που φωτογραφίζεται στο τέλος του πλαισίου προς τη δύση. Έτσι, αν παρουσιάσουμε τις γραμμές του πλαισίου εικόνας που αποκτήθηκαν στην αρχή της καταγραφής θα είναι εσφαλμένα μετατοπισμένες προς την ανατολή σύμφωνα με το έδαφος που αυτές αντιπροσωπεύουν. Στο Σχήμα 3-4 φαίνεται η αντιστάθμιση που γίνεται στο κάτω μέρος της εικόνας προς τη δύση, ώστε να απαλειφθούν τα σφάλματα της εικόνας από αυτό το είδος της απόκλισης. Η συνολική μετατόπιση της εικόνας εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του δορυφόρου και της γης και από το χρόνο καταγραφής του πλαισίου εικόνας.

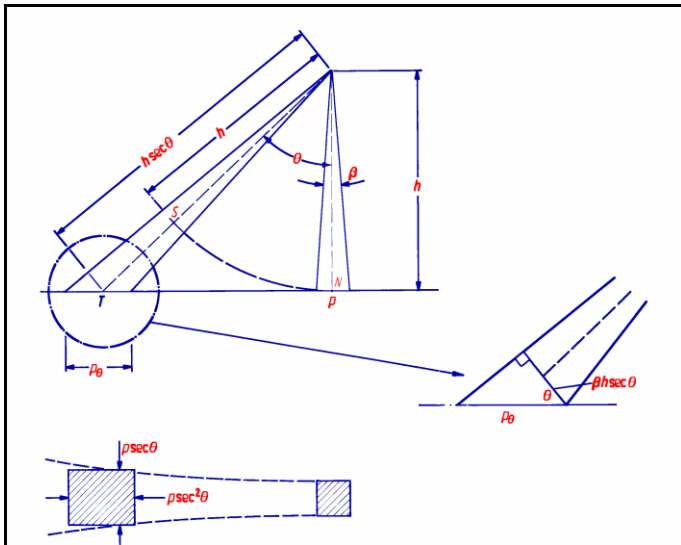


**Σχήμα 3-4** Κατά τη διάρκεια του χρόνου καταγραφής η γη περιστρέφεται από τη δύση προς την ανατολή με αποτέλεσμα τη μετατόπιση του σημείου που φωτογραφίζεται στο τέλος του πλαισίου προς τη δύση (τροποποιημένο από RICHARDS 1986).

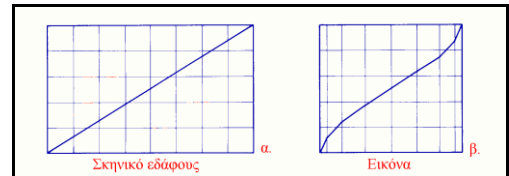
Οι σαρωτές που χρησιμοποιούνται στα δορυφορικά συστήματα έχουν σταθερό στιγμιαίο γωνιακό πεδίο όρασης, με αποτέλεσμα την αύξηση του πραγματικού μεγέθους ενός στοιχείου εικόνας όσο προχωράμε προς τα άκρα του πλαισίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-5. Στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζεται η επίδραση της συμπίεσης κατά μήκος της γραμμής σάρωσης. Το σχέδιο α δείχνει την πραγματική εικόνα εδάφους ενώ το σχέδιο β δείχνει την παραμόρφωση που προκαλείται από τη συμπίεση αυτή<sup>2</sup>. Η επίδραση της καμπυλότητας της γης στη γεωμετρία ενός στοιχείου εικόνας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-7. Οι μηχανικοί σαρωτές όπως είναι ο LANDSAT MSS και TM χρειάζονται κάποιο πεπερασμένο χρόνο για να σαρώσουν μια γραμμή ενός πλαισίου εικόνας. Κατά τη διάρκεια του χρόνου αυτού ο δορυφόρος κινείται με μια ταχύτητα προς τα εμπρός προκαλώντας έτσι μια στρέβλωση κατά μήκος της διεύθυνσης τροχιάς. Αποτέλεσμα αυτού του μηχανισμού είναι η μετατόπιση του τέλους της γραμμής σάρωσης σε σχέση με την αρχή της.

Αποκλίσεις του υψομέτρου, της θέσης και της ταχύτητας των πλατφόρμων επιφέρουν μη συστηματικές αποκλίσεις στη γεωμετρία της δορυφορικής εικόνας. Οι επιδράσεις αυτές είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν διότι δεν είναι γνωστός ο βαθμός αυτών των αποκλίσεων. Για το δορυφορικό σύστημα LANDSAT τέτοιου είδους σφάλματα επανορθώνονται πριν κατανεμηθούν τα δεδομένα στους χρήστες.

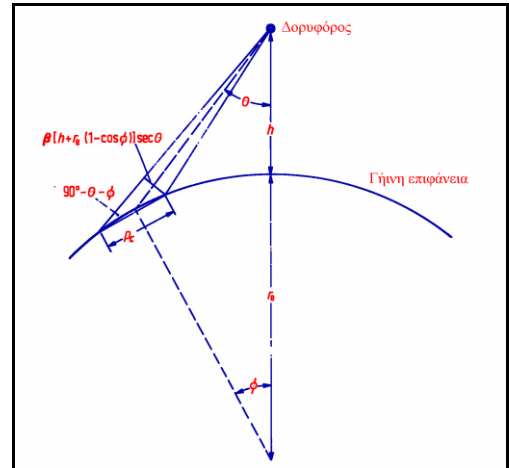
<sup>2</sup> Γενικά η καμπυλότητα της γης επηρεάζει σημαντικά τη γεωμετρία της εικόνας μόνο σε περιπτώσεις που το εύρος των γραμμών σάρωσης είναι πολύ μεγάλο όπως είναι στο δορυφορικό σύστημα NOAA με εύρος 2700 Km.



**Σχήμα 3-5** Το σταθερό στιγμιαίο γωνιακό πεδίο όρασης των δορυφορικών συστημάτων συντελεί στην αύξηση του πραγματικού μεγέθους ενός στοιχείου εικόνας όσο προχωρούμε προς τα άκρα του πλαισίου. Το στιγμιαίο γωνιακό πεδίο όρασης και η καμπυλότητα της γης επηρεάζουν σημαντικά τη γεωμετρία της εικόνας μόνο σε περιπτώσεις που το εύρος των γραμμών σάρωσης είναι πολύ μεγάλο όπως είναι του δορυφορικού συστήματος NOAA με εύρος 2700 Km (τροποποιημένο από RICHARDS 1986).



**Σχήμα 3-6** Οι πανοραμικές επιδράσεις συντελούν στη συμπίεση της γραμμής σάρωσης (τροποπ. από RICHARDS 1986).



**Σχήμα 3-7** Η επίδραση της καμπυλότητας της γης στη διάσταση του στοιχείου εικόνας (τροποποιημένο από RICHARDS 1986).

### 3.1.3.2 Διόρθωση γεωμετρικών σφαλμάτων

Σε αντίθεση με τη ραδιομετρική διόρθωση, στην οποία η διαδικασία είναι συγκεκριμένη και ανάλογη της φύσης της παραμόρφωσης, στην απαλοιφή των γεωμετρικών σφαλμάτων η διαδικασία αφορά όλη τη γεωμετρία της εικόνας ανεξάρτητα από τη φύση της παραμόρφωσης. Για τη διόρθωση των γεωμετρικών σφαλμάτων μιας δορυφορικής εικόνας εφαρμόζονται δύο τεχνικές. Η πρώτη περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση της φύσης και του μεγέθους της παραμόρφωσης και τη χρησιμοποίηση των μοντέλων αυτών για τη δημιουργία μαθηματικών τύπων διόρθωσης<sup>3</sup>. Η δεύτερη και περισσότερο χρησιμοποιημένη τεχνική βασίζεται στη δημιουργία μαθηματικών σχέσεων, οι οποίες συσχετίζουν τις διευθύνσεις των στοιχείων της δορυφορικής εικόνας με τις αντίστοιχες διευθύνσεις που αυτά αναπαριστούν στο έδαφος (ή σε χάρτη)<sup>4</sup>. Και οι δύο τεχνικές αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως «γεωμετρική διόρθωση», η οποία είναι η προβολή των δεδομένων της εικόνας σε ένα επίπεδο προσαρμοσμένο σε κάποιο προβολικό σύστημα (ERDAS Inc. 1991). Αντίθετα, «γεωμετρική προσαρμογή» είναι η διαδικασία προβολής των δεδομένων σε ένα σύστημα συντεταγμένων, το οποίο καθορίζεται βάση κάποιας άλλης εικόνας (JENSEN 1986).

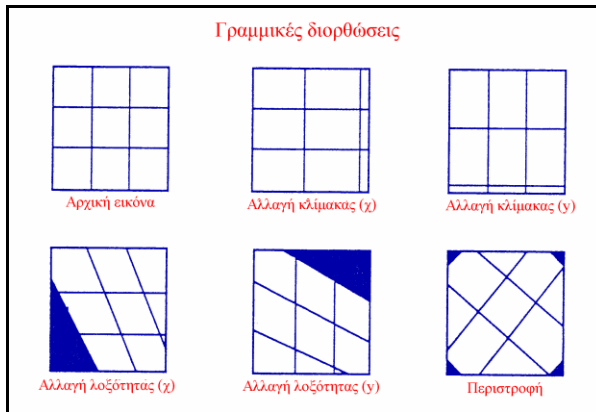
Η διαδικασία της γεωμετρικής διόρθωσης των δορυφορικών δεδομένων περιλαμβάνει δύο λειτουργίες. Η πρώτη αφορά τη σωστή επαναδιευθέτηση της θέσης των στοιχείων εικόνας, μέσω της ανάπτυξης μαθηματικών σχέσεων που συνδέουν τη θέση των στοιχείων της δορυφορικής εικόνας με την αντίστοιχη θέση που αυτά αντιπροσωπεύουν στο έδαφος. Η λειτουργία αυτή αναφέρεται ως «χωρική παρεμβολή». Η δεύτερη λειτουργία αφορά τον υπολογισμό της τιμής φωτεινότητας του στοιχείου της νέας παρεμβαλλόμενης δορυφορικής εικόνας. Η λειτουργία αυτή αναφέρεται ως «παρεμβολή έντασης». Η γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών δεδομένων μέσω της ανάπτυξης μαθηματικών σχέσεων απαιτεί τον προσδιορισμό των φωτοσταθερών<sup>5</sup>. Στη συνέχεια ορίζονται δύο καρτεσιανά συστήματα συντεταγμένων, εκ των οποίων το ένα περιγράφει τη θέση των σημείων στο χάρτη και το άλλο ορίζει τη θέση των στοιχείων της δορυφορικής εικόνας. Τα δύο αυτά συστήματα συντεταγμένων

<sup>3</sup> Για να καταστεί εφικτή η τεχνική αυτή θα πρέπει να είναι γνωστό το είδος της παραμόρφωσης. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται λιγότερο, αφού δε βρίσκει εφαρμογή σε όλες τις περιπτώσεις, λόγω αδυναμίας γνώσης του είδους της παραμόρφωσης.

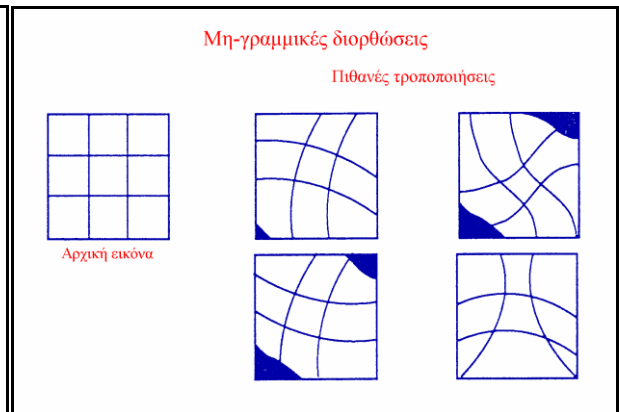
<sup>4</sup> Είναι μια μέθοδος η οποία εφαρμόζεται για την προσαρμογή συστηματικών και μη συστηματικών αποκλίσεων.

<sup>5</sup> Φωτοσταθερά είναι μικρά σε μέγεθος και εύκολα αναγνωρίσιμα χαρακτηριστικά τοποθετημένα σε χάρτη, τα οποία μπορούν επίσης εύκολα να αναγνωρισθούν και στην αντίστοιχη δορυφορική εικόνα.

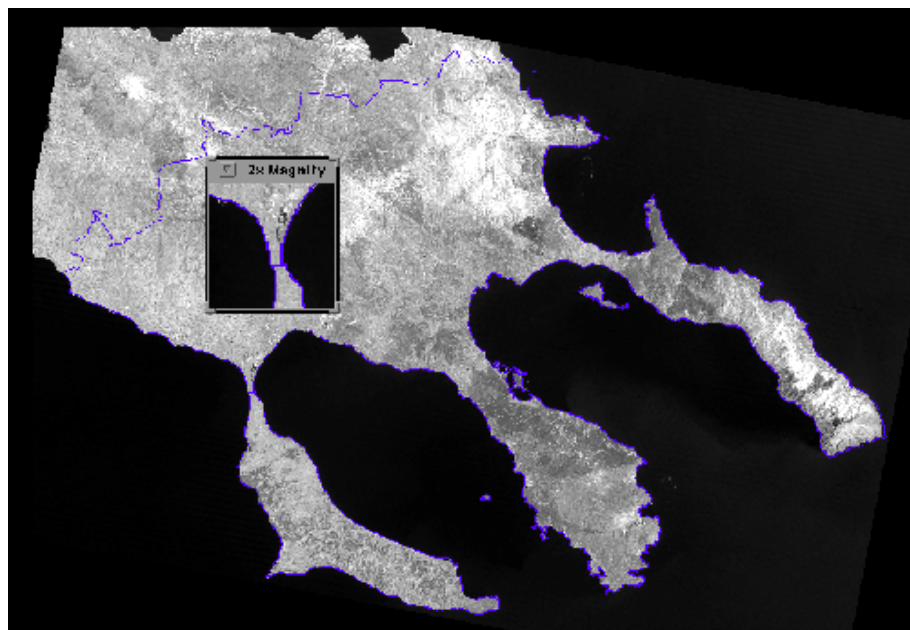
μπορούν να συσχετιστούν μέσω ενός ζεύγους συναρτήσεων. Με βάση τις συντεταγμένες των φωτοσταθερών στο χάρτη και στην υπό διόρθωση δορυφορική εικόνα, εκτιμούνται οι συντελεστές των πολυωνύμων. Τα πολυώνυμα αυτά μπορεί να είναι πρώτου, δευτέρου ή και μεγαλύτερου βαθμού, και χρησιμοποιούνται για τη μαθηματική απεικόνιση των θέσεων των στοιχείων εικόνας μεταξύ εδάφους και διορθωμένης γεωμετρικά δορυφορικής εικόνας. Η πιο χρησιμοποιημένη μέθοδος υπολογισμού αυτών των συντελεστών είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Ανάλογα με το βαθμό του πολυωνύμου που χρησιμοποιείται για τη χωρική παρεμβολή, ο γεωμετρικός μετασχηματισμός διακρίνεται πρώτον, σε γραμμικό ή αφινικό και χρησιμοποιείται για γραμμικές γεωμετρικές αναγωγές, παρόμοιες με αυτές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-8, και δεύτερον σε μη-γραμμικό, ο οποίος χρησιμοποιείται για περισσότερο πολύπλοκες μη γραμμικές γεωμετρικές αναγωγές, παρόμοιες με αυτές που περιγράφονται στο Σχήμα 3-9.



**Σχήμα 3-8** Πιθανές αλλαγές στη γεωμετρική θέση των στοιχείων της δορυφορικής εικόνας μετά την εφαρμογή του γραμμικού γεωμετρικού μετασχηματισμού (τροποποιημένο από ERDAS Inc. 1991).



**Σχήμα 3-9** Πιθανές αλλαγές στη γεωμετρική θέση των στοιχείων της δορυφορικής εικόνας μετά την εφαρμογή του μη-γραμμικού γεωμετρικού μετασχηματισμού (τροποποιημένο από ERDAS Inc. 1991).

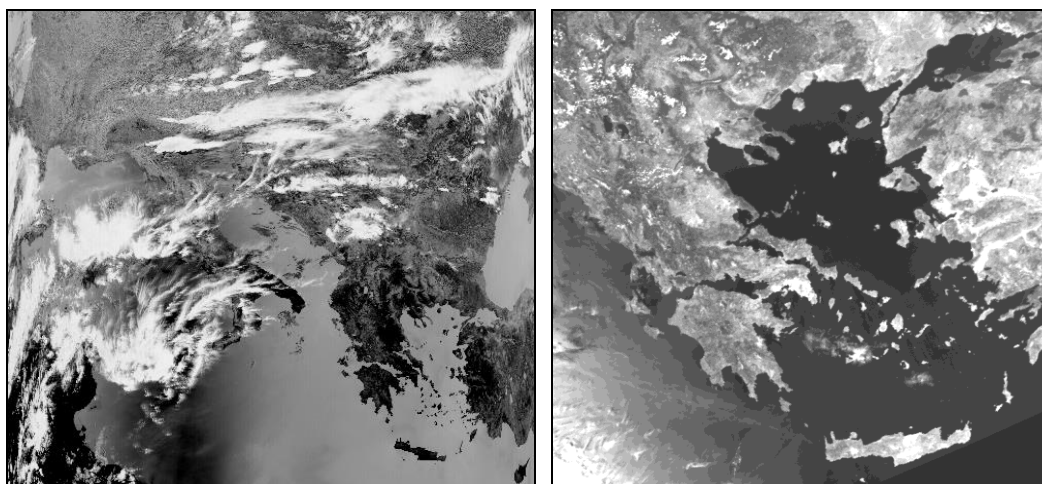


**Εικόνα 3-1** Ένα παράδειγμα γεωμετρικής διόρθωσης και ταυτόχρονα γρήγορου ελέγχου όπου τα γεωγραφικά όρια του Νομού Χαλκιδικής συμπίπτουν με τα όρια της διορθωμένης δορυφορικής εικόνας.

Το επόμενο βήμα, μετά τον υπολογισμό των συντελεστών των πολυωνύμων, είναι η εκτίμηση της τιμής φωτεινότητας των στοιχείων εικόνας στις καινούργιες θέσεις, χρησιμοποιώντας τεχνικές χωρικής

παρεμβολής. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι είναι α) του «κοντινότερου γειτονικού», η οποία επιστρέφει την κοντινότερη τιμή φωτεινότητας β) της «διγραμμικής παρεμβολής», η οποία επιστρέφει την παρεμβαλλόμενη τιμή φωτεινότητας των τεσσάρων κοντινότερων στοιχείων εικόνας, και γ) της «κυβικής συνέλιξης», η οποία επιστρέφει την παρεμβαλλόμενη τιμή φωτεινότητας των δεκαέξι κοντινότερων εικονοστοιχείων.

Ένα παράδειγμα γεωμετρικής διόρθωσης με ταυτόχρονο έλεγχο παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-1 και Εικόνα 3-2 όπου τα γεωγραφικά όρια του Νομού Χαλκιδικής και της Ελλάδας συμπίπτουν με τα όρια των διορθωμένων δορυφορικών εικόνων.



**Εικόνα 3-2 Δορυφορικά δεδομένα του NOAA AVHRR πριν (αριστερή εικόνα) και μετά τη γεωμετρική διόρθωση. Σε τέτοιου είδους δεδομένα η γεωμετρική παραμόρφωση των δεδομένων είναι πολύ έντονη.**

## **3.2 Βελτίωση εικόνων και πολυφασματικοί μετασχηματισμοί**

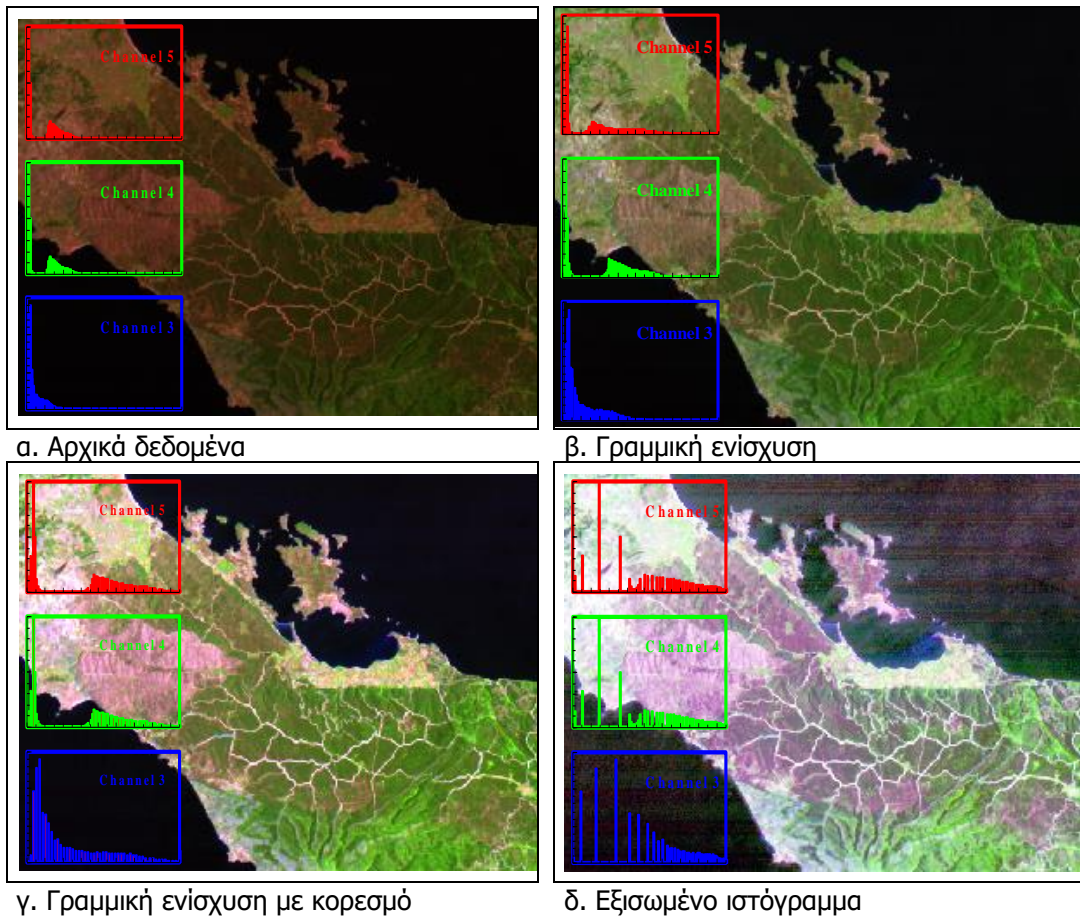
### **3.2.1 Εισαγωγή**

Στα δορυφορικά δεδομένα εφαρμόζονται πολύ συχνά αλγόριθμοι για τη βελτίωση της οπτικής εμφάνισης των δορυφορικών εικόνων και για την ενίσχυση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών. Ο αντικειμενικός σκοπός αυτών των ραδιομετρικών μετασχηματισμών είναι η βελτίωση της εμφάνισης της δορυφορικής εικόνας κυρίως για οπτική ανάλυση και περιστασιακά για ψηφιακή ανάλυση (JENSEN 1986, RICHARDS 1986). Ο MATHER (1987) αναφέρεται στον όρο ενίσχυση για να δηλώσει το μέσο με το οποίο η εμφάνιση της εικόνας μεταβάλλεται κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να αυξάνεται η ραδιομετρική απόδοση και να ενισχύεται φασματικά η περιεχόμενη πληροφορία. Οι τεχνικές ραδιομετρικής ενίσχυσης διακρίνονται σε «χωρικές λειτουργίες» και σε «σημειακές λειτουργίες», ανάλογα με το εάν οι τιμές φωτεινότητας των γειτονικών στοιχείων εικόνας λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση ή όχι (JENSEN 1986). Οι σημειακές λειτουργίες μετασχηματίζουν την τιμή φωτεινότητας ενός στοιχείου εικόνας ατομικά μέσω κάποιας συνάρτησης που χειρίζεται μόνο τη ραδιομετρική τιμή του υπόψη εικονοστοιχείου (JENSEN 1986, MARION 1991). Αντίθετα, οι χωρικές λειτουργίες μετασχηματίζουν την τιμή φωτεινότητας κάποιου στοιχείου εικόνας λαμβάνοντας υπόψη τις ραδιομετρικές τιμές των στοιχείων που το περιβάλλουν. Επίσης, οι μέθοδοι ραδιομετρικής ενίσχυσης διακρίνονται σε φασματικές, χωρικές και πολυφασματικές. Συνήθως, οι φασματικές και χωρικές τεχνικές εφαρμόζονται σε απλούς φασματικούς διαύλους, ενώ οι πολυφασματικοί μετασχηματισμοί απαιτούν περισσότερους από έναν διαύλους.

### **3.2.2 Φασματική ενίσχυση**

Η φασματική ενίσχυση ανήκει στις σημειακές τεχνικές, αφού περιλαμβάνει το χειρισμό και επεξεργασία του ιστογράμματος ενός μόνο φασματικού διαύλου μιας δορυφορικής εικόνας. Ο σκοπός της φασματικής ενίσχυσης είναι η βελτίωση της οπτικής εμφάνισης των δορυφορικών εικόνων καθώς και η ισχυροποίηση κάποιων χαρακτηριστικών. «Ενίσχυση αντίθεσης», «διαστρωμάτωση πυκνότητας», «ταίριασμα ιστογραμμάτων» και «συγχώνευση» είναι μερικές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται

για τη φασματική ενίσχυση. Συνήθως, το ραδιομετρικό εύρος που καταλαμβάνουν τα δορυφορικά δεδομένα είναι πολύ μικρότερο από το διαθέσιμο δυναμικό εύρος του ανιχνευτή, με αποτέλεσμα τη χαμηλή αντίθεση των εικόνων (JENSEN 1986, MATHER 1987). Η χαμηλή αυτή αντίθεση στις δορυφορικές εικόνες οφείλεται στο εύρος ευαισθησίας των ανιχνευτών οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να καταγράφουν ένα μεγάλο εύρος τιμών φωτεινότητας και να λειτουργούν κάτω από ένα μεγάλο εύρος συνθηκών φωτισμού χωρίς ταυτόχρονα να έρχονται σε κατάσταση κορεσμού. Όμως, λίγα σκηνικά και τοπία περιέχουν τέτοιες τιμές φωτεινότητας που να καταλαμβάνουν όλο το διαθέσιμο εύρος ευαισθησίας των ανιχνευτών. Έτσι, τεχνικές ενίσχυσης της αντίθεσης ή τέντωμα αντίθεσης όπως αλλιώς ονομάζεται εφαρμόζονται για τη βελτίωση των δορυφορικών εικόνων (JENSEN 1986, SABINS 1996). Μεταξύ των τεχνικών ενίσχυσης της αντίθεσης διακρίνουμε α) τη γραμμική β) τη λογαριθμική γ) τη γραμμική κορεσμού δ) την εξίσωση ιστογράμματος ε) την ενίσχυση Gaussian κ.ά. Το γραμμικό τέντωμα αντίθεσης μετασχηματίζει τις τιμές φωτεινότητας των στοιχείων εικόνας με μια γραμμική σχέση έτσι ώστε το νέο ραδιομετρικό εύρος να ισούται με το διαθέσιμο. Η λογαριθμική και εκθετική ενίσχυση είναι χρήσιμες τεχνικές για την ενίσχυση χαρακτηριστικών γνωρισμάτων τα οποία έχουν ακραίες τιμές φωτεινότητας, δηλαδή πολύ σκοτεινές και πολύ φωτεινές τιμές. Η γραμμική κορεσμού και η απλή γραμμική, είναι παρόμοιες τεχνικές εκτός από το ότι με τη γραμμική κορεσμού ένα ποσοστό των στοιχείων εικόνας που συνήθως έχουν τις μικρότερες και μεγαλύτερες τιμές φθάνουν σε κατάσταση κορεσμού. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αύξηση της αντίθεσης της εικόνας. Η εξίσωση ιστογράμματος, η οποία θεωρείται ως μία μη-γραμμική μέθοδος, μετασχηματίζει τις αρχικές ραδιομετρικές τιμές με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε τάξη του ιστογράμματος στη νέα εικόνα να έχει παρόμοια συχνότητα. Γραφικά τα αποτελέσματα αυτών των ενισχύσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-3.



**Εικόνα 3-3** Γραφική απεικόνιση των ραδιομετρικών ενισχύσεων α) αρχικά μη επεξεργασμένα δεδομένα β) γραμμική ενίσχυση αντίθεσης γ) γραμμική ενίσχυση αντίθεσης με κορεσμό και δ) εξίσωση ιστογράμματος.

### 3.2.3 Χωρική ενίσχυση

Τεχνικές χωρικής ενίσχυσης, οι οποίες μετασχηματίζουν τις τιμές φωτεινότητας των στοιχείων εικόνας βάσει γειτονικών, τροποποιούν τη χωρική συχνότητα των δορυφορικών εικόνων. Ο JENSEN (1986) ορίζει τη χωρική συχνότητα ως «τον αριθμό των αλλαγών στην τιμή φωτεινότητας ανά μονάδα απόστασης από κάποιο ιδιαίτερο τμήμα μιας εικόνας». Συνεπώς, μιας χαμηλής συχνότητας περιοχή σε μια δορυφορική εικόνα αποτελείται από παρόμοιες τιμές φωτεινότητας, ενώ αντίθετα μιας υψηλής συχνότητας περιοχή αποτελείται από στοιχεία εικόνας των οποίων οι ραδιομετρικές τιμές μεταβάλλονται έντονα (JENSEN 1986). Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στη χωρική ενίσχυση αναφέρονται ως «φίλτρα». Ένα φίλτρο είναι ένας πίνακας τιμών, συνήθως μονής διάστασης, ο οποίος αποτελείται από συγκεκριμένους συντελεστές. Ανάλογα με τους συντελεστές αυτούς τα φίλτρα ανήκουν είτε στα «υψηλής συχνότητας» διότι ενισχύουν λεπτομερειακά χαρακτηριστικά και όρια ή στα «χαμηλής συχνότητας» διότι ενισχύουν βαθμιαίες αλλαγές και συμπιέζουν την υψηλή συχνότητα (ERDAS Inc. 1991).

### 3.2.4 Πολυφασματικοί μετασχηματισμοί

Ο πολυφασματικός χαρακτήρας των δορυφορικών δεδομένων δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής πολυφασματικών μετασχηματισμών για τη δημιουργία «νέων δεδομένων», μέσω γραμμικών και μη αριθμητικών σχέσεων. Στις περισσότερες φορές τα νέα μετασχηματισμένα δεδομένα προσφέρουν περισσότερες δυνατότητες φωτοερμηνείας, διατηρώντας όλη σχεδόν την αρχική πληροφορία και ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τις διαστάσεις των δεδομένων, εξυπηρετώντας έτσι τη γρηγορότερη επεξεργασία. Σε αντίθεση με τη φασματική και χωρική ενίσχυση, κατά τις οποίες η νέα τιμή φωτεινότητας υπολογίζεται από τις τιμές φωτεινότητας των στοιχείων εικόνας του ίδιου φασματικού διαύλου, ο πολυφασματικός μετασχηματισμός χρησιμοποιεί δεδομένα από πολλούς διαύλους.

#### 3.2.4.1 Ανάλυση κυρίων συνιστωσών

Σύμφωνα με τους AFIFI και CLARK (1990), η ανάλυση κυρίων συνιστωσών εφαρμόζεται με σκοπό την απλοποίηση μιας σειράς υψηλά συσχετιζόμενων μεταβλητών. Η ανάλυση κυρίων συνιστωσών είναι μια μέθοδος με την οποία, μέσω γραμμικών μετασχηματισμών των αρχικών δεδομένων, δημιουργείται μια νέα μη συσχετισμένη και παράλληλα πιο ερμηνευτική σειρά δεδομένων (JENSEN 1986, RICHARDS 1986, DWIRED και SAUKAR 1992). Οι μεταβλητές στη νέα αυτή σειρά δεδομένων αναφέρονται ως κύριες συνιστώσες. Η ανάλυση κυρίων συνιστωσών έχει επιτυχώς εφαρμοστεί για μελέτες ανίχνευσης αλλαγών (FUNG και LEDREW 1987), για την καλύτερη απεικόνιση χωρικών γνωρισμάτων (DWIRED και Saukar 1992), για τη βελτίωση της ακρίβειας ταξινόμησης δασικών κατηγοριών (CONESE κ.ά. 1988) κ.ά. Τα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών σε μια σειρά υψηλά συσχετιζόμενων μεταβλητών σύμφωνα με τους AFIFI και CLARK (1990), NIBLACK (1986) και MATHER (1987) είναι τα παρακάτω:

- i. Μείωση της διάστασης των δεδομένων, με ταυτόχρονη διατήρηση ολόκληρης σχεδόν της αρχικής πληροφορίας,
- ii. Μείωση του βαθμού συσχέτισης των μεταβλητών στα αρχικά δεδομένα,
- iii. Αποφυγή προβλημάτων τα οποία σχετίζονται με υψηλής συσχέτισης μεταβλητών,
- iv. Απομόνωση του θορύβου και της τυχαίας πληροφορίας στις τελευταίες κύριες συνιστώσες

Μολονότι η ανάλυση κυρίων συνιστωσών δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα απαιτεί προσοχή στην εκτίμηση των συντελεστών και των παραγόντων που χρησιμοποιούνται, διότι έχει βρεθεί ότι εξαρτάται έντονα από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του τοπίου της δορυφορικής εικόνας (FUNG και LEDREW 1987). Επίσης, οι CHAVEZ και KWARTENG (1989) επεσήμαναν δύο προβλήματα που σχετίζονται με την ανάλυση. Το πρώτο αφορά την απομόνωση της σημαντικής πληροφορίας στις τελευταίες κύριες συνιστώσες και το δεύτερο ότι πολλές φορές οι νέες μεταβλητές δεν ερμηνεύονται εύκολα.

**Πίνακας 3-1 Δείκτες βλάστησης**

Όνομα και σύντμηση	Μαθηματικός τύπος	Περιγραφή και σχόλια
Ratio Based Vegetation (RVI), JORDAN 1969	NIR: Κοκκινό υπέρυθρο $RVI = \frac{NIR}{Red}$ Red: κόκκινο	Είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος και εφαρμόζεται για την απαλοιφή albedo επιδράσεων. Το εύρος τιμών κυμαίνεται μεταξύ 0 και του απείρου.
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), KRIEGLER κ.ά. 1969, ROUSE κ.ά. 1973	$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red}$	Ο δείκτης αυτός έχει το πλεονέκτημα ότι το εύρος τιμών του κυμαίνεται μεταξύ του -1 και 1. Έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες που αφορούν την εκτίμηση βιομάζας και σε έρευνες δασικών πυρκαγιών.
Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI), CRIPPEN 1990	$IPVI = \frac{NIR}{NIR+Red}$	Ο δείκτης αυτός βελτιώνει αισθητά την ταχύτητα των υπολογισμών. Το εύρος τιμών του κυμαίνεται από 0 έως 1, αποφεύγοντας έτσι τις αρνητικές τιμές. Οι δείκτες IPVI και NDVI είναι λειτουργικά ισοδύναμοι
Difference Vegetation Index (DVI), RICHARDSON και EVERITT 1992, LILLESAND και KIEFER 1987	$DVI = NIR - Red$	Στο δείκτη αυτό, οι γραμμές που αντιστοιχούν σε ίσες ποσότητες βλάστησης είναι παράλληλες με τη γραμμή του εδάφους και επίσης η γραμμή του εδάφους έχει αυθαίρετη κλίση και περνάει από την αρχή των αξόνων
Perpendicular Vegetation Index (PVI), RICHARDSON και WIEGAND 1977	$PVI = \sin(a)NIR - \cos(a)Red$ α είναι η γωνία μεταξύ της γραμμής εδάφους και του άξονα του κοκκινού υπέρυθρου διαύλου.	Ο δείκτης αυτός θεωρείται ως μια γενικευμένη έκδοση του NDVI ο οποίος όμως επιτρέπει τη χρησιμοποίηση διαφόρων κλίσεων της γραμμής του εδάφους. Ο PVI είναι αρκετά ευαίσθητος σε ατμοσφαιρικές μεταβολές.
Weighted Difference Vegetation Index (WDVI), CLEVERS 1988	$WDVI = NIR - gRed$ g είναι η κλίση της γραμμής εδάφους	Ο δείκτης αυτός είναι ευαίσθητος επίσης σε ατμοσφαιρικές μεταβολές. Συσχετίζεται με το δείκτη PVI αλλά παρουσιάζει ένα απεριόριστο εύρος τιμών.
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), HUETE 1988	$SAVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} (1+L)$ L είναι ένας διορθωτικός παράγοντας που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1, η πιο συνηθισμένη τιμή είναι 0.5	Θεωρείται ως μια υβριδική έκδοση μεταξύ των δεικτών που βασίζονται σε αναλογίες και στους κάθετους δείκτες. Ο διορθωτικός παράγοντας L κυμαίνεται από 0 για πολύ υψηλή κάλυψη βλάστησης μέχρι 1 για χαμηλή.
Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI), BARET κ.ά. 1989, BARET και GUYOT 1991	$TSAVI = \frac{s(NIR-sRed-a)}{aNIR+Red-as+X(1+s^2)}$ α: σταθερά γραμμής εδάφους s: κλίση της γραμμής εδάφους X: παράγοντας προσαρμογής	Στο δείκτη αυτό η γραμμή του εδάφους έχει αυθαίρετη κλίση και σταθερά. Η παράμετρος χ χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων του εδάφους.
Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI), QI κ.ά. 1994	$MSAVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red+L} (1+L)$ L=1-2sNDVI*WDVI s: η κλίση της γραμμής εδάφους	Όπως προαναφέρθηκε η τιμή L είναι ένας διορθωτικός παράγοντας που συσχετίζεται με τα επίπεδα κάλυψης της βλάστησης. Η βασική ιδέα του δείκτη αυτού ήταν η ανάγκη ύπαρξης του διορθωτικού παράγοντα.
Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2 (MSAVI2), QI κ.ά. 1994	$MSAVI2 = \frac{1}{2} \left( 2(NIR+1) - \sqrt{(2NIR+1)^2 - 8(NIR-Red)} \right)$	Ο δείκτης αυτός δεν απαιτεί τον εκ των προτέρων υπολογισμό των δεικτών WDVI και NDVI.
Global Environmental Monitoring Index (GEMI), PINTY και VERSTRAETE 1991	$GEMI = \frac{Red - 0.125}{1 - Red}$ $eta = \frac{2(NIR^2 - RED^2) + 15NIR + 0.5Red}{NIR + Red + 0.5}$	Ο δείκτης αυτός επιχειρεί να εξαλείψει την αναγκαιότητα για λεπτομερειακές ατμοσφαιρικές διορθώσεις. Έχει βρεθεί ότι ο δείκτης GEMI πλεονεκτεί έναντι άλλων δεικτών για δορυφορικές μετρήσεις.
Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI), KAUFMAN και TANRE 1992	$ARVI = \frac{NIR - rb}{NIR + rb}$ rb=Red-gamma(Blue-Red) gamma=1	Ο δείκτης αυτός έχει παρόμοια μορφή με το δείκτη NDVI. Η αντικατάσταση του Red με το rb σε οποιοδήποτε δείκτη βασιζόμενο σε κλάσμα δημιουργεί την έκδοση του ατμοσφαιρικά ανεκτού δείκτη
Green Vegetation Index (GVI), KAUTH και THOMAS, 1976, CRIST και CICONE, 1984	MSS=-0.29MSS4 -0.56MSS5 +0.60MSS6 +0.49MSS7  TM=-0.2848TM1-0.2435TM2 - 0.5436TM3+0.7243TM4+0.084TM5 -0.18TM7	Οι δείκτες αυτοί εκτιμούνται χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερα σημεία ώστε να οριστεί η γραμμή του



### 3.2.4.2 Δείκτες βλάστησης

Σύμφωνα με τον CAMPBELL (1987) οι δείκτες βλάστησης είναι ποσοτικές μετρήσεις οι οποίες προέρχονται από γραμμικούς και μη-γραμμικούς μετασχηματισμούς των τιμών φωτεινότητας των στοιχείων εικόνας και επιχειρούν να μετρήσουν τη βιομάζα ή τη ζωτικότητα της βλάστησης. Ο σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί ο πολυφασματικός χαρακτήρας των αρχικών παρατηρήσεων της δορυφορικής εικόνας με τη δημιουργία ενός απλού δείκτη που να συσχετίζεται με παραμέτρους της βλάστησης (JENSEN 1986, WIEGAND κ.ά. 1991). Έχει παρατηρηθεί, ότι αυτοί οι δείκτες οι οποίοι είναι το άθροισμα, η διαφορά, ο λόγος ή οποιοσδήποτε άλλος γραμμικός συνδυασμός των αρχικών τιμών φωτεινότητας ή της ακτινοβολίας, συσχετίζονται με εσωτερικούς παράγοντες των οικοσυστημάτων όπως είναι η βιομάζα, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας, το ποσοστό κάλυψης, η παραγωγικότητα κ.ά. (JENSEN 1986, WIEGAND κ.ά. 1991, BARET και GUYOT 1991). Είναι πολύ καλά τεκμηριωμένο μεταξύ των επιστημόνων, ότι η ανακλώμενη ενέργεια στο κόκκινο και κοντινό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος ή σε συνδυασμό τους συσχετίζεται με τους παράγοντες που αναφέρονται παραπάνω. Εκτός από τη θετική σχέση που υπάρχει μεταξύ δεικτών βλάστησης και συνιστωσών των οικοσυστημάτων, οι δείκτες βλάστησης τείνουν να ελαχιστοποιήσουν τις επιδράσεις εξωτερικών παραγόντων, όπως αυτές της κλίσης, της διεύθυνσης του ήλιου κ.ά. Αν και οι δείκτες βλάστησης ελαχιστοποιούν την επίδραση εξωτερικών παραγόντων, εν τούτοις είναι ευαίσθητοι στα χαρακτηριστικά του εδάφους, της θέσης του ήλιου, της τοπογραφίας, της νέφωσης κ.ά. (BARET και GUYOT 1991). Στην περίπτωση ορεινών περιοχών, εξαιτίας τοπογραφικών συνθηκών, απαιτείται ραδιομετρική διόρθωση των δεδομένων πριν την εφαρμογή και χρησιμοποίηση των δεικτών βλάστησης (SADER κ.ά. 1989). Επίσης, εσωτερικοί παράγοντες των οικοσυστημάτων, όπως η πυκνότητα, η κάλυψη, ο υποόροφος της βλάστησης, η ανακλαστικότητα του υποβάθρου κ.ά. επηρεάζουν αρνητικά τη σχέση των δεικτών βλάστησης με τη βιομάζα και άλλων χαρακτηριστικών (SPANNER κ.ά. 1990).

## 4 Ταξινόμηση δορυφορικών δεδομένων

### 4.1 Εισαγωγή

Αφού τα ψηφιακά δορυφορικά δεδομένα είναι χωρικά καταχωρημένα σε στοιχεία εικόνας και ραδιομετρικά σε τιμές φωτεινότητας, η τηλεπισκόπηση διακρίνεται σ' αυτήν που θεωρεί τα δεδομένα ως αριθμούς και σ' αυτήν που τα θεωρεί ως στοιχεία εικόνας, αντίστοιχα (RICHARDS 1986). Επίσης, η θεώρηση αυτή για τη διάκριση της τηλεπισκόπησης, σε εικόνα και αριθμούς, συντελεί σε μια ακόμη διαφοροποίηση των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της πληροφορίας. Η πρώτη αφορά την εξαγωγή της πληροφορίας χρησιμοποιώντας μεθόδους φωτοερμηνείας, αναφέρεται ως «*ποιοτική ανάλυση*» και θεωρεί τα δορυφορικά δεδομένα ως στοιχεία εικόνας, ενώ η δεύτερη αφορά την εξαγωγή της πληροφορίας χρησιμοποιώντας μεθόδους ψηφιακής ανάλυσης, αναφέρεται ως «*ποσοτική ανάλυση*» και θεωρεί τα δορυφορικά δεδομένα ως αριθμούς. Αν και η ποσοτική ανάλυση προσφέρει υψηλότερες ακρίβειες σε σχέση με την ποιοτική, αφού λαμβάνει υπόψη όλο το προσφερόμενο δυναμικό αναφορικά με τη φασματική, και ραδιομετρική πληροφορία, η ικανότητά της να επεξεργάζεται τη χωρική πληροφορία είναι περιορισμένη αφού δεδομένα αναφορικά με το σχήμα, τη διάταξη κ.ά. απαιτούν υπολογιστικές ρουτίνες πολύπλοκων αποφάσεων (RICHARDS 1986).

Στα πλεονεκτήματα της ψηφιακής ταξινόμησης και παραγωγής θεματικών χαρτών με μεθόδους τηλεπισκόπησης συμπεριλαμβάνονται τα εξής:

- i. Ελαχιστοποίηση των εργασιών πεδίου,
- ii. Εξοικονόμηση χρόνου,
- iii. Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους,
- iv. Σχετικά πολύ καλή ακρίβεια η οποία εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή,
- v. Καταγραφή μεταβολών στη διάρκεια του χρόνου,
- vi. Δημιουργία μόνιμου αρχείου καταγραφής του περιβάλλοντος σχετιζόμενο με τον άπειρο θεωρητικά χρόνο αποθήκευσής του και την άμεση δυνατότητα πρόσβασης.

## 4.2 Βασικές έννοιες ταξινόμησης

«Πολυφασματική ταξινόμηση είναι η διαδικασία καταχώρησης των στοιχείων της δορυφορικής εικόνας σε τάξεις ή κατηγορίες με βάση τις τιμές φωτεινότητάς τους ή τις φασματικές τους υπογραφές». Εάν ένα στοιχείο εικόνας ικανοποιεί μια σειρά κριτηρίων, τα οποία διαμορφώνονται ανάλογα με τις φασματικές τάξεις στις οποίες πρόκειται να ταξινομηθεί η εικόνα, τότε το στοιχείο εικόνας καταχωρείται στην τάξη που αντιστοιχεί στα κριτήρια αυτά (CAMPBELL 1987, ERDAS Inc. 1991). Η προαναφερθείσα διαδικασία καταχώρησης των στοιχείων εικόνας σε συγκεκριμένες κατηγορίες είναι ένα παράδειγμα της ανάλυσης δεδομένων η οποία ονομάζεται «αναγνώριση προτύπου» (SWAIN και DAVIS, 1978). Συνεπώς, «ανάλυση προτύπου είναι η επιστήμη – και η τέχνη – προσδιορισμού σημαντικών προτύπων στα δεδομένα, τα οποία μπορούν να πιστοποιηθούν και να εξαχθούν κατά την ταξινόμηση» (ERDAS Inc. 1991). Η διαδικασία της ταξινόμησης συμπεριλαμβάνει, πρώτον την «εκπαίδευση» του ταξινομητή και δεύτερον την «εφαρμογή» αυτού. Εκπαίδευση είναι η διαδικασία καθορισμού των κριτηρίων, τα οποία συνήθως είναι στατιστικά μεγέθη όπως μέσες τιμές, αποκλίσεις, ελάχιστα ή μέγιστα, τιμές συνδιασπορών κ.ά. και μέσω των οποίων ο ταξινομητής αναγνωρίζει πρότυπα στα δεδομένα (HORD 1982). Τα κριτήρια αυτά αναφέρονται ως «φασματικές υπογραφές». Ο καθορισμός των κριτηρίων αυτών γίνεται χρησιμοποιώντας δειγματοληπτικές περιοχές επί της δορυφορικής εικόνας για τις οποίες είναι γνωστή η κατηγορία εδάφους που αυτές αντιπροσωπεύουν. Οι δειγματοληπτικές αυτές περιοχές αναφέρονται ως «περιοχές εκμάθησης» διότι τα εξαγόμενα από αυτές στατιστικά μεγέθη χρησιμοποιούνται στη διαδικασία εκπαίδευσης του ταξινομητή. Ανάλογα με τον τρόπο ορισμού αυτών των περιοχών, η ταξινόμηση διακρίνεται σε «επιβλεπόμενη» και «μη επιβλεπόμενη». Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση ελέγχεται περισσότερο από το χρήστη, αφού απαιτεί τον εκ των προτέρων προσδιορισμό των τελικών προτύπων που θα εξαχθούν και θα χαρτογραφηθούν.

## 4.3 Στρατηγική ταξινόμησης

Αρχικά θα πρέπει να αναφερθεί, ότι τα μόνα γνωστά διαθέσιμα δεδομένα είναι αυτά που απορρέουν από τα δεδομένα της συγκεκριμένης εφαρμογής. Περιληπτικά αυτά είναι (ΚΡΗΤΙΚΟΣ και ΚΑΛΑΠΑΝΙΔΑΣ, 1983) :

- i. Το είδος του θεματικού χάρτη που θα παραχθεί,
- ii. Το μέγεθος των μικρότερων αντικειμένων που θα ταξινομηθούν,
- iii. Η θέση και το μέγεθος της περιοχής εφαρμογής,
- iv. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Τα παραπάνω δεδομένα, βάσει της εμπειρίας του μελετητή, θα καθορίσουν (ΚΡΗΤΙΚΟΣ και ΚΑΛΑΠΑΝΙΔΑΣ, 1983):

- i. Το είδος των εικόνων που θα χρησιμοποιηθούν (δηλαδή ποιας χωρικής και φασματικής διακριτικής ικανότητας δορυφορικά δεδομένα),
- ii. Τη χρονική στιγμή που θα πρέπει να αποκτηθεί η εικόνα,
- iii. Τυχόν βοηθήματα όπως χάρτες της περιοχής, αεροφωτογραφίες, δειγματοληψίες πεδίου κ.ά.

Εφόσον προσδιορισθούν και αποκτηθούν τα παραπάνω στοιχεία η διαδικασία συνεχίζεται με τη χρήση κάποιας μεθόδου ταξινόμησης, η οποία θα εξαρτηθεί από τη δεδομένη εφαρμογή. Γενικά, η διαδικασία δημιουργίας του θεματικού χάρτη περιλαμβάνει τα εξής βήματα (ΚΡΗΤΙΚΟΣ και ΚΑΛΑΠΑΝΙΔΑΣ, 1983):

- i. Γεωμετρική και ραδιομετρική απαλοιφή των σφαλμάτων,

- ii. Εφαρμογή πολυφασματικών μετασχηματισμών για την ενίσχυση της αρχικής πληροφορίας,
- iii. Επιλογή των κατάλληλων διαύλων,
- iv. Προσδιορισμός των φασματικών χαρακτηριστικών των θεματικών τάξεων,
- v. Εφαρμογή αλγορίθμων ταξινόμησης σύμφωνα με τα φασματικά χαρακτηριστικά των τάξεων,
- vi. Προσδιορισμός της ακρίβειας της ταξινόμησης, και
- vii. Εφόσον η ακρίβεια είναι μέσα στα αποδεκτά όρια, ακολουθεί η αποδοχή και αποτύπωση των αποτελεσμάτων σε χάρτη.

## 4.4 Μέθοδοι ταξινόμησης

Η μεθοδολογία ταξινόμησης των δορυφορικών δεδομένων διακρίνεται, πρώτον στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση, όταν η περιοχή μελέτης είναι προσιτή ώστε να γίνουν οι κατάλληλες δειγματοληψίες για την απόκτηση των φασματικών χαρακτηριστικών των τάξεων, και δεύτερον στην μη επιβλεπόμενη στην οποία με κατάλληλες υπολογιστικές διαδικασίες εκτιμούνται τα φασματικά χαρακτηριστικά και κατόπιν αυτά συσχετίζονται με συγκεκριμένες τάξεις. Εκτός από τις παραπάνω δύο μεθόδους υπάρχει ακόμη μία, η οποία δεν είναι διαφορετική, αλλά αποτελεί τον συνδυασμό των δύο παραπάνω και αναφέρεται ως "υβριδική" μέθοδος.

### 4.4.1 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση

*«Επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι μια υπολογιστική διαδικασία, μέσω της οποίας σε κάθε στοιχείο εικόνας που περιγράφεται με διανυσματικές μετρήσεις προσδιορίζεται μια τάξη, σύμφωνα με έναν συγκεκριμένο κανόνα απόφασης, και η οποία έχει προσδιορισθεί χρησιμοποιώντας ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα περιοχών εκμάθησης γνωστής ταυτότητας» (SWAIN και DAVIS 1978)<sup>6</sup>.*

Όταν τα φασματικά χαρακτηριστικά των τάξεων δύνανται να προσδιοριστούν μέσω δειγματοληψιών πεδίου, τότε η μέθοδος αυτή είναι η πιο κατάλληλη για την ποσοτική ανάλυση των δεδομένων των δορυφορικών εικόνων. Γενικά, η μεθοδολογία που ακολουθείται, κατά τη χρησιμοποίηση της μεθόδου αυτής, σύμφωνα με τον RICHARDS (1986), είναι:

- i. Καθορισμός των θεματικών τάξεων στις οποίες θα κατατμηθεί η αρχική εικόνα. Ο καθορισμός γίνεται βάση των προδιαγραφών της συγκεκριμένης μελέτης. Οι τάξεις αυτές μπορεί να είναι χρήσεις γης, ποιότητας φυσικού και δομημένου περιβάλλοντος, ποσοτικού προσδιορισμού φυσικών παραμέτρων σε τάξεις μεγέθους κ.ά.,
- ii. Με βάση τις ήδη προσδιορισμένες θεματικές τάξεις, επιλέγονται κατάλληλες περιοχές εκπαίδευσης είτε στο έδαφος, είτε σε χάρτη ή χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε άλλο μέσο. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια οι αντίστοιχες περιοχές στη δορυφορική εικόνα,
- iii. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα εκμάθησης προσδιορίζονται τα φασματικά χαρακτηριστικά κάθε τάξης. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι παράμετροι που ο τύπος τους εξαρτάται από το είδος του ταξινομητή που θα χρησιμοποιηθεί. Οι παράμετροι αυτοί αναφέρονται ως φασματικές υπογραφές,
- iv. Χρησιμοποιώντας κάποιον ταξινομητή, προσδιορίζεται σε κάθε στοιχείο εικόνας μια από τις θεματικές τάξεις, και τέλος
- v. Εάν η ακρίβεια των αποτελεσμάτων κριθεί ικανοποιητική, τυπώνονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης παράγοντας έτσι το θεματικό χάρτη της περιοχής.

Για να υπάρξουν ικανοποιητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την παραπάνω διαδικασία θα πρέπει ο

<sup>6</sup> Κατά τη θεώρηση αυτή, η επιβλεπόμενη ταξινόμηση απαιτεί την εκ των προτέρων γνώση των κατηγοριών που συνιστούν την περιοχή της δορυφορικής εικόνας.

μελετητής να εξασφαλίσει με όσο το δυνατό καλύτερη ακρίβεια μια σειρά παραγόντων, οι οποίοι επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, και περιληπτικά είναι οι εξής (RICHARDS 1986, CAMPBELL 1987):

- i. Ο πλήρης προσδιορισμός των αντιπροσωπευτικών τάξεων της περιοχής,
- ii. Η ακριβής συσχέτιση των καθορισμένων τάξεων με αντίστοιχες περιοχές εκμάθησης στη δορυφορική εικόνα,
- iii. Ο απαιτούμενος αριθμός των δεδομένων εκμάθησης, ώστε να εξασφαλισθεί η ακρίβεια των υπογραφών. Θεωρητικά, αν ο αριθμός των φασματικών διαύλων είναι  $N$  τότε απαιτούνται τουλάχιστον  $N+1$  δείγματα ανά τάξη. Πρακτικά ο αριθμός αυτός είναι  $10N$  ενώ το αποτέλεσμα θα είναι πιο ικανοποιητικό αν υπάρχει η δυνατότητα να πλησιάσει στα όρια του  $100N$ ,
- iv. Ο κατάλληλος συνδυασμός των φασματικών διαύλων που θα χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να υπάρξουν διακριτές τάξεις. Ελέγχεται με την απεικόνιση των παραμέτρων των φασματικών τάξεων σε ένα διάγραμμα του οποίου άξονες είναι συνδυασμοί των φασματικών διαύλων,
- v. Τέλος, εφόσον έχουν προσδιορισθεί με ακρίβεια τα παραπάνω, η επιλογή ενός κατάλληλου ταξινομητή θα συμβάλει στην περαιτέρω αποφυγή σφαλμάτων.

Σύμφωνα με τον CAMPBELL (1987) τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί που προκύπτουν από την εφαρμογή της επιβλεπόμενης ταξινόμησης συνοψίζονται ως εξής:

#### 4.4.1.1 Πλεονεκτήματα

- i. Υπάρχει ολοκληρωτικός έλεγχος προσδιορισμού των τάξεων στις οποίες θα ταξινομηθεί η δορυφορική εικόνα,
- ii. Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση συσχετίζεται με περιοχές γνωστής ταυτότητας,
- iii. Δεν απαιτείται ο εκ των υστέρων χαρακτηρισμός των πληροφοριακών τάξεων που ορίστηκαν με στατιστικά μεγέθη,
- iv. Είναι δυνατή η εκτίμηση της ακρίβειας χρησιμοποιώντας τις δειγματοληπτικές περιοχές εκμάθησης.

#### 4.4.1.2 Μειονεκτήματα και περιορισμοί

- i. Οι θεματικές φασματικές τάξεις ίσως να μην αντιστοιχούν στις φυσικές θεματικές κατηγορίες,
- ii. Τα δεδομένα εκμάθησης προσδιορίζονται πρωτογενώς βάση πληροφοριακών τάξεων και δευτερογενώς βάση φασματικών χαρακτηριστικών,
- iii. Ο προσδιορισμός των δεδομένων εκμάθησης απαιτεί χρόνο,
- iv. Ορισμένες κατηγορίες εδάφους ίσως να μην καταγράφονται εξαιτίας της άγνοιας του αναλυτή ή επειδή καταλαμβάνουν μικρές περιοχές.

#### 4.4.2 Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

*«Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι μια υπολογιστική διαδικασία μέσω της οποίας σε κάθε στοιχείο εικόνας που περιγράφεται με διανυσματικές μετρήσεις προσδιορίζεται μια τάξη, σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο κανόνα απόφασης, και οι οποίες έχουν προσδιορισθεί, αντίθετα με την επιβλεπόμενη ταξινόμηση, χρησιμοποιώντας ενυπάρχοντα χαρακτηριστικά παρά δείγμα περιοχών εκμάθησης*

γνωστής ταυτότητας» (SWAIN και DAVIS 1978)<sup>7</sup>.

Η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου οι τάξεις στις οποίες θα καταταμηθεί η δορυφορική εικόνα δεν είναι γνωστές. Δηλαδή η πρόσβαση στην περιοχή δεν είναι εφικτή και δεν υπάρχουν διαθέσιμες αεροφωτογραφίες μεγάλης κλίμακας ή άλλα θεματικά υπόβαθρα έτσι ώστε να συσχετιστούν οι πραγματικές τάξεις με περιοχές εκμάθησης επί της δορυφορικής εικόνας. Η απόκτηση των υπογραφών των τάξεων γίνεται με στατιστική ανάλυση των δεδομένων των εικόνων. Βασίζεται στο ότι αν παρουσιασθούν τα δεδομένα σε ένα πολυφασματικό διάστημα  $N$  διαστάσεων τότε τα δεδομένα θα συσσωρευτούν γύρω από τα μέσα των διακριτών τάξεων. Έχουν διατυπωθεί αρκετοί τύποι αλγόριθμων με τους οποίους επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των παραμέτρων των φασματικών χαρακτηριστικών. Βασίζονται κύρια σε μια σειρά καθορισμένων κριτηρίων, όπως είναι ο επιθυμητός αριθμός των τάξεων, μεταβλητές που καθορίζουν πότε μια συσσώρευση θα πρέπει να συγχωνευτεί με μία άλλη, μεταβλητές που καθορίζουν πότε θα δημιουργηθεί μια καινούργια συσσώρευση κ.ά. Τελικό βήμα της διαδικασίας αποτελεί η συσχέτιση των συσσωρεύσεων με τις αντίστοιχες τάξεις που αυτές αναπαριστούν.

Σύμφωνα με τον CAMPBELL (1987) τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί που προκύπτουν από την εφαρμογή της επιβλεπόμενης ταξινόμησης συνοψίζονται στα εξής:

#### **4.4.2.1 Πλεονεκτήματα**

- i. Δεν απαιτείται η εκ των προτέρων γνώση των θεματικών τάξεων της περιοχής εφαρμογής αφού ο προσδιορισμός των φασματικών τάξεων γίνεται υπολογιστικά με στατιστικά μεγέθη. Απαιτείται όμως κάποια γενική γνώση έτσι ώστε να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα της ταξινόμησης,
- ii. Η πιθανότητα σφαλμάτων που προέρχονται από το χρήστη ελαχιστοποιείται,
- iii. Η προσφερόμενη ομοιογένεια των φασματικών τάξεων αναφορικά με τη φασματική σύνθεση είναι υψηλότερη συγκριτικά με την επιβλεπόμενη ταξινόμηση,
- iv. Η ταξινομημένη εικόνα μπορεί να συμπεριλαμβάνει περισσότερες κατηγορίες σε σχέση με την αντίστοιχη της επιβλεπόμενης.

#### **4.4.2.2 Μειονεκτήματα και περιορισμοί**

- i. Οι φασματικές ομοιογενείς τάξεις ίσως να μην αντιστοιχούν σε πληροφοριακές τάξεις που να ενδιαφέρουν την εκάστοτε εφαρμογή,
- ii. Υπάρχει περιορισμένος έλεγχος επί των αποτελεσμάτων,
- iii. Οι σχέσεις μεταξύ πληροφοριακών και φασματικών τάξεων δεν είναι σταθερές στο χώρο και στο χρόνο,

### **4.4.3 Υβριδική ταξινόμηση**

Τέλος, τρίτη μέθοδος ταξινόμησης που μπορεί να εφαρμοστεί σε δορυφορικά δεδομένα είναι μια υβριδική μέθοδος των δύο παραπάνω η οποία περιγράφεται ως εξής (RICHARDS 1986):

- i. Χρησιμοποιώντας μη επιβλεπόμενες μεθόδους προσδιορίζονται οι διακριτές συσσωρεύσεις των δεδομένων, στο διάγραμμα συσσωρεύσεων. Στο βήμα αυτό εκτιμούνται τα στατιστικά που περιγράφουν την κάθε τάξη,
- ii. Χρησιμοποιώντας φωτοσταθερά γίνεται αντιστοιχία των συσσωρεύσεων με αντίστοιχες

<sup>7</sup> Σε μελέτες τηλεπισκόπησης περιστασιακά μπορεί να προσδιορίζεται ο αριθμός των φασματικών τάξεων που συνιστούν μια πληροφοριακή τάξη αλλά είναι πολύ δύσκολο να υπάρχει ξεκάθαρη εικόνα του αριθμού των ευκρινών ομάδων των στοιχείων εικόνας στις οποίες διαχωρίζεται η δορυφορική εικόνα στον πολυφασματικό χώρο (Richards 1986). Υπό αυτό το πρίσμα, τεχνικές αυτόματης ομαδοποίησης με συγκεκριμένα στατιστικά μεγέθη είναι δυνατόν να ορίσουν τις δομές των υπαρχόντων χαρακτηριστικών (Mather 1987).

- κατηγορίες εδάφους,
- iii. Επιλέγονται οι κατάλληλοι φασματικοί δίαυλοι που θα χρησιμοποιηθούν,
  - iv. Ταξινομούνται τα δεδομένα εικόνας χρησιμοποιώντας κατάλληλο ταξινομητή βάση των υπογραφών που αποκτήθηκαν στο βήμα 1.

#### 4.5 Αλγόριθμοι ταξινόμησης

Τμήμα της κάθε διαδικασίας ταξινόμησης αποτελεί η επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου ταξινόμησης. Συνοπτικά μπορεί να περιγραφεί ως οι μαθηματικές εκείνες σχέσεις που εφαρμόζονται για να εκτιμήσουν το βαθμό με τον οποίο ένα στοιχείο εικόνας ανήκει σε μια φασματική τάξη. Η τάξη στην οποία θα καταχωρηθεί τελικά το στοιχείο εικόνας είναι αυτή που παρουσιάζει τον υψηλότερο βαθμό. Ο βαθμός αυτός εκφράζεται είτε με τιμές απόστασης είτε με τιμές πιθανότητας. Ανάμεσα σε αυτές διακρίνουμε τους α) μεγίστης πιθανοφάνειας, β) ελαχίστης απόστασης, γ) παραλληλεπιπέδου, κ.ά.

#### 4.6 Εκτίμηση ακρίβειας

Η εκτίμηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων αποτελεί το προτελευταίο βήμα της διαδικασίας της ταξινόμησης. Με βάση το επίπεδο ακρίβειας και ανάλογα με τις απαιτήσεις της μελέτης θα γίνουν ή όχι δεκτά τα αποτελέσματα. Κρίνεται λοιπόν αρκετά σημαντικό στάδιο για την ολοκλήρωση της όλης διαδικασίας. Για το λόγο αυτό οι μέθοδοι εκτίμησής της θα πρέπει να είναι σωστά σχεδιασμένοι, έτσι ώστε το ποσοστό ακρίβειας του δείγματος των στοιχείων εικόνας ανά τάξη να αντιπροσωπεύει το συνολικό ποσοστό ακρίβειας της τάξης. Γενικά, τα παραγόμενα σφάλματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, πρώτον σε σφάλματα παράλειψης τα οποία αντιστοιχούν σε εκείνα τα στοιχεία εικόνας που ανήκουν στην τάξη που μας ενδιαφέρει αλλά ο ταξινομητής εσφαλμένα δεν τα έχει προσδιορίσει και δεύτερον σε σφάλματα πρόσθεσης τα οποία αντιστοιχούν σε στοιχεία εικόνας από άλλες τάξεις αλλά ο ταξινομητής εσφαλμένα τα ταξινομεί στην ενδιαφερόμενη τάξη. Περιληπτικά ο προσδιορισμός της ακρίβειας ακολουθεί την εξής διαδικασία: Συλλογή δειγματοληπτικών περιοχών της εικόνας από το τελικό αποτέλεσμα και σύγκριση αυτών με τις αντίστοιχες περιοχές εδάφους που αυτά αντιπροσωπεύουν. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης συνοψίζονται σε πίνακες συνάφειας (Πίνακας 4-1). Τα σφάλματα παράλειψης αναπαριστώνται στην στήλη του πίνακα και τα σφάλματα πρόσθεσης στην γραμμή αυτού. Η συνολική ακρίβεια του δείγματος προκύπτει από το σταθμισμένο μέσο των στοιχείων της διαγωνίου. Για το σχεδιασμό της δειγματοληψίας έχουν διατυπωθεί αρκετές θεωρίες, με περισσότερο ευρείας αποδοχής την τυχαία στρωματοποιημένη δειγματοληψία, τα στρώματα της οποίας είναι οι τάξεις στις οποίες αυτή διαιρείται.

**Πίνακας 4-1 Παράδειγμα πίνακα συνάφειας ακρίβειας ταξινόμησης. Τα σφάλματα παράλειψης αναπαριστώνται στη στήλη του πίνακα ενώ τα σφάλματα πρόσθεσης στη γραμμή. Η συνολική ακρίβεια του δείγματος προκύπτει από το σταθμισμένο μέσο των στοιχείων της διαγωνίου**

	Κατηγορία στο έδαφος, πραγματικότητα							Σύνολο	Σφάλματα πρόσθεσης
	1	2	3	4	5	6	7		
Δορυφορική εικόνα, Χάρτης	301	213	5	0	1	0	0	520	57.88%
	142	528	7	21	5	1	0	704	75.00%
	22	6	2068	0	0	1	0	2097	98.62%
	1	73	0	183	4	0	3	264	69.32%
	24	60	9	143	76	16	94	422	18.01%
	2	3	14	0	3	367	8	397	92.44%
	0	1	0	0	4	1	367	373	98.39%
<b>Σύνολο</b>	492	884	2103	347	93	386	472	4777	
<b>Σφάλματα παράλειψης</b>	61.18%	59.73%	98.34%	52.74%	81.72%	95.08%	77.75%		<b>Συνολική ακρίβεια 81.43%</b>

## 5 Φασματική απόκριση συνιστωσών του τοπίου

### 5.1 Εισαγωγή

Τα περισσότερα δορυφορικά συστήματα απόκτησης δεδομένων απλά καταγράφουν, σε επιλεγμένα μήκη κύματος, μεταβολές στο ποσό της ενέργειας που ανακλάται ή εκπέμπεται από αντικείμενα στην επιφάνεια της γης. Οι τιμές αυτές αναπαριστούν τη μέση τιμή που ανακλάται από τα αντικείμενα της περιοχής που αντιστοιχεί στο στιγμιαίο πεδίο όρασης του δορυφόρου. Αφού τα δορυφορικά δεδομένα απεικονιστούν σε ένα δισδιάστατο επίπεδο, σχηματίζοντας έτσι την εικόνα, ο μελετητής μπορεί να ερμηνεύσει τα φασματικά χαρακτηριστικά τους. Επειδή η ποσοτική ανάλυση της εικόνας βασίζεται στην εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων οι οποίοι δε λαμβάνουν υπόψη τα χωρικά χαρακτηριστικά αυτών, η διαδικασία της ανάλυσης στηρίζεται κύρια στα φασματικά χαρακτηριστικά. Έτσι, η αποτελεσματική χρήση των δορυφορικών δεδομένων απαιτεί πλήρη γνώση και κατανόηση των φασματικών χαρακτηριστικών των διαφόρων αντικειμένων της επιφάνειας του εδάφους και των παραγόντων που επιδρούν σ' αυτά.

Εξετάζοντας ένα συγκεκριμένο βιολογικό σύστημα είναι φανερό ότι τα φασματικά χαρακτηριστικά δεν παραμένουν στατικά αλλά παρουσιάζουν μια δυναμική τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο<sup>8</sup>. Έτσι στην ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα χωρο-χρονικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (SWAIN και DAVIS 1978). Εκτός από τα παραπάνω, τα χωρικά χαρακτηριστικά των δεδομένων λαμβάνονται υπόψη και συνεξετάζονται από το μελετητή. Η πλήρης αξιοποίηση τους είναι συνάρτηση βεβαίως της εμπειρίας του<sup>9</sup>.

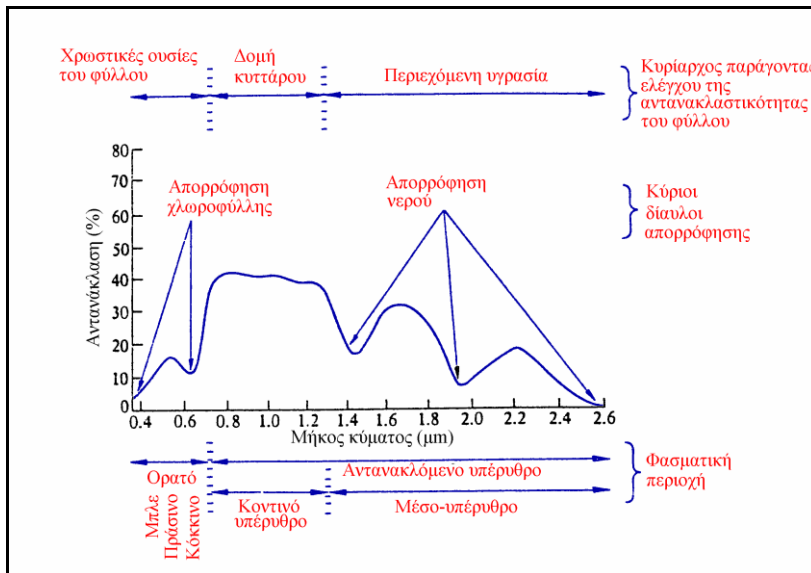
### 5.2 Φασματικά χαρακτηριστικά βλάστησης

Η φασματική απόκριση της βλάστησης, όπως και των άλλων αντικειμένων, είναι συνάρτηση του μήκους κύματος. Στο Σχήμα 5-1 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη φασματικής απόκρισης της πράσινης υγιούς βλάστησης. Οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν και ουσιαστικά διαμορφώνουν την τυπική αυτή καμπύλη σε επίπεδο φύλλου διακρίνονται α) στις χρωστικές ουσίες, β) στη δομή του φύλλου, γ) στην περιεχόμενη υγρασία κ.ά.

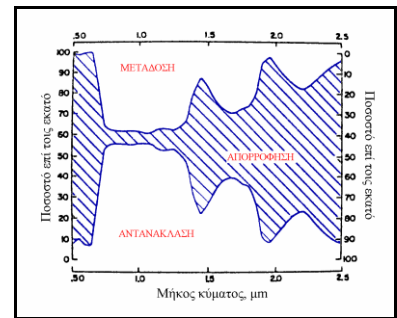
Στο Σχήμα 5-2 παρουσιάζεται γραφικά η σχέση ανάκλασης, μετάδοσης και απορρόφησης της ακτινοβολίας ενός υγιούς φύλλου συναρτήσει του μήκους κύματος. Στο τμήμα του φάσματος το οποίο αντιστοιχεί στην ορατή ακτινοβολία, γενικά η ανάκλαση της βλάστησης βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα, η ανάκλαση είναι χαμηλή στις περιοχές του μπλε και του κόκκινου μήκους κύματος ενώ στην πράσινη περιοχή η ανάκλαση είναι σχετικά υψηλότερη. Αυτή η φασματική συμπεριφορά της βλάστησης στο ορατό φάσμα συσχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη της χλωροφύλλης στα φύλλα, η οποία απορροφά έντονα την ενέργεια που αντιστοιχεί στο μπλε και κόκκινο του φάσματος και η οποία χρησιμοποιείται για τη φωτοσύνθεση. Στην περίπτωση όπου το φυτό βρίσκεται σε καταπόνηση και η παραγωγή χλωροφύλλης μειώνεται, τα φυτά απορροφούν λιγότερη ακτινοβολία που αντιστοιχεί στα κανάλια απορρόφησης της χλωροφύλλης, με αποτέλεσμα να φαίνονται κιτρινωπά. Άλλες χρωστικές ουσίες, οι οποίες βρίσκονται στα φύλλα των φυτών, είναι οι καροτίνες και ξανθοφύλλες οι οποίες είναι κίτρινες και οι ανθοκυανίνες οι οποίες είναι κόκκινες. Η επίδραση των χρωστικών αυτών δεν είναι ορατή επειδή η χλωροφύλλη κυριαρχεί στα υγιή και νεαρά φυτά και αποκρύπτει αυτές. Όμως όσο ένα φυτό προχωρά προς το γηρασμό η χλωροφύλλη τείνει να εξαφανιστεί και έτσι κυριαρχούν η επίδραση των καροτίνων και ξανθοφύλλων οι οποίες είναι υπεύθυνες για την κίτρινη απόχρωση των φύλλων την εποχή της γήρανσης. Επίσης όσο μειώνεται η παραγωγή της χλωροφύλλης, πολλά φυτικά είδη παράγουν ανθοκυανίνη προσδίδοντας στα φύλλα μια κόκκινη απόχρωση. Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζεται η φασματική απόκριση της βλάστησης ανάλογα με τις περιεχόμενες χρωστικές.

<sup>8</sup> Για παράδειγμα, κάποιο είδος καλλιέργειας, ανάλογα με την εποχή του έτους, θα παρουσιάζει διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά αφού περνάει από διάφορα επίπεδα ανάπτυξης. Επίσης το ίδιο είδος την ίδια χρονική στιγμή παρουσιάζει σε διαφορετικές περιοχές μεταβολές των φασματικών του χαρακτηριστικών, οι οποίες καθορίζονται από τις συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες της περιοχής.

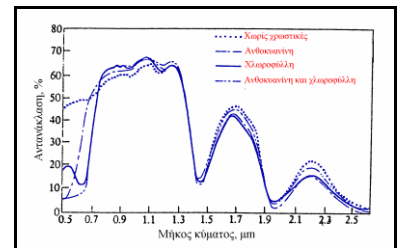
<sup>9</sup> Για παράδειγμα, εάν ένα φασματικό δείγμα, που έχει πιστοποιηθεί ότι ανήκει στη τάξη της βλάστησης, σχηματίζει ορθογώνια τμήματα στην εικόνα τότε είναι προφανές ότι η αντίστοιχη περιοχή αντιπροσωπεύει αγροτικά τεμάχια. Τέτοιου είδους χωρικά χαρακτηριστικά είναι αποτέλεσμα της χωρικής διάταξης των αντικειμένων καθώς και της φασματικής απόκρισης αυτών σε σχέση με τα γειτονικά τους αντικείμενα.



**Σχήμα 5-1** Τυπική καμπύλη φασματικής απόκρισης της πράσινης υγιούς βλάστησης, όπου παρουσιάζονται ο κύριος και ο δευτερεύων παράγοντας διαμόρφωσής της. Η καμπύλη ανακλαστικότητας της βλάστησης παρουσιάζει δυο ελάχιστα στο κόκκινο και μπλε μήκος κύματος, που αντιστοιχεί στις ζώνες απορρόφησης της χλωροφύλλης. Επίσης, παρουσιάζει τρία ελάχιστα στις ζώνες απορρόφησης του νερού (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978).



**Σχήμα 5-2** Ανάκλαση, μετάδοση και απορρόφηση ενός φύλλου συναρτήσει του μήκους κύματος (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978).

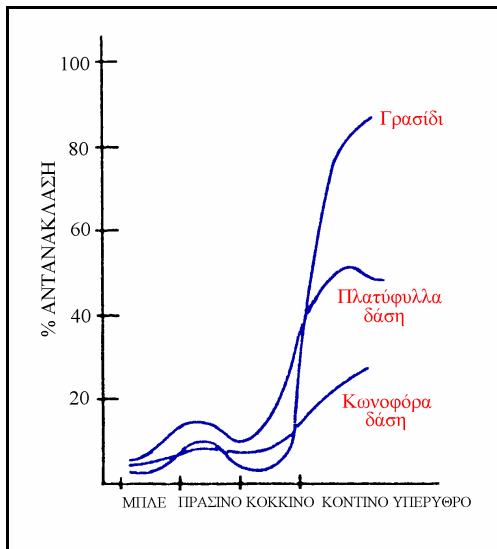


**Σχήμα 5-3** Επίδραση των χρωστικών στη φασματική απόκριση της βλάστησης (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978).

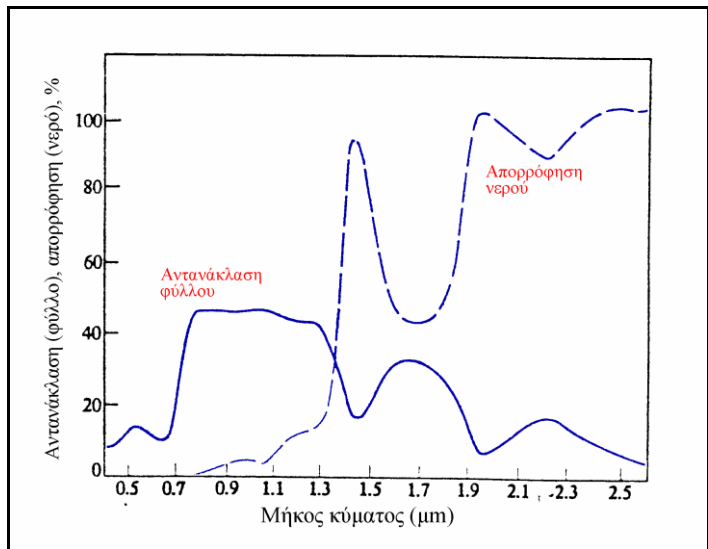
Προχωρώντας στην περιοχή του φάσματος που αντιστοιχεί στην κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία παρατηρείται μια έντονη και απότομη αύξηση της ανάκλασης της ακτινοβολίας. Γενικά το τμήμα αυτό χαρακτηρίζεται από μεγάλη ανάκλαση, μεγάλη μετάδοση και πολύ χαμηλή απορρόφηση. Κύριος παράγοντας που καθορίζει τη συμπεριφορά αυτή της βλάστησης σ' αυτό το τμήμα του φάσματος είναι η εσωτερική δομή των φύλλων των φυτών, και πιο συγκεκριμένα ο αέρας που υπάρχει στα μεσοδιαστήματα μεταξύ της κυτταρικής μεμβράνης και του σπογγώδους ιστού του μεσοφύλλου. Τα νεαρά φύλλα, τα οποία δεν έχουν αναπτυγμένη τη δομή των κυττάρων στο μεσόφυλλο παρουσιάζουν μικρότερη ανακλαστικότητα της μεσο-υπέρυθρης ακτινοβολίας απ' ό,τι τα ώριμα φύλλα. Τα φύλλα και τα στελέχη των ξηροφυτικών φυτών, παρουσιάζουν μεγάλα μεσοδιαστήματα αέρα έτσι ώστε να ανακλούν τη μεσο-υπέρυθρη ακτινοβολία. Επειδή η εσωτερική δομή των φύλλων δεν επηρεάζει σημαντικά τη φασματική απόκριση της βλάστησης στο ορατό τμήμα του φάσματος, διαφορετικά είδη φυτών ενώ παρουσιάζουν την ίδια φασματική καμπύλη στο ορατό τμήμα έχουν μεγάλες φασματικές διαφορές στο κοντινό υπέρυθρο τμήμα. Έτσι γίνεται φανερό, το πως μπορεί να γίνει διάκριση ανάμεσα σε διάφορα είδη φυτών για την παραγωγή θεματικών χαρτών βλάστησης. Στο Σχήμα 5-4 παρουσιάζονται οι φασματικές καμπύλες τριών διαφορετικών ειδών βλάστησης.

Τέλος στο μεσο-υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, η φασματική απόκριση της πράσινης βλάστησης κυριαρχείται από τα ισχυρά κανάλια απορρόφησης του νερού που εμφανίζονται στα 1.4, 1.9 και 2.7 μm. Μέγιστη ανάκλαση παρουσιάζεται στα 1.6 και 2.2 μm του φάσματος. Στο Σχήμα 5-5 φαίνεται ότι η ανάκλαση του φύλλου στο μεσο-υπέρυθρο τμήμα είναι σχεδόν αντιστρόφως ανάλογη της απορρόφησης ενός στρώματος νερού βάθους 1 μέτρου. Ο βαθμός με τον οποίο η εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια απορροφάται από τη βλάστηση σ' αυτό το τμήμα του φάσματος είναι συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας.





**Σχήμα 5-4** Διαφορετικοί τύποι βλάστησης είναι πιο διακριτοί στο κοντινό υπέρυθρο απ' ό,τι στο ορατό τμήμα (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978).



**Σχήμα 5-5** Η αντίστροφη σχέση μεταξύ της ανάκλασης του φύλλου και της απορρόφησης του νερού (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978).

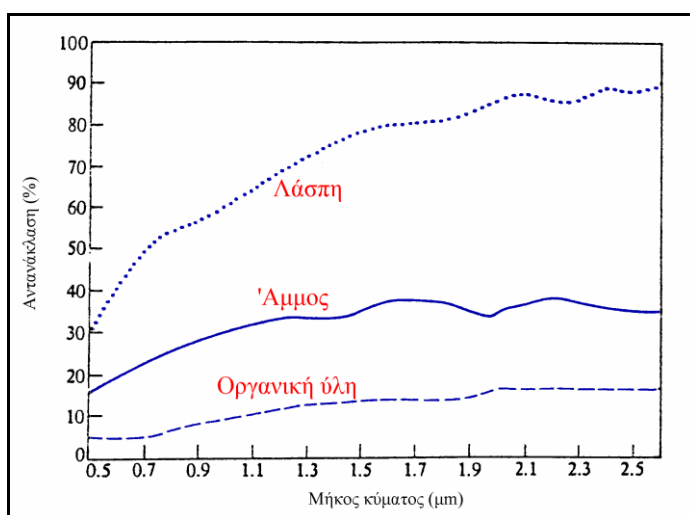
Η παραπάνω περιγραφή της φασματικής απόκρισης της βλάστησης έγινε σε επίπεδο φύλλου του φυτού, συμπεριλαμβανομένου παράγοντες που σχετίζονται με τη δομή, είδος, ηλικία κ.ά. του φυτού ως μονάδα. Η φασματική απόκριση όμως της βλάστησης σε επίπεδο φυτοκοινότητας επηρεάζεται και διαμορφώνεται ανάλογα από πλήθος παραγόντων που έχουν να κάνουν με α) τη συνολική δομή της βλάστησης όπως το ύψος, το πάχος του φυλλώματος, τον προσανατολισμό και κλίση των φύλλων κ.ά., β) τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής, γ) τον τύπο του εδάφους που υποστηρίζει τη βλάστηση, δ) τα χωρο-χρονικά δεδομένα της περιοχής κ.ά.

### 5.3 Φασματικά χαρακτηριστικά εδάφους

Μια τυπική καμπύλη φασματικής απόκρισης του εδάφους είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-6 από το οποίο αρχικά παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει το μήκος κύματος αυξάνει και η ανακλαστικότητα του, ιδιαίτερα στο ορατό και κοντινό-υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Δεν διακρίνεται καμία ιδιαίτερη πολυπλοκότητα της καμπύλης διότι η εισερχόμενη ακτινοβολία είτε θα απορροφηθεί είτε θα ανακλαστεί, δηλαδή η μετάδοση μέσω της ύλης δεν είναι παράγοντας μεταβολής της φασματικής απόκρισης όπως στην περίπτωση της βλάστησης. Παράγοντες που επηρεάζουν την ανακλαστικότητα των εδαφών είναι α) το σχετικό ποσοστό αργίλου, ιλύος και άμμου, β) η περιεχόμενη υγρασία, γ) η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, δ) τα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου, ε) η ποιοτική και ποσοτική περιεκτικότητα σε χημικά στοιχεία κ.ά.

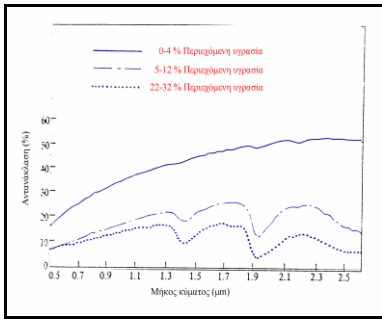
Κυρίαρχο εδαφικό χαρακτηριστικό, το οποίο επηρεάζει και διαμορφώνει αρχικά την καμπύλη φασματικής απόκρισης, είναι η σύστασή του, η οποία προσδιορίζεται από το ποσοστό της περιεχόμενης αργίλου, ιλύος και άμμου. Στα εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο δίνεται η δυνατότητα συγκράτησης μεγάλων ποσοτήτων νερού εξ' αιτίας της μεγάλης ειδικής επιφάνειας και συγχρόνως της μικρής εξάτμισης. Επίσης, επειδή τα κενά μεταξύ των σωματιδίων της αργίλου είναι πολύ μικρά, το νερό δεν αποστραγγίζεται ούτε εξατμίζεται τόσο εύκολα. Από την άλλη, σε αμμώδη εδάφη, εξαιτίας του μεγάλου σχετικά μεγέθους των συστατικών, μειώνεται η ειδική επιφάνεια και άρα η αποθηκευτική τους ικανότητα. Στην περίπτωση αυτή, ο κύριος όγκος του νερού βρίσκεται στα διάκενα που σχηματίζουν τα σωματίδια μεταξύ τους. Επειδή τα διάκενα αυτά είναι αρκετά μεγάλα το νερό αποστραγγίζεται και εξατμίζεται εύκολα. Αυτή η σχέση μεταξύ μεγέθους των εδαφικών σωματιδίων και της περιεχόμενης υγρασίας του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στη φασματική απόκριση των εδαφών, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-7, Σχήμα 5-8 και Σχήμα 5-9. Στο Σχήμα 5-7, όπου παρουσιάζεται η φασματική απόκριση ενός αμμώδους εδάφους, φαίνεται ότι υπό συνθήκες ξηρού αέρα δεν υπάρχουν σημαντικές μειώσεις στην ανάκλαση στα κανάλια απορρόφησης του νερού.

Αντίθετα, όταν τα αμμώδη εδάφη τα οποία δεν έχουν εκτεθεί σε συνθήκες ξηρού αέρα, περιέχουν σημαντικά ποσά νερού και σ' αυτά παρουσιάζονται αισθητές μειώσεις της ανάκλασης στα κανάλια απορρόφησης του νερού. Εκτός από την μείωση της ανάκλασης στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, ανάλογες μειώσεις μικρότερου όμως βαθμού παρατηρούνται και στο ορατό τμήμα του φάσματος. Ανάλογη ερμηνεία δίνεται και στο Σχήμα 5-8, δηλαδή αύξηση της υγρασίας επιφέρει γενική μείωση της ανάκλασης του εδάφους. Συγκρίνοντας όμως τις φασματικές καμπύλες στο Σχήμα 5-8 που αντιπροσωπεύουν τα φασματικά χαρακτηριστικά ενός ιλυώδους εδάφους στις ίδιες συνθήκες υγρασίας με αυτές στο Σχήμα 5-7, παρατηρούμε μια σχετικά μεγαλύτερη μείωση της ανάκλασης στις καμπύλες στο Σχήμα 5-8, και αυτό διότι το μικρό μέγεθος των σωματιδίων της ιλύος, συγκριτικά με την άμμο, επιτρέπει σημαντικά ποσά νερού να προσκολληθούν στα εδαφικά σωματίδια ακόμα και όταν το έδαφος είναι υπό συνθήκες ξηρού αέρα. Ακόμη πιο έντονο παρουσιάζεται το παραπάνω φαινόμενο στο Σχήμα 5-9 όπου παρουσιάζονται οι φασματικές καμπύλες ενός αργιλώδους εδάφους. Εκτός από την παραπάνω σχέση μεγέθους σωματιδίων-συγκράτησης νερού υπάρχει και μια δεύτερη ιδιότητα η οποία επηρεάζεται από το μέγεθος των σωματιδίων, η οποία είναι η ομαλότητα της επιφάνειας. Γενικά ισχύει ότι όσο μειώνεται το μέγεθος των σωματιδίων, η επιφάνεια του εδάφους γίνεται πιο ομαλή και περισσότερη εισερχόμενη ακτινοβολία ανακλάται.

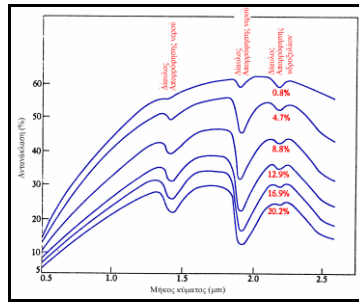


**Σχήμα 5-6 Φασματική απόκριση τριών τύπων εδάφους (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978).**

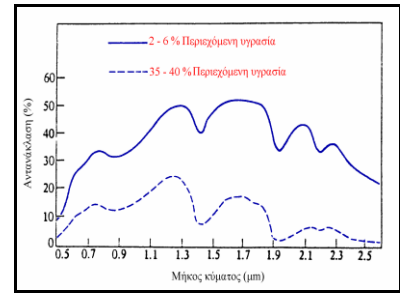
Ένας άλλος παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει της ανάκλαση των εδαφών είναι η περιεκτικότητά του σε οργανική ύλη καθώς επίσης και ο βαθμός αποσύνθεσης αυτής. Ισχύει ότι αύξηση της περιεκτικότητας σε οργανική ύλη και αύξηση του βαθμού αποσύνθεσής της τείνει να μειώσει την ανάκλαση του εδάφους, δηλαδή στην πράξη τα εδάφη αυτά τείνουν να γίνουν πιο σκουρόχρωμα. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι η σχέση οργανικής ύλης και ανάκλασης δεν είναι πάντοτε η ίδια σε όμοια επίπεδα περιεκτικότητας, διότι η σχέση αυτή επηρεάζεται από τις κλιματικές ζώνες και τις συνθήκες αποστράγγισης. Παρόμοια φασματική συμπεριφορά παρατηρείται όταν το έδαφος περιέχει διάφορα οξείδια, όπως του σιδήρου.



**Σχήμα 5-7** Τυπικές φασματικές καμπύλες για ένα αμώδες έδαφος σε 3 διαφορετικά επίπεδα υγρασίας (τροποπ. από SWAIN και DAVIS 1978).



**Σχήμα 5-8** Τυπικές φασματικές καμπύλες για ένα ιλυώδες έδαφος σε διάφορα επίπεδα υγρασίας (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978)

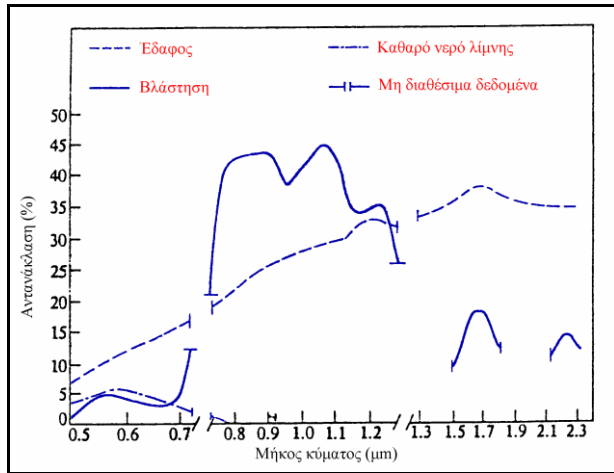


**Σχήμα 5-9** Τυπικές φασματικές καμπύλες για ένα αργιλώδες έδαφος σε 2 διαφορετικά επίπεδα υγρασίας (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978).

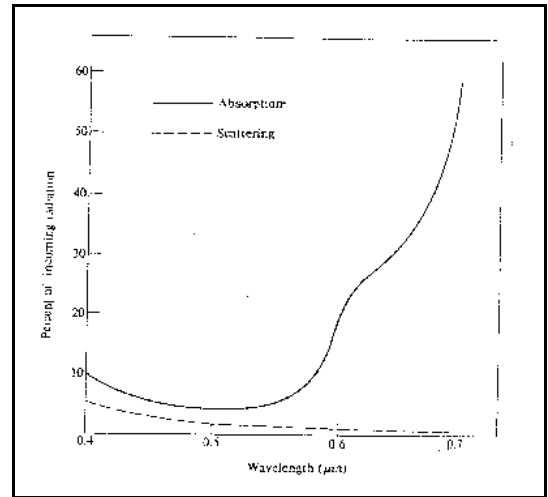
## 5.4 Φασματικά χαρακτηριστικά υδάτινων μαζών

Η καμπύλη φασματικής ανάκλασης του νερού είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-10, η οποία συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες της βλάστησης και του εδάφους, δίνει τη δυνατότητα εύκολης και αποτελεσματικής χαρτογράφησης υδάτινων μαζών ιδιαίτερα στην περιοχή του υπέρυθρου τμήματος του φάσματος. Εκτός από τις φυσικο-χημικές ιδιότητες του νερού πλήθος άλλων παραγόντων επηρεάζουν τελικά τη φασματική του απόκριση, όπως είναι η περιεκτικότητα του σε οργανικά και ανόργανα συστατικά. Αρχικά, μελετώντας την απορρόφηση και μετάδοση του καθαρού νερού (αποσταγμένου) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-11, το νερό απορροφά πολύ λίγη από την εισερχόμενη ενέργεια στα ορατά μήκη κύματος ενώ παράλληλα στα ίδια μήκη κύματος η μετάδοση είναι πολύ υψηλή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στις περιοχές όπου οι όγκοι νερού είναι σχετικά ρηχό και το νερό πολύ καθαρό, η ανάκλαση η οποία τελικά καταγράφεται στο δορυφορικό σύστημα να είναι συνάρτηση της κατάστασης του πυθμένα. Το νερό στη φύση σπάνια συναντάται πολύ καθαρό, περιέχει ποικιλία συστατικών, τα οποία είναι αιωρούμενα. Η ύπαρξη των υλικών αυτών προκαλεί διάχυση και απορρόφηση της εισερχόμενης ενέργειας προκαλώντας αισθητές μεταβολές στη φασματική απόκριση του νερού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-12. Η θολότητα που προκαλείται από τα αιωρούμενα σωματίδια είναι από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη φασματική απόκριση υδάτινων μαζών. Από μελέτες έχει εκτιμηθεί, ότι το θολό νερό έχει σημαντικά μεγαλύτερη ανάκλαση από ότι το καθαρό και ότι το μέγιστο της ανάκλασης για το θολό νερό είναι μετατοπισμένο προς μεγαλύτερα μήκη κύματος. Εκτός από τα αιωρούμενα σωματίδια, άλλη σημαντική παράμετρος είναι η συγκέντρωση της χλωροφύλλης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-13 όσο η συγκέντρωση χλωροφύλλης αυξάνει, τόσο μειώνεται το σχετικό ποσό ενέργειας που ανακλάται στα μήκη κύματος του μπλε ενώ υπάρχει μια αύξηση στα μήκη κύματος του πράσινου. Η σχέση αυτή μεταξύ συγκέντρωσης χλωροφύλλης και φασματικής απόκρισης είναι σημαντική διότι τα επίπεδα χλωροφύλλης είναι δείκτες τόσο για την πρωτογενή παραγωγικότητα όσο και για τον ευτροφισμό υδατικών οικοσυστημάτων.

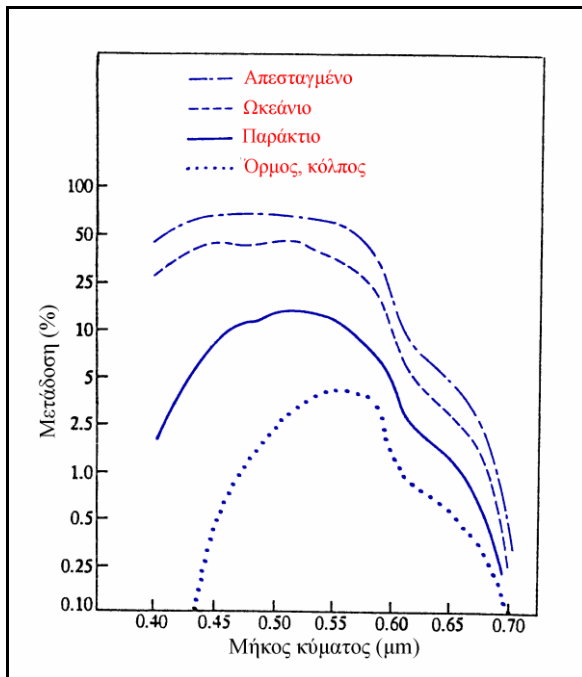
Εκτός όμως από την υγρή φάση στην οποία συναντάται το νερό μεγάλο ενδιαφέρον εκδηλώνεται στον εντοπισμό και χαρτογράφηση του χιονιού. Η κοινή πρακτική για την εκτίμηση των απορροών από περιοχές καλυπτόμενες από χιόνι ήταν οι επιτόπιες μετρήσεις για το βάθος και την περιεκτικότητα σε νερό μιας χιονοστιβάδας σε πολλές χαρακτηριστικές τοποθεσίες ή με παρατήρηση από μικρά αεροσκάφη. Μελέτες έχουν δείξει ότι το χιόνι και τα σύννεφα στο ορατό τμήματος φάσματος έχουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά, γεγονός που κάνει αδύνατο το διαχωρισμό τους. Όμως στο μεσο-υπέρυθρο τμήμα του φάσματος και ιδιαίτερα στα μήκη κύματος 1.55-1.75 και 2.10-2.35 υπάρχουν αισθητές διαφοροποιήσεις και άρα γίνεται εφικτός ο διαχωρισμός τους. Σ' αυτά τα μήκη κύματος τα σύννεφα παρουσιάζουν μεγάλη ανακλαστικότητα και φαίνονται άσπρα στην εικόνα σε αντίθεση με το χιόνι το οποίο παρουσιάζει μικρή ανακλαστικότητα και φαίνεται μαύρο.



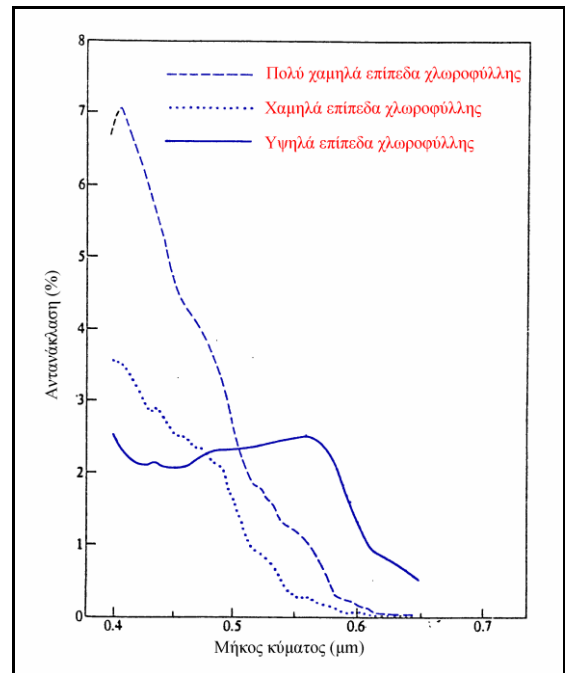
**Σχήμα 5-10 Φασματική ταυτότητα του νερού, της βλάστησης και του εδάφους (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978).**



**Σχήμα 5-11 Απορρόφηση και διάχυση του απεσταγμένου νερού (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978).**



**Σχήμα 5-12 Απορρόφηση διαφόρων τύπων νερού (τροποποιημένο από SWAIN και DAVIS 1978).**



**Σχήμα 5-13 Φασματική ανάκλαση υδάτινων μαζών με διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης χλωροφύλλης (από SWAIN και DAVIS 1978).**

## **Βιβλιογραφία**

- AFIFI, AA, V CLARK. 1990. Computer-Aided Multivariate Analysis. Second Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York. 505 p.
- BARET, F, G GUYOT, D MAJOR. 1989. Tsavi: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation. In 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS 1990, Vancouver, Canada.
- BARET, F, G GUYOT. 1991. Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment. Remote Sensing of Environment. 35:161-173.
- BARRET, EC, LF CURTIS. 1977. Environmental Remote Sensing 2: Practices and Problem., 314 p, Edward Arnold Ltd.
- CAMPBELL, JB. 1987. Introduction to Remote Sensing. The Guilford Press, 551 pp, New York.
- CHAVEZ, PS, AY KWARTENG. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat thematic mapper image data using selective principal component analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55(3):339-348.
- CLEVERS, JGPW. 1988. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. Remote Sensing of Environment, 35:53-70.
- CLEVERS, JGPW. 1989, The application of a weighted infrared vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. Remote Sensing of Environment, 29:25-37.
- CONESE, C, G MARACCHI, F MIGLIETTA, F MASELLI VM SACCO. 1988. Forest classification by principal component analyses of TM data. Int. Journal of Remote Sensing, 9(10)(11):1597-1612.
- CRIPPEN, RE. 1990. Calculating the Vegetation Index Faster. Remote Sensing of Env., 34:71-73.
- CRIST, EP, RC CICONI. 1984. Application of the tasseled cap concept to simulated thematic mapper data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 50, pp. 343-352.
- DWIRED, RS, RT SAUKAR. 1992. Principal component analysis of Landsat MSS data for delineation of terrain features. International Journal of Remote Sensing, 13(12): 2309-2318.
- ERDAS INC., 1991. Erdas Field Guide, Second Edition, printed in United States of America, Erdas Inc. Atlanta JA, 628 p.
- FUNG, T, E LEDREW. 1987. Application of principal components analysis to change detection. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.53, No.12, pp 1649-1658.
- HORD, RM. 1982. Digital Image Processing of Remotely Sensed Data. New York: Acad. Press, Inc.
- HUETE, AR. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index. SAVI. Remote Sensing of Envir., 25:295-309.
- JENSEN, JR. 1986. Introductory digital image processing - A Remote Sensing Perspective. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 377 p.
- JORDAN, CF. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. Ecology, vol. 50, pp. 663-666.
- KAUFMAN, YJ, D TANRE. 1992. Atmospherically resistant vegetation index. ARVI. for EOS-MODIS. In Proceedings IEEE Geosci. and Remote Sensing Symp. 1992, IEEE, New York, pp. 261-270.
- KAUTH, RJ, GS THOMAS. 1976. The tasseled cap – A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, Indiana, pp. 41-51.
- KRIEGLER, FJ, WA MALILA, RF NALEPKA, W RICHARDSON. 1969. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In proceedings of the Sixth Int. Symposium on Remote Sensing of Environment. University of Michigan, Ann Arbor, pp. 97-131.
- LILLESAND TM, WR KIEFER. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation, 3rd edition, 750 p, John

- Wiley and Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- LINTZ, J JR., DS SIMONETT. 1976. Remote sensing of environment., 694 p, Addison-Wesley Publishing Company.
- MARION, A. 1991. Introduction to Image Processing, Chapman and Hall, New York, 314 p.
- MATHER, PM. 1987. Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction, Chapter 6, John Willey & Sons, New York, pp. 227-231.
- NIBLACK, W. 1986. An Introduction to Digital Image Processing, Prentice-Hall Int. UK. Ltd. 215 p.
- PINTY, B, MM VERSTRAETE. 1991. GEMI: A Non-Linear Index to Monitor Global Vegetation from Satellites. *Vegetatio*, vol. 101, pp. 15-20.
- QI, J, A CHEBBOUNI, AR HUETE, YH KERR. 1994. Modified Soil Adjusted Vegetation Index. (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, 48:119-126.
- RICHARDS, JA. 1986. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo. p. 281.
- RICHARDSON, AJ, AJ EVERITT. 1992. Using spectra vegetation indices to estimate rangeland productivity. *Geocarto International*, vol. 1, pp. 63-69.
- RICHARDSON, AJ, CL WIEGAND. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 43, pp. 1541-1552.
- ROUSE, JW, RH HAAS, JA SCHELL, DW DEERING. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Remote Sensing of Environment*, 44:117-126.
- SABINS, FF, JR. 1996. Remote Sensing. Principles and Interpretation, Third Edition, W. H. Freeman and Company, New York. 449 p.
- SADER, SA, RB WAIDE, WT LAWRENCE, AT JOYCE. 1989. Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 28:143-156.
- SLATER, PN. 1975. Photographic Systems for Remote Sensing. Chapter 6 in the *Manual of Remote Sensing*, R. N., Falls Church, Va.: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 1.
- SPANNER, MA, LL PIERIE, DL PETERSON, SW RUNNING. 1990. Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index. The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 19(1):95-111.
- SWAIN, PH, SM DAVIS. 1978. Remote Sensing: The Quantitative Approach, McGraw-Hill, Inc, 396 p.
- WIEGAND, CL, AJ RICHARDSON, DE ESCOBAR, AH GERBEMAN. 1991. Vegetation Indices in Crop Assessments. *Remote Sensing of Environment*, 35: 105-119.
- ΚΑΡΤΕΡΗΣ, Μ. 1993. Τηλεπισκόπηση Φυσικών Πόρων και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Δασικής Διαχειριστικής και Τηλεπισκόπησης.
- ΚΡΗΤΙΚΟΣ, Γ, Θ ΚΑΛΑΠΑΝΙΔΑΣ. 1983. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας και εφαρμογές στην τηλεανίχνευση. Αθήνα 1983.