

# Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης

Θεωρία και Εφαρμογές

Ισαάκ Παρχαρίδης



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά  
Συγγράμματα και Βοηθήματα  
[www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)

**HEALLINK**  
Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΣΥΜΠΡΟΪΚΤΟ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

**Τίτλος Ηλεκτρονικού Συγγράμματος**  
**Αρχές δορυφορικής Τηλεπισκόπησης**  
**Θεωρία και εφαρμογές**

**Συγγραφέας**

*Ισαάκ Παρχαρίδης*

**Κριτικός αναγνώστης**

*Κωνσταντίνος Νικολακόπουλος*

**Συντελεστές έκδοσης**

Γλωσσική Επιμέλεια: *Νερίνα Κιοσέογλου*

Γραφιστική Επιμέλεια: *Θανάσης Μουσιάδης*

Τεχνική Επεξεργασία: *Θανάσης Μουσιάδης*

ISBN: 978-960-603-443-5

Copyright © ΣΕΑΒ, 2015



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή 3.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/gr/>

**(Επιλέξτε την άδεια που επιθυμείτε για το Σύγγραμμά σας και διαγράψτε αυτή που δεν συμβαδίζει)**

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

[www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)

# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	i
Πίνακας Συνοπτομεύσεων.....	i
Ευρετήριο Ελληνογλωσσων Και Ξενογλωσσων Ορων .....	i
Πρόλογος.....	4
1. Εισαγωγή .....	5
1.1 Ορισμοί.....	6
1.2 Ιστορική διαδρομή .....	7
Βιβλιογραφικές αναφορές .....	14
2. Βασικές Αρχές Τηλεπισκόπησης.....	15
2.1 Εισαγωγή – Νόμοι ακτινοβολίας.....	15
2.2 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία – Τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος .....	18
2.2.2 Υπεριώδης ακτινοβολία .....	19
2.2.3 Το φάσμα του ορατού .....	20
2.2.4 Το υπέρυθρο φάσμα .....	21
2.2.5 Μικροκυματική ενέργεια .....	21
2.3 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα.....	22
2.4 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη .....	24
2.4.1 Ανάκλαση .....	24
2.4.2 Μετάδοση.....	27
2.4.3 Απορρόφηση .....	27
2.4.4 Φθορισμός.....	27
2.4.5 Πόλωση.....	28
2.4.6 Ανακλαστικότητα.....	29
2.5 Φασματική απόκριση των αντικειμένων – Φασματικές ταυτότητες .....	29
2.6 Ηλιακή ακτινοβολία και γήινο περιβάλλον.....	31
Βιβλιογραφικές αναφορές .....	33
3. Ψηφιακή ανάλυση εικόνας .....	34
3.1 Ψηφιδωτά (raster) δεδομένα.....	35
3.2 Χαρακτηριστικά ψηφιακής εικόνας .....	36
Βιβλιογραφικές αναφορές .....	39
4. Όργανα καταγραφής και δορυφόροι παρατήρησης της Γης.....	41
4.1 Βασικά χαρακτηριστικά των οργάνων καταγραφής .....	42
4.2 Οπτικά δορυφορικά συστήματα .....	48

4.3 Ενεργά Δορυφορικά Συστήματα (Ραντάρ).....	56
4.4 Υπερφασματικοί δορυφόροι.....	58
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	65
5. Ανάλυση οπτικών δορυφορικών εικόνων.....	66
5.1 Αποκατάσταση ή Προεπεξεργασία εικόνας.....	66
5.1.1 Ατμοσφαιρικές διορθώσεις.....	66
5.1.2 Γεωμετρικές διορθώσεις.....	67
5.2 Βελτίωση εικόνας.....	70
5.3 Ταξινόμηση εικόνας.....	88
5.3.1 Μη ελεγχόμενη ταξινόμηση.....	90
5.3.2 Ελεγχόμενη ταξινόμηση.....	93
5.4 Αρχές ερμηνείας δορυφορικών εικόνων και ψηφιακών αεροφωτογραφιών.....	97
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	103
6. Θερμική ακτινοβολία στην τηλεπισκόπηση.....	106
6.1. Γενικά.....	106
6.2 Θερμικοί σαρωτές.....	108
6.3 Βασικές ιδιότητες της θερμικής ενέργειας.....	111
6.4. Ερμηνεία των θερμικών εικόνων.....	112
6.5 Χρήσεις των θερμικών-υπέρυθρων εικόνων.....	115
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	116
7. Η τηλεπισκόπηση με τη χρήση της μικροκυματικής ακτινοβολίας.....	118
7.1 Εισαγωγή.....	118
7.2 Βασικές αρχές Εικονοληπτικών Radar.....	118
7.3. Γεωμετρία λήψης – Διαχωριστική ικανότητα συστημάτων SAR.....	121
7.4 Εφαρμογές των εικόνων SAR.....	128
7.5 Ψηφιακή επεξεργασία δεδομένων SAR.....	137
7.6 Συμβολομετρία Radar.....	142
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	156
8. Περιπτώσεις Εφαρμογών Τηλεπισκόπησης.....	158
8.1 Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε υγρασία του εδάφους με τη χρήση ενεργητικών και παθητικών αισθητήρων από το Διάστημα.....	158
8.2 Ανίχνευση πετρελαιοκηλίδων για την προστασία του περιβάλλοντος και της θαλάσσιας βιοποικιλότητας.....	159
8.3 Δημιουργία ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.....	161

8.4 Ανίχνευση ορυκτών κοιτασμάτων με τη χρήση υπερφασματικών δεδομένων .....	163
8.5 Χαρτογράφηση της κάλυψης/χρήσης γης .....	165
8.6 Παρακολούθηση και εκτίμηση της εδαφικής παραμόρφωσης.....	168
8.7 Καταγραφή και εκτίμηση των βλαβών μετά από σεισμό .....	171
8.8 Ανίχνευση και χαρτογράφηση αρχαιολογικών χώρων .....	176
8.9 Παρατήρηση ενεργών ηφαιστείων με τη χρήση θερμικής ακτινοβολίας .....	179
Βιβλιογραφικές αναφορές .....	182

## Πίνακας Σύντομεύσεων

ALI: Advanced Land Imager  
ASAR: Advanced Synthetic Aperture radar  
AATSR: Advanced Along-Track Scanning Radiometer  
ATRS: Along-Track Scanning Radiometer  
ASTER: Advanced Spaceborne thermal Emission and Reflection Radiometer  
AVHRR: Advanced very High resolution Radiometer  
ESA: European Space Agency  
BRDF: Bidirectional Reflection Distribution Function  
B&W: Black and White  
CERES: Clouds and the earth's Radiant Energy System  
CNES: Centre National d' Etudes Spatiales  
EMR: Electromagnetic Radiation  
EMS: Electromagnetic Spectrum  
ERTS: Earth Resources Technology Satellite  
ETM: Enhanced Thematic Mapper  
EW: Extra Wide Swath  
EUMETSAT: European Meteorological Satellite Organization  
DEM: Digital Elevation Model  
DInSAR: Differential Synthetic Aperture Radar  
DN: Digital Number  
DSM: Digital Surface Model  
GMES: Global Monitoring and Environment Security  
GCPs: Ground Control Points  
HH: Horizontal-Horizontal  
IFOV: Instantaneous Field of View  
IR: Infrared  
InSAR: Interferometric synthetic Aperture Radar  
IHS: Intensity-Hue-Saturation  
IW: Interferometric Wide Swath  
MODIS: Moderate resolution Imaging Spectroradiometer  
MOPITT: Measurement of Pollution in the Troposphere  
MS: Multispectral  
MSI: MultiSpectral Imager  
MSS: Multispectral Scanner  
MISR: Multiangle Imaging Spectro-Radiometer  
NASA: National Aeronautics and Space Administration  
NDVI: Normalized Differentiate Vegetation Index  
NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration  
OLI: Operational Land Imager  
PSI: Permanent or Persistent SAR Interferometry  
RADAR: Radio Detection and Ranging  
RGB: Red-Green-Blue  
RBV: Return Beam Vidicon  
SAR: Synthetic Aperture Radar  
SBAS: Small Baseline SAR  
SM: Stripmap  
S/N: Signal/Noise

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission  
SWIR: Short-wavelength Infrared  
TIR: Thermal Infrared  
TIRS: Thermal Infrared Scanner  
USGS: United States Geological Survey  
VG: Vegetation Index  
VNIR: Visible Near Infrared  
VV: Vertical-Vertical

## Ευρετήριο Ελληνογλωσσών Και Ξενογλωσσών Όρων

Τηλεπισκόπηση	Remote Sensing
Γεωπληροφορική	Geoinformation
Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	Electromagnetic radiation
Μήκος κύματος	Wavelength
Συχνότητα	Frequency
Διάδοση	Transmittance
Κοντινό υπέρυθρο	Near Infrared
Ενδιάμεσο (μέσο) υπέρυθρο	Middle Infrared
Μακρινό υπέρυθρο	Far infrared
Ανακλώμενο υπέρυθρο	Reflected infrared
Θερμικό υπέρυθρο	Thermal infrared
Υπεριώδες	Ultraviolet
Ορατό	Visible
Υπέρυθρο	Infrared
Μικροκυματικό	Microwave
Προσθετικά πρωτεύοντα χρώματα	Additive primary colors
Αφαιρετικά πρωτεύοντα χρώματα	Subtractive primary colors
Συνάρτηση κατανομής αμφίδρομης συνάρτησης	Bidiirectional reflectance distribution function
Διάχυση	Scattering
Απορρόφηση	Absorption
Ανάκλαση	Reflection
Μετάδοση	Trasmission
Φασματική υπογραφή	Spectral signature
Φασματική απόκριση	Spectral response
Καμπύλες φασματικής απόκρισης	Spectral reflectance curves
Φασματική ανάκλαση	Albedo
Ατμοσφαιρικά παράθυρα	Atmospheric windows
Αναλογικό σε ψηφιακό	Analog to Digital
Ψηφιδωτά δεδομένα	Raster
Επέκταση ιστογράμματος	Histogram stretch
Τυπική απόκλιση	Standard deviation
Προ-επεξεργασία	Preprocessing
Βελτίωση εικόνας	Image enhancement
Ταξινόμηση εικόνας	Image classification
Αισθητήρας	Sensor
Πολυφασματικά δεδομένα	Multispectral data
Πολυφασματικός αισθητήρας	Multispectral sensor
Χωρική, ραδιομετρική, φασματική, χρονική ικανότητα	Spatial, radiometric, spectral, temporal resolution
Σαρωτής	Scanner
Πολυφασματικός σαρωτής	Multispectral scanner
Υπερφασματικά δεδομένα	Hyperspectral data
Εγγραφή εικόνας σε εικόνα	Image coregistration
Σημεία εδαφικού ελέγχου	Ground Control Points
Ιδιοτιμές	Eigenvalues
Ιδιοδιανύσματα	Eigenvectors



Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών	Principal Component Analysis
Αλγόριθμος ελάχιστης απόστασης	Minimum distance classifier
Αλγόριθμος μέγιστης πιθανοφάνειας	Maximum likelihood

## Πρόλογος

Η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης είναι πολύ ευρεία τόσο ως προς τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται όσο και τις τεχνικές επεξεργασίας τους και τις εφαρμογές, ενώ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ταχύτατη εξέλιξή της. Το σύγγραμμα αυτό στόχο έχει να παρέχει γνώση και κατανόηση των βασικών εννοιών, των αρχών και των εφαρμογών της τηλεπισκόπησης.

Παρέχει παραδείγματα εφαρμογών των βασικών αρχών σε μια ποικιλία αντικειμένων της τηλεπισκόπησης, που συνδέονται κυρίως με την επιλογή των δεδομένων, τη συλλογή τους, την ανάλυση και ερμηνεία. Επίσης επιχειρείται να προσδιοριστούν τα όρια της Τηλεπισκόπησης ως προς τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της. Τα βασικά αντικείμενα του συγγράμματος αφορούν: εισαγωγή στην επιστήμη με στοιχεία ιστορικά, τον ρόλο της Τηλεπισκόπησης στη μελέτη του περιβάλλοντος, τις φυσικές αρχές, τα παθητικά και ενεργητικά όργανα καταγραφής και τα χαρακτηριστικά τους, τα βασικά στάδια προεπεξεργασίας, επεξεργασίας και ερμηνείας. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών τόσο στο φυσικό όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον μέσα από την ερευνητική δραστηριότητα του συγγραφέα.

Στο τέλος ορισμένων κεφαλαίων υπάρχουν πηγές αναζήτησης πρόσθετης γνώσης, καθώς επίσης και τεστ με ερωτήσεις για την αυτοαξιολόγηση του φοιτητή.

Το βιβλίο αυτό, με βάση το περιεχόμενό του, καταφέρνει να διατηρήσει μια ισορροπία μεταξύ της θεωρίας, των βασικών εργαλείων επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων και των εφαρμογών της.

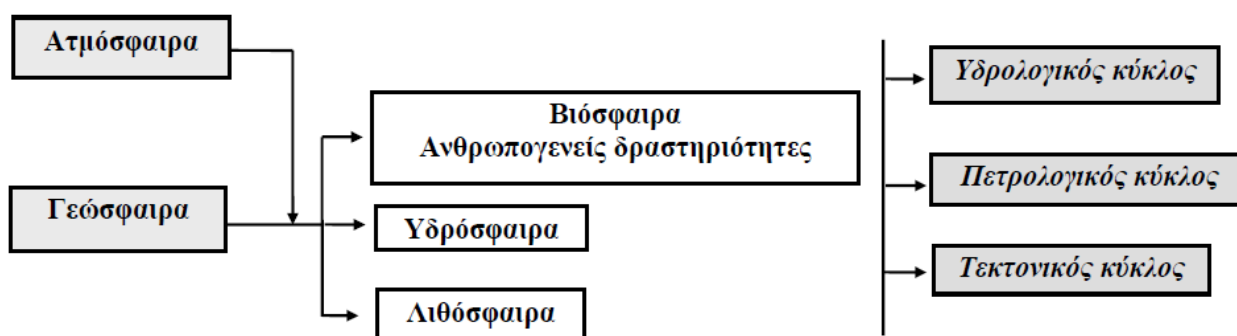
Τέλος, πρέπει να αναφερθεί η συμβολή των Χρ. Μπουντζουκλή καθώς και προπτυχιακών και μεταπτυχιακών φοιτητών που τα τελευταία χρόνια συμμετείχαν ή συνεργάστηκαν με την ομάδα Τηλεπισκόπησης του τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου στην παραγωγή του συγγράμματος. Τέλος σημαντική ήταν η συνεισφορά της κ. Νερίνας Κιοσέογλου στην γλωσσική επιμέλεια του συγγράμματος και των Ν. Γκισάκη και Θ. Μουσιάδη στην τεχνική επεξεργασία.

# 1. Εισαγωγή

Σαν σύνολο ο πλανήτης Γη διαμορφώνει ένα δυναμικό περιβάλλον, το οποίο είναι δυνατόν να διακριθεί σε δύο μεγάλα τμήματα που είναι η ατμόσφαιρα και η γεώσφαιρα. Τα δύο αυτά τμήματα βρίσκονται σε άμεση εξάρτηση και οι μεταβολές του ενός έχει επίδραση στο άλλο.

Η γεώσφαιρα, επάνω στην οποία ζούμε και λειτουργούμε, μπορεί να διακριθεί σε επιμέρους περιβάλλοντα που διαμορφώνονται από το στερεό τμήμα της Γης (λιθόσφαιρα), τις υδάτινες μάζες (υδρόσφαιρα), τις φυσικές δραστηριότητες του φυτικού και ζωικού βασιλείου (βιόσφαιρα) και τις τεχνικές-τεχνολογικές δραστηριότητες, κατά κύριο λόγο ανθρωπογενούς προέλευσης.

Το σύνολο όλων αυτών των επιμέρους σύνθετων περιβαλλόντων τείνει πάντα και πρέπει να βρίσκεται σε ισορροπία αφού οι ανταλλαγές (ενέργειας και ύλης), κατά κύριο λόγο κυκλικές, και οι αλληλοεπιδράσεις καθορίζουν μια εσωτερική δυναμική, σε αντίθεση με την εξωτερική δυναμική που καθορίζεται από το σύνολο του πλανητικού συστήματος.



Εικόνα1.1 Σχηματική παράσταση των περιβαλλόντων της Γης.

Η έρευνα και μελέτη των περιβαλλόντων αυτών σήμερα είναι συνδεδεμένη με εφαρμογές που έχουν άμεση σχέση με την επιβίωση του ανθρώπου τόσο σε βασικά όσο και σε ποιοτικά στοιχεία.

Το γεγονός απαιτεί από τους ειδικούς επιστήμονες:

- καλύτερη προσέγγιση του αντικειμένου.
- μεγαλύτερη ταχύτητα ολοκλήρωσης των εργασιών.
- διευρυμένη συγκριτική παρατήρηση.
- ικανή μείωση του συνολικού κόστους.

Οι λόγοι αυτοί οδήγησαν τις τελευταίες δεκαετίες τους ερευνητές ή μελετητές στην εύρεση και ανάπτυξη έμμεσων τρόπων παρατήρησης καταγραφής και αξιολόγησης, οι σημαντικότεροι από τους οποίους έχουν σχέση με:

- Παρατηρήσεις και καταγραφές στοιχείων από απόσταση.
- Στατιστική ανάλυση και βάσεις δεδομένων για σύγκριση και συσχετισμό.

Οι τρόποι αυτοί, όπως είναι φυσικό, συνεπικουρούν μόνο και με κανέναν τρόπο δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τη βεβαιότητα (βαθμό αληθείας) των άμεσων αποτελεσμάτων που δίνει η υπαίθρια (επί τόπου παρατήρηση) και εργαστηριακή έρευνα (μικροσκοπική και αναλυτική).

Οι παρατηρήσεις και καταγραφές στοιχείων από απόσταση (τηλεμέθοδοι), στηρίζονται σε δύο βασικά στοιχεία, που είναι:

- Οι διαφορετικές φυσικές ιδιότητες των συνθηκών του περιβάλλοντος.
- Η δυνατότητα σύγκρισης σε διαφορετικούς χρόνους εποχιακούς ή/και ετήσιους (η Γη αποτελεί ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο σύνολο) και κάλυψης μεγάλων περιοχών.

Η μελέτη και ανάλυση εικόνων της επιφάνειας της Γης από απόσταση, με αεροπλάνα ή δορυφόρους, σε φωτογραφική ή ψηφιακή μορφή, αποτελεί σήμερα και για πολλές επιστήμες μία από τις πλέον χρήσιμες μεθόδους, με μεγάλη προσέγγιση και πολυδιάστατη πληροφόρηση.

## 1.1 Ορισμοί

Η τηλεπισκόπηση (Remote sensing, teledetection, telerilevamento) ορίζεται ως η τεχνική απόκτησης πληροφοριών για αντικείμενα που βρίσκονται στη γήινη επιφάνεια, μέσα από την ανάλυση δεδομένων που συλλέγονται από ειδικά όργανα τα οποία όμως δεν έχουν φυσική επαφή με τα αντικείμενα. Έτσι, η τηλεπισκόπηση μπορεί να αποδοθεί και ως η αναγνώριση ενός αντικειμένου από απόσταση (Avery & Berlin, 1992).

Η τηλεπισκόπηση διαφέρει από την επιτόπια παρατήρηση ή μέτρηση στο ότι στη δεύτερη το ειδικό όργανο παρατήρησης είναι μέσα ή εφάπτεται του αντικειμένου που μετράμε ή ερευνάμε, όπως π.χ. το θερμόμετρο.

Οι Lillesand, Kiefer και Chirman (2003) ορίζουν την Τηλεπισκόπηση ως την επιστήμη και τέχνη του να επιτυγχάνουμε πληροφόρηση για αντικείμενο, περιοχή ή φαινόμενο, από την ανάλυση δεδομένων που αποκτήθηκαν από ένα μέσο το οποίο δεν είναι σε επαφή με το αντικείμενο, την περιοχή ή το φαινόμενο που εξετάζεται.

Ο Mather (1999) δίνει έναν ορισμό με στενότερη έννοια, λέγοντας ότι η τηλεπισκόπηση του περιβάλλοντος περιλαμβάνει τη μέτρηση και αποτύπωση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης και την ατμόσφαιρα. Η μέτρηση και αποτύπωση γίνεται από ένα σημείο πάνω από την επιφάνεια της Γης και ακολουθεί ο συσχετισμός αυτών των μετρήσεων με τη φύση και την κατανομή των υλικών της επιφάνειας της Γης και των συνθηκών της ατμόσφαιρας.

Ο Gupta (1991) αναφέρει ότι τηλεπισκόπηση σημαίνει απόκτηση πληροφοριών για ένα αντικείμενο χωρίς να υπάρχει άμεση επαφή με αυτό. Για αυτόν η τηλεπισκόπηση έχει διττή διάσταση, που περιλαμβάνει τις ακόλουθες δύο παραμέτρους οι οποίες βρίσκονται σε άμεση σχέση μεταξύ τους:

- την τεχνική απόκτησης δεδομένων με τη βοήθεια ενός μέσου που βρίσκεται σε απόσταση από το αντικείμενο, και
- την ανάλυση των δεδομένων για την ερμηνεία του αντικειμένου.

Η έννοια της Τηλεπισκόπησης, στο ευρύτερο ορισμό της, μπορεί να συμπεριλάβει και ακουστικά (ή ηχητικά) κύματα που παράγονται κάτω από την επιφάνεια του νερού τα οποία μπορεί να καταγράφονται από ειδικούς αισθητήρες.

Τα δε βασικά στάδια του συστήματος της τηλεπισκόπησης περιλαμβάνουν:

- Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, (πηγή ο ήλιος ή αυτοεκπομπή)
- Μετάδοση ενέργειας από την πηγή προς την επιφάνεια της Γης, καθώς και απορρόφηση και σκέδαση από την ανώτερη ατμόσφαιρα
- Αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την επιφάνεια της Γης: αντανάκλαση και εκπομπή
- Μετάδοση της ακτινοβολίας από την επιφάνεια προς τον απομακρυσμένο αισθητήρα
- Δεδομένα εξόδου αισθητήρα
- Μετάδοση δεδομένων, επεξεργασία και ανάλυση

Η τηλεπισκόπηση είναι μια σύγχρονη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με έναν στόχο μέσα από την ανάλυση δεδομένων που αποκτήθηκαν σε σχέση με τον στόχο από απόσταση. Αποτελείται από τρία βασικά μέρη, που είναι:

- οι στόχοι – αντικείμενα ή φαινόμενα σε μια περιοχή,
- η απόκτηση δεδομένων – μέσω ορισμένων μέσων,
- και η ανάλυση των δεδομένων με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών και υπολογιστών με υψηλές προδιαγραφές.

Αυτός ο ορισμός είναι τόσο ευρύς ώστε περιλαμβάνει ακόμα και το οπτικό σύστημα του ανθρώπινου ματιού, σόναρ βυθομέτρηση του πυθμένα της θάλασσας, το υπερηχογράφημα και ακτινογραφίες που χρησιμοποιούνται στις ιατρικές επιστήμες, λείζερ διερεύνηση των ατμοσφαιρικών σωματιδίων . Ο στόχος μπορεί να είναι τόσο μεγάλος όσο η Γη, το Φεγγάρι και άλλοι πλανήτες, ή τόσο μικρός όσο τα βιολογικά κύτταρα που μπορεί να δει μόνο μέσα από τα μικροσκόπια.

Είναι βασικό συστατικό της Γεωπληροφορικής, συμβάλλοντας στη μέτρηση και χαρτογράφηση της επιφάνειας της Γης. Προσφέρει ποσοτικές και ποιοτικές πληροφορίες και γνώση σχετικά αντικείμενα, την κατανομή τους στον χώρο και τον χρόνο καθώς και χωρικές και χρονικές σχέσεις τους, κ.λπ. Σε αυτό το βιβλίο, θα παρουσιάσουμε μερικά από τα σημαντικότερα συστήματα τηλεπισκόπησης για τη χαρτογράφηση της Γης.

Η απόκτηση των δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί από πλατφόρμες όπως αεροσκάφη, δορυφόρους, μπαλόνια, ρουκέτες, διαστημικά λεωφορεία, κ.λπ. εντός ή επί αυτών, όπου χρησιμοποιούνται αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων. Αισθητήρες περιλαμβάνουν εναέριες φωτογραφικές μηχανές και μη φωτογραφικά μέσα, όπως ραδιόμετρα, ηλεκτρο-οπτικοί σαρωτές, συστήματα ραντάρ, κ.λπ. Η πλατφόρμα και οι αισθητήρες θα συζητηθούν λεπτομερώς αργότερα.

Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια ανακλάται, μεταδίδεται ή εκπέμπεται από τον στόχο και καταγράφεται από τον αισθητήρα. Επειδή η ενέργεια ταξιδεύει μέσω της ατμόσφαιρας της Γης, έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε το σήμα μεταξύ του στόχου και του αισθητήρα να διαφέρουν. Οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας στην τηλεπισκόπηση θα εξεταστούν αργότερα.

Μόλις αποκτήσουμε δεδομένα εικόνας, χρειαζόμαστε μεθόδους για την ερμηνεία και ανάλυση των εικόνων. Με τη γνώση «τι» πληροφορίες αναμένουμε να αποκομίσουμε από την τηλεπισκόπηση, θα εξετάσουμε τις μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ληφθεί η επιθυμητή πληροφορία. Μας ενδιαφέρει το «πώς» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες μεθόδους η εξ αποστάσεως ανάλυση δεδομένων τηλεπισκόπησης.

Μια βασική χρήση της τηλεπισκόπησης είναι να επεκτείνει την οπτική ικανότητά μας. Επιπλέον, η τηλεπισκόπηση μπορεί να βελτιώσει τη μνήμη μας, επειδή ο εγκέφαλός μας τείνει να μη θυμάται κάθε λεπτομέρεια σχετικά με το τι βλέπουμε. Με τη χρήση εικόνων τηλεπισκόπησης, μπορούμε να κάνουμε πολλά περισσότερα όπως για παράδειγμα να μετρήσουμε και να χαρτογραφήσουμε τις χωρικές διαστάσεις των αντικειμένων από εικόνες τηλεπισκόπησης. Επιπλέον, χρησιμοποιούμε την τεχνική της τηλεπισκόπησης μέσω των δεδομένων που παράγει για την παρακολούθηση της δυναμικής των φαινομένων στην επιφάνεια της Γης. Αυτά περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης και της ποιότητας του περιβάλλοντος, τη μέτρηση της θερμοκρασίας των διαφόρων αντικειμένων, την ανίχνευση και τον εντοπισμό των επιπτώσεων που προκαλούνται από πυρκαγιά, πλημμύρα, ηφαίστεια, σεισμούς κλπ.

## 1.2 Ιστορική διαδρομή

Από την αρχή της ύπαρξής του, το ανθρώπινο είδος είχε τη δίψα να ανακαλύψει το μη ορατό, να δει τι υπάρχει κάτω από την επιφάνεια της Γης και να προχωρήσει όσο το δυνατόν περισσότερο στο μυστήριο του Διαστήματος. Οι προσπάθειες για την επίτευξη αυτού του σκοπού ήταν συνεχείς και πολλές στην ιστορία της ανθρωπότητας. Στις ιστορικές αναφορές έχουν παρατηρηθεί ενέργειες και φράσεις οι οποίες δείχνουν κάποιες από τις προσπάθειες που έκανε ο άνθρωπος, για να ικανοποιήσει αυτή την ανάγκη

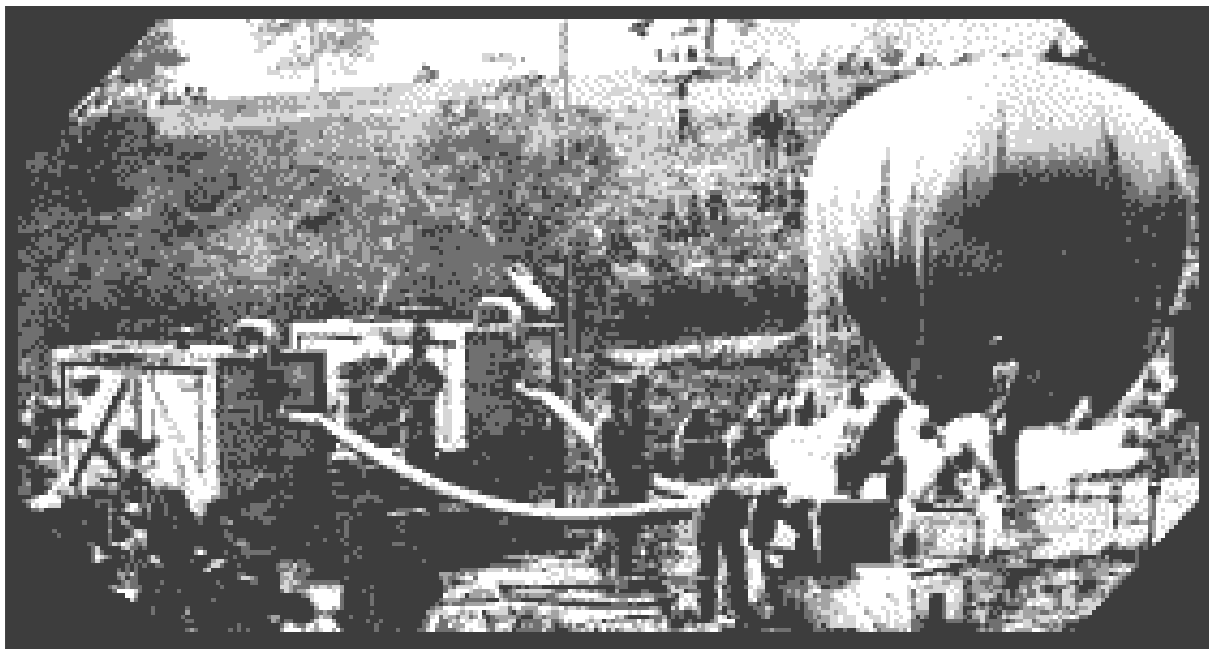
Παρακάτω αναφέρονται μερικοί από τους σημαντικότερους σταθμούς στην ιστορία και μετέπειτα εξέλιξη της επιστήμης της τηλεπισκόπησης.

α) Γαλιλαίος, 1609: Μέσα από το μικρό του τηλεσκόπιο, ο Γαλιλαίος παρατήρησε τον Ήλιο, όπως και κάποιες ατέλειες που υπήρχαν στην επιφάνεια της Σελήνης. Η πιο εντυπωσιακή ανακάλυψή του όμως ήταν οι δορυφόροι που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τον πλανήτη Δία, η οποία ανέτρεπε τον μύθο ότι η Γη ήταν το κέντρο του σύμπαντος και ότι όλα τα αντικείμενα περιστρέφονταν γύρω από αυτήν. Ο Γαλιλαίος πραγματοποίησε προσεκτικές παρατηρήσεις και μετρήσεις, τις οποίες κατέγραψε με λεπτομερείς περιγραφές και σχέδια, δίνοντας έτσι τη μόνη καταγραφείσα μέθοδο για περισσότερα από 200 χρόνια.

β) Η πρώτη αεροφωτογραφία, 1859: Ο Gaspard Felix Tournachon, επίσης γνωστός και ως Nadar, ήταν ένας διάσημος Γάλλος φωτογράφος και είχε ταυτόχρονα σαν χόμπι να πετάει με αερόστατα. Μέσα στο αερόστατο που χρησιμοποιούσε, πάντοτε μετέφερε μαζί και τη φωτογραφική του κάμερα, έχοντας σαν στόχο να επιθεωρεί το έδαφος. Αν και ο Nadar έθεσε τις βάσεις για τη μελλοντική τηλεπισκόπηση, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα, δεν είχε απόλυτη επιτυχία στην από αέρος παρατήρηση, διότι οι φωτογραφικές του παρατηρήσεις τράβηξαν την προσοχή του στρατού.

γ) Το αμερικανικό σώμα στρατού με αερόστατο, 1862: Τον Απρίλιο του 1861 ο καθηγητής Thaddeus Lowe πήγε με ένα αερόστατο κοντά στο Σινσινάτι του Οχάιο, με στόχο του να πραγματοποιήσει καιρικές παρατηρήσεις. Δυστυχώς, δυνατοί άνεμοι τον μετέφεραν μέχρι τη Νότια Καρολίνα, όπου συνελήφθη σαν κατάσκοπος της Ένωσης. Αφού τελικά απελευθερώθηκε, άρχισε να πιστεύει στην ιδέα ότι αερόστατα δεμένα στο έδαφος θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμα στην εξερεύνηση της επιφάνειας της Γης.

Αφού μελέτησε την πρόταση αυτή, ο πρόεδρος Lincoln συμφώνησε και ενέκρινε το πρώτο αμερικανικό σώμα στρατού με αερόστατο, με υπεύθυνο τον καθηγητή Lowe (Εικόνα 5.3). Παρ' ότι έδωσε ένα ισχυρό πλεονέκτημα στον στρατό των Βορείων στον αμερικανικό Εμφύλιο, η μονάδα τέθηκε εκτός λειτουργίας το 1863, διότι είχε την τάση να τραβά τα πυρά των εχθρών. Στα μέσα του 19ου αιώνα για πρώτη φορά φωτογράφοι ανέβηκαν σε αερόστατο για να πάρουν πανοραμικές όψεις πόλεων.



**Εικόνα 1.2** Αερόστατο που χρησιμοποιήθηκε για λήψη αεροφωτογραφιών.

δ) Φωτογραφίες από αεροπλάνο, 1909: Ο Wilbur Wright ήταν ο πιλότος που συμμετείχε σε δύο σημαντικά γεγονότα για την ιστορία της τηλεπισκόπησης. Οι πρώτες φωτογραφίες από αεροπλάνο τραβήχτηκαν από το αεροπλάνο του Wilbur, L. P. Bonvillain, κατά τη διάρκεια μιας επίδειξης στη Γαλλία το 1908. Τον επόμενο χρόνο οι πρώτες εικόνες τραβήχτηκαν στην Ιταλία από έναν φωτογράφο ο οποίος συνόδευε τον Wright (Εικόνα 5.6).

ε) Ο Α΄ Παγκόσμιος Πόλεμος, 1914-1918: Το αεροπλάνο αντικατέστησε το αερόστατο στην παρατήρηση των θέσεων του εχθρού, στον πόλεμο των χαρακωμάτων του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου. Με το τέλος του πολέμου, το ολοκληρωμένο αυτό φωτογραφικό υλικό αναγνωρίστηκε και από τις δύο πλευρές. Οι Γερμανοί τραβούσαν 4.000 φωτογραφίες την ημέρα σαν μέρος του σχεδίου για την τελική τους μεγάλη επίθεση το 1918 και ο αμερικανικός στρατός τράβηξε περισσότερες από 1.000.000 φωτογραφίες τούς τελευταίους τέσσερις μήνες του πολέμου. Αν και οι φωτογραφίες χρησιμοποιήθηκαν πάρα πολύ, η μεγάλη χρησιμότητα της φωτοαναγνώρισης φάνηκε στον επόμενο μεγάλο πόλεμο.

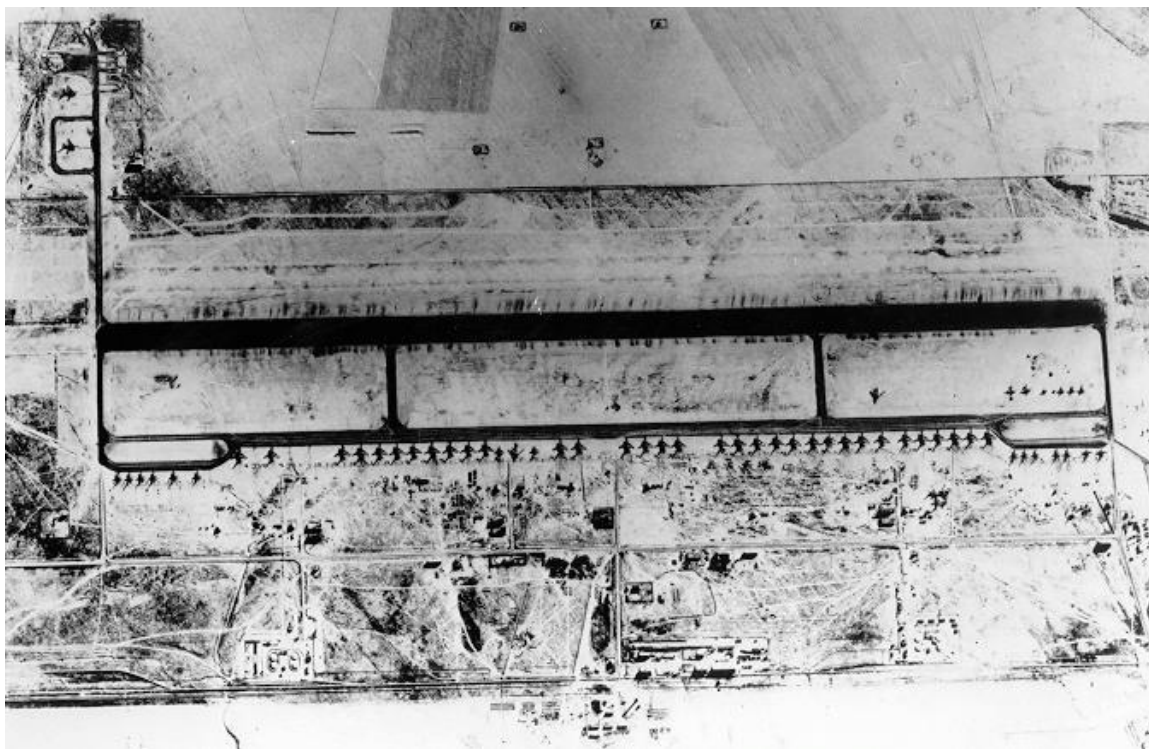


**Εικόνα 1.3** Κατά τη διάρκεια του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου αναγνωριστικά αεροσκάφη πετούσαν πάνω από τις δυνάμεις του εχθρού για να παρατηρήσουν τις κινήσεις των στρατευμάτων, πηγή: [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_GR/](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR/)

Στη διάρκεια του Β΄ Παγκόσμιου πολέμου η εξέλιξη της μεθοδολογίας στη λήψη και ανάλυση φωτογραφιών από αεροπλάνα (αεροφωτογραφιών) υπήρξε ραγδαία.

στ) Η θορυβώδης βόμβα, 1944: Ένας ερμηνευτής φωτογραφιών της Βασιλικής Αεροπορίας της Αγγλίας, η Constance Baddington Smith, ενώ μελετούσε στερεοσκοπικά αεροφωτογραφίες ενός γερμανικού πειραματικού σταθμού στο Peenemunde στις Βαλτικές ακτές, παρατήρησε ότι υπήρχε κάτι που δεν είχε ξαναδεί στην άκρη του δρόμου: «ήταν ένα μικροσκοπικό, σταυροειδούς σχήματος αντικείμενο, τοποθετημένο στο χαμηλότερο σημείο στα πλάγια μιας ιπταμένης μηχανής jet, το οποίο ήταν έτοιμη να απογειωθεί». Είχε ανακαλύψει τη θορυβώδη βόμβα V-1, το τρομερό αυτό όπλο που τρομοκράτησε τη νότια Αγγλία μερικούς μήνες αργότερα. Η ανακάλυψή της, ωστόσο, έδειξε ταυτόχρονα και πολλούς νέους στόχους για τον διοικητή των βομβαρδιστικών.

Οι πρώτες εικόνες της Γης –ουσιαστικά τα πρώτα βήματα στον τομέα της Τηλεπισκοπικής παρατήρησής της– ελήφθησαν κατά την περίοδο 1946-1950 όταν η NASA (Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος), με την παρότρυνση της κυβέρνησης των ΗΠΑ, τοποθέτησε σε πυραύλους V-2 (οι οποίοι είχαν πέσει στα χέρια τους από τους Γερμανούς κατά τον Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο) φωτογραφικές μηχανές 35 mm και τους εκτόξευσε από το Νέο Μεξικό. Η ποιότητα των φωτογραφιών ήταν πολύ χαμηλή και αφορούσε στοιχεία της γήινης επιφάνειας, όπως δεδομένα για τα χαρακτηριστικά των υδάτων, του χιονιού και του πάγου. Αργότερα αποκτήθηκαν φωτογραφίες από υψόμετρο 225Km από τους πυραύλους VIKING 11 και 12 στους οποίους χρησιμοποιήθηκαν μεγαλύτερες κάμερες (K-25) με υπέρυθρο φιλμ.



**Εικόνα 1.4** U-2 φωτογραφία αεροδρομίου στην πρώην Σοβιετική Ένωση (<http://www.oneonta.edu>).

Οι πρώτοι τεχνικοί δορυφόροι, όπως ο Sputnik-1, που εκτοξεύθηκε από την ΕΣΣΔ το 1957 και ο Explorer-1 που εκτοξεύθηκε από τις ΗΠΑ το 1958, αν και δεν έδωσαν ικανοποιητικές εικόνες, ενθάρρυναν τους επιστήμονες να θέσουν σε τροχιά και άλλους δορυφόρους, οι οποίοι είχαν προγραμματιστεί να φέρουν αυτόματες φωτογραφικές μηχανές. Έτσι, τέθηκαν σε τροχιά το Cosmos-4 από την ΕΣΣΔ και οι δορυφόροι της σειράς Discover των ΗΠΑ. Ο δορυφόρος TIROS (Television and Infrared Observation Satellite) που εκτοξεύθηκε τον Απρίλιο του 1960 από τις ΗΠΑ ήταν ο πρώτος που έφερε τηλεοπτική κάμερα.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960, οι πρώτοι εξελιγμένοι αισθητήρες απεικόνισης ενσωματώθηκαν σε δορυφόρους και τέθηκαν σε τροχιά. Κατά την πρώτη περίοδο, οι αισθητήρες αυτοί ήταν κάμερες που απεικόνιζαν με χαμηλής ανάλυσης (μικρή λεπτομέρεια) μαυρόασπρες εικόνες των νεφών και της επιφάνειας της Γης.

Στη συνέχεια, άλλοι τύποι αισθητήρων αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα πέρα από το ορατό, στο ανακλώμενο και θερμικό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το οπτικό πεδίο (FOV) ήταν ευρύ, συνήθως εκατοντάδες χιλιόμετρα. Αυτές οι συνοπτικές περιοχές της περιφερειακής κάλυψης είχαν μεγάλη αξία κυρίως για τη μετεωρολογική κοινότητα, έτσι ώστε πολλοί από αυτούς τους πρώιμους δορυφόρους ασχολούνταν με τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα σύννεφα, οι θερμοκρασίες του αέρα, των ανέμων, κ.λπ.

Μια σημαντική πρόοδος στην τεχνολογία αισθητήρων προήλθε από την υποδιαίρεση της ακτινοβολίας σε φασματικές ζώνες, επιτρέποντας σε αισθητήρες να λαμβάνουν εικόνες σε διάφορες ζώνες για να σχηματίσουν πολυφασματικές εικόνες.

Η πρώτη πολυφασματική φωτογραφία από το Διάστημα αποτυπώθηκε κατά τη διάρκεια του 1968 με την αποστολή Apollo 9. Επιστήμονες τοποθέτησαν τέσσερις φωτογραφικές μηχανές της Hasselblad σε μία βάση ώστε να έχουν όλες το ίδιο σημείο-στόχο.

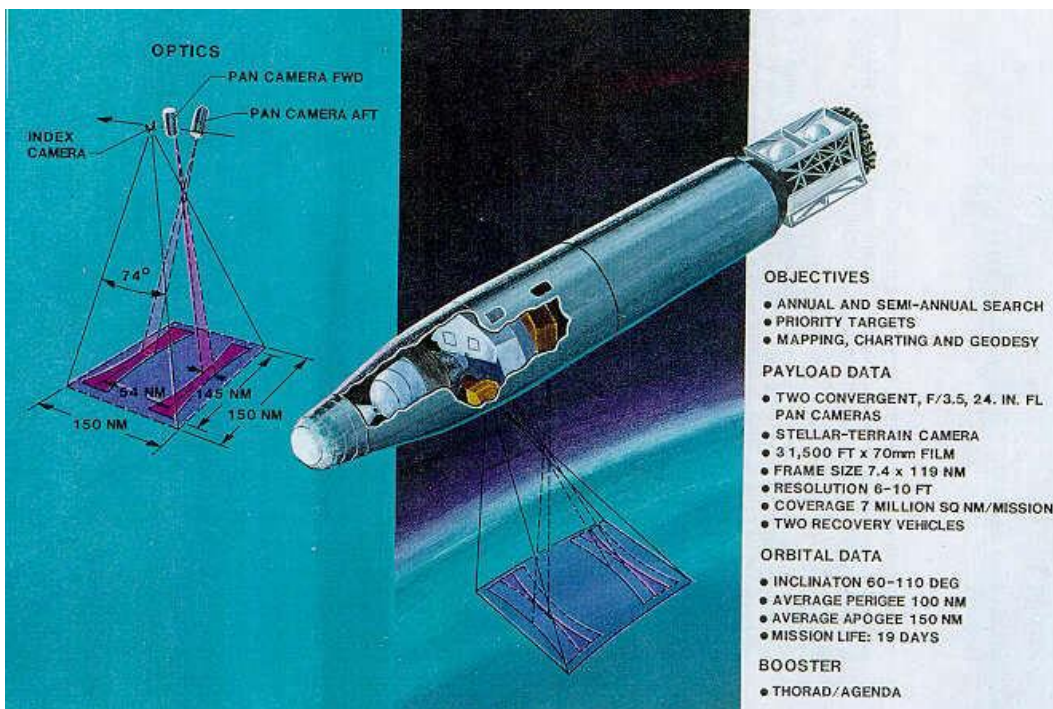
Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1960, ο πρώτος μη επανδρωμένος δορυφόρος ειδικά αφιερωμένου στην πολυφασματική τηλεπισκόπηση μπήκε στο στάδιο σχεδιασμού. Η NASA σχεδίασε, κατασκεύασε και στη συνέχεια εκτόξευσε τον ERTS-1 στις 23 Ιουλίου 1972.

Η πρώτη γενιά των αμερικανικών δορυφόρων με τη χρήση φωτογραφικής αποτύπωσης συγκέντρωσε περισσότερες από 860.000 εικόνες της επιφάνειας της Γης μεταξύ 1960 και 1972. Η εμπιστευτικότητα των στρατιωτικών δορυφορικών συστημάτων με την κωδική ονομασία CORONA, ARGON και LANYARD αποκτούσαν φωτογραφίες από το διάστημα και στη συνέχεια επέστρεφε το φιλμ στη Γη για επεξεργασία και ανάλυση.

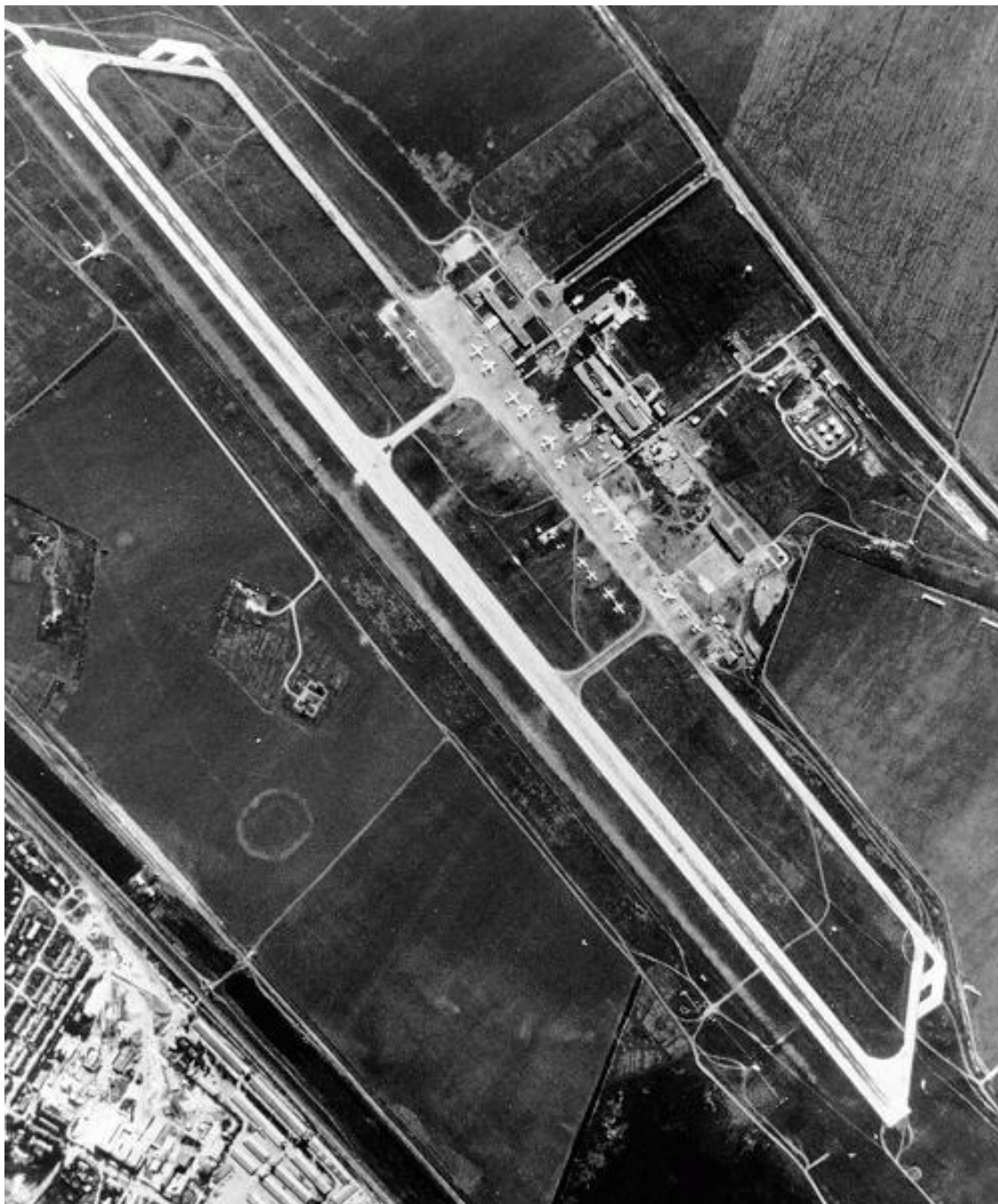




Εικόνα 1.5 Η ροκέτα V-2 (<http://www.geog.ucsb.edu>)



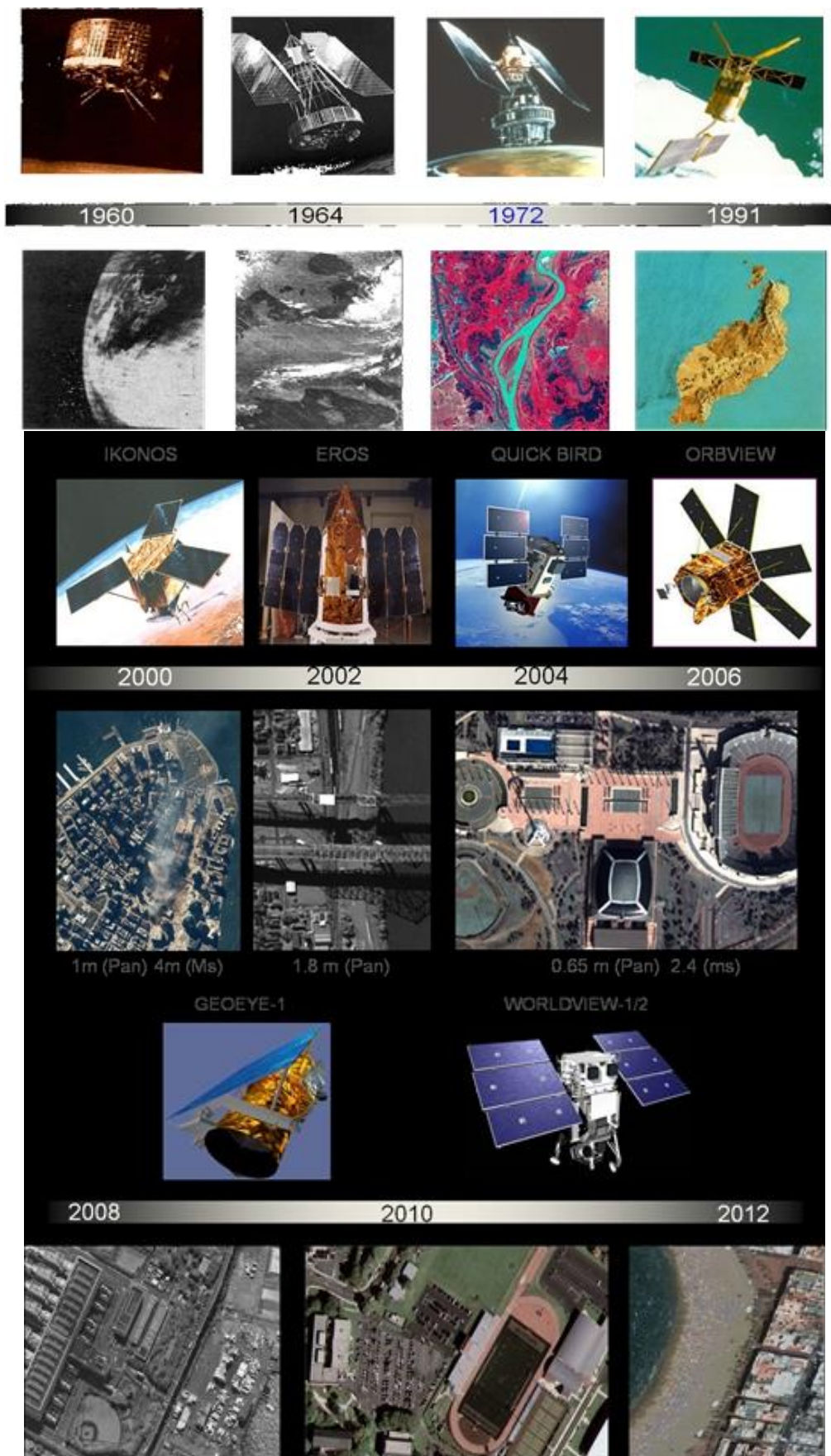
Εικόνα 1.6 Αναγνωριστικός δορυφόρος CORONA (πηγή: <http://en.wikipedia.org/>)



Εικόνα 1.7 Φωτογραφία CORONA 4 ενός αεροδρομίου (<http://www.oneonta.edu>)

Οι εικόνες χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την αναγνώριση και την εκπόνηση χαρτών για τις αμερικανικές υπηρεσίες πληροφοριών. Το 1992, η Task Force Περιβάλλοντος αξιολόγησε θετικά την εφαρμογή των πρώιμων αυτών δορυφορικών δεδομένων για την εκπόνηση περιβαλλοντικών μελετών. Δεδομένου ότι οι CORONA, ARGON και LANYARD δεν ήταν πλέον κρίσιμοι για την εθνική ασφάλεια αλλά θα μπορούσαν να είναι ιστορικής αξίας για την παγκόσμια έρευνα κυρίως για την ανίχνευση των αλλαγών, οι εικόνες αποχαρακτήστηκαν το 1995.

Η εξέλιξη της δορυφορικής τηλεπισκόπησης, μετά την εκτόξευση του πρώτου αμερικανικού δορυφόρου εξερεύνησης φυσικών πόρων LANDSAT 1 (Ιούνιος 1972), ήταν και συνεχίζει να είναι ραγδαία με εφαρμογές σε όλους τους κλάδους των γεωεπιστημών και όχι μόνο.



Εικόνα 1.8 Η εξέλιξη της δορυφορικής απεικόνισης

Η παρατήρηση και παρακολούθηση της Γης από το Διάστημα αποτελεί σήμερα σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη του περιβάλλοντος, για τον σχεδιασμό αναπτυξιακών δράσεων αλλά και για την ενίσχυση των παραγωγικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων.

Στην Ελλάδα η παρατήρηση και παρακολούθηση της Γης από το Διάστημα αποτελεί αντικείμενο μελέτης και εφαρμογής εδώ και περίπου 30 χρόνια, με την εμπλοκή αρχικά των Πανεπιστημιακών Εργαστηρίων και στη συνέχεια Ερευνητικών Ινστιτούτων αλλά και ιδιωτικών φορέων.

Η Ελλάδα υπέγραψε την πρώτη συμφωνία συνεργασίας με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (European Space Agency) το 1994. Με την ένταξή της ως πλήρες μέλος της ESA τον Δεκέμβριο του 2005, η Ελλάδα άρχισε να συμμετέχει ισότιμα με τα υπόλοιπα κράτη μέλη στην υλοποίηση του ευρωπαϊκού διαστημικού προγράμματος.

Σαν κράτος μέλος της ESA, η Ελλάδα συμμετέχει σε προγράμματα που αφορούν τους τομείς των τηλεπικοινωνιών, των τεχνολογιών της πληροφορίας, καθώς και της παρατήρησης της Γης, όπως πρόσφατα η πρωτοβουλία Global Monitoring for Environment and Security (GMES) για τη διαχείριση των φυσικών πόρων και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και πλέον το πρόγραμμα Copernicus.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

### *Ξενόγλωσση βιβλιογραφία*

Avery, T. E., & Berlin, G. L. (1992). *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation* (5th edition). New York: Mc Millan Publishing Company.

Gupta, R. P. (1991). *Remote Sensing Geology*. xvi + 356 pp. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2003). *Remote Sensing and Image Interpretation* (5th edition, p. 750). USA: J.

Mather, M. P. (1999). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images* (2nd edition, p. 292). UK: J. Wiley & Sons.

## 2. Βασικές Αρχές Τηλεπισκόπησης

### 2.1 Εισαγωγή – Νόμοι ακτινοβολίας

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (Electromagnetic radiation – EMR) είναι η βασική ποσότητα ενέργειας που έχει την ικανότητα να παράγει έργο και μετριέται σε joules. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκφράζεται, όπως είναι γνωστό, σαν μηχανική, χημική, ηλεκτρική και θερμική.

Η μετάδοση της ενέργειας γίνεται με επαφή, μεταφορά και ακτινοβολία. Από αυτούς τους τρεις παράγοντες μόνο η ακτινοβολία είναι δυνατόν να μεταδώσει ενέργεια από ένα σώμα σ' ένα άλλο χωρίς την παρέμβαση ενδιάμεσου φορέα και διασχίζοντας εκατομμύρια χιλιόμετρα στο κενό διάστημα. Τη μέθοδο της μεταφοράς ενέργειας με ακτινοβολία εκμεταλλεύεται και η τηλεπισκόπηση, η οποία γίνεται από ένα σώμα προς τον δέκτη (κατάλληλο αισθητήριο όργανο) που λαμβάνει το σήμα.

Στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, δύο μοντέλα είναι αυτά που περιγράφουν και διασαφηνίζουν τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της (Barrett & Curtis, 1992):

α) **Το μοντέλο του κύματος:** κάθε μόριο με θερμότητα πάνω από το απόλυτο μηδέν ταλαντώνεται (πάλλεται). Αυτή η ταλάντωση προκαλεί μια αναταραχή, κυματική στο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο που περιβάλλει το μόριο, το οποίο έτσι δρα ως πηγή ακτινοβολίας. Αυτά τα δύο πεδία είναι κάθετα μεταξύ τους (Εικόνα 2.1). Το κύμα ταλάντωσης ταξιδεύει από την πηγή με σταθερή ταχύτητα, την ταχύτητα του φωτός που ισούται με  $3 \times 10^9$  m/ sec και συμβολίζεται με  $c$ , όταν το μέσο διάδοσης είναι το κενό.

- Η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μίας περιόδου καλείται μήκος κύματος.

- Ο αριθμός των κυμάτων που περνάνε από ένα καθορισμένο σημείο σε 1 δευτερόλεπτο καλείται συχνότητα, έτσι η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από μικρή συχνότητα και αντίστροφα (Εικόνα 2.2).

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να χαρακτηριστεί από διάφορες ιδιότητες:

1. Μήκος κύματος. Είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών. Το μήκος κύματος μετριέται σε μονάδες μήκους.

2. Συχνότητα. Είναι ο αριθμός των κορυφών που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η συχνότητα μετριέται σε hertz, μονάδα που ισοδυναμεί με έναν κύκλο το δευτερόλεπτο.

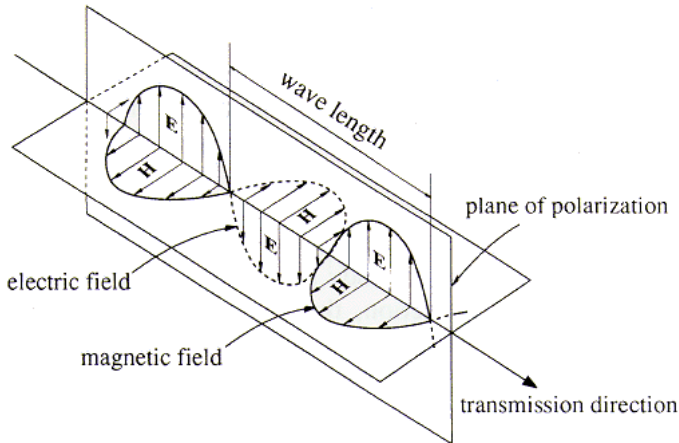
3. Πλάτος. Είναι το ύψος της κάθε κορυφής του κύματος. Το πλάτος μετριέται σε επίπεδα ενέργειας που εκφράζονται σε watt ανά τετραγωνικό μέτρο ανά μικρόμετρο.

4. Φάση. Η φάση της κυματομορφής καθορίζει τον βαθμό στον οποίο οι κορυφές μιας κυματομορφής ευθυγραμμίζονται με εκείνες μιας άλλης. Η φάση μετριέται σε γωνιακές μονάδες όπως μοίρες ή ακτίνια. Αν δύο κύματα είναι ευθυγραμμισμένα και ταλαντώνονται μαζί, λέγονται συμφασικά και έχουν διαφορά φάσης 0. Αν οι κυματομορφές των δύο κυμάτων είναι αντιδιαμετρικές, δηλαδή οι κορυφές αντιστοιχούν στις κοιλότητες, αυτά τα κύματα έχουν διαφορά φάσης 180 μοίρες.

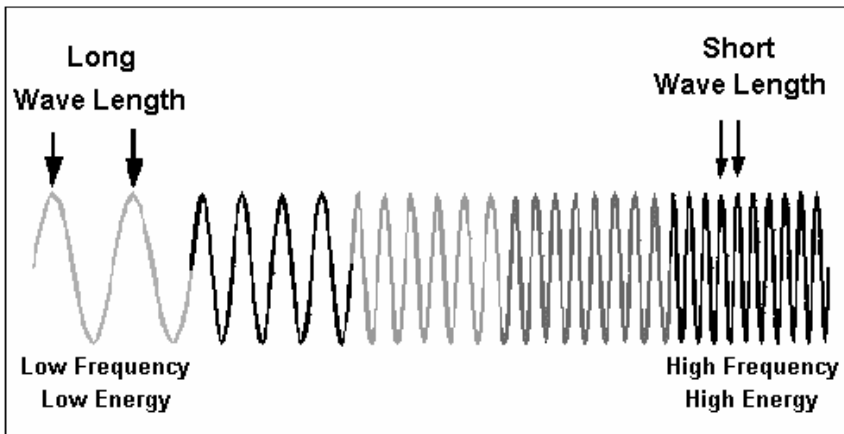
Το γινόμενο του μήκους κύματος ( $\lambda$ ) μιας φωτεινής ακτινοβολίας επί την αντίστοιχη συχνότητά της ( $\nu$ ) είναι σταθερό και ισούται με την ταχύτητα του φωτός που  $c$

$$\lambda\nu=c$$

Από τον προηγούμενο τύπο συνάγεται ότι το μήκος κύματος μιας ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητάς της.



**Εικόνα 2.1** Γραφική αναπαράσταση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε μια συγκεκριμένη στιγμή του χρόνου.



**Εικόνα 2.2** Γραφική αναπαράσταση ηλεκτρομαγνητικού κύματος, στην οποία φαίνεται η αντίστροφη σχέση του μήκους κύματος (wavelength) με τη συχνότητα (frequency) και την ενέργεια (energy).

Ως εκ τούτου, τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μπορούν να καθοριστούν από τη συχνότητα ή το μήκος κύματος. Ποικίλοι τομείς και διάφορες εφαρμογές ακολουθούν διαφορετικές συμβάσεις για την περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, χρησιμοποιώντας είτε το μήκος κύματος είτε τη συχνότητα. Παρόλο που δεν υπάρχει κανένα επιτακτικό πρότυπο, μια κοινή πρακτική στον τομέα της τηλεπισκόπησης είναι να καθορίζονται οι περιοχές του φάσματος με βάση το μήκος κύματος, χρησιμοποιώντας συνήθως μικρόμετρα ( $\mu\text{m}$ ), χιλιοστά (mm) και μέτρα (m) σαν μονάδα μήκους.

β) **Η Θεωρία των κβάντα:** Αυτή δίνει έμφαση στις όψεις της συμπεριφοράς της ακτινοβολίας και υποστηρίζει ότι αποτελείται από πολλά μικρά σωματίδια, τα quanta φωτός, τα οποία αργότερα ονομάστηκαν από τον Einstein φωτόνια. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι, εκτός από την κυματική, το φως έχει και ιδιότητες σώματος. Η ενέργεια που φέρει ένα φωτόνιο ορίζεται ως:

$$\frac{E}{\nu} = h$$

όπου,  $h$ : η σταθερά του Planck =  $6,625 \times 10^{-27}$  erg/sec ή  $6,626 \times 10^{-34}$  J/s  $\nu$ : συχνότητα του κύματος

Ο λόγος της ενέργειας ενός φωτονίου ως προς τη συχνότητα του  $\nu$  είναι σταθερός (σταθερά του Planck  $h$ ). Έτσι στην κλίμακα του φωτονίου, φως υψηλής συχνότητας (μικρό μήκος κύματος) είναι υψηλής ενέργειας, ενώ φως χαμηλής συχνότητας (μεγάλο μήκος κύματος) είναι χαμηλής ενέργειας. Οι νόμοι που διέπουν τις πηγές ακτινοβολίας με την αντίστοιχη EMR την οποία εκπέμπουν είναι οι ακόλουθοι:

#### α) Νόμος του Planck

Ο νόμος αυτός μας επιτρέπει τον υπολογισμό του ποσού της EMR που ακτινοβολείται από ένα σώμα για συγκεκριμένη θερμοκρασία και μήκος κύματος:

$$E(T) = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} d\lambda$$

όπου:  $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$  W/m<sup>2</sup>

$C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$  mK

$\lambda$  = μήκος κύματος

$T$  = απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

#### β) Νόμος των Stephan-Boltzman

Ο νόμος των Stephan-Boltzman αποτελεί το ολοκλήρωμα για όλα τα μήκη κύματος του νόμου του Planck.

Η συνολικά εκπεμπόμενη ροή ενέργειας ( $E$  σε watts/m<sup>2</sup>) από ένα μαύρο σώμα για όλα τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας ( $T$ ) του σώματος, που μετριέται σε βαθμούς Kelvin:

$$E = \sigma T^4$$

όπου  $\sigma$  = συντελεστής

Για ένα μη μαύρο σώμα ο τύπος τροποποιείται ως εξής:

$$E(T) = \epsilon \sigma T^4$$

όπου  $\epsilon$  είναι το κλάσμα της συνολικής ροής που εκπέμπεται από ένα μαύρο σώμα ίδιας θερμοκρασίας και καλείται ικανότητα εκπομπής. Ένα ιδανικό μαύρο σώμα έχει  $\epsilon=1$ . Τα περισσότερα σώματα συμπεριφέρονται ως μαύρα και το  $\epsilon$  παίρνει συνήθως τιμές από 0,9 έως 1,0. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι από τον νόμο των Stephan-Boltzman συνάγεται πως όσο υψηλότερη θερμοκρασία έχει ένα σώμα τόσο περισσότερη ακτινοβολία εκπέμπει. Το γεγονός αυτό λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τον σχεδιασμό των αισθητήρων που μετρούν την EMR. Ψυχρότερα σώματα, όπως π.χ. η Γη, εκπέμπουν λιγότερη ενέργεια και κατά συνέπεια απαιτείται ή μεγαλύτερος χρόνος έκθεσης ή χρήση μεγαλύτερης στοιχειώδους επιφάνειας (εικονοστοιχείο, pixel) προκειμένου να συλλεχθούν αρκετά φωτόνια για μια αξιόπιστη μέτρηση η οποία δεν θα επηρεάζεται από τον θόρυβο.

### γ) Νόμος μετατόπισης του Wein

Ο νόμος αυτός ορίζει ότι το μήκος κύματος κατά το οποίο παρατηρείται η μέγιστη εκπομπή φωτός από μια φωτεινή πηγή είναι αντιστρόφως ανάλογο της θερμοκρασίας της πηγής:

$$\lambda = \frac{2897}{T}$$

### δ) Νόμος του Beer-Lambert

Σύμφωνα με τον νόμο αυτόν (φέρεται επίσης και ως νόμος Beer-Lambert-Bouguer ή ακόμη και ως νόμος Beer) η φωτεινή ενέργεια ακτινοβολίας με συγκεκριμένο μήκος κύματος που χάνεται ( $dI_\lambda$ ) κατά τη διέλευσή της από ένα υγρό είναι ανάλογη με την εισερχόμενη ( $I_\lambda$ ), την πυκνότητα του υγρού ( $\rho$ ) και το μήκος της διαδρομής ( $ds$ ) μέσα στο υγρό:

$$dI = I k \rho ds$$

Το  $k_\lambda$  είναι ο συντελεστής απορροφητικότητας του υγρού. Όσο μεγαλύτερη είναι η απορροφητικότητα ενός υγρού τόσο μικρότερη είναι η ενέργεια της εξερχόμενης ακτινοβολίας. Έτσι, αν όλο το φως διέλθει από ένα υγρό χωρίς καθόλου απορρόφηση, τότε η ικανότητα διάδοσης (transmittance) είναι 100%. Αντίθετα, αν όλο το φως απορροφηθεί από το υγρό, τότε η απορρόφηση είναι άπειρη.

## 2.2 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία – Τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

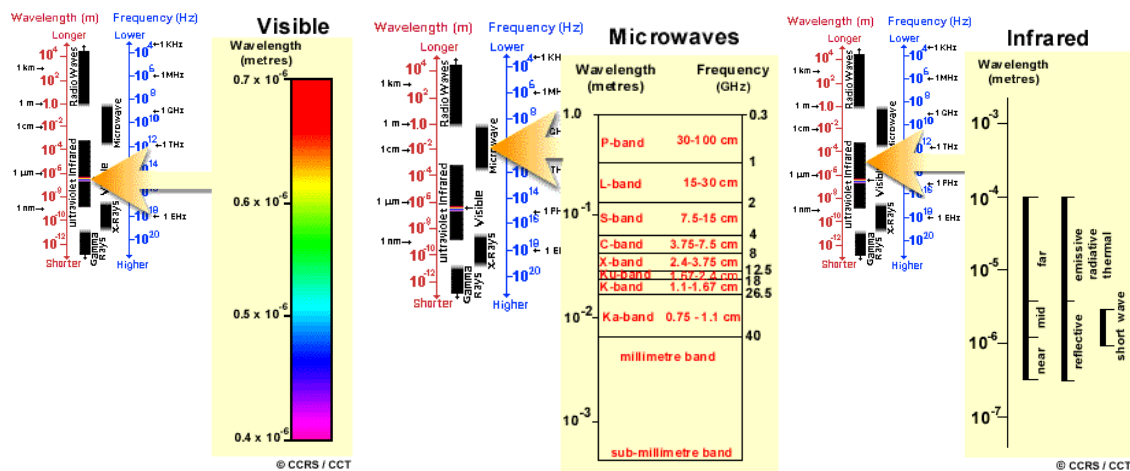
### 2.2.1 Εισαγωγή

Το κανάλι UV βρίσκεται μεταξύ ακτίνων X και ορατού στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, με μήκος κύματος από 0,01 έως 0,40  $\mu\text{m}$  και διακρίνεται σε μακρινό (far UV, 0,01-0,20  $\mu\text{m}$ ), ενδιάμεσο (middle UV, 0,20-0,30  $\mu\text{m}$ ) και κοντινό (near UV, 0,30-0,40  $\mu\text{m}$ ).

Το ορατό κανάλι, με μήκος κύματος από 0,40 έως 0,70  $\mu\text{m}$ , έχει όρια που καθορίζονται από την ανθρώπινη όραση.

Το λευκό χρώμα του φωτός προέρχεται από ένα μείγμα έξι χρωμάτων, που είναι τα ιώδες, μπλε, πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί και ερυθρό. Τα βασικά όμως χρώματα του ορατού είναι το μπλε (0,40-0,50  $\mu\text{m}$ ), το πράσινο (0,50-0,60  $\mu\text{m}$ ) και το ερυθρό (0,60-0,70  $\mu\text{m}$ ) και από τα οποία με κατάλληλο συνδυασμό προκύπτουν όλα τα υπόλοιπα. Για παράδειγμα, το κίτρινο χρώμα προέρχεται από τον συνδυασμό του κόκκινου με το πράσινο και ως εκ τούτου απορροφά το μπλε και ανακλά τα άλλα δύο, ενώ το κυανό απορροφά το κόκκινο και ανακλά το μπλε και το πράσινο.





Εικόνα 2.3 Το ορατό, υπέρυθρο και μικροκυματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (CCRS, 1998).

Το κανάλι IR κυμαίνεται από το ερυθρό του ορατού καναλιού, μέχρι τα μικροκύματα, με μήκος κύματος από 0,70  $\mu\text{m}$  έως 1.000  $\mu\text{m}$ . Διακρίνεται σε κοντινό (near IR, 0,70-1,50  $\mu\text{m}$ ), ενδιάμεσο (middle IR, 1,50-5,60  $\mu\text{m}$ ) και μακρινό (far IR, 5,60-1.000  $\mu\text{m}$ ). Το υπέρυθρο χωρίζεται επίσης σε ανακλώμενο (reflected IR, από 0,70-3,00  $\mu\text{m}$ ) και θερμικό (thermal IR, από περίπου 3,00 έως 1.000  $\mu\text{m}$  ή 0,1 cm).

Το κανάλι των μικροκυμάτων τοποθετείται μεταξύ του υπέρυθρου και των ραδιοκυμάτων, με μήκος κύματος από 0,1 cm έως 1 m. Αυτό περιλαμβάνει τα μεγαλύτερα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση. Η ακτινοβολία των μικροκυμάτων έχει την ικανότητα να διαπερνάει τα σύννεφα και διάφορα επιφανειακά αντικείμενα ανάλογα με το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται. Σε αυτό το κομμάτι της ακτινοβολίας, δηλαδή στο μικροκυματικό κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, λειτουργούν τόσο παθητικοί όσο και ενεργητικοί αισθητήρες.

Οι παθητικοί αισθητήρες (δέκτες) καταγράφουν την ενέργεια που προέρχεται από ένα αντικείμενο (στόχος), ενώ οι ενεργητικοί εκπέμπουν σήμα το οποίο αποστέλλεται στον στόχο και επιστρέφοντας καταγράφεται από κατάλληλους δέκτες.

Ολόκληρο το εύρος της ηλεκτρικής ακτινοβολίας αποτελεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (EMS-Electromagnetic Spectrum). Το φάσμα διαχωρίζεται σε φασματικά κανάλια (spectral bands), τα οποία με τη σειρά τους συγκροτούνται από μικρές ομάδες συνεχών φασματικών γραμμών. Τα φασματικά αυτά κανάλια είναι το υπεριώδες (Ultraviolet, UV), το ορατό (Visible), το υπέρυθρο (Infrared, IR) και το μικροκυματικό (Microwave), από τα οποία το ορατό καθορίζεται σαφέστερα με βάση την ανθρώπινη όραση (Εικόνα 2.3).

## 2.2.2 Υπεριώδης ακτινοβολία

Για πρακτικούς λόγους, μπορεί να ειπωθεί πως η ακτινοβολία που έχει ιδιαίτερη σημασία για την τηλεπισκόπηση ξεκινά με το τμήμα του υπεριώδους, μια ζώνη ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος που βρίσκεται μεταξύ της περιοχής των ακτίνων X και το όριο της ανθρώπινης όρασης. Συχνά, το υπεριώδες υποδιαιρείται στο εγγύς υπεριώδες (γνωστή και ως ακτινοβολία UV-A, 0,32-0,40  $\mu\text{m}$ ), στο μακρινό υπεριώδες (UV-B, 0,32 έως 0,28  $\mu\text{m}$ ) και στο ακραίο υπεριώδες (UV-C, κάτω από 0,28  $\mu\text{m}$ ). Το υπεριώδες τμήμα ανακαλύφθηκε το 1801 από τον Γερμανό επιστήμονα Johann Wilhelm Ritter (1776-1810). Κυριολεκτικά, υπεριώδης σημαίνει «πέρα από το ιώδες», που την υποδεικνύει ως την περιοχή λίγο έξω από το ιώδες, το μικρότερο μήκος κύματος ορατό από τον άνθρωπο. Η ακτινοβολία του κοντινού υπεριώδους είναι γνωστή για την ικανότητά της να επάγει φθορισμό, την εκπομπή ορατής ακτινοβολίας, σε ορισμένα υλικά. Είναι ιδιαίτερα σημαντική για μια εξειδικευμένη μορφή της τηλεπισκόπησης. Ωστόσο, η υπεριώδης ακτινοβολία διαχέεται πολύ εύκολα από την ατμόσφαιρα της Γης, με συνέπεια να μη χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για την τηλεπισκόπηση των υλικών της Γης.

Τμήματα	Όρια
Ακτίνες γ	< 0,03 nm
Ακτίνες Χ	0,03 – 300 nm
Υπεριώδης ακτινοβολία	0,30 – 0,38 μm
Ορατό φως	0,38 – 0,72 μm
Υπέρυθρη ακτινοβολία	
Κοντινό υπέρυθρο	0,72 – 1,30 μm
Μέσο υπέρυθρο	1,30 – 3,00 μm
Μακρινό υπέρυθρο	7,0 – 1.000 μm (1mm)
Μικροκύματα	1 mm – 30 cm
Ραδιοκύματα	>30 cm

**Πίνακας 1.** Κύρια τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

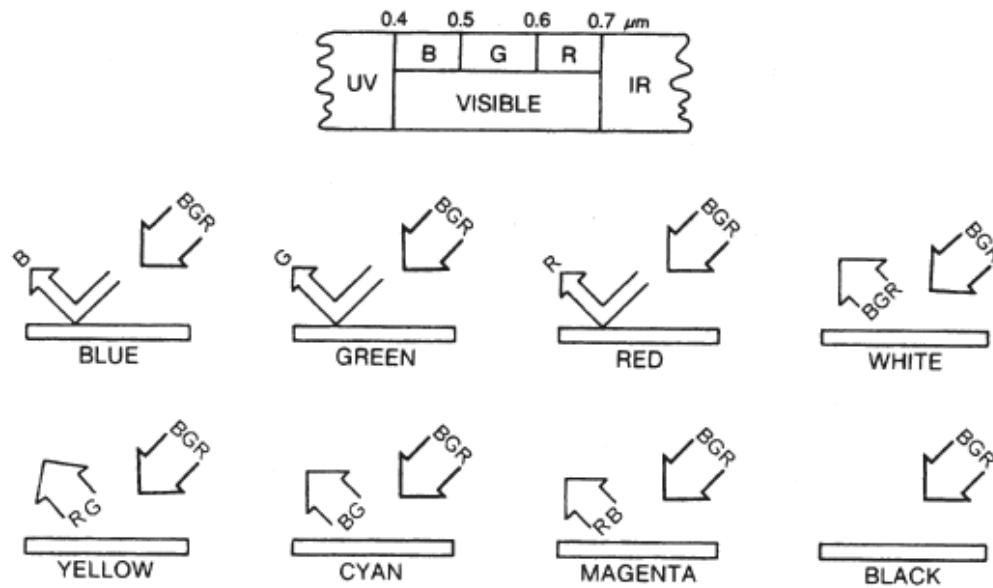
### 2.2.3 Το φάσμα του ορατού

Μολονότι το ορατό φάσμα αποτελεί ένα πολύ μικρό τμήμα του φάσματος, έχει προφανή σημασία στην τηλεοπτική. Τα όρια του ορατού φάσματος ορίζονται από την ευαισθησία του ανθρώπινου οπτικού συστήματος. Οι οπτικές ιδιότητες της ορατής ακτινοβολίας πρώτα διερευνήθηκαν από τον Ισαάκ Νεύτωνα (1641-1727), ο οποίος μεταξύ 1665 και 1666 διεξήγε πειράματα μέσω των οποίων αποκάλυψε ότι το ορατό φως μπορεί να διααιρεθεί (χρησιμοποιώντας πρίσματα, ή, στην εποχή μας, φράγματα περίθλασης) σε τρία τμήματα. Σήμερα γνωρίζουμε αυτά τα τμήματα σαν τα *additive primaries*, που ορίζονται περίπου από 0,4 έως 0,5 μm (μπλε), 0,5 έως 0,6 μm (πράσινο) και 0,6 έως 0,7 μm (ερυθρό) (Εικόνα 2.4). Τα βασικά χρώματα ορίζονται με τέτοιον τρόπο έτσι ώστε κανένα βασικό χρώμα να μην μπορεί να σχηματίζεται από ένα μίγμα των άλλων δύο, και όλα τα άλλα χρώματα μπορούν να σχηματιστούν με την ανάμιξη των τριών βασικών σε κατάλληλες αναλογίες. Ίσες αναλογίες των τριών *additive primaries* συνδυάζονται για να σχηματίσουν λευκό φως.

Το χρώμα ενός αντικείμενου καθορίζεται από το χρώμα του φωτός που αντανακλά (Εικόνα 2.4). Έτσι, ένα «μπλε» αντικείμενο είναι «μπλε», επειδή αντανακλά το μπλε φως. Ενδιάμεσα χρώματα σχηματίζονται όταν ένα αντικείμενο αντανακλά δύο ή περισσότερες από τα βασικά χρώματα, τα οποία συνδυάζονται για να δημιουργήσουν την αίσθηση του «κίτρινου» (κόκκινο και πράσινο), «μοβ» (κόκκινο και μπλε), ή άλλα χρώματα.

Τα βασικά χρώματα είναι σημαντικά όταν εμείς λαμβάνουμε υπόψη μας τα χρώματα του φωτός, όπως, για παράδειγμα, στην έκθεση του φωτογραφικού φιλμ.

Σε αντίθεση, οι αναπαραστάσεις των χρωμάτων στα φιλμ, οι πίνακες ζωγραφικής και παρόμοιες εικόνες σχηματίζονται από συνδυασμούς των τριών *subtractive primaries* που καθορίζουν τα χρώματα των χρωστικών ουσιών και βαφών. Καθένα από τα τρία *subtractive primaries* απορροφά το ένα τρίτο του ορατού φάσματος (Εικόνα 2.4). Το κίτρινο απορροφά το μπλε φως (και αντανακλά κόκκινο και πράσινο), το κυανό (ένα πρασινωπό μπλε) απορροφά το κόκκινο φως (και αντανακλά το μπλε και το πράσινο), και η ματζέντα (ένα γαλαζωπό κόκκινο) απορροφά το πράσινο φως (και αντανακλά κόκκινο και μπλε φως). Ένα μίγμα από ίσες αναλογίες των χρωστικών του των τριών *subtractive primaries* αποδίδει μαύρο (πλήρης απορρόφηση του ορατού φάσματος). Τα βασικά χρώματα παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε θέματα που αφορούν την ενέργεια ακτινοβολίας, ενώ τα αφαιρετικά καθορίζουν τα χρώματα των χρωστικών ουσιών και βαφών που χρησιμοποιούνται για την αναπαραγωγή χρωμάτων σε ταινίες, φωτογραφικές εκτυπώσεις, και άλλες εικόνες.



Εικόνα 2.4 Τα χρώματα.

## 2.2.4 Το υπέρυθρο φάσμα

Μήκη κύματος μεγαλύτερα από το τμήμα του κόκκινου στο ορατό φάσμα ορίζονται ως η υπέρυθη περιοχή, που ανακαλύφθηκε το 1800 από τον Βρετανό αστρονόμο William Herschel (1738- 1822). Αυτό το τμήμα του φάσματος είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με την περιοχή του ορατού, που εκτείνεται από 0,72 έως 15  $\mu\text{m}$ , καθιστώντας το περισσότερο από 40 φορές ευρύτερο από όσο το φάσμα του ορατού. Λόγω του μεγάλου εύρους του, περιλαμβάνει ακτινοβολία με ποικίλες ιδιότητες.

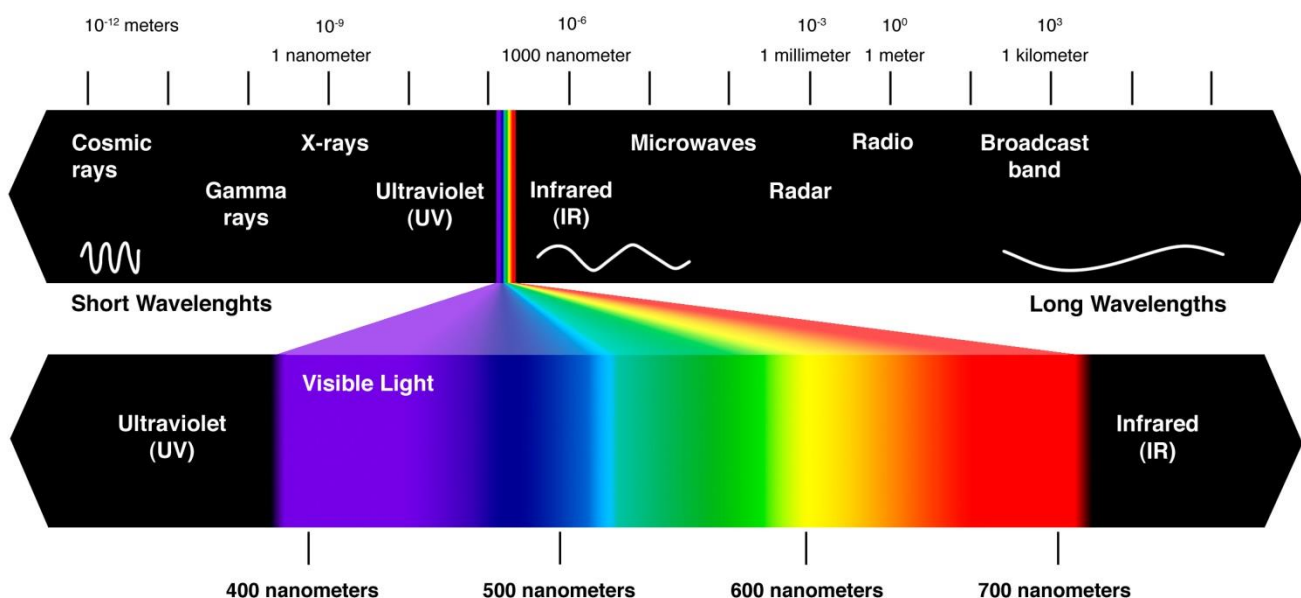
Δύο σημαντικές κατηγορίες μπορεί να αναγνωριστούν εδώ. Η πρώτη αποτελείται από το εγγύς υπέρυθρο και το μέσο υπέρυθρο, που ορίζονται ως εκείνες οι περιοχές του υπέρυθρου φάσματος που βρίσκεται πλησιέστερα στο ορατό. Η ακτινοβολία στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου συμπεριφέρεται, σε σχέση με τα οπτικά συστήματα, με τρόπο ανάλογο με την ακτινοβολία στο ορατό φάσμα. Ως εκ τούτου, η τηλεπισκόπηση σε περιοχή του εγγύς υπέρυθρου μπορεί να χρησιμοποιήσει μεμβράνες, φίλτρα, και κάμερες με σχέδια όμοια με εκείνα που προορίζονται για χρήση με το ορατό φως.

Η δεύτερη κατηγορία της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι το τμήμα του μακρινού υπέρυθρου, το οποίο αποτελείται από μήκη κύματος πέρα από το ορατό και που εκτείνονται σε περιοχές που συνορεύουν με το τμήμα των μικροκυμάτων. Αυτή η ακτινοβολία είναι ριζικά διαφορετική από αυτήν στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο. Ενώ η εγγύς υπέρυθη ακτινοβολία είναι ουσιαστικά η ηλιακή ακτινοβολία η οποία ανακλάται από την επιφάνεια της Γης, η μακρινή υπέρυθη ακτινοβολία είναι αυτή η οποία εκπέμπεται από τη Γη. Στην καθημερινή γλώσσα, η μεγάλου μήκους υπέρυθη ακτινοβολία αποτελεί την θερμική ακτινοβολία. Μερικές φορές αυτό τμήμα του φάσματος αναφέρεται ως το εκπεμπόμενο υπέρυθρο.

## 2.2.5 Μικροκυματική ενέργεια

Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται συνήθως στην τηλεανίχνευση είναι από περίπου 1 mm έως 1  $\mu\text{m}$  σε μήκος κύματος. Τα μικρότερα μήκη κύματος στην περιοχή αυτή έχουν πολλά κοινά με τη θερμική ενέργεια των μακρινών υπέρυθρων. Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος της περιοχής των μικροκυμάτων συγχωνεύονται με τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιούνται για εμπορικές μεταδόσεις. Οι γνώσεις μας για την περιοχή των μικροκυμάτων προέρχονται από την εργασία του Σκωτσέζου φυσικού James Clerk Maxwell (1831-1879) και του Γερμανού φυσικού Heinrich Hertz (1857-1894). Το μικροκυματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος περιλαμβάνει μήκη κύματος από 1mm έως 1m, τα οποία δεν είναι αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι. Οι αισθητήρες των δορυφόρων που χρησιμοποιούν αυτά τα μήκη κύματος μπορούν να καταγράφουν επιφανειακές ιδιότητες του γήινου περιβάλλοντος οι οποίες σχετίζονται κυρίως με γεωμετρικά χαρακτηριστικά (τοπογραφία, μορφολογία, τραχύτητα του εδάφους), την περιεκτικότητα σε νερό της

βλάστησης και του εδάφους και τη διηλεκτρική συμπεριφορά των υλικών (σχετίζεται με το ποσοστό ενέργειας που ανακλάται σε σχέση με αυτό που διεισδύει και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας). Τέλος, οι αισθητήρες που εκπέμπουν και δέχονται κύματα στο μικροκυματικό τμήμα αποτελούνται από τις ζώνες P, L, S, C, X, K, Q, V και W. Οι ζώνες αυτές συμβολίζονται με γράμματα τα οποία έχουν αποδοθεί τυχαία και αυθαίρετα. Η μικροκυματική ενέργεια και οι αισθητήρες ραντάρ θα αναλυθούν λεπτομερώς στο κεφάλαιο 7.



Εικόνα 2.5 Κύρια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και τα κανάλια του, με το μήκος κύματος και τη συχνότητα.

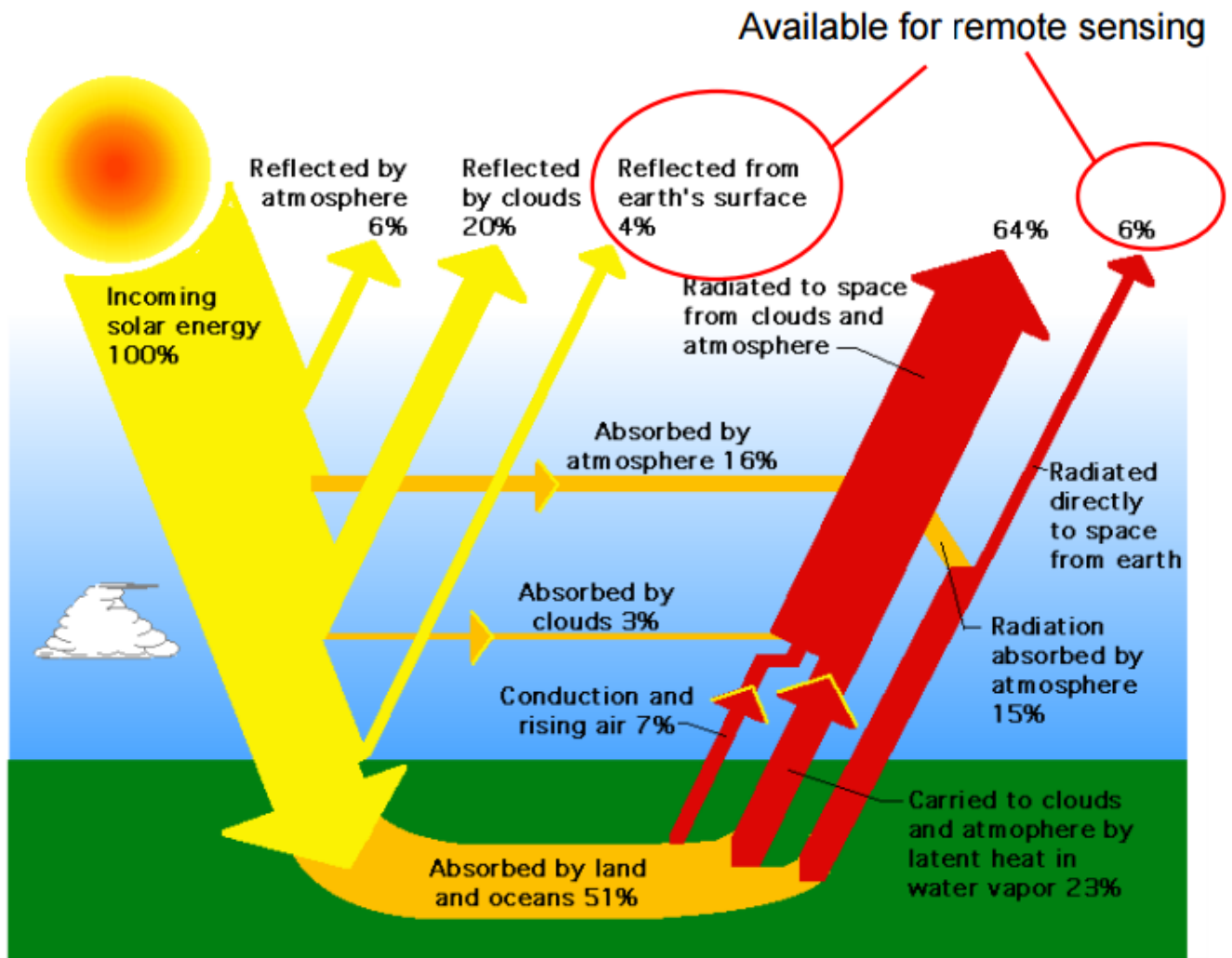
### 2.3 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα

Οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους αντιδρά η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με την ατμόσφαιρα είναι οι ακόλουθοι:

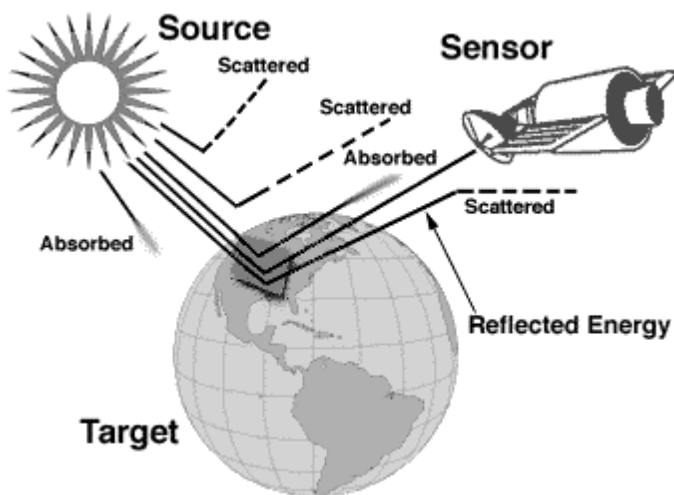
α) Να διέλθει ευθύγραμμα, σχεδόν ανεμπόδιστη.

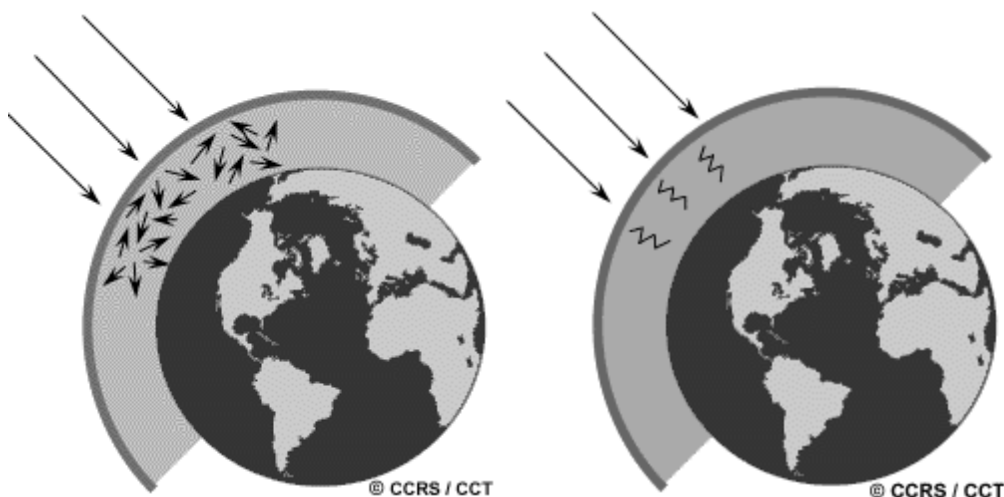
Ένας μεγάλος αριθμός αερίων της ατμόσφαιρας, όπως τα  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $O_3$ ,  $CO_2$ , οι υδρατμοί και η λεπτόκοκκη σκόνη, ευθύνονται για την απορρόφηση σε ορισμένα μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η απορρόφηση κυριαρχεί στο υπέρυθρο τμήμα (1-20  $\mu m$ ) όπου υπάρχουν διάφορες απορροφητικές ζώνες, δηλαδή περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που απορροφούν σε μεγάλο βαθμό την ακτινοβολία.

β) Να ανακλαστεί και να διαχυθεί από αυτήν χωρίς να επέλθει καμιά μεταβολή στην ταχύτητα και στο μήκος κύματός της. Το φαινόμενο της διάχυσης υφίσταται όταν σωματίδια ή μεγάλου μεγέθους μόρια αερίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα δράσουν επί της ακτινοβολίας δίνοντας σε αυτήν νέα πορεία. Ο βαθμός επίδρασης της σκέδασης εξαρτάται από την ποσότητα των σωματιδίων και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



Εικόνα 2.6 Ισοζύγιο ακτινοβολίας της Γης με την ατμόσφαιρα (www.nasa.gov).





**Εικόνα 2.7** Μορφές αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας που προέρχεται από την «πηγή» (source), δηλαδή τον ήλιο, η οποία όταν έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα απορροφάται (absorbed), ανακλάται (reflected) και διαχέεται (scattered).

γ) Αφού διέλθει από την ατμόσφαιρα να απορροφηθεί από τη γήινη επιφάνεια και στη συνέχεια, εκπεμπόμενη ως μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, να προκαλέσει την άνοδο της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας λόγω της απορρόφησής της από αέρια μόρια. Κατά τον μηχανισμό της απορρόφησης τα μόρια της ατμόσφαιρας απορροφούν ενέργεια σε διάφορα μήκη κύματος. Το όζον, το διοξείδιο του άνθρακα και οι υδρατμοί είναι τα τρία κύρια ατμοσφαιρικά συστατικά που συμβάλλουν στην απορρόφηση (Σχήμα 6.).

Τα περισσότερα ατμοσφαιρικά παράθυρα γίνονται λιγότερο διαπερατά όταν η ατμόσφαιρα έχει αυξημένη υγρασία.

Η απορρόφηση από τα αέρια παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές της για μήκη κύματος μικρότερα από 0,30 μm (υπεριώδης ακτίνες X και γ) και τις ελάχιστες για μήκη κύματος μεγαλύτερα από τα 0,60 cm (μικροκύματα).

Αντίθετα, τα σύννεφα απορροφούν ένα μεγάλο μέρος από τη μικροκυματική ακτινοβολία που προέρχεται από τη γήινη επιφάνεια. Μόνο η μικροκυματική ακτινοβολία, με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 0,90 mm, είναι δυνατόν να διαπεράσει πλήρως τα σύννεφα.

Στο ορατό ή στο κοντινό του ορατού τμήματος υπέρυθρο φάσμα, η διάχυση του φωτός από την ατμόσφαιρα είναι η κύρια αιτία μείωσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, η οποία προκαλείται από μόρια αερίων (όπως  $O_2$  και  $N_2$ ) και τα σύννεφα, ενώ αντίθετα σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 18 μm, στη μικροκυματική περιοχή, δεν υπάρχει μεγάλη εξασθένηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που να οφείλεται στην ατμόσφαιρα.

## 2.4 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη

Μετά την αρχική διέλευσή της από την ατμόσφαιρα, η ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια με την οποία αντιδρά με ανάκλαση-διάχυση (R), απορρόφηση (A) ή με μετάδοση (T) σε περίπτωση μιας αρκετά λεπτής επιφάνειας.

### 2.4.1 Ανάκλαση

Ανάκλαση συμβαίνει όταν μια ακτίνα του φωτός ανακατευθύνεται καθώς προσπίπτει σε μια αδιαφανή επιφάνεια. Η φύση της αντανάκλασης εξαρτάται από τα μεγέθη των επιφανειακών ανωμαλιών (τραχύτητα ή ομαλότητα) σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εξετάζεται. Εάν η επιφάνεια είναι ομαλή σε σχέση με το μήκος κύματος, παρατηρείται κατοπτρική ανάκλαση (Εικόνα 2.8). Η κατοπτρική ανάκλαση ανακατευθύνει όλη, ή σχεδόν όλη, την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε μία μόνο κατεύθυνση. Για τέτοιες επιφάνειες, η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης (τα δύο μέσα είναι πανομοιότυπα, έτσι  $n = n$ , και ως εκ τούτου  $\theta = \theta'$ ). Για την ορατή ακτινοβολία, η κατοπτρική ανάκλαση μπορεί να συμβεί με επιφάνειες όπως έναν καθρέφτη, ένα λείο μέταλλο ή μια ήρεμη υδάτινη μάζα.

Εάν μια επιφάνεια είναι τραχιά σε σχέση με το μήκος κύματος, ενεργεί ως διάχυτος ή ισότροπος, ανακλαστήρας. Αλλά η ενέργεια διαχέεται περισσότερο ή λιγότερο ισοδύναμα σε όλες τις κατευθύνσεις. Για την ορατή ακτινοβολία, πολλές φυσικές επιφάνειες μπορεί να συμπεριφερθούν ως ανακλαστικές διάχυσης.

Ένας τέλειος ανακλαστήρας διάχυσης (γνωστή ως επιφάνεια του Lambert) θα είχε ίση φωτεινότητα όταν παρατηρείται από οποιαδήποτε γωνία.

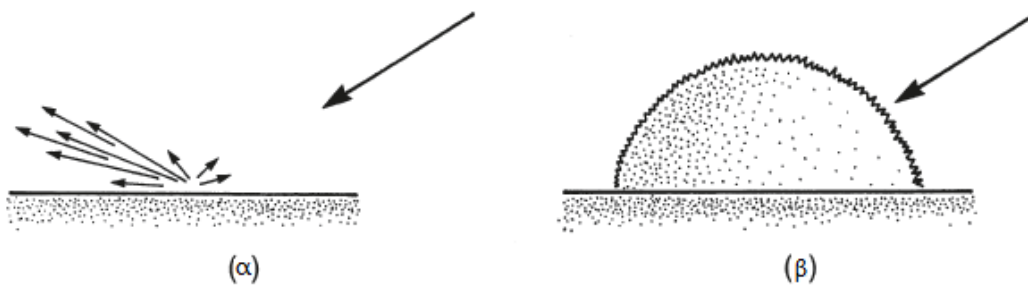
Η εξιδανικευμένη έννοια μιας τέλειας επιφάνειας διάχυσης προέρχεται από το έργο του Johann H. Lambert (1728-1777), ο οποίος πραγματοποίησε πολλά πειράματα που αποσκοπούν στην περιγραφή της συμπεριφοράς του φωτός. Ένας από τους νόμους φωτισμού του Lambert αναφέρει ότι η εισερχόμενη φωτεινότητα (ακτινοβολία) μιας τέλειας επιφάνειας διάχυσης δεν αλλάζει με την οπτική γωνία. Αυτός είναι ο νόμος συνημιτόνου του Lambert, ο οποίος αναφέρει ότι η παρατηρούμενη φωτεινότητα ( $I$ ) μιας επιφάνειας είναι ανάλογη με το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης ( $\theta$ ), όπου  $I$  είναι η φωτεινότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, όπως παρατηρείται σε μηδενική συχνότητα εμφάνισης:

$$I' = I / \cos \theta$$

Αυτή η σχέση συχνά συνδυάζεται με τον εξίσου σημαντικό νόμο αντίστροφου τετραγώνου, ο οποίος αναφέρει ότι η παρατηρούμενη φωτεινότητα μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από τον παρατηρητή στην πηγή:

$$I' = (I / \Delta^2) (\cos \theta)$$

(Οι νόμοι συνημιτόνου και αντίστροφου τετραγώνου απεικονίζονται στην Εικόνα 2.9)



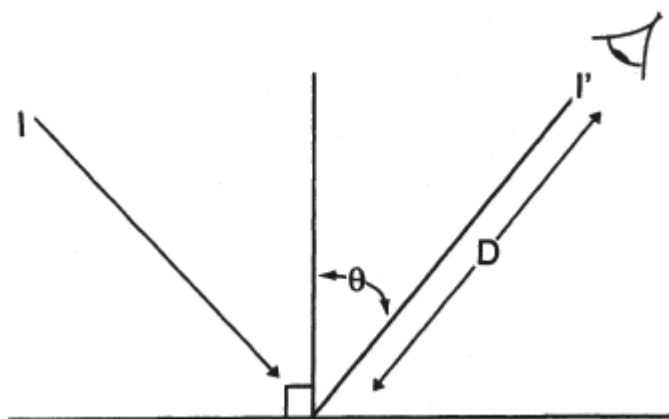
**Εικόνα 2.8.** Ανακλώμενη (α) και διάχυτη (β) ανάκλαση. Κατοπτρική ανάκλαση συμβαίνει όταν μια ομαλή επιφάνεια τείνει να κατευθύνει προσπίπτουσα ακτινοβολία σε μία μόνο κατεύθυνση. Η διάχυτη αντανάκλαση συμβαίνει όταν μια τραχιά επιφάνεια τείνει να διασκορπίσει την ενέργεια περισσότερο ή λιγότερο ισόδυναμα προς όλες τις κατευθύνσεις.

### Συνάρτηση κατανομής αμφίδρομης ανακλαστικότητας

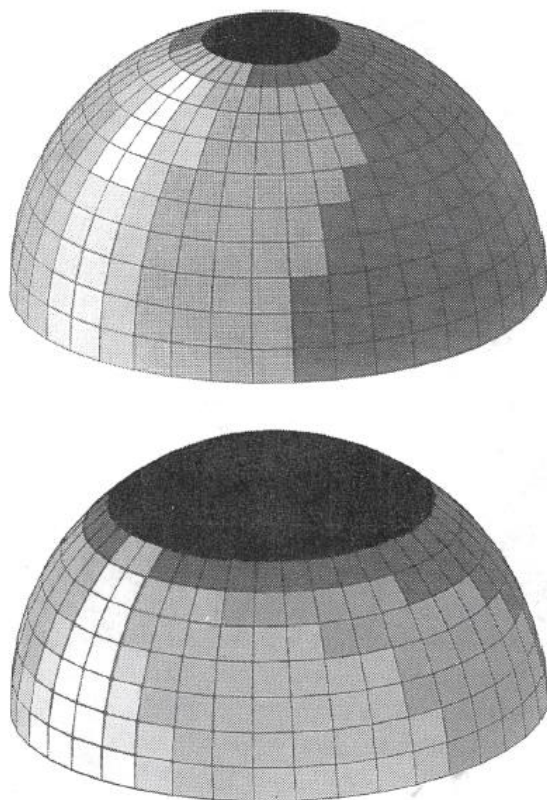
Λόγω της απλότητας και της αμεσότητάς του, η έννοια της επιφάνειας του Lambert συχνά χρησιμοποιείται ως προσέγγιση της οπτικής συμπεριφοράς των αντικειμένων που παρατηρούνται στην τηλεπισκόπηση. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό δεν ισχύει ακριβώς για πολλές, αν όχι τις περισσότερες, φυσικές επιφάνειες. Οι πραγματικές επιφάνειες παρουσιάζουν πολύπλοκα πρότυπα αντανάκλασης που καθορίζονται από τα στοιχεία της γεωμετρίας της επιφάνειας (π.χ., μέγεθος και προσανατολισμούς των φύλλων των φυτών). Ορισμένες επιφάνειες μπορεί να προσεγγίσουν τη συμπεριφορά της επιφάνειας του Lambert σε ορισμένες γωνίες πρόσπτωσης, αλλά εμφανίζουν σαφώς διαφορετικές ιδιότητες σε άλλες γωνίες.

Τα χαρακτηριστικά της αντανάκλασης μιας επιφάνειας που περιγράφεται από τη συνάρτηση κατανομής αμφίδρομης ανακλαστικότητας *bidirectional reflectance distribution function* (BRDF). Το BRDF είναι μια μαθηματική περιγραφή της οπτικής συμπεριφοράς μιας επιφάνειας σε σχέση με τις γωνίες φωτισμού και παρατήρησης, δεδομένου ότι φωτίζεται με μια παράλληλη δέσμη φωτός σε συγκεκριμένο αζιμούθιο και ανύψωση. (Η λειτουργία είναι «αμφίδρομη» με την έννοια ότι αντιπροσωπεύει τόσο τη γωνία του φωτισμού αλλά και τη γωνία παρατήρησης). Το BRDF για μια επιφάνεια του Lambert απεικονίζεται στην Εικόνα 2.14b, ακόμη πιο φωτεινή καθώς η επιφάνεια παρατηρείται υπό οποιοδήποτε γωνία. Οι πραγματικές επιφάνειες έχουν πιο σύνθετη συμπεριφορά. Η περιγραφή των BRDF για τις πραγματικές, και όχι εξιδανικευμένες, επιφάνειες

επιτρέπει την αξιολόγηση των μοιρών ως προς την οποία προσεγγίζουν τα ιδανικά των κατοπτρικών και διάχυτων επιφανειών (Εικόνα 2.10).



**Εικόνα 2.9** Νόμος αντίστροφου τετραγώνου και νόμος συνημιτόνου Lambert.



**Εικόνα 2.10** Συνάρτηση κατανομής αμφίδρομης ανακλαστικότητας για δύο επιφάνειες. Η ποικίλη σκίαση αντιπροσωπεύει διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας που απορροφάται. (Υπολογίστηκε από τον Pierre Villeneuve.)

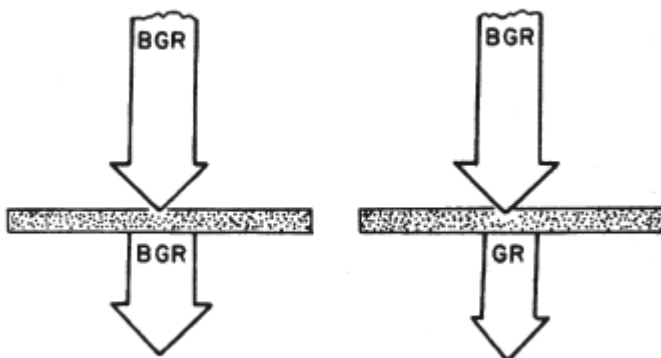


## 2.4.2 Μετάδοση

Η μετάδοση της ακτινοβολίας συμβαίνει όταν η ηλιακή ακτινοβολία περνά μέσα από μια ουσία χωρίς σημαντική εξασθένηση (Εικόνα 2.11). Για ένα δεδομένο πάχος, ή βάθος, μιας ουσίας, η ικανότητα ενός μέσου για τη μετάδοση ενέργειας μετράται ως η διαπερατότητα ( $t$ ):

$$t = \frac{\text{Εκπεμπόμενη ακτινοβολία}}{\text{Προσπίπτουσα ακτινοβολία}}$$

Στον τομέα της τηλεοπτικής, η μετάδοση των ταινιών και των φίλτρων είναι συχνά σημαντική. Σε σχέση με τα φυσικά υλικά, συχνά νομίζουμε ότι μόνο των υδάτινα συστήματα είναι ικανά να μεταδίδουν σημαντικές ποσότητες ακτινοβολίας. Ωστόσο, η διαπερατότητα πολλών υλικών ποικίλλει σημαντικά, ανάλογα με το μήκος κύματος, με αποτέλεσμα άμεσες παρατηρήσεις μας στο ορατό φάσμα να μη μεταφέρονται σε άλλα τμήματα του ραδιοφάσματος. Για παράδειγμα, τα φύλλα των φυτών είναι γενικά αδιαφανή στην ορατή ακτινοβολία, αλλά μεταδίδουν σημαντικές ποσότητες ακτινοβολίας στο υπέρυθρο.



**Εικόνα 2.11** Μεταφορά. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία διέρχεται μέσω ενός αντικείμενου χωρίς σημαντική εξασθένηση (αριστερά), ή μπορεί να είναι επιλεκτικά μεταδιδόμενη (δεξιά). Το αντικείμενο στα δεξιά θα μπορούσε να λειτουργήσει ως ένα κίτρινο φίλτρο, όπως θα διαβιβάξει όλη την ορατή ακτινοβολία εκτός από το μπλε φως.

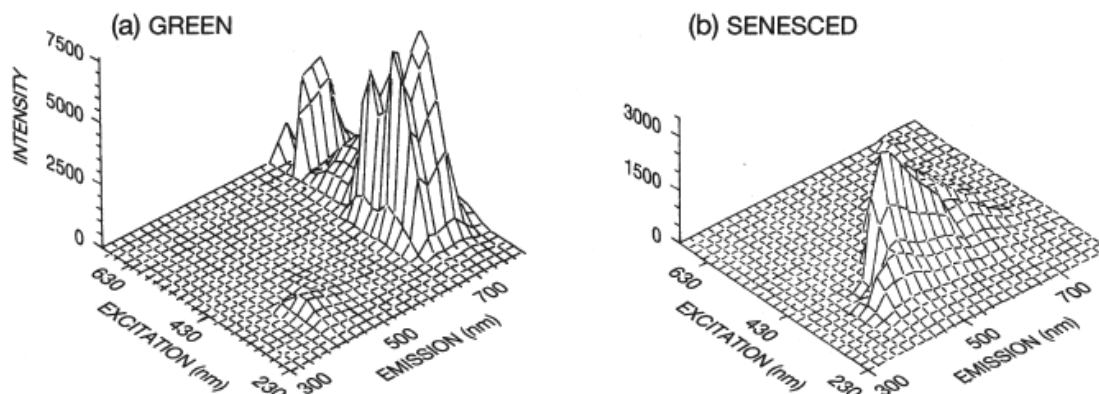
## 2.4.3 Απορρόφηση

Απορρόφηση εκφράζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η ακτινοβολία δεσμεύεται από το αντικείμενο και ακολούθως επανεκπέμπεται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος του θερμικού υπέρυθρου καναλιού. Στην περίπτωση όπου η ακτινοβολία περνάει από ένα μέσο σε ένα άλλο με διαφορετική πυκνότητα, αλλάζει η ταχύτητα και το μήκος κύματος, με ταυτόχρονη μεταβολή της γωνίας εισόδου της ακτινοβολίας.

## 2.4.4 Φθορισμός

Ο φθορισμός συμβαίνει όταν ένα αντικείμενο λαμβάνει ακτινοβολία σε ένα μήκος κύματος και εκπέμπει ακτινοβολία σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος. Τα πιο γνωστά παραδείγματα είναι μερικά θειούχα μεταλλεύματα, που εκπέμπουν ορατή ακτινοβολία όταν φωτίζονται με υπεριώδη ακτινοβολία. Άλλα αντικείμενα φθορίζουν επίσης, αν και η παρατήρηση του φθορισμού απαιτεί πολύ ακριβείς και λεπτομερείς μετρήσεις που δεν είναι πλέον συστηματικά διαθέσιμες για τις περισσότερες εφαρμογές. Η Εικόνα 2.12 απεικονίζει τον φθορισμό των υγιών και γηρασμένων φύλλων, χρησιμοποιώντας έναν άξονα για να περιγράψει τη φασματική κατανομή του φωτισμού και το άλλο για να δείξει τα φάσματα της εκπεμπόμενης ενέργειας.

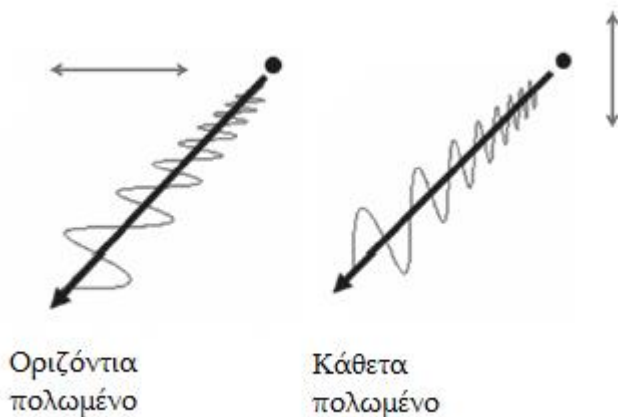
Αυτές οι αντικρουόμενες επιφάνειες απεικονίζουν την αποτελεσματικότητα του φθορισμού σε αποκαλυπτικές διαφορές μεταξύ υγιών και καταπονημένων φύλλων.



Εικόνα 2.12 Φθορισμός

### 2.4.5 Πόλωση

Η πόλωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δηλώνει τον προσανατολισμό των ταλαντώσεων εντός του ηλεκτρικού πεδίου ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (Εικόνα 2.13). Το ηλεκτρικό πεδίο ενός κύματος φωτός (που ταξιδεύει στο κενό) είναι συνήθως προσανατολισμένο κάθετα προς την κατεύθυνση του κύματος (δηλαδή, η ενέργεια διαδίδεται ως ένα εγκάρσιο κύμα). Το πεδίο μπορεί να έχει έναν προτιμώμενο προσανατολισμό, ή μπορεί να περιστρέφεται καθώς το κύμα ταξιδεύει. Παρά το γεγονός ότι η πόλωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι υπερβολικά πολύπλοκη για μια πλήρη συζήτηση εδώ, είναι δυνατόν να γίνει εισαγωγή σε ορισμένες από τις βασικές έννοιες και να τονιστεί η σημασία της.



Εικόνα 2.13 Σχηματική αναπαράσταση οριζόντια και κάθετα πολωμένης ακτινοβολίας. Τα μικρότερα βέλη υποδεικνύουν τους προσανατολισμούς των ηλεκτρικών πεδίων.

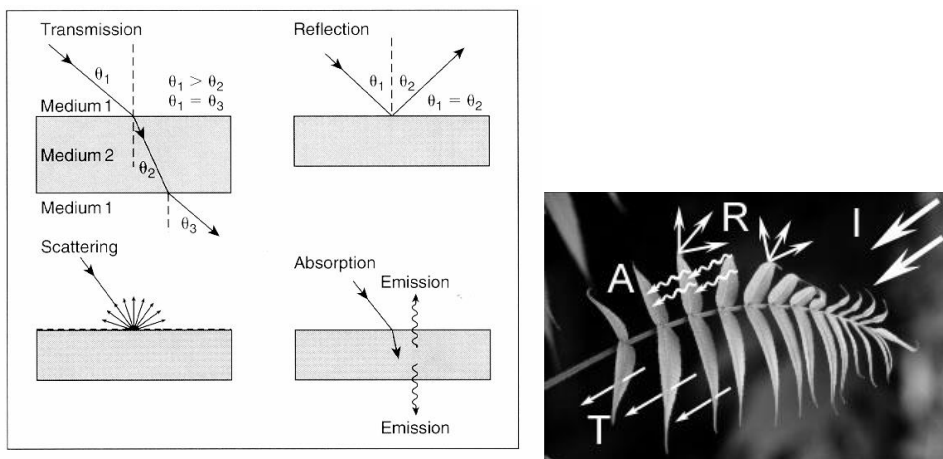
Ένα καθημερινό παράδειγμα της επίδρασης του πολωμένου φωτός δίνεται από τα πολωτικά γυαλιά ηλίου, τα οποία είναι ειδικά σχεδιασμένα για τη μείωση της αντηλιάς. Το φως του ήλιου μέσα στην ατμόσφαιρα έχει ένα μείγμα από πολώσεις· όταν φωτίζει επιφάνειες σε απότομες γωνίες (δηλαδή, όταν ο ήλιος είναι ψηλά στον ουρανό), η ανακλώμενη ακτινοβολία τείνει να έχει επίσης ένα μίγμα των πολώσεων. Ωστόσο, όταν ο ήλιος φωτίζει μια επιφάνεια σε μικρές γωνίες (δηλαδή, ο ήλιος βρίσκεται κοντά στον ορίζοντα), πολλές επιφάνειες τείνουν να αντικατοπτρίζουν την οριζόντια πολωμένη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα πολωτικά γυαλιά ηλίου κατασκευάζονται με φακούς που περιλαμβάνουν μόρια τα οποία μπορούν να απορροφήσουν την οριζόντια πολωμένη φωτεινή ακτινοβολία, μειώνοντας έτσι το έντονο φως. Η πόλωση έχει ευρύτερη σημασία στην πρακτική της τηλεπισκόπησης. Στην ατμόσφαιρα, η πόλωση του φωτός σχετίζεται με τη φύση και την αφθονία των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων και την ατμοσφαιρική διαύγεια.

## 2.4.6 Ανακλαστικότητα

Για πολλές εφαρμογές της τηλεπισκόπησης, η φωτεινότητα της επιφάνειας απεικονίζεται καλύτερα όχι ως ακτινοβολία αλλά μάλλον ως ανακλαστικότητα. Η ανακλαστικότητα εκφράζεται ως η σχετική φωτεινότητα μιας επιφάνειας όπως μετράται για ένα συγκεκριμένο διάστημα μήκους κύματος:

$$\text{Ανακλαστικότητα} = \frac{\text{Παρατηρούμενη φωτεινότητα}}{\text{Ακτινοβολία}}$$

Ως αναλογία, είναι ένας αδιάστατος αριθμός (μεταξύ 0 και 1), αλλά συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό. Στη συνήθη πρακτική της τηλεπισκόπησης, η ανακλαστικότητα δεν είναι άμεσα μετρήσιμη, διότι συνήθως μπορούμε να παρατηρήσουμε μόνο την παρατηρούμενη φωτεινότητα και πρέπει να εκτιμήσουμε την ακτινοβολία.



**Εικόνα 2.14.1 και 2.14.2** Οι τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις τις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τα αντικείμενα της γήινης επιφάνειας: Ανάκλαση (Reflection), Διάχυση (Scattering), Απορρόφηση (Absorption), Μεταβίβαση (Transmission), (Avery & Berlin, 1992). Παράδειγμα αλληλεπίδρασης σε ένα φύλλο.

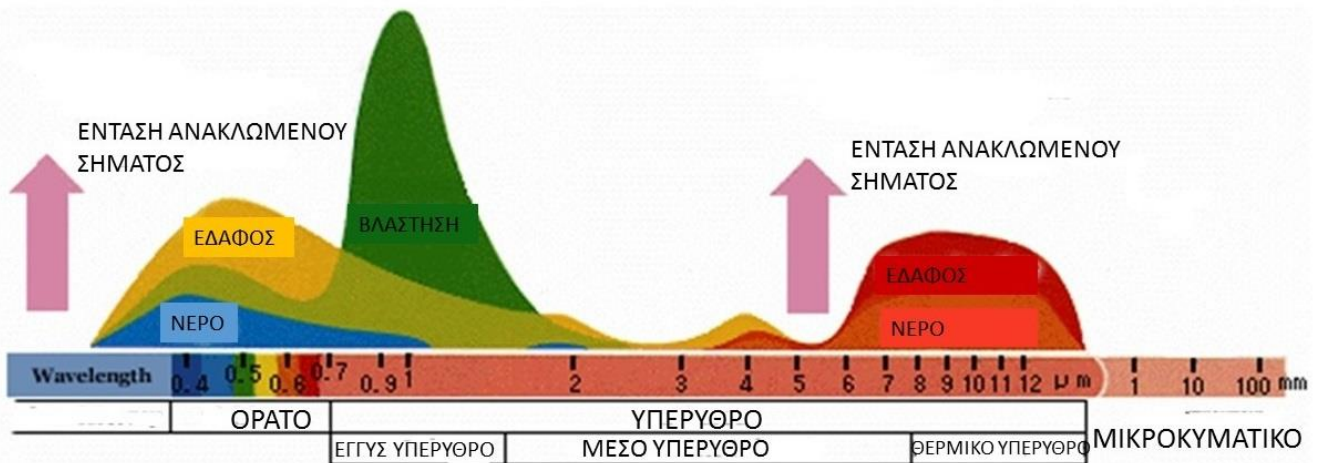
## 2.5 Φασματική απόκριση των αντικειμένων – Φασματικές ταυτότητες

Τα φυσικά χαρακτηριστικά και η σύσταση κάθε αντικειμένου επηρεάζουν το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται στα διάφορα μήκη κύματος με τον δικό του χαρακτηριστικό τρόπο. Η ποσότητα και η φασματική κατανομή της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από ένα αντικείμενο χρησιμοποιούνται ως μέσα αναγνώρισης του αντικειμένου αυτού, αναφερόμενα ως **φασματική ταυτότητα** (spectral signature) ή **φασματική απόκριση** (spectral response) του αντικειμένου και καταγράφονται από τους δέκτες (sensors) των δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά παρατήρησης της Γης (Campbell 1996· Sabins 1997· Mather 1999) (Εικόνα 2.15, Εικόνα 2.16).

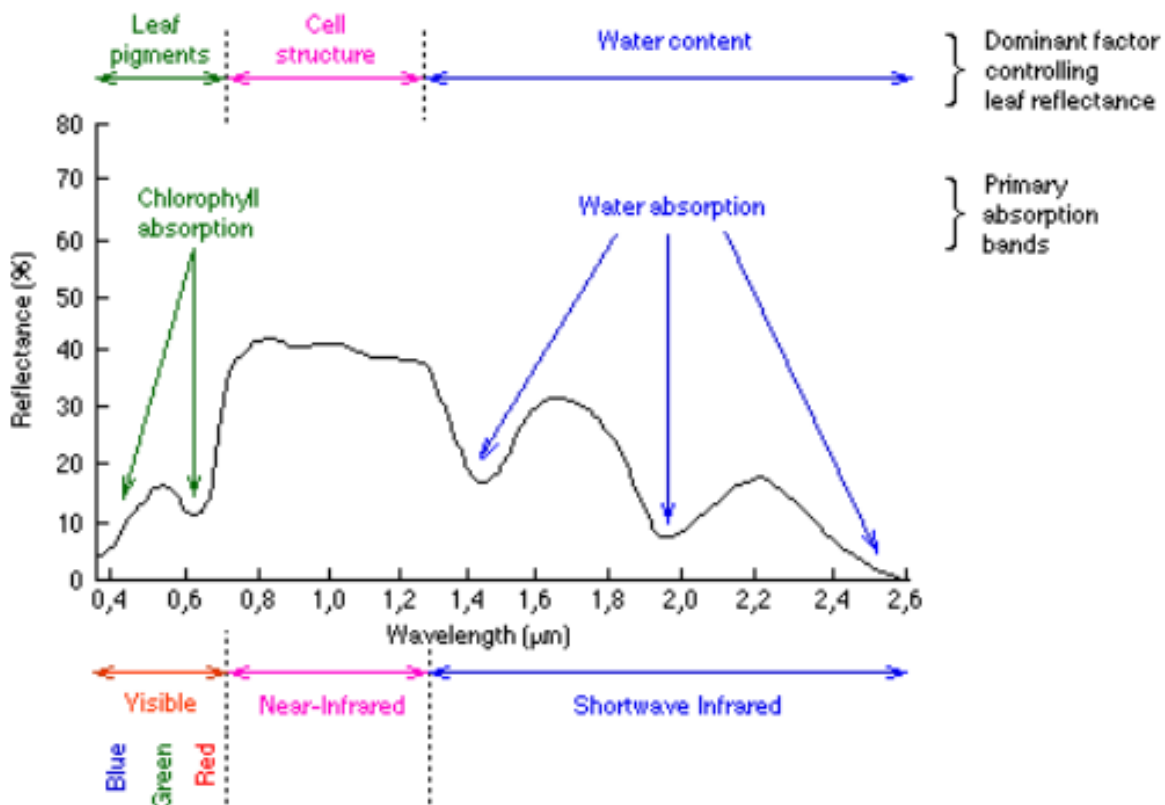
Κατ' αυτόν τον τρόπο καταγράφεται και αναλύεται η συμπεριφορά στην ανάκλαση και στην εκπομπή ακτινοβολίας (ενέργειας με τη μορφή ακτινοβολίας) των διαφόρων αντικειμένων στην επιφάνεια της Γης, ώστε

να διευκολυνθεί η επιλογή των κατάλληλων δεκτών και φασματικών ζωνών που θα βοηθήσουν καλύτερα στον εντοπισμό των αντικειμένων που μας ενδιαφέρουν και των ιδιοτήτων τους που μας ενδιαφέρουν.

Εκτός από τις επιδράσεις με την ύλη, όπως η απορρόφηση, η ανάκλαση και η διάχυση, οι οποίες διαμορφώνουν την πληροφορία που συλλέγεται με τις μεθόδους τηλεπισκόπησης, ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στην ποιότητα του φάσματος είναι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία εξαρτάται από το ύψος του Ηλίου (sun elevation).



**Εικόνα 2.15** Τυπικές καμπύλες φασματικής απόκρισης για διάφορα υλικά της γήινης επιφάνειας σε εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 0,3 έως 12 περίπου  $\mu\text{m}$  (Πηγή: CCRS).



**Εικόνα 2.16** Τυπική καμπύλη φασματικής ανάκλασης (spectral reflectance curves) της βλάστησης στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Διακρίνονται τα φασματικά τμήματα έντονης απορρόφησης από τη χλωροφύλλη (chlorophyll absorption) και το νερό (water absorption). (CCRS, 1998)

Μια χρήσιμη ποσοτική έκφραση της ανάκλασης διαφορετικών αντικειμένων είναι ο **συντελεστής ανάκλασης ή φασματική ανάκλαση ή albedo**. Εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται από τα αντικείμενα, π.χ. με 50% νεφοκάλυψη η φασματική ανάκλαση είναι 35%.

Ως εκ τούτου, το albedo επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο εμφανίζονται τα αντικείμενα κατά την παρατήρηση της Γης από το Διάστημα. Τα πλέον φωτεινά σημεία της είναι τα σύννεφα και τα πλέον σκοτεινά οι υδάτινες μάζες. Το albedo, χωρίς να αποτελεί σημαντική ιδιότητα των αντικειμένων, σε ό,τι αφορά την ανακλαστική τους ικανότητα, βοηθάει στην ερμηνεία της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου (θερμό ή κρύο) κατά την έκθεσή του στον ήλιο. Γενικά, αντικείμενα με υψηλό albedo είναι καλοί ανακλαστήρες, ενώ με χαμηλό albedo είναι καλοί απορροφητές, δηλαδή θερμαίνονται και κρυστώνουν αντίστοιχα ευκολότερα (Πίνακας 2).

Αντικείμενα	Ποσοστό ανάκλασης
Φρέσκο χιόνι	80-95
Παλαιό χιόνι	50-60
Πυκνά σύννεφα	70-80
Αραιά σύννεφα	20-30
Νερό (ήλιος κοντά στον ορίζοντα)	50-80
Νερό (ήλιος κοντά στον ζενίθ)	3-5
Άσφαλτος	5-10
Ξηρό έδαφος	20-25
Υγρό έδαφος	15-25
Κωνοφόρα δένδρα	10-15
Καλλιέργειες	10-25

**Πίνακας 2.** Οι τιμές του albedo, στο ορατό κανάλι, για διάφορα υλικά (Avery & Berlin, 1992).

## 2.6 Ηλιακή ακτινοβολία και γήινο περιβάλλον

Ο Ήλιος αποτελεί την πηγή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας η οποία με μορφή EMR τροφοδοτεί τη Γη με φως και θερμότητα, στοιχεία χρήσιμα για τη ζωή στον πλανήτη μας. Η σημαντικότερη και η πιο καθοριστική ιδιότητα του Ηλίου ως πηγής ακτινοβολίας είναι η θερμοκρασία που επικρατεί στην επιφάνειά του, η οποία σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές είναι  $5.727^{\circ}\text{C}$ . Από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του ήλιου εξαρτάται η κατανομή της εκπεμπόμενης ενέργειας στις διάφορες περιοχές του EMS.

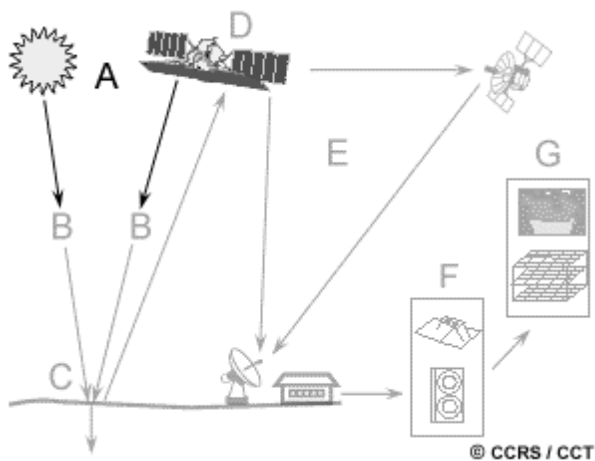
Η EMR που εκπέμπεται από τον Ήλιο (πρωτογενής, μόνο στη διάρκεια της ημέρας για έναν τόπο) φθάνει στην επιφάνεια της Γης από την οποία στη συνέχεια και επαναεκπέμπεται (δευτερογενής, ημέρα και νύχτα για τον ίδιο τόπο), οπότε και ανιχνεύεται από τους αισθητήρες. Έτσι, η ακτινοβολία περνάει δύο φορές μέσα από την ατμόσφαιρα. Στο πέρασμά της υφίσταται μεταβολές από την επίδραση τόσο των αιωρούμενων μικροσωματιδίων όσο και των αερίων μορίων που παίρνουν μέρος στη σύσταση της ατμόσφαιρας.

Το 50% της ηλιακής ακτινοβολίας διέρχεται την ατμόσφαιρα και απορροφάται σε διαφορετικό βαθμό από τα αντικείμενα της γήινης επιφάνειας. Το μεγαλύτερο μέρος της απορροφούμενης ακτινοβολίας μετατρέπεται σε χαμηλής θερμοκρασίας θερμική ενέργεια (θερμότητα), η οποία στη συνέχεια αποδίδεται πίσω στην ατμόσφαιρα ως ακτινοβολία σε θερμικά υπέρυθρα μήκη κύματος, μεταξύ 4,00 και 25,00  $\mu\text{m}$ , με ένα μέγιστο στα 9,70 $\mu\text{m}$ . Η επιφάνεια της Γης (χερσαίο και θαλάσσιο περιβάλλον) έχει σχετικά πολύ μικρή μέση θερμοκρασία, περίπου  $27^{\circ}\text{C}$  ( $290^{\circ}\text{K}$ ), και ακτινοβολεί περίπου 160.000 φορές λιγότερη ενέργεια από τον Ήλιο.

Το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας απαντά σε μήκος κύματος γύρω στα 0,48  $\mu\text{m}$ , δηλαδή στην πράσινη περιοχή του ορατού φωτός, και συμπίπτει σε γενικές γραμμές με την ακτινοβολία που δίνεται από τον νόμο του Planck για το μέλαν σώμα (black body), θερμοκρασίας  $6000^{\circ}\text{K}$ . Το μέλαν σώμα είναι μια υποθετική πηγή

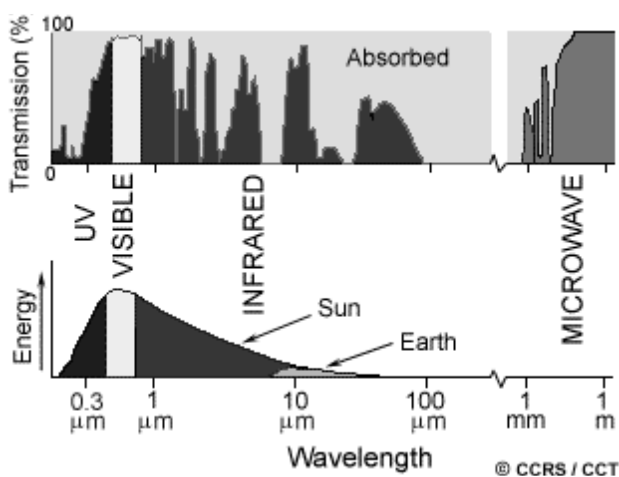
ενέργειας που συμπεριφέρεται με ιδεατό τρόπο, δηλ. απορροφά όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία χωρίς να την ανακλά και στη συνέχεια εκπέμπει ενέργεια με τη μέγιστη αποδοτικότητα. Αντίθετα, η μέγιστη ακτινοβολούμενη ενέργεια της Γης, με μέση θερμοκρασία περίπου  $290^{\circ}\text{K}$ , απαντά περίπου στα  $10\ \mu\text{m}$ , στο θερμικό κανάλι. Επομένως, η Γη είναι μια άριστη πηγή ενέργειας για δέκτες ευαίσθητους στη θερμική υπέρυθη ζώνη.

Είναι λοιπόν φανερό ότι η ποιότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας επηρεάζεται από την ατμόσφαιρα, η οποία εξασθενίζει επιλεκτικά την ακτινοβολία ανάλογα με το μήκος κύματός της.



**Εικόνα 2.17** Αλληλεπίδραση της πηγής ενέργειας και των επιφανειακών χαρακτηριστικών της Γης. A) Πηγή ενέργειας, B) ακτινοβολία και ατμόσφαιρα, C) αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και στόχου, D) καταγραφή της ανακλώμενης ακτινοβολίας από τον αισθητήρα, E) μετάδοση, υποδοχή και επεξεργασία, F) ερμηνεία και ανάλυση, G) εφαρμογές.

Οι περιοχές αυτές του φάσματος που περιλαμβάνουν μήκη κύματος τα οποία μπορούν ανεμπόδιστα να διαπεράσουν την ατμόσφαιρα καλούνται ατμοσφαιρικά παράθυρα (atmospheric windows) ή διερχόμενα κανάλια (transmission bands), ενώ σαν απορροφούμενα κανάλια (absorption bands) ή ατμοσφαιρικά τυφλά (atmospheric blinds) ορίζονται οι περιοχές εκείνες όπου τα μήκη κύματος δεσμεύονται μερικώς ή ολικώς (Εικόνα 2.18).



**Εικόνα 2.18** Κύριες φασματικές περιοχές που χρησιμοποιεί η τηλεπισκόπηση, με το φάσμα της ατμοσφαιρικής απορρόφησης (ατμοσφαιρικά παράθυρα και τυφλά, γκρι και μαύρα αντίστοιχα) και τις περιοχές που καλύπτουν τα συστήματα τηλεπισκόπησης.

Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που φθάνει στην επιφάνεια της Γης θα πρέπει να αντανακλάται, απορροφάται, ή μεταδίδεται. Οι αναλογίες που υπολογίζονται για κάθε διαδικασία εξαρτώνται από τη φύση της επιφάνειας, το μήκος κύματος της ενέργειας και τη γωνία φωτισμού.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

Avery, T. E. & Berlin, G. L. (1992). *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*. New York: Macmillan Publishing Company, 5th edition.

Barrett C.E. & Curtis F.L., (1992). Introduction to environmental remote sensing, third edition, Chapman & Hall, London.

Campbell, J. B., & Ran, L. (1993). CHROM: A C Program to Evaluate the Application of the Dark Object Subtraction Technique to Digital Remote Sensing Data. *Computers and Geosciences*, Vol. 19.

Goetz, A. F. H., Wellman, J. B., & Barnes, W. L. (1985). Optical Remote Sensing of the Earth. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 73.

Kaufman, Y. J. (1989). The Atmospheric Effect on Remote Sensing and Its Correction. Chapter 9 in *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (G. Asrar, ed.). New York: Wiley.

### 3. Ψηφιακή ανάλυση εικόνας

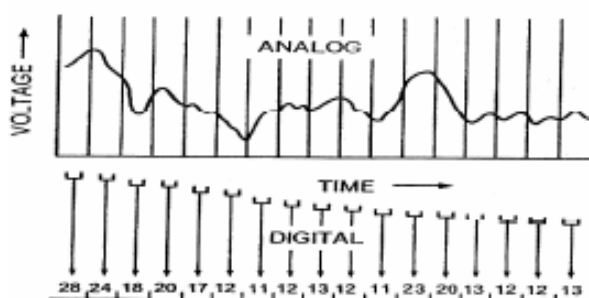
Ο χρήστης (αναλυτής) που έρχεται σε επαφή με την ψηφιακή επεξεργασία πρέπει να συμμετέχει σε πολλές διαφορετικές διεργασίες, που η κάθε μία είναι ξεχωριστή από τις υπόλοιπες στον χειρισμό, ενώ ταυτόχρονα είναι απολύτως απαραίτητη η τήρηση της διαδοχής στα βήματα της επεξεργασίας.

Ένας ηλεκτρο-οπτικός σαρωτής (όπως ο το όργανο καταγραφής του δορυφόρου Landsat) σαρώνει τη γήινη επιφάνεια και γεννά ένα ηλεκτρομαγνητικό ρεύμα που ποικίλλει σε ένταση φωτεινότητας ανάλογα με την επιφάνεια. Εάν ο δέκτης καταγράφει σε διαφορετικές φασματικές ζώνες, τότε θα δημιουργηθούν διαφορετικά ρεύματα ενέργειας. Κάθε ηλεκτρικό ρεύμα είναι ένα συνεχόμενο σύνθετο σήμα το οποίο πρέπει να υποδιαιρεθεί σε ξεκάθαρες μονάδες από τις οποίες θα δημιουργηθούν οι απαραίτητες τιμές για τη ψηφιακή ανάλυση. Η μετατροπή του συνεχόμενου αναλογικού σήματος σε διακριτές ψηφιακές τιμές ολοκληρώνεται δοκιμάζοντας (εφαρμόζοντας) το ρεύμα σε ένα ενιαίο διάστημα (αναλογικό σε ψηφιακό, analog-to-digital ή A-to-D μετατροπή) (Εικόνα 3.1). Επειδή όλες οι τιμές των σημάτων μέσα σε αυτό το διάστημα παριστάνονται με ένα μέσο σήμα, όλη η υπόλοιπη ποικιλία των τιμών χάνεται μέσα στο διάστημα αυτό. Επιπροσθέτως, οι ψηφιακές τιμές είναι κατά έναν τρόπο κλιμακούμενες, όπου απεικονίζονται σχετικά με τη φωτεινότητα, πράγμα που σημαίνει ότι οι ψηφιακές τιμές δεν αναπαριστούν τις ραδιομετρικές τιμές, παρά μόνο με κατάλληλη μετατροπή.

Κάθε ψηφιακή τιμή καταγράφεται ως ένα σύνολο ψηφιακών δυάδων που ονομάζονται bits. Κάθε bit καταγράφει ένα αντιπροσωπευτικό σήμα σε μία εκθετική δύναμη του 2. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ότι το σύστημα σχεδιάστηκε ώστε να καταγράφει επτά bits για κάθε ψηφιακή τιμή, αυτό σημαίνει ότι επτά δυαδικές περιοχές είναι διαθέσιμες στους δέκτες για να καταγράψουν τη φωτεινότητα που δέχονται για κάθε φασματικό κανάλι. Οι 7 τιμές καταγράφονται, συνεχόμενα, σε εκθετική δύναμη του 2 (καθοριζόμενα από τη θέση τους).

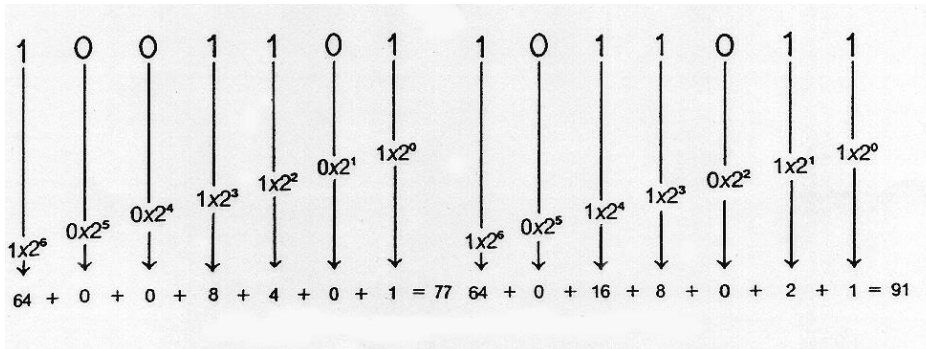
Το μηδέν 0 αποδίδει την τιμή μηδέν για αυτή τη θέση. Έτσι, τα 7 bit δυαδικών αριθμών 1111111 σημαίνουν  $2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 = 64 + 32 + 16 + 8 + 4 + 2 + 1 = 127$  και τα 1001011 καταγράφουν  $2^6 + 0 + 2^4 + 2^3 + 0 + 2^1 + 2^0 = 64 + 0 + 0 + 8 + 0 + 2 + 1 = 75$  (Εικόνα 3.2). Με αυτόν τον τρόπο διακρίνονται οι ψηφιακές τιμές με μια μορφή βολική για αποθήκευση σε δίσκους και για ανάλυση στη συνέχεια από τον H/Y.

Αυτές οι τιμές είναι γνωστές ως **ψηφιακοί αριθμοί (DN)**, **brightness values (BV)** ή ψηφιακοί υπολογισμοί.



Εικόνα 3.1 Μετατροπή των αναλογικών δεδομένων σε ψηφιακά.





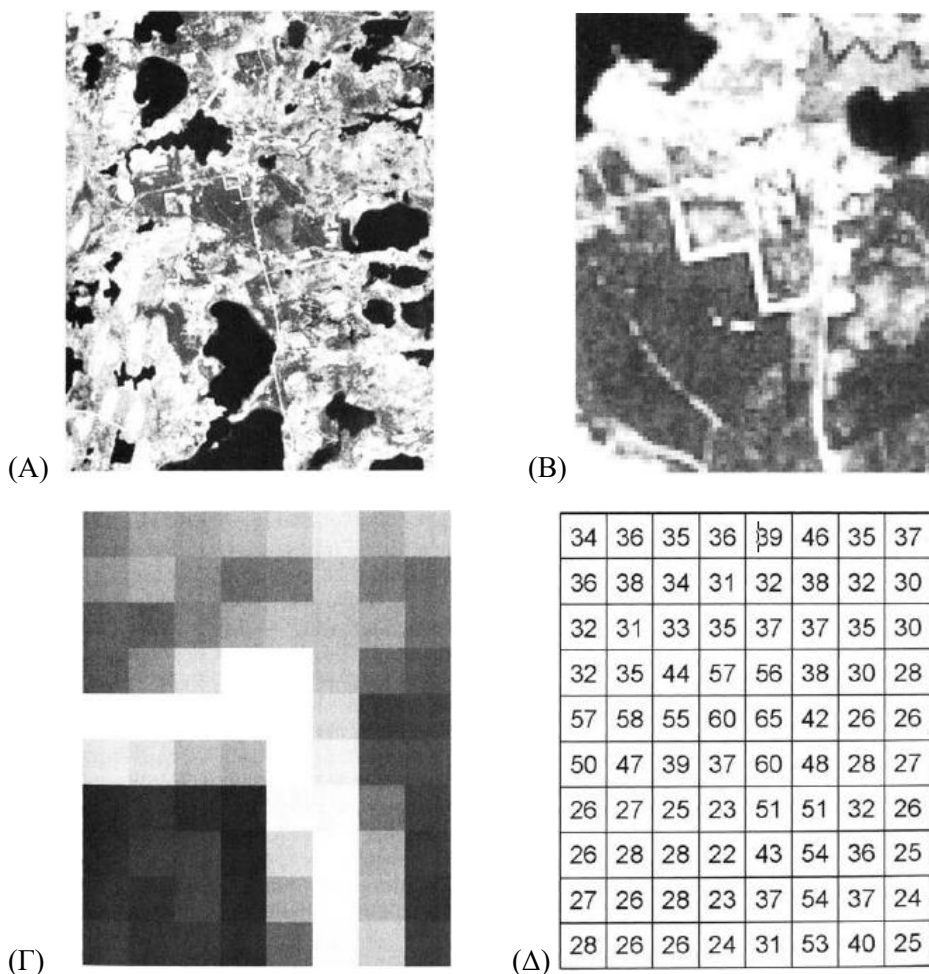
Εικόνα 3.2 Ψηφιακή αναπαράσταση των τιμών σε 7 bits (Campbell, 1996).

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των τιμών φωτεινότητας μέσα σε μια ψηφιακή εικόνα καθορίζεται από τον αριθμό των διαθέσιμων bits. Τα επτά-bit δίνουν ένα μέγιστο 128 (27) πιθανών τιμών (0-127) για κάθε εικονοστοιχείο. Μια μείωση στα έξι-bits μειώνει το εύρος των τιμών φωτεινότητας (64=26), ενώ για παράδειγμα μια αύξηση στα 8-bit αυξάνει το εύρος στα 256 (0-255). Έτσι, είναι φανερό ότι ο αριθμός των bit καθορίζει τη ραδιομετρική ανάλυση των ψηφιακών εικόνων. Τα διαθέσιμα bits καθορίζονται από τον σχεδιασμό του συστήματος και ιδιαίτερα του δέκτη (προσθέτοντας πολλά bits, το σύστημα καταγράφει θόρυβο παρά εξασφαλίζει πληροφορίες για τη φωτεινότητα) και τις ικανότητες καταγραφής και εκπομπής (μετάδοσης) των δεδομένων (κάθε προστιθέμενο bit αυξάνει τις απαιτήσεις μετάδοσης και τον όγκο των δεδομένων). Εάν αναλογιστούμε ότι οι πηγές μετάδοσης και αποθήκευσης είναι καθορισμένες, τότε αυξάνοντας τον αριθμό των bits για κάθε εικονοστοιχείο συνεπάγεται ότι θα έχουμε λιγότερα εικονοστοιχεία ανά εικόνα και ότι το μέγεθος των εικονοστοιχείων θα είναι μεγαλύτερο. Έτσι, ο σχεδιασμός των συστημάτων τηλεπισκόπησης απαιτεί ισορροπία μεταξύ της έκτασης που καλύπτει η εικόνα και της ραδιομετρικής, φασματικής και χωρικής διακριτικής ικανότητας.

Ο Landsat TM θεματικός χαρτογράφος με τα δεδομένα στα 8 bit παρουσιάζει βελτίωση στη ραδιομετρική λεπτομέρεια, γεγονός το οποίο οφείλεται στη βελτίωση των ικανοτήτων επικοινωνίας των φερόμενων συστημάτων στους Landsat 4 και 5 (Avery & Berlin 1992· Campbell 1996· Mather 1999).

### 3.1 Ψηφιδωτά (raster) δεδομένα

Τα ψηφιδωτά δεδομένα προσφέρουν πλεονεκτήματα για τη διαχείριση των τιμών των εικονοστοιχείων από τα λογισμικά επεξεργασίας, καθώς είναι εύκολο να βρεθούν και να εντοπιστούν τα εικονοστοιχεία και οι τιμές τους. Ορισμένα μειονεκτήματα προκύπτουν όταν χρειάζεται να παρουσιάσουμε όχι μεμονωμένα εικονοστοιχεία, αλλά τμήματα αυτών ως διακριτά σημεία ή περιοχές. Σε αυτή την περίπτωση τα διανυσματικά δεδομένα λειτουργούν πιο καλά, ωστόσο δεν είναι κατάλληλα για ψηφιακή ανάλυση δεδομένων τηλεπισκόπησης, παρόλο που πολύ συχνά τα χρησιμοποιούμε για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση των δεδομένων.



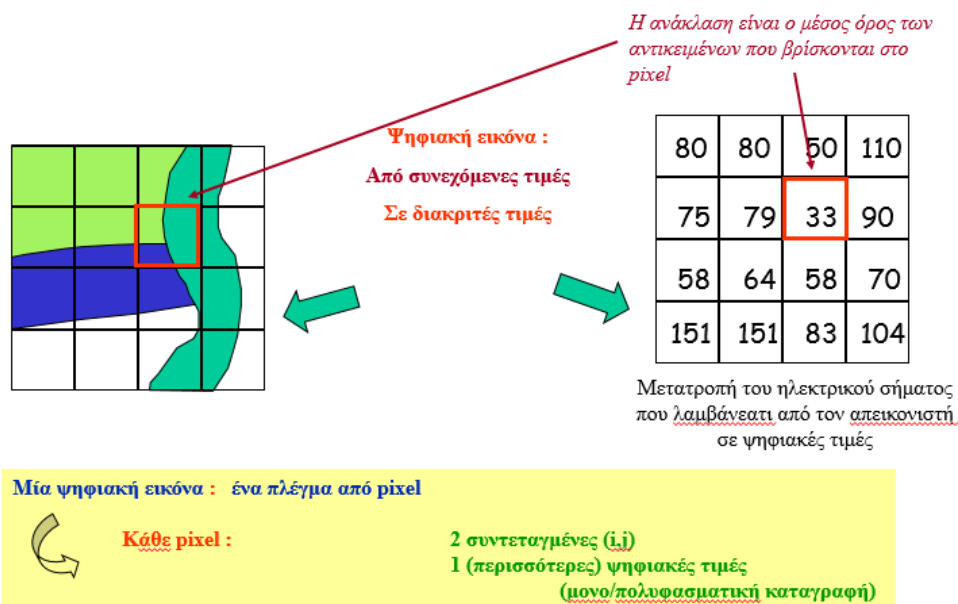
**Εικόνα 3.3** Δομικά στοιχεία μιας ψηφιακής εικόνας: (Α) Αρχική εικόνα 500 (γραμμές) x 400 (στήλες), (Β) Μεγέθυνση της αρχικής εικόνας συνολικών διαστάσεων 100 x 80, (Γ) Μεγέθυνση εικόνας συνολικών διαστάσεων 10 x 8, (Δ) Ψηφιακοί αριθμοί που αντιστοιχούν στην ακτινοβολία του κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας Γ. (Lillesand et al, 2003).

### 3.2 Χαρακτηριστικά ψηφιακής εικόνας

Στη φυσική της μορφή, μια ψηφιακή εικόνα είναι παράταξη δύο διαστάσεων από μικρές περιοχές, που όπως έχει αναφερθεί καλούνται εικονοστοιχεία τα οποία ανταποκρίνονται χωρικά σε σχετικά μικρές περιοχές που καλούνται εδαφικές κυψελίδες διαχωρικής ικανότητας (ground resolution cells). Οι οριζόντιες γραμμές των εικονοστοιχείων καλούνται γραμμές (lines) και οι κάθετες καλούνται στήλες (columns). Έτσι, μια παράταξη αποτελείται από n γραμμές που τρέχουν από πάνω προς τα κάτω και s στήλες από αριστερά προς τα δεξιά. Εξαιτίας αυτής της κατανομής των εικονοστοιχείων θεωρούμε πάντα το πάνω αριστερά σημείο ότι έχει συντεταγμένες: γραμμή 1, στήλη 1 (Ψωμιάδης, 1997).

#### Ιστόγραμμα ψηφιακής εικόνας

Πολυάριθμα χαρακτηριστικά μιας μονοφασματικής εικόνας βρίσκονται στο ιστόγραμμά της. Το ιστόγραμμα περιγράφει την κατανομή των εικονοστοιχείων (ψηφιακοί αριθμοί, DN) μιας εικόνας, που κυμαίνονται μεταξύ 0 και 255. Επίσης, το ιστόγραμμα παρουσιάζει τον αριθμό των εικονοστοιχείων για κάθε τιμή στο εύρος τιμών 0-255. Με άλλα λόγια, το ιστόγραμμα περιέχει τις συχνότητες των ψηφιακών τιμών σε μια εικόνα. Τα δεδομένα ενός ιστογράμματος μπορούν να παρουσιαστούν είτε σε πίνακα (Πίνακας 3.1) είτε γραφικά (Εικόνα 3.4). (Janssen & Huurneman 2001).



Εικόνα 3.4 Μετατροπή συνεχόμενων τιμών σε διακριτές.

Histogram	DN	Npts	Total	Percent
Band 1	3	130	130	0.0004
	4	597.840	597.970	1.6607
	5	4.245.978	4.843.948	11.7944
	6	2.882.771	7.726.719	8.0077
	7	1.825.240	9.551.959	5.0701
	8	1.577.785	11.129.744	4.3827
	9	1.073.328	12.203.072	2.9815
	10	655.703	12.858.775	1.8214
	11	446.063	13.304.838	1.2391
	12	247.745	13.552.583	0.6882
	...	...	...	...
	245	0	35.999.987	0.0000
	246	2	35.999.989	0.0000
	247	0	35.999.989	0.0000
	248	2	35.999.991	0.0000
	249	0	35.999.991	0.0000
	250	1	35.999.992	0.0000
	251	1	35.999.993	0.0000
	252	1	35.999.994	0.0000
	253	1	35.999.995	0.0000
254	0	35.999.995	0.0000	
255	5	36.000.000	0.0000	

Πίνακας 3.1 Παράδειγμα ιστογράμματος σε πίνακα.

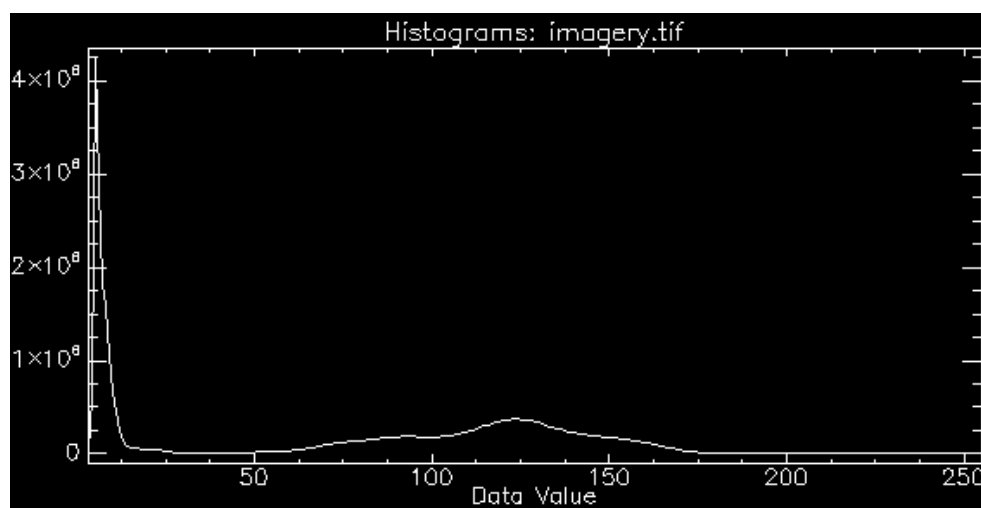
Οι πίνακες που περιγράφουν ιστογράμματα (Πίνακας 3.1) συνήθως περιέχουν τις παρακάτω στήλες:

- DN= Ψηφιακοί αριθμοί
- Nrpts= Αριθμός των εικονοστοιχείων για τη συγκεκριμένη ψηφιακή τιμή (συχνότητα)
- Total= Αθροιστικός αριθμός των εικονοστοιχείων σε μια εικόνα, με τιμή ίση ή μικρότερη του ψηφιακού αριθμού
- Percent= Ποσοστό που καταλαμβάνει το πλήθος των εικονοστοιχείων για μια συγκεκριμένη ψηφιακή τιμή, βάση του συνολικού αριθμού των εικονοστοιχείων

Τα δεδομένα ενός ιστογράμματος μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω σε ορισμένα περιγραφικά στατιστικά: μέσος όρος (mean), τυπική απόκλιση (standard deviation), ελάχιστη(min)/μέγιστη(max) τιμή, όπως επίσης και οι τιμές 1% και 99% (Πίνακας 3.1). Η τυπική απόκλιση είναι το στατιστικό μέτρο της διασποράς των τιμών γύρω από τον μέσο όρο. Η τιμή 1% εκφράζει το όριο κάτω από το οποίο σημειώνονται μόνο το 1% όλων των ψηφιακών τιμών. Οι τιμές 1% και 99% μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ορίσουν την ιδανική επέκταση του ιστογράμματος (histogram stretch) ώστε να γίνει πιο αποτελεσματική η οπτικοποίηση των δεδομένων (Janssen & Huurneman 2001).

	Min	Max	Mean	Std.Dev.
Band 1	3	255	73.391170	57.908413

**Πίνακας 3.2** Περιγραφικά στατιστικά ενός ιστογράμματος.



**Εικόνα 3.5** Παράδειγμα ιστογράμματος εικόνας βάση του πίνακα 3.1. (ENVI 5.0)

Μια εικόνα υψηλής πιστότητας, πριν δοθεί στους ερευνητές για ανάλυση, υπόκειται σε:

- α) διορθώσεις
- β) αποκατάσταση της αρχικής της μορφής

Η παραπάνω διαδικασία περιλαμβάνει γεωμετρικές και ραδιομετρικές διορθώσεις, καθώς και απομάκρυνση των «θορύβων» (Mather, 1999). Τα γεωμετρικά λάθη μπορεί να οφείλονται σε λάθη των οργάνων του δορυφόρου, στην πανοραμική παραμόρφωση λόγω του σχήματος της Γης ή στην περιστροφή της. Γεωμετρική διόρθωση ονομάζεται η μετατροπή της εικόνας έτσι ώστε να έχει συγκεκριμένη και ενιαία κλίμακα και σχεδιαστικές ιδιότητες χάρτη. Η ακτινοβολία που μετριέται από ένα σύστημα για ένα αντικείμενο επηρεάζεται από παράγοντες όπως ο φωτισμός, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του οργάνου που κάνει τη μέτρηση. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να διορθώσουμε μια εικόνα από τις επιδράσεις αυτές ονομάζονται ραδιομετρικές και είναι δυσκολότερες στην εφαρμογή τους σε σχέση με τις γεωμετρικές.

Τα βασικά τμήματα επεξεργασίας μιας εικόνας είναι τα εξής (Avery & Berlin 1992; Richards 1993; Campbell 1996):

- α) Αποκατάσταση ή προεπεξεργασία (preprocessing) της εικόνας
- β) Βελτίωση της παρουσίας της εικόνας (image enhancement)
- γ) Ταξινόμηση της εικόνας (image classification)

#### Λογισμικά επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων

Τα ψηφιακά δεδομένα τηλεπισκόπησης υφίστανται επεξεργασία από λογισμικά ηλεκτρονικών υπολογιστών τα οποία διαχειρίζονται τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί σε εικονοστοιχεία ώστε να δώσουν πληροφορίες σχετικά με συγκεκριμένα θέματα, όπως περιγράφεται στα επόμενα κεφάλαια. Αυτού του είδους η ανάλυση είναι γνωστή ως επεξεργασία εικόνας, ένας όρος που περικλείει αρκετά ευρύ φάσμα τεχνικών. Η επεξεργασία εικόνας απαιτεί ένα σύστημα εξειδικευμένων λογισμικών ηλεκτρονικών υπολογιστών προσαρμοσμένα στη χειραγώγηση των ψηφιακών δεδομένων εικόνας. Παρά το γεγονός ότι τα εν λόγω προγράμματα ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό όσον αφορά τον σκοπό και τη λεπτομέρεια, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν τα κύρια συστατικά που ενδέχεται να περιλαμβάνονται στα περισσότερα συστήματα επεξεργασίας εικόνας.

Σχεδόν όλα τα σύγχρονα λογισμικά επεξεργασίας κατευθύνονται από μενού και γραφικά περιβάλλοντα χρήστη (Graphical User Interface) που επιτρέπουν στον αναλυτή/χρήστη να επιλέξει δυνατότητες από μια λίστα στην οθόνη ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αν και είναι διαθέσιμα πολλά ικανά εμπορικά λογισμικά επεξεργασίας εικόνας, μερικά από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα είναι τα εξής: ERDAS IMAGINE (Hexagon Geospatial), ENVI (Exelis VIS), IDRISI (Clark Labs), Geomatica (PCI Geomatics) κ.ά.

## **Βιβλιογραφικές αναφορές**

### Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Avery, T.E. & Berlin, G.L. (1992). *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*. New York: Mc Millan Publishing Company, 5th edition .

Campbell, B.J., (1996). *Introduction to Remote Sensing*. New York, London: Virginia Polytechnic Institute and State University, The Guilford Publications Press, 2nd edition.

Campbell, B.J., & Wynne, R.H. (1996). *Introduction to Remote Sensing*. New York, London: The Guilford Publications Press, 5th edition.

Mather, M.P., (1999). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images*. UK: J. Wiley & Sons, 2nd edition p. 292.

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., & Chipman, Jonathan W. (2003). *Remote Sensing and Image Interpretation*. USA: J. Wiley & Sons, 5th edition, p. 26.

Janssen, L.F., & Huurneman, G.C. (2001). *Principles of Remote Sensing*. ITC Educational Textbook Series. Enschede, The Netherlands: The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 2nd edition.

Richards J., (1993). *Remote sensing digital image analysis. An Introduction*. Springer-Verlag, 2nd edition.

#### Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

Μιγκίρος, Γ., Παυλόπουλος, Α., Παρχαρίδης, Ι., Γατσής, Ι., Ψωμιάδης, Ε. (2003). ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ – Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες. Σημειώσεις εργαστηρίου Ορυκτολογίας-Γεωλογίας Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Ψωμιάδης, Εμμ. (1997). Υδρολογικές συνθήκες των παράκτιων λεκανών του Βόρειου Κορινθιακού κόλπου με έμφαση στην ανίχνευση της διαφυγής υπογείων υδάτων με χρήση τηλεανίχνευσης. Πτυχιακή μελέτη. Υποβλήθηκε στα Εργαστήρια Ορυκτολογίας-Γεωλογίας και Γεωργικής Υδραυλικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, σελ. 211.

## 4. Όργανα καταγραφής και δορυφόροι παρατήρησης της Γης.

Δύο είναι τα βασικά δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης και απεικόνισης της Γης:

1. Τα συστήματα τηλεπισκόπησης που καταγράφουν τη «φυσική» ακτινοβολία ονομάζονται **παθητικά**. Για την ανακλώμενη ενέργεια αυτό συμβαίνει κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν ο ήλιος φωτίζει τμήματα της Γης, ενώ δεν υπάρχει ανακλώμενη ενέργεια τη νύχτα. Η με φυσικό τρόπο εκπεμπόμενη ενέργεια (θερμικό υπέρυθρο) μπορεί να καταγραφεί ημέρα ή νύχτα και εφόσον το ποσό της ενέργειας είναι τέτοιο ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή. Τα παθητικά συστήματα χρησιμοποιούν το τμήμα του φάσματος από πολύ μικρά μήκη κύματος (μικρότερα του 0,4 μm) έως την περιοχή του μήκους κύματος 1.000 μm.

2. Τα **ενεργητικά** συστήματα είναι εκείνα που καταγράφουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από άλλη εξωτερική πηγή ή από το ίδιο το όργανο καταγραφής. Συνήθως το σύστημα καταγραφής είναι αυτό που εκπέμπει και την ενέργεια προς την επιφάνεια και στη συνέχεια ανακλάται επιστρέφει και καταγράφεται η «ηχώ» του σήματος από το ίδιο το σύστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου τύπου οργάνου είναι τα Radars που εκπέμπουν στην περιοχή των μικροκυμάτων. Η ανάγκη των ενεργών συστημάτων σε ενέργεια είναι μεγάλη και για τον λόγο αυτό η λειτουργία τους δεν είναι συνεχής.

### Χαρακτηριστικά της τροχιάς των δορυφόρων

Η διαδρομή που ακολουθείται από έναν δορυφόρο γύρω από τη Γη ονομάζεται τροχιά. Η τροχιά σχετίζεται με τις δυνατότητες και τον στόχο για το οποίο τέθηκε σε τροχιά ο δορυφόρος. Η επιλογή της τροχιάς μπορεί να αλλάζει ως προς το ύψος, τον προσανατολισμό και την περιστροφή ως προς τη Γη.

Οι δορυφόροι που έχουν τεθεί σε πολύ υψηλές τροχιές και στοχεύουν πάντοτε την ίδια περιοχή της Γης ονομάζονται γεωστατικοί δορυφόροι και η τροχιά τους γεωστατική (Εικόνα 4.1).

Οι γεωστατικοί δορυφόροι βρίσκονται σε τροχιά περίπου 36.000 Km και περιστρέφονται με ταχύτητες όμοιες με την περιστροφή της Γης. Έτσι δίνουν την εντύπωση ότι είναι στατικοί σχετικά με την επιφάνεια της Γης. Αυτό επιτρέπει στον δορυφόρο να παρατηρεί και να συλλέγει πληροφορίες πάνω από συγκεκριμένες περιοχές. Γεωστατικοί είναι οι μετεωρολογικοί και τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι. Τα δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης της Γης έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να ακολουθούν μια τροχιά η οποία, σε συνδυασμό με την περιστροφή της Γης από τα δυτικά προς τα ανατολικά, επιτρέπει σε αυτά να καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η τροχιά αυτή ονομάζεται **σχεδόν πολική** (Εικόνα 4.1), από την κλίση της τροχιάς που είναι σχεδόν B-N. Το είδος αυτό τροχιάς ονομάζεται και **ηλιοσύγχρονη** γιατί οι δορυφόροι καλύπτουν κάθε περιοχή της Γης σε μια σταθερή τοπική ώρα. Σε οποιοδήποτε γεωγραφικό πλάτος και μήκος και για την ίδια εποχή, ο Ήλιος θα έχει την ίδια θέση, καθώς καλύπτεται από τον δορυφόρο. Αυτό σημαίνει ότι ο φωτισμός παραμένει σταθερός και διευκολύνει τις συγκρίσεις διαχρονικά για την ίδια εποχή. Επίσης, η καταγραφή της επιφάνειας παρουσιάζει αλλαγές στον τρόπο που η ηλιακή ακτινοβολία φθάνει στη Γη και φωτίζει την επιφάνεια, ως προς το αζιμούθιο και την ηλιακή γωνία ανύψωσης. Οι αλλαγές αυτές είναι εποχικές και αφορούν μόνο τα οπτικά συστήματα καταγραφής.

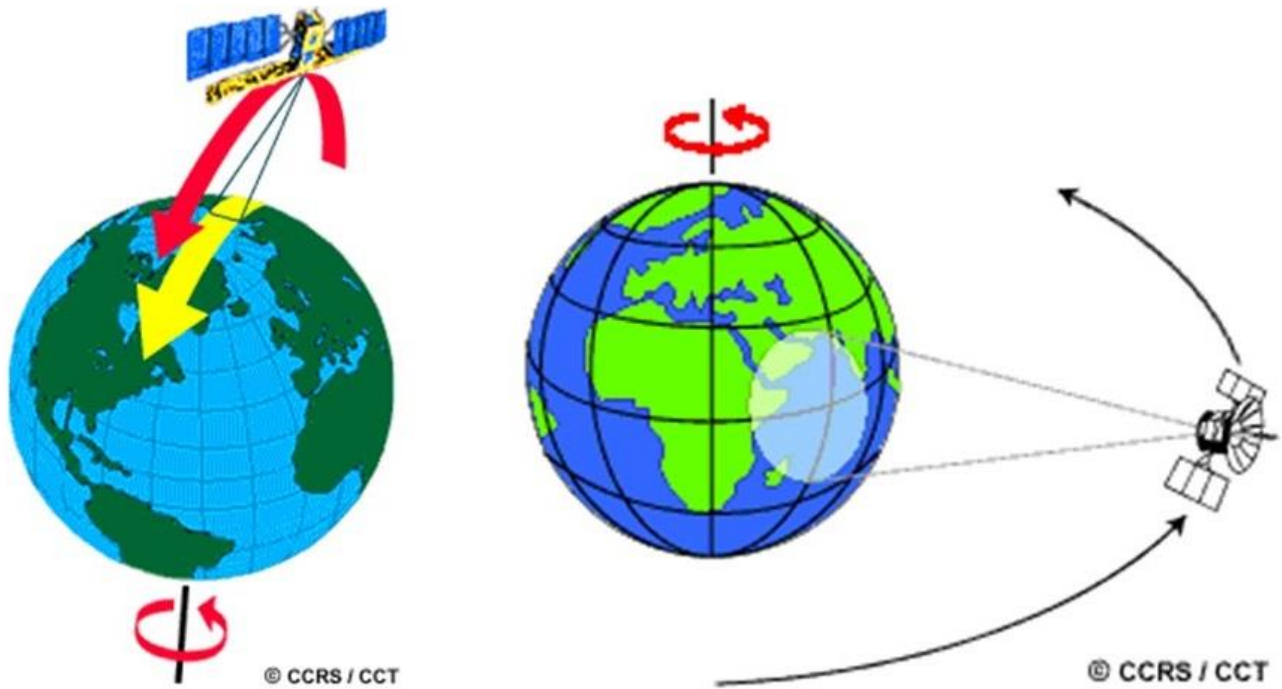
### **Όργανα καταγραφής**

Ο όρος απομακρυσμένοι αισθητήρες (remote sensors) περιλαμβάνει όλα τα όργανα ανίχνευσης και μέτρησης από απόσταση της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, καθώς και τα ανακλώμενα ακουστικά κύματα από αντικείμενα που βρίσκονται κάτω από τις υδατικές μάζες, στην περίπτωση των Sonar (Avery & Berlin, 1992).

Οι περισσότερες εφαρμογές της τηλεπισκόπησης απαιτούν πληροφορίες από διαφορετικές φασματικές περιοχές (πολυφασματική/multispectral-multiband), οι οποίες αποκτούνται με διαφορετικούς αισθητήρες (πολυαισθητήρες/multisensor) ή έναν μεμονωμένο αισθητήρα που λειτουργεί ταυτόχρονα σε διαφορετικές φασματικές περιοχές (multispectral ή multiband sensor).

Οι απεικονιστές μπορούν να ταξινομηθούν:

- ανάλογα με τις διεργασίες ανίχνευσης (π.χ. φωτογραφικοί ή απεικονιστές τηλεόρασης)
- ανάλογα με τη φασματική περιοχή λειτουργίας τους ή τον τρόπο λειτουργίας τους (π.χ. ενεργητικοί ή παθητικοί απεικονιστές)



**Εικόνα 4.1** Αριστερά η σχεδόν πολική τροχιά δορυφόρων και δεξιά η γεωστατική τροχιά.

Σύμφωνα με τους Lillesand & Kiefer (2000) οι απεικονιστές ταξινομούνται σε οπτικούς (optical) ή παθητικούς και μικροκυματικούς (microwave) ή ενεργητικούς.

Οι οπτικοί απεικονιστές λειτουργούν στην υπεριώδη, ορατή και υπέρυθη περιοχή του φάσματος και όλοι χρησιμοποιούν για απεικόνιση στοιχεία ανάκλασης και επανεκπομπής. Οι μικροκυματικοί απεικονιστές λειτουργούν σε φασματική περιοχή με μήκος κύματος ίσο ή μεγαλύτερο του χιλιοστού και χρησιμοποιούν την ακτινοβολία που οι ίδιοι εκπέμπουν διαθέτουν δηλαδή και πομπό και δέκτη.

Τα συστήματα απεικόνισης της γήινης επιφάνειας, δηλ. οι αισθητήρες (sensors), μπορούν να υποδιαιρεθούν σε τρεις βασικούς τύπους, τις κάμερες, τους σαρωτές και τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR).

Οι κάμερες και οι σαρωτές αποτελούν οπτικά συστήματα και είναι παθητικοί αισθητήρες, δηλαδή καταγράφουν την ανακλώμενη ή εκπεμπόμενη «φυσική» ακτινοβολία (με πηγή ακτινοβολίας τον ήλιο) ενώ τα SAR αποτελούν ενεργητικούς αισθητήρες, δηλαδή στέλνουν και δέχονται πίσω τα μικροκυματικά σήματα (με πηγή και δέκτη της ακτινοβολίας τον ίδιο τον αισθητήρα).

Τα λαμβανόμενα από τον αισθητήρα σήματα καταγράφονται τόσο σε αναλογική όσο και σε ψηφιακή μορφή. Τα αναλογικά δεδομένα είναι υλικό τυπωμένο σε κάποιο φιλμ ή χαρτί (όπως οι αεροφωτογραφίες), ενώ τα ψηφιακά δεδομένα είναι υλικό που βρίσκεται σε δυαδική μορφή και μπορεί να το διαχειριστεί κάποιος σε έναν Η/Υ.

#### 4.1 Βασικά χαρακτηριστικά των οργάνων καταγραφής

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της τηλεπισκόπησης στη χρήση εικόνων, όπου χρησιμοποιούνται φασματικά κανάλια στο ορατό, υπέρυθρο και μικροκυματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, περιγράφονται με τη χωρική (spatial), φασματική (spectral) και ραδιομετρική (radiometric) και χρονική (temporal) διακριτική ικανότητα ή ανάλυση.



## Χωρική διακριτική ικανότητα

Για ορισμένα όργανα καταγραφής η απόσταση μεταξύ της γήινης επιφάνειας και του οργάνου καταγραφής αποτελεί καθοριστικό ρόλο στη λεπτομέρεια της πληροφορίας που καταγράφεται. Η ευδιάκριτη λεπτομέρεια σε μια εικόνα εξαρτάται από τη **χωρική διακριτική ικανότητα** του οργάνου καταγραφής και αναφέρεται στο μέγεθος του μικρότερου χαρακτηριστικού που μπορεί να ανιχνευθεί. Για ορισμένα όργανα καταγραφής, η απόσταση μεταξύ του στόχου και της διαστημικής εξέδρας είναι καθοριστική για τη λεπτομέρεια της παραγόμενης εικόνας. Συνήθως σε δορυφόρους που βρίσκονται σε πολύ υψηλή τροχιά ενώ καταγράφουν μεγάλες περιοχές η διακριτική ικανότητα περιορίζεται. Ανεξάρτητα από τη διακριτική ικανότητα ενός συστήματος, μικρά χαρακτηριστικά μπορούν να αναγνωριστούν εάν η φασματική τους απόκριση διαφέρει σημαντικά από τον περιβάλλοντα χώρο (π.χ. δρόμοι). Εάν ένα σύστημα καταγραφής έχει χωρική διακριτική ικανότητα 20 m, τότε στην αντίστοιχη εικόνα κάθε εικονοστοιχείο (pixel) αντιπροσωπεύει μία περιοχή της επιφάνειας ίση με 20 X 20 m.

Ο Αστάρας (1994) αναφέρει ως χωρική διακριτική ικανότητα μιας εικόνας ή φωτογραφίας την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο αντικειμένων στην οποία οι διαστάσεις τους φαίνονται χωριστά και καθαρά. Αντικείμενα που βρίσκονται σε πλησιέστερη απόσταση από αυτήν θα φαίνονται στην εικόνα ως ένα αντικείμενο. Η χωρική διακριτική ικανότητα εξαρτάται από την αντίθεση φωτεινότητας (contrast) των αντικειμένων της εικόνας. Ως αντίθεση φωτεινότητας ορίζεται ο λόγος της διαφοροποίησης στη φωτεινότητα, μεταξύ ενός αντικειμένου και των υπολοίπων που βρίσκονται γύρω του, ή του αθροίσματος των δύο αυτών φωτεινοτήτων, εκφραζόμενο επί τους εκατό. Σύμφωνα με τον Campbell (1996) ως αντίθεση ορίζεται ως η διαφοροποίηση της φωτεινότητας ενός αντικειμένου σε σχέση με το «φόντο» που υπάρχει γύρω του.

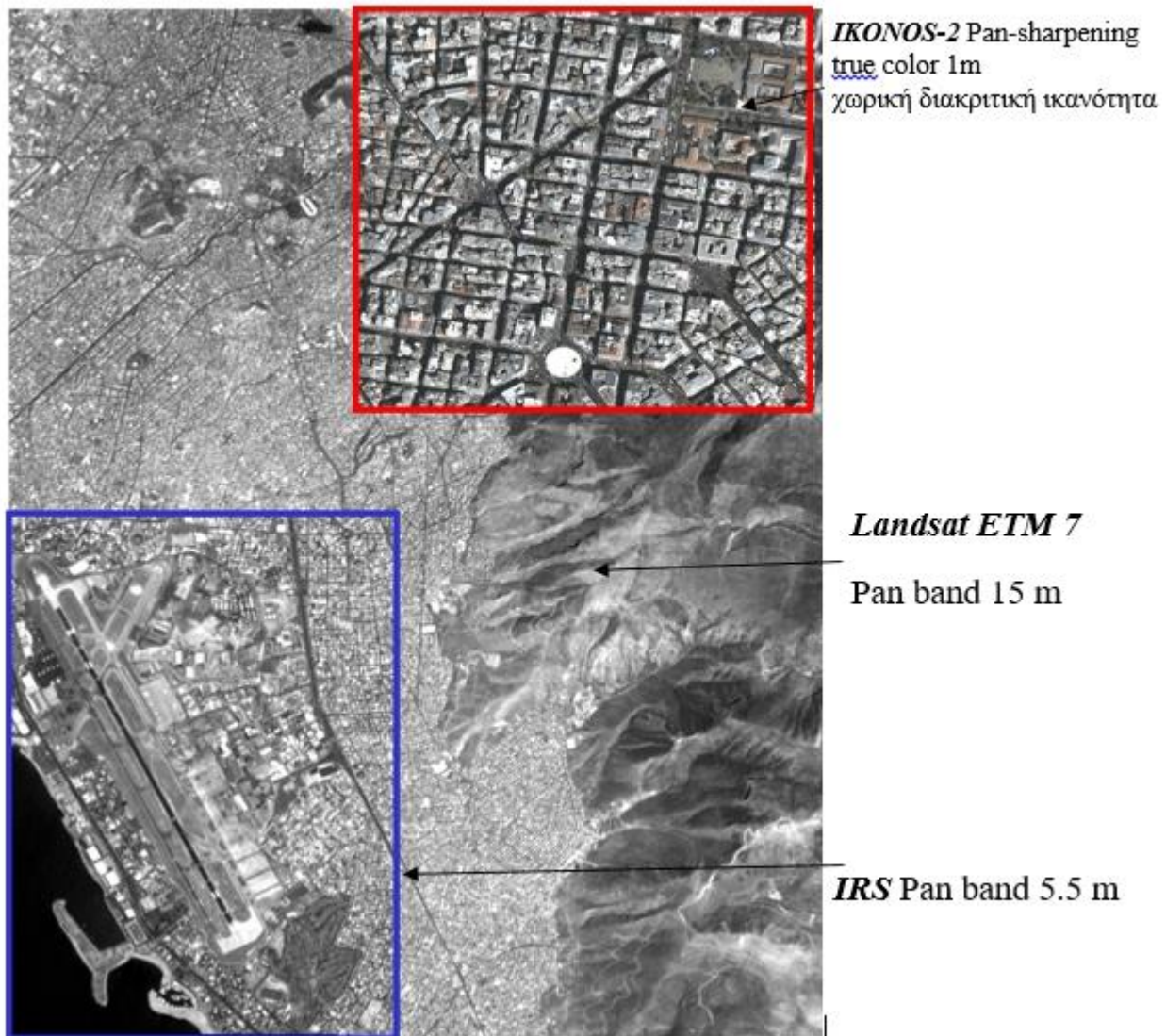
Η αντίθεση (contrast) εξαρτάται από:

- το σχήμα των αντικειμένων ή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους
- τον λόγο του προσανατολισμού (όψη-aspect ratio) του μήκους σε σχέση με το πλάτος
- τον αριθμό των αντικειμένων σε μια περιοχή
- το «άπλωμα» (βαθμός που εκτείνεται) και η ομοιομορφία του γύρω χώρου

Όσον αφορά αποκλειστικά τις φωτογραφίες (αναλογικά προϊόντα), αυτή εκφράζεται σε ζεύγη γραμμών που μπορούν να διακριθούν και εξαρτάται από την ανθρώπινη όραση, την κλίμακα και την απόσταση παρατήρησης (Sabins, 1997).

Στις δορυφορικές ψηφιακές εικόνες που παράγονται από τους σαρωτές ή τις κάμερες, η χωρική διακριτική ικανότητα ταυτίζεται με το «στοιχείο της εικόνας» (pixel) που είναι η «στοιχειώδης επιφάνεια» της Γης που καταγράφεται από τους δέκτες (Εικόνα 4.2).

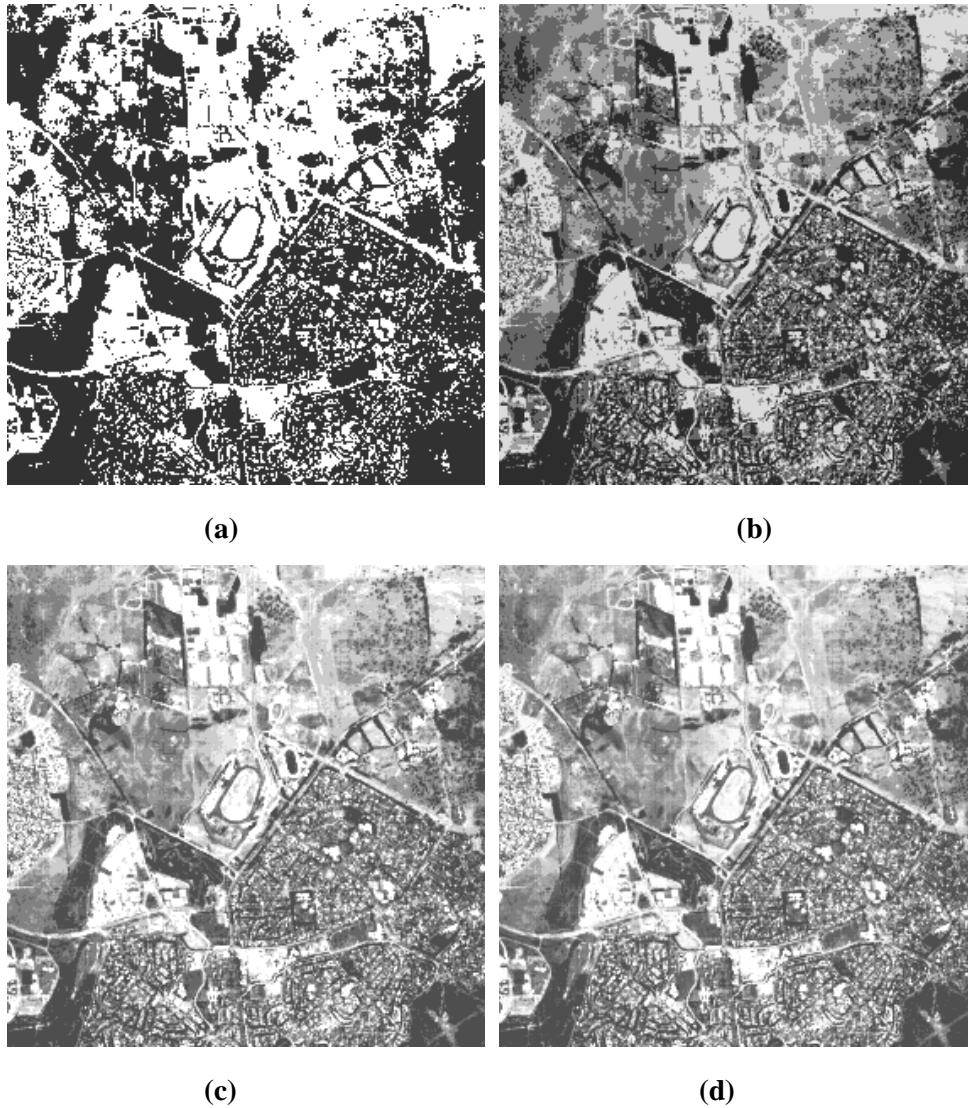
Ο πιο συνηθισμένος τρόπος μέτρησης της χωρικής διακριτικής ικανότητας που βασίζεται στις γεωμετρικές ιδιότητες του συστήματος είναι το Στιγμιαίο Πεδίο Λήψεως ή IFOV (Instantaneous Field of View) του αισθητήρα. Το IFOV ορίζεται ως η περιοχή στη γήινη επιφάνεια που ανιχνεύεται από το ανάλογο όργανο, για ένα συγκεκριμένο ύψος λήψης, σε μία δεδομένη στιγμή (Mather, 1999), και εξαρτάται από την ταχύτητα της κίνησης σάρωσης και την κίνηση του μέσου μεταφοράς του συστήματος. Ένας πρακτικός τρόπος προσδιορισμού της διακριτικής ικανότητας ενός συστήματος είναι η αναφορά σε μέτρα/pixel. Για παράδειγμα, το όργανο καταγραφής θεματικός χαρτογράφος του δορυφορικού συστήματος Landsat έχει χωρική ανάλυση 30μέτρα/pixel που σημαίνει ότι εάν προβάλλουμε το εικονοστοιχείο του στην επιφάνεια της Γης, αυτό θα αντιστοιχεί σε ένα εμβαδόν επιφανείας 900 τετραγωνικά μέτρα.



Εικόνα 4.2 Χωρική διακριτική ικανότητα σε διαφορετικά δορυφορικά συστήματα.

### Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα

Τα ραδιομετρικά χαρακτηριστικά περιγράφουν την πραγματική πληροφορία που περιέχεται σε μία εικόνα. Κατά την αποτύπωση μίας εικόνας, η ευαισθησία της στην ένταση της ανακλώμενης ενέργειας καθορίζει τη ραδιομετρική ικανότητα. Ουσιαστικά η ραδιομετρική ικανότητα περιγράφει την ικανότητα ενός συστήματος να καταγράφει διαφορές στην ισχύ του σήματος. Τα δεδομένα μιας εικόνας αντιπροσωπεύονται από ψηφιακές τιμές που μεταβάλλονται από 0 έως μία τιμή  $X$  παράγωγη στη δύναμη του 2 ( $X^2$ ). Η αύξηση της ραδιομετρικής ικανότητας προκαλεί ανάλογη αύξηση των διαβαθμίσεων του γκρι στην εικόνα και επομένως έχουμε μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα των στόχων (Εικόνα 4.3). Ο Tucker (1979) ανακάλυψε τη σχέση μεταξύ της ραδιομετρικής ικανότητας και της ικανότητας να διακρίνει διαφορετικά είδη βλάστησης και παρατήρησε ότι επήλθε βελτίωση 2-3% με τη χρήση 256 διαβαθμίσεων του γκρι (8 bits) σε σύγκριση με τη χρήση 64 (6 bits).



**Εικόνα 4.3** (a) 2, (b) 4, (c) 8, (d) 16 επίπεδα του γκρι.

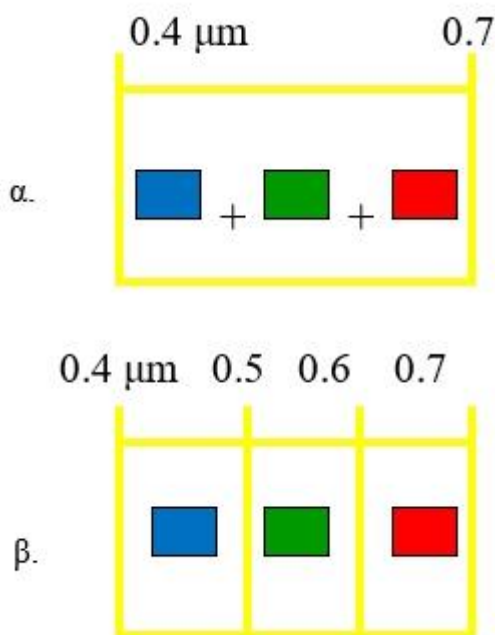
### Φασματική διακριτική ικανότητα

Η δεύτερη σημαντική ιδιότητα ενός οπτικού συστήματος εικόνας είναι η φασματική διακριτική ικανότητα. Η φασματική διακριτική ικανότητα σχετίζεται με τον αριθμό των φασματικών καναλιών που χρησιμοποιεί ο κάθε δορυφόρος και είναι πολύ σημαντική ιδιότητα, όπως αναδεικνύεται στη συνέχεια, αφού στις πολυφασματικές εικόνες:

α) η θέση στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, το εύρος και ο αριθμός των φασματικών καναλιών μπορούν να καθορίζουν τον βαθμό και το είδος των διαφόρων στόχων (Εικόνα 4.4).

β) η χρήση τους μπορεί να επιφέρει πολύ καλά αποτελέσματα διακριτικής ικανότητας σε σχέση με οποιοδήποτε μεμονωμένο φασματικό κανάλι.

Πολυφασματικά ονομάζονται τα συστήματα που καταγράφουν σε πάνω από δύο φασματικές ζώνες και υπερφασματικά με δεκάδες φασματικές ζώνες και πολύ μικρό εύρος των ζωνών. Όμως, η αύξηση της φασματικής ανάλυσης δεν μπορεί να αυξηθεί απεριόριστα χωρίς να πληρωθεί κάποιο τίμημα. Η αύξηση της φασματικής ανάλυσης στα τεχνολογικά προηγμένα συστήματα δορυφόρων επιδρά αρνητικά στα παραγόμενα προϊόντα, με τη μείωση του λόγου  $S/N$  ( $S$ = σήμα,  $N$ = θόρυβος – signal to ratio). Τα συστήματα pushbroom («σάρωση κατά μήκος»), που χρησιμοποιούνται σήμερα, δίνουν καλύτερα αποτελέσματα στον λόγο  $S/N$  για υψηλής φασματικής ικανότητας προϊόντα, σε σχέση με τους μηχανικούς σαρωτές.



Εικόνα 4.4 α. πανχρωματική απεικόνιση, β. πολυφασματική

### Χρονική διακριτική ικανότητα

Η χρονική διακριτική ικανότητα ενός συστήματος σχετίζεται με τη συχνότητα λήψης εικόνων για την ίδια περιοχή. Η περίοδος επαναληψιμότητας για ένα δορυφορικό σύστημα συνήθως είναι της τάξης κάποιων ημερών ή ωρών όταν πρόκειται για αστερισμό δορυφορικού συστήματος, για να μπορέσει να αποτυπώσει την ίδια γεωγραφική περιοχή με την ίδια γωνία παρατήρησης, απόλυτη χρονική διακριτική ικανότητα. Στα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να ικανοποιούνται από τη διαχρονική ανάλυση έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα είναι τα ακόλουθα:

- Οι διαχρονικές εικόνες πρέπει να λαμβάνονται από τα συστήματα καταγραφής την ίδια περίπου ώρα της ημέρας, ώστε να εξαλείφονται οι ημερήσιες διαφορές της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, διότι προκαλούν ανώμαλες διαφοροποιήσεις των ιδιοτήτων ανάκλασης των αντικειμένων.

- Θα πρέπει να λαμβάνονται την ίδια περίοδο του έτους, ώστε να μειώνονται στο ελάχιστο οι φαινολογικές διαφοροποιήσεις διαφόρων επιφανειακών χαρακτηριστικών.

Ορισμένα δορυφορικά συστήματα έχουν τη δυνατότητα να στοχεύουν την ίδια περιοχή ενώ βρίσκονται στην επόμενη ή τη μεθεπόμενη τροχιά, λόγω της ικανότητας στρέψης του σαρωτή υπό γωνία, ενώ κάποια άλλα συστήματα μεταξύ δύο συνεχόμενων τροχιών παρέχουν επικάλυψη που κυμαίνεται από 10% έως 30%. Επομένως, η πραγματική χρονική διακριτική ικανότητα εξαρτάται από τις δυνατότητες του συστήματος, την επικάλυψη και το γεωγραφικό μήκος της περιοχής.

### **Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των οργάνων καταγραφής**

**α) Οπτικά συστήματα:** σε αυτά περιλαμβάνονται οι κάμερες και οι σαρωτές.

**Κάμερες:** Πρόκειται για φωτογραφικές μηχανές που χρησιμοποιούν φιλμ, καλύπτουν το ορατό φάσμα και το κοντινό υπέρυθρο (Εικόνα 3.6, 3.8). Ο συνδυασμός φακών-φίλτρων-φιλμ και το ύψος λήψης διαμορφώνει το τελικό αποτέλεσμα, που είναι η εικόνα, ασπρόμαυρη ή έγχρωμη, αποτυπωμένη σε χαρτί ή σε φιλμ (θετικό ή αρνητικό).

### Πλεονεκτήματα

- Δεν απαιτούν πολύπλοκα λογισμικά επεξεργασίας
- Απαιτούν απλές γεωμετρικές διορθώσεις.

- Χαρακτηρίζονται από δυνατότητα μεγάλης χωρικής διακριτικής ικανότητας.
- Έχουν ευρύτατο στιγμιαίο πεδίο λήψης.

#### Μειονεκτήματα

- Εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και την ηλιακή φωτεινότητα.
- Εμφανίζουν περιορισμό φασματικής ανάλυσης που καθορίζεται από τα φίλμ.
- Έχουν περιορισμένη λήψη εικόνας.
- Επιτρέπουν πολύ μικρή δυνατότητα βελτίωσης της εικόνας.
- Έχουν μεγάλη απώλεια πληροφόρησης κατά τη μετατροπή τους σε ψηφιακή μορφή μετά τη σάρωση.

**Σαρωτές (scanners):** Πρόκειται για όργανα που παράγουν εικόνες σε διαφορετικά φασματικά κανάλια ταυτόχρονα, σαρώνοντας την επιφάνεια της Γης. Καλύπτουν το ορατό φάσμα και το υπέρυθρο .

#### Πλεονεκτήματα

- Έχουν απεριόριστη λήψη δεδομένων.
- Παρουσιάζουν μεγάλη φασματική ανάλυση.
- Εμφανίζουν μεγάλη διακριτική ικανότητα.

#### Μειονεκτήματα

- Παρουσιάζουν γεωμετρική παραμόρφωση που οφείλεται στη χρήση μηχανικών σαρωτών η οποία, αν και μικρή, δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.
- Εμφανίζουν προβλήματα σχετικά με τη ραδιομετρική διαβάθμιση. Έχουν εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες και την ηλιακή φωτεινότητα.

**β) Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (SAR):** Ως επί το πλείστον είναι ενεργητικά συστήματα καταγραφής και καλύπτουν το μικροκυματικό φάσμα.

#### Πλεονεκτήματα

- Δεν εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και την ηλιακή φωτεινότητα του γήινου περιβάλλοντος (λειτουργούν ημέρα και νύχτα με μερική ή ολική νεφοκάλυψη).
- Μπορούν να χρησιμοποιούν διάφορες φασματικές ζώνες αν και τα πιο πολλά συστήματα περιορίζονται σε μία ζώνη.

#### Μειονεκτήματα

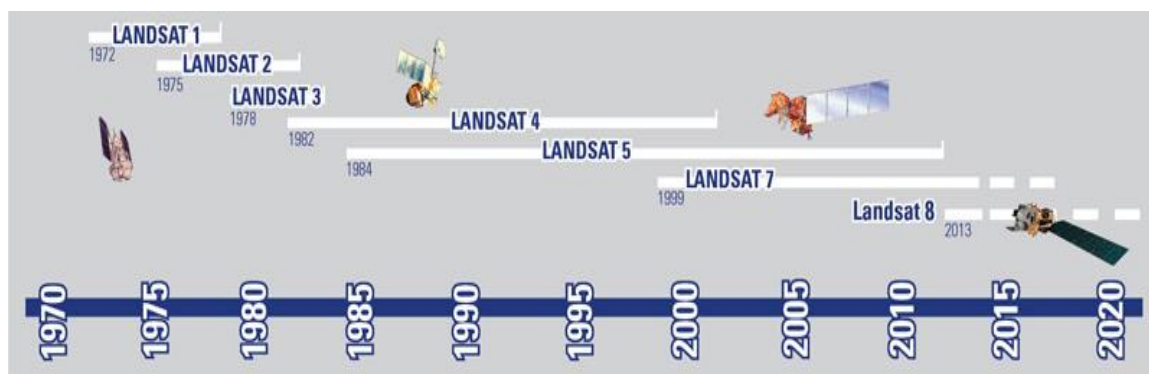
- Χρειάζονται αρκετό χρόνο και πολύπλοκα λογισμικά για την επεξεργασία των δεδομένων.
- Απαιτούν σημαντικές γεωμετρικές διορθώσεις στις οποίες κρίνεται αναγκαία η χρήση DEM (Ψηφιακών Υψομετρικών Μοντέλων).
- Έχουν μειωμένη λήψη δεδομένων.
- Δεν παρέχουν πολυφασματικά δεδομένα (με εξαίρεση πειραματικές πτήσεις και διαστημικά λεωφορεία).

## 4.2 Οπτικά δορυφορικά συστήματα

### Δορυφορικό πρόγραμμα LANDSAT

Το πρώτο πρόγραμμα που έθεσε σε λειτουργία η NASA το 1967 ήταν το ERTS (Earth Resource Technology Satellite). Το πρόγραμμα αυτό είχε σαν σκοπό την εκτόξευση πέντε δορυφόρων οι οποίοι μετέφεραν διάφορα συστήματα τηλεπισκόπησης, τα οποία αρχικά είχαν σχεδιαστεί για να αποκτούν πληροφορίες για τις πλουτοπαραγωγικές πηγές της Γης. Ο πρώτος δορυφόρος εκτοξεύτηκε στις 23 Ιουλίου του 1972 και ονομαζόταν ERTS-1.

Έπειτα ακολούθησε ο ERTS-2 στις 22 Ιανουαρίου του 1975, τον οποίο πριν την εκτόξευσή του η NASA μετονόμασε σε LANDSAT, ξεχωρίζοντάς τον έτσι από τον ωκεανογραφικό δορυφόρο SEASAT που εκτοξεύτηκε στις 26 Ιουνίου του 1978. Ο ERTS-1 ονομάστηκε αναδρομικά LANDSAT-1 και ο ERTS-2 έγινε κατά την εκτόξευσή του LANDSAT-2. Ο LANDSAT-3 εκτοξεύτηκε στις 5 Μαρτίου του 1978, ο LANDSAT-4 στις 16 Ιουλίου του 1982 και ο LANDSAT-5 στις 1 Μαρτίου του 1984. Οι LANDSAT-2 και -3 λειτούργησαν επιτυχώς μέχρι τις 27/7/83 και 7/9/83 αντίστοιχα, διότι διάφορες μηχανικές βλάβες επέσπευσαν τη διακοπή της λειτουργίας τους. Ο LANDSAT-6, αν και εκτοξεύτηκε, έπεσε λίγο μετά την εκτόξευση στη θάλασσα εξαιτίας κάποιας βλάβης. Ο δορυφόρος LANDSAT 7 εκτοξεύτηκε στις 15 Απριλίου 1999 και από τότε δίνει νέα και βελτιωμένα δεδομένα αυτής της σειράς, ενώ στις 11 Φεβρουαρίου 2011 τέθηκε σε τροχιά ο Landsat 8 (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5 Χρονολογικό διάγραμμα αποστολών LANDSAT (πηγή: <http://landsat.usgs.gov/>)

### Χαρακτηριστικά των LANDSAT πρώτης και δεύτερης γενιάς

Οι δορυφόροι LANDSAT-1, 2 και 3 (βάρους 815 kgf και διαστάσεων περίπου 3m ύψος, 4m πλάτος και 1,5m διάμετρο) είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά στη λειτουργία τους και ονομαζόνταν δορυφόροι πρώτης γενιάς. Είχαν σχήμα πεταλούδας, με το κύριο μέρος να έχει κυλινδρικό σχήμα. Τα ηλιακά πτερύγια είχαν μήκος 4m περίπου και τέθηκαν σε τροχιά ύψους 900km.

Περιστρέφονταν γύρω από τη Γη σε χρόνο 103min, δηλαδή εκτελούσαν 14 περιστροφές την ημέρα. Η τροχιά τους ήταν σχεδόν πολική και έτεμνε τον Ισημερινό υπό γωνία 99°, η οποία και τους καθιστούσε σχεδόν πολικούς. Ταυτόχρονα ήταν και ηλιοσύγχρονοι (sun-synchronous), πράγμα που σήμαινε ότι η ταχύτητα περιστροφής του δορυφόρου γινόταν με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με αυτήν της Γης γύρω από τον Ήλιο. Σε αυτό το χαρακτηριστικό της τροχιάς οφείλεται το γεγονός ότι οι δορυφόροι περνούσαν από τον Ισημερινό την ίδια τοπική ώρα στη φωτεινή πλευρά της Γης. Η διεύθυνση σάρωσης γινόταν από Βορρά προς Νότο και έτσι κάλυπταν ολόκληρη την επιφάνεια της Γης εκτός από τους πόλους (από τις 82-90°) σε 18 μέρες.

Οι δορυφόροι LANDSAT-4 και LANDSAT-5 που τέθηκαν σε τροχιά στις 16/7/1982 και 1/3/1984 αντίστοιχα αποτελούν τη συνέχεια των δορυφόρων πρώτης γενιάς.

Το ύψος τροχιάς τους μειώθηκε από τα 900 στα 705km. Αυτή η μείωση του ύψους έγινε βασικά για να είναι δυνατόν να επιδιορθώνονται από τα διαστημικά λεωφορεία και να βελτιωθεί η χωρική διακριτική ικανότητα (IFOV). Η τροχιά τους παραμένει κυκλική, ηλιοσύγχρονη και σχεδόν πολική. Οι δορυφόροι αυτοί περνούν από τον Ισημερινό στις 9:45 π.μ. τοπική ώρα.

Τα όργανα καταγραφής του LANDSAT ήταν αρχικά σχεδιασμένα να κάνουν μια αυτόματη παρατήρηση χρησιμοποιώντας μια κάμερα επιστροφόμενης δέσμης RVB (Return Beam Vidicon Cameras) και έναν πολυφασματικό σαρωτή MSS.

Το σύστημα RVB του LANDSAT-1 και 2 εξοπλίστηκε με τρεις κάμερες όμοιες με αυτές της τηλεόρασης. Αυτές οι κάμερες λάμβαναν δεδομένα σε διαφορετικά τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 0,48 έως 0,83μm. Στον LANDSAT-3 το RVB αντικαταστάθηκε από δύο παγχρωματικές κάμερες στο τμήμα 0,51-0,75μm.

Ο πολυφασματικός σαρωτής MSS (Multispectral Scanner) ενσωματώθηκε και στους πέντε πρώτους δορυφόρους του προγράμματος LANDSAT. Πρόκειται για έναν γραμμικό σαρωτή, ο οποίος σαρώνει την επιφάνεια κάτω από τον δορυφόρο και δημιουργεί μια εικόνα της γήινης επιφάνειας καθώς κινείται. Ο σαρωτής συλλέγει δεδομένα σε τέσσερα διαφορετικά φασματικά κανάλια, στην περιοχή του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου (ένα πέμπτο κανάλι στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου που έφερε ο LANDSAT-3 έδωσε πολύ λίγα δεδομένα, λόγω συνεχών βλαβών που συνέβησαν μετά την εκτόξευση). Η πραγματική χωρική διακριτική ικανότητα ή στιγμιαία παροχή των εικόνων LANDSAT MSS είναι 79x79m· παρ' όλα αυτά, ορισμένα χαρακτηριστικά, περιορισμένου μήκους και πλάτους, τα οποία έχουν χαρακτηριστική ανακλώμενη αντίθεση σε σχέση με το περιβάλλον τους, μπορούν επίσης να ανιχνευθούν. Αντίθετα, αντικείμενα μεγαλύτερα από 79m σε μήκος και τα οποία παρουσιάζουν μικρή διαφορά στην ανάκλασή τους, σε σχέση με το περιβάλλον, δεν ανιχνεύονται.

Οι αισθητήρες που φέρουν οι LANDSAT-4 και -5 είναι ο MSS και ο TM (θεματικός χαρτογράφος). Ο MSS είναι ίδιος με αυτόν των προηγούμενων δορυφόρων, μόνο που τα τέσσερα κανάλια 4, 5, 6, 7 μετονομάστηκαν σε 1, 2, 3, 4. Ο θεματικός χαρτογράφος (TM) είναι ένας πολυφασματικός γραμμικός σαρωτής, ο οποίος περιλαμβάνει σημαντικό αριθμό βελτιώσεων σε σχέση με τον MSS. Οι σημαντικότερες από τις βελτιώσεις είναι οι ακόλουθες:

- Έχει 7 φασματικές ζώνες αντί για 4 που έχει ο MSS, γεγονός που σημαίνει καλύτερη φασματική διακριτική ικανότητα. Οι φασματικές ζώνες είναι στην περιοχή του ορατού, κοντινού-μέσου υπέρυθρου και του θερμικού τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η επιλογή των φασματικών ζωνών στον Θεματικό Χαρτογράφο έγινε για να ικανοποιηθούν οι ερευνητικές ανάγκες των επιστημών σχετικά με την παρακολούθηση και τον έλεγχο του περιβάλλοντος. Οι 7 φασματικές ζώνες καλύπτουν την περιοχή του φάσματος από 0,45 έως 12,5, δηλαδή από το ορατό έως το θερμικό υπέρυθρο. Η πρόσθεση της ζώνης 1 βοηθάει τους χρήστες να σχηματίσουν «αληθείς έγχρωμες εικόνες», κάτι που δεν γίνεται με τις εικόνες του MSS. Με την πρόσθεση επίσης της φασματικής ζώνης 6 έχουμε τη δυνατότητα απόκτησης θερμικών υπέρυθρων εικόνων.
- Η χωρική ανάλυση του Θεματικού Χαρτογράφου είναι 30m, σε σχέση με τα 80m του MSS, εκτός του καναλιού 6 (θερμικό υπέρυθρο) που είναι 120m. Αυτή η βελτίωση της χωρικής ανάλυσης προσδίδει καλύτερη οπτική ανάλυση των εικόνων TM.
- Ο Θεματικός Χαρτογράφος (TM) δεν χρησιμοποιεί οπτικές ίνες για να μεταφέρει την ακτινοβολία στους ανιχνευτές, αλλά οι ίδιοι οι ανιχνευτές είναι τοποθετημένοι στο εστιακό επίπεδο του οπτικού συστήματος. Επίσης το κάτοπτρο-σαρωτής συλλέγει δεδομένα και στις δύο κινήσεις σάρωσης που κάνει.
- Ραδιομετρικά ο Θεματικός Χαρτογράφος αναπαριστά τη μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό σε εύρος 256 ψηφιακών τιμών (8 bits). Αυτό αντιστοιχεί σε τετραπλή αύξηση στην τιμή της κλίμακας του γκρι σε σχέση με τους 64 ψηφιακούς αριθμούς (6 bits) που χρησιμοποιούνται από τον MSS. Αυτή η υψηλότερη ραδιομετρική ακρίβεια επιτρέπει την παρατήρηση μικρότερων αλλαγών στα ραδιομετρικά μεγέθη σε ένα δεδομένο κανάλι.

Η βελτίωση των σαρωτών συνοδεύτηκε και από τη βελτίωση των συστημάτων μετάδοσης των δεδομένων από τους LANDSAT 4 και 5 στους επίγειους σταθμούς λήψης μέσω βοηθητικών δορυφόρων αναμετάδοσης των δεδομένων που τέθηκαν σε τροχιά (Sabins, 1997). Γενικά, οι εικόνες LANDSAT TM είναι χρήσιμες για ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών σε σχέση με τις εικόνες του LANDSAT MSS. Αυτό οφείλεται κύρια στην αύξηση του αριθμού των φασματικών καναλιών και στη βελτίωση της χωρικής ανάλυσης.

## LANDSAT 7

Ο δορυφόρος Landsat 7 εκτοξεύτηκε στις 15 Απριλίου 1999 και, αφού ολοκλήρωσε τις διεργασίες ελέγχου λειτουργίας των συστημάτων που μεταφέρει, άρχισε να πραγματοποιεί την υπηρεσιακή του φάση.

Ο δορυφόρος κινείται σε τροχιά γύρω από το Γη σε ύψος περίπου 705km, είναι ηλιοσύγχρονος, με κλίση περίπου 98° και τέμνει τον Ισημερινό στις 10 π.μ.

Μεταφέρει έναν Βελτιωμένο Θεματικό Χαρτογράφο (ETM+, Enhanced Thematic Mapper Plus), σε σχέση με τον απλό Θεματικό Χαρτογράφο (TM) που μετέφερε ο Landsat 5. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα του νέου δορυφόρου είναι:

- Περιέχει ένα παγχρωματικό κανάλι με 15 m χωρική διακριτική ικανότητα. Το παγχρωματικό κανάλι καταγράφει δεδομένα στο διάστημα 0,52-0,9μm, πράγμα που προσδίδει βελτιωμένο λόγο σήματος/θόρυβο και κατ' επέκταση καλύτερο διαχωρισμό της βλάστησης. Επίσης η ταυτόχρονη εγκατάσταση με τα πολυφασματικά κανάλια δίνει εξαιρετική ποιότητα όταν τα δεδομένα τους συγχωνεύονται.
- Το νέο θερμικό κανάλι 6 έχει χωρική διακριτική ικανότητα 60m (σε σχέση με τα 120m που είχε σε όλους τους προηγούμενους δορυφόρους της σειράς Landsat).
- Φέρει έναν ηλιακό βαθμονομητή (dual mode) μαζί με μία εσωτερική λάμπα βαθμονόμησης. Αυτός ο συνδυασμός βελτιώνει την ικανότητα βαθμονόμησης του οργάνου.
- Γεωδαιτική ακρίβεια 400m κατά μήκος του κάθετου ίχνους.
- Έχει δυνατότητα μετάδοσης των δεδομένων που λαμβάνει με τρεις τρόπους: i) απευθείας, ii) μέσω του data relay satellite system, iii) με αποθήκευση και αργότερα μετάδοση.
- Μεγαλύτερη ραδιομετρική ποιότητα-8bits με επιλεγμένη τιμή υψηλής/χαμηλής προσθήκης (gain), με σκοπό τη βελτίωση της αντίθεσης (Mather 1999· Lillesand & Kiefer 2000).

Ο Landsat 7 προσφέρει κάποιες ευκολίες στη χρήση των δεδομένων του, όπως:

α) Περιλαμβάνει ευρεία λωρίδα σάρωσης 185Km (ίδια με αυτήν των δορυφόρων Landsat 4 και 5) η οποία προσδίδει σταθερή γεωμετρία πάνω από μεγάλες περιοχές.

β) Η απόλυτη βαθμονόμηση καναλιών του Θεματικού Χαρτογράφου (+/- 5%) για διαχρονική ανάλυση και ανίχνευση μεταβολών.

γ) Η ταυτόχρονη λήψη του Παγχρωματικού (PAN) και των Πολυφασματικών καναλιών (MS) που σημαίνει μειωμένη προσπάθεια επεξεργασίας. Τα κανάλια PAN και MS λαμβάνονται ταυτόχρονα, χωρίς έτσι να υπάρχει ανάγκη για κάποιον ειδικό προγραμματισμό. Ο κύκλος επαναληψιμότητας απόκτησης των δεδομένων από τον δορυφόρο για την ίδια περιοχή είναι 16 ημέρες.

Όλες οι εικόνες του Landsat αναφέρονται σε παγκόσμια κατανομημένους δείκτες σειρών κάθετων στη διεύθυνση ροής (rows) και τροχιών παράλληλων στη διεύθυνση ροής του δορυφόρου (paths). Όλες οι εικόνες των δορυφόρων Landsat καθορίζονται από τον τύπο της εικόνας (TM ή MSS), την ημερομηνία και το path & row της εικόνας. Σήμερα τα δεδομένα των εικόνων από Landsat 1 έως 7 αποτελούν ένα πλούσιο αρχειακό υλικό το οποίο θεωρείται μοναδικό ειδικά για μελέτες διαχρονικής παρατήρησης.

## LANDSAT 8

Ο δορυφόρος Landsat 8 εκτοξεύτηκε στις 11 Φεβρουαρίου 2013 από την αεροπορική βάση Vandenberg στην Καλιφόρνια, και αναπτύχθηκε από τη NASA σε συνεργασία με την γεωλογική υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS). Η NASA ανέλαβε τον σχεδιασμό, την κατασκευή, την εκτόξευση και τα εν τροχιά στάδια βαθμονόμησης του δορυφόρου, περίοδο κατά την οποία ο δορυφόρος ονομαζόταν Landsat Data Continuity Mission (LDCM). Στις 30 Μαΐου του 2013 το USGS ανέλαβε τις διαδικασίες λειτουργίας του δορυφόρου και πλέον, οι διαδικασίες βαθμονόμησης, ο δορυφορικός χειρισμός, η παραγωγή και η αποθήκευση δεδομένων στο κέντρο Earth Resources Observation and Science (EROS) είναι αντικείμενο εργασίας του USGS. Μετά από τη μετάβαση αυτή ο δορυφόρος μετονομάστηκε σε Landsat 8.

Ο Landsat 8 μεταφέρει δύο όργανα καταγραφής: i) το Operational Land Imager (OLI) και ii) το Thermal Infrared Sensor (TIRS). Αυτοί οι δύο αισθητήρες παρέχουν εποχική κάλυψη της παγκόσμιας ξηράς σε χωρική ανάλυση 30 μέτρων για τα κανάλια που βρίσκονται στο ορατό, κοντινό υπέρυθρο και μικροκυματικό υπέρυθρο,



100 μέτρων για τα θερμικά κανάλια και 15 μέτρων για το παγχρωματικό κανάλι. Ο αισθητήρας OLI συλλέγει δεδομένα στο ορατό κοντινό υπέρυθρο, μικροκυματικό υπέρυθρο καθώς και στο παγχρωματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τέλος, ο αισθητήρας OLI παρέχει δύο νέες φασματικές ζώνες, μία προσαρμοσμένη ειδικά για την ανίχνευση νεφών (κανάλι 9) και μία για παρατηρήσεις της παράκτιας ζώνης (φασματικό κανάλι 1).

Όσον αφορά τον αισθητήρα TIRS, συλλέγει δεδομένα σε 2 φασματικά κανάλια στο τμήμα του θερμικού υπέρυθρου, σε αντίθεση με τους προηγούμενους δορυφόρους του προγράμματος Landsat στους οποίους υπήρχε μόνο 1 φασματικό κανάλι στο συγκεκριμένο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Ο Landsat 8 αποστέλλει περίπου 400 λήψεις εικόνων ανά ημέρα στο αρχείο δεδομένων του USGS (150 παραπάνω από τον Landsat 7), αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα για λήψεις εικόνων χωρίς σύννεφα.

Τα φασματικά κανάλια του δορυφόρου Landsat 8 έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Εικόνα 4.6):

*Φασματικό Κανάλι 1:* ανιχνεύει το βαθύ μπλε. Οι μπλε δέσμες ακτινοβολίας είναι δύσκολο να συλληφθούν από το Διάστημα, επειδή αυτή διασκορπίζεται εύκολα από τα μικροσκοπικά κομμάτια σκόνης και νερού στον αέρα, ακόμα και από τα ίδια τα μόρια του αέρα. Αυτό εξηγεί γιατί τα πολύ μακρινά αντικείμενα (όπως τα βουνά ή ο ορίζοντας) εμφανίζονται γαλαζωπά και γιατί ο ουρανός είναι μπλε. Αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι δύσκολο να συλληφθεί με αρκετή ευαισθησία ώστε να είναι χρήσιμο και έτσι το φασματικό κανάλι 1 είναι το μόνο όργανο του είδους του που παράγει ανοιχτά δεδομένα σε αυτήν την ανάλυση. Επίσης ονομάζεται και κανάλι coastal/aerosol, λόγω των δύο κύριων χρήσεών του: απεικόνιση ρηχών υδάτων και παρακολούθηση των λεπτών σωματιδίων όπως η σκόνη και ο καπνός.

*Φασματικά Κανάλια 2, 3, 4:* είναι το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο του ορατού.

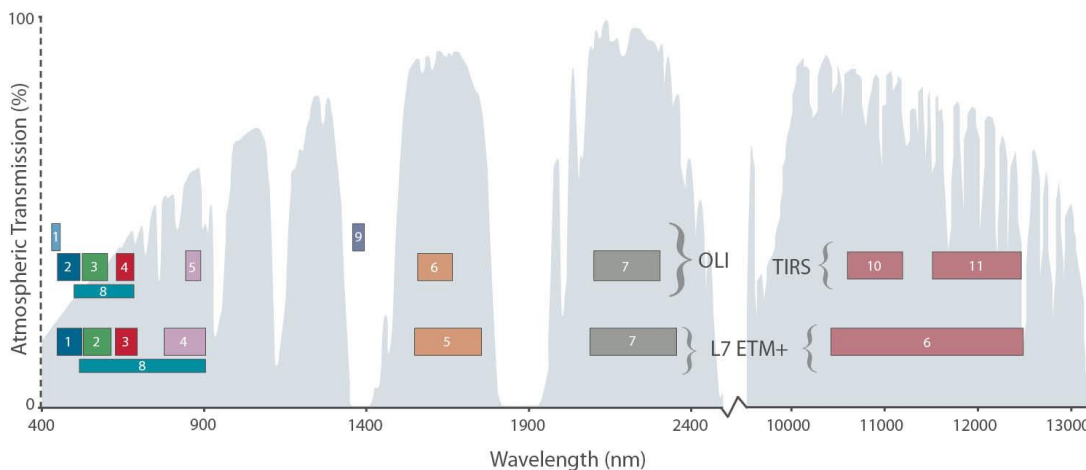
*Φασματικό Κανάλι 5:* μετράει το κοντινό υπέρυθρο. Αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την οικολογία γιατί τα υγιή φυτά το ανακλούν – η υγρασία στα φύλλα τους σκεδάζει τα κύματα πίσω στον ουρανό. Συγκρίνοντάς το με τα άλλα κανάλια, μπορούν να υπολογιστούν δείκτες όπως ο δείκτης βλάστησης (NDVI), τα οποία μας επιτρέπουν να μετρήσουμε τη βλάστηση με μεγαλύτερη ακρίβεια από ό,τι αν ψάχαμε μόνο στο πράσινο του ορατού.

*Φασματικά Κανάλια 6, 7:* καλύπτουν διαφορετικά τμήματα του μικροκυματικού υπέρυθρου. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τον διαχωρισμό υγρού και ξερού εδάφους και για τη γεωλογία (πετρώματα και εδάφη που φαίνονται παρόμοια σε άλλα φασματικά κανάλια έχουν ισχυρές αντιθέσεις στο μικροκυματικό υπέρυθρο).

*Φασματικό Κανάλι 8:* είναι το παγχρωματικό κανάλι. Λειτουργεί όπως το ασπρόμαυρο φιλμ. Αντί να συλλέγει τα ορατά χρώματα ξεχωριστά, τα συνδυάζει σε ένα κανάλι. Επειδή αυτός ο αισθητήρας μπορεί να «δει» πιο πολύ φως ταυτόχρονα, είναι το πιο ευκρινές κανάλι, με 15 μέτρα χωρική διακριτική ικανότητα.

*Φασματικό Κανάλι 9:* καταγράφει τη λιγότερη πληροφορία, παρ' όλα αυτά είναι ένα από τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του Landsat 8. Καλύπτει ένα πολύ μικρό κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος: μόνο στο διάστημα  $1370 \pm 10\text{nm}$ . Λίγα διαστημικά όργανα καταγραφής συλλέγουν αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, επειδή η ατμόσφαιρα το απορροφάει σχεδόν όλο. Ο Landsat 8 μετατρέπει αυτό σε πλεονέκτημα: ακριβώς επειδή το έδαφος είναι ελάχιστα ορατό στο κανάλι αυτό, οτιδήποτε εμφανίζεται σε αυτό καθαρά το αντανακλά πολύ φωτεινά και βρίσκεται πάνω από το μεγαλύτερο μέρος της ατμόσφαιρας. Το κανάλι 9 είναι μόνο για να καταγράφει τα σύννεφα.

*Φασματικά Κανάλια 10,11:* βρίσκονται στο θερμικό υπέρυθρο και καταγράφουν τη θερμότητα. Αντί για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα, όπως οι μετεωρολογικοί σταθμοί, καταγράφεται η θερμοκρασία του εδάφους, το οποίο είναι συνήθως αρκετά θερμότερο.



**Εικόνα 4.6** Γραφική απεικόνιση μεταξύ των φασματικών καναλιών των αισθητήρων OLI & TIRS (Landsat 8) και Landsat 7 ETM+. (Πηγή: USGS)

## Δορυφόρος Terra

Ο δορυφόρος Terra εκτοξεύτηκε στις 18 Δεκεμβρίου του 1999 από τη NASA και ξεκίνησε να στέλνει δεδομένα τον Φεβρουάριο το 2000. Αποτελεί κοινό πρόγραμμα των ΗΠΑ, της Ιαπωνίας και του Καναδά και μεταφέρει 5 όργανα καταγραφής. Οι Ηνωμένες Πολιτείες παρέιχαν διαστημικό σκάφος και 3 όργανα καταγραφής (CERES, MISR, MODIS), το ιαπωνικό Υπουργείο Διεθνούς Εμπορίου και Βιομηχανίας παρέιχε το όργανο καταγραφής ASTER και τέλος, η канаδική Υπηρεσία Διαστήματος σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο του Τορόντο παρέιχε το όργανο καταγραφής MOPITT.

Τα 5 όργανα καταγραφής του δορυφόρου Terra:

- ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)
- CERES (Clouds and Earth's Radiant Energy System)
- MISR (Multi-angle Imaging Spectroradiometer)
- MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)
- MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere)

Επειδή και τα πέντε όργανα βρίσκονται στον ίδιο δορυφόρο κάνοντας ταυτόχρονες λήψεις, δίνεται στους επιστήμονες η δυνατότητα να συγκρίνουν διάφορες πτυχές των χαρακτηριστικών της Γης με την πάροδο του χρόνου. Ο δορυφόρος Terra συμβάλλει επίσης στη μελέτη των περιβαλλοντικών κινδύνων μέσα από τη μεγάλη συλλογή εικόνων, βοηθώντας έτσι τους επιστήμονες να κατανοήσουν και να προετοιμαστούν για τις επιπτώσεις των φυσικών καταστροφών. Οι λήψεις του δορυφόρου Terra καλύπτουν χρονική διάρκεια μεγαλύτερη των 10 χρόνων, καθιστώντας τα έτσι ένα πολύτιμο αρχείο γεγονότων και καταστάσεων του παρελθόντος και παρέχοντας τα θεμέλια για μελλοντικές δορυφορικές αποστολές.

### Το όργανο καταγραφής ASTER

Το όργανο καταγραφής ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) λαμβάνει εικόνες υψηλής ανάλυσης (15 έως 90 τετραγωνικά μέτρα ανά pixel) της Γης σε 14 διαφορετικά μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που κυμαίνονται από το ορατό έως στο θερμικό υπέρυθρο. Τα δεδομένα ASTER χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία λεπτομερών χαρτών της θερμοκρασίας, της εκπομπής, της ανάκλασης και του υψομέτρου της επιφάνειας της Γης.

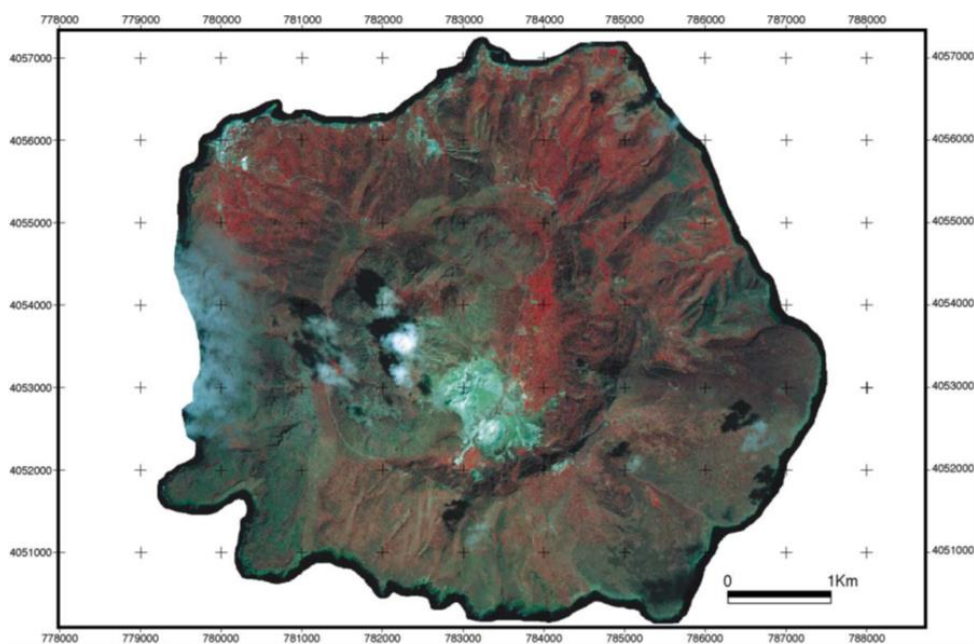
Το όργανο ASTER, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα όργανα καταγραφής πάνω στον δορυφόρο Terra, δεν συλλέγει δεδομένα συνέχεια, αλλά κατά μέσο όρο κάθε 8 λεπτά ανά τροχιά. Δεδομένης της υψηλής ανάλυσης εικόνων και της ικανότητας του οργάνου να αλλάζει τη γωνία θέασης, είναι δυνατή η παραγωγή στερεοσκοπικών εικόνων και αναλυτικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους.

Το όργανο ASTER αποτελείται από τρία επιμέρους υποσυστήματα. Κάθε υποσύστημα λειτουργεί σε μια διαφορετική φασματική ζώνη, έχει τα δικά του τηλεσκόπιο και έχει κατασκευαστεί από διαφορετική ιαπωνική εταιρεία. Τα τρία υποσυστήματα του ASTER έχουν λάβει την ονομασία τους από τη φασματική ζώνη στην οποία λειτουργούν και είναι τα εξής:

- ορατό και κοντινό υπέρυθρο (Visible and Near Infrared, VNIR)
- μέσο υπέρυθρο (Shortwave Infrared, SWIR)
- θερμικό υπέρυθρο (Thermal Infrared, TIR)

## IKONOS

Ο δορυφόρος IKONOS, ο πρώτος εμπορικός δορυφόρος για δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης, τέθηκε σε τροχιά με επιτυχία στις 24 Σεπτεμβρίου 1999. Ο αισθητήρας του IKONOS είναι υψηλής ανάλυσης και λειτουργεί από εταιρεία DigitalGlobe. Οι δυνατότητές του περιλαμβάνουν τη λήψη πολυφασματικών εικόνων (ορατό και κοντινό υπέρυθρο) με διακριτική ικανότητα 3,2m, και σε ένα παγχρωματικό κανάλι με 0,82m διακριτική ικανότητα στο ναδίρ.



**Εικόνα 4.7** Ορθο-διορθωμένη ψευδέγχρωμη εικόνα IKONOS της Νισύρου (Vassilopoulou et al. 2002).

Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν τόσο στο αστικό όσο και στο αγροτικό περιβάλλον (Εικόνα 4.7), χαρτογράφηση των φυσικών πόρων και των φυσικών καταστροφών, τη γεωργία και τη δασοκομία, την εξόρυξη ορυκτών πόρων, τη μηχανική, τις κατασκευές και την ανίχνευση των αλλαγών.

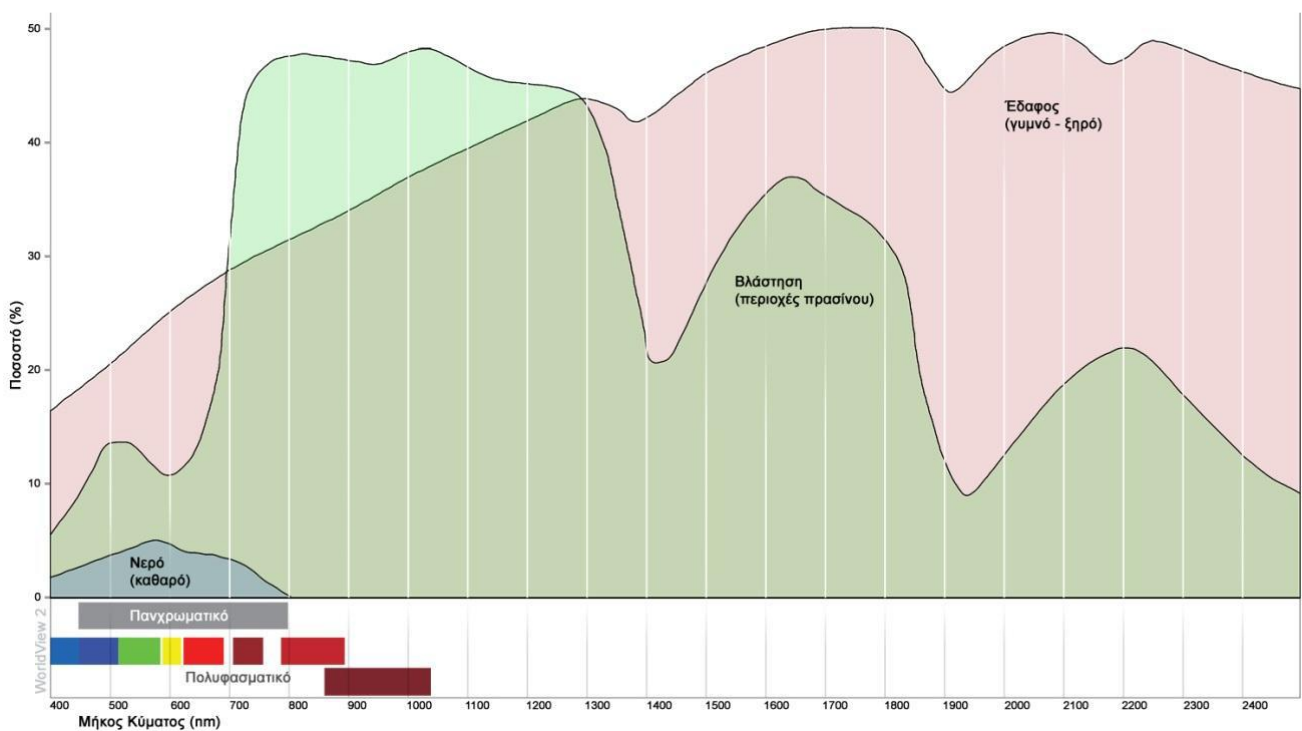
Ο δορυφόρος IKONOS μπορεί να προγραμματιστεί για να αποκτήσει στερεοσκοπικά δεδομένα δορυφορικών εικόνων με σκοπό την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων επιφανείας (DSM) είτε ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα (DEMs) με ακρίβεια <math>< 5\text{m}</math>. Στις 22 Ιανουαρίου 2015 η εταιρεία DigitalGlobe ανακοίνωσε ότι κατά τη διάρκεια των πρόσφατων δραστηριοτήτων συντήρησης του δορυφόρου διαγνώστηκε πρόβλημα στη λήψη εικόνων. Η

Digital Globe προσπαθεί να επιλύσει το τεχνικό πρόβλημα στην ακρίβεια των εικόνων που συλλέγονται από το όργανο καταγραφής του IKONOS.

### Το πρόγραμμα World View

Ο δορυφόρος World View-1 τέθηκε σε τροχιά με επιτυχία στις 18 Σεπτεμβρίου 2007. Η τροχιά του είναι σε ύψος 496km, έχει ένα μέσο χρόνο επανάληψης λήψης 1,7 ημέρες και είναι σε θέση να συλλέγει μέχρι 750.000km<sup>2</sup> (290.000 τετραγωνικά μίλια) ανά ημέρα και να παράγει εικόνες με 0,5m χωρική διακριτική ικανότητα. Ο δορυφόρος είναι επίσης εξοπλισμένος με υψηλού επιπέδου δυνατότητες εντοπισμού και παρουσιάζει εκπληκτική ευκινησία για την ταχεία και αποτελεσματική στερεοσκοπική συλλογή δεδομένων.

Ο δορυφόρος World View 2 τέθηκε σε τροχιά στις 8 Οκτωβρίου 2009, παρέχει παγχρωματικά δεδομένα (B & W) με ανάλυση 0,46 μέτρα καθώς και στερεοσκοπική παρατήρηση. Με βελτιωμένη την ευελιξία του, ο World View-2 είναι σε θέση να ενεργεί ως ένα «πινέλο», το οποίο σαρώνει εμπρός πίσω για να αποτυπώσει πολύ εκτεταμένες περιοχές σε πολυφασματικές εικόνες σε ένα μόνο πέρασμα (Εικόνα 4.8). Ο World View-2 είναι σε θέση να συλλέξει περίπου 1.000.000 km<sup>2</sup> καθημερινά, διπλασιάζοντας την ικανότητα συλλογής των δύο World View δορυφόρων μαζί σε σχεδόν 2.000.000 km<sup>2</sup> ανά ημέρα.



Εικόνα 4.8 Συνδυαστική πληροφορία των καμπυλών φασματικής ανάκλασης για τη βλάστηση, το έδαφος, το νερό και τα φασματικά κανάλια του World View 2.

Ο δορυφόρος World View-3 φέρει έναν υπερσύγχρονο αισθητήρα με υψηλή φασματική και χωρική ανάλυση σε υψόμετρο 617km. Ο δορυφόρος World View-3 προσφέρει 31cm χωρική ανάλυση στο παγχρωματικό, 1,24m στα πολυφασματικά και 3,7m στο μέσο υπέρυθρο. Έχει μέσο χρόνο επανάληψης λήψης <1 ημέρα και είναι σε θέση να συλλέγει μέχρι 680.000km<sup>2</sup> ανά ημέρα.

### Δορυφόρος QuickBird

Ο δορυφόρος QuickBird εκτοξεύτηκε στις 18 Οκτωβρίου 2001 και ξεκίνησε να πραγματοποιεί λήψεις εμπορικά διαθέσιμων δεδομένων εντός του 2002. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του επέτρεπαν τη λήψη δορυφορικών

δεδομένων με την υψηλότερη ανάλυση στην αγορά. Η υψηλή διακριτική τους ικανότητα (0,7m), σε συνδυασμό με το υψηλό βάθος τόνου (11 bit), καθιστούν τα παγχρωματικά δεδομένα QuickBird ικανά να μπορούν να καλύψουν απαιτήσεις εφαρμογών που δεν ήταν δυνατό να καλυφθούν με παλαιότερα δορυφορικά δεδομένα. Ταυτόχρονα προσέφερε μια νέα διάσταση στην ανάλυση και ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί για περιβαλλοντικές εφαρμογές, εξαγωγή των χρήσεων γης, καταγραφή των επιπτώσεων από φυσικές καταστροφές κ.λπ. Επιπλέον, λόγω της δυνατότητας λήψης στερεοζευγών εντός τροχιάς, είναι δυνατή η επεξεργασία και παραγωγή DEM (εξαγωγή πληροφορίας και στην τρίτη διάσταση), με ανάλυση και ακρίβεια πρωτοποριακή για τον χώρο των δορυφορικών δεδομένων. Την 27η Ιανουαρίου 2015 ξαναμπήκε στη γήινη ατμόσφαιρα μετά την ολοκλήρωση της 13 χρόνων αποστολή του. Ο QuickBird πραγματοποίησε πάνω από 70.000 περιστροφές του πλανήτη, λαμβάνοντας εικόνες υψηλής ανάλυσης της Γης που αντιστοιχούν σε περίπου 636.000.000 km<sup>2</sup> και που συνέβαλαν ώστε η ανθρωπότητα να κατανοήσει τον συνεχώς μεταβαλλόμενο πλανήτη μας.

## **Pleiades**

Ο αστερισμός δορυφόρων Pleiades παρέχει έγχρωμα προϊόντα με χωρική διακριτική ανάλυση 50 εκατοστά αποδίδοντας εξαιρετικά υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας. Η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης και η εξαιρετική ποιότητα εικόνας τον καθιστούν ιδανική λύση για τη χαρτογράφηση ακριβείας. Ο πρώτος δορυφόρος Pleiades-1A εκτοξεύτηκε με επιτυχία στις 16 Δεκεμβρίου 2011, ενώ ο 1B εκτοξεύτηκε με επιτυχία στις 2 Δεκεμβρίου 2012. Σχεδιασμένο για πολιτικές και στρατιωτικές χρήσεις, το σύστημα Pleiades είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και την ανίχνευση αλλαγών στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον.

Οι δορυφόροι Pleiades-1A και 1B είναι σε απόσταση 180° στην ίδια σχεδόν πολική ηλιοσύγχρονη τροχιά σε ύψος 694 km, επιτρέποντας καθημερινά λήψη στην ίδια περιοχή σε οποιαδήποτε τοποθεσία στον πλανήτη. Έτσι καθίστανται ιδανικοί για τη χαρτογράφηση και παρακολούθηση μεγάλων κατασκευαστικών έργων, παρακολούθηση των ορυχείων, βιομηχανικών και στρατιωτικών υποδομών, για ζώνες συγκρούσεων και κρίσεων / περιοχές πληγείσες από φυσικούς κινδύνους, καθώς και δράσεις εκκένωσης και διάσωσης. Το δορυφορικό σύστημα Pleiades διαθέτει τέσσερις φασματικές ζώνες (μπλε, πράσινο, κόκκινο, και IR), καθώς και ακρίβεια θέσης στην εικόνα περίπου στα 3m χωρίς τα σημεία εδαφικού ελέγχου (GCPs). Η ακρίβεια της εικόνας μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο –έως ενός έκτακτου του μέτρου– με τη χρήση GCPs. Επειδή ο δορυφόρος έχει σχεδιαστεί έχοντας υπόψη καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, οι εικόνες μπορούν να ζητηθούν και λιγότερο από έξι ώρες πριν από τη λήψη.

## **Δορυφορικό σύστημα SPOT**

Σχεδιάστηκε το 1978 από το CNES (Centre National D'Etudes Spatiales) και είναι από τα τυπικά συστήματα δεύτερης γενιάς των δορυφόρων παρατήρησης της Γης. Είναι επίσης ο πρώτος δορυφόρος που εκτοξεύτηκε από την Ευρώπη ελεγχόμενος από το Εθνικό Κέντρο Χωροταξικών Ερευνών της Γαλλίας, το Ινστιτούτο εικόνων SPOT και τη συμμετοχή του Βελγίου και της Σουηδίας. Ο πρώτος δορυφόρος αυτού του προγράμματος, ο SPOT-1, εκτοξεύτηκε στις 22 Φεβρουαρίου του 1986. Ο SPOT-2 τέθηκε σε τροχιά στις 22 Ιανουαρίου του 1990 και ακολουθούσε την τροχιά του SPOT-1 με διαφορά φάσης ώστε οι δορυφόροι να περνούν από την ίδια περιοχή κάθε 13 ημέρες, έχοντας και οι δύο τα ίδια περίπου τεχνικά χαρακτηριστικά.

Ο SPOT-3 εκτοξεύτηκε στις 23 Σεπτεμβρίου 1993 και έδωσε εικόνες μέχρι και τις 14 Νοεμβρίου 1996, ημερομηνία όπου τέθηκε εκτός λειτουργίας λόγω κάποιων τεχνικών προβλημάτων. Η τροχιά του δορυφόρου είναι σχεδόν πολική, ηλιοσύγχρονη, σε ύψος 830km και περνά από τον Ισημερινό κατερχόμενος στις 10:30 τοπική ώρα επαναλαμβάνοντας μία πλήρη περιστροφή της Γης σε 26 ημέρες, με κλίση 98,7°. Περιοχές του Ισημερινού μπορούν να παρατηρηθούν έτσι 7 φορές, ενώ περιοχές με γεωγραφικό πλάτος 45°, 11 φορές. Μεταφέρει δύο σαρωτές, καθένας από τους οποίους σαρώνει τη Γη σε ζώνη πλάτους 60km. Η μία ζώνη σάρωσης με την άλλη έχει επικάλυψη 3km. Έτσι, συνολικά η ζώνη σάρωσης από τους δύο σαρωτές είναι 117km (2 x 60 μείον 3km).

Ο SPOT-4 εκτοξεύτηκε στα τέλη Μαρτίου του 1998 και άρχισε να δίνει εικόνες από τον Ιούνιο του ίδιου έτους. Ο SPOT-5, ο οποίος εκτοξεύτηκε τον Μάιο του 2002, έχει αρκετές βελτιώσεις στις λειτουργίες του.

Φέρει δύο δέκτες σάρωσης, τους HRV1 και 2 (High Resolution Visible) για τους δορυφόρους SPOT-1, 2, 3, τους HRVIR1 και 2 για το δορυφόρο SPOT-4, και τους HRG1 και 2 για τον SPOT-5. Πρόκειται για σαρωτές που δίνουν πολυφασματικές (XS) εικόνες, σε τρεις διαφορετικές φασματικές ζώνες (πράσινο, ερυθρό και κοντινό υπέρυθρο) για τους SPOT-1, 2, 3, ενώ για τους δύο πιο σύγχρονους δορυφόρους, σε 4 ζώνες (προστέθηκε το μακρινό υπέρυθρο κανάλι, 1,58-1,75  $\mu\text{m}$ ) με ραδιομετρική ανάλυση 8-bits και χωρική διακριτική ικανότητα (στο ναδίρ) 20m (SPOT-1, 2, 3, 4) και 10m (SPOT-5, εξαίρεση αποτελεί το μακρινό υπέρυθρο κανάλι το οποίο παραμένει στα 20m) αντίστοιχα. Επίσης παρέχουν παγχρωματικές (P) εικόνες με χωρική ανάλυση 10m (SPOT-1, 2, 3, 4) και 5m (SPOT-5, υπάρχει η δυνατότητα της μείωσης στα 2,5m) και ραδιομετρική 6-bits. Έχει δηλαδή πολύ καλύτερη χωρική ανάλυση από τον θεματικό χαρτογράφο του Landsat TM (πολυφασματικό 30m, παγχρωματικό 15m).

Ο SPOT-6 κατασκευάστηκε από την AIRBUS Defence & Space και εκτοξεύτηκε με επιτυχία στις 9 Σεπτεμβρίου 2012, ενώ ο SPOT 7 εκτοξεύτηκε με επιτυχία στις 30 Ιουνίου 2014. Σε απόσταση 180° αλλά στην ίδια τροχιά, ο αστερισμός SPOT-6 και SPOT-7, πέρα από την εξασφάλιση της συνέχειας των υπηρεσιών από την οικογένεια SPOT, προσφέρει πλέον νέες δυνατότητες ιδίως όσον αφορά την ευκρίνεια, την απόκριση και την ικανότητα συλλογής. Με χωρική διακριτική ικανότητα 1.5m είναι κατάλληλοι για τοπογραφική αποτύπωση σε κλίμακα 1:25.000, υψηλή επανάληψη λήψης για την ίδια περιοχή, ευρεία ικανότητα κάλυψης. Πέρα από το παγχρωματικό (1,5m) οι δορυφόροι καταγράφουν πολυφασματικά δεδομένα (ορατό κοντινό υπέρυθρο) με χωρική ανάλυση 6m.

### 4.3 Ενεργά Δορυφορικά Συστήματα (Ραντάρ)

#### Δορυφόροι ERS 1-2

Οι δορυφόροι ERS-1 και ERS-2 κατασκευάστηκαν από την ευρωπαϊκή βιομηχανία, υπό τη διεύθυνση της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (ESA). Εκτοξεύτηκαν το 1991 και 1995, αντίστοιχα. Είναι εξοπλισμένοι με ενεργά συστήματα μικροκυμάτων, γεγονός που τους επιτρέπει να λαμβάνουν δεδομένα ακόμα και κατά τη διάρκεια της ημέρας ή όταν υπάρχουν πυκνά σύννεφα. Ένα από αυτά τα όργανα, το σκεδασίμετρο, μετρά τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου πάνω από τους ωκεανούς. Ένας άλλος αισθητήρας είναι υψομετρικός και μπορεί να μετρήσει το ύψος των κυμάτων. Ωστόσο, ο πιο γνωστός, ίσως, αισθητήρας των δορυφόρων ERS είναι ο SAR (Synthetic Aperture Radar, Ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας), που απεικονίζει την επιφάνεια της Γης και χρησιμοποιείται κυρίως για χαρτογραφικούς σκοπούς. Όμως η ανάλυση και ερμηνεία μιας εικόνας του SAR είναι πολύ διαφορετική από εκείνη ενός οπτικού ή ενός υπέρυθρου αισθητήρα. Οι εικόνες του SAR δεν είναι έγχρωμες, αλλά παρέχουν στοιχεία για την τραχύτητα της επιφάνειας. Για παράδειγμα, για έναν αισθητήρα SAR, η ταραγμένη θάλασσα, όπου οι άνεμοι προκαλούν κύματα μεσαίου ή μεγάλου ύψους, είναι μια ανώμαλη επιφάνεια, ενώ λεία επιφάνεια είναι μια ήσυχη θάλασσα με λίγο ή καθόλου κύματα. Σε ό,τι αφορά τις χερσαίες επιφάνειες, μια δασώδης περιοχή είναι μια ανώμαλη επιφάνεια και φαίνεται σαν μια φωτεινή περιοχή στην απεικόνιση, ενώ ένα λιβάδι ή μία οδική αρτηρία είναι «λείες» επιφάνειες και εμφανίζονται με σκούρο χρώμα. Οι πάγοι και τα παγόβουνα στη θάλασσα της Αρκτικής έχουν χαρτογραφηθεί και παρακολουθούνται χάρη στους αισθητήρες παντός καιρού των ραδιοεντοπιστικών δορυφόρων. Πρόκειται για μια σημαντική βοήθεια στη μελέτη του παγκόσμιου κλίματος, καθώς οι μεταβολές στους θαλάσσιους πάγους αντανακλούν μεταβολές στη θερμοκρασία του πλανήτη και στα θαλάσσια ρεύματα. Ένα ακόμη σημαντικό θέμα με παγκόσμια οικολογική σημασία είναι η παρακολούθηση της αποψίλωσης των τροπικών δασών. Οι ραδιοεντοπιστικοί αισθητήρες είναι σε θέση να ανιχνεύσουν ακόμη και μικρά ανοίγματα στα δάση, παρά τον νεφελώδη καιρό στους τροπικούς.

Στον ERS-2 έχει τοποθετηθεί ένα ραδιόμετρο σάρωσης κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου) (Along Track Scanning Radiometer, ATRS). Είναι ένας «παραδοσιακός» παθητικός σαρωτής με 7 κανάλια στο ορατό, το εγγύς υπέρυθρο και το θερμικό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Το θερμικό υπέρυθρο κανάλι φάσμα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη χαρτογράφηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας. Το ορατό και το

εγγύς υπέρυθρο κανάλι έχουν ανάλυση 1km και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χαρτογράφηση της βλάστησης σε παγκόσμια κλίμακα. Επίσης, ο ERS-2 είναι εξοπλισμένος με όργανα κατάλληλα για την παγκόσμια χαρτογράφηση του στρώματος του όζοντος. Τα δεδομένα του ERS-2 μπορούν να παίξουν ζωτικό ρόλο στην επιστημονική κατανόηση των διαφόρων μεταβολών στο στρώμα του όζοντος και στον προσδιορισμό της επίδρασης που έχει η ανθρωπογενής ρύπανση.

### **Δορυφόρος Envisat**

Ο δορυφόρος Envisat εκτοξεύτηκε την 1η Μαρτίου 2002. Επρόκειτο για έναν προηγμένο δορυφόρο πολικής τροχιάς για παρατήρηση της Γης, που παρείχε μετρήσεις της ατμόσφαιρας, των ωκεανών, του εδάφους και των πάγων. Τα δεδομένα του Envisat υποστήριξαν την επιστημονική έρευνα της Γης και κατέστησαν δυνατή την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών και κλιματικών αλλαγών. Επίσης, τα δεδομένα του συνέβαλαν στην ανάπτυξη διαφόρων επιχειρησιακών και εμπορικών εφαρμογών. Η αποστολή του Envisat ολοκληρώθηκε στις 8 Απριλίου 2012. Το προηγμένο ραδιόμετρο σάρωσης κατά μήκος της τροχιάς (AATSR) διασφάλισε τη συνέχιση της συλλογής των ομάδων δεδομένων AATRS-1 και AATRS-2 της σειράς ERS για ακριβείς μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας (με ακρίβεια 0,3 K ή υψηλότερη) με σκοπό την υποβοήθηση της κλιματικής έρευνας και τη χρήση από διάφορους επιχειρησιακούς και επιστημονικούς φορείς. Ένα προηγμένο ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (ASAR), που λειτουργούσε στη ζώνη C, διασφάλισε τη συνέχιση της συλλογής δεδομένων μετά τον δορυφόρο ERS-2. Διέθετε βελτιωμένες δυνατότητες σε ό,τι αφορά την κάλυψη, το εύρος των γωνιών πρόσπτωσης, την πολικότητα και τους τρόπους λειτουργίας. Οι βελτιώσεις κατέστησαν δυνατή τη ρύθμιση της γωνίας ανύψωσης της δέσμης ραντάρ και την επιλογή διαφόρων ζωνών σάρωσης πλάτους 100 ή 400 km.

Το MERIS ήταν ένα φασματόμετρο απεικόνισης που μετρούσε την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από τη Γη με επίγεια χωρική ανάλυση 300m, 15 φασματικές ζώνες στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο φως και δυνατότητα προγραμματισμού του πλάτους και της θέσης. Με το MERIS ήταν δυνατή η συνολική κάλυψη της Γης κάθε 3 ημέρες. Η κύρια αποστολή του MERIS ήταν η μέτρηση του χρώματος της θάλασσας στους ωκεανούς και στις παράκτιες περιοχές. Γνωρίζοντας το χρώμα της θάλασσας μπορούμε να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης, τη συγκέντρωση των αιωρούμενων ιζημάτων και το φορτίο αερολυμάτων πάνω από τις θαλάσσιες περιοχές, στοιχεία που είναι σημαντικά για τη μελέτη του κύκλου του άνθρακα στους ωκεανούς και του θερμοκρασιακού καθεστώτος στην επιφάνεια των ωκεανών. Τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση της αλιείας στις παράκτιες ζώνες.

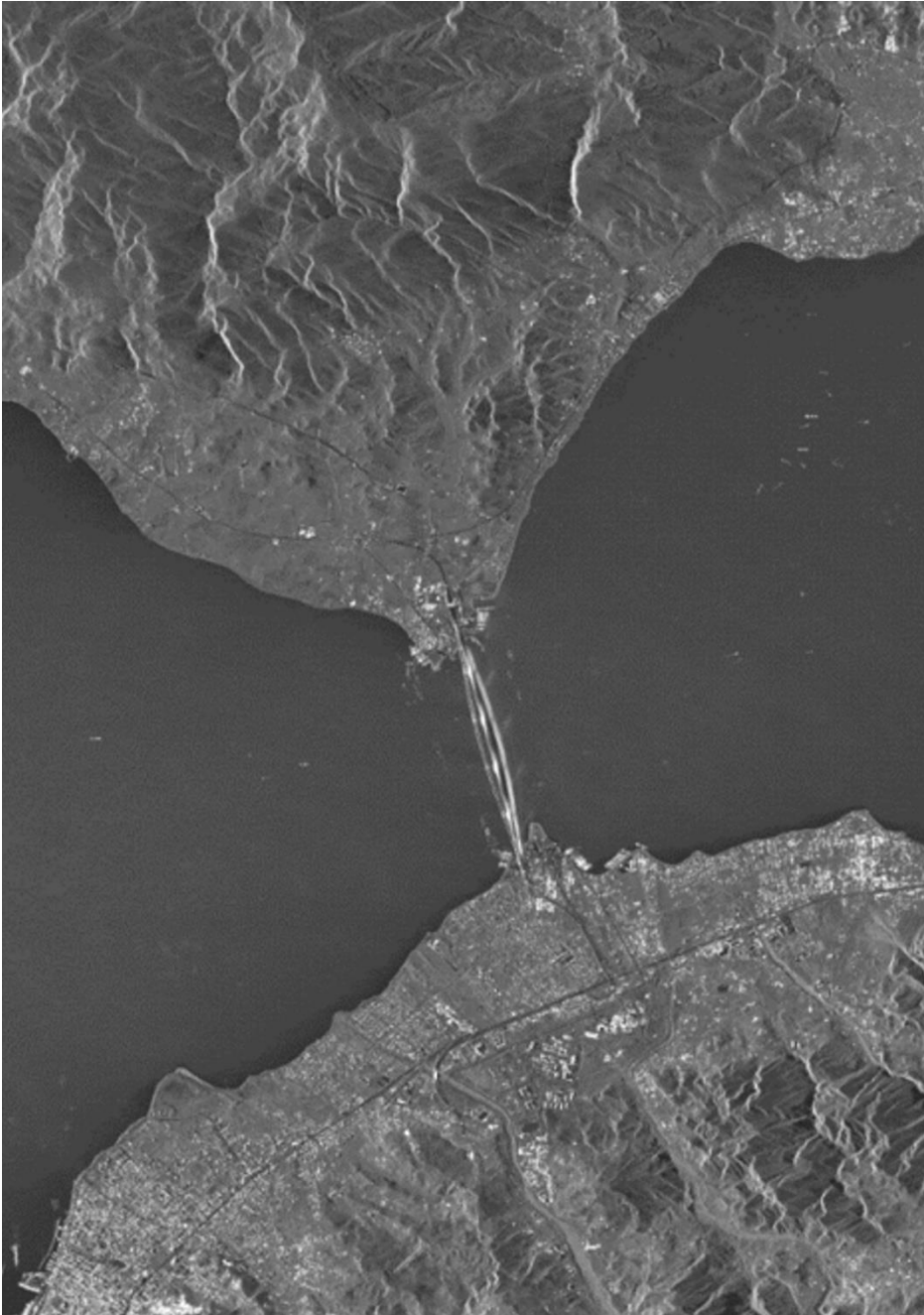
### **Δορυφόρος TerraSAR-x**

Ο TerraSAR-X είναι ένας γερμανικός δορυφόρος παρατήρησης της Γης. Το κύριο φορτίο του είναι ένας αισθητήρας ραντάρ που λειτουργεί στο φασματικό κανάλι X (Εικόνα 4.9), ο οποίος περιλαμβάνει διάφορους τρόπους λειτουργίας, επιτρέποντας την καταγραφή εικόνων σε διαφορετικά πλάτη λωρίδας σάρωσης (swath), αλλά και σε διαφορετικές αναλύσεις και πολώσεις. Έτσι, ο δορυφόρος TerraSAR-x προσφέρει ικανότητες διαστημικής παρατήρησης της Γης που προηγουμένως δεν ήταν διαθέσιμες. Ο στόχος της αποστολής είναι να παρέχει δεδομένα SAR στο κανάλι X, για έρευνα και ανάπτυξη, καθώς επίσης και για επιστημονικές και εμπορικές εφαρμογές. Ο δορυφόρος βρίσκεται σε μια σχεδόν πολική τροχιά γύρω από τη Γη, σε υψόμετρο 514 χιλιομέτρων. Χρησιμοποιώντας την κεραία του ραντάρ, είναι σε θέση να παράγει δεδομένα με ανάλυση μέχρι ένα μέτρο, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, νέφωση ή απουσία του φωτός της ημέρας. Ο TerraSAR-X έχει τεθεί σε πλήρη λειτουργία από τις 7 Ιανουαρίου 2008.

### **Cosmo-SkyMed**

Ο δορυφόρος COSMO-SkyMed είναι ένα από τα πιο καινοτόμα προγράμματα παρατήρησης της Γης και χρηματοδοτείται από την Ιταλική Υπηρεσία Διαστήματος, το Υπουργείο Άμυνας, το Υπουργείο Παιδείας, από πανεπιστήμια και ερευνητικούς φορείς. Το σύστημα COSMO-SkyMed περιλαμβάνει έναν σχηματισμό τεσσάρων δορυφόρων εξοπλισμένων με αισθητήρες ραντάρ που μπορούν να λειτουργήσουν σε οποιοσδήποτε

καιρικές συνθήκες ή συνθήκες ορατότητας και με πολύ υψηλή συχνότητα επαναληψιμότητας λήψεων. Το πρόγραμμα COSMO-SkyMed σχεδιάστηκε για να ανταποκριθεί σε πολιτικούς (περιβάλλον, πολιτική προστασία, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) και στρατιωτικούς στόχους (παρακολούθηση). Τα συνολικά χαρακτηριστικά του συστήματος επιτρέπουν να λειτουργεί σε συνεργασία με άλλα συστήματα και να χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο των διεθνών συμφωνιών. Ειδικότερα, το πρόγραμμα COSMO-SkyMed είναι σε θέση να πληροί τις αυστηρές απαιτήσεις λειτουργίας του προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης/ESA Copernicus. Το σύστημα έχει υλοποιηθεί σε στάδια: ο πρώτος δορυφόρος ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2007, ο δεύτερος τον Δεκέμβριο του 2007, ο τρίτος τον Οκτώβριο του 2008 και ο τέταρτος τον Νοέμβριο του 2010.



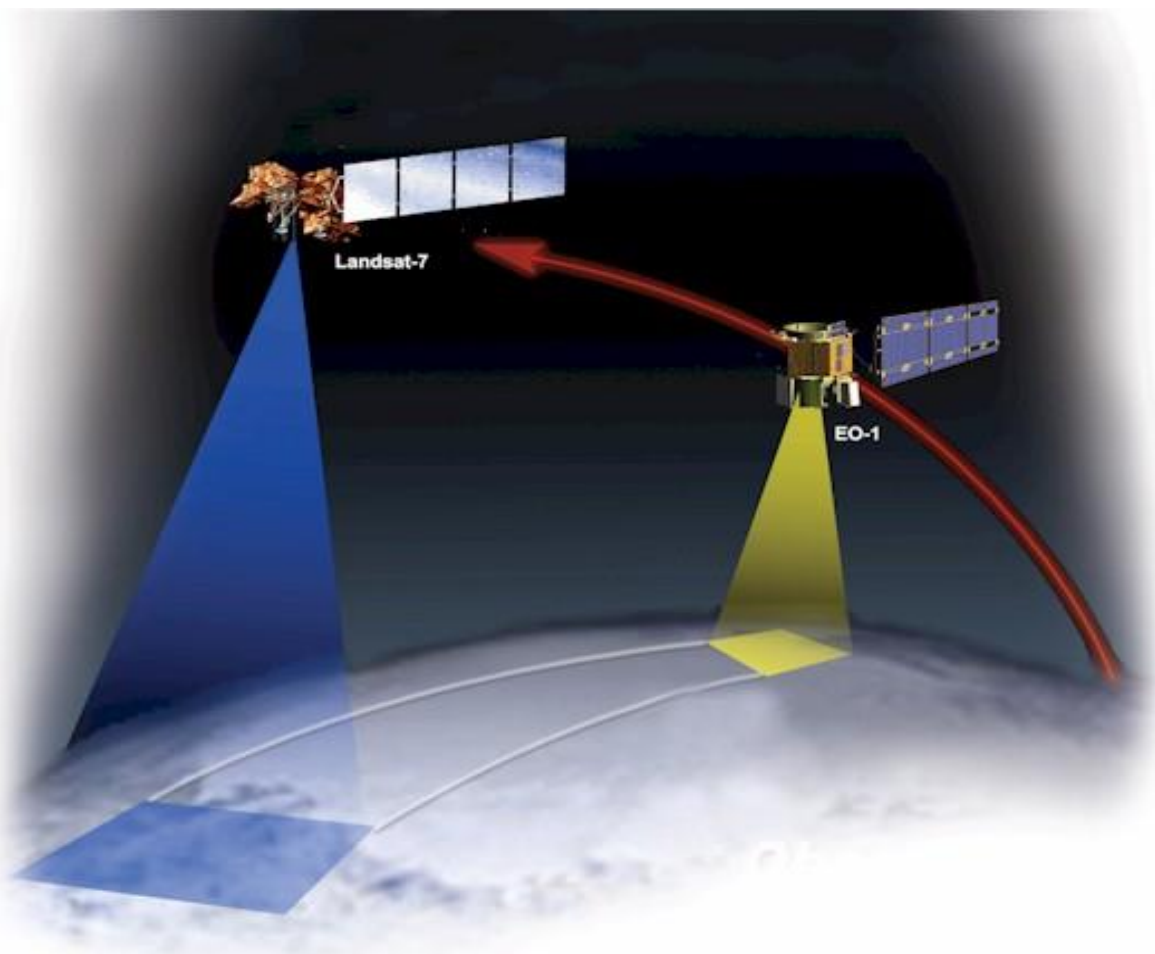
*Εικόνα 4.9* Εικόνα TerraSAR-X stripmap πάνω από τη γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου.

#### **4.4 Υπερφασματικοί δορυφόροι**



## Ο δορυφόρος EO-1 και ο υπερφασματικός αισθητήρας Hyperion

Ο δορυφόρος Earth Observing-1 εκτοξεύτηκε στις 21 Νοεμβρίου 2000, με αποστολή ενός έτους. Στόχος αυτής ήταν η επικύρωση της τεχνολογίας Landsat Data Continuity Mission (LDCM). Για την αρχική του αποστολή χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας ALI- Land Imager. Κατά το πέρας της αποστολής επιστημονικές κοινότητες εξέφρασαν υψηλό ενδιαφέρον για τη συνεχή απόκτηση δεδομένων εικόνας από τον EO-1. Με βάση το ενδιαφέρον των χρηστών, επιτεύχθηκε συμφωνία μεταξύ NASA και United States Geological Survey για να επιτραπεί η συνέχιση του προγράμματος EO-1 ως μια εκτεταμένη αποστολή για τη συλλογή και τη διανομή δεδομένων. Ο δορυφόρος EO-1 έχει ηλιοσύγχρονη τροχιά και βρίσκεται σε ύψος 705km και διέρχεται ένα λεπτό πίσω από τον δορυφόρο Landsat 7 (Εικόνα 4.10).



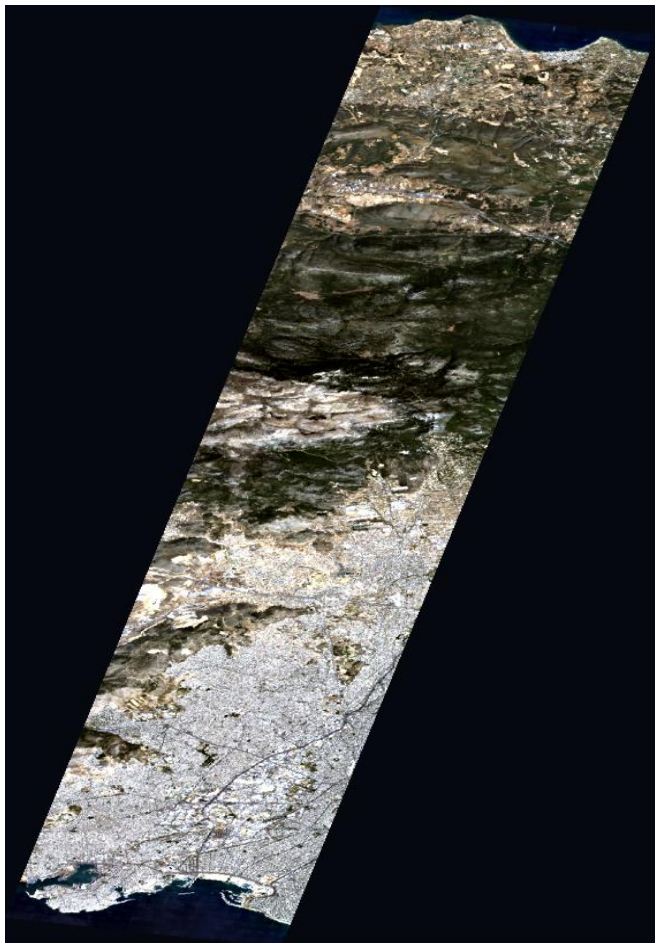
**Εικόνα 4.10** Η τροχιά του δορυφόρου EO-1 σε σχέση με την τροχιά του Landsat-7.

Ο δορυφόρος EO-1 ακολουθεί μια κυκλική, επαναληπτική, ηλιοσύγχρονη, σχεδόν πολική τροχιά σε υψόμετρο 705 km στον Ισημερινό. Το διαστημικό σκάφος ταξιδεύει από βορρά προς νότο περνώντας πάνω από τον Ισημερινό περίπου στις 10:00 – 10:15 π.μ.

Ο δορυφόρος ταξιδεύει γύρω από τη Γη με ταχύτητα 7,5 km/sec, με κλίση τροχιάς 98,2 βαθμούς και μια τροχιακή περίοδο 98,9 λεπτών. Κάθε τροχιά διαρκεί περίπου 99 λεπτά και η ταχύτητα του κατώτατου σημείου του δορυφόρου είναι ίση με 6,74 km/sec. Ο EO-1 ολοκληρώνει περίπου 14 τροχιές την ημέρα, με κύκλο επανεπίσκεψης 16 ημερών. Εκτός από τις περιοχές που περιλαμβάνονται μέσα στην τρέχουσα διαδρομή του δορυφόρου (διαδρομή ναδίρ), οι αισθητήρες του EO-1 έχουν τη δυνατότητα να σκοπεύουν και πλάγια, επιτρέποντας την απόκτηση εικόνων από περιοχές ενδιαφέροντος οι οποίες δεν καλύπτονται κατά την τρέχουσα

διαδρομή του δορυφόρου. Ουσιαστικά, υπάρχει η δυνατότητα για προγραμματισμό λήψεων σε τρεις διαφορετικές διαδρομές του EO-1. Αρχικά έχουμε τη διαδρομή ναδίρ (κατακόρυφο πέρασμα, μία φορά κάθε 16 μέρες), ακολουθεί η δυτική διαδρομή (ο δορυφόρος στοχεύει ανατολικά, 7 μέρες μετά το πέρασμα στη διαδρομή ναδίρ) και τέλος έχουμε την ανατολική διαδρομή (ο δορυφόρος στοχεύει δυτικά, 9 μέρες μετά το πέρασμα στη διαδρομή ναδίρ).

Σε κάθε εικόνα που έχει αποκτηθεί με τον αισθητήρα ALI το πλάτος της περιοχής που απεικονίζεται αντιστοιχεί σε 37km, ενώ αντίστοιχα για τις εικόνες του αισθητήρα Hyperion αντιστοιχεί σε 7,7km. Το μήκος κάθε εικόνας και των δύο αισθητήρων είναι ίσο με 42km ή ίσο με 185km, ανάλογα με τις διαστάσεις οι οποίες έχουν καθοριστεί κατά τον προγραμματισμό (Εικόνα 4.11).



**Εικόνα 4.11** Έγχρωμη εικόνα Hyperion φασματικά κανάλια 29(640.4972),23(579.4455),16(508.2184) που καλύπτει τμήμα της δυτικής Αττικής.

Η συλλογή εικόνων από τον συγκεκριμένο δορυφόρο είναι πολύ περιορισμένη όσον αφορά τη γεωγραφική τους κατανομή, αλλά και όσον αφορά τη συνολική ποσότητα, με έναν μέσο όρο συλλογής 18 εικόνων την ημέρα. Επιπλέον παρουσιάζει περιορισμένη καταγραφή δεδομένων καθώς όλες οι εικόνες που καταγράφονται από τους αισθητήρες πρέπει να αποθηκεύονται στον «Warp», ο οποίος έχει όριο τα 45 Gb, τα οποία μεταφράζονται σε 4-5 εικόνες. Οι αισθητήρες του EO-1 δεν μπορούν να καταγράφουν και να αποφορτίζουν δεδομένα ταυτόχρονα. Αυτό σημαίνει ότι όταν προκύπτει ανάγκη για αποφόρτιση δεδομένων, αποκλείεται το ενδεχόμενο απόκτησης εικόνων σε μία ολόκληρη διαδρομή. Για τον λόγο αυτό, η αποφόρτιση δεδομένων προγραμματίζεται συνήθως για τις νυχτερινές ώρες. Ο Υπερφασματικός Αισθητήρας Hyperion αποτελεί όργανο του δορυφόρου EO-1, συλλέγει υπερφασματικά δεδομένα σε συνολικά 242 διαύλους στο συνεχές φάσμα από τη φασματική περιοχή των 356nm μέχρι και τα 2577nm, με χωρική ανάλυση ίση με 30 μέτρα. Τα δεδομένα στο σύστημα Hyperion αποκτώνται από δύο ξεχωριστά φασματόμετρα τύπου pushbroom, δηλαδή από σαρωτές που σαρώνουν την επιφάνεια της Γης γραμμή προς γραμμή κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης του συστήματος απεικόνισης. Ανάμεσα στα δύο φασματόμετρα υπάρχει μία περιοχή φασματικής

επικάλυψης, μεταξύ των 852 και 1.058nm. Επιπλέον, ενώ ο αισθητήρας συλλέγει δεδομένα συνολικά σε 242 διαύλους, στα τελικά προϊόντα δεν είναι όλοι βαθμονομημένοι. Αυτό οφείλεται κυρίως στην απώλεια σήματος του αισθητήρα στις συγκεκριμένες φασματικές περιοχές, δηλαδή στη χαμηλή ευαισθησία των ανιχνευτών. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται σε όλες τις υπερφασματικές εικόνες Hyperion και οι διάλογοι αυτοί αφαιρούνται κατά την προ-επεξεργασία των εικόνων. Άρα το συνολικό προϊόν στο επίπεδο επεξεργασίας L1R θα περιέχει ένα σύνολο 196 διαύλων εκ των οποίων τα κανάλια 8 έως 57 (497-925nm) αντιστοιχούν στο εγγύς υπέρυθρο και 77 έως 224 (912-2395nm) αντιστοιχούν στο μέσο υπέρυθρο. Επίσης η εικόνα είναι διορθωμένη ραδιομετρικά και όχι γεωμετρικά, επομένως ο χρήστης πρέπει να εφαρμόσει τις κατάλληλες γεωμετρικές διορθώσεις.

Τα διαθέσιμα προϊόντα Hyperion είναι:

*Επίπεδο επεξεργασίας 0:* Στο επίπεδο αυτό βρίσκονται ουσιαστικά τα πρωτογενή δεδομένα που λαμβάνονται απευθείας από τον αισθητήρα Hyperion (raw data) και στα οποία δεν εφαρμόζεται καμία επεξεργασία.

*Επίπεδο επεξεργασίας 1R:* Τα δεδομένα στο επίπεδο 1R είναι ραδιομετρικά διορθωμένα και δημιουργούνται από το EPGS (EO-1 Product Generation System). Προκύπτουν από την εφαρμογή μιας ραδιομετρικής βαθμονόμησης στα δεδομένα του επιπέδου 0.

*Επίπεδο επεξεργασίας 1Gst:* Στο επίπεδο επεξεργασίας 1Gst (Systematic Terrain Corrected) το οποίο είναι και το νεότερο, τα δεδομένα δεν είναι μόνο ραδιομετρικά βαθμονομημένα, αλλά είναι και συστηματικά διορθωμένα για το ανάγλυφο του εδάφους. Τα δεδομένα αυτού του επιπέδου χαρακτηρίζονται από τη βελτιωμένη γεωμετρική τους ακρίβεια.

## **Το πρόγραμμα Copernicus**

Το Copernicus είναι το πιο φιλόδοξο πρόγραμμα παρατήρησης της Γης μέχρι σήμερα. Θα παρέχει ακριβείς, έγκαιρες και εύκολα προσβάσιμες πληροφορίες για τη βελτίωση της διαχείρισης του περιβάλλοντος, την κατανόηση και τον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και τη διασφάλιση της ασφάλειας των πολιτών.

Το Copernicus είναι το νέο όνομα για την Παγκόσμια Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος και της Ασφάλειας, πρόγραμμα παλαιότερα γνωστό ως το GMES. Η πρωτοβουλία αυτή, με επικεφαλής την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EC), γίνεται σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA).

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος συντονίζει τη διαχείριση των δεδομένων για πάνω από 30 δορυφόρους. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, που ενεργεί εξ ονόματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, είναι υπεύθυνη για τη συνολική πρωτοβουλία, τον καθορισμό των απαιτήσεων και τη διαχείριση των υπηρεσιών.

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ΕΟΔ) αναπτύσσει μια νέα οικογένεια δορυφόρων που ονομάζεται Sentinel, ειδικά για τις επιχειρησιακές ανάγκες του προγράμματος Copernicus. Οι δορυφόροι αυτοί θα παρέχουν ένα μοναδικό σύνολο των παρατηρήσεων, αρχής γενομένης με τις εικόνες ραντάρ παντός καιρού, μέρα και νύχτα από τον Sentinel-1A, που τέθηκε σε τροχιά στις 3 Απριλίου 2014 (Εικόνα 4.12). Ο Sentinel-2 θα παρέχει υψηλής ανάλυσης οπτικές εικόνες και ο Sentinel-3 θα παρέχει στοιχεία για τις υπηρεσίες που σχετίζονται με τη θάλασσα και τη γη. Ο Sentinel-4 και ο Sentinel-5 θα παρέχουν στοιχεία για την παρακολούθηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας από γεωστατική και πολική τροχιά, αντίστοιχα. Ο Sentinel-6 θα φέρει όργανα για τη μέτρηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας σε παγκόσμια κλίμακα, κυρίως για ζητήματα επιχειρησιακής ωκεανογραφίας και για τη μελέτη της κλιματικής αλλαγής.

### ***Sentinel 1***

Ο πρώτος στη σειρά, ο Sentinel-1, φέρει ένα προηγμένο όργανο ραντάρ για τη λήψη εικόνων της επιφάνειας της Γης ημέρα και νύχτα και ανεξάρτητα του καιρού (Εικόνα 4.13). Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) στη μικροκυματική ζώνη C- βασίζεται στην κληρονομιά και των συστημάτων SAR των δορυφόρων ERS-1, ERS-2, Envisat και Radarsat του ΕΟΔ και του Καναδά.

Πρόκειται για αστερισμό δύο δορυφόρων Sentinel 1A και 1B σε τροχιά που έχουν απόσταση 180° και καλύπτουν ολόκληρη τη Γη κάθε έξι ημέρες. Η μετάδοση των δεδομένων θα γίνεται σε μια σειρά επίγειων σταθμών σε όλο τον κόσμο με σκοπό την ταχεία διάδοση των δεδομένων. Ο Sentinel-1 φέρει επίσης ένα λέιζερ

για να μεταδώσει δεδομένα στον γεωστατικό ευρωπαϊκό σύστημα αναμετάδοσης δεδομένων για συνεχή παροχή δεδομένων.

Ο Sentinel-1 είναι το αποτέλεσμα της στενής συνεργασίας μεταξύ του ΕΟΔ, της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, της διαστημικής βιομηχανίας, των παρόχων σχετικών υπηρεσιών και των χρηστών δεδομένων. Σχεδιασμένος και κατασκευασμένος από μια κοινοπραξία περίπου 60 εταιρειών με επικεφαλής την Thales Alenia Space και την Airbus Defence and Space, αποτελεί ένα εξαιρετικό παράδειγμα της τεχνολογικής υπεροχής της Ευρώπης.

Η αποστολή θα προσφέρει υπηρεσίες σε πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα, οι υπηρεσίες που σχετίζονται με την παρακολούθηση της Αρκτικής και την έκταση του θαλάσσιου πάγου, τη χαρτογράφηση του θαλάσσιου πάγου, την επιτήρηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης των πετρελαιοκηλίδων και τον εντοπισμό του πλοίου για την ασφάλεια στη θάλασσα, την παρακολούθηση της επιφάνειας του εδάφους για παραμορφώσεις που οφείλονται είτε σε ανθρωπογενή αίτια είτε σε φυσικές καταστροφές, τη χαρτογράφηση των δασών και τους κινδύνους αποψίλωσης, το νερό και τη διαχείρισή του και τη χαρτογράφηση για να υποστηρίξει την ανθρωπιστική βοήθεια και καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Ο σχεδιασμός του Sentinel-1, ο οποίος εστιάζεται στην αξιοπιστία, λειτουργική σταθερότητα, παγκόσμια κάλυψη και γρήγορη μετάδοση των δεδομένων, αναμένεται να βοηθήσει στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών και να ανταποκριθεί στις εξελισσόμενες ανάγκες του προγράμματος Copernicus. Ο Sentinel-1A εκτοξεύτηκε στις 3 Απριλίου 2014 σε έναν πύραυλο Soyuz από τον διαστημικό σταθμό της Ευρώπης στη Γαλλική Γουιάνα. Το όργανο Ραντάρ του Sentinel-1 μπορεί να λειτουργήσει με τέσσερις τρόπους: Interferometric Wide Swath (IW), Extra Wide Swath (EW), Wave (WV) and Stripmap (SM).



Εικόνα 4.12 Δορυφόρος Sentinel-1.

Αυτοί οι τρόποι μπορούν να λειτουργούν σε διάφορα καθεστάτα πόλωσης. Η λειτουργία Wave διαθέτει μονή πόλωση (VV ή HH). Για όλους τους άλλους τρόπους μεταφοράς, το διπλό σύστημα πόλωσης είναι διαθέσιμο (VV + VH ή HH + HV), καθώς και μονή πόλωση (HH ή VV).



**Εικόνα 4.13** Εικόνα ραντάρ Sentinel-1 που απεικονίζει την περιοχή της Αττικής και τον Σαρωνικό κόλπο.

Κάθε λειτουργία μπορεί να παράγει δυναμικά προϊόντα σε μορφή:

Level-0: Συμπιεσμένα και ανεπεξέργαστα δεδομένα. Τα προϊόντα Level-0 είναι η βάση από την οποία παράγονται όλα τα άλλα προϊόντα υψηλού επιπέδου, με ένα τυπικό μέγεθος 1GB (σε λειτουργία IW).

Level-1 Single Look Complex: Εστιασμένα δεδομένα, με γεωαναφορά χρησιμοποιώντας στοιχεία της τροχιάς του δορυφόρου, και με γεωμετρία σύμφωνα με την κλίση εμβέλειας του δορυφόρου (slant range). Τα προϊόντα αυτά έχουν ένα τυπικό μέγεθος 8GB (σε λειτουργία IW διπλής πόλωσης) και 4 GB (στο IW λειτουργία μόνο πόλωση). Είναι το προϊόν που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή των μεθόδων της συμβολομετρίας.

Level-1: Γεωμετρία εδάφους (Ground Range Detected) Εστιασμένα δεδομένα, με προβολή σε γεωμετρία εδάφους χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ελλειψοειδούς. Τυπικά το μέγεθος του προϊόντος είναι 1GB (σε λειτουργία IW).

Level-2: Συστηματική διανομή των προϊόντα για εφαρμογές σχετικά με το περιβάλλον ωκεανών (αιολική ενέργεια, κυματική και ρεύματα).

Οι χρήστες των προϊόντων Sentinel 1, αλλά και άλλων αποστολών ραντάρ, για να επεξεργαστούν μπορούν να έχουν πρόσβαση στο Sentinel-1 Tool Box μια πλούσια και φιλική εργαλειοθήκη.

### **Sentinel 2**

Ο Sentinel-2 φέρει ένα καινοτόμο όργανο καταγραφής ευρείας χωρικής λήψης και υψηλής χωρικής ανάλυσης πολυφασματικών δεδομένων με 13 φασματικές ζώνες για μια νέα προοπτική της Γης και της βλάστησης (Εικόνα 7.14). Ο συνδυασμός της υψηλής χωρικής ανάλυσης, οι νέες φασματικές δυνατότητές του, το ευρύ πλάτος καταγραφής των 290km και η υψηλή επανάληψη πάνω από την ίδια περιοχή θα παρέχουν μια άνευ προηγουμένου απεικόνιση της Γης. Η αποστολή βασίζεται σε έναν αστερισμό δύο πανομοιότυπων δορυφόρων

στην ίδια τροχιά, σε απόσταση 180° με σκοπό τη βέλτιστη κάλυψη και την παράδοση δεδομένων. Μαζί θα καλύπτουν όλη την επιφάνεια της Γης κάθε πέντε μέρες στον Ισημερινό. Η αποστολή θα παρέχει πληροφορίες κυρίως για τις γεωργικές και δασοκομικές πρακτικές και για να βοηθήσει τη διαχείριση της επισιτιστικής ασφάλειας. Δορυφορικές εικόνες θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό διαφόρων δεικτών των φυτών, που σχετίζονται με την παρουσία της χλωροφύλλης των φύλλων και την περιεκτικότητα σε νερό. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις εφαρμογές που σχετίζονται με τη βλάστηση της Γης. Η αποστολή Sentinel-2A είναι προγραμματισμένη για εκτόξευση τον Ιούνιο του 2015 και ο Sentinel-2B θα ακολουθήσει κατά το δεύτερο εξάμηνο του 2016. Το υψηλής ανάλυσης πολυφασματικό όργανο καταγραφής του Sentinel-2 βασίζεται στην ήδη καθιερωμένη κληρονομιά από τις αποστολές SPOT και των δορυφόρων Landsat.

Ο πολυφασματικός απεικονιστής (MSI) καλύπτει 13 φασματικές ζώνες (443-2.190nm) με και χωρικές αναλύσεις των 10m (για 4 φασματικά κανάλια στο ορατό και το εγγύς υπέρυθρο), 20m (για 6 φασματικά κανάλια στις μέσες υπέρυθρες ζώνες) και 60m (3 κανάλια για ατμοσφαιρικές διορθώσεις).



**Εικόνα 4.14** Εικόνα Sentinel-2 που απεικονίζει την περιοχή της Αττικής και τον Σαρωνικό κόλπο με ημερομηνία λήψης 25/9/2015 (Πηγή:ESA).

### **Sentinel 3**

Η αποστολή του δορυφόρου Sentinel-3 έχει ως κύριο στόχο τη μέτρηση της τοπογραφίας της θαλάσσιας επιφάνειας, τη μέτρηση της χερσαίας και θαλάσσιας θερμοκρασίας και επίσης το χρώμα με υψηλών προδιαγραφών ακρίβεια και αξιοπιστία για την υποστήριξη της πρόβλεψης κατάστασης των ωκεάνιων συστημάτων, καθώς και για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και του κλίματος.

Σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, θα παρέχονται δεδομένα για την πρόβλεψη κατάστασης των ωκεανών, χαρτογράφηση του θαλάσσιου πάγου και υπηρεσίες σχετικά με τη θαλάσσια ασφάλεια όπου χρειάζονται ακριβή και έγκαιρες μετρήσεις της κατάστασης της επιφάνειας του ωκεανού, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας

της επιφάνειας, καταγραφή των ωκεάνιων οικοσυστημάτων, την ποιότητα του νερού και την παρακολούθηση της ρύπανσης. Οι υπηρεσίες στο χερσαίο περιβάλλον σχετίζονται με την παρακολούθηση των αλλαγών χρήσεων γης, τη δασική κάλυψη, τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα, την ποιότητα του εδάφους, καθώς και την έγκαιρη προειδοποίηση κινδύνου πυρκαγιάς· είναι ζητήματα στα οποία θα συμβάλει σημαντικά ο Sentinel-3.

### ***Sentinel 4-5***

Οι αποστολές Sentinel-4 και Sentinel-5 είναι εστιασμένες στην παρακολούθηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας για το Copernicus Atmosphere Services. Και οι δύο αποστολές θα μεταφέρονται επί μετεωρολογικών δορυφόρων του προγράμματος EUMETSAT. Ο Sentinel 4 θα πραγματοποιεί παρατηρήσεις με βάση τους γεωστατικούς δορυφόρους Meteosat τρίτης γενιάς, ενώ ο Sentinel 5 σε πολική τροχιά του δορυφόρου MetOp δεύτερης γενιάς.

Οι αποστολές Sentinel-4 και -5 θα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις ατμοσφαιρικές μεταβλητές για τη στήριξη των ευρωπαϊκών περιβαλλοντικών πολιτικών. Οι υπηρεσίες θα περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, την παρουσία του όζοντος στην στρατόσφαιρα, την ηλιακή ακτινοβολία και γενικά την παρακολούθηση του κλίματος.

## **Βιβλιογραφικές αναφορές**

### Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Avery, T. E. & Berlin, G. L. (1992). *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*. New York: Macmillan Publishing Company, 5th edition.

Mather, M.P., (1999). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images*.UK: J. Wiley & Sons, 2nd edition p. 292.

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., & Chipman, Jonathan W. (2003). *Remote Sensing and Image Interpretation*. USA: J. Wiley & Sons, 5th edition, p. 26.

Campbell, J. B., & Ran, L. (1993). CHROM: A C Program to Evaluate the Application of the Dark Object Subtraction Technique to Digital Remote Sensing Data. *Computers and Geosciences*, Vol. 19.

Sabins, F.F., (1997). *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. New York: W.H. Freeman and Company, 3rd edition, p. 494.

Tucker C.J., (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, p. 127-150

Vassilopoulou, S., Hurni, L., Dietrich, V., Baltsavias, E., Pateraki, M., Lagios, E., Parcharidis, I., (2002). Orthophoto Generation Using Ikonos Imagery and High Resolution DEM: Study Case on Volcanic Hazard Monitoring of Nisyros Island (Greece). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 24-38.

## 5. Ανάλυση οπτικών δορυφορικών εικόνων

### 5.1 Αποκατάσταση ή Προεπεξεργασία εικόνας

Η αποκατάσταση της εικόνας, ή αλλιώς διόρθωση, αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια της ψηφιακής επεξεργασίας, γιατί τα επόμενα στάδια, όπως η βελτίωση και η ταξινόμηση, βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε αυτήν. Οι πιθανές ατέλειες του πρώτου σταδίου θα μεγιστοποιηθούν στα επόμενα στάδια, με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση της πληροφόρησης από την εικόνα που τελικά θα δημιουργηθεί.

Μια σειρά υπολογιστικών αλγόριθμων έχουν δημιουργηθεί για να διορθώνουν λάθη και παραμορφώσεις στις εικόνες.

Τα σημαντικότερα λάθη που καλούμαστε να διορθώσουμε στην αποκατάσταση της εικόνας είναι:

- Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις.
- Οι γεωμετρικές παραμορφώσεις.

#### 5.1.1 Ατμοσφαιρικές διορθώσεις

Η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος που λαμβάνει ένας δορυφορικός δέκτης εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες (Mather, 1999):

- α) Την ανάκλαση από τον στόχο.
- β) Την κλίση και τον προσανατολισμό της επιφάνειας σε σχέση με το ηλιακό αζιμούθιο.
- γ) Την ατμοσφαιρική επίδραση.
- δ) Τη γωνία λήψης του δέκτη.
- ε) Τη γωνία του ηλιακού ύψους.

Είναι λοιπόν φανερό ότι η ατμόσφαιρα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εξασθένιση του σήματος που φθάνει στον δορυφόρο. Αν και η τεχνολογία σήμερα έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό και οι δέκτες-σαρωτές καταγράφουν με τον καλύτερο τρόπο την ανακλώμενη ακτινοβολία, αρκετές φορές η επίδραση της ατμόσφαιρας είναι μεγάλη και ειδικότερα στα μήκη κύματος του ορατού φάσματος.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι για την εφαρμογή των ατμοσφαιρικών διορθώσεων στις δορυφορικές εικόνες, έχοντας σαν σκοπό να προσεγγίσουν την πραγματικότητα. Η προσέγγιση αυτή πολλές φορές δεν είναι εφικτή λόγω της έλλειψης των απαραίτητων στοιχείων που απαιτούνται για την εφαρμογή του αλγόριθμου και τα οποία αφορούν την ατμόσφαιρα και τη δορυφορική λήψη για τη συγκεκριμένη ημερομηνία.

Οι ατμοσφαιρικές διορθώσεις σε ορισμένες περιπτώσεις αποτελούν ένα απαραίτητο στάδιο προεπεξεργασίας των δεδομένων, θα πρέπει όμως να γίνονται προσεκτικά, ανάλογα με το αντικείμενο και τον στόχο της εφαρμογής, διότι είναι ένα δύσκολο κομμάτι της επεξεργασίας και είναι δυνατό να αλλοιώσουν τα πρωτογενή δεδομένα και να μην επιτευχθεί η βελτίωση που επιζητείται.



### 5.1.2 Γεωμετρικές διορθώσεις

Η δορυφορική εικόνα ως πρωτογενές δεδομένο εμφανίζει γεωμετρικές παραμορφώσεις οι οποίες σχετίζονται με τα ακόλουθα (Mather, 1999):

- Προοπτική απεικόνιση του συστήματος καταγραφής.
- Η κίνηση του συστήματος του σαρωτή.
- Η κίνηση ή/ και σταθερότητα της εξέδρας.
- Η ταχύτητα και το ύψος της εξέδρας.
- Το ανάγλυφο της γήινης επιφάνειας.
- Η καμπυλότητα και η περιστροφή της Γης.

Σε ό,τι αφορά τις φωτογραφικές κάμερες που χρησιμοποιούνται στις αεροφωτογραφίες, αυτές δημιουργούν εικόνες ακριβώς πάνω από την επιφάνεια. Η κυρίαρχη γεωμετρική παραμόρφωση στην περίπτωση των κάθετων αεροφωτογραφιών οφείλεται στη μετατόπιση του ανάγλυφου. Τα αντικείμενα ακριβώς κάτω από τον φακό της κάμερας (ναδίρ) αποτυπώνονται μόνο με το επάνω τμήμα τους, ενώ όλα τα άλλα αντικείμενα που βρίσκονται σε απόσταση από το ναδίρ εμφανίζονται με απόκλιση από το κέντρο της φωτογραφίας, επιτρέποντας να αποτυπωθούν πλην του πάνω τμήματος και πλευρικά τμήματα. Εάν τα αντικείμενα είναι μεγάλα σε ύψος ή βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το κέντρο της εικόνας, η παραμόρφωση και το σφάλμα θα είναι μεγαλύτερα.

Μια δορυφορική εικόνα δεν έχει τις ιδιότητες ενός χάρτη, και η κατάλληλη μετατροπή της για την απόκτηση της κλίμακας και των ιδιοτήτων προβολής ενός χάρτη ονομάζεται γεωμετρική διόρθωση. Η γεωμετρική διόρθωση έχει ως στόχο να μετασχηματίσει το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας ( $x, y$ ), το οποίο έχει παραμορφώσεις, σε ένα συγκεκριμένο σύστημα ( $X, Y$ ) χαρτογραφικής προβολής. Είναι ένα σημαντικό βήμα στην επεξεργασία των δεδομένων διότι επιτρέπει π.χ. την εισαγωγή τους σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών και την ταυτόχρονη χρήση τους μαζί με άλλα θεματικά επίπεδα πληροφορίας.

Κάθε χαρτογραφικό σύστημα προβολής είναι σχεδιασμένο ώστε να αναπαριστά την επιφάνεια μιας σφαίρας ή ενός ελλειψοειδούς σε ένα επίπεδο και σχετίζεται με ένα σύστημα συντεταγμένων. Το σύστημα αυτό ακολουθεί έναν κλάδο του οποίου κάθε θέση εκφράζεται με ένα αριθμητικό ζεύγος  $X$  και  $Y$  (στήλες και σειρές). Η μετατροπή των δεδομένων μιας εικόνας από ένα σύστημα καννάβου σε άλλο ονομάζεται γεωμετρική αναγωγή. Καθώς τα εικονοστοιχεία του νέου συστήματος δεν είναι σε «ευθυγράμμιση» με το παλιό εφαρμόζεται η τεχνική της αναδόμησης.

Η γεωμετρική διόρθωση είναι σημαντική για εφαρμογές που αφορούν:

- Τη σύγκριση μεταξύ δύο εικόνων ίδιας περιοχής σε διαφορετικό χρόνο, σε επίπεδο εικονοστοιχείου, για την ανίχνευση των αλλαγών.
- Την ανάπτυξη ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών με τη χρήση και συσχέτιση άλλων θεματικών χαρτών.
- Τη μέτρηση αποστάσεων ή επιφανειών.
- Τη δημιουργία μωσαϊκού.
- Τις ανάγκες κάθε ανάλυσης στην οποία απαιτείται ακρίβεια στον εντοπισμό θέσεων.

Τα βήματα που ακολουθούνται για τη γεωμετρική επεξεργασία είναι τα παρακάτω:

- Επιλογή του κατάλληλου συστήματος συντεταγμένων. Στην επιλογή αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το αντικείμενο χρήσης του τελικού προϊόντος.
- Επιλογή του τύπου της διόρθωσης. Για παράδειγμα, με σύγκριση εικόνας με εικόνα (image to image registration) ή με την εισαγωγή των συντεταγμένων από τοπογραφικό χάρτη.

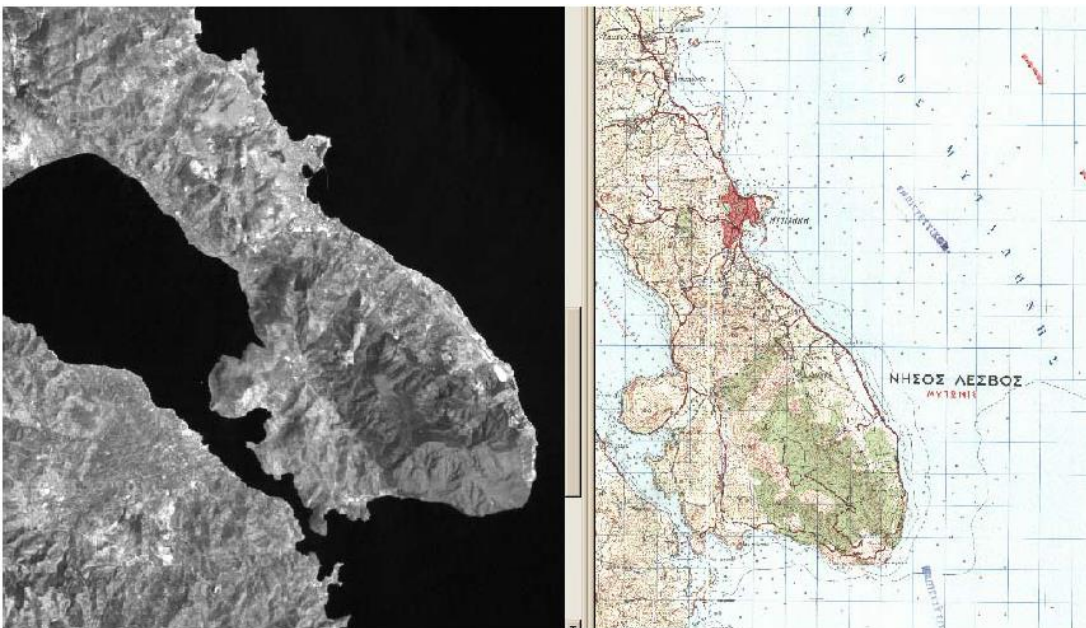
- Εντοπισμός των εδαφικών σημείων ελέγχου (ground control points).
- Επιλογή του βαθμού μετασχηματισμού.
- Επιλογή της τεχνικής της αναδόμησης. Δημιουργία της τελικής εικόνας μέσα από την αναδόμηση και τον σχηματισμό ενός νέου καννάβου. Ανάπτυξη της τεχνικής της γεωμετρικής διόρθωσης

Για την τεχνική της γεωμετρικής διόρθωσης απαιτείται μια πηγή άντλησης της πληροφορίας για τις τιμές των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων της εικόνας.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι γεωμετρικής διόρθωσης ανάλογα με την πηγή της πληροφορίας:

1. **Εγγραφή εικόνας σε άλλη εικόνα (image to image).** Αναφέρεται στον μετασχηματισμό του συστήματος συντεταγμένων μιας εικόνας σε κάποιον άλλο μιας δεύτερης εικόνας. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ήδη μια εικόνα γεωμετρικά διορθωμένη σε ένα συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων από την οποία θα αντληθεί η σχετική πληροφορία.

2. **Εγγραφή εικόνας σε χάρτη.** Αναφέρεται στον μετασχηματισμό του συστήματος της εικόνας στο σύστημα συντεταγμένων του τοπογραφικού χάρτη (Εικόνα 5.1). Ο χάρτης μπορεί να ψηφιοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως εικόνα ή τα σημεία να αναγνωριστούν και να υπολογιστούν από τον χάρτη και να εισαχθούν με το πληκτρολόγιο. Τέλος, τα σημεία μπορούν να καθοριστούν και στην ύπαιθρο με τη χρήση GPS.



**Εικόνα 5.5** Δορυφορική εικόνα LANDSAT-5 TM από περιοχή της Ν. Λέσβου (αριστερά). Τοπογραφικός χάρτης 1:50.000 σε μορφή raster με σύστημα συντεταγμένων (δεξιά).

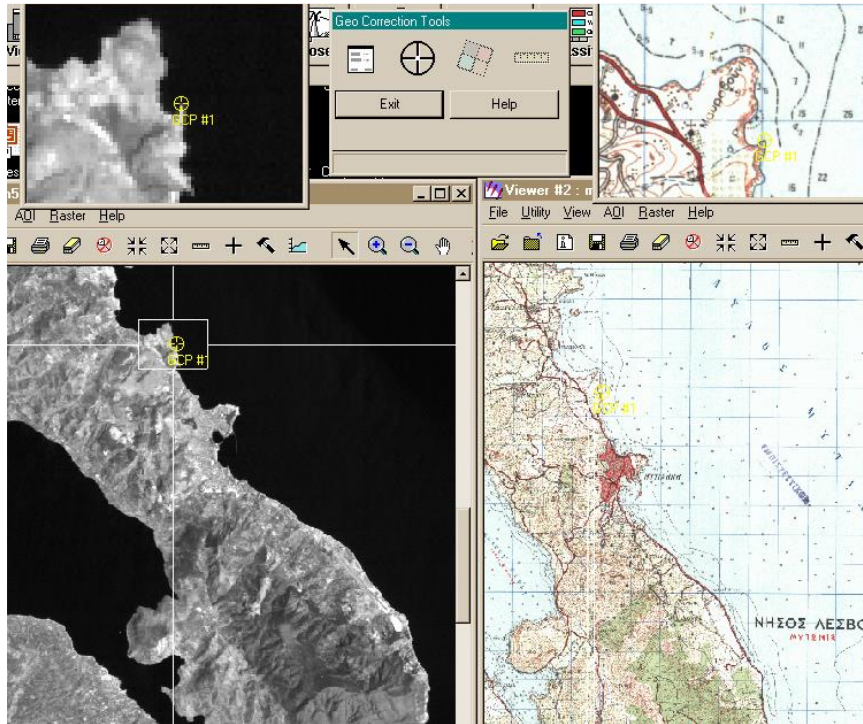
#### Γεωμετρική διόρθωση με πολυώνυμα – Επιλογή του βαθμού μετασχηματισμού

Βασίζεται στον καθορισμό ενός μαθηματικού μετασχηματισμού πολυωνύμων ανεξαρτήτως της πηγής και του είδους της γεωμετρικής διόρθωσης. Ανάλογα με τον βαθμό της παραμόρφωσης, τον συνολικό αριθμό των GCP και τη σχετική τους θέση, απαιτούνται συχνά πολύπλοκα πολυώνυμα για τις ανάγκες της μετατροπής. Το επίπεδο πολυπλοκότητας των πολυωνύμων εκφράζεται ως «βαθμός πολυωνύμου» (ο υψηλότερος εκθέτης στο πολυώνυμο).

Ο βαθμός μετασχηματισμού είναι ο βαθμός του πολυωνύμου που χρησιμοποιείται για τον μετασχηματισμό αυτό. Συνήθως χρησιμοποιείται ο 1ος και 2ος βαθμός μετασχηματισμού.

### Εδαφικά σημεία ελέγχου (Ground Control Points)

Τα σημεία εδαφικού ελέγχου αποτελούν συγκεκριμένα εικονοστοιχεία σε μια εικόνα για τα οποία γνωρίζουμε τις συντεταγμένες από άλλη πηγή αναφοράς. Σε κάθε σημείο ελέγχου αντιστοιχεί ένα ζεύγος τιμών συντεταγμένων X, Y. Η ακρίβεια στην επιλογή των GCP είναι καθοριστικός παράγοντας για την ποιότητα της γεωμετρικής διόρθωσης. Η επιλογή των σημείων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν κανονική διασπορά σε όλη την εικόνα. Σημεία ελέγχου μπορούν να είναι διασταυρώσεις δρόμων, συμβολές ρεμάτων, αεροδιάδρομοι, μικρά κτίσματα, σημεία κατά μήκος της ακτογραμμής, κ.λπ. (Εικόνα 5.2).



**Εικόνα 5.6** Γεωμετρική διόρθωση δορυφορικής εικόνας με τη βοήθεια του τοπογραφικού χάρτη.

### Ο απαιτούμενος αριθμός εδαφικών σημείων ελέγχου (GCP)

Συνήθως οι μετασχηματισμοί υψηλού βαθμού χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση ιδιαίτερα δύσκολων παραμορφώσεων. Ένας υψηλός βαθμός μετασχηματισμού, π.χ. 3ου βαθμού, απαιτεί μεγάλο αριθμό GCP. Για την εφαρμογή ενός 1ου βαθμού μετασχηματισμού (ορίζεται επίπεδο) απαιτούνται κατ' ελάχιστον 3 σημεία ελέγχου. Για τον 2ου βαθμού μετασχηματισμό απαιτούνται κατ' ελάχιστον 6 σημεία (παραβολοειδές). Ο ελάχιστος αριθμός σημείων για να πραγματοποιηθεί μετασχηματισμός t βαθμού είναι:

$$(t+1)*(t+2) / 2$$

### Μέθοδοι αναδόμησης της εικόνας

Μετά τον προσδιορισμό του βαθμού μετασχηματισμού, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός εκ νέου των νέων τιμών DN (ψηφιακοί αριθμοί) του επιπέδου διαβάθμισης του γκρι. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι:

#### *α. Μέθοδος του πλησιέστερου σημείου*

Με βάση τη μέθοδο αυτή αντικαθίσταται η τιμή DN του νέου εικονοστοιχείου με την τιμή του πλησιέστερου εικονοστοιχείου της αρχικής εικόνας. Οι προκύπτουσες νέες τιμές (DN) παραμένουν ίδιες με

αυτές της αρχικής εικόνας. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι απλή, διατηρεί τις αρχικές τιμές, όμως παρατηρούνται κάποια σφάλματα κυρίως σε γραμμικά στοιχεία της εικόνας.

#### *β. Μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής*

Η μέθοδος αυτή για τον υπολογισμό της τιμής του νέου εικονοστοιχείου χρησιμοποιεί τον μέσο όρο των τιμών των τεσσάρων εγγύτερων αρχικών εικονοστοιχείων. Το τελικό αποτέλεσμα συνήθως είναι ικανοποιητικό με δεδομένο ότι λαμβάνονται υπόψη περισσότερες τιμές.

#### *γ. Μέθοδος της κυβικής παρεμβολής*

Είναι η πλέον πολύπλοκη και σύνθετη μέθοδος. Η κυβική παρεμβολή χρησιμοποιεί τον μέσο όρο 16 εγγύτερων εικονοστοιχείων για να αποδώσει τιμή DN στο υπό παρεμβολή εικονοστοιχείο. Η αισθητική των νέων εικόνων είναι ικανοποιητική, όμως οι εικόνες υφίστανται ισχυρή αλλοίωση (λόγω εξομάλυνσης).

## **5.2 Βελτίωση εικόνας**

Η οπτική ανάλυση και ερμηνεία συχνά είναι επαρκής για αρκετές εφαρμογές των δορυφορικών εικόνων που τυπώνονται σε φωτογραφικό χαρτί. Στην περίπτωση των ψηφιακών εικόνων χρησιμοποιούμε H/Y και ειδικό λογισμικό για τη διαχείριση και εμφάνιση της εικόνας, καθώς και για τη δημιουργία προϊόντων τα οποία να ικανοποιούν τον ερμηνευτή. Βασικά τα ραδιομετρικά προβλήματα οφείλονται κατά κύριο λόγο είτε σε σφάλματα καταγραφής και ψηφιοποίησης είτε στην απορροφούμενη ή ανακλώμενη από την ατμόσφαιρα και τα αντικείμενα ενέργεια, καθώς και τη διάχυση (Mather, 1999).

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της εικόνας ταξινομούνται ως εξής:

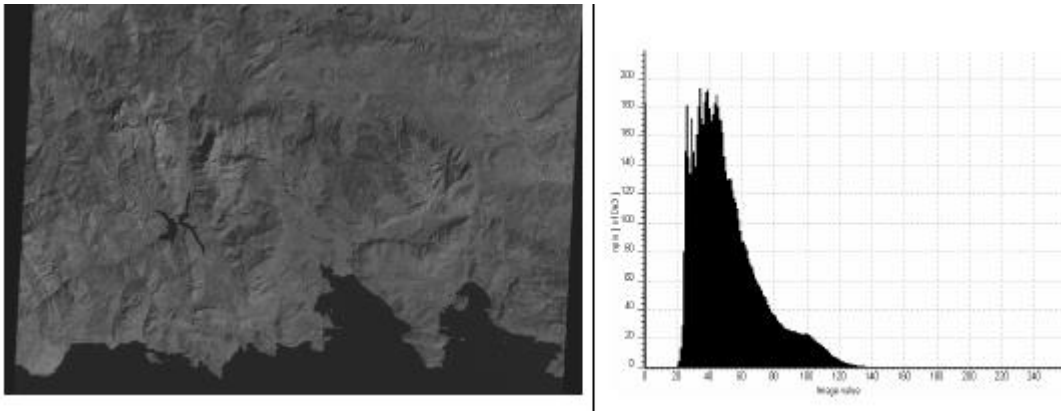
- I. Βελτίωση της αντίθεσης (Contrast Enhancement).**
- II. Χρήση φίλτρων (filters).**
- III. Ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal components analysis).**
- IV. Συνδυασμός φασματικών ζωνών (Combination of spectral zones).**
- V. Λόγοι φασματικών ζωνών (Ratios).**
- VI. Συγχώνευση δεδομένων.**

Η τεχνική της βελτίωσης της αντίθεσης αποτελεί ραδιομετρική βελτιστοποίηση, η τεχνική της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών καλείται φασματική, ενώ η τεχνική της εφαρμογής φίλτρων χωρική. Η ραδιομετρική βελτιστοποίηση λειτουργεί σε ένα μόνο εικονοστοιχείο, ενώ η χωρική λειτουργεί σε ομάδες εικονοστοιχείων. Η χωρική βελτιστοποίηση συνδέεται με τη χωρική συχνότητα η οποία είναι η διαφορά μεταξύ των υψηλότερων και χαμηλότερων τιμών σε μια ομάδα εικονοστοιχείων.

### **I. Βελτίωση της αντίθεσης (Contrast Stretching)**

Οι τεχνικές βελτίωσης της αντίθεσης είναι η πλέον συνήθεις στις ψηφιακές εικόνες. Η ανάλυση της εικόνας με οπτική ερμηνεία συχνά διευκολύνεται όταν βελτιωθεί η αισθητική των εικόνων. Οι αισθητήρες που φέρουν οι δορυφόροι πρέπει να είναι ικανοί να ανιχνεύουν επίπεδα ανάκλασης από τα χαμηλότερης μέχρι τα υψηλότερης ανακλαστικής ικανότητας αντικείμενα.

Ερμηνεύοντας ένα ιστόγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε την αποτύπωση των εικονοστοιχείων σε μία εικόνα να έχουν δυναμικά τιμές από 0 έως 255, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα συστήματα είναι των 8bits τα οποία αντιστοιχούν σε 256 διαβαθμίσεις του γκρι. Στην αρχική μορφή της εικόνας δεν χρησιμοποιούνται όλες οι διαβαθμίσεις, με αποτέλεσμα η εικόνα να εμφανίζεται με μικρή χρωματική αντίθεση. Όταν το ιστόγραμμα μιας εικόνας είναι, για παράδειγμα, από 20 έως 120 της κλίμακας του γκρι, αυτό σημαίνει ότι η εικόνα είναι πολύ σκοτεινή (Εικόνα 5.3). Αντίστοιχα, αν το ιστόγραμμα είναι στην περιοχή 180-240, τότε η εικόνα θα είναι πολύ φωτεινή. Όταν οι αντιθέσεις μεταξύ των τιμών των εικονοστοιχείων είναι πολύ μικρές, τότε και οι υφιστάμενες διαφορές καθίστανται δυσδιάκριτες και η ερμηνεία σχεδόν αδύνατη.



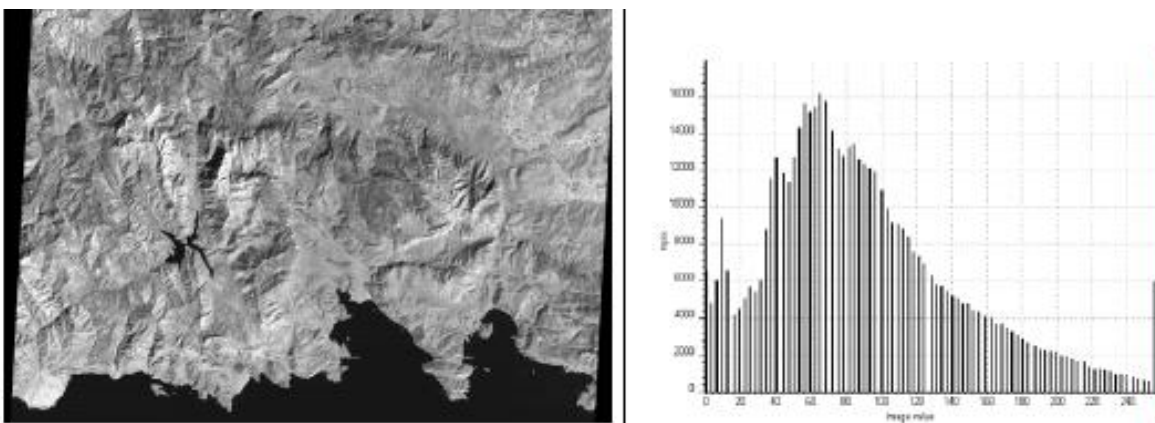
**Εικόνα 5.7** Δορυφορική εικόνα LANDSAT-5 TM (raw data) από την περιοχή της Ιτέας (αριστερά) και το ιστόγραμμα των φασματικών τιμών της (δεξιά). Παρατηρείται η συγκέντρωση των τιμών σε ένα μικρό εύρος της κλίμακας του γκρι, προς την αρχή του άξονα, και για τον λόγο αυτό η εικόνα εμφανίζεται σκοτεινή.

Για τη βελτίωση της εικόνας εφαρμόζονται οι τεχνικές διόρθωσης του ιστογράμματος οι οποίες αποσκοπούν στη βελτίωση των αντιθέσεων της εικόνας. Ο τελικός στόχος της βελτίωσης της αντίθεσης της εικόνας είναι να μετασχηματιστεί το αρχικό εύρος διακύμανσης των τιμών DN του γκρι της εικόνας σε κάποιο άλλο εύρος είτε με διάταση του ιστογράμματος είτε με σύμπτυξή του. Μπορούν να εφαρμοστούν γραμμικοί ή μη γραμμικοί μετασχηματισμοί, οι οποίοι όμως διατηρούν τη διάταξη των τιμών των εικονοστοιχείων και είναι αντιστρέψιμοι.

Η βελτίωση της αντίθεσης στην εικόνα μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους εξής τρόπους:

α) Με γραμμική επέκταση της αντίθεσης (linear contrast stretching): στην πιο απλή της μορφή, περιλαμβάνει την αποτύπωση των τιμών των εικονοστοιχείων στην πλήρη εξάπλωση της κατανομής των τιμών. Οι τιμές των εικονοστοιχείων ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε τα DN<sub>min</sub> να αποτυπώνονται στην τιμή 0 και τα DN<sub>max</sub> στην τιμή 255. Οι ενδιάμεσες τιμές κρατούν τις σχετικές θέσεις έτσι ώστε οι μέσες τιμές μεταξύ DN<sub>min</sub> και DN<sub>max</sub> να αντιστοιχούν στο 127. Με γραμμική επέκταση της αντίθεσης έχουμε αύξηση της αντίθεσης στην ψηφιακή εικόνα, ενώ διατηρούνται οι συσχετισμοί της αρχικής ακτινοβολίας (Εικόνα 5.4). Επίσης, ένα είδος γραμμικής επέκτασης θα έχουμε όταν πάρουμε ένα τμήμα των ψηφιακών τιμών και το «τεντώσουμε» από το 0 έως 255. Τέλος, μπορεί να εφαρμοστεί γραμμική επέκταση με κορεσμό. Συγκεκριμένα ένα μικρό ποσοστό ωθείται στα δύο άκρα ώστε να λάβει τις ακραίες τιμές 0 και 255.

β) Με λογαριθμική επέκταση: Τα δεδομένα με αυτή τη μέθοδο μπορούν να επεκταθούν χρησιμοποιώντας μια λογαριθμική συνάρτηση. Η λογαριθμική αυτή επέκταση είναι χρήσιμη για χαρακτηριστικά που κρύβονται σε σκοτεινά σημεία της αρχικής εικόνας, ενώ η εκθετική συνάρτηση επεκτείνει τα φωτεινά σημεία της κλίμακας του γκρι της αρχικής εικόνας.

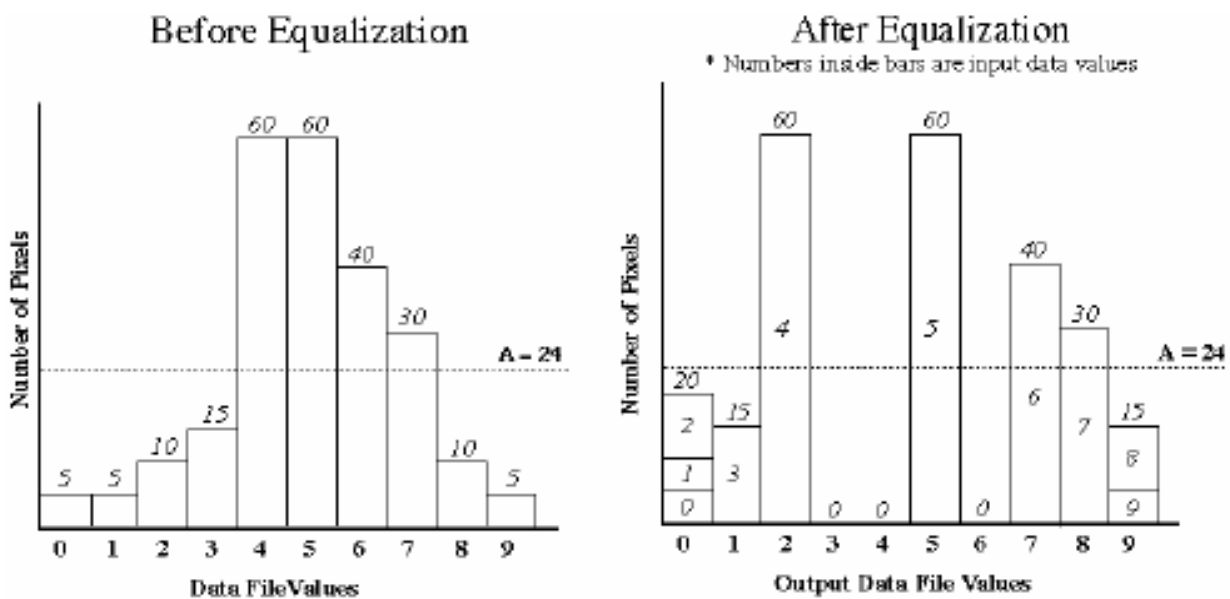


**Εικόνα 5.8** Δορυφορική εικόνα LANDSAT-5 TM από την περιοχή της Ιτέας στην οποία έχει εφαρμοστεί η γραμμική επέκταση του ιστογράμματος (αριστερά) και το ιστόγραμμα των φασματικών τιμών της (δεξιά).

γ) Με πολλαπλή γραμμική επέκταση (piece-wise linear stretch): Διαφορετικά τμήματα της χρωματικής διαφοροποίησης του γκρι, στην αρχική εικόνα, μπορούν να επεκταθούν με ανόμοιο τρόπο, δηλαδή κάθενα από αυτά να επιδέχεται ξεχωριστά γραμμική επέκταση.

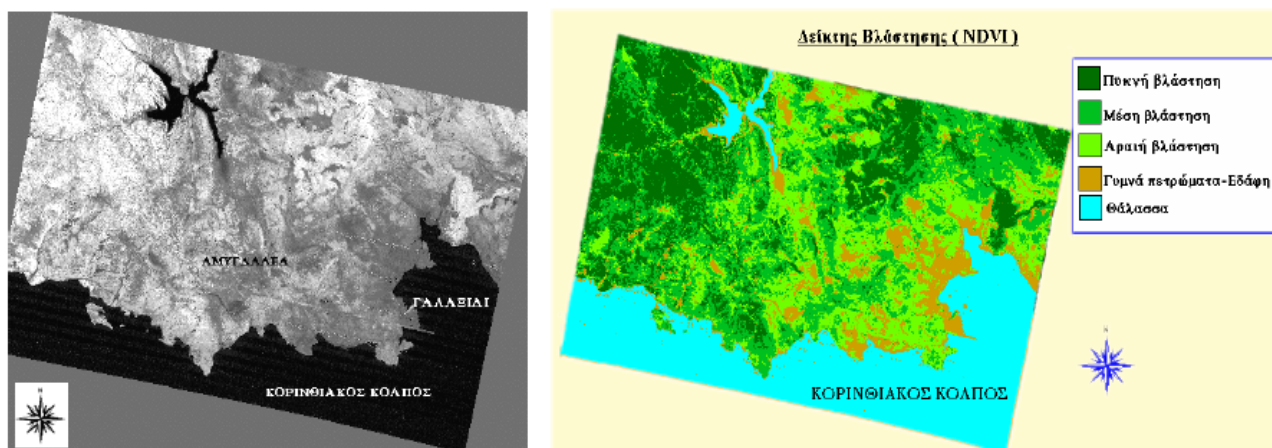
δ) Ισοδυναμοποίηση του ιστογράμματος (Histogram Equalization): καλείται επίσης συνάρτηση αθροιστικής κατανομής επέκτασης ή ενιαία κατανομή επέκτασης. Ακολουθώντας την κανονική κατανομή, τα εικονοστοιχεία κοντά στη μέση τιμή είναι αυτά που απαντώνται πιο συχνά. Η μέθοδος αυτή επεκτείνει όλα τα DN και τα μετατρέπει σε ισοδύναμη συχνότητα. Κατ' αυτόν τον τρόπο η νέα εικόνα που δημιουργείται έχει ομοιόμορφη πυκνότητα των εικονοστοιχείων κατά τον άξονα DN. Η μέθοδος αυτή από μόνη της περιέχει τον υπολογισμό του αριθμού των εικονοστοιχείων σε κάθε τάξη του ιστογράμματος κατανομής.

Η τιμή αυτή μπορεί να βρεθεί εύκολα από τη διαίρεση του N, που αντιπροσωπεύει το σύνολο των εικονοστοιχείων της εικόνας, με το 256, που είναι ο αριθμός των τάξεων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε μεμονωμένη εικόνα (μία φασματική ζώνη), δεν κρίνεται όμως κατάλληλη για έγχρωμες εμφανίσεις (Μιγκίρος κ.ά., 1995) (Εικόνα 5.5).



**Εικόνα 9.5** Απεικονίζονται τα ιστογράμματα που δείχνουν τις τιμές πριν και μετά την εφαρμογή της ισοδυναμοποίησης. Όταν τα συγκρίνουμε, βλέπουμε ότι η μέθοδος αυτή ενισχύει το κοντράστ των πιο συχνών περιοχών. Στο παράδειγμα αυτό το αρχικό ιστόγραμμα από 3-7 επεκτείνεται σε εύρος από 1-8.

ε) Χρωματική Βελτίωση με τεμαχιοποίηση της πυκνότητας (Density slicing): Είναι η τεχνική κατά την οποία το εύρος των ψηφιακών τιμών 0-255 (256 αποχρώσεις του γκρι) μιας εικόνας, τεμαχίζεται σε έναν αριθμό τμημάτων και εφαρμόζεται σε αυτά η έγχρωμη απεικόνιση των βασικών χρωμάτων (κόκκινο, πράσινο, μπλε). Τα τμήματα των συνεχόμενων τιμών του γκρι που δημιουργούνται καλούνται τεμάχια (slices). Έτσι, το εύρος 0-255 απλώς μετατρέπεται σε διαφορετικά τεμάχια χρωμάτων. Αυτή η μετατροπή της ασπρόμαυρης εικόνας σε ψευδέγχρωμη, δίνει τη δυνατότητα του καλύτερου τονισμού ορισμένων χαρακτηριστικών, με ταυτόχρονο όμως τον κίνδυνο της απώλειας κάποιων σημαντικών λεπτομερειών. Βέβαια εάν οι τιμές των εικονοστοιχείων μιας εικόνας είναι συγκεντρωμένες σε ένα μικρό τμήμα της κλίμακας του γκρι, τότε η απόδοση ενός χρώματος σε μία εικόνα δεν θα δώσει αντίστοιχα έντονη χρωματική διαφοροποίηση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η χρήση της ισοδυναμοποίησης του ιστογράμματος μπορεί να δώσει λύση σε αυτό το πρόβλημα (Εικόνα 5.6).



**Εικόνα 5.10** Εικόνα του δείκτη βλάστησης μιας περιοχής στην Κεντρική Στερεά Ελλάδα, πριν και μετά την εφαρμογή της τεμαχιοποίησης της πυκνότητας (density slicing). Είναι φανερό ότι το προϊόν που προκύπτει αποτελεί καλύτερο υπόβαθρο, για έναν χρήστη, όσον αφορά την προσπάθεια ανάλυσης και ερμηνείας αυτής της εικόνας (Parcharidis et al., 1998).

## II. Φίλτρα

Πρόκειται για τεχνικές οι οποίες δίνουν έμφαση στην επιλεκτική πληροφόρηση σε διάφορες χωρικές κλίμακες που εμπεριέχονται στην εικόνα. Μια εικόνα θεωρείται ως το άθροισμα συνιστωσών υψηλής και χαμηλής συχνότητας. Τα ψηφιακά φίλτρα χρησιμοποιούνται για να αφαιρεθούν οι υψηλές ή χαμηλές συνιστώσες (Εικόνα 5.7).

Ένα αργά μεταβαλλόμενο σήμα θεωρείται ως μορφή κύματος με μεγάλο μήκος κύματος ή με χαμηλή συχνότητα, και το φίλτρο που διαχωρίζει τη συχνότητα αυτή ονομάζεται φίλτρο «διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων» (low pass filter). Αντίθετα, η ταχέως μεταβαλλόμενη λεπτομέρεια της εικόνας θεωρείται ως μικρού μήκους κύμα ή υψηλής συχνότητας. Το φίλτρο που διαχωρίζει αυτή τη συνιστώσα ονομάζεται «φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων» (High pass filter).

Η χαμηλής συχνότητας πληροφόρηση επιτρέπει την αναγνώριση του υποβάθρου, το οποίο εμφανίζεται με τρόπο ώστε να λείπουν ή να έχουν υποβαθμιστεί οι λεπτομέρειες από την εικόνα, ενώ η υψηλή επιτρέπει την απομόνωση ή ενίσχυση της τοπικής λεπτομέρειας.

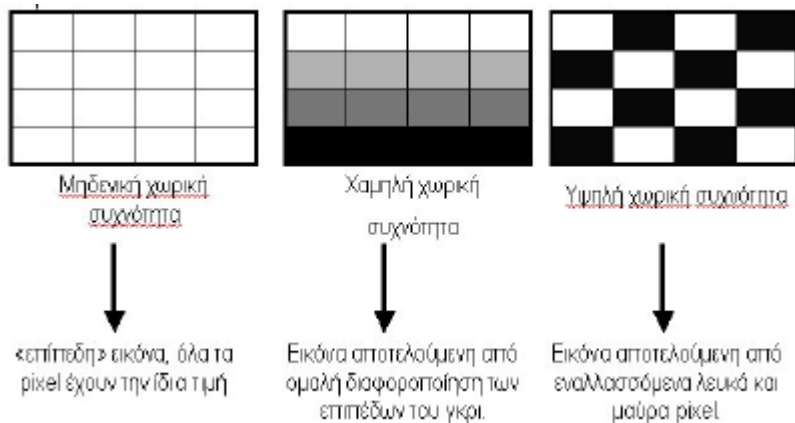
Τα φίλτρα χαμηλής διέλευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξάλειψη των θορύβων που συχνά παρατηρούνται στις εικόνες, καθώς επίσης είναι χρήσιμα και στις ταξινομημένες εικόνες. Τα υψηλής διέλευσης χρησιμοποιούνται συχνά για να αναδείξουν γεωμορφολογικά ή γεωλογικά χαρακτηριστικά. Με την τεχνική εφαρμογής φίλτρων εισάγεται μία εικόνα και υπολογίζονται τα εικονοστοιχεία της νέας εικόνας σε συνάρτηση με τα γειτονικά τους εικονοστοιχεία. Τα γειτονικά εικονοστοιχεία ορίζονται από πίνακες τιμών (kernel) (Εικόνα 5.8)

### Φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (Low pass filter)

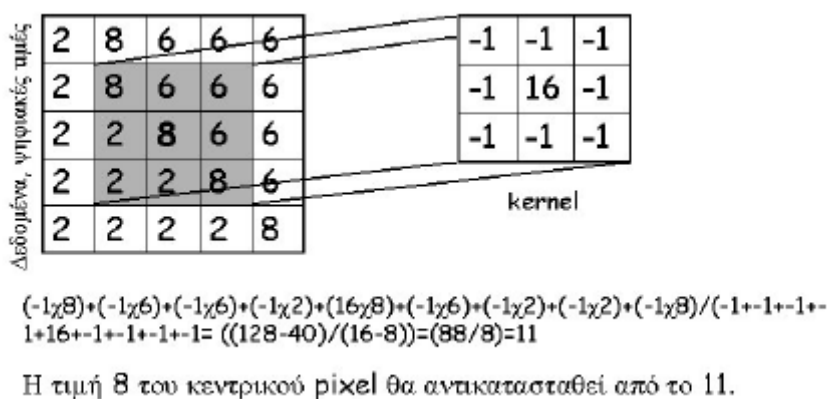
Οι πίνακες που χρησιμοποιούνται στη περίπτωση των φίλτρων χαμηλών συχνοτήτων, απλά εξομαλύνουν τις τιμές των εικονοστοιχείων, καθιστώντας αυτά ομοιογενή (η ομοιογένεια χαρακτηρίζει τη χαμηλή χωρική συχνότητα). Η τελική εικόνα είναι επίπεδη και έχει υποστεί εξομάλυνση χωρίς της ύπαρξη κάποιας λεπτομέρειας (Εικόνα 5.9). Μερικοί τύποι φίλτρων εξομάλυνσης είναι:

-Mean filter χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση ενός DEM.

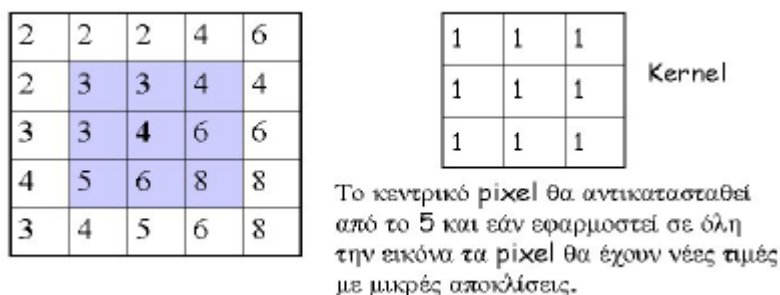
-Median filter κατάλληλο για την απομάκρυνση του θορύβου (Εικόνα 5.10).



Εικόνα 5.11 Είδη χωρικών συχνοτήτων.

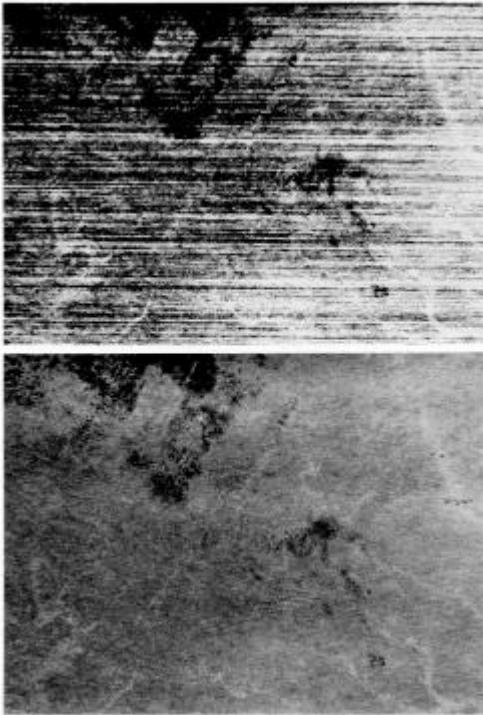


Εικόνα 5.12 Εφαρμογή του φίλτρου σε μία εικόνα.



Εικόνα 5.13 Φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων.



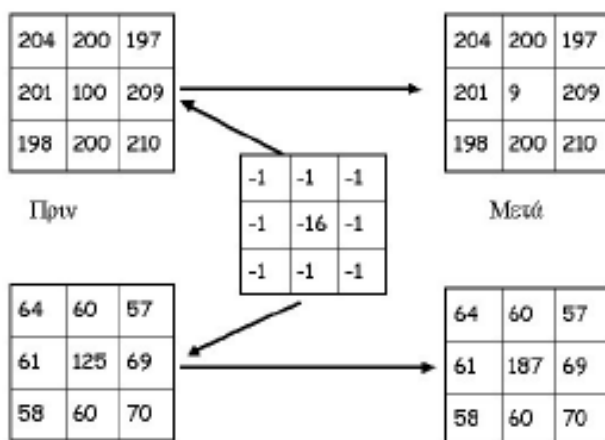


**Εικόνα 5.14** Θερμική υπέρυθρη εικόνα (που έχει ληφθεί κατά τις νυχτερινές ώρες) πριν και μετά την απομάκρυνση του θορύβου (Chavez, 1986).

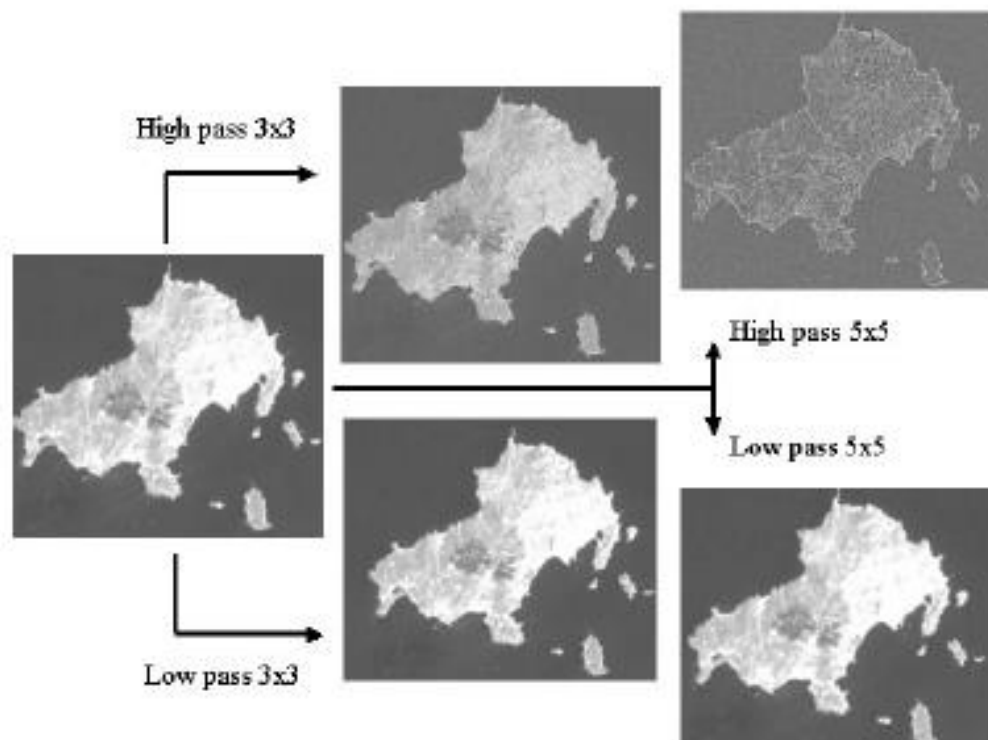
Φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (high pass filter)

Η εφαρμογή των φίλτρων διέλευσης υψηλών συχνοτήτων έχει ως σκοπό την αύξηση της χωρικής συχνότητας. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των ακμών επειδή έχουν την ιδιότητα να αναδεικνύουν τα όρια μεταξύ ομοιογενών ομάδων εικονοστοιχείων. Τα όρια αυτά πιθανόν να συμπίπτουν με το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής, όρια διαφορετικών χρήσεων γης, όρια γεωλογικών σχηματισμών, κ.λπ. (Εικόνες 5.11 και 5.12).

Στην περίπτωση όπου το εικονοστοιχείο περιβάλλεται από χαμηλότερες ή υψηλότερες τιμές, με την εφαρμογή του φίλτρου αποκτά ακόμη χαμηλότερη ή μεγαλύτερη τιμή. Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε αύξηση της χωρικής συχνότητας.



**Εικόνα 5.15** Εφαρμογή φίλτρου υψηλών συχνοτήτων.

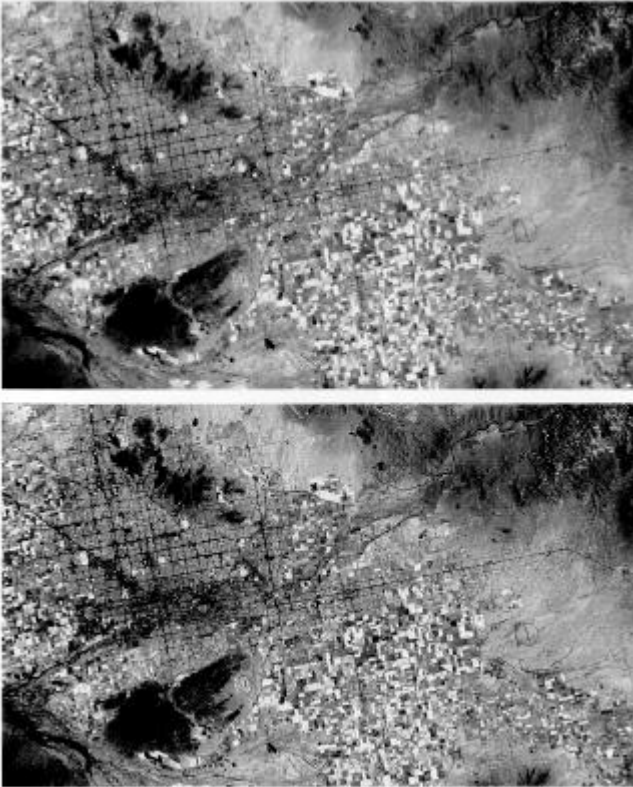


**Εικόνα 5.16** Εφαρμογή φίλτρων υψηλής και χαμηλής συχνότητας στην ίδια δορυφορική εικόνα και ανάδειξη της διαφοροποίησης των τελικών προϊόντων.

### Βελτίωση των ακμών (Edge Enhancement)

Ο αλγόριθμος που αφορά τη βελτίωση των ακμών σχεδιάστηκε για να τονίσει κάποιες απότομες αλλαγές που συχνά υπάρχουν μεταξύ δύο όμορων εικονοστοιχείων στο επίπεδο των DN. Αυτές οι αλλαγές αναπαριστούν υψηλές χωρικές συχνότητες που καλούνται «ακμές». Μια ακμή μπορεί να είναι ένα όριο που χωρίζει δυο διαφορετικά χαρακτηριστικά ή μια γραμμή που διαχωρίζει τα χαρακτηριστικά δύο πλευρών.

Η βελτίωση των ακμών έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία μιας απότομης, «οξείας» εικόνας, γιατί η υψηλή συχνότητα πληροφορίας «ενδυναμώνεται» (strengthen) από ένα υψηλής διέλευσης φίλτρο (high pass filter) (Εικόνα 5.13).



**Εικόνα 5.17** Εφαρμογή της μεθόδου βελτίωσης των ακμών (*edge enhancement*) της εικόνας του καναλιού 7 του *Landsat MSS*, στην περιοχή του *Phoenix* στην *Αριζόνα* (*Chavez et al., 1977*).

### III. Ανάλυση κύριων συνιστωσών

Η ευρεία δια-φασματική συσχέτιση είναι ένα υπαρκτό και ταυτόχρονα σημαντικό πρόβλημα που συχνά συναντάται κατά την ανάλυση των πολυφασματικών δεδομένων. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι οι εικόνες που δημιουργούνται από ψηφιακά δεδομένα διαφορετικών φασματικών καναλιών συχνά εμφανίζουν συσχετιζόμενη πληροφόρηση που δεν βοηθάει στην ερμηνεία τους.

Η μέθοδος των κύριων συνιστωσών (*principal components*) ή κανονικών συνιστωσών (*canonical components*) αποτελεί τεχνική που χρησιμοποιείται για να μετατρέψει δεδομένα με υψηλό βαθμό συσχέτισης σε νέα δεδομένα, μη συσχετισμένα. Κατά τη διαδικασία αυτή, βέβαια, διατηρείται το σύνολο σχεδόν της πληροφόρησης των αρχικών δεδομένων (*Lillesand & Kiefer, 2000*).

Για παράδειγμα, πολυφασματικές εικόνες ορατού (*VIS*)-κοντινού υπέρυθρου (*NIR*) σε περιοχές με έντονη την ύπαρξη της βλάστησης έχουν αρνητικούς συσχετισμούς και θετικούς συσχετισμούς μεταξύ των υποπεριοχών του ορατού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης είναι τέτοια ώστε όταν η ανάκλαση αυξάνει στο πράσινο τμήμα του φάσματος, στο ερυθρό μειώνεται, ενώ στο κοντινό υπέρυθρο αυξάνει επίσης. Η παρουσία συσχετισμών μεταξύ των ζωνών μιας πολυφασματικής εικόνας σημαίνει ότι υπάρχει επικάλυψη των δεδομένων, γεγονός που αντανακλάται στους συσχετισμούς αυτούς (*Reichert, 1989*).

Γενικά ισχύει ότι υπάρχει επανάληψη στην πληροφορία μεταξύ κυρίως των γειτονικών φασματικών ζωνών και ακριβώς αυτή την επανάληψη καλείται να μειώσει η ανάλυση κύριων συνιστωσών. Όταν αφαιρείται η επαναλαμβανόμενη πληροφορία, η πληροφορία παραμένει η ίδια, αλλά τα δεδομένα έχουν μικρότερο όγκο. Με βάση την τεχνική, οι *N* αρχικές εικόνες μετατρέπονται σε *N* αριθμό συνιστωσών-εικόνων. Αυτές οι εικόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία «σύνθετων εικόνων».

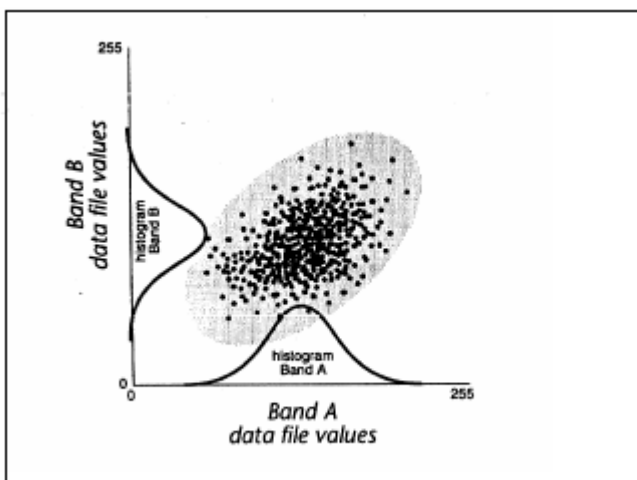
Ο μετασχηματισμός κύριων συνιστωσών είναι ένας γραμμικός μετασχηματισμός και η δομή του μπορεί να περιγραφεί ως μια γραμμική σύνθεση. Για παράδειγμα, παράγουμε νέες εικόνες (συνιστώσες) πολλαπλασιάζοντας κάθε αρχική φασματική ζώνη με έναν συντελεστή και προσθέτοντας τα αποτελέσματα, όπως δείχνει η ακόλουθη εξίσωση:

$$C = w_1B_1 + w_2B_2 + w_3B_3 + \dots + w_nB_n$$

Οι συντελεστές στους μετασχηματισμούς ονομάζονται «ιδιοδιανύσματα». Για κάθε αριθμό αρχικών εικόνων δημιουργείται ίδιος αριθμός εξισώσεων μετασχηματισμού, επομένως δημιουργείται ίδιος αριθμός εικόνων-συνιστωσών. Η Εικόνα 5.14 εξηγεί γραφικά τις σχέσεις (βαθμός συσχέτισης) ανάμεσα στα δεδομένα των τιμών δύο φασματικών καναλιών. Εάν οι τιμές των εικονοστοιχείων και των δύο καναλιών ακολουθούν τη συνάρτηση της κανονικής κατανομής, τότε το αποτέλεσμα του σχήματος θα είναι μία έλλειψη.

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη δημιουργία των συνιστωσών περιγράφεται στη συνέχεια:

Για την εκτέλεση του μετασχηματισμού των κύριων συνιστωσών, οι άξονες του φασματικού χώρου περιστρέφονται, αλλάζοντας τις συντεταγμένες του κάθε εικονοστοιχείο στον φασματικό χώρο, καθώς επίσης και τις τιμές των δεδομένων. Αυτό γίνεται εισάγοντας n-ιστογράμματα των n-εικόνων στον αλγόριθμο της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών. Αυτός ο αλγόριθμος υπολογίζει τις n-κύριες συνιστώσες, οι οποίες είναι ουσιαστικά ορθογώνια άνυσματα σε έναν χώρο n-διαστάσεων, που οριοθετείται στις διευθύνσεις της μέγιστης διακύμανσης. Τα εξαγόμενα αυτού του βήματος είναι οι προβολές των συντελεστών των n-καναλιών στις τελικές n-κύριες συνιστώσες. Οι καινούργιοι άξονες είναι παράλληλοι με τους άξονες της έλλειψης (Lillesand & Kiefer, 2000).

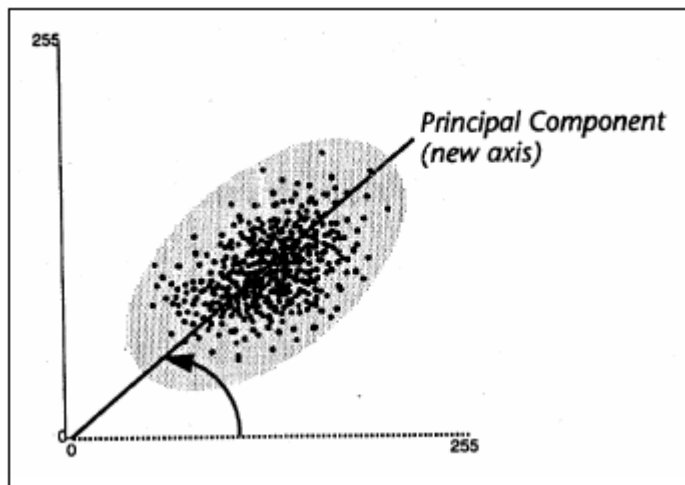


**Εικόνα 5.18** Το διάγραμμα κατανομής των τιμών δύο φασματικών καναλιών A και B (Πηγή: ERDAS).

Σχετικά με την πρώτη κύρια συνιστώσα, υπολογίζονται αλγεβρικά το μήκος και ο προσανατολισμός της πιο πλατιάς τομής της έλλειψης. Η τομή που ανταποκρίνεται στον μεγαλύτερο άξονα της έλλειψης ονομάζεται πρώτη κύρια συνιστώσα των δεδομένων. Η διεύθυνση της πρώτης κύριας συνιστώσας είναι το πρώτο ιδιοδιάνυσμα, και το μήκος της η πρώτη ιδιοτιμή (Taylor, 1979). Δηλαδή, η πρώτη κύρια συνιστώσα είναι ένα άνυσμα που ακολουθεί τη διεύθυνση της μέγιστης διακύμανσης των εικονοστοιχείων της εικόνας, περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη συνιστώσα (Εικόνα 5.15).

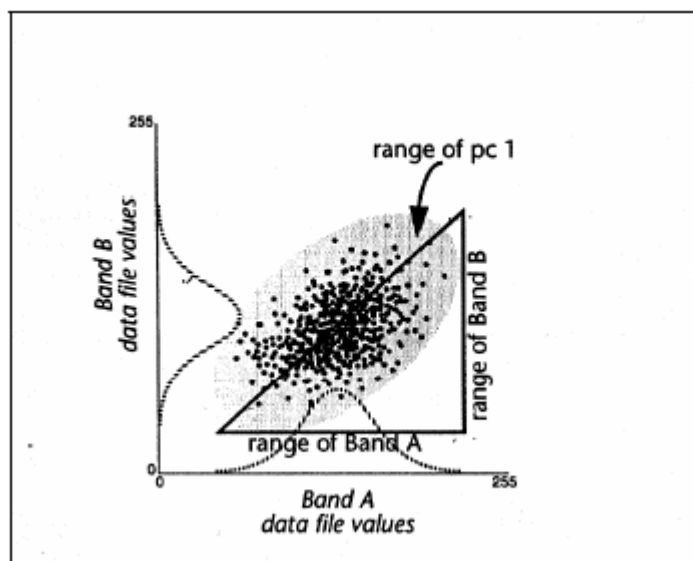
Από την πρώτη κύρια συνιστώσα καθορίζεται ένας καινούργιος άξονας του φασματικού χώρου. Στα σημεία του διαγράμματος τώρα δίνονται καινούργιες συντεταγμένες που ανταποκρίνονται στους καινούργιους άξονες, καθώς οι συντεταγμένες των σημείων αποτελούν τις τιμές των δεδομένων. Μέσα από αυτή τη διαδικασία προκύπτουν καινούργιες τιμές οι οποίες αποθηκεύονται σ' ένα καινούργιο αρχείο δεδομένων του καναλιού της πρώτης κύριας συνιστώσας.

Η πρώτη κύρια συνιστώσα δείχνει τον προσανατολισμό και το μήκος της μεγαλύτερης τομής της έλλειψης, όπως ένας άξονας του φασματικού χώρου μετρά τη μεγαλύτερη μεταβολή ανάμεσα στα δεδομένα. Στην Εικόνα 5.16 μπορούμε εύκολα να δούμε ότι η πρώτη ιδιοτιμή θα είναι πάντα μεγαλύτερη από την κύμανση των εισαγόμενων καναλιών (input bands), όπως ακριβώς η υποτείνουσα ενός ορθογώνιου τριγώνου πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερη από τις άλλες δύο πλευρές.



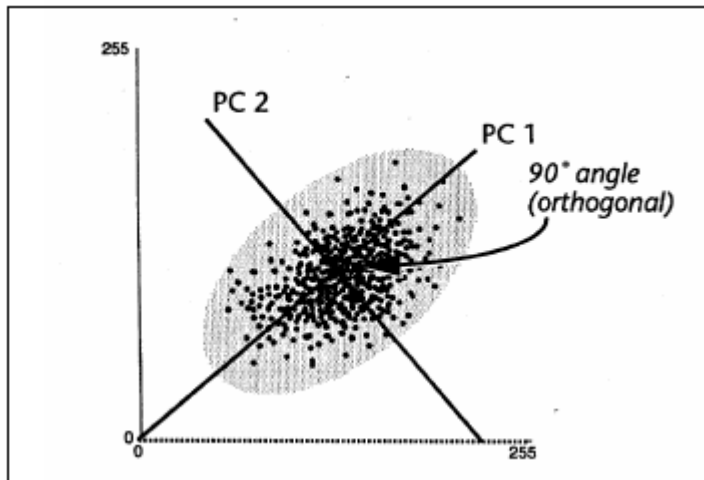
Εικόνα 5.19 Η πρώτη κύρια συνιστώσα (ERDAS, 1995).

Η δεύτερη κύρια συνιστώσα είναι η πιο πλατιά τομή της έλλειψης που είναι κάθετη στην πρώτη κύρια συνιστώσα. Έτσι περιγράφει το μεγαλύτερο μέρος της μεταβολής των δεδομένων που δεν έχουν ήδη περιγραφεί από την πρώτη κύρια συνιστώσα (Taylor, 1979). Στην ανάλυση σε δύο άξονες, η δεύτερη κύρια συνιστώσα ανταποκρίνεται στον μικρότερο άξονα της έλλειψης.



Εικόνα 5.20 Κατανομή των τιμών των δεδομένων της πρώτης κύριας συνιστώσας (Πηγή:ERDAS).

Δηλαδή η δεύτερη κύρια συνιστώσα είναι ένα άνυσμα που ευθυγραμμίζεται κατά μήκος της μέγιστης απομένουσας διακύμανσης των δεδομένων (Εικόνα 5.17). Για αυτόν τον λόγο απομακρύνει το μέγιστο ποσό διακύμανσης των δεδομένων που απομένουν μετά την εφαρμογή της πρώτης συνιστώσας.



Εικόνα 5.21 Δεύτερη κύρια συνιστώσα (ERDAS, 1995).

Κάθε επόμενη κύρια συνιστώσα είναι ορθογώνια σε σχέση με τις άλλες, απομακρύνοντας το μέγιστο ποσό της διακύμανσης που έχει απομείνει (η διακύμανση γίνεται μικρότερη όσο η τάξη των κύριων συνιστωσών αυξάνει). Η συνιστώσα  $n$  περιλαμβάνει όλη την απομείνουσα διακύμανση και διαχωρίζει τα πιο ξεχωριστά εικονοστοιχεία που υπάρχουν στην εικόνα (π.χ. θόρυβος). Όλες οι κύριες συνιστώσες μετρούν στο 100% τη διακύμανση, ωστόσο οι τρεις πρώτες συνήθως έχουν την πλειοψηφία (50-95%).

Η δημιουργία των εικόνων συνιστωσών συνοδεύεται από στατιστικά δεδομένα χρήσιμα στην κατανόηση και ερμηνεία τους, όπως τα εξής:

α) Ο πίνακας συσχέτισης (correlation matrix): έχει ιδιαίτερη σημασία γιατί δείχνει τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ των αρχικών εικόνων και επομένως εμφανίζει τον βαθμό επαναληψιμότητας της πληροφορίας.

β) Οι ιδιοτιμές (eigenvalues): μαζί με το ποσοστό μεταβλητότητας προσδιορίζουν το ποσό της πληροφορίας για κάθε συνιστώσα, με το ενδιαφέρον να επικεντρώνεται κυρίως στα ποσοστά της πληροφορίας ανά εικόνα-συνιστώσα.

γ) Ο πίνακας ιδιοδιανυσμάτων (eigenvectors): εκφράζουν τον βαθμό συσχετισμού μεταξύ κάθε συνιστώσας και των αρχικών εικόνων. Μαζί με τις ιδιοτιμές αποτελούν τα σημαντικότερα δεδομένα.

Το πλεονέκτημα που προσφέρει η δημιουργία των κύριων συνιστωσών επικεντρώνεται στο ότι η περισσότερη και πιο αξιοποιήσιμη πληροφορία βρίσκεται στα πρώτα δύο ή τρία κανάλια, ενώ τα τελευταία έχουν από ελάχιστη έως μηδενική. Αυτή η συμπίεση της πληροφορίας έχει σαν αποτέλεσμα τη δραστική μείωση του αριθμού των καναλιών από 7 σε 2 ή 3, ανάλογα με τις απαιτήσεις του μελετητή. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται τόσο τη μείωση του χρόνου επεξεργασίας όσο και του διατιθέμενου χώρου αποθήκευσης των δεδομένων. Επίσης, η δυνατότητα ανάκτησης της πληροφορίας από τα δεδομένα των καναλιών των κύριων συνιστωσών είναι τόσο καλή όσο και από τα αρχικά δεδομένα της εικόνας (Jensen, 1986). Η ανάλυση των κύριων συνιστωσών είναι χρήσιμη διότι:

-Δεν απαιτείται εκ των προτέρων πληροφόρηση σχετικά με το περιεχόμενο της σκηνής της εικόνας.

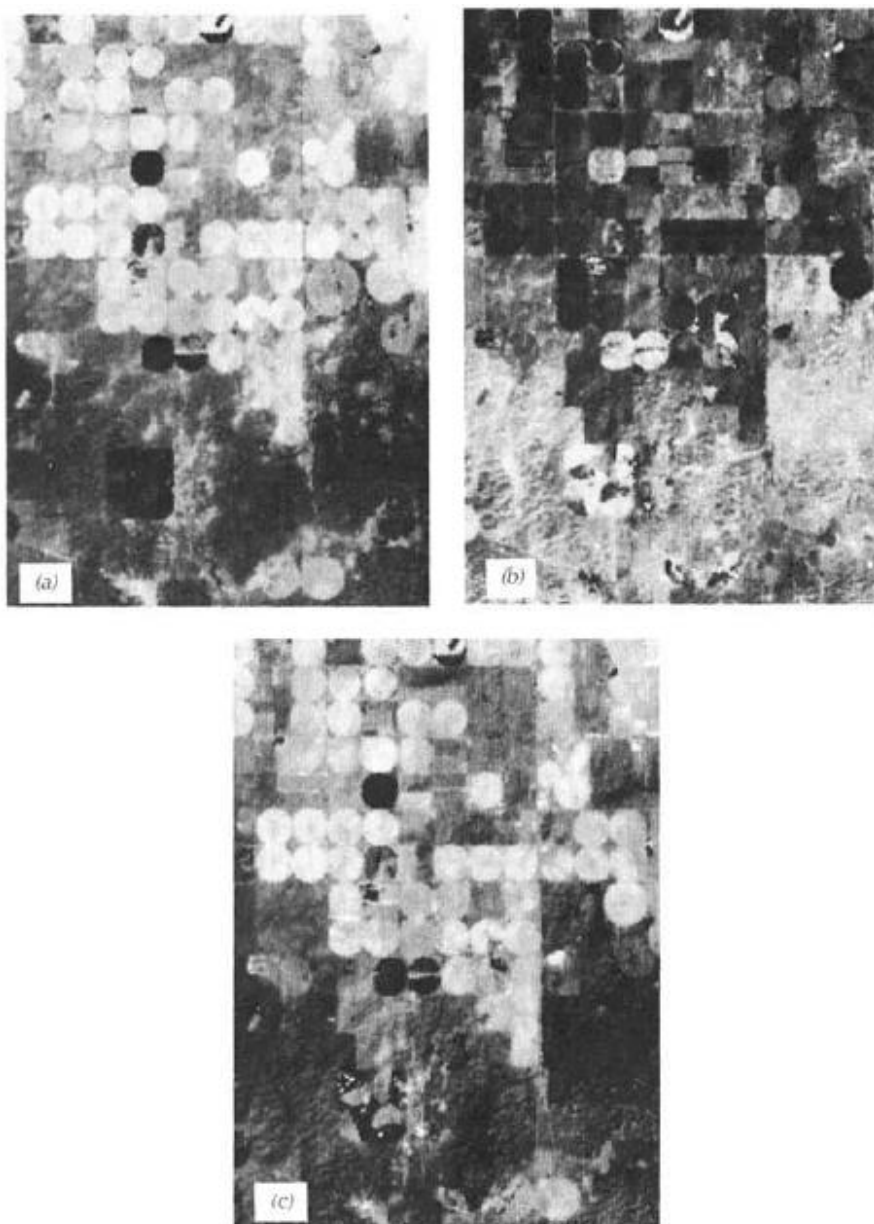
-Η περισσότερη πληροφόρηση ενός συνόλου εικόνων (καναλιών) μπορεί να εμπεριέχεται στις πρώτες κύριες συνιστώσες, για αυτό ακριβώς η τεχνική μειώνει τον αριθμό των καναλιών με τα οποία πρέπει να εργαστούμε.

-Η υψηλή συσχέτιση ανάμεσα στα κανάλια μειώνεται.

-Η χρήση φασματικών υπογραφών στον καθορισμό του μετασχηματισμού των κύριων συνιστωσών επιτρέπει την εφαρμογή των εξισώσεων μετασχηματισμού που καθορίζονται από το σύνολο των καναλιών της εικόνας.

#### Μετασχηματισμός Tasseled Cap (Kauth)

Είναι μια μέθοδος μετασχηματισμού δεδομένων που αναπτύχθηκε για την παρακολούθηση της βλάστησης. Οι Kauth και Thomas (1976) καθιέρωσαν έναν γραμμικό μετασχηματισμό των τεσσάρων καναλιών του δορυφόρου Landsat MSS ώστε να εξάγουν συνιστώσες χρήσιμες για τη χαρτογράφηση της βλάστησης. Η μέθοδος tasseled cap χρησιμοποιεί τα δεδομένα των καναλιών του δορυφόρου με τέτοιο τρόπο, όπου η πλειοψηφία της πληροφορίας της εικόνας συγκεντρώνεται στις πρώτες τρεις συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα ονομάζεται φωτεινότητα (brightness) και αποτελείται από το σταθμισμένο σύνολο της αντανάκλασης όλων των φασματικών καναλιών και περιέχει το μεγαλύτερο ποσοστό της πληροφορίας στην εικόνα.



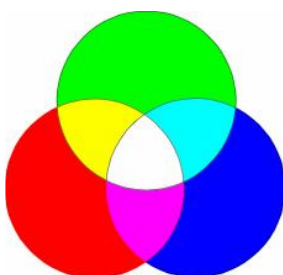
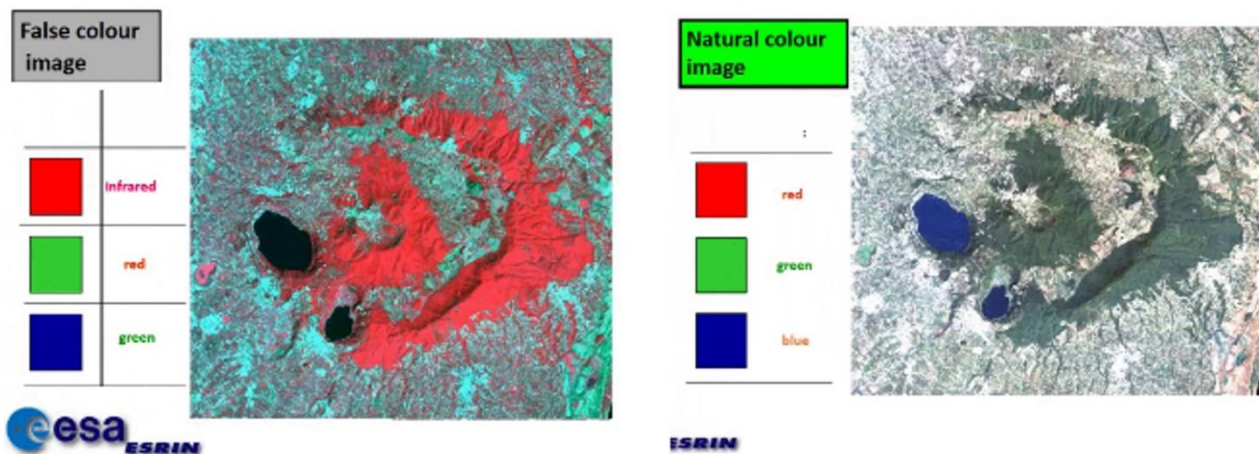
**Εικόνα 5.22** Μετασχηματισμός Tasseled Cap σε δεδομένα Landsat TM της κεντρικής και βόρειας Νεμπράσκα. Οι τρεις συνιστώσες που εμφανίζονται εδώ απεικονίζουν: (a) πρασινότητα, (b) φωτεινότητα, (c) υγρασία. (Lillesand et al, 2003)

Σχετίζεται με γυμνό ή εν μέρει καλυμμένο έδαφος και ανθρώπινη δραστηριότητα όπως σκυρόδεμα και άσφαλτο. Η δεύτερη συνιστώσα ορίζεται ως πρασινότητα (greenness) και αποτελεί την αντίθεση μεταξύ των καναλιών του κοντινού υπέρυθρου (NI) και του ορατού και αποτυπώνει την έντονη συσχέτιση με την ένταση της φωτοσυνθετικά ενεργής βλάστησης στην εικόνα (Lillesand et al, 2003). Οι Crist και Cicone (1984) ανέπτυξαν την επόμενη συνιστώσα που ερμηνεύεται ως δείκτης υγρασίας (wetness) και σχετίζεται με την υγρασία του εδάφους και το νερό. Τα πρώτα τρία κανάλια tasseled cap συνιστούν περίπου το 97% της χρήσιμης πληροφορίας της εικόνας. Όπως και με την μέθοδο Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (Principle Components Analysis), οι επόμενες συνιστώσες συνήθως αποτελούνται από θόρυβο (noise) και ατμοσφαιρικές επιρροές. Η Εικόνα 5.18 απεικονίζει την εφαρμογή της μεθόδου tasseled cap σε δεδομένα Landsat TM της κεντρικής και βόρειας Νεμπράσκα. Το βόρειο μέρος της εικόνας κατέχεται από πλήθος κυκλικών καλλιεργειών καλαμποκιού που ποτίζονταν καθ' όλη τη διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ στο νότιο κυριαρχούν λιβάδια. Η μεγαλύτερη φωτεινότητα αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες τιμές για την κάθε συνιστώσα (Lillesand et al, 2003).

#### IV. Συνδυασμός φασματικών ζωνών – Σύνθετες ψευδέγχρωμες εικόνες (FCC)

Ο συνδυασμός διαφόρων φασματικών καναλιών οδηγεί στη δημιουργία πολυφασματικών εικόνων με βελτιωμένη ευαισθησία στη φασματική ανάκλαση ή χρωματική διαφοροποίηση μεταξύ επιφανειακών αντικειμένων που συχνά είναι δύσκολο να ανιχνευτούν στα επιμέρους φασματικά κανάλια.

Η ανθρώπινη αντίληψη για τα χρώματα προέρχεται από το σχετικό ποσό ακτινοβολίας, στο ερυθρό, πράσινο και μπλε τμήμα, που μετρούνται από το αισθητήριο όργανο, το μάτι. Το ερυθρό, το πράσινο και το μπλε μπορούν να προστεθούν και να παράγουν μεγάλο αριθμό χρωμάτων. Τα τρία αυτά χρώματα ονομάζονται κύρια χρώματα. Ο τρόπος εμφάνισης εικόνων, στηριζόμενος στη λογική των κύριων αυτών χρωμάτων, ονομάζεται σύστημα RGB (Red Green Blue) (Εικόνα 5.19).



**Εικόνα 5.23** Προσθετικό Μοντέλο Χρωμάτων. Η πρόσθεση χρωμάτων συμβαίνει όταν αναμιζουμε ένα βασικό χρώμα με κάποιο άλλο. Για παράδειγμα, εάν εστιάσουμε στο ίδιο σημείο (λευκός τοίχος) μια δέσμη πράσινου φωτός και μια δέσμη κόκκινου, αυτό που θα προκύψει είναι μια απόχρωση του κίτρινου χρώματος, και εάν προσθέσουμε και μια δέσμη μπλε



φωτός, τότε το σημείο εκείνο θα έχει λευκό χρώμα. Ο τρόπος λειτουργίας των υπολογιστών στη δημιουργία των χρωμάτων στην οθόνη είναι ακριβώς ο ίδιος (CCRS, 1998).

Σε μια πολυφασματική, έγχρωμη δορυφορική εικόνα, κάθε εικονοστοιχείο λαμβάνει ένα χρώμα από τη σύνθεση των τριών βασικών χρωμάτων ερυθρό (R), πράσινο (G) και μπλε (B). Η ένταση κάθε χρώματος κυμαίνεται από 0 έως 255. Τα διαστημικά συστήματα συλλέγουν και αποθηκεύουν την πληροφορία από ένα περιορισμένο εύρος μήκους κύματος το οποίο καλείται φασματικό κανάλι ή φασματική ζώνη. Υπάρχει η δυνατότητα ενσωμάτωσης και εμφάνισης της πληροφορίας ενός αριθμού φασματικών καναλιών (συνήθως τριών) συνδεδεμένα με τα τρία βασικά χρώματα, ερυθρό (R), πράσινο (G), μπλε (B). Η πληροφορία για κάθε κανάλι εμφανίζεται με ένα από τα βασικά χρώματα και εξαρτάται από τη σχετική φωτεινότητα (ψηφιακή τιμή) του κάθε εικονοστοιχείου. Έτσι γίνεται η σύνθεση των βασικών χρωμάτων σε διαφορετικές αναλογίες δημιουργώντας διαφορετικά τελικά χρώματα (Εικόνα 5.20).



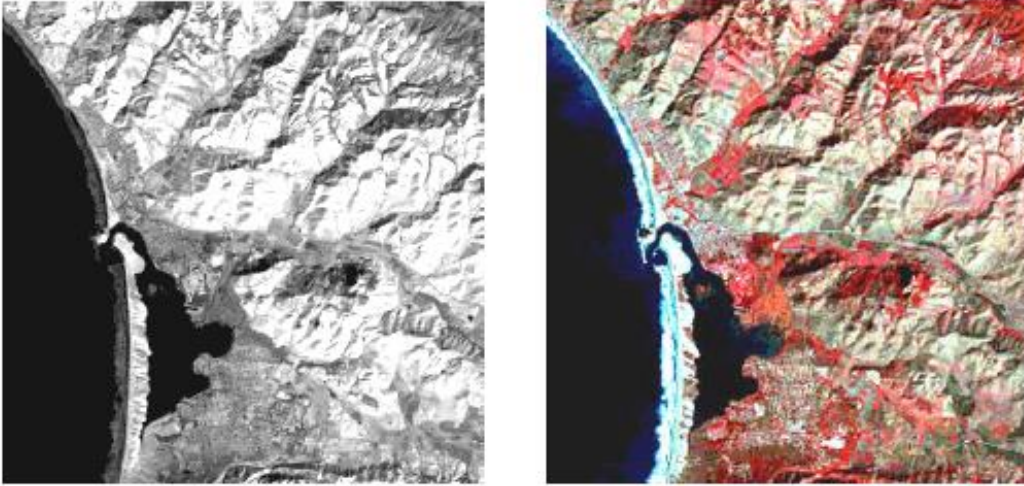
**Εικόνα 5.24** Συνδυασμός των τριών βασικών χρωμάτων.

Η επιλογή των φασματικών καναλιών γίνεται με βάση τον σκοπό για τον οποίο απαιτούνται πληροφορίες.

Η αύξηση της ευκρίνειας λαμβάνει χώρα για δύο βασικούς λόγους, διότι:

α) Η φασματική πληροφόρηση λαμβάνεται από τρεις διαφορετικές φασματικές εικόνες, πράγμα που ουσιαστικά προσθέτει τόσο στην πληροφόρηση όσο και στην καλύτερη χρωματική διαβάθμιση της εικόνας (3 x 256 χρώματα).

β) Επιτρέπει την καλύτερη ανάλυση, αφού το ανθρώπινο μάτι είναι πιο ευαίσθητο στις χρωματικές αλλαγές (σε σχέση με τις αποχρώσεις του γκρι) (Εικόνα 5.21).



**Εικόνα 5.25** Εικόνα που δείχνει το φασματικό κανάλι 3 του θεματικού χαρτογράφου του δορυφόρου Landsat, της περιοχής Morro Bay στην Καλιφόρνια, και την ψευδέγχρωμη εικόνα που προκύπτει από τον συνδυασμό των φασματικών καναλιών 4, 3, 2 ως ερυθρό (red), πράσινο (green), μπλε (blue).

## V. Αριθμητικές πράξεις με εικόνες – Λόγοι φασματικών καναλιών

Οι αριθμητικές πράξεις της πρόσθεσης, αφαίρεσης, πολλαπλασιασμού και διαίρεσης στις τιμές του επιπέδου του γκρι (DN, ψηφιακή τιμή για κάθε εικονοστοιχείο) των εικονοστοιχείων, από δύο φασματικές ζώνες μίας εικόνας μπορούν να σχηματίσουν μια νέα εικόνα.

Από όλες τις πράξεις, η πλέον χρήσιμη είναι η διαίρεση. Η δημιουργία λόγου μεταξύ δύο φασματικών ζωνών μιας περιοχής είναι η πλέον συχνή εφαρμογή. Η διαίρεση φασματικών καναλιών είναι μια μέθοδος η οποία δημιουργεί πολυφασματικές εικόνες που βελτιώνουν λεπτές φασματικές ανακλαστικότητες ή χρωματικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιφανειακών υλικών, που συχνά είναι δύσκολο να ανιχνευτούν στις αρχικές εικόνες (για παράδειγμα, σε ένα απλό φασματικό κανάλι ή στις σύνθετες ψευδέγχρωμες εικόνες). Η διαίρεση των καναλιών τονίζει τις χρωματικές διαφοροποιήσεις, αφού απομακρύνει τη φωτεινότητα πρώτης τάξης, η οποία οφείλεται στην τοπογραφία (π.χ. προσήλια ή σκιασμένα πρανή). Έτσι, η διαίρεση επιδρά ομαλοποιώντας τα φασματικά δεδομένα, απομακρύνοντας τη φωτεινότητα της αντίθεσης και τονίζοντας τα περιεχόμενα χρώματα των δεδομένων.

Η εφαρμογή λόγου ολοκληρώνεται με τη διαίρεση των ψηφιακών τιμών (Digital numbers-DNs) των δεδομένων του ενός φασματικού καναλιού με τις φασματικές τιμές ενός δεύτερου για κάθε χωρικά καταγεγραμμένο (registered) ζευγάρι εικονοστοιχείων.

Τα πηλίκα (quotients) έπειτα μετατρέπονται σε ακέραιους αριθμούς 8-bit, χρησιμοποιώντας πολλαπλασιασμένους παράγοντες (normalization factors), για παράδειγμα:

α)  $DN_{40}/DN_{50} = 0,80$  , (π.χ. ο λόγος TM4/TM5 των καναλιών του Landsat).

β) (τιμή του λόγου)×(παράγοντα ομαλοποίησης\*) = Νέα ψηφιακή τιμή (DN) μεταξύ 0-255

\*συνήθως ο παράγοντας αυτός ισούται με την τιμή 100.

Η κατανομή της καινούργιας ψηφιακής τιμής επεκτείνεται με εφαρμογή της μεθόδου της βελτίωσης της αντίθεσης (contrast stretch), πριν από την τελική ερμηνεία της εικόνας. Η ανακατανομή των ψηφιακών τιμών είναι συνήθως γραμμική (linear stretch) ώστε να διατηρούνται οι αρχικές σχέσεις των λόγων. Οι ακραίες διαβαθμίσεις σε μία εικόνα λόγου αναπαριστούν τις μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις φασματικής ανάκλασης (Avery & Berlin, 1992).

Ο αριθμός  $n$  των πιθανών συνδυασμών λόγων για έναν πολυφασματικό σαρωτή με  $P$  φασματικά κανάλια δίνεται από τον τύπο:

$$n = P (P-1)$$

Έτσι, για παράδειγμα, για τα έξι φασματικά κανάλια (εκτός του θερμικού) του θεματικού χαρτογράφου (TM) του Landsat 5, υπάρχουν 30 διαφορετικοί πιθανοί συνδυασμοί λόγων, 15 κανονικοί και 15 αντίστροφοι.

Μερικοί από τους λόγους αυτούς, με βάση και τη γενική χρήση τους, είναι:

(α) Οι λόγοι 3/1 και 3/2, που είναι σημαντικοί για την περιγραφή πετρωμάτων πλούσιων σε οξείδια και υπεροξείδια του σιδήρου.

(β) Ο λόγος 5/7, που είναι χρήσιμος για την εξακρίβωση των αργιλικών πετρωμάτων, διότι αυτά παρουσιάζουν μεγάλη απορρόφηση στο κανάλι 7 (2,2 $\mu$ m) και μεγάλη ανάκλαση στο κανάλι 5 (1,6 $\mu$ m) του Landsat.

(γ) Ο λόγος 4/3, που είναι ιδανικός στο να σκιαγραφεί την κατανομή της βλάστησης. Γενικά όσο πιο ανοιχτοί οι τόνοι στην εικόνα τόσο εντονότερη είναι η παρουσία της βλάστησης.

(δ) Ο λόγος 5/2, που είναι χρήσιμος για τη διάκριση διαφορετικών τύπων βλάστησης. Γενικά οι ανοιχτοί τόνοι σε μια εικόνα εκφράζουν την έντονη παρουσία της βλάστησης.

(ε) Ο λόγος 3/7, που είναι κατάλληλος για την παρατήρηση διαφοροποιήσεων μεταξύ διαύγειας-θολερότητας των υδάτων.

Πολλές φορές έχει παρατηρηθεί ότι οι πληροφορίες της φωταύγειας (albedo) των διαφόρων αντικειμένων της επιφάνειας χάνονται μετά την επεξεργασία των λόγων. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποκατασταθεί με τον χρωματικό συνδυασμό ενός απλού φασματικού καναλιού με δύο εικόνες λόγων. Το αποτέλεσμα αυτού του συνδυασμού ονομάζεται υβριδική ψευδέγχρωμη εικόνα, η οποία βελτιώνει τις ιδιότητες της φωταύγειας αλλά και τις χρωματικές διαφοροποιήσεις της εικόνας (Chavez et al., 1977).

### **Φασματικοί λόγοι για παρατήρηση της βλάστησης**

Για τη μεθοδικότερη παρατήρηση της βλάστησης αναπτύχθηκαν κατά καιρούς διάφορες μορφές συνδυασμών λόγων, χρησιμοποιώντας μήκη κύματος της περιοχής 0,7-1,1 $\mu$ m του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με μήκη κύματος της περιοχής 0,6-0,7 $\mu$ m. Συγκεκριμένα, έγινε προσπάθεια εκτίμησης της βιομάζας ή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας μιας καλλιέργειας, η διάκριση μεταξύ υγιούς και μη βλάστησης, της παραγωγικότητας, κ.ά. (Tucker 1979· Jackson 1983· Philipson & Teng 1988· Teng 1990).

Αυτοί οι συνδυασμοί είναι γνωστοί ως δείκτες βλάστησης (Vegetation Indices) και έχουν σαν σκοπό τον περιορισμό των χρονοβόρων και πολυδάπανων εργασιών υπαίθρου, συνεκτιμώντας τις τεράστιες ποσότητες των δορυφορικών δεδομένων.

Οι πιο διαδεδομένοι δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιούνται διεθνώς είναι:

α) Ο πλέον διαδεδομένος δείκτης βλάστησης που χρησιμοποιείται, είναι ο Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένων Διαφορών (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI), ο οποίος έχει τη δυνατότητα να ελαχιστοποιεί την επίδραση της τοπογραφίας. Επιπλέον η κλίμακα των τιμών έχει την επιθυμητή μορφή -1 έως 1, με το 0 να είναι το όριο στην απουσία της βλάστησης. Ο δείκτης NDVI ορίζεται από την ακόλουθη γενική εξίσωση:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

όπου NIR=φασματικό κανάλι του κοντινού υπέρυθρου και

RED= φασματικό κανάλι στην περιοχή του ερυθρού του ορατού.

Το άθροισμα στον παρονομαστή αναπληρώνει κυρίως αλλαγές που υπάρχουν στις συνθήκες φωτισμού, στις επιφανειακές κλίσεις και στον προσανατολισμό τους.

Το αποτέλεσμα αυτού του λόγου είναι μια νέα ασπρόμαυρη εικόνα, κάθε εικονοστοιχείο της οποίας παριστάνει τη διαίρεση της φωτεινότητας των εικονοστοιχείων των δύο αρχικών εικόνων. Έτσι, οι περιοχές που καλύπτονται από βλάστηση αποδίδονται με ανοιχτότερες αποχρώσεις του γκρι έως και λευκές, λόγω της υψηλής ανάκλασης που αυτή παρουσιάζει στο κοντινό υπέρυθρο και της αντίστοιχης χαμηλής στο ορατό, ενώ οι υδάτινες μάζες εμφανίζονται με μαύρο χρώμα.

β) Ο λόγος δείκτης βλάστησης (Ratio VI) δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{Ratio} = \text{NIR/RED}$$

Είναι η απλούστερη μορφή και στηρίζεται στην αντίθεση μεταξύ των ζωνών του ερυθρού και κοντινού υπέρυθρου για τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν σε βλάστηση, με υψηλές τιμές για τον δείκτη από τον συνδυασμό χαμηλής τιμής ανάκλασης για το ερυθρό και υψηλής για το κοντινό υπέρυθρο.

Άλλοι λόγοι που χρησιμοποιούνται επίσης είναι ο TVI, ο OSAVI, ο PVI και άλλοι (Sabins 1997, Lillesand & Kiefer 2000).

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο δέκτη είναι:

A) Landsat MSS = Φασματικά κανάλια 5 (0,6-0,7μm), 6 (0,7-0,8μm) και 7 (0,8-1,1μm), κανάλια 2, 3, 4 αντίστοιχα για τον Landsat 4 και 5.

B) Landsat TM = Φασματικά κανάλια 3 (0,63-0,69μm) και 4 (0,76-0,90μm).

Γ) SPOT HRV πολυφασματικό = Φασματικά κανάλια 2 (0,61-0,68μm) και 3 (0,79-0,89μm).

Δ) NOAA AVHRR = Φασματικά κανάλια 1 (0,58-0,68μm) και 2 (0,72-1,0μm).

## VI. Συνέργεια-συγχώνευση δορυφορικών δεδομένων

Τα τελευταία χρόνια ο αυξανόμενος αριθμός δορυφόρων που έχει μπει σε τροχιά παρέχει πληθώρα δεδομένων τα οποία καλύπτουν διαφορετικά τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και έχουν διαφορετικές χωρικές, χρονικές και φασματικές αναλύσεις. Η αφθονία αυτών των δεδομένων, σε συνδυασμό με την αδυναμία τους να μπορούν να δώσουν λύσεις σε πολλές εφαρμογές, οδήγησαν τον επιστημονικό κόσμο στην αναζήτηση καινούργιων τεχνικών για καλύτερη εκμετάλλευση των δορυφορικών δεδομένων.

Η συγχώνευση ή ενοποίηση ή συνέργεια των δεδομένων (fusion ή merge) έδωσε νέα ώθηση, την τελευταία δεκαετία, στην καλύτερη αξιοποίηση της πληθώρας των δεδομένων που παρέμεναν ανεκμετάλλευτα σε πολλές εφαρμογές. Τα τελικά προϊόντα παρέχουν πολλές φορές αυξημένες ικανότητες ερμηνείας και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για τον λόγο ότι συνδυάζονται δεδομένα με διαφορετικά χαρακτηριστικά (Pohl & van Genderen, 1998).

Ο σκοπός της συγχώνευσης είναι ο συνδυασμός ανάμοιων και συμπληρωματικών δεδομένων και η δημιουργία ενός νέου προϊόντος το οποίο θα περιλαμβάνει όσο το δυνατόν περισσότερα από τα χαρακτηριστικά και τις πληροφορίες των επιμέρους εικόνων που συνδυάστηκαν, αναδεικνύοντας έτσι το σύνολο των πλεονεκτημάτων των πρωτογενών δεδομένων και βελτιώνοντας την ποιότητα της πληροφορίας.

Βέβαια, πολλές φορές το τελικό προϊόν δεν δύναται να παρέχει τα επιθυμητά αποτελέσματα και για αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητη η εκ των προτέρων καλή γνώση των αρχικών δεδομένων, του στόχου της εφαρμογής και της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση της συγχώνευσης.

Η συγχώνευση μπορεί να γίνει σε διαφορετικούς τύπους δεδομένων:

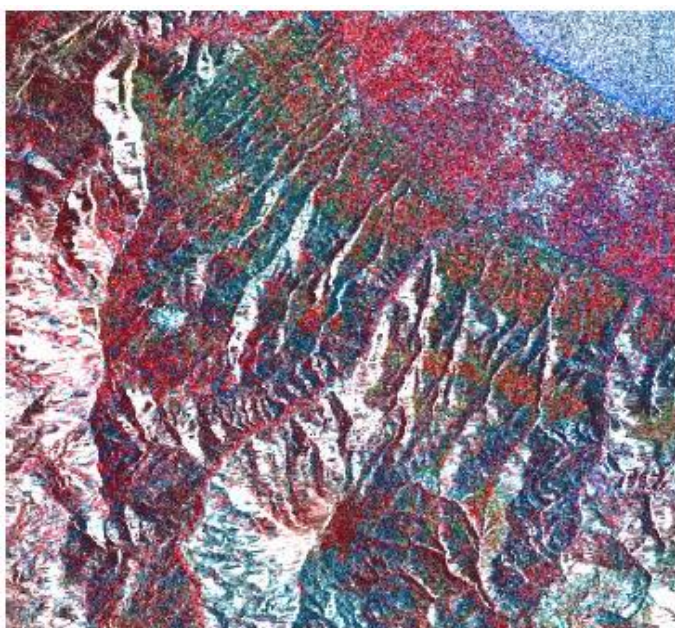
α) Από έναν δέκτη (εκμετάλλευση της χρονικής ανάλυσης), π.χ. διαχρονικές εικόνες SAR για την ανίχνευση αλλαγών των χρήσεων γης (Weydahl, 1993).

β) από έναν δέκτη (βελτίωση της χωρικής ανάλυσης), π.χ. παγχρωματικό/πολυφασματικό SPOT (Cliché et al., 1985).

γ) από δύο δέκτες (εκμετάλλευση της διαφορετικής φύσης των δεδομένων), π.χ. πολυφασματικό SPOT/εικόνα SAR (Gatsis et al., 2001) (Εικόνα 5.22).

δ) από δύο δέκτες (βελτίωση της χωρικής ανάλυσης), π.χ. παγχρωματικό SPOT/πολυφασματικό LANDSAT (Chavez et al., 1991).

ε) από δύο δέκτες (εκμετάλλευση της χρονικής ανάλυσης), π.χ. διαχρονικές εικόνες SAR (ERS-1/ERS-2) για την ανίχνευση αλλαγών των χρήσεων γης (Guyenne, 1995).



**Εικόνα 5.26** Συγχώνευση δεδομένων SPOT-2 & ERS-2. Παρατηρείται η έντονη χαραδρωτική διάβρωση και γενικότερα η ανάδειξη της γεωμορφολογίας στην περιοχή της Κορινθίας (Gatsis et al., 2001).

Οι μέθοδοι συγχώνευσης ομαδοποιούνται σε δύο ομάδες:

**A) Μέθοδοι που σχετίζονται με τα χρωματικά συστήματα (RGB, IHS, κ.α.)** (Welch & Ehlers, 1987).

**B) Στατιστικές ή αριθμητικές μέθοδοι, όπως:**

1) Αριθμητικοί συνδυασμοί (πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμός και διαίρεση φασματικών καναλιών) (Carper et al., 1990).

2) Ανάλυση κύριων συνιστωσών (Yesou et al., 1993).

- 3) Χρήση φίλτρων high-pass (Shettigara, 1992).
- 4) Μεταβλητές πολλαπλής ανάλυσης (Singh, 1989).
- 5) Μετασχηματισμός Wavelet (Ranchin & Wald, 1993).

Τα τελευταία χρόνια όλο και πιο πολλές εφαρμογές περιλαμβάνουν τη χρήση των συγχωνευμένων εικόνων με επιτυχή αποτελέσματα. Επιγραμματικά αναφέρονται μερικές από αυτές:

- α) Χαρτογραφία – Ενημέρωση χαρτών (Welch & Ehlers, 1988).
- β) Χρήσεις γης – Γεωργία (ανίχνευση αλλαγών) (Munehika et al., 1993).
- γ) Δασολογία (Lozano-Garcia & Hoffer, 1993).
- δ) Καταγραφή πλημμυρισμένων εκτάσεων (Yesou et al., 1994).
- ε) Γεωλογία – Γεωμορφολογία (Jutz & Chorowitz, 1993).

### 5.3 Ταξινόμηση εικόνας

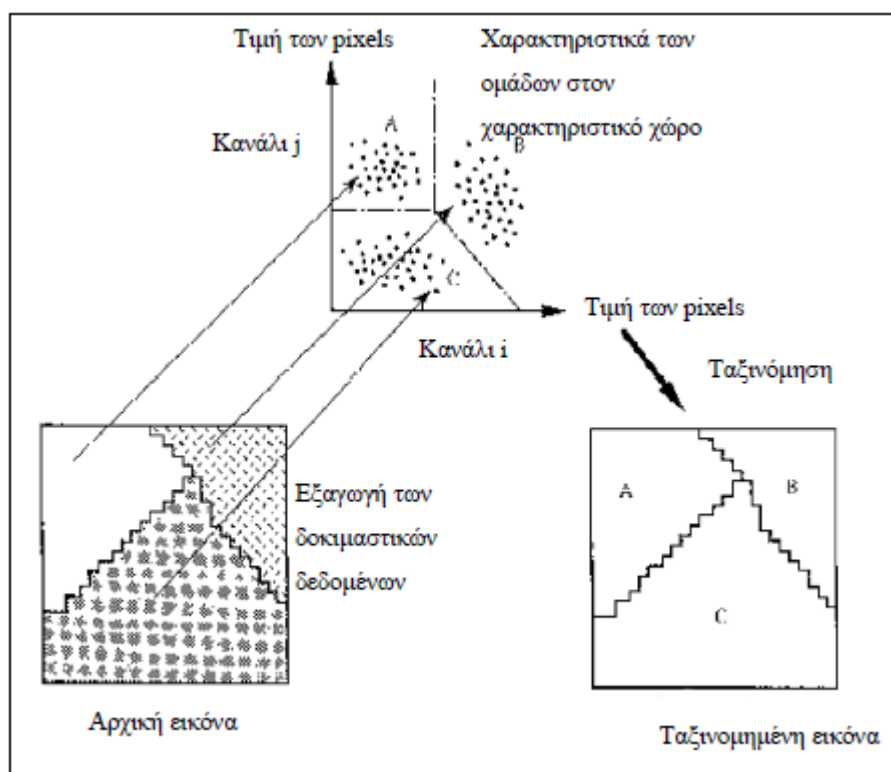
Οι δορυφορικές εικόνες της γήινης επιφάνειας μπορούν να αναλυθούν με στόχο τη μετατροπή των δεδομένων σε θεματική πληροφόρηση. Η «ψηφιακή ταξινόμηση εικόνας» είναι μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της πληροφόρησης από τα δεδομένα, δηλαδή είναι η διαδικασία της κατανομής των εικονοστοιχείων (pixels) μιας εικόνας σε κλάσεις, όπου στο κάθε εικονοστοιχείο μιας δορυφορικής εικόνας αποδίδεται μια ιδιότητα, η οποία περιγράφει ένα γήινο χαρακτηριστικό-αντικείμενο.

Η διαδικασία ταξινόμησης (classification) περιέχει ουσιαστικά δύο βήματα, που είναι:

α) Η αναγνώριση των κατηγοριών όλων των γήινων αντικειμένων. Στο πλαίσιο της τηλεπισκόπησης της γήινης επιφάνειας, οι ομάδες αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν για παράδειγμα δασώδεις περιοχές, υδάτινες μάζες, λιβάδια καθώς και άλλους τύπους κάλυψης γης, που εξαρτώνται από τη φύση της κάθε μελέτης.

β) Η απόδοση μιας ιδιότητας (καταχώρηση ονόματος) στα εικονοστοιχεία, τα οποία με αυτόν τον τρόπο ταξινομούνται.

Κάθε εικονοστοιχείο μιας εικόνας μπορεί να διαχειριστεί ως ένα ατομικό χαρακτηριστικό, που παρουσιάζει διάφορες τιμές σε διαφορετικά φασματικά κανάλια. Συγκρίνοντας τα εικονοστοιχεία, τόσο μεταξύ τους όσο και με εικονοστοιχεία που έχουν γνωστή ταυτότητα, είναι δυνατό να ομαδοποιηθούν σε ομάδες όμοιων εικονοστοιχείων που συμπίπτουν με τις ομάδες πληροφόρησης που ενδιαφέρουν τους εκάστοτε χρήστες. Οι ομάδες που σχηματίζονται ορίζουν περιοχές, με τέτοιο, τρόπο ώστε μετά την ταξινόμηση η ψηφιακή εικόνα να εμφανίζεται ως ένα μωσαϊκό από ομοιόμορφα τεμάχια, που το καθένα διαχωρίζεται με ένα χρώμα ή ένα σύμβολο (Εικόνα 5.23).



**Εικόνα 5.27** Η διαδικασία της ταξινόμησης σε γενικές γραμμές.

Η ταξινόμηση της εικόνας αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση των ψηφιακών εικόνων διότι βοηθάει στην εξαγωγή σημαντικής πληροφορίας από μία εικόνα. Η χρησιμότητα της ταξινόμησης εντοπίζεται στο γεγονός ότι το εξαγόμενο αποτέλεσμα είναι ένας θεματικός χάρτης, ο οποίος, αν διορθωθεί και γεωμετρικά, μετατρέπεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προβολή χάρτη, καθιστώντας δυνατή την εισαγωγή του σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.

Ο όρος «ταξινομητής» αναφέρεται στο πρόγραμμα (software) του Η/Υ που εφαρμόζει μία συγκεκριμένη διαδικασία για την ταξινόμηση της εικόνας. Υπάρχουν αρκετοί ταξινομητές οι οποίοι βασίζονται σε διαφορετικούς αλγόριθμους. Ένας ταξινομητής δεν μπορεί να είναι κατάλληλος για όλες τις πιθανές περιπτώσεις, διότι τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής, καθώς και οι συνθήκες κάθε μελέτης διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα καλύτερα αποτελέσματα ταξινόμησης, σε μία υβριδική προσέγγιση, λαμβάνονται χρησιμοποιώντας πολλούς διαφορετικούς ταξινομητές.

Η απλούστερη μορφή ταξινόμησης της ψηφιακής εικόνας είναι όταν κάθε εικονοστοιχείο λαμβάνεται χωριστά υπόψη, χρησιμοποιώντας ως οδηγό τις τιμές που έχει σε ένα μόνο φασματικό κανάλι. Αυτοί οι ταξινομητές αναφέρονται ως «ταξινομητές σημείου» (point classifiers), διότι θεωρούν κάθε εικονοστοιχείο ως μία σημειακή παρατήρηση τιμών απομονωμένων από τις γειτονικές τους. Οι σημειακοί ταξινομητές προσφέρουν το πλεονέκτημα της απλότητας, αλλά έχουν ως μειονέκτημα την έλλειψη της ικανότητας εξερεύνησης της πληροφόρησης που μπορεί να έχουν τα γειτονικά εικονοστοιχεία.

Μια πιο σύνθετη ταξινομητική διαδικασία χρησιμοποιεί ομάδες από εικονοστοιχεία για να εξάγει την πληροφορία της ομοιογένειας τους. Αυτοί οι ταξινομητές καλούνται «χωρικοί ή γειτονικοί ταξινομητές» (spatial or neighborhood classifiers) και εξετάζουν μικρές περιοχές μέσα σε μια εικόνα, χρησιμοποιώντας για την ταξινόμηση της εικόνας τη φασματική πληροφόρηση και την πληροφόρηση της ομοιογένειας των εικονοστοιχείων.

Ένας άλλου είδους διαχωρισμός μεταξύ μεθόδων ταξινόμησης διαχωρίζει την ελεγχόμενη (supervised) από τη μη ελεγχόμενη (unsupervised) ταξινόμηση. Η ελεγχόμενη ταξινόμηση απαιτεί από τον αναλυτή να αναγνωρίσει σε μια εικόνα περιοχές που ξέρει ότι ανήκουν σίγουρα σε κάποια συγκεκριμένη κατηγορία, με σκοπό ουσιαστικά να οδηγήσει ο ίδιος την ταξινόμηση. Στη μη ελεγχόμενη ταξινόμηση η διαδικασία προχωρεί

με ελάχιστη συνεισφορά του αναλυτή και μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια έρευνα φυσικών ομάδων από εικονοστοιχεία που βρίσκονται και μπορούν να διαχωριστούν μέσα σε μια εικόνα. Έτσι, στη μεν ελεγχόμενη προσέγγιση ταξινόμησης σχεδιάζουμε χρήσιμες κατηγορίες πληροφόρησης και έπειτα εξετάζουμε τον φασματικό τους διαχωρισμό, στη δε μη ελεγχόμενη καθορίζουμε φασματικές ομάδες και μετά καθορίζουμε την ωφελιμότητα της πληροφόρησης που παράγουν (Forster 1992, Campbell 1996).

Παρ' όλα αυτά, μερικές διαδικασίες ταξινόμησης δεν οριοθετούνται απόλυτα μέσα σε αυτά τα πλαίσια και καλούνται υβριδικές ταξινομήσεις.

#### Κλάσεις πληροφόρησης και φασματικές κλάσεις

Κλάσεις Πληροφόρησης είναι οι κατηγορίες που ενδιαφέρουν τους χρήστες των δεδομένων, π.χ. τα διαφορετικά είδη χρήσης/κάλυψης γης.

Οι φασματικές κλάσεις είναι ομάδες από εικονοστοιχεία που είναι ομοειδή, σύμφωνα με την ανακλαστικότητα που παρουσιάζουν στα διάφορα φασματικά κανάλια. Εάν είναι δυνατό να καθοριστούν δεσμοί μεταξύ των φασματικών κλάσεων σε μια εικόνα και των κλάσεων πληροφόρησης που είναι πρωταρχικής σημασίας, τότε η εικόνα καθίσταται σημαντική πηγή πληροφόρησης. Για παράδειγμα, μία περιοχή της κλάσης πληροφόρησης «δάσος» παραμένει «δάσος», ακόμη και εάν περιλαμβάνει διαφορετικής ηλικίας δένδρα ή αποτελείται από διαφορετικά είδη δένδρων, διαφορετικής πυκνότητας ή κατάστασης υγείας, ενώ στην πραγματικότητα αυτές οι διαφορές οδηγούν φυσιολογικά σε διαφορετικές φασματικές αποκρίσεις μιας κλάσης πληροφόρησης. Επιπλέον, άλλοι παράγοντες, όπως η ποικιλομορφία στη φωτεινότητα και στη σκίαση, μπορεί να επιφέρουν επιπρόσθετες διαφοροποιήσεις ακόμα και μέσα σε φασματικά ομοιόμορφες κλάσεις.

Οι κλάσεις πληροφόρησης αποτελούνται τυπικά από έναν αριθμό φασματικών υποκλάσεων, δηλαδή φασματικά ευδιάκριτων ομάδων από εικονοστοιχεία, τα οποία όλα μαζί μπορούν να συναρμολογηθούν σχηματίζοντας μία κλάση. Για κάθε φασματικό κανάλι, κάθε διαφορετική κλάση χαρακτηρίζεται από μια μέση τιμή (την τυπική φωτεινότητα κάθε κλάσης) που παρουσιάζει μία σταθερή μεταβλητότητα και η οποία μπορεί να εκφραστεί με τη διακύμανση (variance) ή την τυπική απόκλιση (standard deviation) ή την τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης.

Η σαφής διάκριση ή όχι δύο διαφορετικών φασματικών κλάσεων συνεπάγεται και από τη διαφοροποίηση της μέσης τιμής τους, δηλαδή οι κλάσεις που είναι διαφορετικές θα έχουν και διαφορετική μέση τιμή.

Μια άλλη απλή μέτρηση της σαφήνειας, που λαμβάνει υπόψη επίσης τις διαφορές της μεταβλητότητας μεταξύ των κλάσεων, είναι η κανονικοποιημένη διαφορά (normalized difference) η οποία βρίσκεται από τη διαίρεση της διαφοράς της μέσης τιμής με την τυπική απόκλιση των κλάσεων.

### **5.3.1 Μη ελεγχόμενη ταξινόμηση**

Η μη ελεγχόμενη ταξινόμηση μπορεί να οριστεί ως η αναγνώριση και χαρτογράφηση φυσικών φασματικών ομάδων μέσα στα πολυφασματικά δεδομένα. Αυτή η μορφή ταξινόμησης δεν χρησιμοποιεί δεδομένα εισαγόμενα από τον αναλυτή ως βάση για την ταξινόμηση, αλλά βασίζεται αποκλειστικά στις φυσικές ομάδες που δημιουργούν οι διαφορετικές ψηφιακές τιμές μιας εικόνας. Για αυτό τον λόγο, δεν είναι απαραίτητη η πληροφόρηση για την κάλυψη γης μιας περιοχής, για να αρχίσει η διαδικασία της ταξινόμησης. Αυτή όμως η πληροφορία είναι απαραίτητη στην εκτίμηση των ταξινομημένων δεδομένων. Η εκτίμηση αυτή πρέπει να γίνει χρησιμοποιώντας κάποια δεδομένα αναφοράς (μεγαλύτερης κλίμακας εικόνες, χάρτες ή δεδομένα υπαίθρου) για τον καθορισμό της ταυτότητας και της τιμής πληροφόρησης που παρέχουν.

Η διαδικασία της μη ελεγχόμενης ταξινόμησης μπορεί να περιγραφεί, λαμβάνοντας υπόψη δύο φασματικές ζώνες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ορθογώνιοι άξονες ενός διαγράμματος δύο διαστάσεων (Εικόνες 5.24 και 5.25). Χρησιμοποιώντας τις υπόλοιπες φασματικές ζώνες σαν επιπρόσθετες

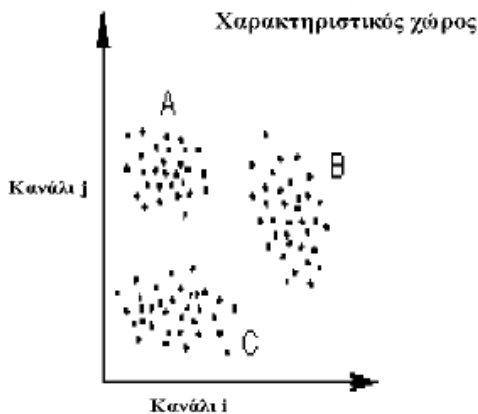


μεταβλητές, μπορούν οι ομάδες αυτές (παρ' όλη τη δυσκολία αναπαράστασής τους σε δύο διαστάσεις) να αποτυπωθούν στον χώρο με ένα πλήθος σημείων.

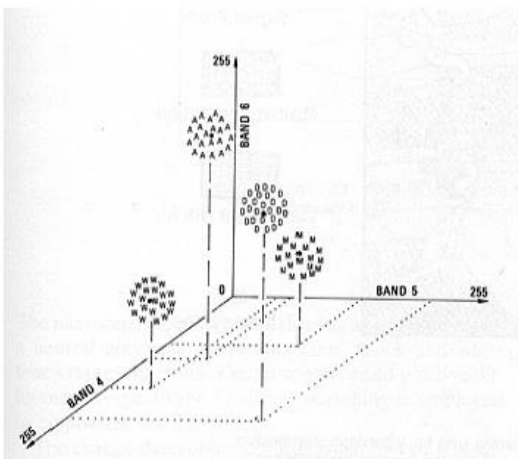
Η μη ελεγχόμενη ταξινόμηση προσπαθεί να επιτύχει την καταλληλότερη κατανομή των εικονοστοιχείων στις διάφορες ομάδες, χρησιμοποιώντας κάποιους περιορισμούς οι οποίοι καθορίζονται από τον αναλυτή. Ένας μη ελεγχόμενος ταξινομητής συνήθως προχωρεί σε επεξεργασία δύο βημάτων, που συμπεριλαμβάνει:

1) Έναν αλγόριθμο για τον υπολογισμό των αποστάσεων.

2) Μια διαδικασία για την εύρεση, τον έλεγχο και τη διόρθωση των κλάσεων σύμφωνα με τους περιορισμούς που ορίζονται από τον αναλυτή.



**Εικόνα 5.28** Διάγραμμα διασποράς των τιμών των εικονοστοιχείων σε έναν δισδιάστατο χαρακτηριστικό χώρο. Τα A, B και C ορίζουν φυσικές φασματικές κλάσεις



**Εικόνα 5.29** Διάγραμμα διασποράς των τιμών των εικονοστοιχείων σε έναν τρισδιάστατο χαρακτηριστικό χώρο. Από F.F. Sabins, Remote Sensing: Principles and Interpretation. 2nd Ed., 1987. Αναπαραγωγή από τον W.H. Freeman & Co., New York City.

Ο αναλυτής μπορεί να χρειαστεί να προσδιορίσει τον αριθμό των ομάδων που θα δημιουργηθούν μέσα στις κλάσεις ή να απαιτήσει οι κλάσεις να παρουσιάζουν ελάχιστο βαθμό ευκρίνειας λαμβάνοντας υπόψη τις γειτονικές ομάδες.

Η μη ελεγχόμενη ταξινόμηση παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1) Δεν χρειάζεται εκτεταμένη γνώση της περιοχής μελέτης.

2) Η περίπτωση του ανθρώπινου λάθους ελαχιστοποιείται. Ο χειριστής μπορεί να καθορίσει μόνος του τον αριθμό των κατηγοριών που επιθυμεί (ή πιθανόν, τα ελάχιστα και μέγιστα όρια στις διάφορες κατηγορίες) και μερικές φορές τους περιορισμούς που ελέγχουν την ευκρίνεια και ομοιομορφία των ομάδων.

3) Οι ομάδες που ορίζονται από τη μη ελεγχόμενη ταξινόμηση είναι συχνά πολύ πιο ομοιόμορφες ως προς τη φασματική σύνθεση, σε σχέση με αυτές που δημιουργούνται από την ελεγχόμενη ταξινόμηση.

4) Ομάδες όπου σπάνια εμφανίζονται αναγνωρίζονται σαν ξεχωριστές μονάδες. Τέτοιες ομάδες, που καταλαμβάνουν συνήθως μικρή έκταση, μπορεί να παραμείνουν χωρίς αναγνώριση στη διαδικασία της ελεγχόμενης ταξινόμησης και μπορεί ακούσια να ενσωματωθούν σε άλλες κλάσεις, δημιουργώντας σφάλματα και ανακρίβειες σε όλη τη διάρκεια της ταξινόμησης.

Τα μειονεκτήματα και οι περιορισμοί αφορούν τη διαδικασία της «φυσικής» ομαδοποίησης των εικονοστοιχείων και τις δυσκολίες που ενέχει η αντιστοίχιση αυτών των ομάδων στις διάφορες κατηγορίες πληροφόρησης που ενδιαφέρουν τον αναλυτή.

Η μη ελεγχόμενη ταξινόμηση αναγνωρίζει μέσα στα δεδομένα, φασματικά ομοιογενείς κλάσεις. Αυτές οι κλάσεις δεν ανταποκρίνονται απαραίτητα στις κατηγορίες πληροφόρησης που ενδιαφέρουν τον αναλυτή. Ως εκ τούτου, ο αναλυτής πρέπει να ταιριάζει τις κλάσεις που δημιουργήθηκαν με τις κλάσεις πληροφόρησης που επιθυμεί, γεγονός που εμπεριέχει προβλήματα, διότι σπάνια υπάρχει απόλυτη αντιστοίχιση μεταξύ τους.

Ο αναλυτής έχει ελάχιστους περιορισμούς όσον αφορά τον αριθμό των κλάσεων που θα δημιουργηθούν και των αντίστοιχων ταυτοτήτων τους. Εάν όμως για παράδειγμα χρειαστεί να δημιουργήσει ένα συγκεκριμένο μενού από κλάσεις πληροφόρησης, ώστε να μπορέσει να τις συνδυάσει στη συνέχεια με άλλες ταξινομήσεις που θα προέλθουν από άλλες χρονολογικές περιόδους, τότε το αποτέλεσμα ίσως να μην είναι ικανοποιητικό. Αυτό συμβαίνει διότι οι φασματικές ιδιότητες συγκεκριμένων φασματικών κλάσεων αλλάζουν με το πέρασμα του χρόνου (σε ετήσια βάση, ή και κατά τη διάρκεια του έτους) και έτσι όταν ορίζονται για μια ημερομηνία δεν μπορούν να επεκταθούν εύκολα σε άλλες.

Η σειρά των ενεργειών που ακολουθούνται στην μη ελεγχόμενη ταξινόμηση ξεκινάει με τον καθορισμό του ελάχιστου και μέγιστου αριθμού των κατηγοριών που θα δημιουργηθούν από τον αλγόριθμο της ταξινόμησης. Ο αριθμός αυτός μπορεί να βασίζεται είτε στη γνώση της περιοχής από τον αναλυτή είτε στις ανάγκες του χρήστη για συγκεκριμένο αριθμό κλάσεων στην τελική ταξινόμηση. Η ταξινόμηση ξεκινάει με την αυθαίρετη επιλογή ενός αριθμού από εικονοστοιχεία, σαν κέντρα των ομάδων. Συχνά αυτά επιλέγονται τυχαία, ώστε να είναι βέβαιο ότι ο αναλυτής δεν μπορεί να επηρεάσει την ταξινόμηση και ότι τα επιλεγμένα εικονοστοιχεία είναι αντιπροσωπευτικά των τιμών που βρίσκονται σε ολόκληρη την εικόνα.

Ο αλγόριθμος της ταξινόμησης έπειτα βρίσκει τις αποστάσεις ανάμεσα στα εικονοστοιχεία και σχηματίζει αρχικές εκτιμήσεις για τα κέντρα των ομάδων, σύμφωνα με τους περιορισμούς που έχει ορίσει ο αναλυτής. Στο επόμενο στάδιο, όλα τα εναπομείναντα, μη ενταγμένα εικονοστοιχεία της εικόνας εκχωρούν στην κοντινότερη ομάδα. Μετά από αυτό ολόκληρη εικόνα έχει ταξινομηθεί, αλλά αυτή η ταξινόμηση δίνει μόνο μια εκτίμηση του τελικού αποτελέσματος, διότι οι κλάσεις που έχουν σχηματιστεί δεν είναι εντελώς ακριβείς και δεν ικανοποιούν πλήρως τους περιορισμούς που έχει θέσει ο αναλυτής.

Για να αρχίσει το επόμενο στάδιο, ο αλγόριθμος βρίσκει τα κέντρα όλων των κλάσεων, από την πρόσθεση νέων εικονοστοιχείων της ταξινόμησης θεωρώντας ότι τα αρχικά κέντρα δεν είναι πλέον ακριβή. Τότε όλη η εικόνα ταξινομείται ξανά με το κάθε εικονοστοιχείο να αποδίδεται στο κοντινότερο κεντροειδές. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς, έως ότου τα νέα κεντροειδή που θα σχηματιστούν να μη διαφέρουν αισθητά από τις τοποθεσίες των κεντροειδών που έχουν υπολογιστεί στο προηγούμενο βήμα και οι κλάσεις να ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς που απαιτεί ο αναλυτής.

Η όλη διαδικασία είναι αντικειμενική, υπό την έννοια ότι ο αναλυτής δεν παρεμβαίνει στην απόδοση των εικονοστοιχείων στις φυσικές φασματικές κλάσεις. Ωστόσο, βασίζεται σε αποφάσεις τις οποίες λαμβάνει

ο χρήστης, όπως την επιλογή του αλγόριθμου που θα χρησιμοποιηθεί, του αριθμού των κλάσεων που θα σχηματιστούν, καθώς και την ομοιομορφία και ευκρίνεια των κλάσεων. Πολλές διαφορετικές διαδικασίες για τη μη ελεγχόμενη ταξινόμηση είναι διαθέσιμες, όμως οι περισσότερες βασίζονται στη γενική στρατηγική που περιγράφηκε. Οι συνιστώσες κλειδιά, σε κάθε αλγόριθμο μη ελεγχόμενης ταξινόμησης, είναι οι αποτελεσματικές μέθοδοι μέτρησης των αποστάσεων στον χώρο των δεδομένων, η αναγνώριση των κεντροειδών των κλάσεων και ο έλεγχος ευκρίνειάς τους.

### 5.3.2 Ελεγχόμενη ταξινόμηση

Ελεγχόμενη ταξινόμηση ονομάζεται η διαδικασία που χρησιμοποιεί «δείγματα» γνωστής ταυτότητας (π.χ. εικονοστοιχεία τα οποία ήδη έχουν χαρακτηριστεί με κάποια κλάση πληροφόρησης) με σκοπό την ταξινόμηση των εικονοστοιχείων, των οποίων δεν έχει προσδιοριστεί η ταυτότητα. Τα δείγματα λαμβάνονται από περιοχές δειγματοληψίας που καθορίζει ο αναλυτής και συνήθως οριοθετούνται με ψηφιοποίηση επάνω στην εικόνα. Οι περιοχές αυτές πρέπει να έχουν γνωστή ταυτότητα και να εμπεριέχουν μονάχα ένα χαρακτηριστικό. Τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται μέσα σε αυτές τις περιοχές και τα οποία χρησιμοποιούνται για την ελεγχόμενη ταξινόμηση είναι οι οδηγοί που θα χρησιμοποιηθούν από τον αλγόριθμο ταξινόμησης. Οι φασματικές τιμές όλων των υπόλοιπων εικονοστοιχείων συγκρίνονται με αυτές των περιοχών δειγματοληψίας και καταχωρίζονται στην πιο κοντινή από άποψη πληροφόρησης κατηγορία. Έτσι, καθίσταται προφανές ότι η επιλογή των περιοχών δειγματοληψίας είναι ουσιαστικά το κλειδί για την επιτυχία της ελεγχόμενης ταξινόμησης.

Το βασικό πλεονέκτημα της ελεγχόμενης ταξινόμησης επικεντρώνεται στην υψηλή εξειδίκευση της διαδικασίας, η οποία οφείλεται στην επιλογή των περιοχών δειγματοληψίας, γεγονός που απλοποιεί τη διαδικασία ταύτισης των φασματικών κλάσεων με τις κλάσεις πληροφόρησης, που ενδιαφέρουν τον αναλυτή, στον τελικό χάρτη.

Η ελεγχόμενη ταξινόμηση εξαρτάται από την ικανότητα του αναλυτή να εφαρμόσει μια διαρθρωμένη ταξινόμηση έτσι ώστε οι τελικές φασματικές κλάσεις να είναι ευδιάκριτες στον πολυδιάστατο χώρο των δεδομένων. Για αυτό τον λόγο η διαδικασία επιλογής του πεδίου δειγματοληψίας πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά. Ο αντικειμενικός σκοπός της κατάλληλης επιλογής του πεδίου δειγματοληψίας είναι η παραγωγή ενός σετ στατιστικών αναλύσεων, που θα περιγράφουν τα χαρακτηριστικά φασματικής απόκρισης για κάθε είδος κάλυψης γης που ταξινομείται.

Υπάρχουν διάφορων ειδών αλγόριθμοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της ελεγχόμενης ταξινόμησης. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι:

#### α) Αλγόριθμος της ελάχιστης απόστασης (minimum distance classifier)

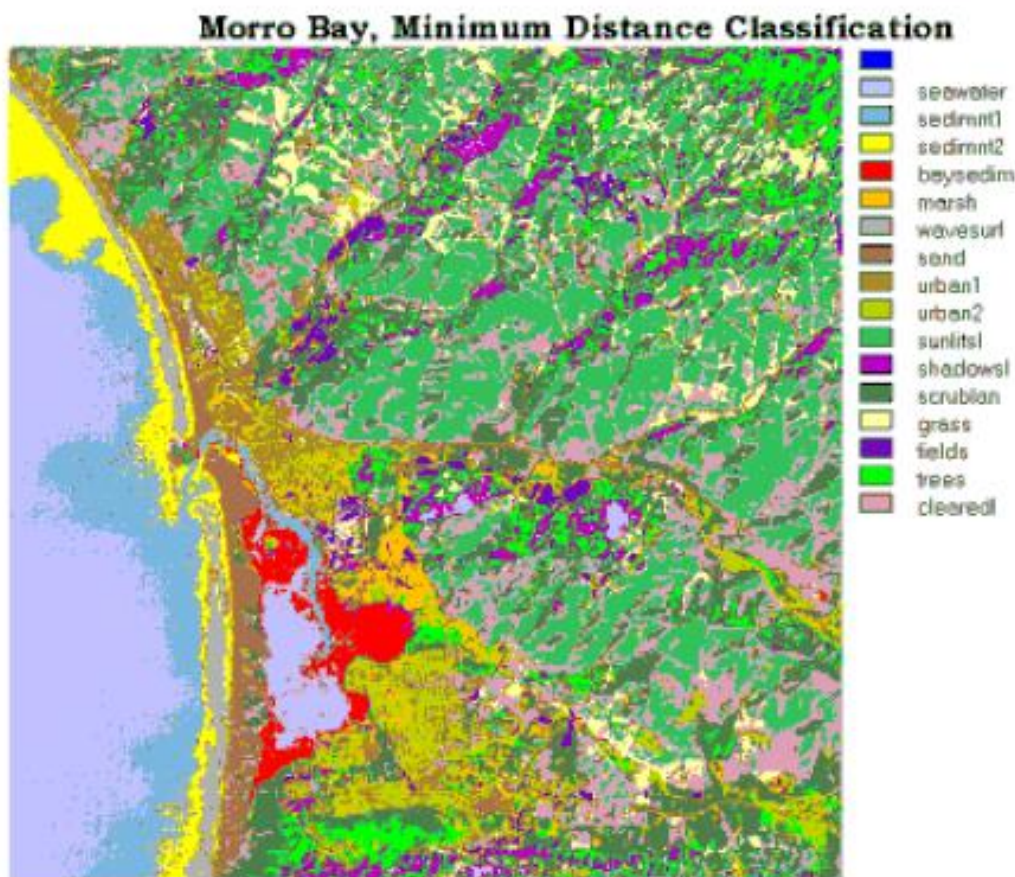
Το γενικό μοντέλο αυτής της μορφής ταξινόμησης μπορεί να περιγραφεί θεωρώντας τα εικονοστοιχεία της εικόνας διασκορπισμένα μέσα σε έναν πολυδιάστατο χώρο (ο αριθμός των διαστάσεων είναι ίσος με τον αριθμό των φασματικών καναλιών που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση). Η διαδικασία της ταξινόμησης βασίζεται πάντοτε στην απάντηση τους εξής ερωτήματος: «ανήκουν δύο οποιαδήποτε εικονοστοιχεία στην ίδια ομάδα;» Ο αλγόριθμος της ελάχιστης απόστασης μπορεί να απαντήσει σε αυτό το ερώτημα, βρίσκοντας την απόσταση ανάμεσα σε όλα τα ζευγάρια των εικονοστοιχείων. Εάν η απόσταση ανάμεσα στις τιμές δύο εικονοστοιχείων είναι μικρότερη από οποιοδήποτε άλλο εικονοστοιχείο της εικόνας, τότε αυτά ανήκουν στην ίδια ομάδα. Οι αποστάσεις των υπόλοιπων εικονοστοιχείων της εικόνας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βρεθεί η σχέση μεταξύ όλων των υπόλοιπων ομάδων (Εικόνα 5.26).

Τέτοιου είδους αποστάσεις μπορούν να υπολογιστούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, ένας εκ των οποίων είναι η Ευκλείδεια απόσταση, της οποίας ο αλγόριθμος είναι:

$$D_{ab} = \left[ \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

όπου  $i$  είναι ένα από τα  $n$  φασματικά κανάλια,  $a$  και  $b$  είναι τα εικονοστοιχεία και  $D_{ab}$  είναι η απόσταση μεταξύ των δύο εικονοστοιχείων. Ο υπολογισμός της απόστασης βασίζεται στο Πυθαγόρειο θεώρημα.

Η Ευκλείδεια απόσταση χρησιμοποιείται κυρίως στις περιπτώσεις όπου οι διακυμάνσεις (variances) των πληθυσμών των κλάσεων είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Η διαδικασία ταξινόμησης υπολογίζει όλες τις αποστάσεις για τον καθορισμό των ομοιοτήτων των εικονοστοιχείων και των ομάδων που βρίσκονται σε μια εικόνα. Όμως, δεν είναι εφικτό όλες οι αποστάσεις να μετρηθούν με την Ευκλείδεια απόσταση.



**Εικόνα 5.30** Ταξινομημένη εικόνα, με τον αλγόριθμο της ελάχιστης απόστασης (minimum distance), της περιοχής Morro Bay στην Καλιφόρνια (Πηγή: NASA).

$$d_k^2 = (X - \mu_k)^t \sum_k^{-1} (X - \mu_k)$$

όπου  $X$ : το άνωσμα των δεδομένων της εικόνας ( $n$  κανάλια),  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$

$\mu_k$ : ο μέσος της  $k$  κλάσης και

$\Sigma_k = [m_1, m_2, \dots, m_n]$

$\Sigma_k$ : πίνακας διακύμανσης-συνδιακύμανσης:

$$\Sigma_k = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_{nn} \end{bmatrix}$$

$\sigma_k$ : πίνακας διακύμανσης:

$$\sigma_k = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & & \sigma_{nn} \end{bmatrix}$$

### β) Αλγόριθμος της μέγιστης πιθανότητας (maximum likelihood classifier)

Ο αλγόριθμος της μέγιστης πιθανότητας είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος ταξινόμησης στην τηλεπισκόπηση. Με αυτή τη μέθοδο ένα εικονοστοιχείο, χρησιμοποιώντας τη μέγιστη πιθανότητα, ταξινομείται στην αντίστοιχη κλάση. Η λήψη αποφάσεων που χρησιμοποιεί η μέθοδος αυτή απαιτεί τα δειγματοληπτικά εικονοστοιχεία να ακολουθούν κανονική κατανομή.

Υπό αυτή την προϋπόθεση, τα δειγματοληπτικά εικονοστοιχεία μπορούν να εκφραστούν με τιμές του μέσου (mean), της διακύμανσης (variance) και της συνδιακύμανσής (covariance) τους. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πιθανότητας συμμετοχής ενός εικονοστοιχείου σε μία κλάση. Η έκφραση αυτής της πιθανότητας, υπό την προϋπόθεση της κανονικής κατανομής, φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$L_k(\mathbf{X}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |\Sigma_k|^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{X}-\boldsymbol{\mu}_k) \Sigma_k^{-1} (\mathbf{X}-\boldsymbol{\mu}_k)^t\right\}$$

όπου: n: ο αριθμός των καναλιών

X: τα δεδομένα της εικόνας στα n κανάλια

$L_k(X)$ : η πιθανότητα του X να ανήκει στην κλάση k

$\mu_k$ : το μέσο άνυσμα της κλάσης k

$\Sigma_k$ : ο πίνακας διακύμανσης-συνδιακύμανσης της κλάσης k,

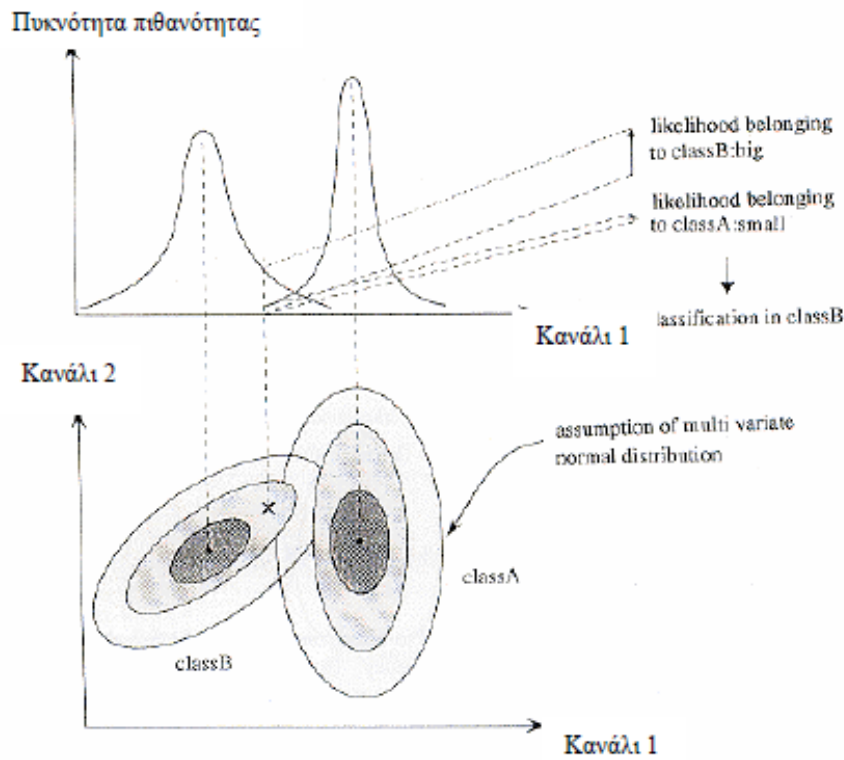
$|\Sigma_k|$ : η ορίζουσα του  $\Sigma_k$

Η γενική ιδέα της μεθόδου της μέγιστης πιθανότητας απεικονίζεται στην Εικόνα 5.28. Η μέθοδος αυτή περιγράφει λεπτομερώς τις ελλειψοειδείς καμπύλες ισοπιθανότητας. Ο δεύτερος όρος στην παραπάνω εξίσωση είναι η απόσταση Mahalanobis, που εδώ διορθώνεται για τη διακύμανση-συνδιακύμανση της κλάσης k. Η μέθοδος της μέγιστης πιθανότητας πλεονεκτεί από την άποψη της θεωρίας των πιθανοτήτων, αλλά πάντα λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω:

α) Η αξιόπιστη και ακριβής λήψη δεδομένων υπαίθρου, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση του μέσου διανύσματος και του πίνακα διακύμανσης-συνδιακύμανσης του πληθυσμού.

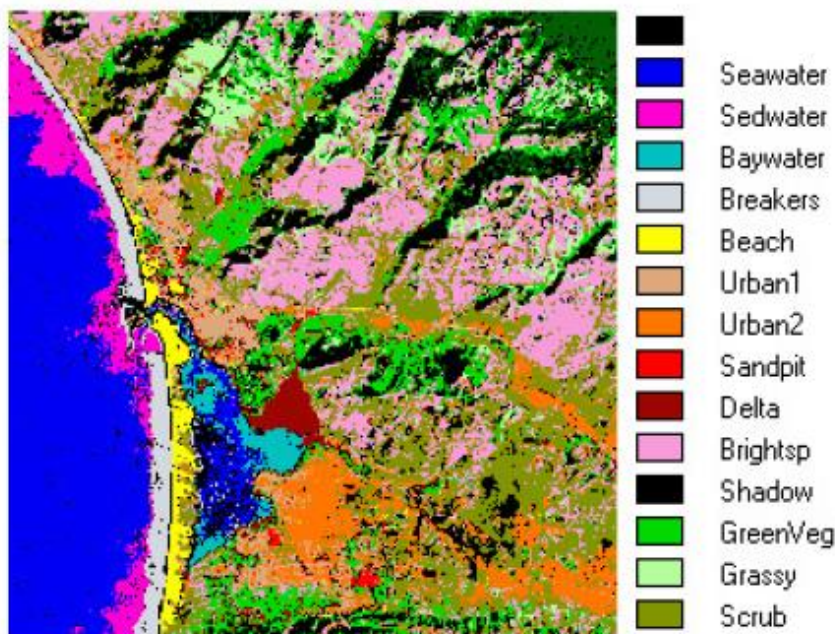
β) Ο αντίστροφος πίνακας διακύμανσης-συνδιακύμανσης γίνεται ασταθής στην περίπτωση που υπάρχει υψηλός δείκτης συσχέτισης μεταξύ δύο φασματικών καναλιών ή όταν τα δεδομένα υπαίθρου είναι πολύ ομοιογενή. Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός των φασματικών καναλιών θα πρέπει να μειωθεί χρησιμοποιώντας την ανάλυση κύριων συνιστωσών.

γ) Η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί όταν η κατανομή πληθυσμού των εικονοστοιχείων δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή (Εικόνα 5.27) .



Εικόνα 5.31 Η ταξινόμηση, όπως προκύπτει με τον αλγόριθμο της μέγιστης πιθανότητας (maximum likelihood).

Maximum Likelihood Morro Bay 7 TM Bands



**Εικόνα 5.32** Ταξινομημένη εικόνα, με τον αλγόριθμο της μέγιστης πιθανότητας (*maximum likelihood*), της περιοχής Morro Bay στην Καλιφόρνια (NASA, 1998).

#### Εκτίμηση της ακρίβειας

Για να γίνουν οι παραγόμενοι ταξινομημένοι χάρτες και τα στατιστικά στοιχεία των χρήσεων γης εκμεταλλεύσιμα από τους ενδιαφερόμενους χρήστες, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της ακρίβειας ταξινόμησης, η οποία δίνει πληροφορίες για την αξιοπιστία του τελικού χάρτη, υπολογίζοντας τον αριθμό των σφαλμάτων της ταξινόμησης.

Το ταξινομικό σφάλμα είναι η απόδοση ενός εικονοστοιχείου το οποίο ανήκει σε μία κατηγορία (όπως αυτό ορίζεται από τις υπαίθριες παρατηρήσεις) σε μία άλλη κατηγορία κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης των δορυφορικών δεδομένων. Τα λάθη αυτά σχετίζονται με τις κλάσεις εκείνες που η πληροφόρησή τους κατανέμεται σε μεγάλο φασματικό εύρος και συνεπώς είναι δύσκολο να ταξινομηθούν σωστά ή με σφάλματα εκχώρησης των διαφόρων κατηγοριών πληροφόρησης στη σωστή φασματική πληροφόρηση (Richards 1993· Cambell 1996· Ψωμιάδης 2000).

Ο έλεγχος της ακρίβειας ταξινόμησης υπολογίζεται συγκρίνοντας τη συμφωνία μίας ταξινομημένης εικόνας άγνωστης ποιότητας και ενός προτύπου από δεδομένα που έχουν συνήθως συλλεχθεί στην ύπαιθρο. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός πίνακα που περιλαμβάνει τα πρότυπα και την κλάση στην οποία εκχωρήθηκαν κατά την ταξινόμηση, ελέγχοντας το κατά πόσο ταυτίζονται. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό ταύτισης τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακρίβεια της ταξινόμησης.

## **5.4 Αρχές ερμηνείας δορυφορικών εικόνων και ψηφιακών αεροφωτογραφιών**

Η τηλεπισκόπηση τα τελευταία χρόνια εξελίχθηκε σε ένα σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη των χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας. Δεν πρόκειται για κάποια μαγική τεχνική που μπορεί να λύσει κάθε πρόβλημα, αλλά για μια νέα τεχνική η οποία χρησιμοποιείται σε συνεργασία με άλλες «παραδοσιακές» τεχνικές. Οι παρατηρήσεις υπαίθρου ήταν και θα είναι αναγκαίες και δεν πρόκειται να αντικατασταθούν πλήρως από την τηλεπισκόπηση. Όμως η συλλογή δεδομένων στην ύπαιθρο απαιτεί πολύ χρόνο και μεγάλο κόστος, ενώ τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης μπορεί να καταγράφουν δεδομένα σε πολύ μικρό σχετικά χρόνο

και κόστος. Ο χρήστης μπορεί, με τη βοήθεια των δεδομένων παρακολούθησης της γης, να αποκτήσει μια ολοκληρωμένη και γρήγορη εικόνα της ευρύτερης περιοχής που μελετά, σε σχέση με αυτήν που μπορεί να έχει στην ύπαιθρο, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον χρόνο και το κόστος που απαιτείται κατά τις εργασίες υπαίθρου. Επίσης, τα δεδομένα τηλεπισκόπησης μπορούν να δώσουν πληροφόρηση για δύσβατες περιοχές οι οποίες δύσκολα μπορούν να προσεγγιστούν.

Οι κύριοι παράγοντες που καθιστούν τα δορυφορικά δεδομένα σημαντικά και αξιόπιστα για τη μελέτη και τον έλεγχο των φυσικών πόρων είναι η συνοπτική εικόνα του χώρου που αποδίδουν, ο οποίος μπορεί να περιλαμβάνει χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα, η συχνή και επαναλαμβανόμενη κάλυψη της περιοχής, η οποία επιτρέπει την παρατήρηση μικρών εποχικών αλλαγών, η συλλογή δεδομένων σε επιλεγμένα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και η δυνατότητα να αποδίδονται τα δεδομένα τους τόσο σε ψηφιακή όσο και σε αναλογική μορφή (Tranavglia, 1989).

Η μεθοδολογία επεξεργασίας μιας εικόνας βασίζεται σε δύο βασικά βήματα, **την ανάλυση και την ερμηνεία.**

Η διαφορά μεταξύ ανάλυσης και ερμηνείας έγκειται στο ότι:

- Η ανάλυση είναι ο διαχωρισμός ή διάσπαση ενός συνόλου στα τμήματά του.

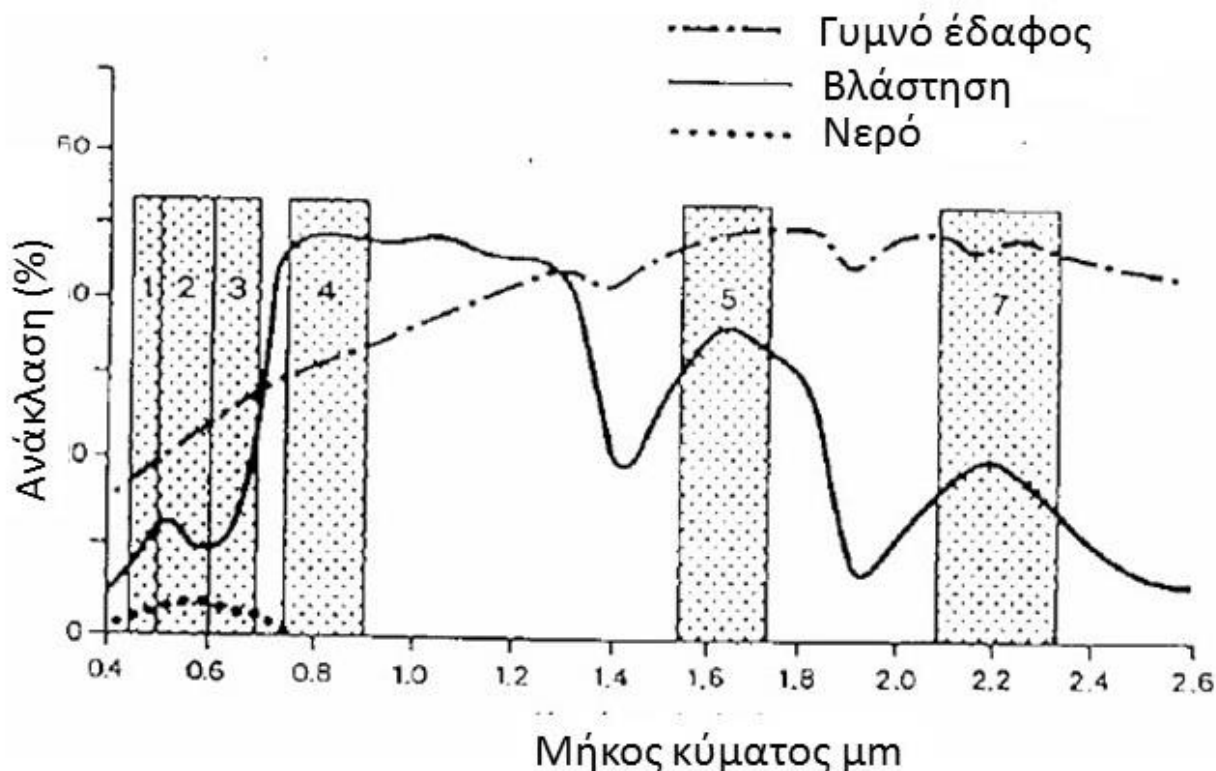
- Η ερμηνεία, η οποία ακολουθεί την ανάλυση, είναι η επεξήγηση της σημασίας κάθε τμήματος της εικόνας αναφορικά με το σύνολό της και ο συσχετισμός των φασματικών και χωρικών ιδιοτήτων των διαφόρων χαρακτηριστικών δεδομένων που την αποτελούν (Εικόνα 5.29). Η ανάλυση αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων είναι η διαδικασία διάκρισης των φυσικών και ανθρωπογενών χαρακτηριστικών που είναι αποτυπωμένα σε αυτές. Η αναγνώριση και καταγραφή των χαρακτηριστικών αυτών ονομάζεται ποιοτική ανάλυση, ενώ ο καθορισμός της γεωμετρίας τους στον χώρο ονομάζεται ποσοτική ανάλυση.

Η ποιοτική ανάλυση λέγεται **φωτοερμηνεία**, ενώ η ποσοτική **φωτογραμμετρία**.

### Ποιοτική Ανάλυση

Στη φωτοερμηνεία σημαντικό ρόλο παίζουν οι υποκειμενικοί παράγοντες, όπως η οξύτητα όρασης και αντίληψης του ερευνητή. Σημαντικό επίσης ρόλο παίζουν και οι αντικειμενικοί παράγοντες, όπως είναι η ποιότητα των δεδομένων καθώς και η τεχνική που ακολουθείται.





**Εικόνα 5.33** Θεματική χαρτογράφηση των φασματικών χαρακτηριστικών, οι αριθμοί αναφέρονται στα κανάλια του LANDSAT TM (after Lillesand & Kiefer, 2000).

Τα βασικά είδη δεδομένων στα οποία εφαρμόζεται η φωτοερμηνεία είναι τα ακόλουθα:

- Αεροφωτογραφίες
- Παγχρωματικές δορυφορικές εικόνες
- Πολυφασματικά δορυφορικά δεδομένα

Σαν **ποιότητα ανάλυσης** εκφράζεται η ικανότητα που έχουν τα αντικείμενα που απεικονίζονται να είναι ευκρινή και να ξεχωρίζουν από τα γειτονικά τους. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται τόσο από τη χωρική διακριτική ανάλυση των δεδομένων όσο και από τη φασματική τους ταυτότητα.

Η ποιοτική ανάλυση γίνεται κυρίως με βάση τα ακόλουθα διαγνωστικά κριτήρια:

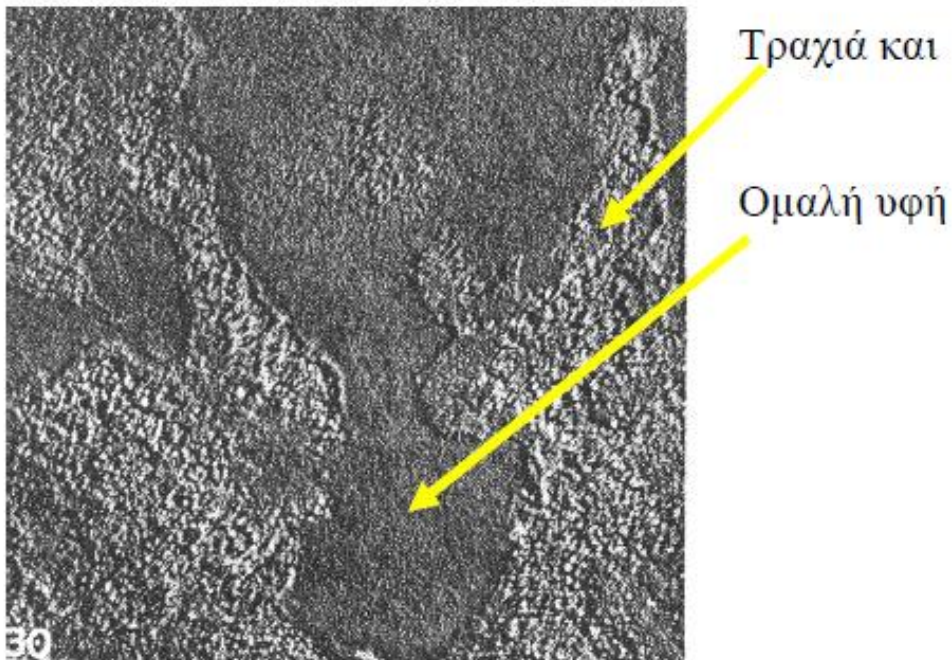
**Φωτογραφικός τόνος:** επηρεάζει το σχετικό ποσό του φωτός που ανακλάται από ένα αντικείμενο και τον χρόνο λήψης της εικόνας και το οποίο στην εικόνα ή την αεροφωτογραφία μεταφράζεται σε αποχρώσεις του γκρι. Επειδή ο τόνος εξαρτάται από την ώρα, την εποχή και τις καιρικές συνθήκες, επιδιώκεται η λήψη αεροφωτογραφιών να πραγματοποιείται υπό συνθήκες που ευνοούν μεγάλη αντίθεση του τόνου. Στη περίπτωση των δορυφορικών δεδομένων, επειδή η ώρα λήψης είναι πάντοτε η ίδια, διαφορές στις εικόνες υπάρχουν μονάχα λόγω εποχικών διαφοροποιήσεων. Ο τόνος αναφέρεται στη σχετική φωτεινότητα ή χρωματική απόδοση ενός αντικειμένου στην εικόνα. Γενικά ο τόνος είναι το βασικό στοιχείο διάκρισης χαρακτηριστικών. Οι μεταβολές στον τόνο επιτρέπουν τη διάκριση των υπόλοιπων κριτηρίων αναγνώρισης να γίνουν ορατά (Εικόνα 5.30).

**Χρώμα:** αυτό εκφράζεται με διάφορες αποχρώσεις χρωμάτων στις έγχρωμες αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες και με διαβαθμίσεις του γκρι στις ασπρόμαυρες εικόνες.



**Εικόνα 5.34** Χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας που αποδίδονται με διαφορετικούς τόνους.

**Υφή:** αναφέρεται στην κατανομή και τη συχνότητα των τονικών μεταβολών σε συγκεκριμένες περιοχές της εικόνας. Οι διαβαθμίσεις του γκρι είναι συνέπεια του ότι τα διάφορα αντικείμενα αντανακλούν ή εκπέμπουν ακτινοβολία σε διαφορετικά μήκη κύματος (Εικόνα 5.31).



**Εικόνα 5.35** Χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας με τραχιά και ομαλή υφή.

**Σχήμα:** αναφέρεται στο γενικό σχήμα, δηλαδή στη δομή και στο περίγραμμα μεμονωμένων αντικειμένων. Αποτελεί ένα ιδιαίτερο κριτήριο ορισμένων φυσικών και ανθρωπογενών χαρακτηριστικών (Εικόνα 5.32).



**Εικόνα 5.36** Αντικείμενα της γήινης επιφάνειας με χαρακτηριστική μορφή σχήματος.

**Μέγεθος:** Σε πολλές περιπτώσεις το μήκος, το πλάτος και ο όγκος είναι σημαντικά κριτήρια αναγνώρισης αντικειμένων φυσικών και μη. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της κλίμακας πολλών αντικειμένων εάν τα συγκρίνουμε με άλλα αντικείμενα με γνωστή κλίμακα π.χ. δρόμοι, κ.ά. (Εικόνες 5.33, 5.34).



**Εικόνα 5.37** Αντικείμενα της γήινης επιφάνειας τα οποία διακρίνονται με βάση το μέγεθός τους



*Εικόνα 5.38* Αντικείμενα της γήινης επιφάνειας τα οποία διακρίνονται με βάση το μέγεθός τους.



*Εικόνα 5.39* Θεμελιώδη χαρακτηριστικά ερμηνείας μιας εικόνας: **Μέγεθος:** μικρά πλοία και μεγάλα εμπορικά πλοία. **Σχήμα:** σχεδόν τετράγωνες οικίες- ακανόνιστο σχήμα για τα χαμηλά παλαιά σπίτια **Σκιά:** ύψος κτιρίων **Τόνος:** σκούροι τόνοι για το δάσος και ανοιχτοί τόνοι για τις καλλιεργούμενες εκτάσεις **Διάταξη:** η κατανομή των κτιρίων στην αστική περιοχή

**Διάταξη:** Αναφέρεται στη χωρική διεύθυνση ευδιάκριτων αντικειμένων. Επαναλαμβανόμενες διευθετήσεις φυσικών και ανθρωπογενών χαρακτηριστικών είναι συνήθεις. Τυπικά μία επανάληψη παρόμοιων τόνων και υφών θα δημιουργήσει μια ξεχωριστή διάταξη. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν γεωργικές δραστηριότητες, χαρακτηριστικά του εδάφους, κ.λπ. Το αστικό οδικό δίκτυο με τα σπίτια εκατέρωθεν είναι ένα συγκεκριμένο παράδειγμα διάταξης.

Ένα παράδειγμα στο οποίο απεικονίζονται τα διάφορα χαρακτηριστικά μιας εικόνας που είναι θεμελιώδη για την ερμηνεία της εμφανίζεται στην Εικόνα 5.39.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

### Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Avery, T.E. & Berlin, G.L. (1992). *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*. New York: Mc Millan Publishing Company, 5th edition.

Campbell, B.J., (1996). *Introduction to Remote Sensing*. New York, London: Virginia Polytechnic Institute and State University, The Guilford Publications Press, 2nd edition.

Carper, W.J., Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W. (1990). The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, p. 459-467.

Chavez, P.S., Berlin, G.L. & Acosta, A.V., (1977). Computer Processing of Landsat MSS Digital Data for Linear Enhancements. In *Proceedings, Second Annual William T. Pecora Memorial Symposium*, 235-50. Falls Church, Va.: American Society of Photogrammetry (Ratios).

Chavez, P.S., Sides, S.C. & Anderson, J.A., (1991). Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: TM & SPOT pan. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, p. 295-303.

Cliche, G., Bonn, F. & Teillet, P. (1985). Integration of the SPOT Pan channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, p. 311-316.

Crist, E.P., & Cicone, R.C. (1984). Application of the Tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 50, no. 3, pp. 343-352.

Forster, B.C. (1992). *Introduction to Remote Sensing Data Processing and Analysis*. School of Geomatic Engineering, University of New South Wales, p.68.

Gatsis, I., Pavlopoulos, A. & Parcharidis, I. (2001). Geomorphological observations and related natural hazards using remotely sensed data. A case study in Corinthos area (NE Peloponnes, S. Greece). *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 83A (4), p. 217-228.

- Guyenne, T. D. (1995). ERS1-2 multitemporal tandem image: Helsinki (Finland). *Supplement to Earth Observation Quarterly*, 84, 4.
- Jackson, R.D., (1983). Spectral Indices in N-Space. *Remote Sensing of Environment* 13: 409-21 (Ratios).
- Jensen J.R., (1986). *Introductory Digital Image Processing*. USA: Simon & Schuster Inc.
- Jutz, S.L. & Chorowicz, J., (1993). Geological mapping and detection of oblique extension structure in the Kenyan Rift Valley with a SPOT/Landsat-TM data merge. *International Journal of Remote Sensing*, 14, p. 1677-1688.
- Kauth, R.J., & Thomas, G.S. (1976). The Tasseled Cap-A Graphic Description of Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat. *Proceedings: 2nd International Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette.
- Lillesand, T.M., & Kiefer, R.W. (2000). *Remote Sensing and Image Interpretation*. USA: J. Wiley & Sons, 4th edition, p. 750.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., & Chipman, Jonathan W. (2003). *Remote Sensing and Image Interpretation*. USA: J. Wiley & Sons, 5th edition, p. 590.
- Lozano-Garcia, D. F. & Hoffer, R. M. (1993). Synergistic effects of combined Landsat-TM and SIR-B data for forest resources assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 14, p. 2677-2694.
- Mather, M.P. (1999). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images*. UK: J. Wiley & Sons, 2nd edition, p. 292.
- Munehika, C.K., Warnick, J.S., Salvaggio, C. & Schott, J.R. (1993). Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59, p. 67-72.
- Philipson, W.R., Teng, W.L. (1988). Operational Interpretation of AVHRR Vegetation Indices for World Crop Information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54: 55-59 (Ratios).
- Pohl, C. & van Genderen, J.L. (1998). Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no 5, p. 823-854.
- Ranchin, T. & Wald, L. (1993). The wavelet transform for the analysis of remotely sensed images. *International Journal of Remote Sensing*, 14, p. 615-619.
- Reichert, P. (1989). *Digital image processing. Remote Sensing applications to water resources*, FAO, pp 75-100.
- Richards, J., (1993). *Remote sensing digital image analysis. An Introduction*. Springer-Verlag, 2nd edition.
- Sabins, F.F., (1997). *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. New York: W.H. Freeman and Company, 3rd edition, p. 494.
- Shettigara, V. K., (1992). A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58, p. 561-567.
- Singh, A., (1989). Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10, p. 989-1003.
- Taylor, S.E., (1979). Measured emissivity of soils in the southeast United States. *Remote Sens. Environ.* 8:359-364.

- Teng, W.L. (1990). AVHRR Monitoring of U.S. Crops During the 1998 Drought. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56: 1143-46 (Ratios).
- Travaglia, C. (1989). *Principles of satellite imagery interpretation. Remote sensing applications to land resources*. FAO. p. 85-97.
- Tucker, C.J., (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, p. 127-150.
- Welch, R. & Ehlers, M., (1987). Merging multiresolution SPOT HRV and LANDSAT TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, p. 301-303.
- Welch, R. & Ehlers, M., (1988). Cartographic feature extraction with integrated SIR-B and Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 9 (5): 873-889.
- Weydahl, D.J., (1993). Multitemporal analysis of ERS-1 SAR images over land areas. Better Understanding of Earth Environment, *Proc. 13th Annual I.E.E.E. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '93)*, Tokyo, Japan, 18-21 August 1993 (new York: I.E.E.E.), p. 1459-1461.
- Yesou, H., Besnus, Y. & Rolet, J. (1993). Extraction of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery – a contribution to the study of the geological structures. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48, p. 23-36.
- Yesou, H., Besnus, Y. & Rolet, J. (1994). Perception of a geological body using multiple source remotely-sensed data – relative influence of the spectral content and the spatial resolution. *International Journal of Remote Sensing*, 15, p. 2495-2510.

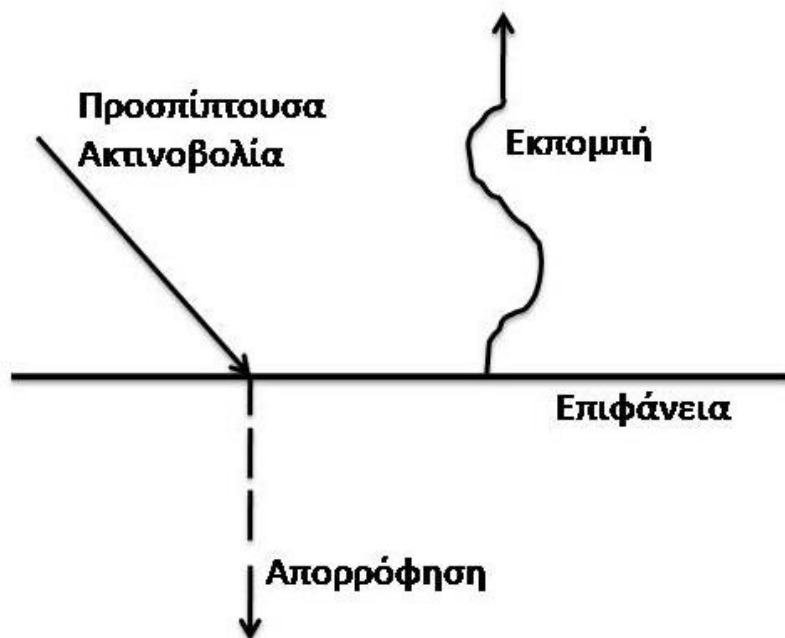
#### Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

- Μιγκίρος Γ., Παυλόπουλος Α., Παρχαρίδης Ι., Γατσής Ι., Ψωμιάδης Ε. (2003), ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ – Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες. Σημειώσεις εργαστηρίου Ορυκτολογίας-Γεωλογίας Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.
- Μιγκίρος Γ., Παυλόπουλος Α., Παρχαρίδης Ι., (1995). *Τηλεπισκόπηση. Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες*. Αθήνα: Εργαστήριο Ορυκτολογίας-Γεωλογίας, Γ.Π.Α., σελ. 108.
- Ψωμιάδης, Εμμ., (2000). Διερεύνηση και καταγραφή των αλλαγών κάλυψης γης στην ευρύτερη περιοχή της Λαμίας με επεξεργασία δορυφορικών εικόνων Landsat. Μεταπτυχιακή διατριβή. Υποβλήθηκε στο τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων, μεταπτυχιακό τομέα «Διαχείριση Περιβάλλοντος» του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, σελ. 168.

## 6. Θερμική ακτινοβολία στην τηλεπισκόπηση

### 6.1. Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι βασικότερες πηγές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι η φωτεινή ενέργεια του ήλιου και η εκπεμπόμενη θερμική ενέργεια. Η δεύτερη προέρχεται κυρίως έμμεσα από την ακτινοβολία του Ήλιου, η οποία απορροφάται από τα αντικείμενα της γήινης επιφάνειας ως μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία και επανεκπέμπεται ως μεγάλου μήκους κύματος θερμική ενέργεια (Εικόνα 6.1). Επομένως η Γη είναι μια άριστη πηγή ενέργειας για δέκτες ευαίσθητους στη θερμική υπέρυθη ζώνη, το τμήμα του φάσματος η ακτινοβολία του οποίου αντιστοιχεί σε μήκη κύματος από 3 έως 14  $\mu\text{m}$ , όπως αυτούς που μεταφέρουν τα οπτικά συστήματα καταγραφής.



**Εικόνα 6.1** Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία – Απορρόφηση από τα αντικείμενα της γήινης επιφάνειας - Εκπεμπόμενη ακτινοβολία.

Η ενέργεια που εκπέμπεται από κάθε αντικείμενο της επιφάνειας εξαρτάται άμεσα από την απόλυτη θερμοκρασία του η οποία είναι συνάρτηση κυρίως της σύστασής του. Αυτή η ενέργεια που εκπέμπει κάθε σώμα ξεχωριστά κατανέμεται μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας, σε όλα τα μήκη κύματος, που είναι διαθέσιμο για να θερμάνει μια επιφάνεια εξαρτάται:

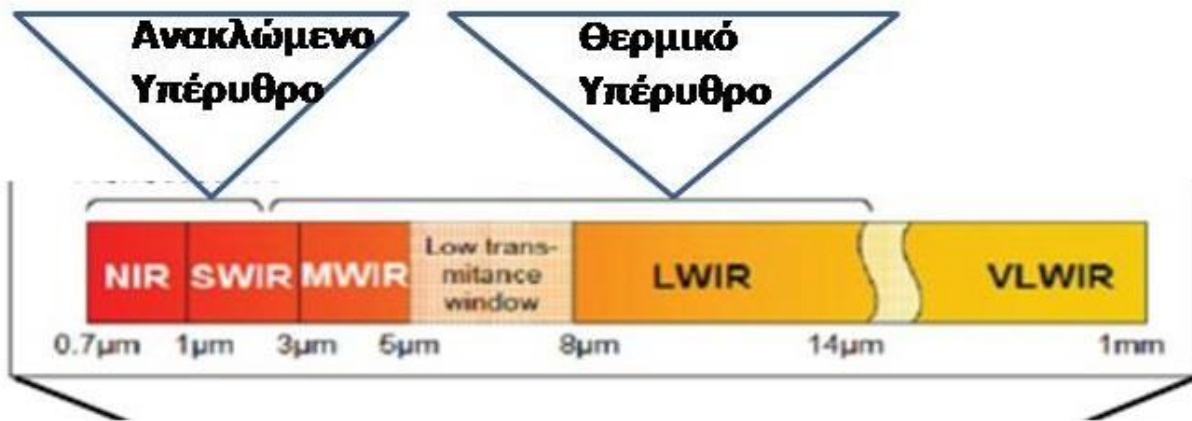
- Από το ύψος του Ήλιου από τον ορίζοντα, που είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους και του χρόνου της ημέρας και του μήνα.
- Από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως η συννεφιά, η υγρασία και η πυκνότητα του αέρα, δηλαδή μια συνάρτηση των καιρικών συνθηκών και του γεωγραφικού πλάτους.
- Από την τοπογραφία σε σχέση με το ηλιακό αζιμούθιο και το υψόμετρο· για παράδειγμα, κλίσεις που έχουν προσανατολισμό προς τον ήλιο λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα εκπομπής:



- Τόνος των αντικειμένων: τα πιο σκούρα αντικείμενα είναι καλύτεροι απορροφητές και καλύτεροι πομποί θερμικής ακτινοβολίας
- Τραχύτητα επιφάνειας: όσο τραχύτερη είναι η επιφάνεια σε σχέση με το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια και επομένως μεγαλύτερη είναι η δυνατότητα απορρόφησης και εκ νέου εκπομπής της ακτινοβολίας.
- Υγρασία: όσο περισσότερη η περιεχόμενη σε υγρασία σε ένα αντικείμενο τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητα να είναι καλός πομπός το αντικείμενο αυτό.
- Το οπτικό πεδίο και η γωνία θέασης του οργάνου καταγραφής μπορούν να επηρεάσουν την ικανότητα εκπομπής.

Μια θερμική εικόνα καταγράφει την ακτινοβολούμενη θερμική ενέργεια που εκπέμπεται από τη γήινη επιφάνεια. Στα φασματικά διαστήματα 3-5μm και 8-14μm του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος τα φυσικά σώματα απορροφούν κυρίως την ηλιακή ακτινοβολία και την ανακλούν ελάχιστα.



### Υπερυθρο Τμήμα ΗΜΦ

Εικόνα 6.2 Το υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Η θερμοκρασία που προέρχεται από το θερμικό υπέρυθρο μετριέται από τον νόμο των Stefan-Boltzman:

$$F_b = \sigma \times T_{kin}^4$$

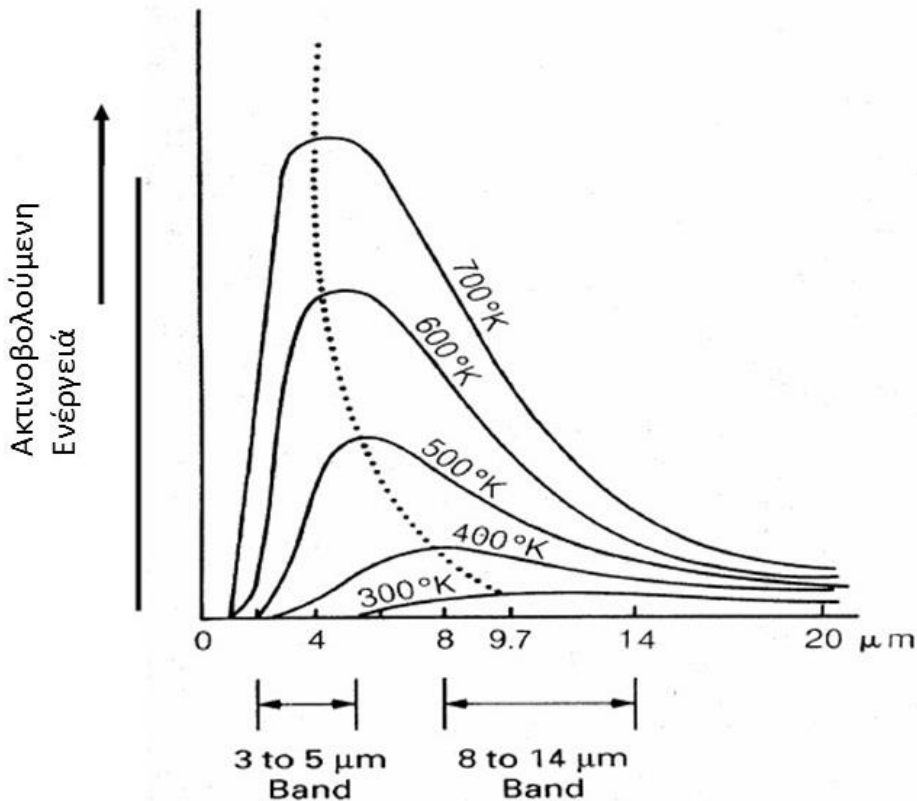
όπου  $T_{kin}^4$  η κινητική ενέργεια των μορίων ενός υλικού, από την οποία και προέρχεται η θερμότητα.

Όσα υλικά έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν (0 Kelvin, -273,16°C, -459,69°F) εκπέμπουν ακτινοβολία  $\epsilon$  (emissivity) που ισούται με τον λόγο:

$$\epsilon = \frac{\text{ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο}}{\text{ακτινοβολία που εκπέμπεται από το μαύρο σώμα}}$$

Ως μαύρο σώμα λαμβάνεται το ιδανικό υλικό που απορροφά όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και έτσι η ανάκλαση και η διάχυση είναι μηδέν, ενώ η εκπομπή του είναι ίση με την μονάδα. Κατ' αυτόν τον τρόπο η

αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας μιας επιφάνειας εξαρτάται από την αύξηση ή μείωση της θερμότητας του υλικού στην επιφάνειά του.



**Εικόνα 6.3** Καμπύλες φασματικής κατανομής της ακτινοβολούμενης ενέργειας από αντικείμενα σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Σημειώνονται και τα φασματικά κανάλια εκπομπής (Estes et al., 1983).

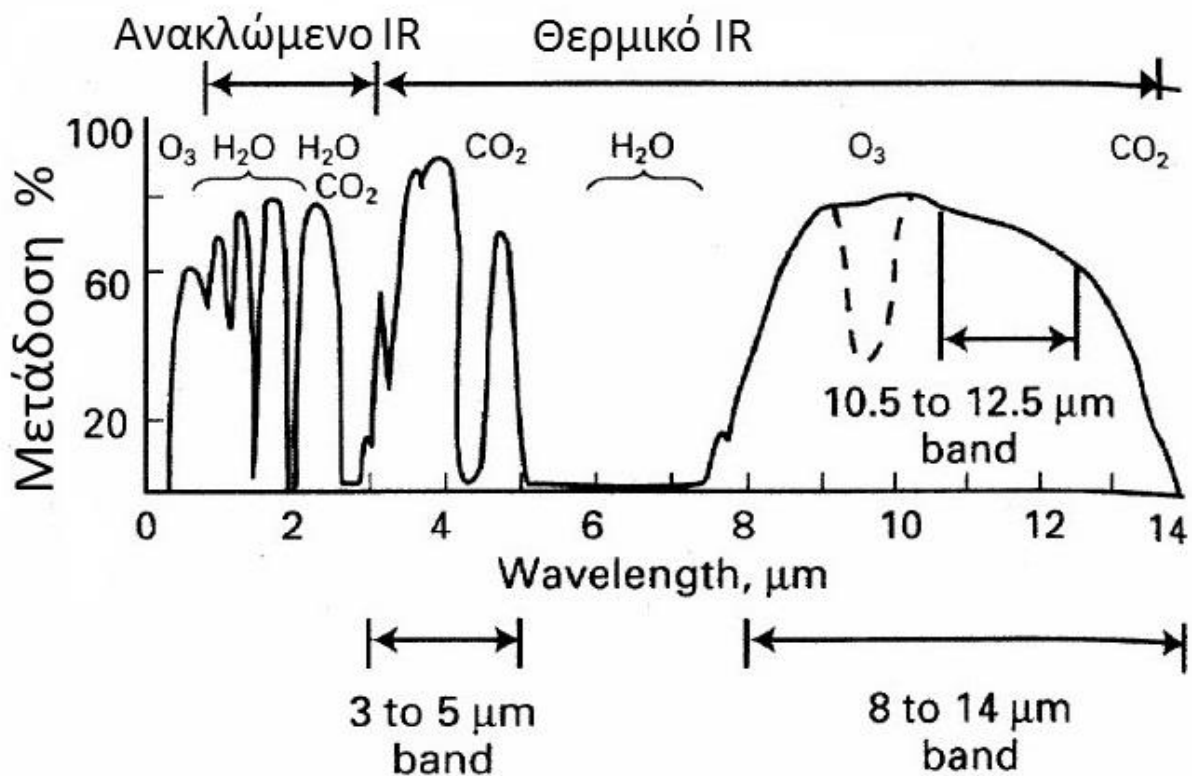
## 6.2 Θερμικοί σαρωτές

Οι αισθητήρες που μπορούν να ανιχνεύσουν τη θερμική υπέρυθη ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από τα χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες σχετικά με τις θερμικές ιδιότητες αυτών των υλικών. Όπως και στην περίπτωση της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας, οι αισθητήρες είναι παθητικά συστήματα που βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία ως την απόλυτη πηγή ενέργειας. Επειδή η θερμοκρασία της επιφάνειας υφίσταται αλλαγές κατά τη διάρκεια της ημέρας, τα συστήματα ανίχνευσης του θερμικού υπέρυθρου είναι ευαίσθητα στην ώρα της ημέρας κατά την οποία γίνεται η λήψη των εικόνων.

Οι θερμικοί σαρωτές έχουν ουσιαστικά το ίδιο τρόπο λειτουργίας με τους πολυφασματικούς σαρωτές, μόνο που περιορίζονται στο θερμικό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι θερμικοί σαρωτές έχουν τη δυνατότητα της λήψης δεδομένων με τη βοήθεια ειδικών φίλτρων, σε δύο διαφορετικά ατμοσφαιρικά παράθυρα, 3-5  $\mu\text{m}$  και 8-14  $\mu\text{m}$ .

Όμως εξαιτίας της μεγάλης απορρόφησης στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας από διάφορα αέρια, όπως το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το όζον ( $\text{O}_3$ ) και τους υδρατμούς του νερού, τα δεδομένα λαμβάνονται κυρίως στο διάστημα 10,5-12,5  $\mu\text{m}$  του φάσματος όπου η απορρόφηση είναι μικρότερη (Εικόνα 6.4).

Οι δέκτες μετατρέπουν τη λαμβανόμενη θερμική υπέρυθη ακτινοβολία σε ηλεκτρικά σήματα ανάλογα με την έντασή της. Μετά τη μετατροπή της ακτινοβολίας σε ηλεκτρικής μορφής σήμα και την καταγραφή του σε μαγνητικές ταινίες, ακολουθεί η επεξεργασία του στο εργαστήριο για την παραγωγή της εικόνας.



**Εικόνα 6.4** Τα φασματικά κανάλια που χρησιμοποιούνται στη θερμική υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (κατά Sabins, 1997).

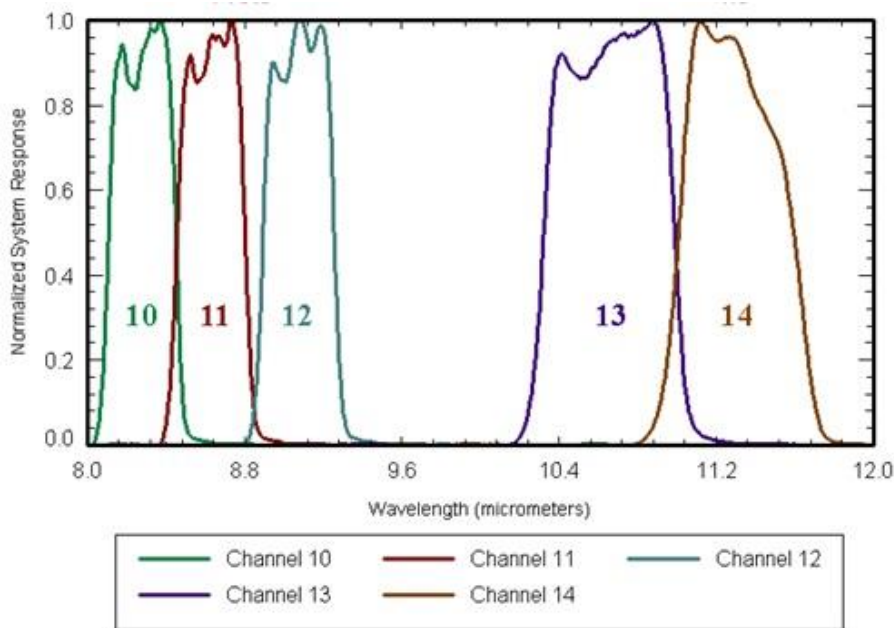
Η επεξεργασία μιας θερμικής εικόνας περιλαμβάνει την εφαρμογή των ακόλουθων διαδικασιών:

- Γεωμετρική διόρθωση, βαθμονόμηση
- Επέκταση των «κρυμμένων» πληροφοριών της εικόνας
- Θερμική σύγκριση και βελτίωση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων

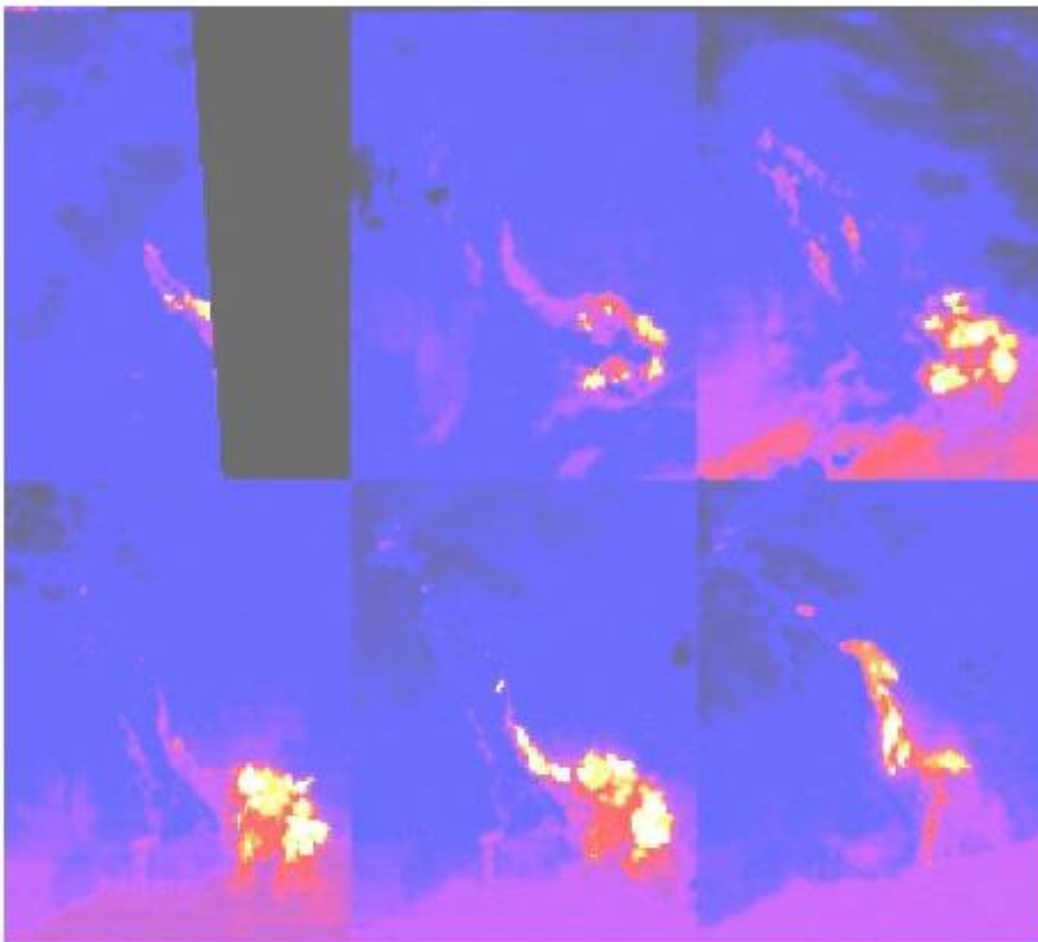
Η γεωμετρική διόρθωση θεωρείται βασικότερη ώστε να επιτευχθεί η διόρθωση των παραμορφώσεων της εικόνας που προέρχονται λόγω των κλυδωνισμών και της «ολίσθησης» της πλατφόρμας του μεταφορέα του δέκτη. Υπάρχουν συγκεκριμένοι αλγόριθμοι που βοηθούν με αρκετά ικανοποιητικό τρόπο στην επίλυση αυτών των προβλημάτων (Tonelli, 1989).

Οι περισσότεροι θερμικοί δέκτες καταγράφουν τη συγκέντρωση της εκπεμπόμενης ενέργειας ή **ροή ενέργειας**, των αντικειμένων, που ορίζει τη θερμική του ενέργεια και μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια θερμικών **ραδιομέτρων**. Αντίθετα, οι θερμικοί δέκτες δεν μπορούν να μετρήσουν τη θερμοκρασία ενός σώματος η οποία προέρχεται από την κινητική ενέργεια των μορίων του και μετριέται με το θερμόμετρο. Η θερμική ενέργεια εκπέμπεται από τις επιφάνειες όλων των αντικειμένων της γήινης επιφάνειας συνεχώς, έτσι είναι δυνατόν να ανιχνευθεί τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα.

Δύο από τα πιο γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα καταγραφής είναι του **LANDSAT** (Landsat 5 TM φασματική ζώνη 6, 10,4-12,5 μm, pixel= 120 mX120 m και **Landsat7** ETM φασματική ζώνη 6, 10,4-12,5 μm, pixel size=90 m X 90 m) και του **ASTER** (Band 10: 8.125 - 8.475 μm, Band 11: 8.475 - 8.825 μm, Band 12: 8.925 - 9.275 μm, Band 13: 10.25 - 10.95 μm, Band 14: 10.95 - 11.65 μm, pixel = 90 x 90 m) (Εικόνες 6.5, 6.6).



**Εικόνα 6.5** Κατανομή στο ΗΜΦ των θερμικών φασματικών ζωνών του ASTER



**Εικόνα 6.6** Η σειρά των νυκτερινών θερμικών εικόνων ASTER εμφανίζει τη δράση ηφαιστείου στη Χαβάη, με τη λάβα να καταλήγει στη θάλασσα. Κάθε εικόνα είναι 9x12 χιλ. Ξεκινώντας από πάνω αριστερά οι εικόνες έχουν περίπου έναν μήνα χρονική διαφορά το 2000. Είναι η φασματική ζώνη 14 κωδικοποιημένη με χρώματα, από το μαύρο (ψυχρότερα) στο μπλε, κόκκινο, κίτρινο, λευκό (θερμότερο).

### 6.3 Βασικές ιδιότητες της θερμικής ενέργειας

α) **Θερμική Αγωγιμότητα (Thermal conductivity-K):** αναπαριστά το εύρος μέσα από το οποίο η θερμότητα περνάει μέσα σε ένα υλικό. Εκφράζεται σε θερμίδες, ανά εκατοστό, ανά δευτερόλεπτο και ανά βαθμό Κελσίου ( $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ), δηλαδή εκφράζει τον αριθμό των θερμίδων που θα περάσουν μέσα από μία επιφάνεια  $1 \text{ cm}^2$ , σε χρόνο  $1 \text{ sec}$  ανά  $1 \text{ C}$  εύρος θερμοκρασίας.

β) **Θερμοχωρητικότητα (Thermal capacity-c):** είναι η ικανότητα κάθε αντικειμένου να αποθηκεύει θερμότητα. Εκφράζει δηλαδή τον αριθμό των θερμίδων που απαιτούνται για να αυξηθεί η θερμοκρασία  $1 \text{ gr}$  κατά  $1 \text{ C}$  ( $\text{cal}/\text{gr} \cdot \text{C}$ ). Η θερμοχωρητικότητα των περισσότερων γεωλογικών υλικών είναι σχεδόν όμοια, ενώ το νερό έχει πολύ μεγάλη θερμοχωρητικότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά.

Με την προσθήκη της πυκνότητας (density-p) ή του λόγου της μάζας δια του όγκου προστίθεται μια καινούργια έννοια, αυτή της **θερμικής αποθήκευσης (thermal storage)** που είναι παράγωγο του γινομένου της πυκνότητας (p) με τη θερμοχωρητικότητα (c), δηλαδή:

$$C = p \cdot c$$

γ) **Θερμική αδράνεια (Thermal inertia-P):** είναι η μέτρηση της θερμικής απόκρισης ενός υλικού στις μεταβολές θερμοκρασίας και εκφράζεται σε θερμίδες ανά τετραγωνικό εκατοστό, ανά τετραγωνική ρίζα του δευτερολέπτου και ανά βαθμό Κελσίου ( $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1/2} \cdot \text{C}$ ). Η θερμική αδράνεια εκφράζεται σαν:

$$P = (K \cdot p \cdot c)^{1/2}$$

Όπου, K= θερμοχωρητικότητα, p= πυκνότητα, c= θερμοχωρητικότητα

Ο σημαντικότερος παράγοντας που την επηρεάζει είναι η πυκνότητα.

Στο μεγαλύτερο μέρος της η θερμική αδράνεια αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της πυκνότητας ενός υλικού. Υλικά με χαμηλή θερμική αδράνεια έχουν μικρή θερμοχωρητικότητα, πυκνότητα και θερμική αγωγιμότητα. Ξηρά, πορώδη υλικά συνήθως έχουν χαμηλή θερμική αδράνεια. Αυτά τα υλικά αποκτούν τη μέγιστη θερμοκρασία την ημέρα και την ελάχιστη τη νύχτα, γεγονός που συνοδεύεται και από μία μέγιστη διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας,  $\Delta T$  ( $T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ ) κατά τη διάρκεια της ημέρας (24 ώρες). Αντίθετα, τα υλικά με υψηλή θερμική αδράνεια παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στις μεταβολές της θερμοκρασίας, έτσι είναι σχετικά κρύα κατά τη διάρκεια της ημέρας και σχετικά ζεστά κατά τη διάρκεια της νύχτας. Αυτά παρουσιάζουν περισσότερο ομοιόμορφη επιφανειακή θερμοκρασία σε ένα σχετικά μικρό θερμοκρασιακό εύρος, σε σχέση με τα αντικείμενα με χαμηλή θερμική αδράνεια.

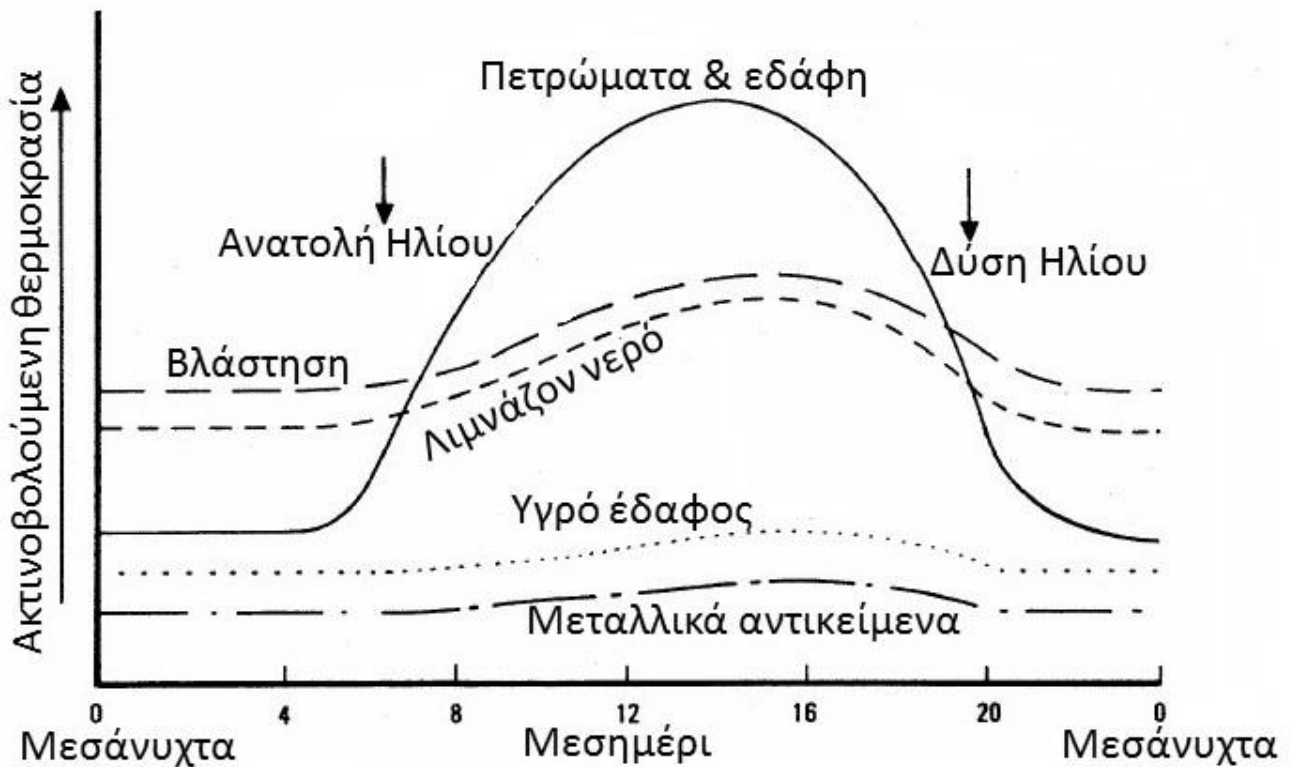
δ) **Θερμική διαχυτικότητα (Thermal Diffusivity-κ):** Οι ίδιες τιμές που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της θερμικής αδράνειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον καθορισμό της θερμικής διαχυτικότητας, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\kappa = K / (c \cdot p) = K/C \text{ (cm}^2/\text{sec)}$$

Στον τομέα της τηλεπισκόπησης η θερμική διαχυτικότητα ελέγχει την ικανότητα των αντικειμένων να μεταφέρουν θερμότητα από την επιφάνεια του εδάφους στο υπέδαφος κατά τη διάρκεια της ζεστής ημέρας και από το υπέδαφος στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια της ψυχρής νυχτερινής περιόδου. Για παράδειγμα, ο γρανίτης έχει μεγαλύτερη θερμική διαχυτικότητα από ό,τι ο βασάλτης και έτσι μπορεί να μεταφέρει μεγαλύτερο ποσοστό θερμότητας στα βαθύτερα στρώματα κατά τη διάρκεια της ημέρας.

ε) **Ημερήσιες μεταβολές θερμοκρασίας (Diurnal temperature variation):**

Τα διάφορα αντικείμενα παρουσιάζουν μια ημερήσια μεταβολή. Στην Εικόνα 6.7 φαίνεται μια τυπική ημερήσια μεταβολή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας διάφορων αντικειμένων. Η πιο απότομη αλλαγή θερμοκρασίας εμφανίζεται με απότομα κύματα που λαμβάνουν χώρα νωρίς την αυγή και αργά το απόγευμα. Στην τομή δύο τέτοιων κυμάτων από διαφορετικά σώματα σχηματίζονται οι λεγόμενοι **θερμικοί κροσσοί συμβολής**, όπου η εκπεμπόμενη θερμοκρασία για τα δύο αντικείμενα είναι ακριβώς ίδια (Ψωμιάδης, 1997).



**Εικόνα 6.7** Καμπύλες ημερήσιας ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας για διάφορα αντικείμενα της γήινης επιφάνειας (κατά Sabins, 1997).

Διάφορες εφαρμογές του θερμικού φάσματος του Landsat TM έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν για έρευνα και εξερεύνηση διαφόρων φυσικών φαινομένων. Κάποιες από αυτές είναι η χρησιμοποίησή του για την αναγνώριση θερμικών νησίδων στην περιοχή των Αθηνών (Παρχαρίδης κ.ά., 1994), η εκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας με ανίχνευση της ατμοσφαιρικής επίδρασης (Price, 1983), η μέτρηση της θερμικής εκπεμπτικότητας των εδαφών (Taylor, 1979) καθώς και η θερμική φασματική συμπεριφορά κάποιων πετρωμάτων και ορυκτών (Lyon 1972, 1975).

#### 6.4. Ερμηνεία των θερμικών εικόνων

Μια θερμική υπέρυθη εικόνα μοιάζει με μια παγχρωματική εικόνα, με τη διαφορά ότι αυτή αντιπροσωπεύει την εκπεμπόμενη θερμική ενέργεια και όχι την ανακλώμενη ενέργεια. Οι θερμικές εικόνες απεικονίζουν την αντίθεση στις διαβαθμίσεις του γκρι, που προέρχονται από τη διαφορετική θερμική ενέργεια την οποία εκπέμπει κάθε σώμα. Οι ανοιχτότεροι τόνοι αναπαριστούν θερμές περιοχές, ενώ οι σκοτεινότερες τις ψυχρότερες περιοχές (Εικόνα 6.8).



**Εικόνα 6.8** Η σχετικά ψυχρή επιφάνεια του ποταμού, οι δασικές λωρίδες στις όχθες του ποταμού και τα πεδία των πλήρως αναπτυγμένων καλλιεργειών εμφανίζονται με σκούρα εικονοστοιχεία, ενώ τα φωτεινότερα εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε γυμνό έδαφος σε αυτή την ημερήσια καλοκαιρινή λήψη από τον Landsat 7 ETM+, φασματικό κανάλι 6 και χωρική διακριτική ικανότητα 60 μέτρα/pixel.



**Εικόνα 6.9** Σε αυτή τη νυχτερινή θερμική υπέρυθρη εικόνα της Βόρειας Ερυθραίας και της Ερυθράς Θάλασσας, το νερό είναι θερμότερο από την επιφάνεια της Γης και ως εκ τούτου εμφανίζεται με πιο φωτεινούς τόνους εικονοστοιχείων στο επάνω δεξιά τμήμα της εικόνας. Οι παραλλαγές στη φωτεινότητα στην ξηρά αφορούν τις μεταβολές στις θερμικές ιδιότητες και, σε μικρότερο βαθμό, στην τοπογραφία.

Αναλυτικότερα για τα διάφορα αντικείμενα ισχύει:

- Το νερό σε αντίθεση με το έδαφος: Οι υδάτινες μάζες είναι γενικά ψυχρότερες (σκοτεινές περιοχές) σε σχέση με το έδαφος κατά τη διάρκεια της ημέρας (Εικόνα 6.9). Κατά τη διάρκεια της νύχτας συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, αφού η επιφανειακή θερμοκρασία αντιστρέφεται και έτσι το νερό είναι θερμότερο λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητάς του, οπότε και εμφανίζεται με ανοιχτότερους τόνους του γκρι.

- Η βλάστηση: Τα δένδρα με κανονικό φύλλωμα συνήθως εμφανίζονται με σκούρους τόνους (ψυχρά) κατά τη διάρκεια της ημέρας και με ανοιχτότερους τόνους τη νύχτα (θερμά). Αυτό οφείλεται στο ότι η εξατμισοδιαπνοή είναι μέγιστη τις πρωινές ώρες, γεγονός που μειώνει τη θερμοκρασία των φύλλων (λανθάνουσα απώλεια θερμότητας). Αυτός ο τύπος της βλάστησης εμφανίζεται θερμός τη νύχτα λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε νερό και της αντιστροφής του ζεστού αέρα από την επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια της νύχτας προς τα φύλλα (ο κρύος αέρας από τα υψηλότερα στρώματα πηγαίνει κοντά στο έδαφος). Τα δένδρα γενικά δεν επηρεάζονται από την επίδραση των θερμικών ιδιοτήτων του εδάφους. Το γρασιδί και άλλα χαμηλού ύψους φυτά είναι θερμότερα κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά γρήγορα πλησιάζουν την τοπική θερμοκρασία του αέρα μετά τη δύση του ηλίου. Σε μια ήρεμη νύχτα ο αέρας κοντά στο έδαφος είναι ψυχρότερος απ' ό,τι λίγα μέτρα ψηλότερα, έτσι η χαμηλή βλάστηση απεικονίζεται με σκοτεινότερους τόνους απ' ό,τι τα δένδρα. Η χαμηλή βλάστηση επηρεάζεται άμεσα από τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους.

- Συνεκτικά και μη συνεκτικά υλικά: Εκτεθειμένα πετρώματα στην επιφάνεια εμφανίζονται γενικά με διαφορετικές διαβαθμίσεις του γκρι λόγω της διαφορετικής τους θερμικής αδράνειας και θερμικής διαχυτικότητας. Στις ημερήσιες εικόνες, τα επιφανειακά πετρώματα εμφανίζονται με σκοτεινότερους τόνους απ' ό,τι τα μη συνεκτικά υλικά, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στις νυχτερινές εικόνες.

- Επίπεδα υλικά (Pavement materials): Υλικά όπως η άσφαλτος, το τσιμέντο και οι χωμάτινοι δρόμοι, εμφανίζονται σχετικά ζεστά (ανοιχτοί τόνοι) τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα. Είναι δηλαδή γενικά καλοί απορροφητές της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και, επειδή έχουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, έχουν την ικανότητα να εκπέμπουν θερμική ενέργεια για πολλές ώρες μετά τη δύση του Ηλίου. Λιγότερο φωτεινοί το βράδυ εμφανίζονται οι χωμάτινοι δρόμοι γιατί χάνουν πιο εύκολα τη θερμική τους ενέργεια.

- Μεταλλικές επιφάνειες: Οι γυμνές μεταλλικές επιφάνειες εμφανίζονται με σκούρους τόνους τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας τους. Η λεία επιφάνειά τους παρουσιάζει πολύ μεγάλα ποσοστά ανάκλασης και μικρότερα απορρόφησης και εκπομπής, σε σχέση με άλλα σώματα, και συνεπώς εκπέμπουν πολύ λιγότερη θερμική ενέργεια.

- Πηγές υψηλής θερμοκρασίας: Η θερμική εκπομπή από σημεία όπως είναι το σημείο εκδήλωσης μιας πυρκαγιάς, ένα εν ενεργεία ηφαίστειο ή οι γεωθερμικές πηγές είναι σχετικά ανεπηρέαστα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία παραμένει αρκετά σταθερή και έτσι αυτοί εμφανίζονται με πολύ έντονα ανοιχτούς τόνους όλο το 24ωρο.

- Καλυπτόμενα χαρακτηριστικά: Σε ορισμένες περιπτώσεις κάποια καλυμμένα χαρακτηριστικά ανιχνεύονται από τους θερμικούς δέκτες ακόμα και αν αυτοί δεν έχουν τη δυνατότητα «διείσδυσης» στην πληροφόρηση. Για παράδειγμα, σε νυχτερινές θερμικές εικόνες μπορεί να ανιχνευτεί ένα ρέμα που βρίσκεται κάτω από πυκνή βλάστηση. Αυτό συμβαίνει γιατί η βλάστηση λαμβάνει τη θερμότητα που προέρχεται από το ρέμα και στη συνέχεια αυτή εκπέμπει θερμική ενέργεια που έμμεσα υποδηλώνει την ύπαρξη του ρέματος.

- «Φαντάσματα»: Το φαινόμενο των φαντασμάτων κάποιων συγκεκριμένων σωμάτων μπορεί να εμφανιστεί σε μια θερμική εικόνα, όταν το αντικείμενο που δημιούργησε μια διαφοροποίηση στη θερμοκρασία σε σχέση με το έδαφος έχει μετακινηθεί. Για παράδειγμα, αυτοκίνητα που είναι παρκαρισμένα σε άσφαλτο κατά τη διάρκεια της μέρας δημιουργούν από κάτω έναν χώρο (όσο το εμβαδόν τους) με χαμηλότερη θερμοκρασία, έτσι όταν μετακινηθούν αφήνουν ουσιαστικά ένα σημάδι χωρίς να βρίσκονται εκεί και δίνουν την εντύπωση ενός φαντάσματος.



## 6.5 Χρήσεις των θερμικών-υπέρυθρων εικόνων

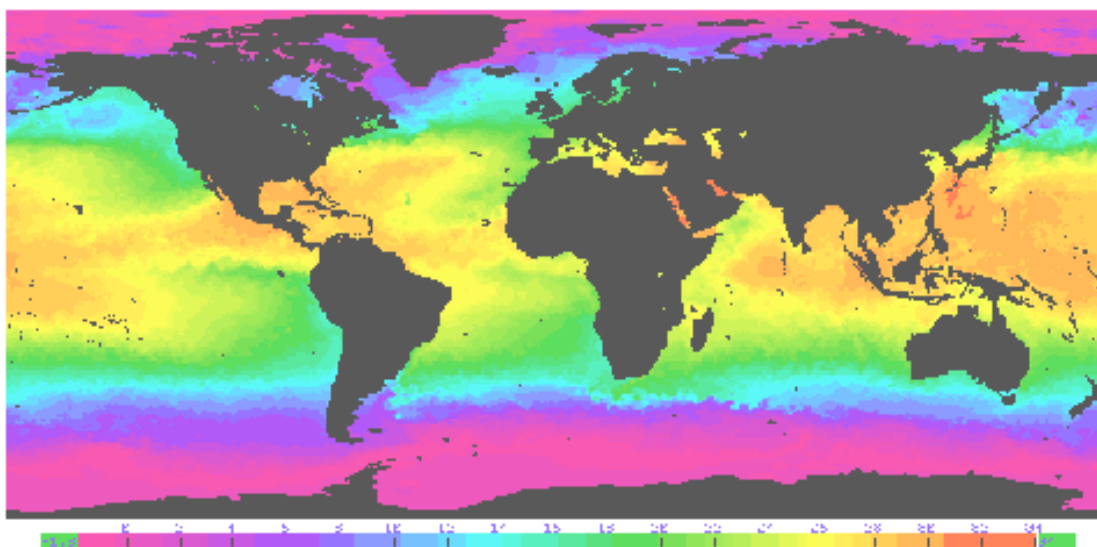
Από τις φασματικές εικόνες μπορούν να προκύψουν ποικίλες πληροφορίες οι οποίες είναι εφαρμόσιμες σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους.

Μερικές από αυτές τις πληροφορίες είναι οι ακόλουθες:

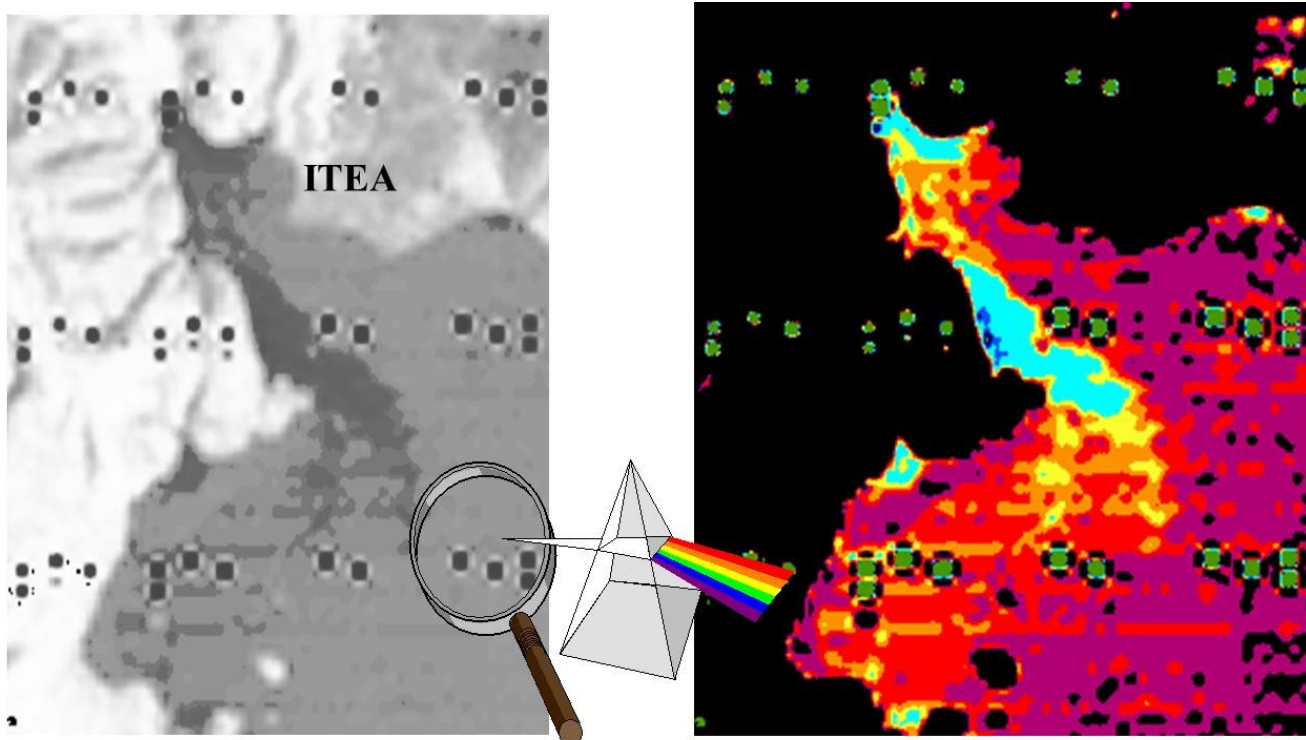
- Στη γεωλογία οι θερμικές εικόνες χρησιμοποιήθηκαν για χαρτογράφηση γεωλογικών δομών, για την αναγνώριση και διάκριση διαφόρων πετρωμάτων, την παρακολούθηση ενεργών ηφαιστείων, την ανακάλυψη επιφανειακών ή υπεδαφικών γεωθερμικών χαρακτηριστικών, την ανίχνευση υπόγειων ταμιευτήρων μικρού βάθους, πετρελαίου κ.ά.
- Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή πληροφοριών όσον αφορά τις υδάτινες μάζες (Εικόνες 6.10 και 6.11). Για παράδειγμα, θερμές επιδράσεις που είναι αποτέλεσμα της θερμικής ρύπανσης των υδάτων μετά την απόρριψη λυμάτων σε λίμνες και ποτάμια μπορούν εύκολα να ανιχνευθούν εξαιτίας της μεγάλης θερμικής διαφοροποίησης μεταξύ των αποβλήτων και των υδάτων. Ταυτόχρονα, είναι εφικτός ο εντοπισμός θερμών πηγών ή τις εκροές των υπόγειων ψυχρών νερών στη θάλασσα ή σε ένα ποτάμι. Επίσης, είναι δυνατή η ανίχνευση πετρελαιοκηλίδων από την επίσης διαφορετική θερμική εκπομπή του πετρελαίου από το περιβάλλον ύδωρ.
- Στη χαρτογράφηση εδαφών και της επιφανειακής υγρασίας.
- Στην παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών.
- Στη μελέτη της εξατμισοδιαπνοής της βλάστησης.
- Στον εντοπισμό αρχαιολογικών χώρων, λόγω της ικανότητάς τους να ανιχνεύουν ακόμα και ελάχιστες θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις (ημέρα και νύχτα) που μπορούν να συσχετιστούν με θαμμένα ή δύσκολα διακριτά αντικείμενα της γήινης επιφάνειας.

Οι θερμικές εικόνες επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες του περιβάλλοντος, ορισμένοι από τους οποίους αναφέρονται στη συνέχεια και ένας ερμηνευτής οφείλει να γνωρίζει:

- α) Από τα σύννεφα και τους επιφανειακούς ανέμους: αυτοί δημιουργούν θερμικά τμήματα «ομίχλης» κοντά στην επιφάνεια του εδάφους
- β) Την ώρα της ημέρας: οι ημερήσιες εικόνες καταγράφουν τη διαφορετική εκπεμπόμενη θερμότητα και τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά.



**Εικόνα 6.10** Χάρτης ανάλυσης 50 km/pixel της Παγκόσμιας Θαλάσσιας Επιφανειακής Θερμοκρασίας (SST) για την περίοδο 11-14 Αυγούστου 2001 από δεδομένα NOAA AVHRR θερμικό υπέρυθρο. Η εμφάνιση μη φυσιολογικών κλιματικών συνθηκών, όπως το El-Nino, μπορεί να προβλεφθεί από τις παρατηρήσεις αυτού του τύπου, δηλαδή την απόκλιση της ημερήσιας SST από τη μέση SST. (Πηγή: NOAA / NESDIS)



**Εικόνα 6.11** Αριστερά θερμική εικόνα Landsat 5 της περιοχής Ιτέας όπου οι πιο φωτεινές περιοχές αυτές αντιστοιχούν στην θερμότερη Ηπειρωτική ζώνη. Οι γκρι περιοχές είναι οι τιμές της θάλασσας (όπου πλέον δεν επηρεάζονται από την θερμοκρασία του υπόγειου νερού) και τέλος οι πολύ σκουρες περιοχές στον κόλπο αντιπροσωπευουν ριχελς που δείχνουν την διαφυγή του υπόγειου ύδατος στις διάφορες μορφές διάχυσής του. Η δεξιά εικόνα έχει προκύψει από την αριστερή με την εφαρμογή της μεθόδου της Τεμαχιοποίησης της Πυκνότητας (Density Slicing), με στόχο την καλύτερη αναγνώριση της έκτασης του φαινομένου και ερμηνείας διαφόρων παραμέτρων του. ταυτόχρονα εφαρμόστηκε φίλτρο χαμηλής διέλευσης (low pass)- majority με κυψελίδα 3 x 3, με σκοπό την ομογενοποίηση των διαφόρων ενοτήτων. Εμφανής είναι ο περιοδικός θόρυβος στις εικόνες φαινόμενο συχνό στις θερμικές εικόνες του Landsat 5 Parcharidis et al. 1998).

γ) Επιφανειακή υγρασία και πυκνότητα της βλάστησης: αυτοί οι παράγοντες επιδρούν καλύπτοντας κατά κάποιον τρόπο άλλα χαρακτηριστικά στις θερμικές εικόνες και για αυτό και τα συμπεράσματα είναι πιο αξιόπιστα σε εικόνες ξηρών και ημίξηρων περιοχών.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

### Ξερόγλωσση βιβλιογραφία

Estes, J.E., Hajic, E.J. & Tinney, L.R., (1983). Fundamentals of image analysis-analysis of visible and thermal infrared data in Colwell, R.N. (ed.), *Manual of remote sensing*, second edition: ch. 24, p. 987-1124 Falls Church, VA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Lyon, R.J.P., (1972). *An Introduction to Atmospheric Radiation*. New York: Academic Press,.

Lyon, R.J.P. and A.A. Green, (1975). *Reflectance and emittance of terrain in the mid-infrared (6-25 μm) region*, in *Infrared and Raman Spectroscopy of Lunar and Terrestrial Minerals*, C. Car red., Academic Press, San Diego, p. 165-195.

- Parcharidis, I., Psomiadis, E., Stamatis, G. (1998): Using Landsat TM images to study karstic phenomena. *ITC Journal* 1998-2, 118-123.
- Price, J. C. (1983). Estimating surface temperatures from satellite thermal infrared data-a simple formulation for the atmospheric effect. *Remote Sens. Environ.*13:353-361
- Sabins, F.F. (1997). *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. New York: W.H. Freeman and Company, 3rd edition, p. 494.
- Taylor, S.E. (1979). Measured emissivity of soils in the southeast United States. *Remote Sens. Environ.* 8:359-364.

Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

- Παρχαρίδης, Ι., Χρονοπούλου-Σερέλη, Α., Χρονόπουλος, Ι. (1994) . Η αναγνώριση θερμικών νησίδων στην περιοχή Αθηνών με χρήση δορυφορικών εικόνων LANDSAT 5 TM. Συστήματα παρατήρησης και παρακολούθησης της Γης. 1η Συνάντηση Εργασίας, Ιανουάριος 1995 Αθήνα. Πρακτικά 460-466.

## 7. Η τηλεπισκόπηση με τη χρήση της μικροκυματικής ακτινοβολίας

### 7.1 Εισαγωγή

Η κατανόηση της τηλεπισκόπησης με ραντάρ απεικόνισης είναι πιο δύσκολη από ό,τι με οπτικά μέσα, διότι η τεχνολογία από μόνη της είναι πιο πολύπλοκη και τα δεδομένα που καταγράφονται είναι πιο ποικίλα. Θα πρέπει πρώτα να απαντηθεί το ερώτημα γιατί χρειαζόμαστε το απεικονιστικό ραντάρ. Μια απλή απάντηση μπορεί να βρεθεί αν εξετάσουμε το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η τεχνολογία για τα οπτικά συστήματα λειτουργεί σε μήκη κύματος της τάξης περίπου 1μm, ενώ τα συστήματα ραντάρ σε μήκη κύματος μερικών εκατοστών (ανάλογα το band στο οποίο λειτουργεί το εκάστοτε όργανο διαφέρει και το μήκος κύματος). Από αυτή τη διαφορά είναι προφανές ότι τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της Γης εμφανίζονται διαφορετικά στα ραντάρ από ό,τι στα οπτικά. Επίσης, πέρα από αυτό δίνουν τη δυνατότητα ανίχνευσης χαρακτηριστικών και στοιχείων τα οποία είναι αδύνατο τα οπτικά μέσα να ανιχνεύσουν. Αυτή η δυνατότητα είναι επίσης αποτέλεσμα της διείσδυσης που μπορούν να επιτύχουν τα συστήματα που λειτουργούν στο μικροκυματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, λόγω του μεγάλου μήκους κύματος. Σε πολλές περιπτώσεις, λαμβάνοντας υπόψη πάντα και άλλους παράγοντες όπως π.χ. η υγρασία, όσο μεγαλύτερο το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερη και η ικανότητα διείσδυσης.

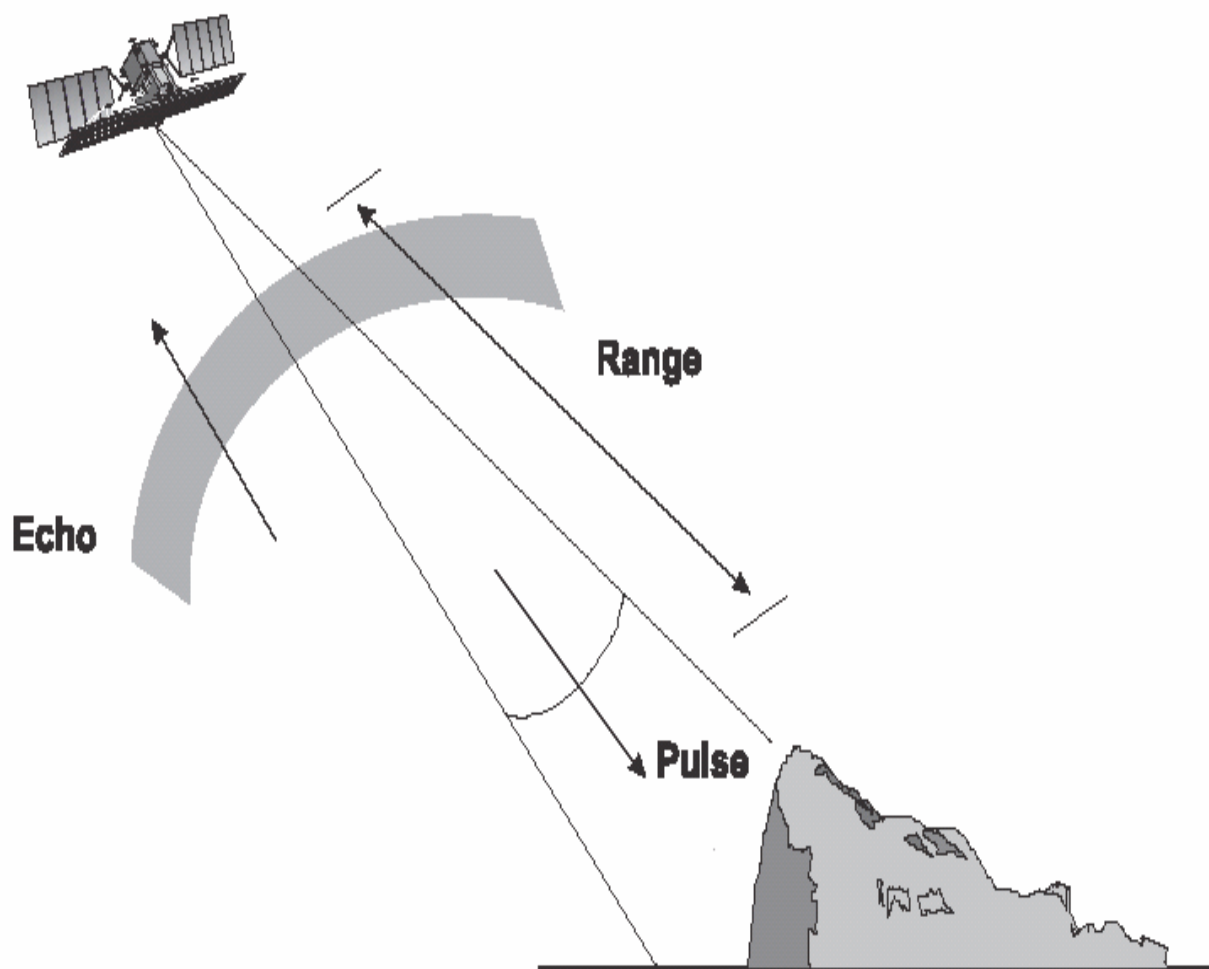
Με το ραντάρ, τέλος, έχουμε τον έλεγχο των ιδιοτήτων της προσπίπτουσας ενέργειας. Αυτό μας επιτρέπει να έχουμε μια ευρεία ποικιλία των τύπων δεδομένων που πρέπει να καταγράφονται, και καινοτόμες εφαρμογές όπως η τοπογραφική αποτύπωση, η ανίχνευση της αλλαγής του τοπίου και, σε περιορισμένο βαθμό, η τρισδιάστατη μοντελοποίηση της λεπτομέρειας όγκου ενός στοιχείου.

Δεδομένου ότι υπάρχουν τόσο πολλές έννοιες και τεχνικές που πρέπει να αφομοιωθούν, το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια επισκόπηση του θέματος γύρω από τις βασικές αρχές, τη γεωμετρία λήψης, τις ιδιότητες των εικόνων, τα δορυφορικά συστήματα ραντάρ και, τέλος, την επεξεργασία των δεδομένων.

### 7.2 Βασικές αρχές Εικονοληπτικών Radar

Το μικροκυματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος περιλαμβάνει μήκη κύματος από 1mm έως 1m, τα οποία δεν είναι αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι. Οι αισθητήρες των δορυφόρων που χρησιμοποιούν αυτά τα μήκη κύματος μπορούν να καταγράφουν επιφανειακές ιδιότητες του γήινου περιβάλλοντος οι οποίες σχετίζονται κυρίως με γεωμετρικά χαρακτηριστικά (τοπογραφία, μορφολογία, τραχύτητα του εδάφους), την περιεκτικότητα σε νερό της βλάστησης και του εδάφους και τη διηλεκτρική συμπεριφορά των υλικών (σχετίζεται με το ποσοστό ενέργειας που ανακλάται σε σχέση με αυτό που διεισδύει και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας).

Τα συστήματα SAR (Synthetic Aperture Radar), τα οποία καταγράφουν τη μικροκυματική ακτινοβολία ως επί το πλείστον, ονομάζονται ενεργά (active) λόγω της δυνατότητας να εκπέμπουν παλμούς μικροκυματικής ακτινοβολίας διάρκειας μερικών λεπτών από μια κεραία που βρίσκεται επάνω στον δορυφόρο ή στο αεροσκάφος και έτσι να αποτελούν πηγές ενέργειας ή φωτισμού (Εικόνα 7.1). Η μικροκυματική ακτινοβολία διαδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας προς τη γήινη επιφάνεια, σκεδάζεται ή ανακλάται, και στη συνέχεια ένα μέρος της επιστρέφει προς την κεραία του δορυφόρου, ενώ το υπόλοιπο χάνεται προς διαφορετική κατεύθυνση. Η καταγραφή του χρόνου επιστροφής του παλμού στα όργανα του δορυφόρου είναι αυτή που καθορίζει τη θέση των γήινων χαρακτηριστικών επάνω στην εικόνα. Η λειτουργία αυτή έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την αντίστοιχη των παθητικών (passive) οπτικών συστημάτων τα οποία απλώς καταγράφουν την ενέργεια που εκπέμπεται από τη γήινη επιφάνεια σε διαφορετικά μήκη κύματος και η οποία εξαρτάται από τη γωνιακή απόσταση (Lillesand & Kiefer, 2000).



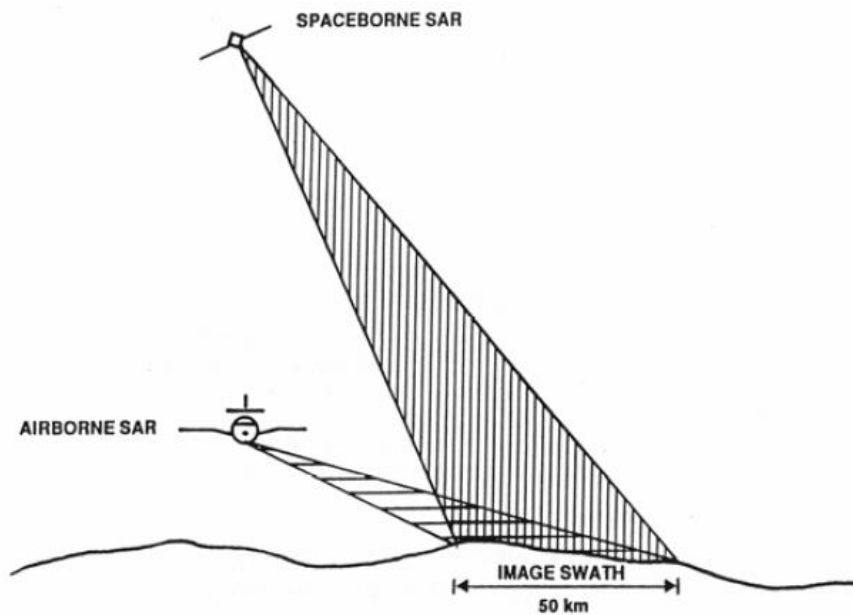
**Εικόνα 7.1** Τρόπος λειτουργίας ενός ενεργού συστήματος SAR .

Επίσης, ένα σύστημα radar δεν κοιτάζει κατευθείαν προς τα κάτω (ναδίρ) αλλά προς τα κάτω και πλαγίως του τροχιακού επιπέδου, σε αντίθεση με έναν οπτικό δέκτη (Εικόνα 7.2). Αυτό είναι απαραίτητο έτσι ώστε οι εκπεμπόμενοι παλμοί να σαρώνουν τη γήινη επιφάνεια σε αυξανόμενες αποστάσεις από το radar και συνεπώς να αποδίδουν στην εικόνα τη διάσταση στη διεύθυνση των μετρούμενων αποστάσεων (Τσίλιμπάρης, 1993).

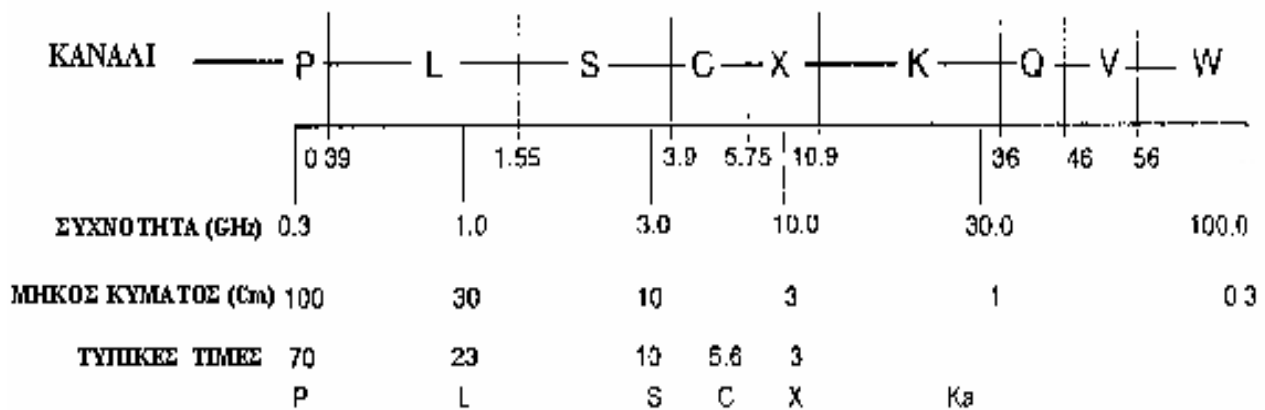
Τα συστήματα SAR είναι αρκετά πολύπλοκα και με μεγάλο κόστος κατασκευής. Παρουσιάζουν όμως το πλεονέκτημα της καλύτερης ανάλυσης σε σχέση με τα συστήματα RAR (real aperture radar), στα οποία το μικρό μήκος της κεραίας δημιουργεί το πρόβλημα της χαμηλής ανάλυσης (Avery & Berlin, 1992).

Οι αισθητήρες SAR εκπέμπουν και δέχονται κύματα στο μικροκυματικό τμήμα το οποίο αποτελείται από τις ζώνες P, L, S, C, X, K, Q, V και W (Εικόνα 7.3). Οι ζώνες αυτές συμβολίζονται με γράμματα τα οποία έχουν αποδοθεί τυχαία και αυθαίρετα.

Η συχνότητα (frequency) αποτελεί την πιο σημαντική ιδιότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, καθώς παραμένει σταθερή κατά τη διάδοση της ακτινοβολίας μέσα από υλικά με διαφορετική πυκνότητα, σε αντίθεση με την ταχύτητα και το μήκος κύματος τα οποία αλλάζουν. Επίσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την επιφάνεια πρόσπτωσης και συγκεκριμένα στο βάθος διείσδυσης και στη διάχυσή της από μια τραχιά επιφάνεια (Elachi, 1987). Παρ' όλα αυτά, πολλοί επιστήμονες χρησιμοποιούν το μήκος κύματος για την πιο άμεση περιγραφή των φασματικών καναλιών (Sabins, 1997).



Εικόνα 7.2 Τρόπος εικονοληψίας από ένα σύστημα SAR (δορυφορικό ή αερομεταφερόμενο) (ESA, 1994).



Εικόνα 7.3 Οι ζώνες στο μικροκυματικό φάσμα που χρησιμοποιούν οι αισθητήρες SAR (ESA, 1994).

Τα συστήματα καταγραφής στο μικροκυματικό τμήμα ονομάζονται παντός καιρού (all weather), αφού έχουν το πλεονέκτημα της λειτουργίας ανεξάρτητα από τον ηλιακό φωτισμό και επομένως την ικανότητα να λειτουργούν κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, και κατά κανόνα δεν είναι ευαίσθητα στις δυσμενείς καιρικές συνθήκες και στη νεφοκάλυψη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη ή μηδενική εξασθένηση της μικροκυματικής ακτινοβολίας κατά το πέρασμά της μέσα από την ατμόσφαιρα (Drury, 1987).

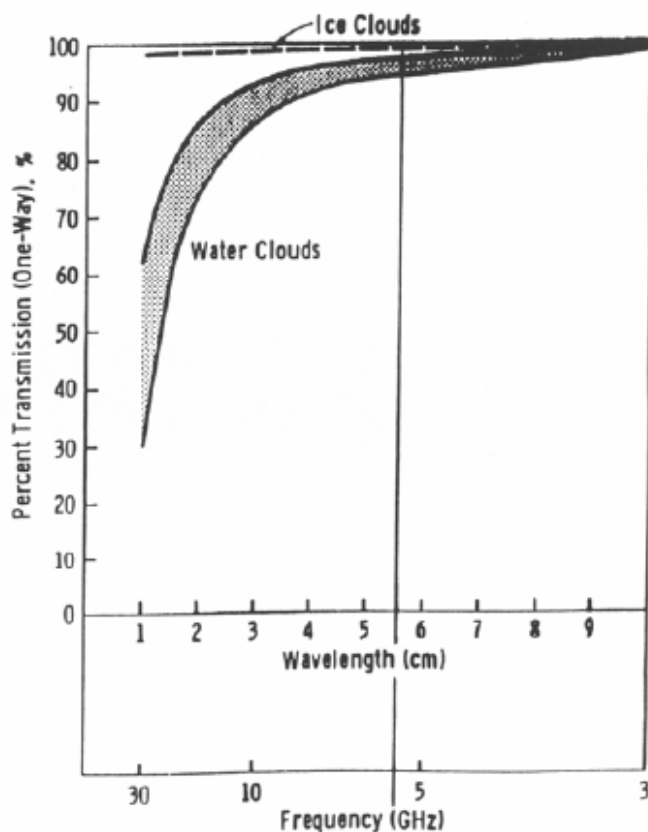
Η ικανότητα διείσδυσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας μέσα από τα νέφη και το υπέδαφος αυξάνεται με το μήκος κύματος. Για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 3cm ή συχνότητας μικρότερης από 10 GHz τα σύννεφα

είναι περατά, οπότε και δεν αποτυπώνονται στην εικόνα. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι τα υγρά σωματίδια των νεφών έχουν μέση διάμετρο (0,1mm) σαφώς μικρότερη από τα μήκη κύματος των συστημάτων SAR (Εικόνα 7.4). Αν και τα Radar βλέπουν μέσα από τα νέφη, είναι δυνατόν μια καταιγίδα να καταστήσει ασθενέστερο το εκπεμπόμενο και λαμβανόμενο σήμα και σε σπάνιες περιπτώσεις το σύστημα να καταγράψει το φαινόμενο. Ταυτόχρονα, τα μικροκύματα μεγάλου μήκους κύματος μπορούν να διαπεράσουν ξηρές επιφάνειες σε βάθος.

### 7.3. Γεωμετρία λήψης – Διαχωριστική ικανότητα συστημάτων SAR

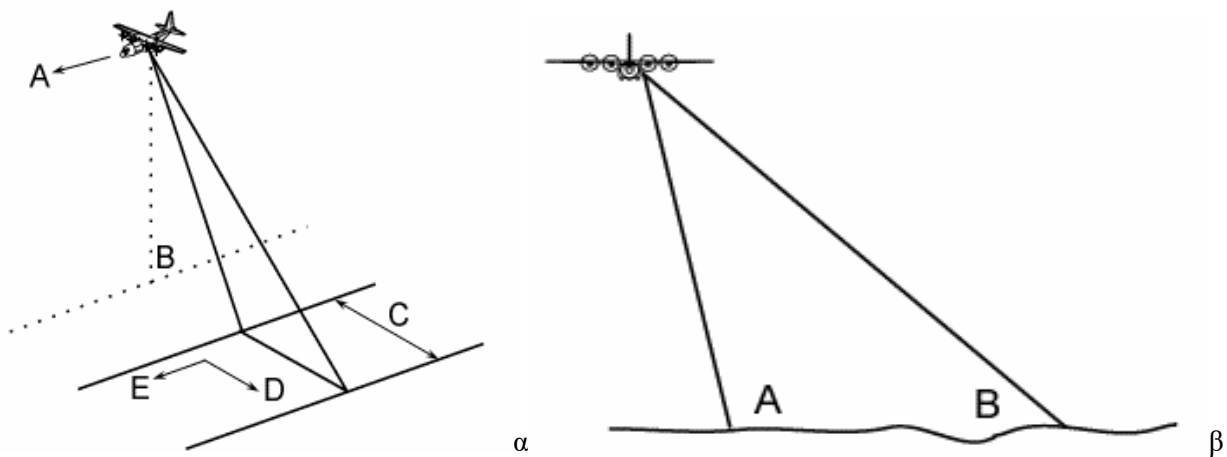
Η γεωμετρία της εικονοληψίας ενός συστήματος SAR διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη των σαρωτών των οπτικών συστημάτων που συλλέγουν την ανακλώμενη ακτινοβολία κυρίως από το ναδίρ της τροχιάς. Η μικροκυματική δέσμη μεταδίδεται υπό γωνία και προς τα δεξιά της δορυφορικής πλατφόρμας, είτε αυτή εκτελεί ανερχόμενη τροχιά είτε κατερχόμενη, σαρώνοντας μία λωρίδα συγκεκριμένου πλάτους (swath – C) η οποία βρίσκεται εκτός σημείου ναδίρ (B) (Εικόνα 7.5α). Η διεύθυνση της απόστασης (range – D) είναι κάθετη στη διεύθυνση τροχιάς (A) της πλατφόρμας, ενώ η διεύθυνση του αζιμούθιου (azimuth – E) είναι παράλληλη σε αυτήν. Η γεωμετρία της πλάγιας εικονοληψίας είναι χαρακτηριστική για όλα τα συστήματα SAR.

Το τμήμα της εικόνας που βρίσκεται κοντά στο ναδίρ ονομάζεται «εγγύς περιοχή» (near range – A) ενώ το μακρύτερο τμήμα ονομάζεται «άπω περιοχή» (far range – B) (Εικόνα 7.5).



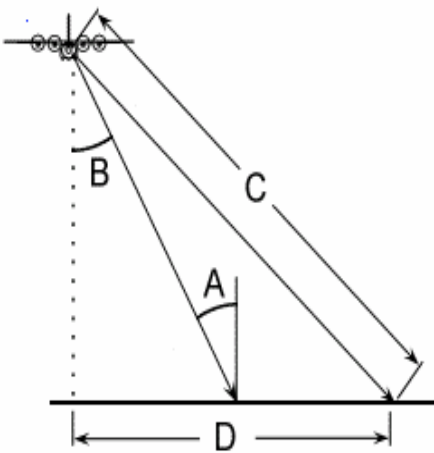
Εικόνα 7.4 Ποσοστό περατότητας των σύννεφων από τα μικροκύματα σε σχέση με τη συχνότητα (ESA, 1994).

Η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle – A) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της μικροκυματικής δέσμης και του εδάφους και η οποία αυξάνεται από την εγγύς περιοχή προς την άπω περιοχή, ενώ η γωνία παρατήρησης (look angle – B) είναι η γωνία με την οποία βλέπει το σύστημα SAR τη γήινη επιφάνεια (Εικόνα 7.6).



**Εικόνα 7.5** Γεωμετρία εικονοληψίας ενός συστήματος SAR (CCRS, 1998).

Η κεκλιμένη απόσταση (slant range distance – C) κατά την εγκάρσια διάσταση σε σχέση με την τροχιά είναι η απόσταση της πλατφόρμας από το αντικείμενο-στόχο στη γήινη επιφάνεια και έπεται ότι η απόσταση αυτή θα κυμαίνεται ανάλογα με τη θέση του αντικειμένου μέσα στην περιοχή σάρωσης. Η εδαφική απόσταση (ground range distance – D) είναι η πραγματική οριζόντια απόσταση κατά μήκος του εδάφους μεταξύ του ίχνους του συστήματος στο ναδίρ και το αντικείμενο-στόχο και επίσης κυμαίνεται ανάλογα με τη θέση του αντικειμένου μέσα στην περιοχή σάρωσης.



**Εικόνα 7.6** Γεωμετρία εικονοληψίας ενός συστήματος SAR .

Διαχωριστική ικανότητα ή χωρική ανάλυση ενός συστήματος Radar είναι η ελάχιστη απόσταση δύο αντικειμένων-στόχων που μπορούν να διακριθούν σε μία εικόνα (Εικόνα 7.7) και είναι συνάρτηση συγκεκριμένων ιδιοτήτων της μικροκυματικής ακτινοβολίας και της γεωμετρίας εικονοληψίας. Η χωρική ανάλυση εξαρτάται από το μήκος του παλμού (P) στη διεύθυνση της κεκλιμένης απόστασης, που είναι κάθετη στη διεύθυνση τροχιάς (Εικόνα 7.8), και από το πλάτος σάρωσης της επιφάνειας στη διεύθυνση του αζιμούθιου, που είναι παράλληλη της τροχιάς. Ως εκ τούτου καθορίζονται δύο διαχωριστικές ικανότητες: της απόστασης (range or across-track resolution) και του αζιμούθιου (azimuth or along-track resolution).



Η χωρική ανάλυση στην απόσταση καθορίζεται από το μήκος του παλμού (P). Η διάκριση δύο αντικειμένων-στόχων κατά την εγκάρσια διάσταση (range) είναι δυνατή όταν τα ανακλώμενα σήματά τους φθάνουν στον δορυφόρο σε διαφορετικούς χρόνους. Για να επιτευχθεί αυτή η διαφοροποίηση θα πρέπει τα δύο αντικείμενα να έχουν τέτοια απόσταση ώστε να μην περικλείονται από τη ζώνη του μισού μήκους του παλμού (Εικόνα 7.87). Με τη μείωση του μήκους του παλμού είναι δυνατή η επίτευξη λεπτομερέστερης ανάλυσης, λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι η μείωση αυτή δεν μπορεί να είναι απεριόριστη λόγω τεχνικών περιορισμών, τουλάχιστον με τη σημερινή τεχνολογία.

RADARSAT-2 Fine Beam (3m)

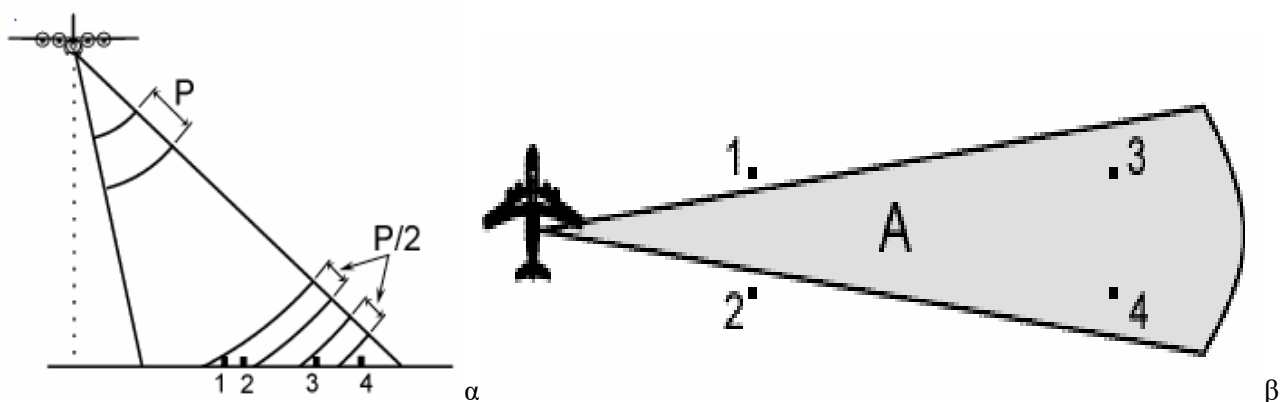
ERS-2 SAR (20m)



**Εικόνα 7.7** Η γενική τάση σήμερα της αεροδιαστημικής βιομηχανίας είναι ο σχεδιασμός και κατασκευή αισθητήρων ραντάρ που χαρακτηρίζονται από υψηλή χωρική και χρονική ικανότητα.

Η χωρική ανάλυση στο αζιμούθιο καθορίζεται από το γωνιακό πλάτος της μικροκυματικής δέσμης και την κεκλιμένη απόσταση (slant range distance). Καθώς η δέσμη μεταδίδεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τον δέκτη, η ανάλυση μεγαλώνει και γίνεται αδρότερη (coarser resolution). Ως εκ τούτου, οι στόχοι 1 και 2 στην εγγύς περιοχή θα είναι διακριτοί σε αντίθεση με τους στόχους 3 και 4 στην άπω περιοχή (Εικόνα 7.8).

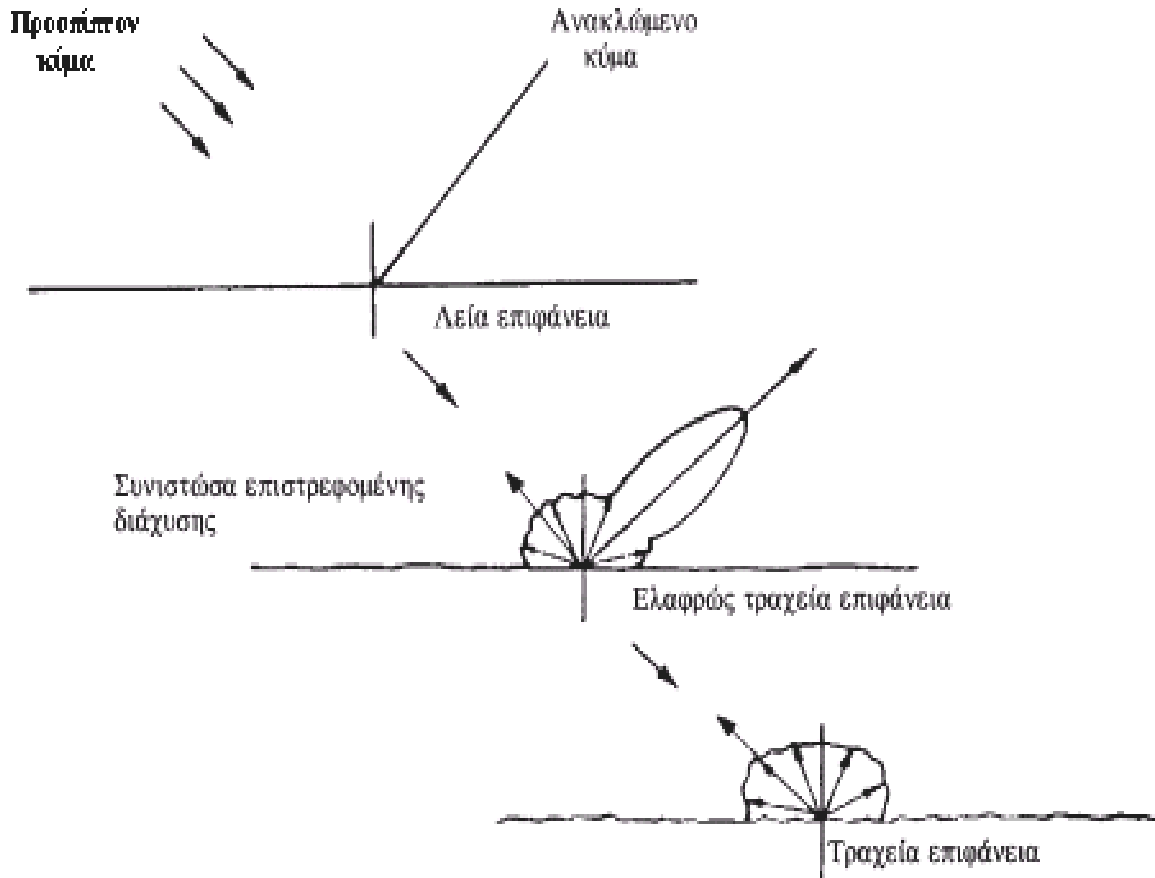
Το πλάτος της μικροκυματικής δέσμης είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος της κεραίας (άνοιγμα κεραίας – aperture), δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η κεραία, το πλάτος της δέσμης θα είναι στενότερο και η ανάλυση στο αζιμούθιο θα είναι λεπτομερέστερη (finer resolution) . Το μήκος της κεραίας υπόκειται σε τεχνικούς περιορισμούς και κυμαίνεται από 1-2m σε αερομεταφερόμενες πλατφόρμες και από 10-15m σε δορυφόρους.



**Εικόνα 7.8** Χωρική ανάλυση στην απόσταση (α) και στο αζιμούθιο (β) (Πηγή: CCRS).

## Η αλληλεπίδραση σήματος Radar με τη γήινη επιφάνεια

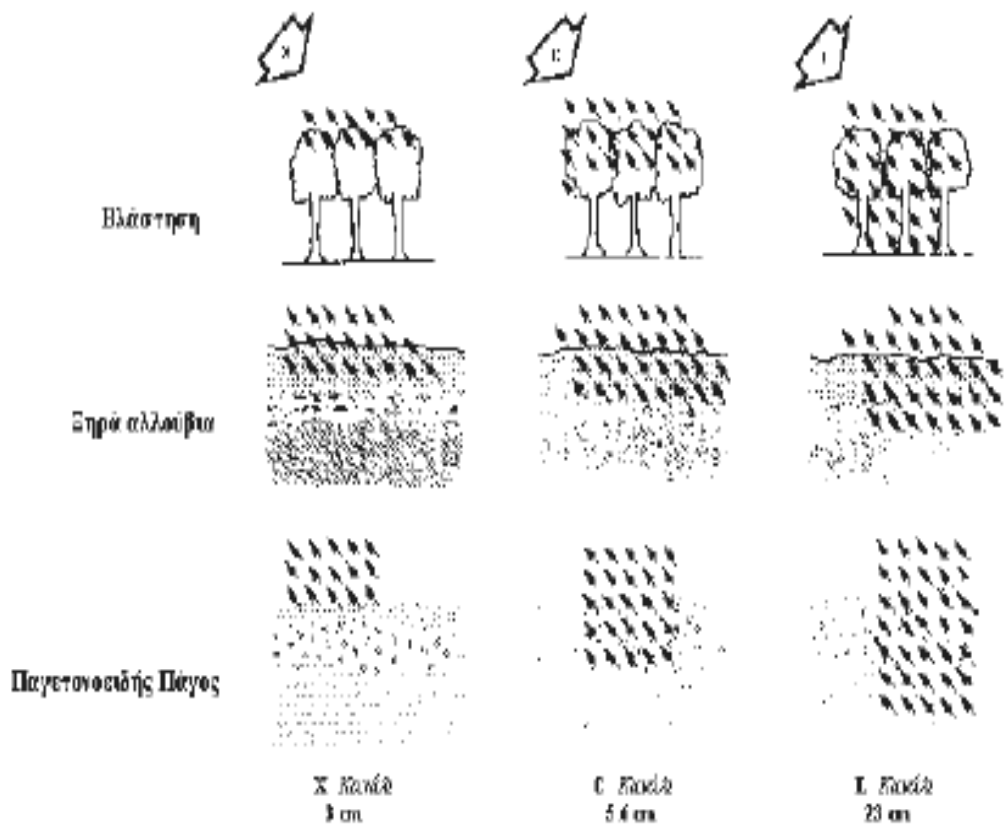
Μια απεικόνιση Radar αποτελεί μία εικόνα στην οποία η ισχύς του σήματος που επανασκεδάζεται (backscatter) από ένα αντικείμενο καθορίζει το ψηφιακό αριθμό (DN) για κάθε κυψελίδα. Η ισχύς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μεταξύ των οποίων είναι οι παράμετροι παρατήρησης (όπως μήκος κύματος, συχνότητα, πόλωση, προσπίπτουσα γωνία του εκπεμπόμενου κύματος) και οι επιφανειακές παράμετροι (όπως ανάγλυφο-τραχύτητα, γεωμετρικό σχήμα και διηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων) (Εικόνα 7.9). Επιπλέον, ανάλογα με το μήκος κύματος η ακτινοβολία διεισδύει στο επιφανειακό υλικό σε διάφορα βάθη. Η εικόνα 7.10 δείχνει τη διαφορετική διείσδυση σε βάθος, των ζωνών X, C και L, η οποία αυξάνει ανάλογα με το μήκος κύματος και την απουσία υγρασίας.



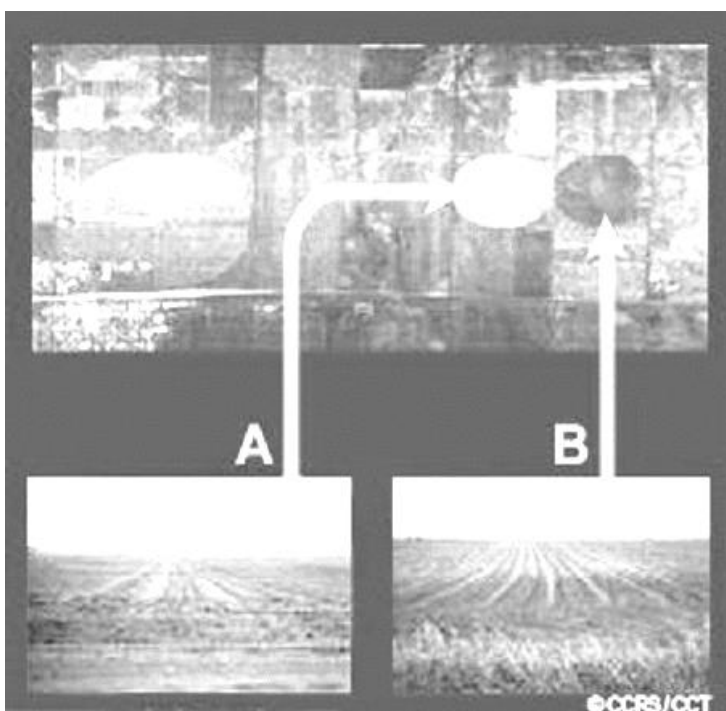
Εικόνα 7.9 Τύποι επιφανειακής διάχυσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας.

Η διηλεκτρική σταθερά περιγράφει την ικανότητα των υλικών να απορροφούν, ανακλούν και να μεταφέρουν τη μικροκυματική ενέργεια και αυξάνει με την παρουσία της υγρασίας στα υλικά, αλλάζοντας σημαντικά τις ιδιότητες ενός αντικείμενου για τον τρόπο που θα εμφανίζεται στην εικόνα radar. Η επανασκέδαση και, επομένως, η φωτεινότητα θα είναι έντονη όταν υπάρχει αυξημένο ποσοστό υγρασίας (Εικόνα 7.11).

Σημαντικό στοιχείο αποτελεί και ο τρόπος επανασκέδασης του σήματος Radar από τα διάφορα χαρακτηριστικά ενός δάσους. Οι διάφορες φασματικές ζώνες στο μικροκυματικό είναι ευαίσθητες σε διαφορετικά τμήματα ενός δάσους. Στην Εικόνα 7.12, A είναι η επανασκέδαση του σήματος της κορυφής των δένδρων, B είναι μια επανασκέδαση σήματος μέσα από το φύλλωμα των δένδρων, C είναι η επανασκέδαση από το έδαφος, D είναι η επανασκέδαση από τον κορμό και το έδαφος και E είναι η σκιά των δένδρων. Οι μεγαλύτερες σε συχνότητα φασματικές ζώνες Radar (ξεκινώντας από την X) έχουν εξάρτηση του ανακλώμενου σήματός τους από τη γεωμετρία και τον προσανατολισμό των φύλλων. Η φασματική ζώνη C είναι ευαίσθητη στα μικρά κλαδιά και τα φύλλα των δένδρων, ενώ οι L και P εξαρτώνται από τα κλαδιά, τους κορμούς και το έδαφος .



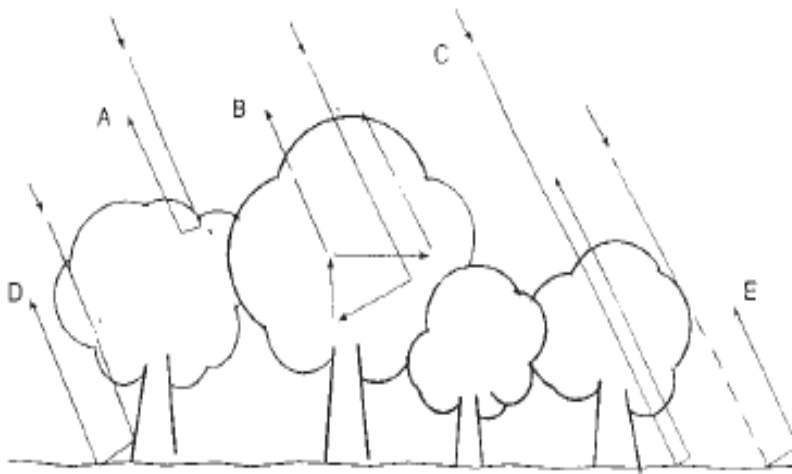
**Εικόνα 7.10** Διαφορετική διείσδυση σε βάθος από την επιφάνεια, των ζωνών X, C και L, η οποία αυξάνει με το μήκος κύματος και την περιέχουσα υγρασία (Πηγή: ESA).



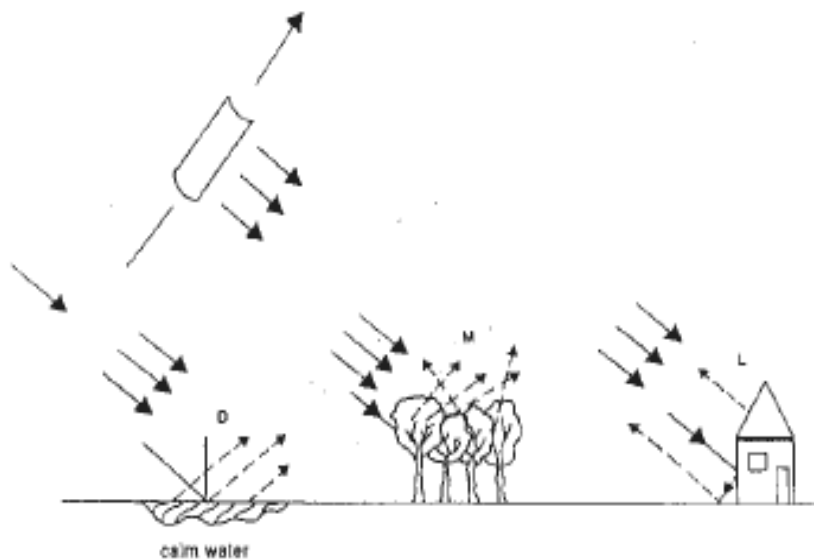
**Εικόνα 7.11** Απεικόνιση ενός υγρού εδάφους (A) και ενός ξηρού εδάφους (B) σε μια εικόνα Radar (Πηγή: CCRS).

Συμπερασματικά λοιπόν θα λέγαμε ότι τα διάφορα αντικείμενα της γήινης επιφάνειας ανακλούν το σήμα του Radar σε διαφορετικό βαθμό, τον οποίο ονομάζουμε συντελεστή επανασκέδασης ( $\sigma_0$ ). Το ποσό της ανάκλασης καθορίζει και την απόχρωση, στην κλίμακα του γκρι, σε μια εικόνα SAR.

Μια λεία επιφάνεια ενός υλικού με υψηλή διηλεκτρική σταθερά συμπεριφέρεται ως καθρέφτης και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η μικροκυματική ακτινοβολία να ανακλάται εξολοκλήρου προς διαφορετική κατεύθυνση από αυτήν του δορυφόρου. Τα υλικά αυτά είναι γνωστά ως κατοπτρικοί ανακλαστήρες (specular reflectors) και εμφανίζονται με σκούρες αποχρώσεις του γκρι στην εικόνα, αφού το  $\sigma_0$  είναι πολύ χαμηλό. Η ήρεμη επιφάνεια μιας υδάτινης μάζας θα μπορούσε να αποτελέσει έναν κατοπτρικό ανακλαστήρα, όπως επίσης και μια λεία, μεταλλική επιφάνεια. Αντίθετα, μια τραχιά επιφάνεια (δάσος) θα αποτυπώνεται με μέσες αποχρώσεις του γκρι λόγω της επιστροφής μέρους της ακτινοβολίας, ενώ τα κτίρια και γενικότερα τα αντικείμενα που σχηματίζουν κάθετη επιφάνεια στο προσπίπτον σήμα θα εμφανίζονται με ανοιχτές-λευκές αποχρώσεις (corner reflectors) (Εικόνα 7.13).



**Εικόνα 7.12** Τρόπος επανασκέδασης του σήματος Radar από τα διάφορα χαρακτηριστικά ενός δάσους (Πηγή:ESA).



**Εικόνα 7.13** Διαφορετικός βαθμός επανασκέδασης των αντικειμένων της γήινης επιφάνειας(Πηγή:ESA).

Το ανάγλυφο της γήινης επιφάνειας παίζει σημαντικό ρόλο όταν αυτό έχει διαστάσεις που μπορούν να συγκριθούν με το προσπίπτον μήκος κύματος. Ο τρόπος που αποτυπώνεται η τραχύτητα του εδάφους σε μια εικόνα, ως ανάγλυφη ή λεία, εξαρτάται από το μέγεθος των αλλαγών στην επιφάνειά του, το μήκος του κύματος και την προσπίπτουσα γωνία. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία πρόσπτωσης και το μήκος κύματος σε σχέση με το μέγεθος των επιφανειακών αλλαγών, τόσο περισσότερο λεία εμφανίζεται η επιφάνεια του αντικειμένου.

## Ιδιότητες εικόνων radar

Στη βασική λειτουργία του Radar περιλαμβάνεται η εκπομπή ενός ελάχιστου χρόνου (microsecond) υψηλής ενέργειας σήματος και η αποτύπωση της επανασκέδασης από τη γήινη επιφάνεια του σήματος αυτού. Η πληροφόρηση η οποία καταγράφεται έχει άμεση σχέση, δηλαδή εμπεριέχει στην αποτύπωσή της, με τα ακόλουθα:

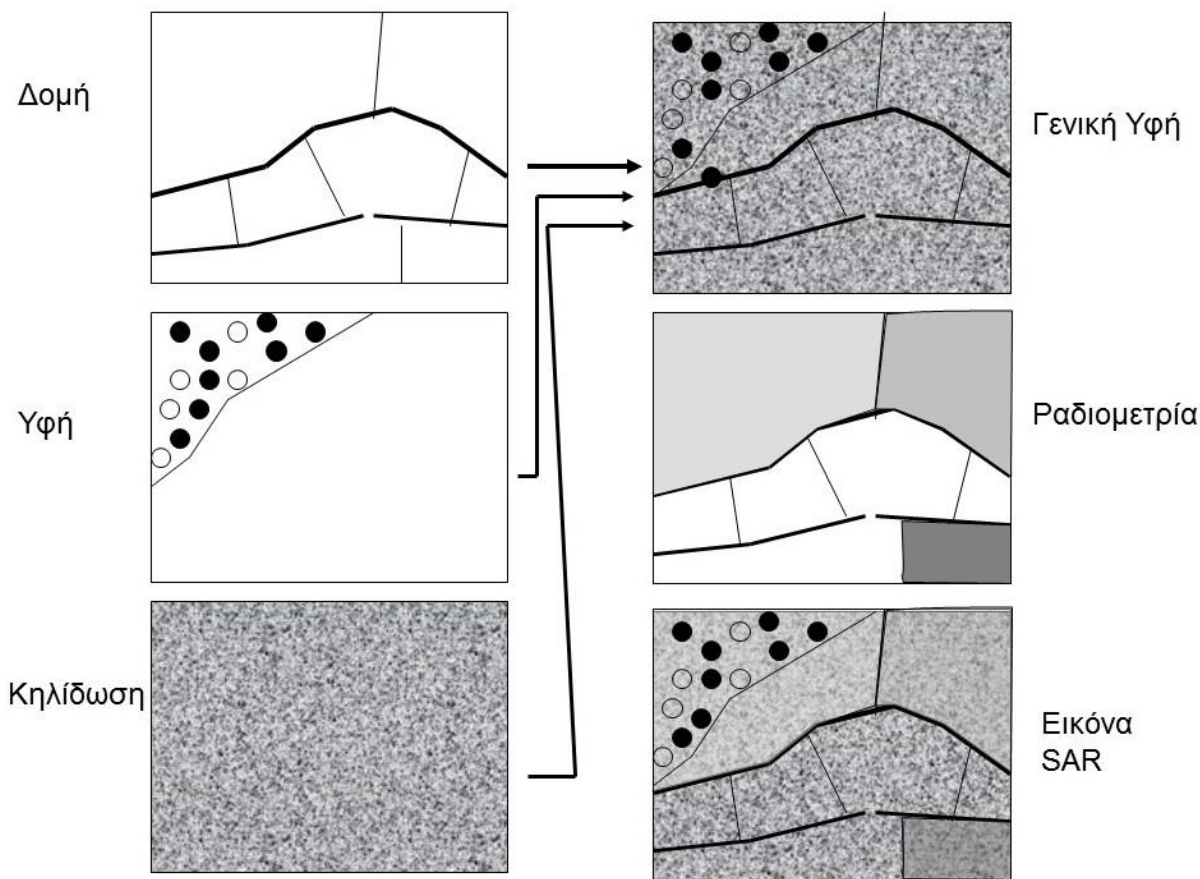
- τη σχετική ισχύ του σήματος.
- τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ του εκπεμπόμενου και εισερχόμενου σήματος.
- τη διεύθυνση από την οποία προέρχεται το ανακλώμενο σήμα.

Ένα μικρής ισχύος εισερχόμενο σήμα εμφανίζεται στην εικόνα Radar ως σκούρο ή μαύρο. Στα ενεργά συστήματα Radar το ίδιο όργανο χρησιμοποιείται για την εκπομπή και για τη λήψη της μικροκυματικής ακτινοβολίας, ενώ η αποτύπωση των ανακλώμενων σημάτων γίνεται σε ψηφιακή μορφή. Τα ψηφιακά δεδομένα υφίστανται επεξεργασία έτσι ώστε να δημιουργηθεί το τελικό προϊόν που είναι μια δισδιάστατη συλλογή από ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων.

Η υφή μιας εικόνας SAR διακρίνεται σε τρία συστατικά:

- Η μικροϋφή ή θόρυβος (speckle), που εμφανίζεται σαν τυχαίοι κόκκοι ίδιου μεγέθους ή ελαφρώς μεγαλύτεροι από την κυψελίδα διακριτικής ικανότητας. Μειώνει την ικανότητα ανάγνωσης της εικόνας και η επίδρασή της μπορεί να ελαττωθεί με τεχνικές φιλτραρίσματος (speckle filtering methods).
- Η μεσοϋφή, που εκφράζει τη διαφοροποίηση της έντασης του ανακλώμενου σήματος η οποία οφείλεται στη φύση του υλικού και στη γεωμετρία της επιφάνειάς του. Για παράδειγμα, ανοιχτές αποχρώσεις του γκρι μπορεί να οφείλονται στο ανακλώμενο σήμα φύλλων που έχουν θέση προς το Radar και σκοτεινές αποχρώσεις του γκρι να οφείλονται σε φύλλα που δεν βλέπουν προς το Radar. Η υφή αυτή είναι πολλές φορές μεγαλύτερη από τη κυψελίδα διακριτικής ικανότητας και είναι πολύ σημαντική για την ερμηνεία της εικόνας.
- Η μακροϋφή αφορά τις διαφοροποιήσεις της φωτεινότητας του Radar και οφείλεται σε αντικείμενα της γήινης επιφάνειας, όπως δρόμοι, γραμμώσεις που έχουν σχέση με τη δομή των πετρωμάτων, όρια μεταξύ χρήσεων γης κ.λπ. Η υφή αυτή είναι επίσης πολύ σημαντική στην ερμηνεία της εικόνας, ενώ με τη χρήση ειδικών φίλτρων είναι δυνατόν να διευκολυνθεί η ανίχνευσή της.

Μια εικόνα λοιπόν αποτελείται από αυτές τις τρεις συνιστώσες και επιπλέον από το ραδιομετρικό τμήμα το οποίο χαρακτηρίζεται από τη μέση ανάκλαση μιας ομοιογενούς επιφάνειας (Εικόνα 7.14).



**Εικόνα 7.14** Βασικές συνιστώσες εικόνας Radar (Πηγή:ESA, 1994).

## 7.4 Εφαρμογές των εικόνων SAR

### Α. Ανίχνευση πυρκαγιών

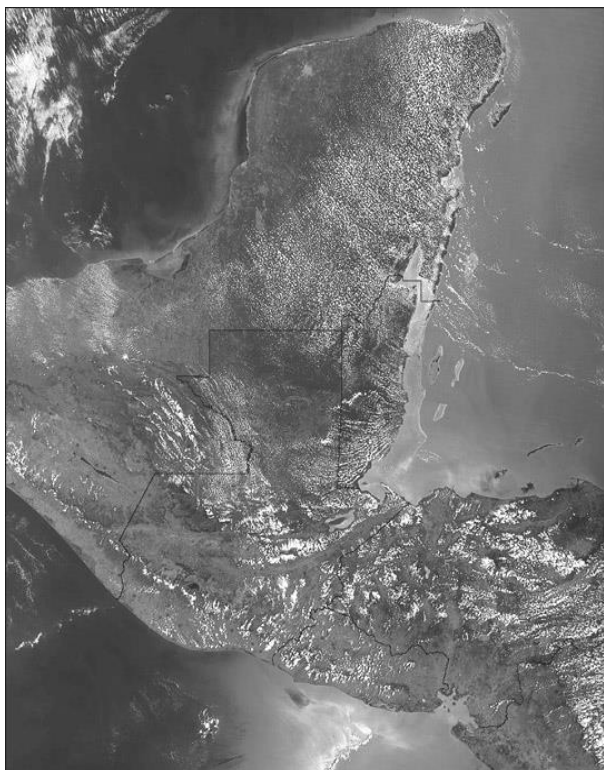
Η ικανότητα λήψης εικόνων από τα συστήματα Radar κατά τις νυχτερινές ώρες δίνει τη δυνατότητα της ανίχνευσης και παρατήρησης των πυρκαγιών κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας, κυρίως μέσω του ATSR (Along Track Scanning Radiometer) – ERS-2 και του AATSR (Advanced Along-Track Scanning Radiometer) – Envisat (Εικόνα 7.15). Τα όργανα αυτά έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν τα θερμά σημεία στη γήινη επιφάνεια που προέρχονται από μέτωπα πυρκαγιών (ESA, 1996).

### Β. Πλημμύρες

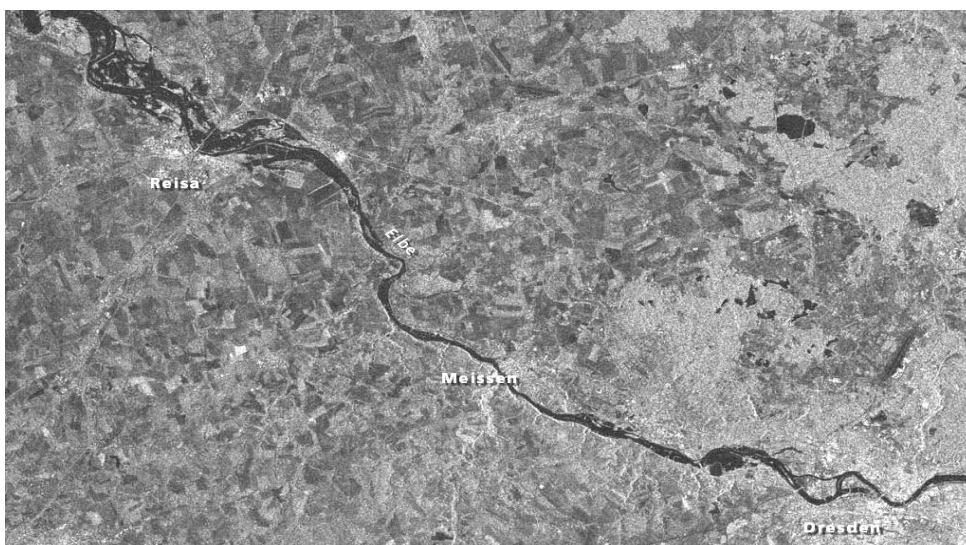
Η ανίχνευση και καταγραφή των πλημμυρισμένων εκτάσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση εικόνων SAR λόγω της ικανότητας διάκρισης του νερού από τη στεριά. Επιπλέον, η δυνατότητα λήψης εικόνων ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και φωτισμού καθιστά τα συστήματα SAR απαραίτητα σε πολλές περιπτώσεις για την καταγραφή του φαινομένου κατά την έναρξή του. Με τη χρήση διαχρονικών εικόνων SAR είναι δυνατή η χαρτογράφηση των εκτάσεων που πλημμυρίζουν (Εικόνα 7.16).

### Γ. Μελέτη πάγων

Τα συστήματα SAR και Radar Altimeter παρακολουθούν την κατάσταση και την εξέλιξη των μόνιμων στρωμάτων πάγου στην επιφάνεια της Γης στην Ανταρκτική, Γροιλανδία και Αλάσκα. Χαρτογραφούν τη δυναμική τους, όπως είναι οι μετατοπίσεις και η ισορροπία των μαζών, εκτιμούν τις μακροπρόθεσμες επιδράσεις τους στο κλίμα και υπολογίζουν σε καθορισμένα διαστήματα τις εποχικές μεταβολές στις παραμέτρους των πάγων.

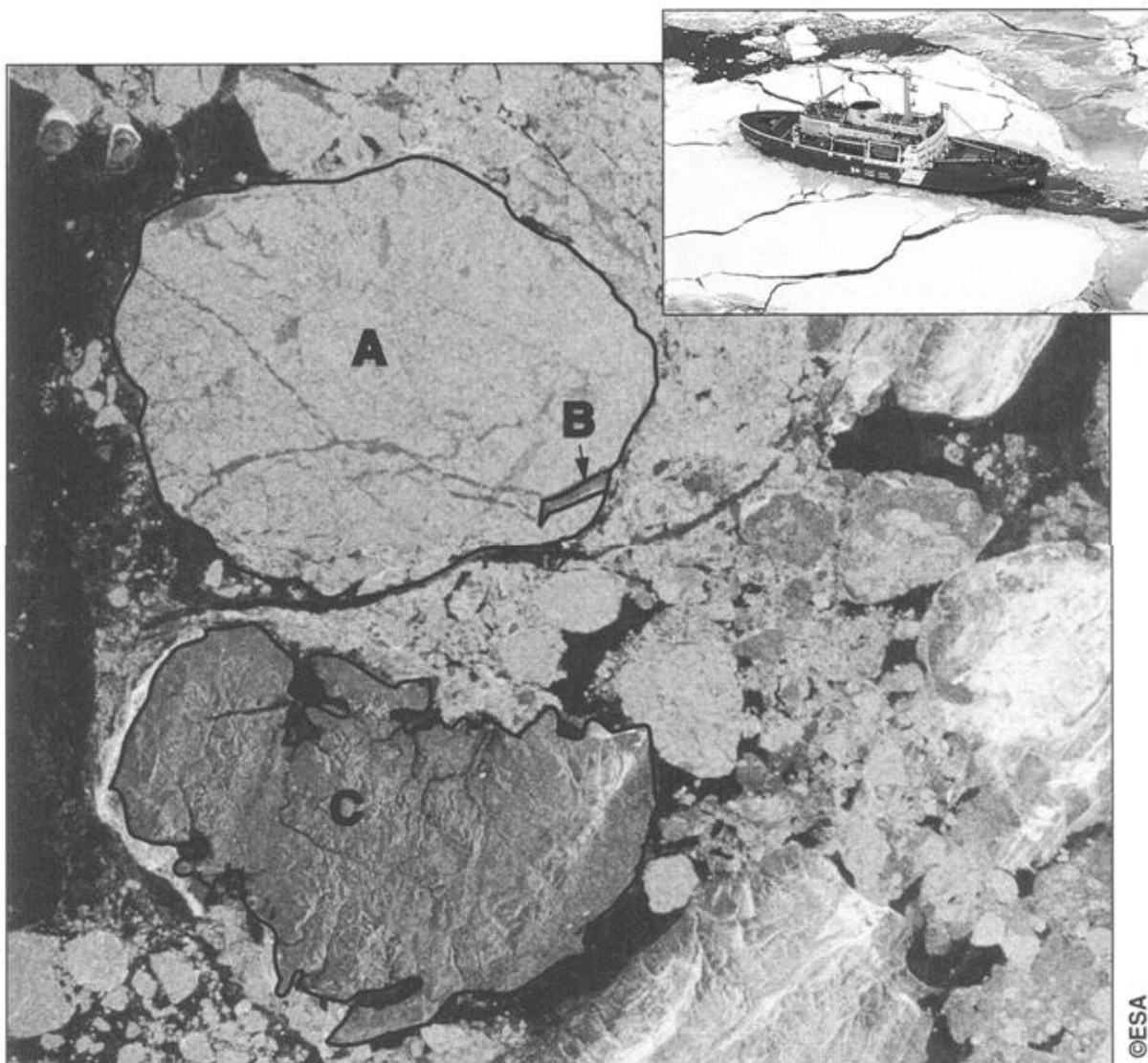


**Εικόνα 7.15** Καταγραφή των πυρκαγιών στην Κεντρική Αμερική.



**Εικόνα 7.16** Διαχρονική εικόνα SAR από τον δορυφόρο ENVISAT. Με τους σκούρους τόνους του γκρι κατά μήκος του ποταμού, εμφανίζονται οι εκτάσεις που πλημμύρισαν μετά την έναρξη του φαινομένου.

Οι φυσικές ιδιότητες των πάγων, όπως η αλατότητα, η χιονοκάλυψη, η τραχύτητα και το πορώδες, σε συνδυασμό με το πάχος και την ηλικία του πάγου, επηρεάζουν το σήμα επανασκέδασης (Radarsat International, 1995). Έτσι, τα δεδομένα SAR μπορούν να δώσουν πληροφορίες σχετικά με τα όρια, την τραχύτητα, την ηλικία και την κίνηση των πάγων βοηθώντας τις μελέτες σχετικά με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αλλά και τη διευκόλυνση της ναυσιπλοΐας (Εικόνα 7.17)



**Εικόνα 7.17** ERS-1 από την Καναδική Αρκτική. A: παλαιότερης ηλικίας πάγοι (φωτεινότεροι τόνοι), B: πάγος 1 χρόνου (σκούροι τόνοι), C: Νησί Κάμερον (Radarsat International, 1995).

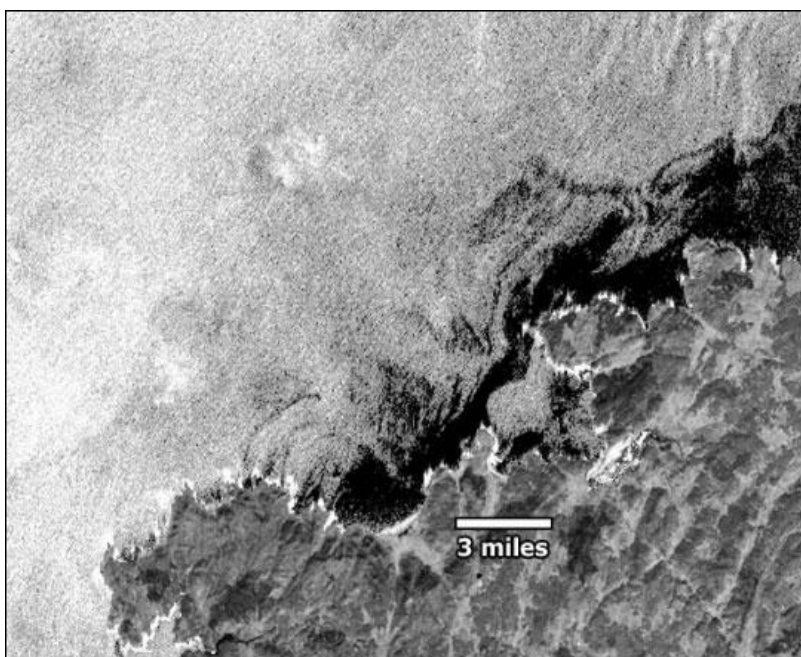
#### Δ. Ανίχνευση πετρελαιοκηλίδων

Η ρύπανση των θαλασσών από τα πετρελαιοειδή αποτελεί ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα τα τελευταία χρόνια. Συγκεκριμένα, η συχνή καταστροφή των ευαίσθητων παράκτιων οικοσυστημάτων από τις διαρροές πετρελαίου ή από ατυχήματα των πετρελαιοφόρων πλοίων, σε περιοχές όπως η κλειστή Μεσόγειος θάλασσα, καθιστά αναγκαία τη δυνατότητα παρακολούθησης και ανίχνευσης των πετρελαιοκηλίδων. Αυτήν δίνουν τα συστήματα SAR μέσω της ικανότητάς τους να διακρίνουν τις πετρελαιοκηλίδες από την υπόλοιπη υδάτινη μάζα (Εικόνα 7.18).





A



B

**Εικόνα 7.18**

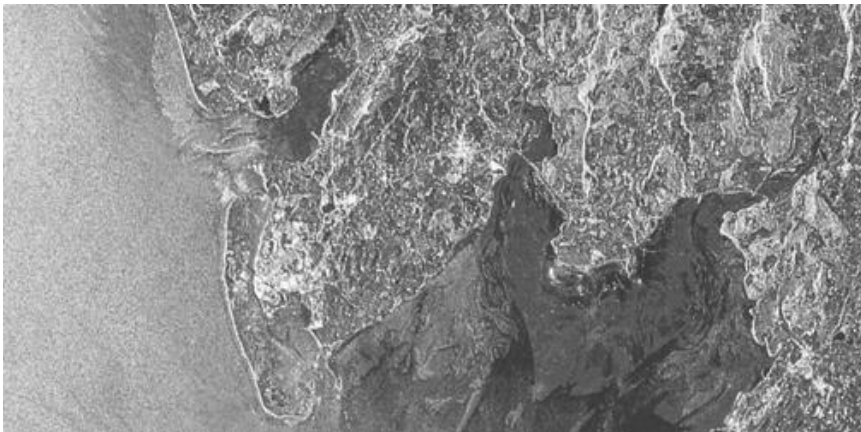
**A:** Εικόνα IKONOS από τις ακτές της Δ. Ισπανίας όπου διακρίνονται με δυσκολία οι μαύρες πετρελαιοκηλίδες στην ακτή (η ύπαρξη των νεφών δυσκολεύει ακόμη περισσότερο την παρατήρηση) μετά τη βύθιση ενός τάνκερ στις 13 Νοεμβρίου 2002.

**B:** Εικόνα RADARSAT από την ίδια περιοχή, όπου αναδεικνύονται με διακριτό τρόπο τα όρια της πετρελαιοκηλίδας (μαύρο χρώμα) στις δυτικές ακτές της Ισπανίας. Είναι χαρακτηριστική η διάκρισή της από την υδάτινη μάζα, η οποία έχει φωτεινότερες αποχρώσεις λόγω του έντονου κυματισμού.

Η πιο σκούρα εμφάνισή τους σε μια εικόνα SAR είναι χαρακτηριστική, εξαιτίας του σχηματισμού μιας πιο λείας επιφάνειας σε σχέση με την υδάτινη μάζα, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το εξασθενημένο σήμα επιστροφής προς το Radar. Η έλλειψη σημαντικού κυματισμού αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την καλύτερη οριοθέτηση της πετρελαιοκηλίδας.

### Ε. Μελέτη παράκτιων περιοχών

Οι εικόνες SAR μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρατήρηση, την παρακολούθηση και ανίχνευση φαινομένων που αφορούν παράκτιες περιοχές. Η μελέτη των παλιρροϊκών φαινομένων (Εικόνα 7.19), των φυσικών καταστροφών, των βαθυμετρικών χαρακτηριστικών σε αβαθή νερά, των αλλαγών της ακτογραμμής λόγω διάβρωσης-απόθεσης, των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην παράκτια ζώνη (π.χ. ιχθυοκαλλιέργειες), της δυναμικής εξέλιξης των δέλτα και πολλών άλλων φαινομένων μπορεί να διευκολυνθεί από τη χρήση των προϊόντων αυτών.



**Εικόνα 7.19** Διαχρονική εικόνα ERS-1 για την καταγραφή των παλιρροϊκών φαινομένων σε παράκτια περιοχή της Μεγ. Βρετανίας. Οι περιοχές με τους σκούρους τόνους του γκρι αποτελούν αμμώδεις υφάλους και λασποτόπια τα οποία πλημμυρίζουν κατά το υψηλότερο σημείο της παλίρροιας (Πηγή: ESA).

### ΣΤ. Ωκεανογραφία

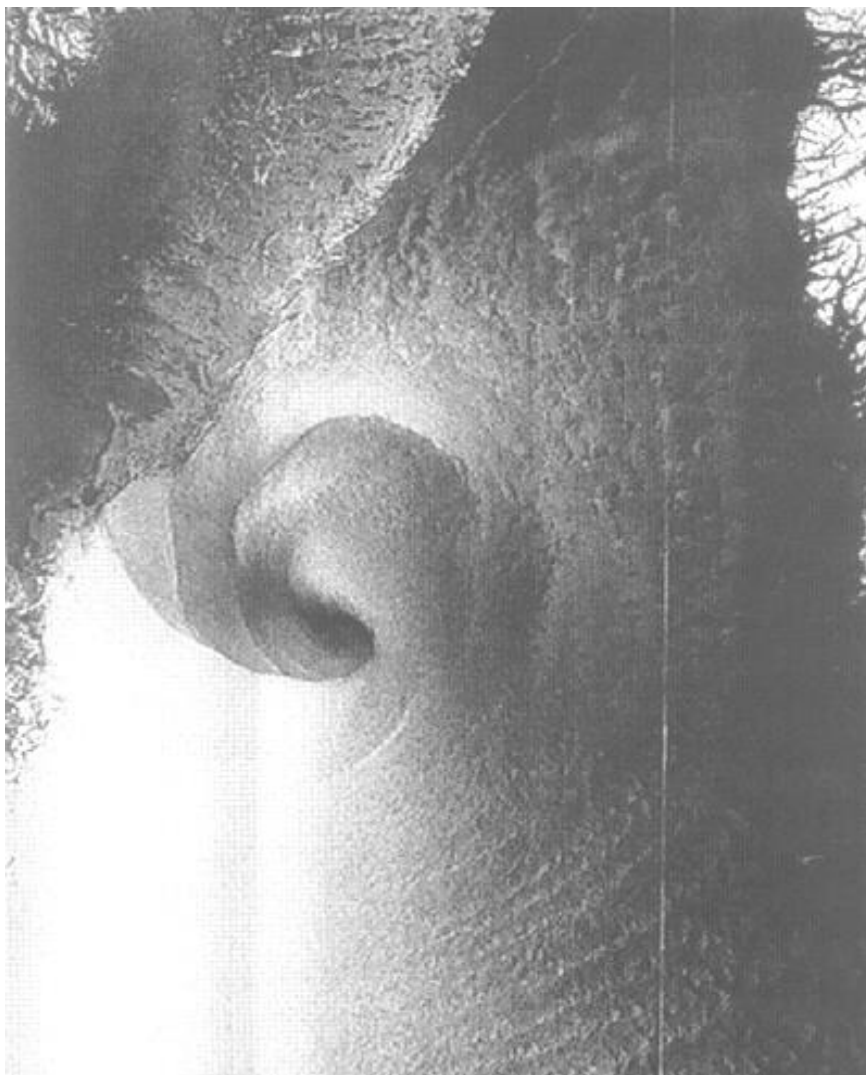
Οι εφαρμογές στην ωκεανογραφία αφορούν:

- τη δυναμική και ανάπτυξη συστημάτων κυματισμού σε ανοικτούς ωκεανούς και στα παράκτια ύδατα, σε κλειστές ή σχεδόν κλειστές θαλάσσιες λεκάνες, όπως είναι η Μεσόγειος θάλασσα.
- την κλιματολογία των ωκεάνιων συστημάτων κυματισμού.
- τη σχέση ανέμων και συστημάτων κυματισμού.

Επίσης, αυτά δίνουν στοιχεία που αφορούν την τοπογραφία (επιφανειακή και υποθαλάσσια), τα θερμικά χαρακτηριστικά των υδάτινων μαζών και της ρύπανσής τους, κ.ά. (Vincent, 1997).

### Z. Μετεωρολογία

Η κύρια συμβολή των συστημάτων SAR είναι στην παροχή δεδομένων σχετικά με τις παραμέτρους των ανέμων και των κυμάτων καθώς επίσης στην καταγραφή επικίνδυνων καιρικών φαινομένων όπως καταιγίδες, κυκλώνες, κ.ά. (Εικόνα 7.20). Τα στοιχεία αυτά είναι πολύ σημαντικά για την πρόγνωση του καιρού.



**Εικόνα 7.20** Καταγραφή κυκλώνα κοντά στις ακτές της Γροιλανδίας από τον δορυφόρο RADARSAT ScanSAR (ESA, 1998).

### H. Δασολογία

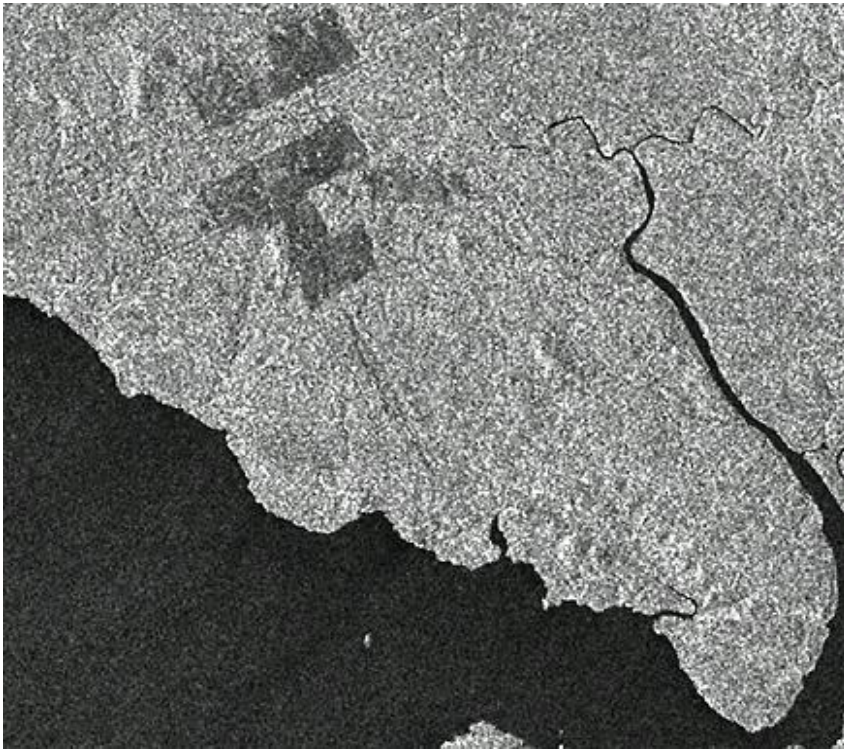
Τα Radar, ανάλογα με τη φασματική ζώνη που χρησιμοποιούν (L, X, C, κ.λπ.), έχουν υψηλή ευαισθησία σε παραμέτρους όπως το ανάγλυφο-τραχύτητα της επιφάνειας, η δομή και ο προσανατολισμός των φυτών, καθώς και η υγρασία τους.

Όταν χρησιμοποιείται το κανάλι C (ERS-1 και 2, Radarsat) το δάσος απεικονίζεται με μέσες αποχρώσεις του γκρι και η ανάκλαση του σήματος εξαρτάται από τη γεωμετρία και τον προσανατολισμό των φύλλων. Αντίθετα, με το κανάλι L (JERS-1), το οποίο διεισδύει μέσα στο δάσος λόγω του μεγαλύτερου μήκους κύματος, η φύλλωση

των δένδρων είναι από λίγο έως πολύ διαφανής και η ανάκλαση του σήματος γίνεται από τα κλαδιά, τους κορμούς και το έδαφος.

Οι πληροφορίες που περιέχονται στις δορυφορικές εικόνες αλλάζουν σε σχέση με τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται (από το οπτικό στο μικροκυματικό) και γι' αυτό συνιστάται συνδυασμένη χρήση δεδομένων για την ίδια περιοχή από διαφορετικά αισθητήρια όργανα ώστε να υπάρχει αλληλοσυμπλήρωση.

Οι εικόνες SAR αποδείχθηκαν σημαντικό εργαλείο για τη διαχρονική παρακολούθηση της αποψίλωσης των δασών, κυρίως όσον αφορά τις τροπικές περιοχές (π.χ. περιοχή Αμαζονίου), ανεξαρτήτως νεφοκάλυψης, η οποία είναι συχνή στις περιοχές αυτές (Εικόνα 7.21). Ταυτόχρονα τα δεδομένα SAR έχουν χρησιμοποιηθεί με πολύ καλά αποτελέσματα στη χαρτογράφηση των δασών.



**Εικόνα 7.21:** Εικόνα RADARSAT που αναδεικνύει την αποψίλωση του δάσους (σκούρες αποχρώσεις στο πάνω μέρος της εικόνας) σε περιοχή της Νότιας Κίνας .

### Θ. Υδρολογία

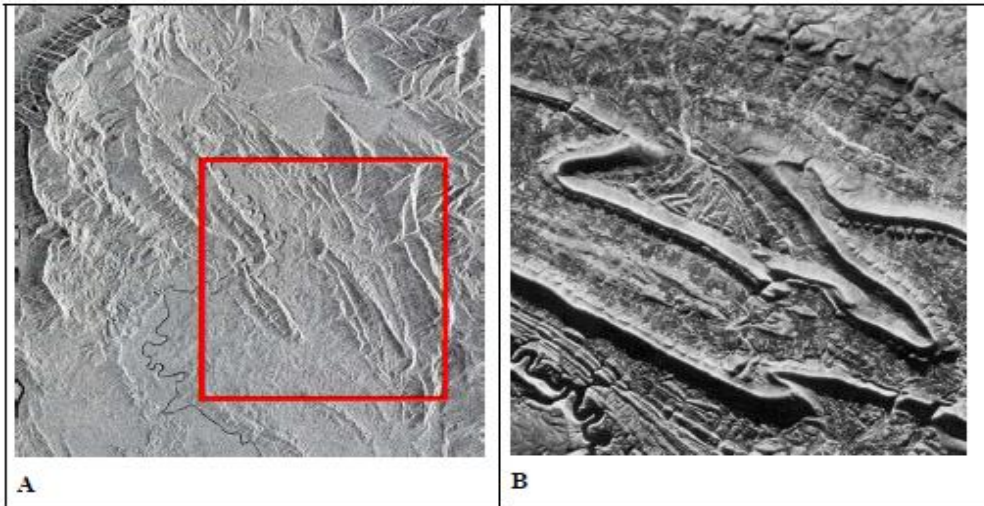
Οι εικόνες SAR έχουν χρησιμοποιηθεί για τα υδρολογικά μοντέλα και την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας. Στην περίπτωση των εδαφών το μικροκυματικό φάσμα είναι ευαίσθητο στην παρουσία της υγρασίας στο ανώτερο εδαφικό στρώμα. Τα δεδομένα SAR μπορούν να βοηθήσουν στη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας σε μια μεγάλη περιοχή, λόγω της συνοπτικής κάλυψης που προσφέρουν, κάτι που θα ήταν αρκετά δύσκολο να πραγματοποιηθεί με τις συμβατικές μεθόδους.

### Ι. Γεωλογία

Η απεικόνιση με Radar χρησιμοποιείται στη γεωλογία εδώ και πολλές δεκαετίες. Ως γνωστόν οι εικόνες SAR είναι ευαίσθητες στην τοπογραφία και στο ανάγλυφο. Χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη της θεωρίας των λιθοσφαιρικών πλακών, αφού αυτές αναδεικνύουν μορφολογίες, π.χ. των μεσοωκεάνιων ραχών και των μεγάλων δομών και γεωλογικών ορίων. Γενικότερα οι εικόνες SAR μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στα ακόλουθα (Prost, 1994):

- στην εξήγηση γεωλογικών φαινομένων, όπως είναι οι σεισμοί και η κατανομή της ενέργειάς τους.
- στην έρευνα του πετρελαίου, αερίων και γενικότερα στην κοιτασματολογία (Εικόνα 7.22).
- στη χαρτογράφηση δομών και λιθολογίας, όπου η γεωμετρία των εικόνων βοηθά στην αναγνώριση γραμμώσεων, διακλάσεων, ρηγμάτων, διατμητικών ζωνών και πτυχών (Εικόνα 7.23).

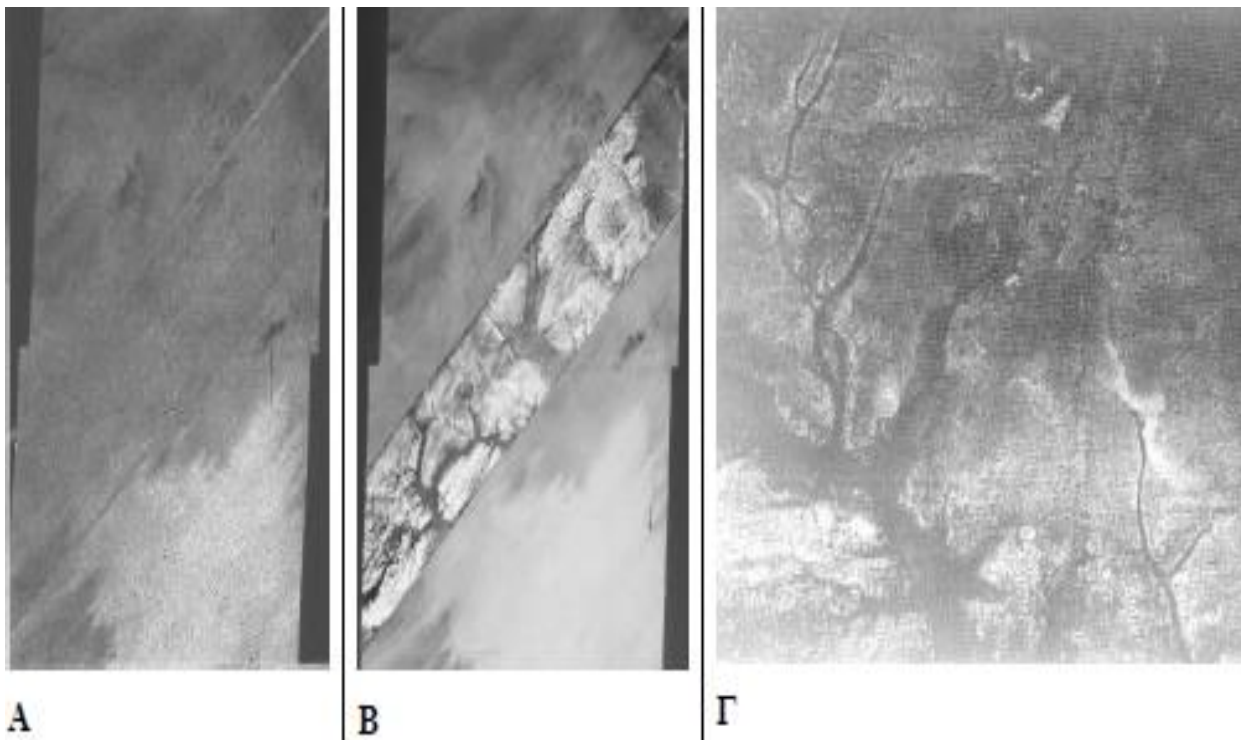
- στην ανάδειξη της γεωμορφολογίας και την καταγραφή του υδρογραφικού δικτύου (Εικόνα 7.24 και 7.25).
- στη χαρτογράφηση των διαφόρων λιθοτύπων και φαινομένων αποσάρθρωσης, όπως είναι τα πτυχωμένα ιζηματογενή πετρώματα τα οποία συχνά αποτελούν ενότητες με υψηλή αντίσταση στη διάβρωση.
- στην παρατήρηση της δραστηριότητας των ηφαιστείων.
- στη μελέτη του φαινομένου της ερημοποίησης.



**Εικόνα 7.22** Ανάδειξη της μορφολογίας και των γεωλογικών δομών σε μία εικόνα RADARSAT (A) και σε ένα αερομεταφερόμενο σύστημα SAR (B). Οι δομές αντικλίνων (A βλ. πλαίσιο, B) αποτελούν δείκτες πιθανής ύπαρξης κοιτασμάτων πετρελαίου στο υπέδαφος. Τα δεδομένα SAR, μαζί με στοιχεία από εργασίες υπαίθρου, μπορούν να υποδείξουν τις κατάλληλες τοποθεσίες για δοκιμαστικές γεωτρήσεις (Drury 1987).



**Εικόνα 7.23** Εικόνα RADARSAT που απεικονίζει έναν διαβρωμένο ιζηματογενή δόμο (dome). Η ανίχνευση της γεωλογικής δομής είναι εφικτή παρά την ύπαρξη ενός πυκνού τροπικού δάσους και τη μόνιμη νεφοκάλυψη την περίοδο λήψης της εικόνας (Radarsat International, 1996).



**Εικόνα 7.24** Παλαιοδρογραφικό δίκτυο στην έρημο Σαχάρα. Α: Απεικόνιση τμήματος της Σαχάρας από τον δορυφόρο Landsat, Β: Συνδυασμός εικόνων Landsat και SIR-A (ασπρόμαυρη λωρίδα) από την ίδια περιοχή, Γ: Εικόνα SIR-A από την περιοχή της Α. Σαχάρας. Τα οπτικά συστήματα δεν έχουν την ικανότητα να βλέπουν κάτω από την επιφάνεια της Γης και έτσι το μόνο χαρακτηριστικό που διακρίνεται στην εικόνα Landsat (Α) είναι η άμμος πάχους 0,1 – 20m. που καλύπτει την περιοχή. Αντίθετα το σύστημα Radar έχει τη δυνατότητα να διεισδύει σε βάθος και να καταγράφει χαρακτηριστικά τα οποία δεν είναι εμφανή από τα οπτικά συστήματα (Β-Γ), όπως σε αυτή την περίπτωση την ανάδειξη του παλαιοδρογραφικού δικτύου που υπήρχε πριν τη δημιουργία της ερήμου (υγρές περίοδοι Πλειστόκαινου) και σήμερα διατηρείται στο υπέδαφος (Drury 1987).

#### Κ. Χαρτογράφηση χρήσης γης και αναγνώριση καλλιεργειών

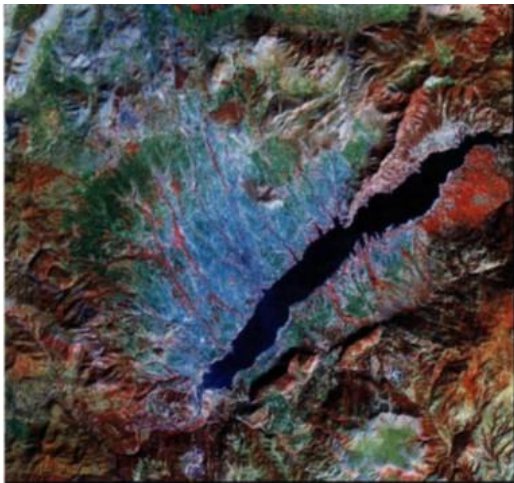
Οι εικόνες SAR βοηθούν στην αναγνώριση των διαφόρων τύπων χρήσης γης (αστικές, γεωργικές περιοχές, δάση, υδάτινες μάζες), γεγονός που οφείλεται κυρίως στην ευαισθησία των συστημάτων Radar στο ανάγλυφο και στην παρουσία της υγρασίας (Danson & Plummer, 1995). Στη χαρτογράφηση των χρήσεων γης, όμως, κρίνεται αναγκαία η δουλειά υπαίθρου και η συνδυασμένη χρήση με τα δεδομένα των οπτικών συστημάτων, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των Radar, σε σχέση με άλλα αισθητήρια όργανα (οπτικά) για την αναγνώριση των καλλιεργειών, είναι η δυνατότητα λήψης δεδομένων σε οποιαδήποτε περίοδο απαιτείται για τη διάκριση των καλλιεργειών κατά τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες (Εικόνα 7.26).

Η ανακλώμενη ενέργεια από μια γεωργική περιοχή μπορεί να διαιρεθεί σε επιμέρους τμήματα, που είναι:

- το τμήμα που ανακλάται από τη βλάστηση.
- το τμήμα των πολλαπλών ανακλάσεων από το έδαφος και τη βλάστηση.
- το τμήμα που ανακλάται μόνο από το έδαφος.

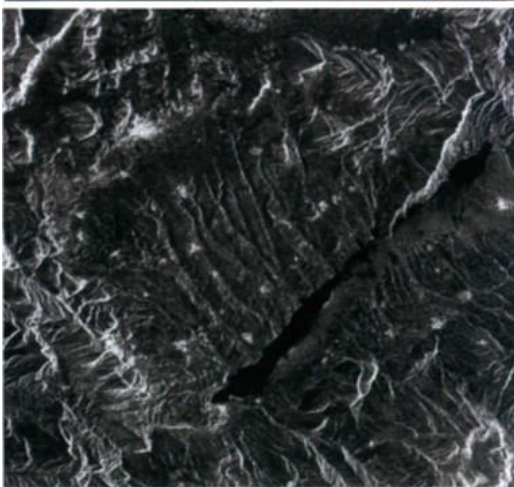
Σημαντική βοήθεια δίνουν οι σύνθετες έγχρωμες εικόνες SAR (διαχρονικές) για την παρακολούθηση και αναγνώριση των καλλιεργειών.



LANDSAT 5 472 RGB



Εικόνα μίξης LANDSAT 5 + ERS-1

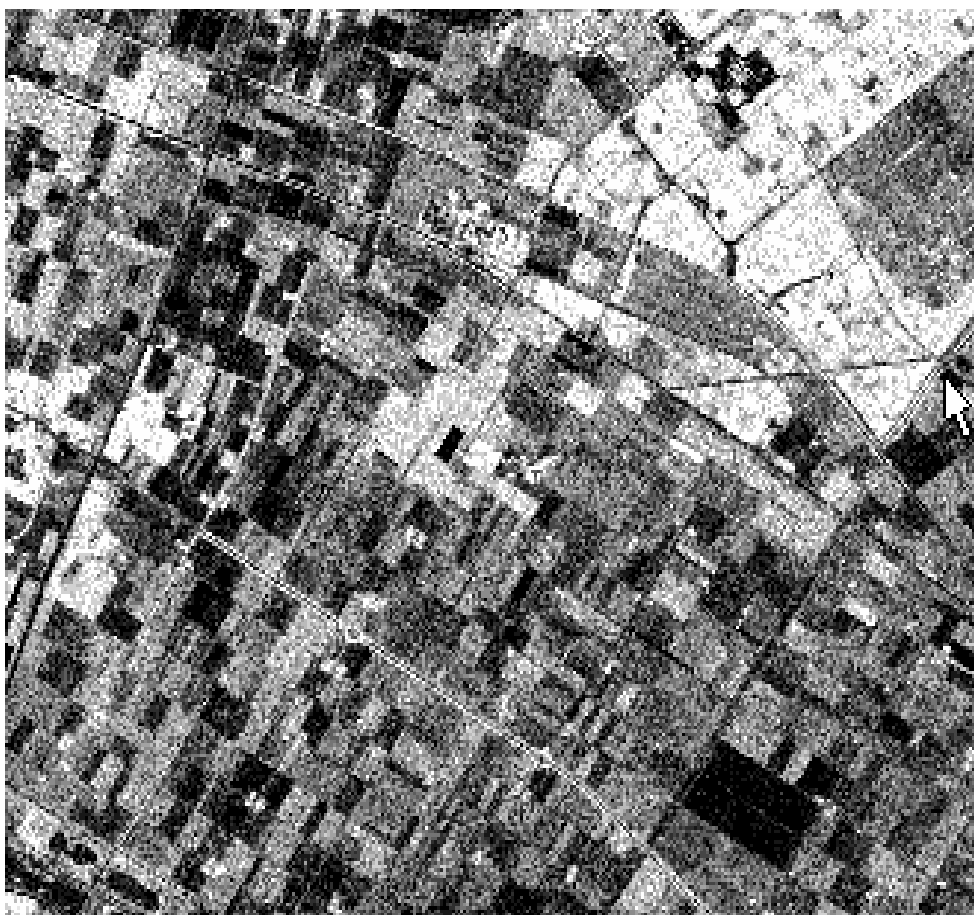


ERS-1

**Εικόνα 7.25** Προϊόν μίξης εικόνων *LANDSAT 7* και *ERS-1* της ευρύτερης περιοχής της Κοζάνης (Parcharidis et al. 2001).

## 7.5 Ψηφιακή επεξεργασία δεδομένων SAR

Η επεξεργασία των δεδομένων SAR αποτελεί μια δύσκολη εργασία λόγω της διαφορετικής φύσης των δεδομένων σε σχέση με τα οπτικά συστήματα και της αποτύπωσης της γήινης επιφάνειας σε μία εικόνα. Η ύπαρξη του θορύβου ή της κηλίδωσης (speckle), η διαφορετική ραδιομετρία των εικόνων (16 bit) και ταυτόχρονα οι σοβαρές μετατοπίσεις ανάγλυφο που παρατηρούνται κυρίως σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο καθιστούν την επεξεργασία ακόμη δυσκολότερη με επίπτωση στην ερμηνεία των δεδομένων και στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

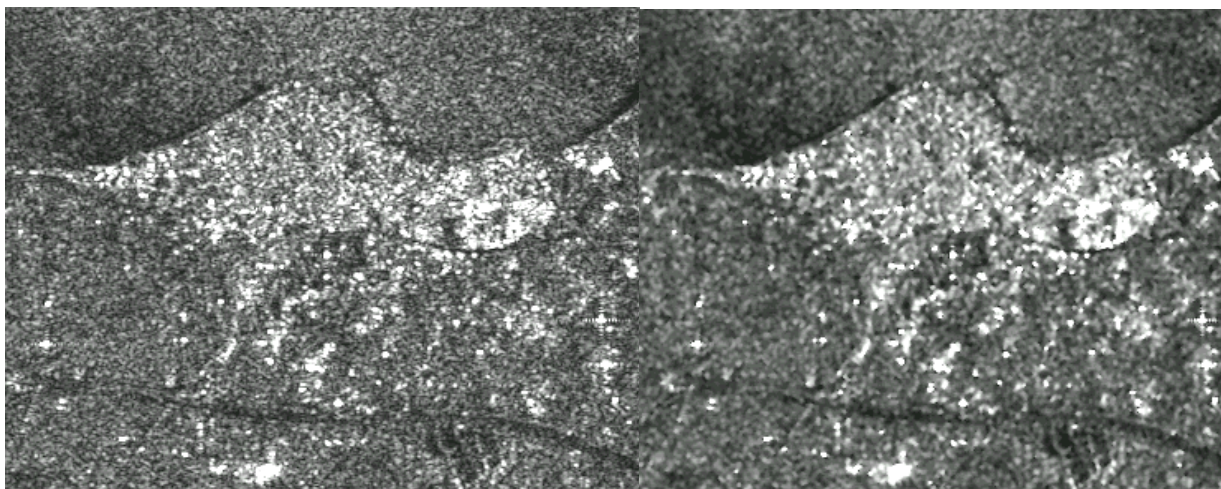


**Εικόνα 7.26:** Εικόνα SIR-C SAR (L-band) από την πεδινή περιοχή Flevoland της Ολλανδίας. Η υγρασία, ο φαινολογικός κύκλος του φυτού, το ύψος φύτευσης, η απόσταση φύτευσης, ο προσανατολισμός των γραμμών φύτευσης, η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, η πόλωση και το φασματικό κανάλι που χρησιμοποιείται, αποτελούν τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν το σήμα επανασκέδασης .

Τα μικροκυματικά σήματα, όταν επιστρέφουν από κάποιο στόχο, βρίσκονται σε φάση (in phase) ή εκτός φάσης (out of phase) (Lillesand & Kiefer, 2000). Η ποικιλία των κυματικών μορφών που λαμβάνονται από την κεραία του δορυφόρου προκαλεί τυχαία κατανομή φωτεινότερων ή σκουρότερων κυψελίδων μέσα στην εικόνα, δίνοντας έτσι κοκκώδη εμφάνιση η οποία καθιστά δύσκολη την ερμηνεία της.

Έτσι, οι εικόνες SAR χαρακτηρίζονται από την έντονη παρουσία θορύβου με τη μορφή κηλίδωσης, η οποία αποτελεί και τμήμα της γενικής υφής της εικόνας. Ο θόρυβος μπορεί να μειωθεί, χωρίς να μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως, με διάφορες τεχνικές επεξεργασίας, δεδομένου ότι η εικόνα έχει ήδη υποστεί μείωση του θορύβου με την τεχνική multi-looking, πριν αυτή αποκτηθεί από τον χρήστη. Η χρήση ειδικών φίλτρων μπορεί να μειώσει τον θόρυβο και, ανάλογα με το μέγεθός τους (3x3, 5x5, κ.ά.), η ομοιογενοποίηση των πρωτογενών δεδομένων μπορεί να είναι μικρή ή μεγάλη (Εικόνα 7.27).





**Εικόνα 7.27** Η πόλη της Κορίνθου σε ψηφιακή απεικόνιση από τον δορυφόρο ERS-2. A: πρωτογενή δεδομένα SAR στα οποία είναι εμφανής ο θόρυβος (speckle), B: μετά την εφαρμογή ειδικού φίλτρου FELEE (3x3) (Lopez et al., 1990) είναι διακριτή η μείωση του θορύβου χωρίς να αλλοιώνονται σημαντικά τα δεδομένα.

Από την άλλη πλευρά, όμως, τα δεδομένα που θα προκύψουν θα έχουν υποστεί αλλοίωση, όπως άλλωστε συμβαίνει ύστερα από κάθε επέμβαση στα πρωτογενή δεδομένα, η οποία δεν είναι πάντα επιθυμητή και γι' αυτό το, λόγω ο τρόπος χρήσης και η επιλογή των φίλτρων θα πρέπει να γίνεται με βάση την εφαρμογή και το, στόχο της, έτσι ώστε η απώλεια πληροφορίας να μην είναι σε βάρος της ερμηνείας των χαρακτηριστικών ταυτοτήτων που την αφορούν.

Στη συνέχεια, το επόμενο βήμα είναι η διόρθωση της ραδιομετρίας της εικόνας SAR και η συμπίεσή της από 16 bit σε 8 bit, δηλαδή η μετατροπή των ραδιομετρικών τιμών από 65.536 σε 256 αποχρώσεις του γκρι, με σκοπό τη διευκόλυνση της επεξεργασίας από τα διάφορα υπολογιστικά πακέτα.

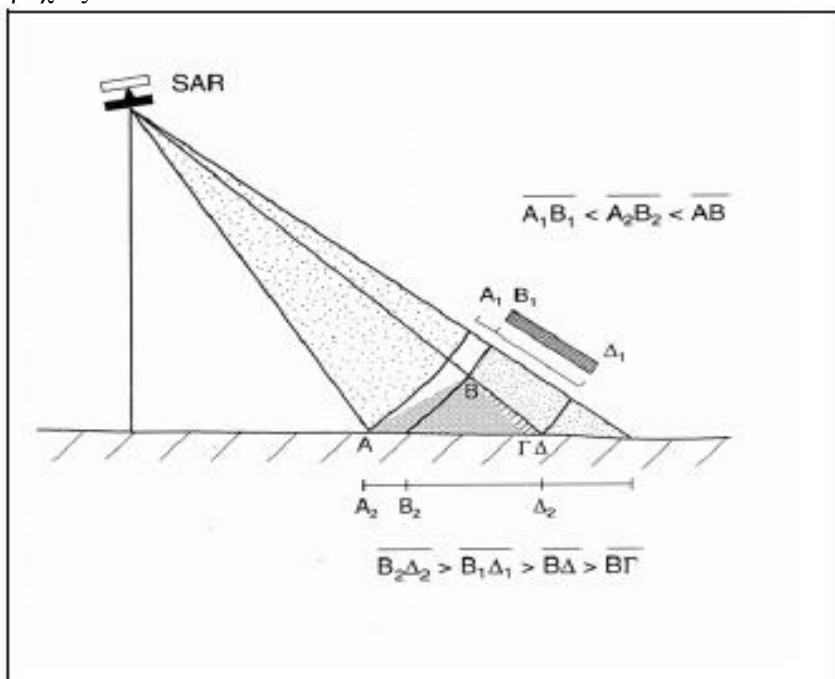
Κατά τη σάρωση μιας επιφάνειας με έντονο ανάγλυφο, ο μικροκυματικός παλμός που στέλνει η κεραία προς τη γήινη επιφάνεια κάνει πολλές φορές σχεδόν τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην κορυφή του βουνού σε σχέση με τους πρόποδες του. Αντίστοιχα και το σήμα επιστροφής από την κορυφή θα φθάσει με μικρή χρονική υστέρηση στον δέκτη σε σχέση με αυτό της βάσης. Έτσι, η κορυφή θα παρουσιάζεται επάνω στην εικόνα σε μικρότερη απόσταση από τους πρόποδες συγκριτικά με την πραγματικότητα. Αυτή η γεωμετρική παραμόρφωση προκαλεί τη συμπίεση της εικόνας σε διεύθυνση κάθετη στο ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου και έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρείται το φαινόμενο της σμίκρυνσης (foreshortening) (Εικόνες 7.28, 7.29). Μια ακραία περίπτωση του φαινομένου σμίκρυνσης αποτελεί το φαινόμενο της αναστροφής (layover). Όταν η κλίση της πλαγιάς του υψώματος είναι αρκετά μεγάλη έως κάθετη, τότε το σήμα επιστροφής από την κορυφή του βουνού ή της κορυφογραμμής θα φθάσει πιο σύντομα στην κεραία σε σχέση με το σήμα της βάσης του βουνού. Αυτού του είδους η γεωμετρική παραμόρφωση οδηγεί στη συμπίκνωση της ραδιομετρικής πληροφορίας (Εικόνα 7.30).

Τέλος, το φαινόμενο της σκίασης αποτελεί μία ακόμη παράμετρο απόκρυψης πληροφοριών. Κατά την εικονοληψία με τα συστήματα SAR οι σκιές είναι απόλυτες, σε αντίθεση με τις εικόνες των οπτικών συστημάτων (ορατό και υπέρυθρο) όπου τα αντικείμενα στη γήινη επιφάνεια μπορούν να αναγνωριστούν σε σκιασμένες περιοχές λόγω της διάχυσης του ορατού και υπέρυθρου φωτός (Μερτίκας, 1999). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στις πλαγιές των βουνών με μεγάλες κλίσεις οι οποίες δεν είναι ορατές στον δορυφόρο και έχουν αντίθετο προσανατολισμό (Εικόνα 7.30).

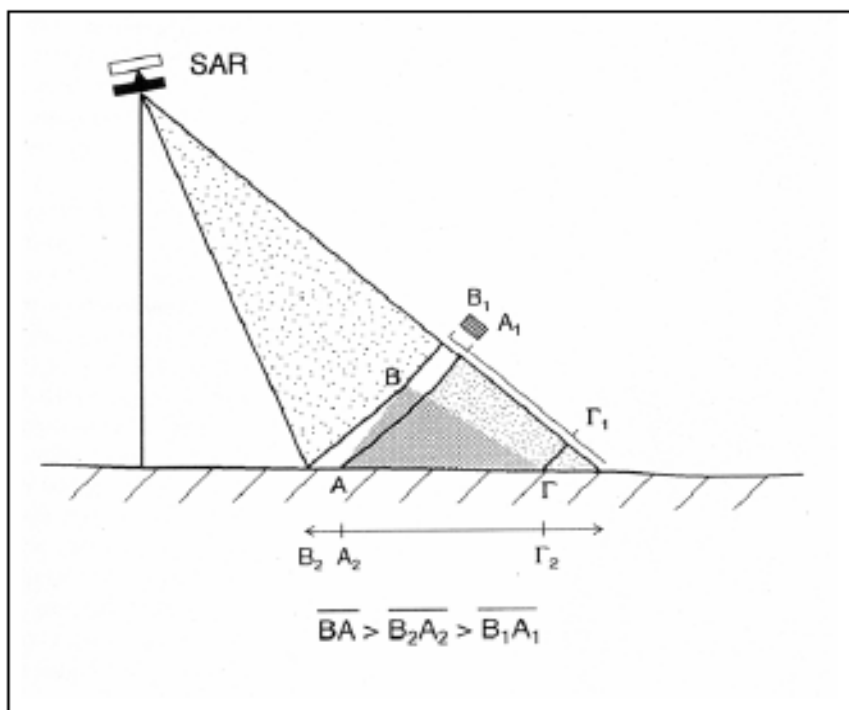
Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της γωνίας παρατήρησης (look angle), τότε το εκπεμπόμενο σήμα δεν φτάνει ποτέ στις πλαγιές αυτές, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σκούρες έως μαύρες επάνω στην εικόνα, προκαλώντας έτσι απόκρυψη πληροφορίας στο τμήμα που αντιστοιχεί στη σκιασμένη επιφάνεια και ταυτόχρονα επιμήκυνση (lengthening).

Οι παραμορφώσεις του ανάγλυφου είναι δυνατόν να διορθωθούν σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση ψηφιακών υψομετρικών δεδομένων εδάφους, και ανάλογα με τη λεπτομέρειά τους το τελικό προϊόν θα προσεγγίζει περισσότερο ή λιγότερο την πραγματικότητα (Εικόνα 7.31). Αντίθετα, η απόκρυψη της πληροφορίας λόγω σκίασης ή λόγω φαινομένων σμίκρυνσης και αναστροφής δεν είναι εύκολο να υποκατασταθεί. Είναι όμως

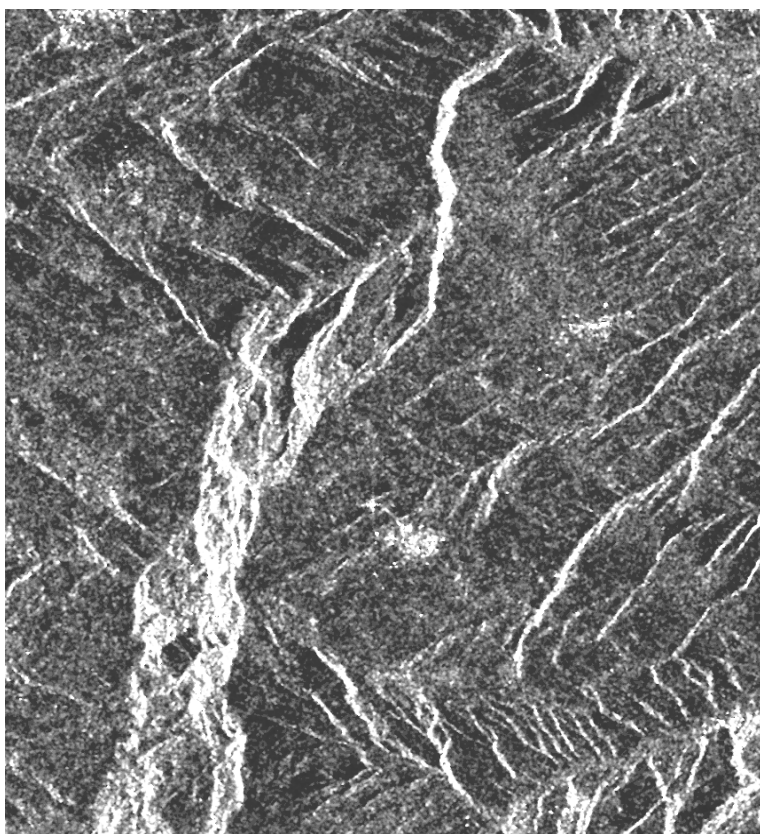
δυνατή η μερική αναπλήρωση της απώλειας αυτής με την απόκτηση δεύτερης εικόνας από δορυφόρο αντίθετης τροχιάς.



**Εικόνα 7.28** Χαρακτηριστική γεωμετρική παραμόρφωση εικόνας SAR, τύπου σμίκρυνσης (foreshortening) και σκίασης. Η πλαγιά AB σμικρύνεται σε A1B1 στο κατά σύρωση (slant range) επίπεδο και σε A2B2 στην προβολή επί της εικόνας. Επίσης η πλαγιά BΓ βρίσκεται σε σκιά και το αντίστοιχο τμήμα της εικόνας εμφανίζεται πιο επίμηκες, B2A2.

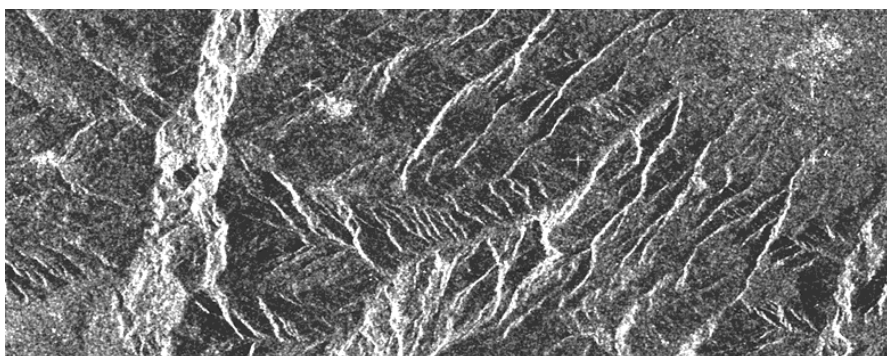


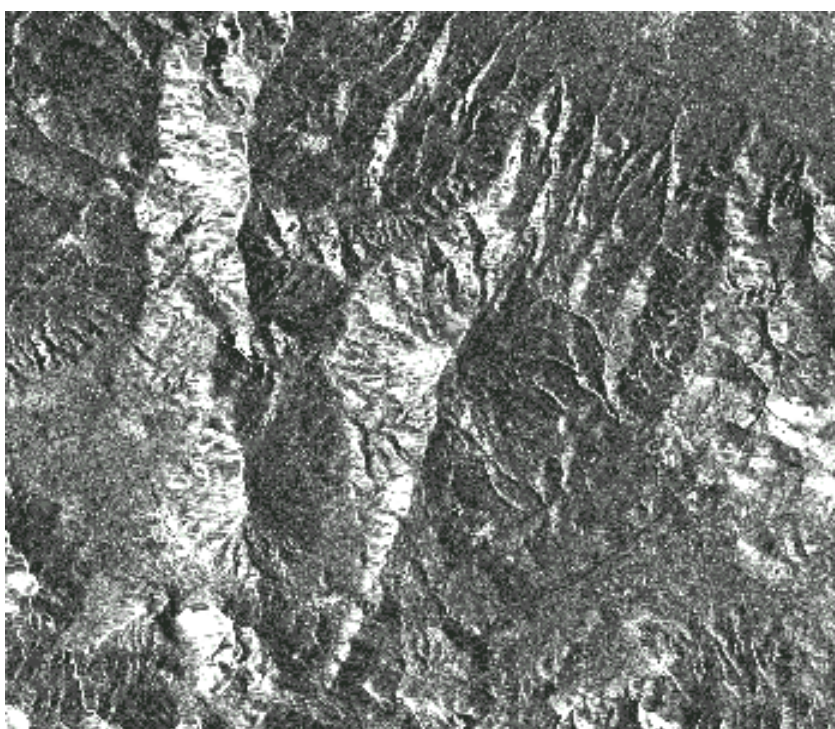
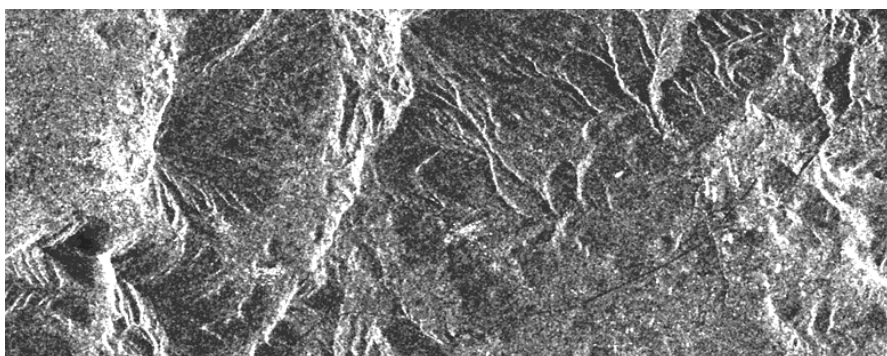
**Εικόνα 7.29** Χαρακτηριστική γεωμετρική παραμόρφωση εικόνας SAR, τύπου αναστροφής (layover). Η κορυφή του υψώματος B καταγράφεται πριν από τη βάση του A, με αποτέλεσμα η λωρίδα B2A2 επί της εικόνας να μην αντιπροσωπεύει την πραγματική διάσταση του ανάγλυφου και έτσι να υπάρχει απώλεια πληροφορίας.



**Εικόνα 7.30** Χαρακτηριστικά παραμόρφωσης ανάγλυφου-σκίασης όπως εμφανίζονται σε μια ψηφιακή εικόνα SAR (περιοχή Κορινθίας) στην οποία έχει προηγηθεί η μείωση του θορύβου και η γραμμική επέκταση του ιστογράμματος.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση των εικόνων SAR δεν έχουμε πολυφασματικά προϊόντα, αφού τα Radar χρησιμοποιούν συνήθως μία φασματική ζώνη. Παρ' όλα αυτά, οι εικόνες SAR μπορούν να συνδυαστούν και να παράγουν ψευδέγχρωμες εικόνες για τη διαχρονική παρακολούθηση φαινομένων τα οποία σχετίζονται με φυσικές καταστροφές και όχι μόνο, όπως πλημμύρες, κίνηση πάγων στους πόλους, παλιρροϊκά φαινόμενα, αποψίλωση δασών, αλλαγή χρήσεων γης, κ.ά. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί 2 ή 3 παγχρωματικές εικόνες SAR από την ίδια περιοχή, με διαφορετικές ημερομηνίες λήψης, πριν και μετά την έναρξη του φαινομένου, και στην κάθε μία αποδίδεται ένα από τα τρία βασικά χρώματα, κόκκινο, πράσινο και μπλε (RGB). Το αποτέλεσμα της σύνθεσης αυτής είναι μια ψευδέγχρωμη εικόνα όπου τα τρία βασικά χρώματα ή τα παράγωγά τους εμφανίζονται στην εικόνα για περιοχές όπου τις αντίστοιχες ημερομηνίες το σθ είναι υψηλό ή σχετικά υψηλό. Ειδικά στην περίπτωση των παράγωγων χρωμάτων, όπως π.χ. το κίτρινο (κόκκινο + πράσινο) η υψηλή συμπεριφορά του σθ ισχύει για δύο ημερομηνίες. Το τελικό προϊόν αποκαλύπτει τις υφιστάμενες αλλαγές μέσω της χρωματικής διαφοράς. Η χροιά (hue) του χρώματος αναδεικνύει την ημερομηνία όπου παρουσιάστηκαν οι αλλαγές, ενώ η ένταση (intensity) του χρώματος δίνει τον βαθμό της αλλαγής.





**Εικόνα 7.31** Εικόνα ERS-2 από την ευρύτερη περιοχή της Νεμέας πριν (A) και μετά την ορθοδιόρθωση (B) με χρήση Ψηφιακού Μοντέλου Ανάγλυφου. Παρατηρείται ότι η απώλεια πληροφορίας που εντοπίζεται στα πρανή που «βλέπουν» τον δορυφόρο (λευκές αποχρώσεις) δεν αναπληρώνεται με την ορθοδιόρθωση (Gatsis et al., 2001).

## 7.6 Συμβολομετρία Radar

Σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνικές γεωδαιτικές μεθόδους (πχ. στερεοσκοπικές), η ικανότητα των Radar να μετρούν αποστάσεις μέσω χρόνου και υπό γωνία από μεγάλες αποστάσεις αποτέλεσε μια νέα τεχνική, τη συμβολομετρία (Interferometry).

Ένα απλό παράδειγμα για την κατανόηση αυτής της τεχνικής είναι το ανθρώπινο μάτι, το οποίο είναι ουσιαστικά «τυφλό» στο να εντοπίσει τη διαφορά σε απόσταση από ένα αντικείμενο που είναι στην ίδια σειρά. Επομένως ούτε ένα Radar ή SAR μπορεί να διακρίνει δύο αντικείμενα-στόχους στην ίδια σειρά· αυτό μπορεί να γίνει μόνο από διαφορετικές οπτικές γωνίες και με τη χρησιμοποίηση δύο ή και παραπάνω συστημάτων Radar.

Αυτή η ιδέα και η χρήση των πληροφοριών της φάσης του εκπεμπόμενου και σκεδασμένου σήματος άνοιξαν τον δρόμο για την τεχνική της συμβολομετρίας. Αν χρησιμοποιηθούν δύο εικόνες SAR, είτε από δύο διαφορετικά συστήματα είτε με επαναλαμβανόμενες λήψεις του ίδιου συστήματος, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η απόσταση (Fletcher, 2007 Part A).

Τα πρώτα αποτελέσματα της συμβολομετρίας αξιοποιήθηκαν το 1986 από τους Zebker και Goldstein, που χρησιμοποίησαν δύο εικόνες και πολλαπλασιάζοντας τα εύρη τους διαχώρισαν τη φάση της εικόνας, με αποτέλεσμα να παραχθεί ένα συμβολογράφημα (interferogram), το οποίο στη συνέχεια απέδωσε έναν τοπογραφικό χάρτη της περιοχής με ανάλυση 10-30m. Έτσι το κύριο βάρος για τις πρώτες εφαρμογές έπεσε στην εκτίμηση της τοπογραφίας, αποδίδοντας μεγάλης ακρίβειας αποτελέσματα (Ferretti et al., 1997). Στην πάροδο του χρόνου και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας δημιουργήθηκαν περισσότερα και εξελιγμένα δορυφορικά συστήματα, με αποτέλεσμα τα «συνεχής λήψης» (repeat-pass) δεδομένα που κατέδειξαν νέες εφαρμογές με την παρακολούθηση παραμορφώσεων πάνω στη γήινη επιφάνεια (Διαφορική Συμβολομετρία – DInSAR, Συμβολομετρία των σταθερών σκεδαστών – Permanent Scatters Interferometry, κ.λπ.).

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι η αξιοπιστία, η ορθότητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των παραπάνω εφαρμογών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνέπεια με την οποία ακολουθούνται τα βήματα της εκάστοτε μεθοδολογίας, καθώς και από την ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων. Το πιο βασικό κλειδί για την επιτυχία των αποτελεσμάτων σε αξιοπιστία, ορθότητα και ακρίβεια είναι η χρήση όσο το δυνατόν περισσότερων ζευγών εικόνων SAR, με σκοπό την αντιμετώπιση σφαλμάτων σε διάφορες παραμέτρους που θα αναλυθούν και στη συνέχεια.

### **Γεωμετρία Συμβολομετρίας**

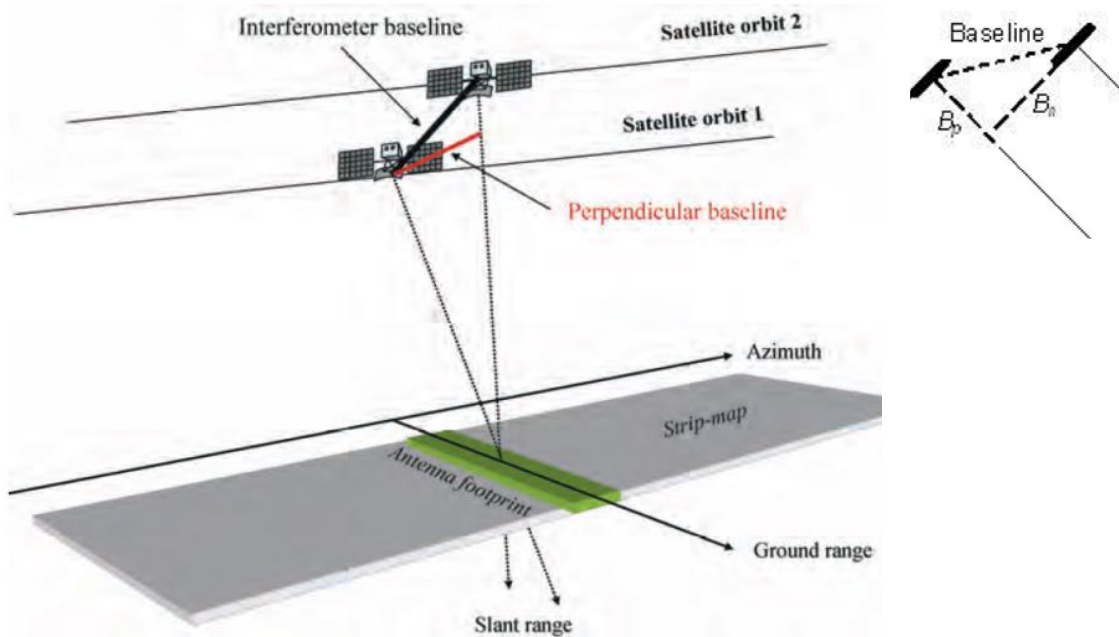
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ένα σύστημα radar – SAR μπορεί να παρατηρήσει μια περιοχή με διαφορετική γωνία, είτε από δύο διαφορετικά συστήματα είτε με επαναλαμβανόμενες λήψεις του ίδιου συστήματος. Από αυτή την γεωμετρία της εικονοληψίας δημιουργούνται δύο χαρακτηριστικά που είναι θεμελιώδη για την τεχνική της Συμβολομετρίας: η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων (ή τροχιών) προς την τροχιά ονομάζεται βασική συμβολομετρική γραμμή, ενώ η κάθετη προβολή της στην κεκλιμένη απόσταση (slant range) είναι η κάθετη συμβολομετρική γραμμή (Εικόνα 7.32). Έστω ότι μεταξύ των δύο δορυφόρων θέτουμε ένα καρτεσιανό δισδιάστατο σύστημα, οι δύο δορυφόροι έχουν μεταξύ τους μία κάθετη και μία οριζόντια απόσταση. Η κάθετη βασική γραμμή ( $B_p$ ) είναι κάθετη στη μετάδοση του σήματος, ενώ η παράλληλη βασική γραμμή ( $B_n$ ) είναι παράλληλη στη μετάδοση του σήματος. Οι δύο αυτές διαστάσεις συνθέτουν το διάνυσμα της βασικής συμβολομετρικής γραμμής (baseline) (Εικόνα 7.32).

Όπως γίνεται αντιληπτό, η διαφορά φάσης που προκύπτει μεταξύ των δύο εικόνων είναι ίση με την παράλληλη συμβολομετρική γραμμή ( $B_p$ ). Αντίστοιχα, αυτή η διαφορά φάσης της συμβολομετρίας μπορεί να σχετιστεί και με το άλλο διάνυσμα της κάθετης συμβολομετρικής γραμμής ( $B_n$ ). Ιδιαίτερα η κάθετη συμβολομετρική γραμμή παίζει σημαντικό ρόλο στην τεχνική της συμβολομετρίας, χαρακτηριστικό που θα αποδοθεί στη συνέχεια της θεωρίας. Τέλος, σημαντικό είναι να τονιστεί ότι η βασική συμβολομετρική γραμμή έχει ένα ανώτερο όριο απόστασης μεταξύ των δύο δορυφόρων. Ένα συμβολομετρικό ζευγάρι, ανάλογα με το δορυφορικό σύστημα, έχει μια κρίσιμη απόσταση μεταξύ των δύο, την κρίσιμη τιμή της βασικής γραμμής (Fletcher, 2007 Part A).

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν δύο τεχνικές για την απόκτηση συμβολομετρικών ζευγαριών: η διαφορετική πτήσης-λήψης συμβολομετρία (repeat pass interferometry) και η ίδια πτήσης-λήψης συμβολομετρία (single-pass interferometry). Στη repeat pass interferometry ένα σύστημα Radar (π.χ., ERS1/2, RADARSAT ή Envisat) παρατηρεί την ίδια περιοχή από διαφορετικές τροχιές. Στη single-pass interferometry, μια διαστημική πλατφόρμα (π.χ., το Shuttle Radar Topography Mission – SRTM) είναι εξοπλισμένη με δύο κεραίες που εκπέμπουν και λαμβάνουν το σήμα με ένα πέρασμα.

### **Περιγραφή των βασικών αρχών της συμβολομετρίας**

Σε αυτή την ενότητα αποτυπώνονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της τεχνικής της συμβολομετρίας και ταυτόχρονα γίνεται μια επεξήγηση των βασικών όρων της που θα χρησιμοποιηθούν και στο στάδιο της μεθοδολογίας και επεξεργασίας.



Εικόνα 7.32 Γεωμετρία ενός συμβολομετρικού συστήματος SAR (Τροποποιημένο Fletcher, 2007).

### Συμβολομετρική Φάση και Συμβολογράφημα

Έστω ότι έχουμε ένα συμβολομετρικό ζευγάρι SAR που παρατηρούν ένα συγκεκριμένο τμήμα της επιφάνειας της Γης. Κάθε σύστημα SAR αποτυπώνει την περιοχή αυτή μέσα από εικονοστοιχεία που εμπεριέχουν τόσο το εύρος όσο και τη φάση του ανακλώμενου σήματος. Ιδιαίτερα όμως η φάση του σήματος και η ανάλυσή της συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην τεχνική της συμβολομετρίας.

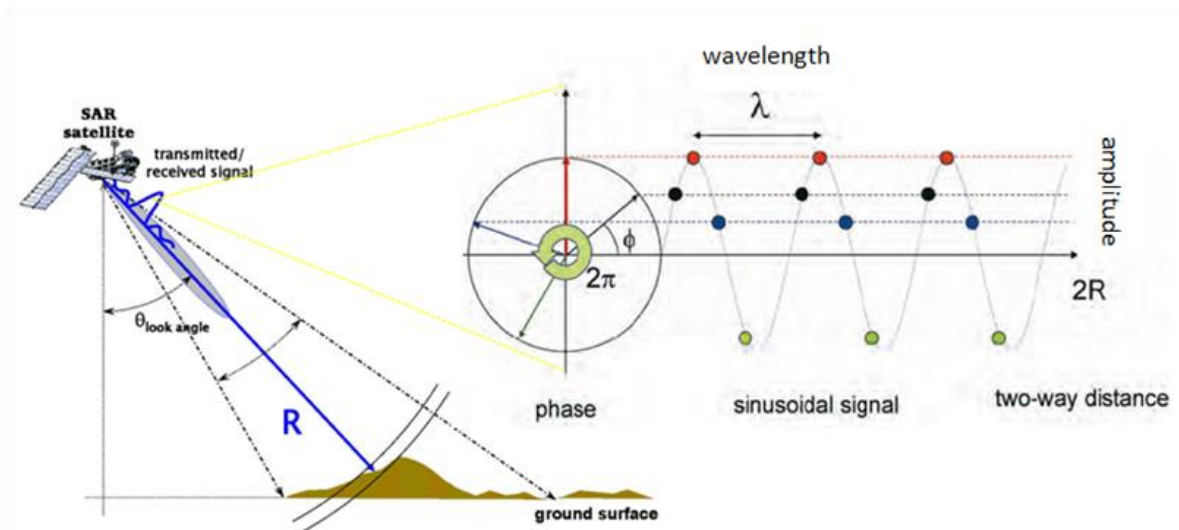
Η ακτινοβολία που μεταδίδεται από το ραντάρ φθάνει στην επιφάνεια, ανακλάται και στη συνέχεια επιστρέφει στον αισθητήρα του ραντάρ, επομένως υπάρχει ένα αμφίδρομο ταξίδι σήματος. Το εν λόγω σήμα είναι ημιτονοειδής φύσης και η καθυστέρηση ( $t$ ) ισοδυναμεί με αλλαγή φάσης ( $\varphi$ ) μεταξύ μετάδοσης και λήψης του σήματος. Επομένως η διαφορά φάσης είναι ίση με το αμφίδρομο ταξίδι του σήματος με απόσταση  $2R$  διαιρούμενο με το μεταδιδόμενο ( $\lambda$ ) μήκος κύματος. Η διαφορά φάσης παίρνει τιμές από  $0$  έως  $2\pi$  (Εικόνα 7.33). Ο τύπος που προκύπτει είναι (Hanssen, 2001):

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R \quad \text{ή} \quad \frac{4\pi}{\lambda} R$$

Εκ των πραγμάτων στα συμβολομετρικά ζεύγη, η απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ του δορυφορικού συστήματος και του αντικειμένου-στόχου στην επιφάνεια της Γης μπορεί να μετρηθεί μέσω της τιμής της διαφοράς της φάσης των δύο συστημάτων SAR. Αυτή η διαφορά της φάσης μεταξύ των δύο εικόνων ονομάζεται συμβολομετρική φάση (interferometric phase). Επομένως ο τύπος που θα προκύψει από τη διαφορά φάσης των δύο συστημάτων που στοχεύουν με διαφορετική κλίση την επιφάνεια και άρα με διαφορετική κεκλιμένη απόσταση (slant-range) ( $R$ ) είναι ο εξής:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2)$$

Σε συνδυασμό με την πληροφορία της γεωμετρίας και τη διαφορετική θέση του αισθητήρα γίνεται η παρατήρηση των γωνιακών διαφορών που απαιτούνται για την τοπογραφική αποτύπωση.



**Εικόνα 7.33** Αναπαράσταση διαδικασίας συμβολομετρικής φάσης (τροποποιημένη από Fletcher, 2007)

Πρακτικά η «ένωση» των δύο εικόνων πραγματοποιείται με τον πολλαπλασιασμό της μιας εικόνας με τη συζυγή μιγαδική της άλλης. Συγκεκριμένα, γίνεται ένας διαγώνιος πολλαπλασιασμός φαντίο επί φαντίο της πρώτης με τη δεύτερη εικόνα, δηλαδή το εύρος της πρώτης επί της δεύτερης, ενώ η φάση της προκύπτει από τη συμβολομετρική φάση (interferometric phase). Αυτή η «νέα» σύσταση της εικόνας ονομάζεται συμβολογράφημα (interferogram) και η μορφή της αποτελείται από μια συνεχόμενη επιφάνεια καμπυλών ίσης φάσης που ονομάζονται και κροσσοί (fringes) (Fletcher, 2007 Part A/Part B).

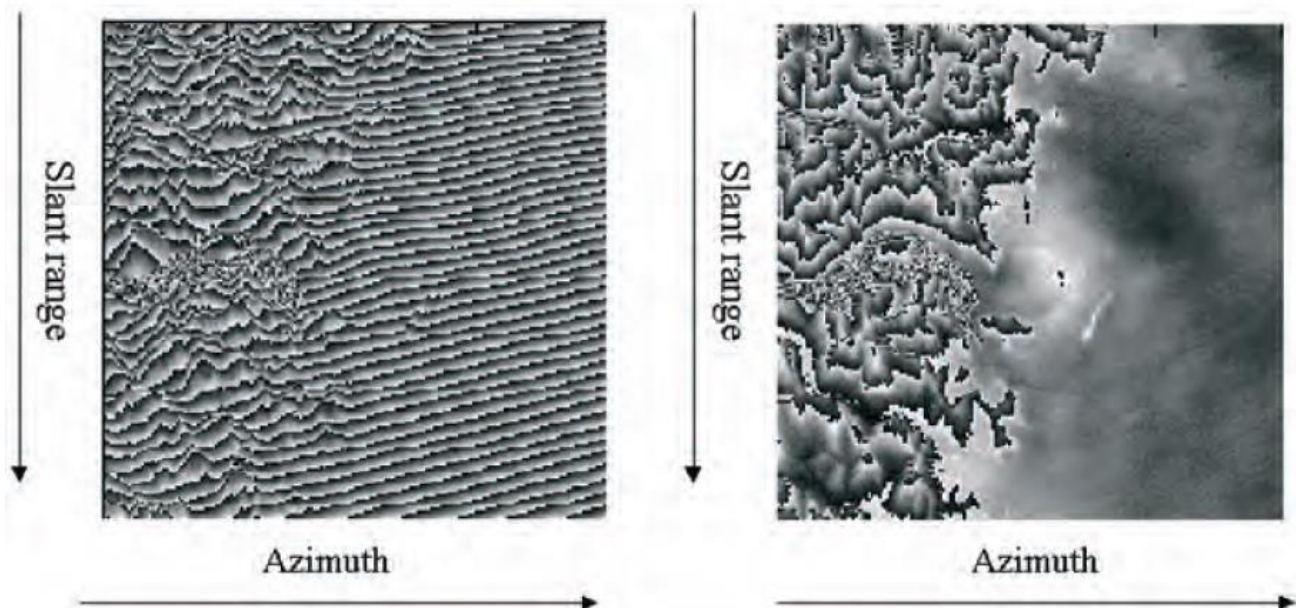
### Εξομάλυνση του συμβολογραφήματος

Σύμφωνα με τη γεωμετρία της απεικόνισης των SAR και της εικονοληψίας από το slant-range, το συμβολογράφημα (interferogram) δεν μπορεί να αποφύγει την ισοπέδωση της επιφάνειας της Γης κατά την αποτύπωσή της (Εικόνα 7.34). Έτσι, τα αντικείμενα με το ίδιο υψόμετρο στην επιφάνεια έχουν την ίδια συμβολομετρική φάση (interferometric phase).

Η εξομάλυνση του συμβολογραφήματος (interferogram flattening), ως εκ τούτου, δημιουργεί έναν χάρτη φάσης που ακολουθεί το σχετικό υψόμετρο του εδάφους. Στο εξομαλυμένο συμβολογράφημα οι ίσες φάσης καμπύλες/κροσσοί (fringes) ακολουθούν τη χωρική κατανομή των ισοϋψών καμπυλών της περιοχής (Εικόνα 7.34) (Fletcher, 2007 Part A).

Το μέγεθος μεταξύ δύο συνεχόμενων γειτονικών κροσσών ονομάζεται το υψόμετρο της ασάφειας ή υψομετρική ασάφεια (altitude of ambiguity –  $h_a$ ) και μπορεί να υπολογιστεί από μια σειρά συμβολομετρικών παραμέτρων. Συγκεκριμένα, το υψόμετρο της ασάφειας ορίζεται ως η διαφορά ύψους που δημιουργεί μια αλλαγή συμβολομετρικής φάσης του  $2\pi$  μετά την εξομάλυνση του συμβολογραφήματος (interferogram flattening). Το υψόμετρο της ασάφειας είναι αντιστρόφως ανάλογο με το διάνυσμα της κάθετης συμβολομετρικής γραμμής ( $B_n$ ) και μεταβάλλεται ανάλογα με το δορυφορικό σύστημα.

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_n}$$



**Εικόνα 7.34** Αριστερά, ένα συμβολογράφημα ERS ενός μέρους των ιταλικών Άλπεων και δεξιά, το *interferogram flatterring*: οι ασυνέχειες φάσης μοιάζουν με τις ισούψείς καμπύλες (Fletcher, 2007 Part A).

### Συμβολομετρική συνοχή

Η ποιότητα της διαφοράς φάσης ενός συμβολογράφηματος (*interferogram*) υπολογίζεται από τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ του συμβολομετρικού ζεύγους. Ουσιαστικά, η συμβολομετρική συνάφεια (*interferometric coherence*) ( $\gamma$ ) είναι η μονάδα μέτρησης του θορύβου της φάσης και η ικανότητα διάκρισης των κροσσών στο συμβολογράφημα (Touzi et al., 1999). Ο ορισμός της συνοχής (Born et al., 1980· Hanssen, 2001):

$$\gamma = \frac{E\{\alpha * \beta\}}{\sqrt{E\{\alpha^2\} * E\{\beta^2\}}}$$

Το εύρος των τιμών της συμβολομετρικής συνάφειας είναι μεταξύ 0 και 1. Το συγκεκριμένο εύρος προσδιορίζει τη σταθερότητα του σήματος που σκεδάζεται στον αισθητήρα του SAR για μία περιοχή μελέτης. Οι τιμές πολύ κοντά στο 0 εμφανίζουν μια μη συσχετιζόμενη εικόνα. Από την άλλη, οι τιμές που είναι κοντά στο 1 ανταποκρίνονται σε ένα σταθερό σήμα που σκεδάζεται από την περιοχή (Touzi et al., 1999).

Όπως γίνεται αντιληπτό η ποιότητα της συμβολομετρικής συνάφειας συνδέεται άμεσα με τον θόρυβο της συμβολομετρικής φάσης. Θορυβώδεις περιοχές συνδέονται με χαμηλή συμβολομετρική συνάφεια και το αντίστροφο. Επομένως και ο υπολογισμός της συμβολομετρικής συνάφειας θα περιέχει μια σειρά από παραμέτρους, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι πηγές θορύβου της συμβολομετρικής φάσης. Οι παράγοντες που πλαισιώνουν την τελική τιμή της συμβολομετρικής συνάφειας αποτυπώνουν και έναν λόγο/αιτία μη αποσυσχέτισης (*decorrelation*) της συμβολομετρικής φάσης και είναι οι εξής (Hanssen, 2001):

$$\gamma_{total} = \gamma_{temporal} \cdot \gamma_{geometric} \cdot \gamma_{volume} \cdot \gamma_{thermal} \cdot \gamma_{processor} \cdot \gamma_{DC}$$

Περίληπτικά, οι παραπάνω παράγοντες αφορούν τα εξής:

$\gamma_{temporal}$  – Χρονική αποσυσχέτιση που προκαλείται από φυσικές αλλαγές στο έδαφος, οι οποίες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των σκεδαστών.



$\gamma_{\text{geometric}}$  – Γεωμετρικά μη συσχετιζόμενη συνάφεια είναι η διαφορά στις γωνίες εικονοληψίας των δύο συστημάτων για την ίδια γεωγραφική περιοχή.  
 $\gamma_{\text{volume}}$  – Αποσυσχέτιση όγκου (volume decorrelation), όταν τα αντικείμενα σκεδαστές καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο στην επίπεδη επιφάνεια του συμβολογραφήματος.  
 $\gamma_{\text{thermal}}$  – Θερμικός θόρυβος (thermal noise) που προκαλείται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών της κεραίας.  
 $\gamma_{\text{processor}}$  – Αποσυσχέτιση επεξεργασίας από τον επεξεργαστή, που απορρέει από την επιλογή των αλγορίθμων για μια σειρά επεξεργασιών π.χ. Coregistration, interpolation, κ.λπ.  
 $\gamma_{\text{DC}}$  – Doppler Centroid decorrelation που προκαλείται από τα διαφορετικά Doppler κεντροειδή μεταξύ των δύο συστημάτων.

## Πηγές αποσυσχέτισης συμβολομετρικής φάσης

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι σε μια μονάδα χωρικής ανάλυσης (resolution cell) ενός συμβολογράμματος περιέχεται πληροφορία όχι μόνο ενός αλλά πολλών σκεδαστών (distributed scatterers), καθένας από τους οποίους μπορεί να αλλάξει στο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο SAR εικονοληψιών. Η κύρια επίδραση της παρουσίας πολλών σκεδαστών ανά μονάδα χωρικής ανάλυσης στο πέρασ του χρόνου είναι η εισαγωγή του θορύβου φάσης (phase noise) (Hanssen, 2001).

## Ατμοσφαιρικές επιδράσεις

Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις αποτελούν τη μεγαλύτερη πηγή σφάλματος της συμβολομετρίας. Ο συγκεκριμένος θόρυβος προκύπτει από την ατμοσφαιρική καθυστέρηση του μήκους κύματος του σήματος από ομοιογενούς χαρακτηριστικά ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Ιδιαίτερα όταν το συμβολομετρικό ζεύγος έχει προέλθει από δύο εικόνες SAR διαφορετικής χρονικής εικονοληψίας, το εκάστοτε σήμα μπορεί να επηρεαστεί με διαφορετικό τρόπο από την ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, η διαφορετική ατμοσφαιρική υγρασία, η θερμοκρασία και η ατμοσφαιρική πίεση μεταξύ των δύο εικόνων συμβάλλουν σε ένα ορατό αποτέλεσμα της συμβολομετρικής φάσης. Αυτοί οι παράγοντες προκαλούν στο συμβολογράφημα μια αλλαγή φάσης κατά μήκος της εικόνας με μια πιο ομαλή χωρική μεταβλητότητα (από μερικές εκατοντάδες μέτρα σε λίγα χιλιόμετρα) (Goldstein, 1995· Zebker and Rosen, 1997).

## Χρονική αποσυσχέτιση

Συγκεκριμένα, η χρονική αποσυσχέτιση (temporal decorrelation) εμφανίζεται σε περιοχές που έχουν κοντά υδάτινες μάζες και πυκνή βλάστηση. Σε τέτοιες περιοχές οι σκεδαστές μπορούν να αλλάξουν από λεπτό προς λεπτό, ενώ βραχύδεις και αστικές περιοχές παρουσιάζουν χρονική σταθερότητα. Περιοριστικός παράγοντας για τη χρονική αποσυσχέτιση είναι η επιλογή απεικονίσεων με μικρό χρονικό εύρος.

## Χωρική αποσυσχέτιση

Ο συγκεκριμένος όρος διαχωρίζεται σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι από το σύστημα SAR με τον θόρυβο του συστήματος και τη γεωμετρική αποσυσχέτιση (geometric decorrelation) και η άλλη από την ποσότητα «όγκου της σκέδασης» (volume decorrelation). Η αποσυσχέτιση όγκου (volume decorrelation) παρουσιάζεται όταν αντικείμενα σκεδαστές καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο στην επίπεδη επιφάνεια του συμβολογραφήματος (π.χ. το άνοιγμα των κλαδιών ενός δέντρου), ενώ η γεωμετρική αποσυσχέτιση (geometric decorrelation) ή αποσυσχέτιση ανύσματος βάσης (baseline decorrelation) αποτελεί τον λόγο απώλειας συνάφειας εξαιτίας διαφορών στη γεωμετρία λήψης των εικόνων. Σημαντική παράμετρος σε αυτό τον παράγοντα αποσυσχέτισης είναι η βασική συμβολομετρική γραμμή, η οποία έχει ένα ανώτερο όριο απόστασης μεταξύ των δύο δορυφόρων, την κρίσιμη συμβολομετρική γραμμή (critical baseline). Συμβολομετρικά ζεύγη με μεγαλύτερη απόσταση από την κρίσιμη συμβολομετρική γραμμή παράγουν συμβολομετρική φάση που είναι καθαρός

θόρυβος. Η κρίσιμη συμβολομετρική γραμμή εξαρτάται από τη μορφολογία της περιοχής, με κύριο χαρακτηριστικό την κλίση του εδάφους και την απόσταση αισθητήρα-στόχου (Zebker et al., 1992).

### **Από το συμβολογράφημα στην τοπογραφική πληροφορία**

Ένα από τα πιο σημαντικά σημεία της τεχνικής της συμβολομετρίας είναι η μετατροπή της συμβολομετρικής φάσης σε τοπογραφική πληροφορία. Ουσιαστικά έχει να κάνει με την αποκρυπτογράφηση της φάσης που αποτελείται από την κυκλική φύση του  $2\pi$  του σήματος και τη μετατροπή του σε υψομετρική πληροφορία. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία ονομάζεται «εκτύλιξη-ξεδίπλωμα της φάσης» (phase unwrapping). Η διαφορά φάσης μεταξύ δύο σημείων του εξομαλυμένου συμβολογράφηματος παρέχει εικόνα της μεταβολής του υψόμετρου με το υψόμετρο της ασάφειας. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι μια επίπονη διαδικασία και αποτυπώνεται αναλυτικά στην ενότητα της επεξεργασίας-μεθοδολογίας των δεδομένων. Η γενική ιδέα στην οποία βασίζεται η εκτύλιξη της φάσης είναι διαγραφή κάθε ακέραιου αριθμού του υψόμετρου της ασάφειας (ισοδύναμο με ακέραιο αριθμό κύκλων φάσης  $2\pi$ ). Η διαδικασία της προσθήκης των ακέραιων πολλαπλάσιων του  $2\pi$  στους συμβολομετρικούς κρροσούς ονομάζεται εκτύλιξη της φάσης.

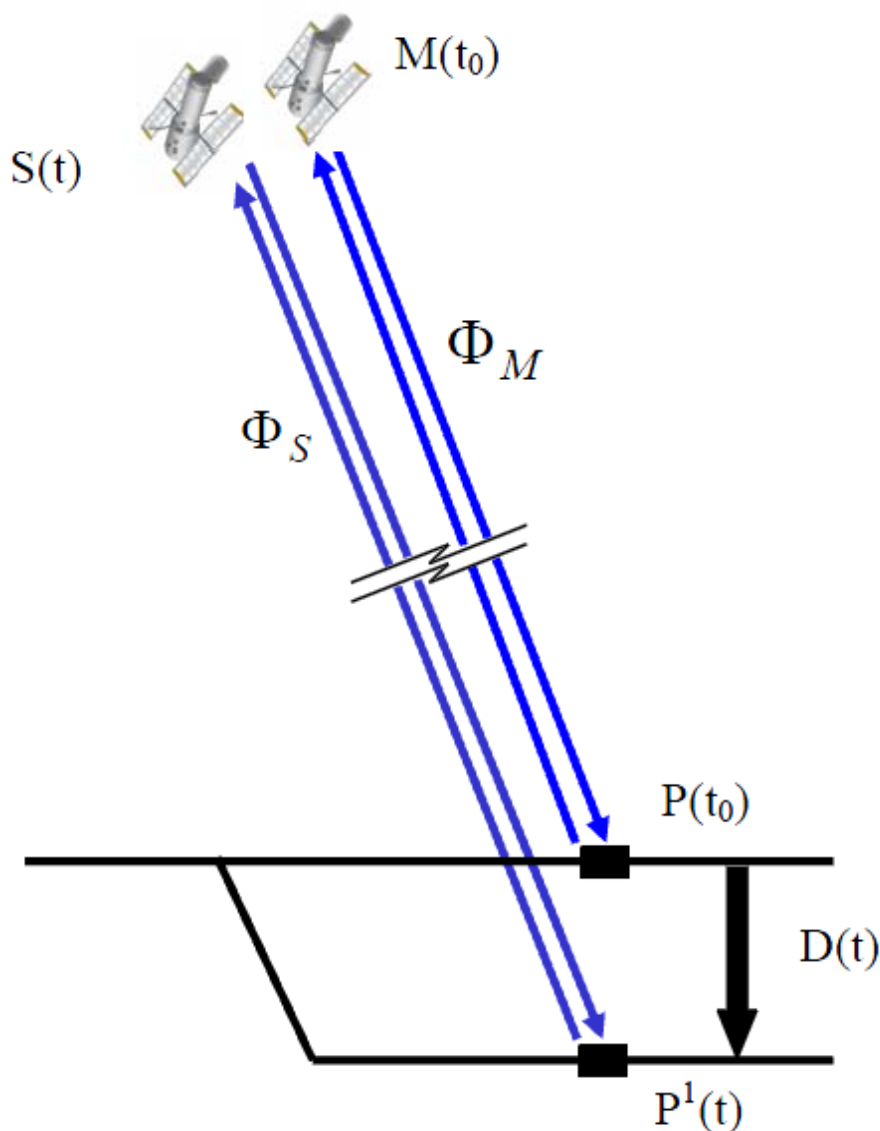
### **Διαφορική συμβολομετρία**

Η διαφορική συμβολομετρία αποτελεί μια εξελεγχόμενη τεχνική της απλής συμβολομετρίας. Η ανάπτυξη αυτής της τεχνικής είχε ως σκοπό τον εντοπισμό μετακινήσεων της επιφάνειας λόγω γεωφυσικών φαινομένων ή ανθρώπινων παρεμβάσεων. Συμβατική «απλή» συμβολομετρία ονομάζεται η διαδικασία της δημιουργίας της τοπογραφίας και των σχετικών υψομέτρων δύο συμβολομετρικών ζευγών SAR για μία περιοχή. Η παραπάνω διαδικασία συμβολίζεται ως InSAR, SAR interferometry. Η ιδέα για την εξέλιξη της διαφορικής συμβολομετρίας πηγάζει από την παραδοχή ότι αν η τοπογραφία είναι γνωστή, η αντίστοιχη φάση που διαμορφώνει την τοπογραφία στην InSAR μπορεί να αφαιρεθεί από τη συμβολομετρική φάση αποτυπώνοντας την παραμόρφωση του εδάφους της επιφάνειας. Αυτή ακριβώς η «διαφορική» τεχνική της InSAR ονομάζεται διαφορική συμβολομετρία (Differential InSAR technique (DInSAR)).

### **Περιγραφή λειτουργίας της διαφορικής συμβολομετρίας**

Γίνεται διάκριση μεταξύ διαφορικής συμβολομετρίας (differential InSAR technique – DInSAR) και συμβατικής «απλής» συμβολομετρίας InSAR είναι καθαρά για τεχνικούς λόγους και εφαρμογών. Διότι η «υπόσταση» της συμβολομετρίας αποτελεί εγγενώς διαφορική τεχνική. Επομένως η τεχνική DInSAR κληρονομεί, ως εξέλιξη της InSAR, όλα τα πλεονεκτήματα αλλά και όλα τα μειονεκτήματα, όπως ο θόρυβος, οι παράγοντες αποσυσχέτισης, κ.λπ. (Fletcher, 2007 Part A / Part B).

Η περιγραφή της λειτουργίας αυτής της τεχνικής γίνεται άμεσα αντιληπτή με την ανάλυση ενός παραδείγματος μέτρησης της παραμόρφωσης (Crosetto et al., 2005). Κάνοντας την αρχική παραδοχή ότι δύο συστήματα SAR εντοπίζουν μια περιοχή πριν και μετά την παραμόρφωση, το συγκριμένο στιγμιότυπο απεικονίζεται στην Εικόνα 7.35.



Εικόνα 7.35 Γεωμετρία διαφορικής συμβολομετρίας (Crossetto et al., 2005).

Ο αισθητήρας αποκτά μια πρώτη εικόνα SAR κατά τη χρονική στιγμή  $t_0$ . Ο πρώτος δορυφόρος και η αντίστοιχη εικόνα καλούνται κύριες – master προϊόντα. Έτσι έχουμε την πρώτη μέτρηση της φάσης με την κύρια εικόνα και την αντίστοιχη φάση  $\Phi_M$ . Η κύρια εικόνα «σημαδεύει» ένα αντικείμενο στόχο P. Στη συνέχεια, μετά από ένα χρονικό διάστημα, εμφανίζεται μια παραμόρφωση η οποία έχει μια συγκεκριμένη χρονική εξέλιξη  $D(t)$ , και το P αντικείμενο υποχωρεί στο προς  $P^1$ . Ο αισθητήρας S αποκτά μια δεύτερη εικόνα SAR κατά τη χρονική στιγμή t. Τα επόμενα προϊόντα μετά την κύρια ονομάζονται «δευτερεύοντα», Slave. Επομένως μετριέται φάση  $\Phi_s$ .

Παρατηρώντας το συγκεκριμένο στιγμιότυπο από τη σκοπιά της απλής συμβολομετρίας, υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει παραμόρφωση, δηλαδή το έδαφος είναι σταθερό και P συμπίπτει με  $P^1$ . Η InSAR παράγει τη συμβολομετρική φάση  $\Delta\Phi_{InSAR}$  που είναι η διαφορά φάσης  $\Phi_M$  και  $\Phi_s$ . Η πληροφορία της συμβολομετρικής φάσης  $\Delta\Phi_{InSAR}$  είναι το βασικό στοιχείο για την παραγωγή DEM.

$$\Delta\Phi_{InSAR} = \Phi_M + \Phi_s + \Phi_{NOISE} + \Phi_{ATMOSPHER}$$

Έτσι όταν το σημείο μετακινείται από το P στο P1, εκτός από την τοπογραφική φάση  $\Phi_{\text{TOPOGRAPHY}} = \Phi_M + \Phi_S$ , προστίθεται και μία ακόμα φάση λόγω της παραμόρφωσης και της μετακίνησης του στόχου,  $\Phi_{\text{MOVEMENT}}$ . Επομένως ο τύπος για τη διαφορική συμβολομετρική φάση με την τεχνική DInSAR έχει ως εξής:

$$\Delta\Phi_{\text{DInSAR}} = \Phi_{\text{TOPOGRAPHY}} + \Phi_{\text{NOISE}} + \varphi_{\text{ATMOSPHER}} + \Phi_{\text{MOVEMENT}}$$

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η ιδέα για την εξέλιξη της διαφορικής συμβολομετρίας πηγάζει στην προϋπόθεση ότι η τοπογραφία είναι γνωστή. Έτσι στον τύπο της διαφορικής συμβολομετρικής φάσης η «γνωστή» τοπογραφική πληροφορία, επομένως και φάση  $\Phi_{\text{KNOWN TOPOGRAPHY}}$ , αφαιρείται από τις υπόλοιπες συνεισφέρουσες φάσεις.

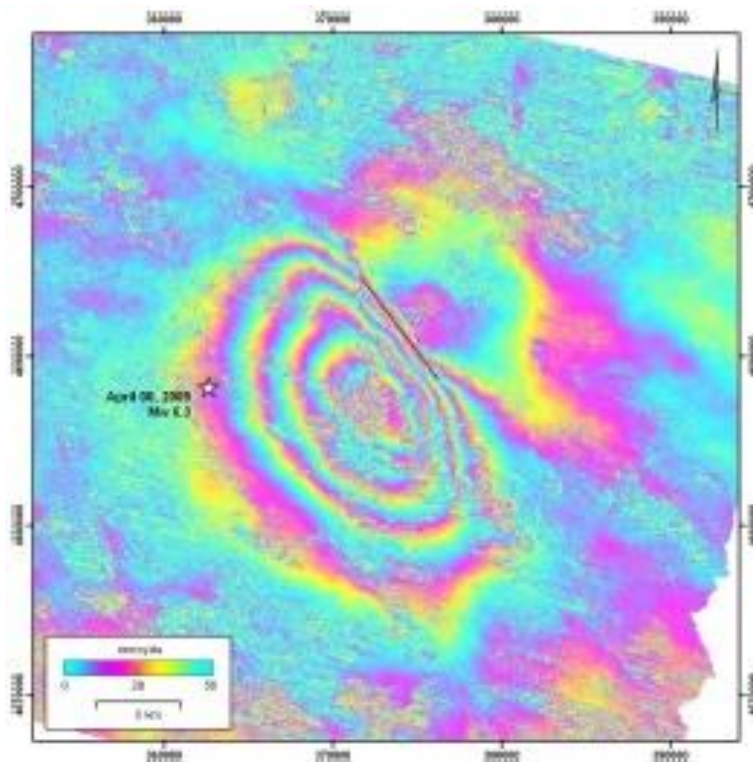
$$\Delta\Phi_{\text{DInSAR}} = \Phi_{\text{NOISE}} + \varphi_{\text{ATMOSPHER}} + \Phi_{\text{MOVEMENT}} - \Phi_{\text{KNOWN TOPOGRAPHY}}$$

Ενώ τέλος για ένα δεδομένο pixel, στην περίπτωση μας το αντικείμενο P, δίνεται η δυνατότητα του υπολογισμού της φάσης του τοπογραφικού σφάλματος  $\Phi_{\text{TOPOGRAPHY-RESUDALS}}$  σε συνάρτηση με ένα DEM και την κύρια συμβολομετρική γραμμή.

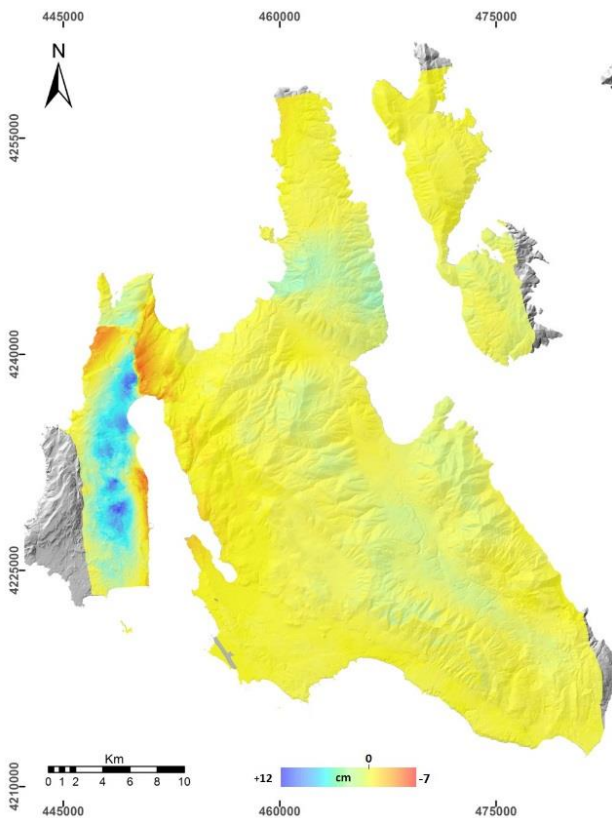
$$\Delta\Phi_{\text{DInSAR}} = \Phi_{\text{NOISE}} + \varphi_{\text{ATMOSPHER}} + \Phi_{\text{MOVEMENT}} + \Phi_{\text{TOPOGRAPHY-RESUDALS}}$$

Για να γίνει γνωστή η τοπογραφική πληροφορία και κατ' επέκταση η φάση  $\Phi_{\text{KNOWN TOPOGRAPHY}}$  υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι που χρησιμοποιούν διαφορετικό τρόπο προσδιορισμού της.

Η πρώτη είναι η απλή διαφορική συμβολομετρία ή απλή συμβολομετρία, η (two-pass) μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί μια εξωτερική πηγή τοπογραφίας, όπως το υψομετρικό μοντέλο επιφάνειας (Digital Elevation Model), που μετατρέπεται σε συντεταγμένες ραντάρ με τη βοήθεια της κύριας συμβολομετρικής γραμμής (Εικόνες 7.36 και 7.37). Δεδομένου ότι για πολλές περιοχές του κόσμου υπάρχουν διαθέσιμα DEM, αποτελεί μία από τις πιο εφικτές προσεγγίσεις. Βέβαια, σε αυτή την μέθοδο γίνεται μια προσπάθεια προσδιορισμού των λαθών που έχει το εκάστοτε DEM (Massonnet et al., 1993).



**Εικόνα 7.36** Συν-σεισμικό συμβολόγραμμα 2 περασμάτων + DEM του σεισμού της L' Acquila 7/4/2009 με τη χρήση ζεύγους εικόνων ENVISAT ASAR (Papanikolaou et al. 2010).



**Εικόνα 7.37** Συν-σεισμικό συμβολόγραμμα 2 περασμάτων + DEM του σεισμού της Κεφαλονιάς 3/2/2014 με τη χρήση ζεύγους εικόνων TerraSAR-X (Benekos et al. 2015)

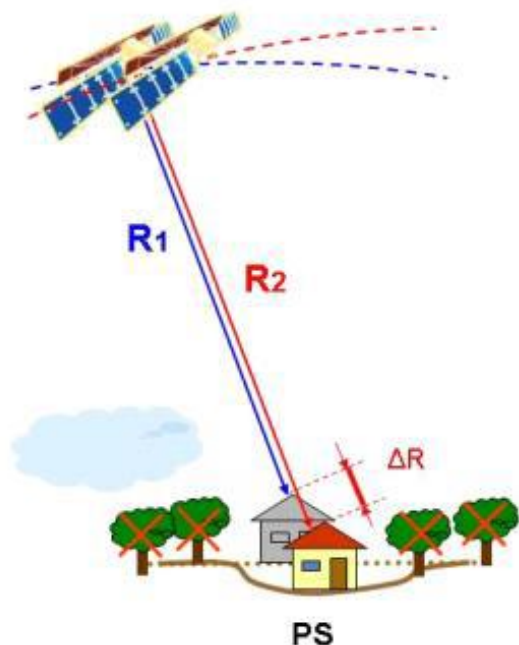
Μια δεύτερη μέθοδος είναι η λεγόμενη μέθοδος των τριών περασμάτων. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένα άλλο συμβολομετρικό ζευγάρι που εντοπίζει την ίδια περιοχή και παράγει την τοπογραφική πληροφορία με τις μεθόδους απλής συμβολομετρίας. Το συγκεκριμένο συμβολομετρικό ονομάζεται και τοπογραφικό ζευγάρι. Αυτό το ζεύγος θεωρείται ότι δεν έχει καμία παραμόρφωση και η βασική συμβολομετρική γραμμή του είναι κατάλληλη έτσι ώστε να αποδώσει ευαισθησία και επαρκή συνοχή στην τοπογραφία. Έτσι αφαιρείται από το συμβολομετρικό ζευγάρι που έχει υποστεί παραμόρφωση και παράγει το διαφορικό συμβολογράφημα (differential interferogram). Βασική προϋπόθεση αυτής της μεθοδολογίας είναι ότι μεταξύ των δύο ζευγαριών πρέπει να υπάρχει μία κοινή εικόνα (Zebker et al., 1994). Στην περίπτωση που τα δύο ζεύγη δεν μπορούν να βρουν μία κοινή εικόνα λόγω μεγάλης απόστασης της βασικής συμβολομετρικής γραμμής και κατ' επέκταση μειωμένης συνάφειας εναλλακτικά εφαρμόζεται η μέθοδος των τεσσάρων περασμάτων όπου το τοπογραφικό ζευγάρι είναι ανεξάρτητο του ζευγαριού που παράγει την παραμόρφωση. Βασικό στοιχείο αυτής της μεθόδου είναι η καλή συμπροσαρμογή (co-registration) των εικόνων για να υπερτεθεί καλά η μία πάνω στην άλλη.

### Τεχνική σταθερών ανακλαστήρων – Persistent Scatterers Interferometry (PSI)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τεχνικές της Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ εφαρμόζονται κυρίως για την ανίχνευση εδαφικών παραμορφώσεων. Τέτοιας έντασης εδαφικές παραμορφώσεις σχετίζονται με φαινόμενα όπως οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και γενικότερα το σύνολο των φυσικών διεργασιών που έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλης έντασης παραμορφώσεων στην επιφάνεια της Γης. Κατά βάση μετακινήσεις

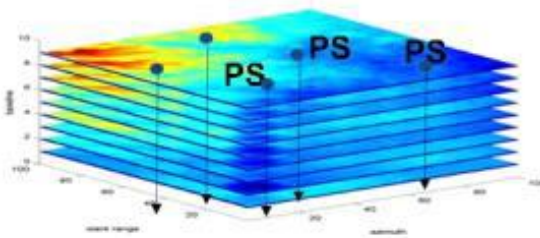
μικρότερες των 28 mm, για συστήματα SAR που λειτουργούν στο κανάλι-C της μικροκυματικής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (όπως εκείνα των ERS και ENVISAT), δύσκολα διαχωρίζονται από τις επιμέρους επιδράσεις στο σήμα. Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις αποτελούν ίσως τον σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα στην αναγνώριση μικρότερης κλίμακας μετακινήσεων βάσει των τεχνικών της συμβατικής Διαφορικής Συμβολομετρίας Ραντάρ. Προς την ίδια κατεύθυνση οδηγούν και τα φαινόμενα της χωρικής και χρονικής αποσυσχέτισης. Τα τελευταία χρόνια, προκειμένου να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί, έχουν αναπτυχθεί πιο εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων SAR. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό κινήσεων με πολύ μεγάλη ακρίβεια της τάξης των μερικών χιλιοστών. Μπορούν να μετρηθούν ακόμη και οι μετακινήσεις 0,1 χιλιοστών ετησίως σε μεμονωμένα εδαφικά ή δομικά σημεία και για εκτεταμένες περιοχές, που καλύπτουν κυρίως αστικά ή ημιαστικά περιβάλλοντα. Λόγω ακριβώς της φύσης των συγκεκριμένων τεχνικών, όπου η ανάλυση λαμβάνει χώρα αποκλειστικά σε συγκεκριμένα σημεία των οποίων τα χαρακτηριστικά ανάκλασης του σήματος Radar παραμένουν σταθερά, καλούνται τεχνικές σταθερών οπισθοσκεδαστών..

Η τεχνική των σταθερών οπισθοσκεδαστών (Permanent or Persistent Scatterers ή PSI) αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 2000 από μια ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου του Μιλάνου (POLIMI) (Ferretti et al., 2000 & 2001). Ο βασικός στόχος της συγκεκριμένης τεχνικής ήταν να ξεπεράσει τους περιορισμούς της χρονικής και χωρικής αποσυσχέτισης της συμβολομετρίας Radar (InSAR). Ταυτόχρονα, αυτή η νέα τεχνική αντιμετωπίζει επιτυχώς προβλήματα όπως οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις, οι οποίες μπορούν να μετριάσουν σε αρκετά μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία και ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Ferretti et al., 2000 & 2001· Zhao et al., 2009). Μπορούν να μετρηθούν ακόμη και οι μετακινήσεις 0,1 χιλιοστών ετησίως (σε εξαιρετικές περιπτώσεις).



DInSAR περιοριστικοί παράγοντες:

- Μεταβολές της οπισθοσκέδασης
- Ατμοσφαιρικές επιδράσεις



Με τη χρήση:

- Μεγάλου αριθμού εικόνων SAR αναγνώριση:
- Υψηλής συνάφειας στόχοι: Σταθεροί Ανακλαστήρες (PS)

Εκτίμηση και στη συνέχεια αφαίρεση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων

Εικόνα 7.38 Η βασική έννοια της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων (τροποποιημένο από TRE).

Η τεχνική χρησιμοποιεί ένα πλούσιο αρχείο δορυφορικών εικόνων Radar (με εκκίνηση το 1992) με σκοπό να αναγνωρίσει δίκτυα από επιφανειακά χαρακτηριστικά τα οποία σκεδιάζουν σταθερά το σήμα του Radar στο σύνολο όλων των εικόνων. Οι σταθεροί ανακλαστήρες αντιστοιχούν κυρίως σε χαρακτηριστικά τα οποία έχουν κατασκευαστεί από τον ανθρώπινο παράγοντα όπως κτίρια, γέφυρες, φράγματα, υδάτινοι αγωγοί, κεραιές κ.λπ., καθώς επίσης και σε φυσικούς ανακλαστήρες όπως πετρώματα.

Με άλλα λόγια, οι σταθεροί ανακλαστήρες συνθέτουν ένα «φυσικό γεωδαιτικό δίκτυο» με σκοπό την παρατήρηση της παραμόρφωσης της γήινης επιφάνειας με ακρίβεια χιλιοστού (αφορά κυρίως στη γραμμική παραμόρφωση αλλά όχι μόνο), καθώς επίσης και της σταθερότητας των μεμονωμένων κατασκευών. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι οι σταθεροί ανακλαστήρες είναι χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας τα οποία διατηρούν πάντα την ίδια συμπεριφορά στις εικόνες Radar που λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικά λήψεις (Εικόνα 7.38).

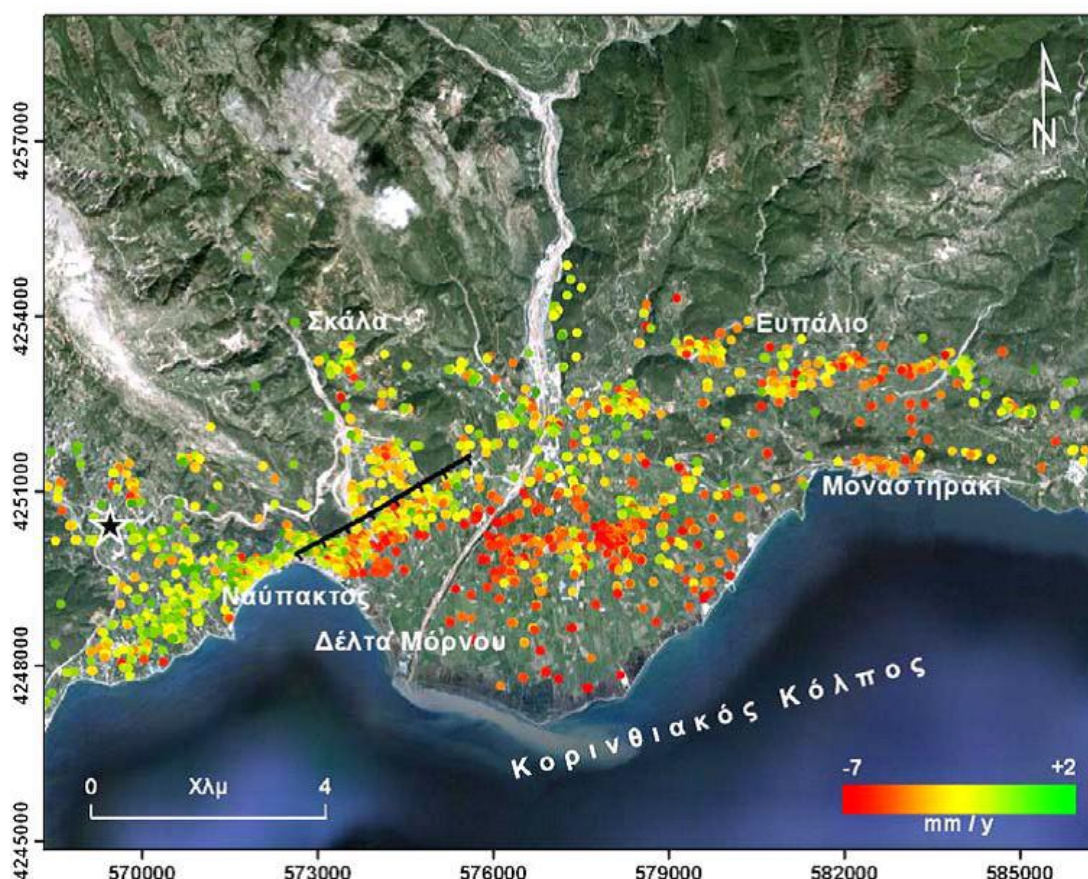
Ο ακριβής εντοπισμός των σταθερών αυτών οπισθοσκεδαστών δεν μπορεί να προβλεφθεί πριν την επεξεργασία, αλλά γενικά πάνω από αστικές περιοχές η πυκνότητά τους κυμαίνεται μεταξύ 300-600 σημείων ανά τετρ. χλμ (Ferretti et al., 2006). Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων είναι η δυνατότητα εξαγωγής χαρτών ταχύτητας της ετήσιας εδαφικής μετατόπισης για ένα διάστημα που μπορεί να φτάσει έως και τα 20 χρόνια. Επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα διερεύνησης των διακυμάνσεων της εδαφικής μετατόπισης με τον χρόνο (χρονοσειρά) για κάθε σκεδαστή, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αναγνώριση τυχόν μεταβολών του ρυθμού παραμόρφωσης, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την αντιμετώπισή τους (Ferretti et al. 2004· Colesanti et al. 2003· Werner et al., 2003· Parcharidis et al. 2009).

### Εφαρμογές της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων

Η τεχνική των PS εξαρτάται από τις εφαρμογές στις οποίες προτίθεται να εφαρμοστεί. Σε γενικές γραμμές, η πιθανότητα επιτυχίας της εφαρμογής των σταθερών ανακλαστήρων εξαρτάται από : α) τον αριθμό των εικόνων Radar και τη χρονική διασπορά τους, β) την πυκνότητα των σταθερών ανακλαστήρων στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, γ) την κίνηση των ανακλαστήρων πάντα προς τη διεύθυνση του δορυφόρου (LOS) και δ) την κάλυψη ή μη της περιοχής από χιόνι. Παρακάτω γίνεται μια μικρή αναφορά των διαφορετικών εφαρμογών στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική (Ferretti et al., 2006).

- **Καθίζηση εδάφους** – Η χρονική όσο και η χωρική διακριτική ικανότητα των δεδομένων Radar καθιστά δυνατή την παρατήρηση της καθίζησης που λαμβάνει χώρα σε αστικές περιοχές. Η πυκνότητα των ανακλαστήρων είναι συνήθως μεγαλύτερη από 100 ανακλαστήρες ανά τετρ. χλμ. και χιλιάδες τετρ. χλμ. μπορούν να παρατηρηθούν σε μηνιαία βάση (Ferretti et al., 2000). Επιπλέον, μπορεί να ανιχνευτεί η παραμόρφωση σε περιαστικές περιοχές (Εικόνα 7.39) ή και ακόμη μεμονωμένα κτίρια και γενικά μεμονωμένες κατασκευές (Εικόνα 7.40) τα οποία έχουν υποστεί καθίζηση (Ferretti et al., 2000), καθώς επίσης και οι πιθανές εποχικές μετακινήσεις οι οποίες προήλθαν από διακυμάνσεις του υδάτινου ορίζοντα (Colesanti et al., 2003a). Επιπρόσθετα, εταιρείες στον τομέα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου είναι οι κύριοι χρήστες των δεδομένων των σταθερών ανακλαστήρων. Επίσης, η παραμόρφωση η οποία έχει προέλθει από δραστηριότητες ορυχείων μπορεί να ανιχνευτεί με την τεχνική των PS (Colesanti, Le Mouelic & Bennani et al., 2005).
- **Ρήγματα και ηφαιστεια** – Για την παρατήρηση των ρηγμάτων μιας περιοχής απαιτούνται μετρήσεις πολύ μεγάλης ακρίβειας, διότι η μετακίνηση του εδάφους μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή (Massonnet & Feigl, 1998). Επιπροσθέτως, υψηλότερη ακρίβεια σημαίνει καλύτερη εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Τα δεδομένα των σταθερών ανακλαστήρων παίζουν σημαντικό ρόλο για δύο ρόλους: α) η πυκνότητα των ανακλαστήρων είναι σαφώς μεγαλύτερη από ό,τι εκείνη των σταθμών GPS και β) η ακρίβεια των μετρήσεων στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι μεγαλύτερη από εκείνη των GPS. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα τελευταία χρόνια έχει γίνει πλέον αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα ότι οι δύο τεχνικές των σταθερών ανακλαστήρων και των GPS είναι συμπληρωματικές και θα πρέπει να αξιοποιούνται παράλληλα για την παρατήρηση περιοχών οι οποίες βρίσκονται σε κίνδυνο. Είναι πλέον φανερό ότι η ευρεία περιοχή που καλύπτουν οι ανακλαστήρες οδηγεί σε καλύτερη ταυτοποίηση των πιθανών περιοχών για σταθμούς GPS, τονίζοντας περιοχές οι οποίες έχουν υποστεί παραμορφώσεις προκαλούμενες από ανθρωπογενείς πηγές παρά από τεκτονικές ή ηφαιστειακές κινήσεις (Salvi, Atzore & Tolomei et al., 2004).

- Κατολισθήσεις** – Μετρήσεις που έχουν παραχθεί από την τεχνική των PS, συνδυαζόμενες με πληροφορίες σχετικά με τον μηχανισμό της μετακίνησης οι οποίες έχουν προέλθει από in situ δεδομένα, αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο παρακολούθησης περιοχών που χαρακτηρίζονται από αστάθεια πρανών και κατολισθήσεων (Colesanti et al., 2003· Colesanti & Wasowski, 2006· Farina et al., 2006· Hilley et al., 2004· Ferretti et al., 2005). Παρόλο που οι περιορισμοί της τεχνικής όσον αφορά τις εφαρμογές των κατολισθήσεων είναι ακόμη αυστηροί, η πιθανότητα δημιουργίας πληροφορίας μετακινήσεων πολύ γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια στην ταχύτητα της παραμόρφωσης, χρησιμοποιώντας ιστορικά αρχεία δεδομένων, ανοίγει νέους ορίζοντες στη δημιουργία χαρτών παραμόρφωσης που οφείλονται σε κατολισθητικά φαινόμενα (Farina et al., 2006). Η τεχνική των PS μπορεί να διαχωρίσει μια περιοχή σε ασταθή και σταθερά πρανή. Η ταχύτητα παραμόρφωσης μπορεί να εκτιμηθεί, καθώς δεν ξεπερνά τα 5-6 εκατοστά ετησίως. Τέλος, η πιθανότητα συνεχούς ανανέωσης των δεδομένων μιας περιοχής και συνεπώς της ανανέωσης των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και η δυνατότητα εισαγωγής των αποτελεσμάτων της τεχνικής σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), έχουν αυξήσει θεαματικά την έρευνα για κατολισθήσεις.



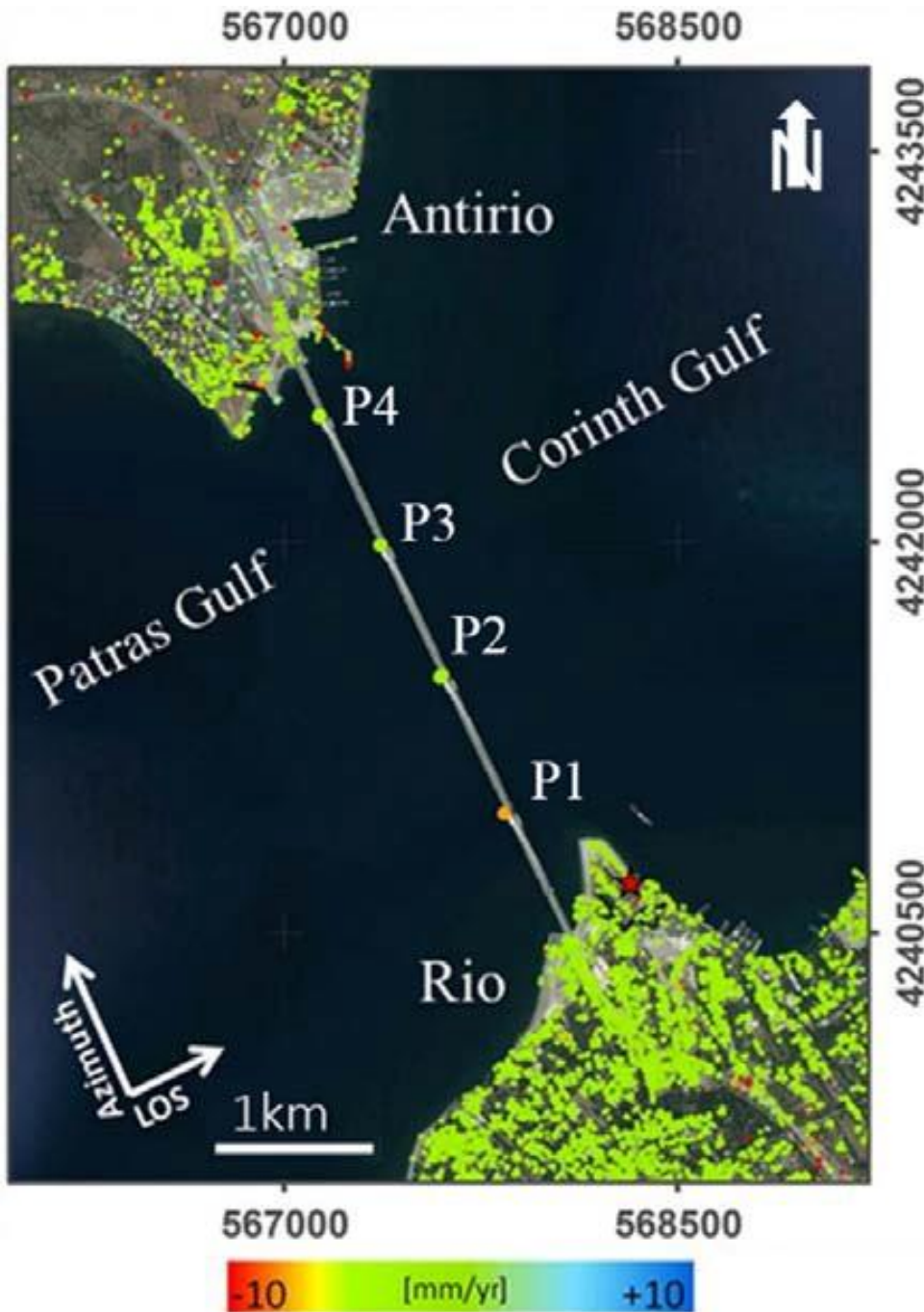
**Εικόνα 7.39** Χάρτης εδαφικής παραμόρφωσης του δέλτα του ποταμού Μόρνου, με τη μέθοδο των σταθερών ανακλαστήρων για την περίοδο 2002-2009 (Parcharidis et al. 2009)

- Μεμονωμένες κατασκευές/κτίρια** – Μετρήσεις των κινήσεων της γήινης επιφάνειας με ακρίβεια χιλιοστού απαιτούνται για την εκτίμηση της σταθερότητας των κατασκευών. Είναι πολύ σημαντικό ότι με την τεχνική αυτή περισσότεροι από ένας ανακλαστήρες μπορούν να βρεθούν σε ένα κτίριο. Αυτό μπορεί να συμβεί σε αρκετά μεγάλες σε έκταση κατασκευές (π.χ. φράγματα, γέφυρες, μεγάλα κτίρια) (Parcharidis et al., 2009). Επιπλέον, πολλά υποσχόμενη, για μελλοντικές έρευνες που στηρίζονται στην



τεχνική των PS, είναι η δυνατότητα δημιουργίας ενός γεωδαιτικού δικτύου αποτελούμενου από κτίρια πάνω στα οποία έχουν τοποθετηθεί τεχνητοί ανακλαστήρες. Βέβαια, ένα ιστορικό αρχείο δεδομένων Radar μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση της σύνδεσης μεταξύ αιτίας-αποτελέσματος – Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός τούνελ και οι ζημιές οι οποίες έχουν προέλθει εξαιτίας του. Τέλος, τα αποτελέσματα των PS έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ως αποδεικτικό στοιχείο σε δίκες.

- **Σχεδιασμός χρήσεων γης** – Η τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων διευκολύνει τη σχεδίαση κύριων κατασκευαστικών έργων όπως είναι οι αγωγοί, οι γραμμές μεταβίβασεων, οι αυτοκινητόδρομοι και οι γραμμές τρένου, προσδιορίζοντας σταθερούς διαδρόμους για αυτές τις εγκαταστάσεις.



**Εικόνα 7.40** Χάρτης μέσης ετήσιας παραμόρφωσης της γέφυρας αλλά και των περιοχών Ρίου και Αντιρρίου με τη μέθοδο των σταθερών σκεδαστών και τη χρήση εικόνων TerraSAR-X (Parcharidis et al. 2015).

## Βιβλιογραφικές αναφορές

### Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Avery, T.E. & Berlin, G.L. (1992). *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*. New York: Mc Millan Publishing Company, 5th edition.

Benekos, G., Derdelakos, K., Bountzouklis, C., Kourkouli, P., & Parcharidis, I. (2015). Surface displacements of the 2014 Cephalonia (Greece) earthquake using high resolution SAR interferometry. *Earth Science Informatics*, DOI: 10.1007/s12145-015-0205-7

Colesanti, C., Ferretti, A., Novalli, F., Prati, C., & Rocca, F. (2003). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using permanent scatterers technique. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 41(7), part I, pp. 1685–1701.

Colesanti, C., Le Mouelic, S., Bennani, M., Raucoules, D., Carnec, C., & Ferretti, A. (2005) Detection of mining related ground instabilities using the permanent scatterers technique - A case study in the east of France. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), pp. 201-207.

Danson, M., & Plummer, S., (1995). *Advances in environmental remote sensing*. J. Wiley & Sons.

Drury, S.A. (1987). *Image Interpretation in Geology*. London: Allen & Unwin Ltd.

Elachi, Ch. (1987). *Spaceborne radar remote sensing: Applications and techniques*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Farina, P., Colombo, D., Fumagalli, A., Marks, F., & Moretti, S. (2006). Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering Geology*, 88(3-4), pp. 200-217.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. & Monti Guarnieri, A. (1997). Multibaseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction. *3rd ERS Workshop*, Florence, Italy.

Fletcher, K., (2007). *InSAR Principles: guidelines for SAR interferometry processing and interpretation*. European Space Agency Publications ESTEC.

Gatsis I., Pavlopoulos A. & Parcharidis I. (2001). Geomorphological observations and related natural hazards using remotely sensed data. A case study in Corinthos area (NE Peloponnes, S. Greece). *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 83A (4), pp. 217-228.

Goldstein, R. (1995). Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 22(18), pp. 2517-2520.

Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Press.

Hilley, G.E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., & Rocca, F. (2004). Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304(5679), pp. 1952-1955.

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., & Chipman, Jonathan W. (2003). *Remote Sensing and Image Interpretation*. USA: J. Wiley & Sons, 5th edition., p. 750.

Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute T. (1993). The displacement field of the Landers Earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364, pp. 138–142.

Massonnet, D. & Feigl, K. (1998). Radar Interferometry and Its Application to changes in the Earth's Surface. *Geophysical Radar Interferometry Reviews of Geophysics* 36, pp. 441–500.

Prost, G. (1994). *Remote sensing for geologists*. Gordon and breach science publishers.

Papanikolaou, I.D., Fomelis, M., Parcharidis, I., Lekkas, E.L. & Fountoulis, I.G. (2010). Deformation pattern of the 6 and 7 of April 2009, Mw=6.3 and Mw=5.6 earthquakes in L' Aquila (Central Italy)

revealed by ground and space based observations. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, pp. 73-87.

Parcharidis, I., Nikolakopoulos, K., Serelis, K. & Baskoutas, I. (2001). Integrated use of Optical and Radar data for active Faults and corresponding displaced landforms in Kozani basin (Greece). *Geocarto International*, Vol. 16, No 3, pp. 17-24.

Parcharidis, I., Foumelis, M., Kourkouli, P., & Wegmuller, U. (2009). Persistent scatterers InSAR to detect ground deformation over Rio- Antirio area (Western Greece) for the period 1992–2000. *Journal of Applied Geophysics*, 68, pp. 348–355.

Sabins, F.F., (1997). *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. New York: W.H. Freeman and Company, 3rd edition, p. 494.

Salvi, S., Atzori, S., Tolomei, C., Allievi, J., Ferretti, A., Rocca, F., Prati, C., Stramondo, S., & Feuillet, N. (2004). Inflation rate of the Colli Albani volcanic complex retrieved by the permanent scatterers SAR interferometry technique. *Geophysical Research Letters*, 31(12), L12606 1–14.

Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., & Vachon, P.W. (1999). Coherence estimation for SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (1 PART 1), pp. 135-149.

Zebker, H.A., Madsen, S.N., Martin, J., Wheeler, K.B., Miller, T., Lou, Y., Alberti, G., Vetrella, S., & Cucci, A. (1992). The topsar interferometric radar topographic mapping instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), pp. 933-940.

Vincent, R. (1997). *Fundamentals of geological and environmental remote sensing*. Prentice Hall.

Zebker, H.A., Rosen, P.A., Goldstein, R.M., Gabriel, A., & Werner, C.L. (1994). On the derivation of coseismic displacement-fields using differential radar interferometry—the Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth B*, 10, pp. 19617–19634.

Zebker, H., & Goldstein, R. (1986). Topographic mapping from interferometer synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research* vol. 91 issue B5, pp. 4993–4999.

#### Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

Μερτίκας, Σ. (1999). *Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας*. Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.

Τσιλιμπάρης, Ξ. (1993). *Περιοδικές μελέτες. RADAR Συνθετικού Ανοίγματος (SAR): Αρχές λειτουργίας τους – Γεωμετρική επεξεργασία των εικόνων τους*. Εθνικό Κέντρο Διαστημικών Ερευνών, ΓΕΑ.

## 8. Περιπτώσεις Εφαρμογών Τηλεπισκόπησης

### 8.1 Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε υγρασία του εδάφους με τη χρήση ενεργητικών και παθητικών αισθητήρων από το Διάστημα

Η υγρασία του εδάφους είναι μια βασική μεταβλητή σε σχέση με το νερό και τους φυσικούς κινδύνους, συμπεριλαμβανομένων των πλημμυρών και των κατολισθήσεων. Η ακριβής εκτίμηση των χωρικών και χρονικών διακυμάνσεων της υγρασίας του εδάφους είναι κρίσιμης σημασίας για πολλές περιβαλλοντικές μελέτες. Συγκεκριμένα, υψηλής ανάλυσης παρατηρήσεις της υγρασίας του εδάφους και του τοπίου καθώς και της διαδικασίας ψύξης/απόψυξης του νερού οδηγεί σε βελτίωση των προβλέψεων των πλημμυρών, ειδικά για τις μεσαίες και μεγάλες λεκάνες απορροής στις οποίες εμφανίζεται και όπου οι καταστροφικές επιπτώσεις από τις πλημμύρες είναι συχνές. Η επιφανειακή κατάσταση υγρασίας του εδάφους είναι το κλειδί για την εκτίμηση του νερού της βροχής και συγκεκριμένα σε νερό που υφίσταται διήθηση και σε νερό απορροής· ως εκ τούτου, είναι ένα από τα σημαντικότερα κομμάτια των πληροφοριών που χρησιμοποιείται στα μοντέλα για την πρόβλεψη πλημμυρών. Ομοίως, η υγρασία του εδάφους σε ορεινές περιοχές είναι ένας από τους σημαντικότερους προσδιοριστικούς παράγοντες των κατολισθήσεων.

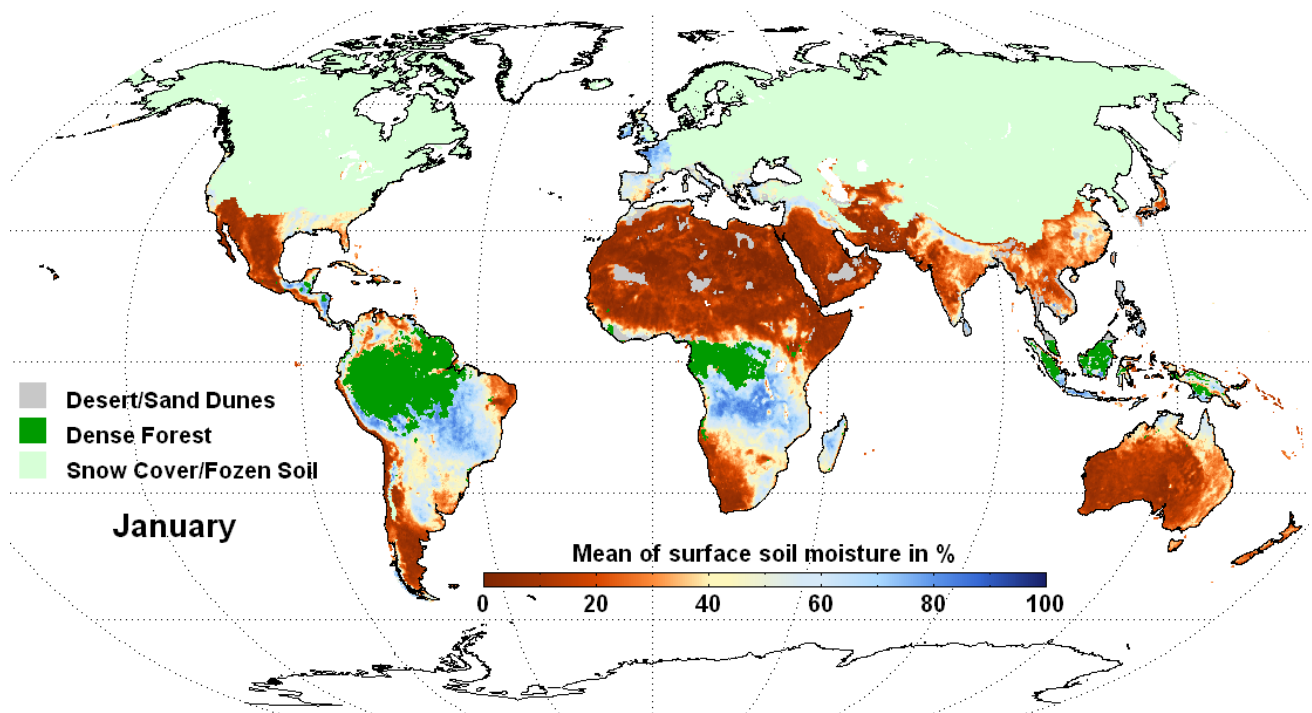
Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της δορυφορικής τηλεπισκόπησης έχουν αποδείξει ότι η υγρασία του εδάφους μπορεί να μετρηθεί με ποικίλες τεχνικές τηλεπισκόπησης, καθεμιά με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Έρευνες σχετικά με την εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους με τη χρήση της τηλεπισκόπησης ξεκίνησαν στα μέσα της δεκαετίας του 1970, λίγο μετά την ανάπτυξη των πρώτων δορυφορικών συστημάτων. Στην πορεία της ερευνητικής προσπάθειας ακολούθησαν διαφορετικές τεχνικές που εκτείνονται σε όλο το μήκος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από το οπτικό μέχρι και την περιοχή των μικροκυμάτων. Πολυάριθμοι ερευνητές έχουν αποδείξει ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία κοντά στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να μετρηθεί με την οπτική ακτινοβολία, το θερμικό υπέρυθρο καθώς και την παθητική και ενεργητική μικροκυματική ακτινοβολία (Walker et al., 1998). Οι βασικές διαφορές μεταξύ αυτών των τεχνικών είναι η περιοχή μήκους κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιείται, η πηγή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, η απόκριση που μετρείται από τον αισθητήρα και η φυσική σχέση μεταξύ της απόκρισης και της περιεκτικότητας σε υγρασία του εδάφους.

Η τηλεπισκόπηση για την εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους, με τη χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας με μήκη κύματος μεταξύ 0,4 και 2,5 μm, μετρά την ανακλώμενη ακτινοβολία του Ήλιου από την επιφάνεια της Γης. Συγκριτικά, τα μικροκύματα και οι θερμικές υπέρυθρες περιοχές έχουν χρησιμοποιηθεί πιο συχνά για τον υπολογισμό της υγρασίας του εδάφους (Engman & Chauhan 1995· Jackson et al, 1995), ενώ έχει δοθεί ελάχιστη προσοχή στη χρήση του τμήματος της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή την ορατή και ανακλώμενη ακτινοβολία (Liu et al., 2003).

Η εκτίμηση της επιφανειακής υγρασίας του εδάφους με τη χρήση του θερμικού τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βασίζεται κυρίως στις μετρήσεις της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους, είτε μεμονωμένα, όπως η μέθοδος της θερμικής αδράνειας, είτε σε συνδυασμό με δείκτες βλάστησης, όπως η μέθοδος δείκτης θερμοκρασίας / βλάστηση. Η μέθοδος της θερμικής αδράνειας είναι απλή και εύκολη στην εφαρμογή, έχει σαφή φυσική έννοια και μπορεί να επιτύχει υψηλή ακρίβεια στην εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους. Ωστόσο, αυτό ισχύει μόνο στις περιοχές με ελάχιστη ή μηδενική κάλυψη σε βλάστησης.

Η περιοχή των μικροκυμάτων παρέχει μια μοναδική ικανότητα για εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους με τη μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην περιοχή μεταξύ 0,5 και 100 εκατοστά. Η θεμελιώδης βάση των μικροκυμάτων για την ανίχνευση της υγρασίας του εδάφους είναι η μεγάλη αντίθεση ανάμεσα στις διηλεκτρικές ιδιότητες του νερού (~ 80) και των σωματιδίων του εδάφους (<4). Καθώς αυξάνει η υγρασία, η διηλεκτρική σταθερά του μίγματος έδαφος-νερό αυξάνει, και αυτή η αλλαγή είναι ανιχνεύσιμη με αισθητήρες ραντάρ (Njokuand Kong, 1977· Dobsonetal, 1985).



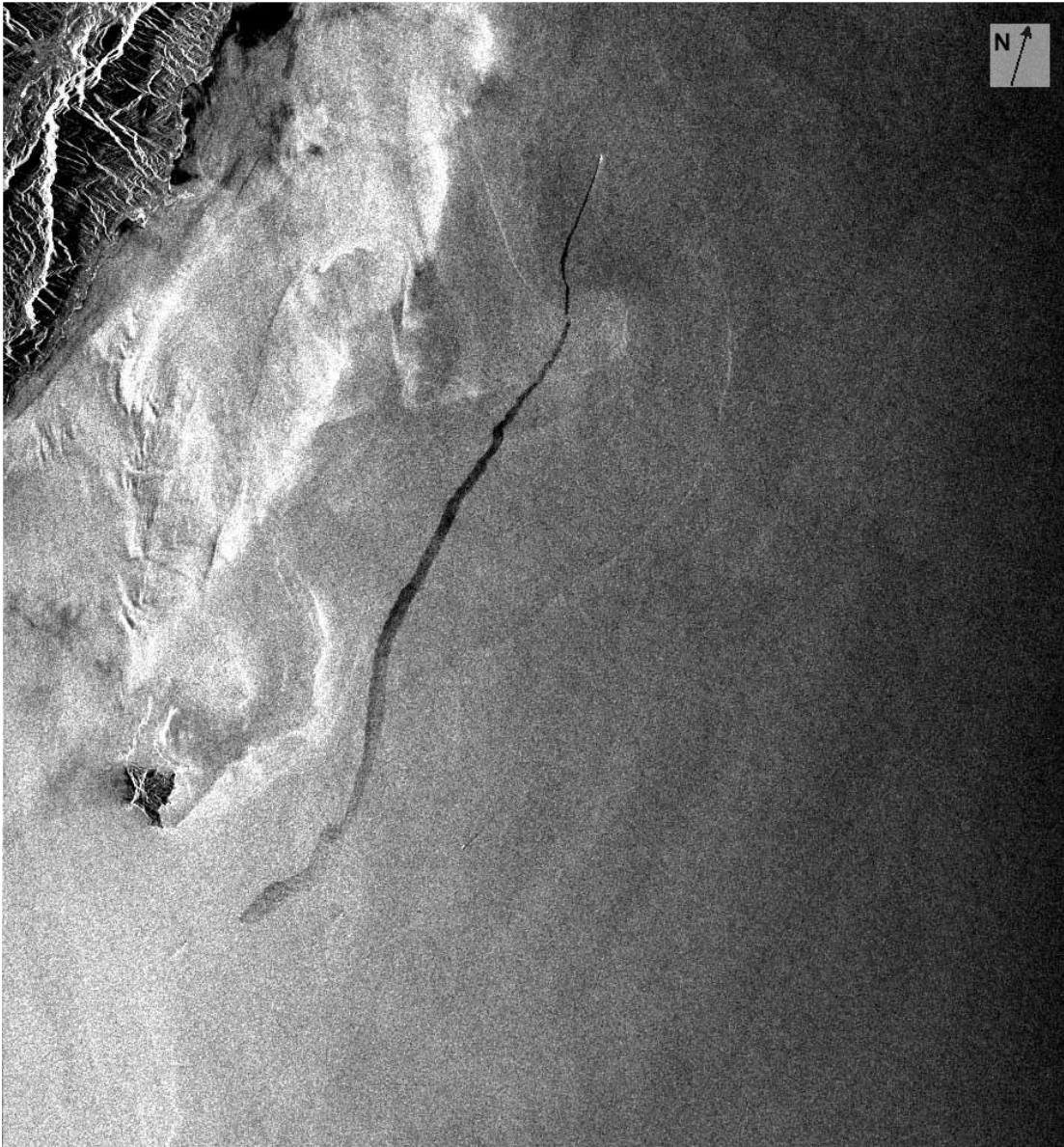
**Εικόνα 8.1** Μέση επιφανειακή εδαφική υγρασία σε παγκόσμια κλίμακα με βάση τα δεδομένα του δορυφόρου ERS για τη χρονική περίοδο 1991-2007 (Πηγή: TU Wien).

## 8.2 Ανίχνευση πετρελαιοκηλίδων για την προστασία του περιβάλλοντος και της θαλάσσιας βιοποικιλότητας

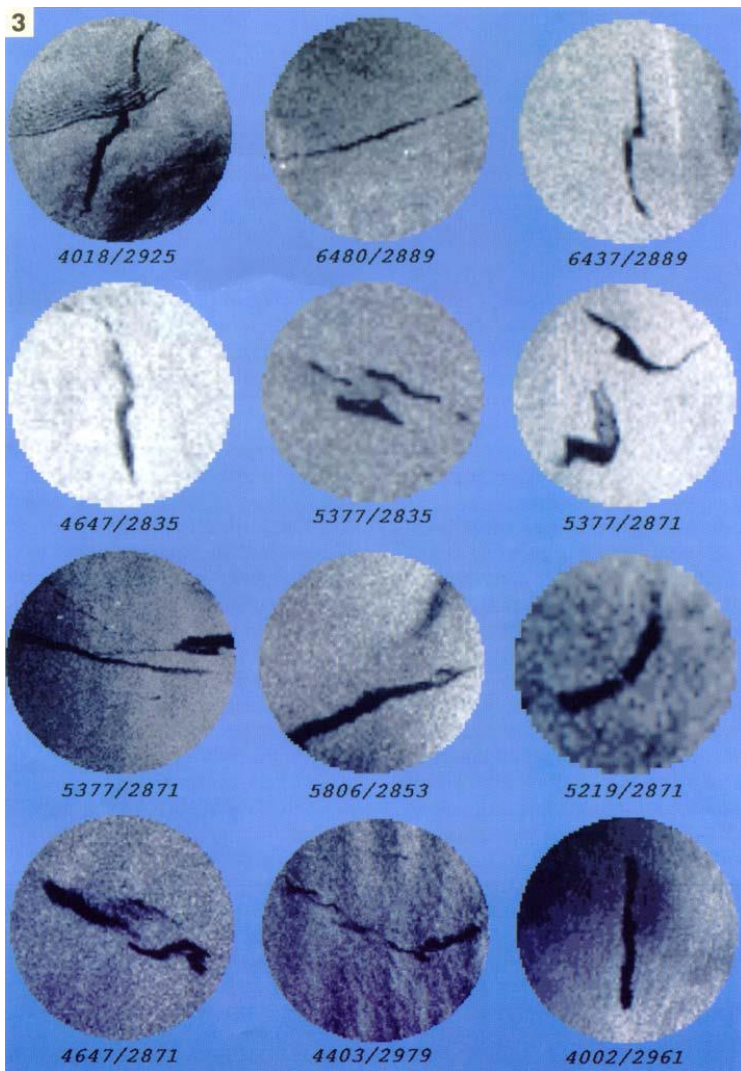
Οι διαρροές από πλοία, υπεράκτιες εξέδρες και πετρελαιοαγωγούς απειλούν σοβαρά με ρύπανση τις θάλασσες και τις παράκτιες περιοχές προκαλώντας τεράστιες καταστροφές στο φυσικό περιβάλλον και στην οικονομία. Η πετρελαϊκή ρύπανση από τα πλοία και πλατφόρμες είναι συνήθως το αποτέλεσμα είτε της σκόπιμης λειτουργίας απορρίψεων είτε τυχαίων διαρροών. Η ταχεία ανίχνευση και έγκαιρη προειδοποίηση των θαλάσσιων πετρελαιοκηλίδων επιτρέπουν στις εθνικές και περιφερειακές αρχές ακτοφυλακής να αναγνωρίσουν και να συλλάβουν τους ρυπαίνοντες για την πράξη των παράνομων απορρίψεων, καθώς και να ανταποκρίνονται γρήγορα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση μεγάλων πετρελαιοκηλίδων από ατύχημα. Η παρακολούθηση μεγάλων περιοχών της επιφάνειας της θάλασσας με αεροσκάφη είναι χρονοβόρα και δαπανηρή, και συνήθως δεν είναι μια εφικτή εναλλακτική λύση για τις αρχές. Μια δορυφορική εικόνα μπορεί να καταγράψει περισσότερα από εκατό χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα της επιφάνειας της θάλασσας, αποτελώντας έτσι έναν πολύ αποτελεσματικό τρόπο για τον έλεγχο για διαρροές πετρελαίου μπορούν επίσης να προσδιορίζουν την κατεύθυνση και την ταχύτητα της κίνησης του πετρελαίου.

Τα δορυφορικά δεδομένα ραντάρ συνθετικού διαφράγματος (SAR) έχουν ιδιαίτερη σημασία για τον εντοπισμό των πετρελαιοκηλίδων, παρέχοντας εικόνες ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, μέρα και νύχτα, με ευρεία κάλυψη της περιοχής υπό παρακολούθηση. Τα ραντάρ είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για την ανίχνευση των πετρελαιοκηλίδων επειδή η παρουσία του πετρελαίου αλλάζει ριζικά τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας που σκεδάζεται από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι καθαρές επιφάνειες χαρακτηρίζονται από την παραγωγή – λόγω αιολικής ενέργειας– κυμάτων μικρού ύψους που σκεδάζουν την ακτινοβολία του ραντάρ και πάλι πίσω στον ίδιο τον δορυφόρο ραντάρ. Η παρουσία του πετρελαίου αποσβένει την τραχύτητα των κυμάτων, μειώνοντας έτσι την ανακλώμενη ενέργεια που μετρείται από το ραντάρ: για τον λόγο αυτόν οι πετρελαιοκηλίδες εμφανίζονται ως σκοτεινές περιοχές σε μια κατά τα άλλα φωτεινή απεικόνιση της θάλασσας στην εικόνα.

Γίνεται συνδυασμός των δεδομένων SAR με άλλα είδη πληροφοριών (π.χ. δεδομένα χάραξης πλεύσης του πλοίου) ώστε να ανιχνευθούν τα πλοία που είναι κοντά στην περιοχή ρύπανσης και τελικά να εντοπιστεί ο ρυπαίνων. Όταν λαμβάνει χώρα ένα τέτοιο γεγονός, ένα μήνυμα-καταχώριση αποστέλλεται ταχέως (εντός 30 λεπτών) στις αρμόδιες αρχές, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να προβούν σε περαιτέρω ενέργειες.



**Εικόνα 8.2** ERS-1 SAR εικόνα λήψης 20 Μαΐου 1994 στον Ειρηνικό Ωκεανό ανατολικά της Ταϊβάν, στην οποία εμφανίζεται ένα πλοίο που ταξιδεύει προς βορρά και το φωτεινό σημείο στο μπροστινό μέρος της μαύρης γραμμής που ταυτίζεται με την απόρριψη πετρελαίου. Το πετρέλαιο διαλύεται με τον χρόνο προκαλώντας διεύρυνση του ίχνους (Πηγή: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος).



**Εικόνα 8.3** Τυπικά σχήματα των πετρελαιοκηλίδων που προέρχονται από την απόρριψη του ορυκτού πετρελαίου από πλοία (Πηγή: CRISP).

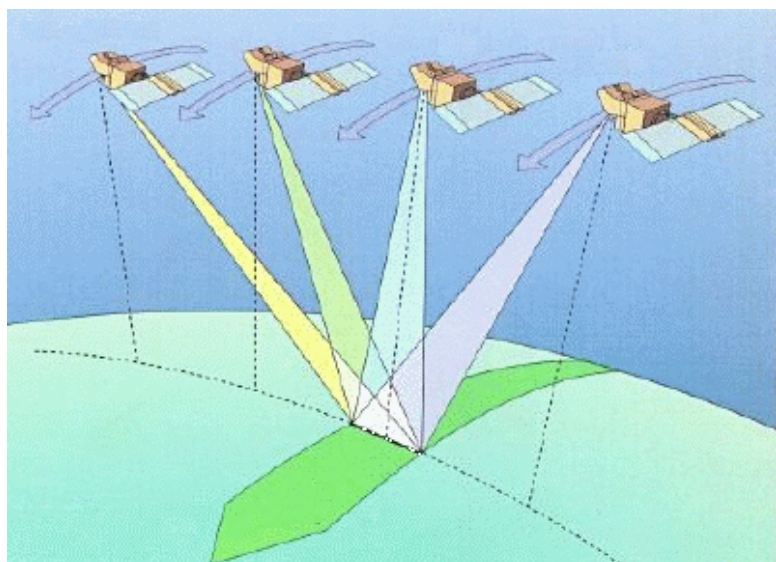
### 8.3 Δημιουργία ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

Η διαθεσιμότητα των ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEMs) είναι ζωτικής σημασίας για την εκτέλεση της γεωμετρικής και ραδιομετρικής διόρθωσης λόγω ανάγλυφου για τηλεπισκοπικές απεικονίσεις.

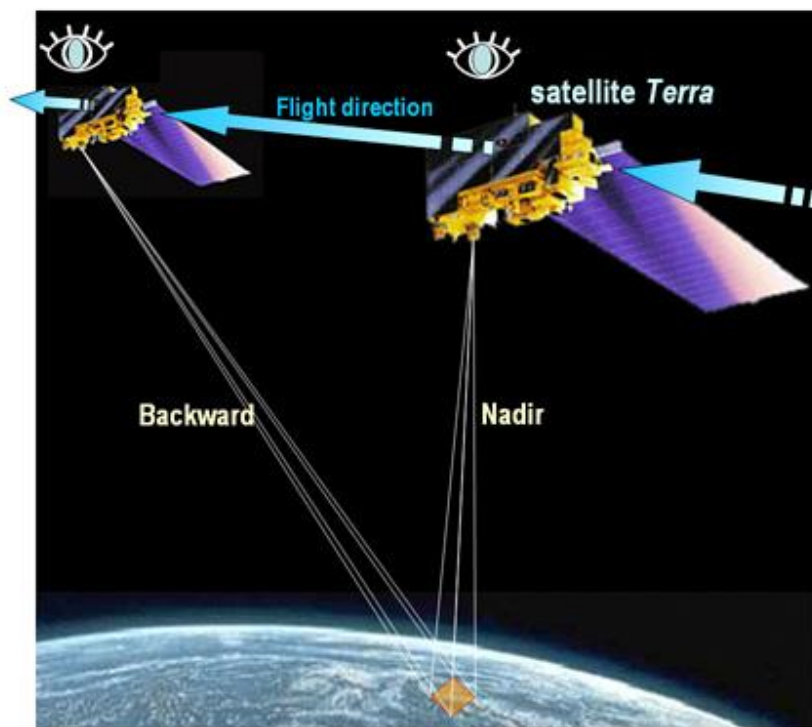
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να δημιουργηθούν ψηφιακά μοντέλα υψομέτρου. Ο ένας είναι μέσω της δημιουργίας ενός συνόλου δεδομένων από υψομετρικά σημεία, για παράδειγμα με τη χρήση συσκευών GPS των δεδομένων, και στη συνέχεια παρεμβολής μεταξύ των σημείων. Αυτό είναι εξαιρετικά χρονοβόρο. Επίσης η παραδοσιακή τοπογραφία είναι επίσης πολύ χρονοβόρα και περιορίζει την επικαιροποίηση της χαρτογράφησης σε περιφερειακή κλίμακα. Η δημιουργία DEMs από τηλεπισκοπικά δεδομένα μπορεί να είναι οικονομικά αποτελεσματική και αποδοτική. Μια ποικιλία από αισθητήρες και διαφορετικές μεθοδολογίες είναι διαθέσιμη για να δημιουργήσει κάποιος τέτοια μοντέλα. Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι να παραχθούν υψομετρικά δεδομένα: 1. τεχνικές που χρησιμοποιούν αεροφωτογραφίες (φωτογραμμετρίας), δορυφορικές εικόνες στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο ή τα δεδομένα από ραντάρ. 2. μέσω της τεχνικής της συμβολομετρίας ραντάρ.

Η τεχνική μέσω της στερεοσκοπικής παρατήρησης περιλαμβάνει την εξαγωγή της πληροφορίας του ανάγλυφου από τις στερεοσκοπικά επικαλυπτόμενες εικόνες, συνήθως αεροφωτογραφίες, εικόνες SPOT (Εικόνα 8.4) ή ASTER, ή και ραντάρ.

Οπτικές εικόνες παρατήρησης της Γης, όπως αυτές που αποκτώνται από τους δορυφόρους SPOT και TERRA, χρησιμοποιούνται στην παραγωγή DEMs με την τεχνική φωτογραμμετρίας. Σε περιοχές με συχνή νεφοκάλυψη, είναι δύσκολο να αποκτηθεί κατάλληλο στερεοσκοπικό ζεύγος οπτικών δεδομένων.



**Εικόνα 8.4** Η γεωμετρία λήψης στερεοσκοπικών εικόνων από τον δορυφόρο SPOT που παρέχει ένα σύντομο χρονικό διάστημα επανάληψης λήψης 1 έως 3 ημερών.



**Εικόνα 8.5** Η γεωμετρία λήψης στερεο-ζεύγους από τον δορυφόρο Terra και το όργανο καταγραφής ASTER.



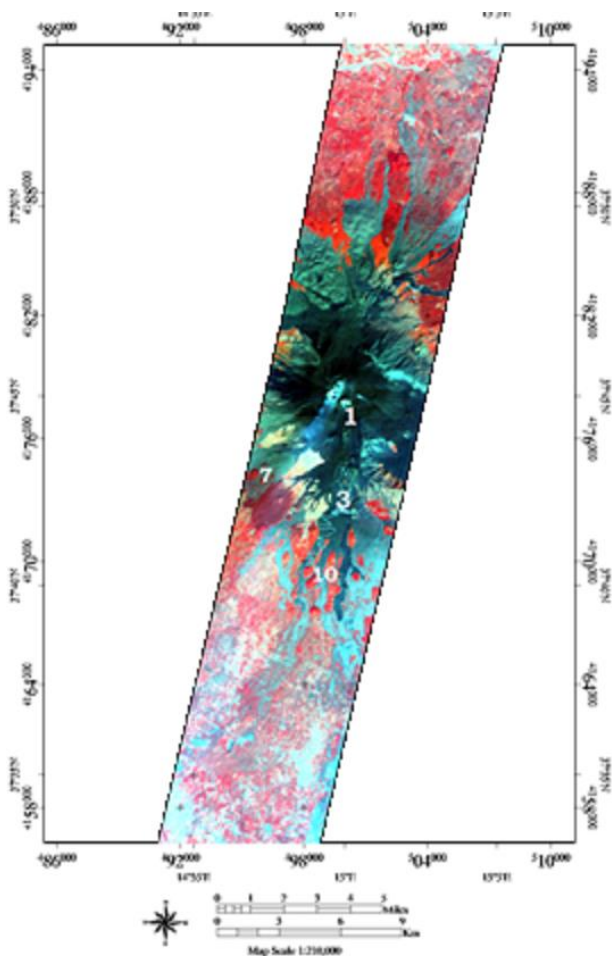
Τα ψηφιακά υψομετρικά δεδομένα ASTER GDEM Ver. 2 παρήχθησαν από τη διακρατική συνεργασία Ιαπωνίας-ΗΠΑ χρησιμοποιώντας δεδομένα ASTER που έχουν αποκτηθεί από την αρχή της παρατήρησης του δορυφόρου μέχρι το τέλος Αυγούστου του 2010. Το DEM δημιουργείται από στερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων που αποκτούνται με μία λήψη στο ναδίρ και μία προς τα πίσω (υπό γωνία) πάνω από την ίδια περιοχή (Εικόνα 8.5).

Η τεχνική της συμβολομετρίας ραντάρ έχει τη δυνατότητα στην απλή της μορφή να δημιουργεί υψομετρικά μοντέλα υψηλής ποιότητας. Τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα που προέρχονται από δεδομένα του οργάνου SAR (όπως αυτό που έχουν οι δορυφόροι ERS, Radarsat, ENVISAT ALOS PALSAR κ.λπ.) χρησιμοποιούν την τεχνική της συμβολομετρίας SAR. Η ποιότητα του προϊόντος εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και της κάλυψης γης.

Η βασική απαίτηση για δεδομένα, τόσο για τη στερεοσκοπική παρατήρηση όσο και για τη συμβολομετρία, είναι ότι η περιοχή στόχος θα πρέπει να έχει απεικονιστεί δύο φορές με δύο διαφορετικές γωνίες θέασης.

## 8.4 Ανίχνευση ορυκτών κοιτασμάτων με τη χρήση υπερφασματικών δεδομένων

Υπάρχουν πάνω από 4.000 ορυκτά στη Γη. Καθένα έχει τη δική του χημική σύνθεση. Αυτό σημαίνει ότι κάθε ορυκτό έχει και τη δική του φασματική ταυτότητα. Χρησιμοποιώντας περισσότερα φασματικά κανάλια όπως κάνουν οι υπερφασματικοί αισθητήρες, έχουμε τη δυνατότητα για τη χαρτογράφηση περισσότερων ορυκτών και επομένως περισσότερων ειδών πετρωμάτων.



**Εικόνα 8.6** Εικόνα Hyperion του 2012 (ψευδέγχρωμη σύνθεση R:45 G:27 B:15)· η λωρίδα κάλυψης αφορά το ανατολικό τμήμα της Σικελίας στο οποίο περιλαμβάνεται και το ηφαίστειο της Αίτνας (Καραγιαννοπούλου, 2015).

Οι οπτικοί αισθητήρες ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τους Παγχρωματικούς (ένας δίαυλος, ορατή περιοχή του φάσματος), τους Πολυφασματικούς (δεκάδες δίαυλοι, πολλές περιοχές του οπτικού φάσματος) και τους Υπερφασματικούς (εκατοντάδες φασματικά κανάλια, σε πολλές περιοχές του οπτικού φάσματος και με μικρό φασματικό εύρος).

Τα πολυφασματικά δεδομένα, ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό για γεωλογική χαρτογράφηση, έχουν περιορισμούς εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού των φασματικών καναλιών με μεγάλο εύρος, με αποτέλεσμα να χάνεται πληροφορία. Από την άλλη, τα υπερφασματικά δεδομένα δίνουν τη δυνατότητα εντοπισμού χαρακτηριστικών των φυσικών στοιχείων, καθώς έχουν πολλά κανάλια με μικρό φασματικό εύρος. Οι υπερφασματικοί αισθητήρες συλλέγουν και επεξεργάζονται δεδομένα ταυτόχρονα σε δεκάδες ή εκατοντάδες στήλες των φασματικών καναλιών. Αυτές οι συνεχείς μετρήσεις καθιστούν δυνατή την παραγωγή ενός συνεχούς φάσματος για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας.

Το κύριο πλεονέκτημα της υπερφασματικής απεικόνισης είναι ότι δίνει τη δυνατότητα απόκτησης ολόκληρου του συνεχούς φάσματος, ενώ στα μειονεκτήματα είναι το κόστος και η πολυπλοκότητα. Οι γρήγοροι υπολογιστές, οι ευαίσθητοι ανιχνευτές και η μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης δεδομένων είναι οι βασικές απαιτήσεις για την ανάλυση των υπερφασματικών δεδομένων.

Ο αισθητήρας Hyperion, που αποτελεί υποσύστημα του δορυφόρου EO-1, παρέχει ένα σύστημα απεικόνισης υπερφασματικής ανάλυσης το οποίο μπορεί να χωριστεί μέχρι και σε 242 φασματικές ζώνες (0,4-2,5 μm) με 30 μέτρα χωρική διακριτική ικανότητα. Το όργανο μπορεί να απεικονίσει (7,5-7,7) x (100-120) km έκτασης ανά εικόνα και παρέχει λεπτομερή φασματική χαρτογράφηση και στα 220 κανάλια με υψηλή ραδιομετρική ακρίβεια.



**Εικόνα 8.7** Η περιοχή του Φακού (Λήμνος) από τον απεικονιστή Hyperion του δορυφόρου EO1. RGB band 29-band 21-band 11 (Ανυφαντή 2015).

Η φασματική ταυτοποίηση των ορυκτών βασίζεται σε έναν συνδυασμό οπτικής εκτίμησης των φασματικών διαγραμμάτων (spectral plots) και σε αυτόματη ή μη αυτόματη σύγκριση με τις φασματικές υπογραφές των ορυκτών που υπάρχουν στις διάφορες φασματικές βιβλιοθήκες.

Οι εξαλλοιώσεις ορισμένων τύπων πετρωμάτων και ιδιαίτερα οι υδροθερμικές οδηγούν στη δημιουργία κοιτασμάτων βιομηχανικών ή μεταλλικών ορυκτών, όπως για παράδειγμα στη Μήλο όπου έχουν δημιουργηθεί εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα βιομηχανικών ορυκτών (μπεντονίτης, καολινίτης κ.λπ.). Τα περισσότερα από τα ορυκτά εξαλλοίωσης είναι δυνατόν να αναγνωριστούν μέσω της ανακλώμενης ακτινοβολίας με μήκη κύματος μεταξύ 0,4 -2,5 μm και με φασματική ανάλυση 0,005 μm. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι απαιτείται ένα σύστημα καταγραφής με μεγάλο αριθμό φασματικών καναλιών.

Στα αργιλικά ορυκτά όπως ο καολινίτης, ο αλουνίτης κ.λπ. το φασματικό εύρος 2,1-2,4 μm χαρακτηρίζεται από ισχυρή απορρόφηση, ενώ η μέγιστη ανάκλαση εντοπίζεται στα 1,6 μm. Ως εκ τούτου, ο λόγος για παράδειγμα 1,55-1,75/2,2-2,24 είναι μια ισχυρή παράμετρος στην αναγνώριση της παρουσίας των αργιλικών ορυκτών. Βέβαια, το καθένα από τα αργιλικά ορυκτά χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη φασματική ταυτότητα και με βάση αυτήν θα μπορούσαν να διακριθούν.

## 8.5 Χαρτογράφηση της κάλυψης/χρήσης γης

«Κάλυψη γης» είναι η φυσική ιδιότητα της επιφάνειας. Η «χρήση γης» εξηγεί πώς χρησιμοποιείται το έδαφος. Η χαρτογράφηση χρήσης γης και κάλυψης γης έχει μεγάλη σημασία στην επιστημονική έρευνα, στον σχεδιασμό και στη διαχείριση του χώρου. Ένα σχέδιο χρήσης γης αντικατοπτρίζει τον χαρακτήρα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στον άνθρωπο και το περιβάλλον και την επιρροή σε βασικές οικονομικές δραστηριότητες της κοινωνίας. Λόγω της προόδου στα δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης της Γης, οι τεχνικές αναλύσεις τους αποτελούν ένα ρεαλιστικό και ελκυστικό εργαλείο για χρήση στον τομέα της έρευνας και της διαχείρισης των φυσικών πόρων. Ένας χάρτης χρήσεων γης είναι πολύτιμο εργαλείο για τις μελέτες σχετικά με τη γεωργία και τους φυσικούς πόρους. Επίσης η επικαιροποίηση αυτών των χαρτών είναι απαραίτητη λόγω της δυναμικής των φυσικών πόρων αλλά και των δράσεων του ανθρώπου.

Η τηλεπισκόπηση προσφέρει γρήγορη και πραγματική αναπαράσταση του τοπίου με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Επίσης παρέχει τα δεδομένα σε ψηφιακή μορφή και σε μεγάλο εύρος φασματικών καναλιών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αυτή η διαθεσιμότητα των πολυφασματικών δεδομένων τα καθιστά έναν πολύ χρήσιμο και εύκολο τρόπο για την οριοθέτηση της χρήσης γης και τη χαρτογράφηση των κατηγοριών κάλυψης γης.

Η τηλεπισκόπηση δεν αντικαθιστά πλήρως τις παρατηρήσεις υπαίθρου. Όμως η συλλογή δεδομένων στην ύπαιθρο απαιτεί πολύ χρόνο και μεγάλο κόστος, ενώ τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης μπορεί να καταγράφουν πληροφορίες σε πολύ μικρό σχετικά χρόνο και με μειωμένο κόστος. Ο χρήστης μπορεί, με τη βοήθεια των δεδομένων παρακολούθησης της γης, να αποκτήσει ολοκληρωμένη και γρήγορη εικόνα της ευρύτερης περιοχής που μελετά, σε σχέση με αυτήν που μπορεί να έχει στην ύπαιθρο, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον χρόνο και το κόστος που απαιτείται κατά τις εργασίες υπαίθρου. Επίσης, τα δεδομένα τηλεπισκόπησης μπορούν να δώσουν πληροφόρηση για δύσβατες περιοχές, οι οποίες δύσκολα μπορούν να προσεγγιστούν. Με τη χρήση διαχρονικών δεδομένων επιτυγχάνεται η χαρτογράφηση, η διερεύνηση και η τελική καταγραφή των αλλαγών χρήσης/κάλυψης γης.

Η βασική προϋπόθεση για τη χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης για την ανίχνευση της αλλαγής είναι ότι οι αλλαγές στη γη κάλυψη επιφέρουν μεταβολές στις τιμές της ακτινοβολίας και οι αλλαγές στην ακτινοβολία λόγω της κάλυψης γης είναι εντονότερες σε σχέση με τις αλλαγές της στην ακτινοβολία που προκαλούνται από άλλους παράγοντες, όπως οι διαφορές σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι διαφορές στην υγρασία του εδάφους και οι διαφορές στις ηλιακές γωνίες, λόγω χάρη η γωνία ηλιακής ανύψωσης.

Τα πλεονεκτήματα της τηλεπισκόπησης έναντι των άλλων μεθόδων συλλογής δεδομένων, και κυρίως αυτών που χρησιμοποιούν μόνο εργασία υπαίθρου, σύμφωνα με τον Townshend (1981) είναι τα παρακάτω:

- Η ικανότητα χωρικής αντίληψης (spatial comprehensiveness) των δεδομένων των δορυφορικών εικόνων, σε σχέση με αυτά τα οποία συλλέγονται με εργασία υπαίθρου. Αποτέλεσμα της ικανότητας αυτής είναι να βελτιώνεται η ευκολία προσέγγισης (accessibility), ιδιαίτερα σε περιοχές οι οποίες είναι μεγάλες ή δύσκολες στην προσέγγισή τους.
- Η κάλυψη διαφόρων περιοχών είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί χρονικά γρήγορα και, κατά συνέπεια, γίνεται δυνατή η σύγκριση μεταξύ ίδιων δεδομένων από διάφορες περιοχές (comparability of data).
- Η συνοπτική απεικόνιση (synoptic view) μεγάλων περιοχών σε μία δορυφορική εικόνα καθιστά δυνατή την ταυτοποίηση ευρείας κλίμακας διαφοροποιήσεων των βιοφυσικών στοιχείων της περιοχής.
- Η δυνατότητα διαχρονικών λήψεων (multidate images) από τους δορυφόρους δίνει την ευκαιρία να μελετηθούν δυναμικά φαινόμενα, να γίνουν διαχρονικές συγκρίσεις και να καταγράφονται στοιχεία ή φαινόμενα σε συνεχή βάση (monitoring).
- Η λήψη των εικόνων σε πολλές ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (πολυφασματικές λήψεις) δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να ανιχνεύσει διαφορές μεταξύ βιοφυσικών στοιχείων της επιφάνειας, οι οποίες δεν είναι δυνατό να γίνουν αντιληπτές με την ανάλυση μίας μόνο φασματικής ζώνης.

Τα βασικά τμήματα επεξεργασίας μιας εικόνας για τη δημιουργία θεματικού χάρτη κάλυψης ή χρήσης γης είναι:

- α) Αποκατάσταση ή προ-επεξεργασία (preprocessing) της εικόνας.
- β) Βελτίωση της παρουσίας της εικόνας (Image Enhancement).
- γ) Ταξινόμηση της εικόνας (Image Classification).

Η διαδικασία ταξινόμησης (Classification) περιέχει ουσιαστικά δύο βήματα, που είναι:

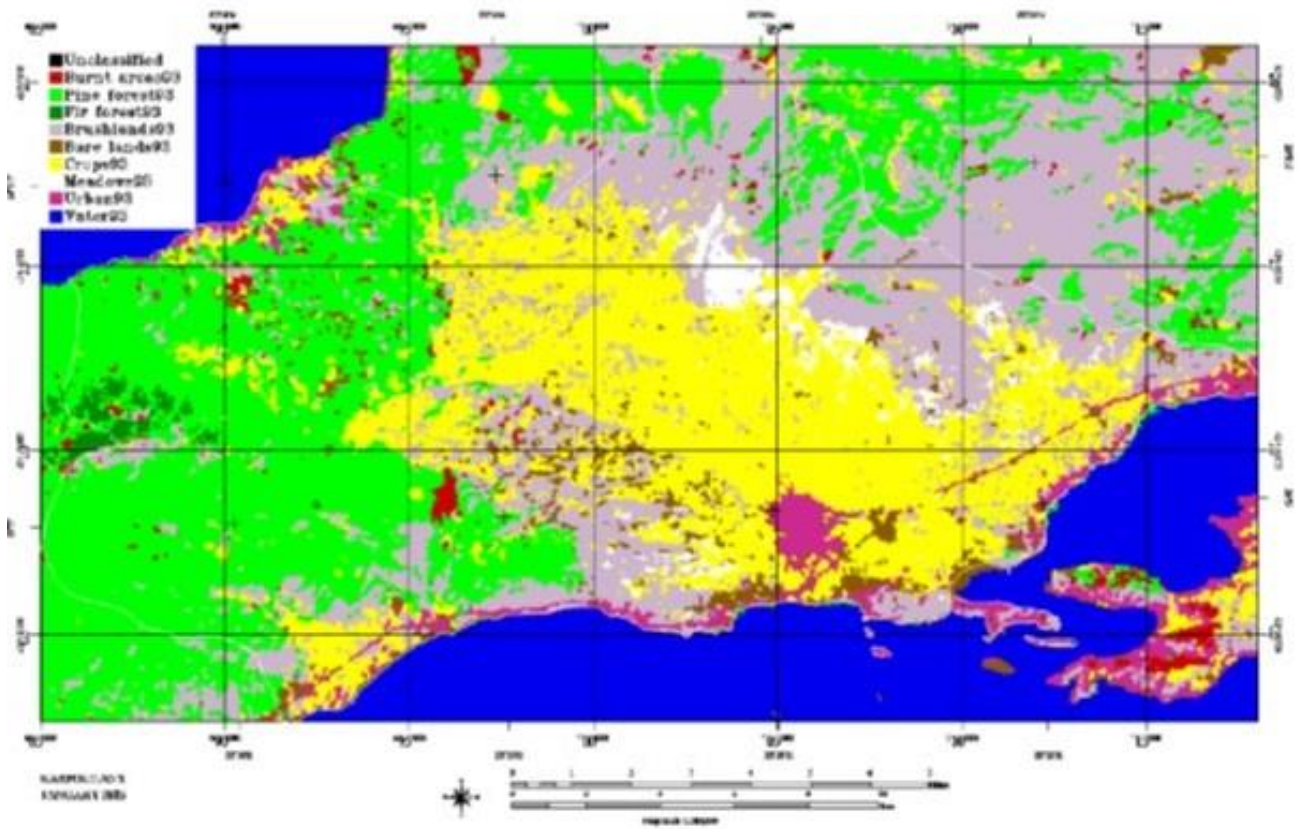
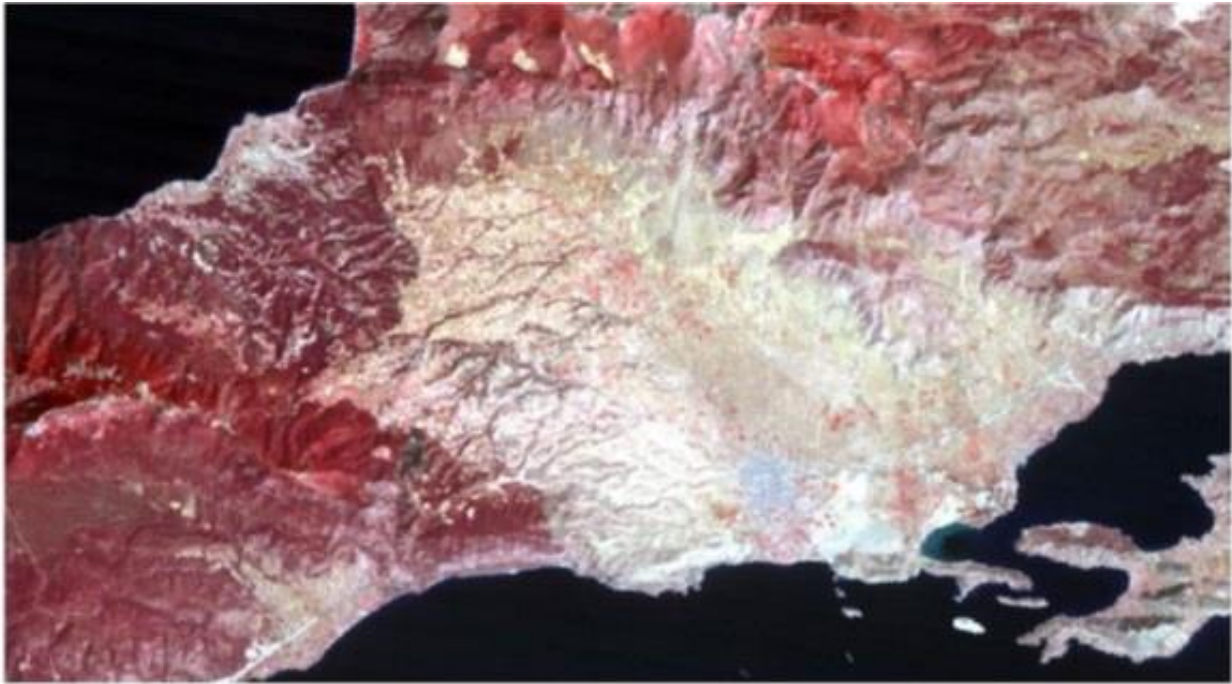
1. Η αναγνώριση των κατηγοριών όλων των γήινων αντικειμένων. Στο πλαίσιο της τηλεπισκόπησης της γήινης επιφάνειας, οι ομάδες αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν για παράδειγμα δασώδεις περιοχές, υδάτινες μάζες, λιβάδια καθώς και άλλους τύπους κάλυψης γης, που εξαρτώνται από τη φύση της κάθε μελέτης.

2. Η απόδοση μιας ιδιότητας (καταχώριση ονόματος) στα εικονοστοιχεία, τα οποία με αυτόν τον τρόπο ταξινομούνται.

Η ταξινόμηση θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί εφόσον έχει εκτιμηθεί η ακρίβειά της. Ο βαθμός σφάλματος της ταξινόμησης, ο οποίος εκφράζει την καταχώριση κάποιων ψηφίδων σε λανθασμένη τάξη, καθορίζει και το ποσοστό επιτυχίας της ταξινόμησης, πράγμα που δίνει τη δυνατότητα να εκτιμηθεί η ακρίβειά της. Δορυφορικές εικόνες της ίδιας περιοχής που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση μεταβολών στα χαρακτηριστικά της σκηνής όπως η κάλυψη και οι χρήσεις γης. Όπως ήδη έχει αναφερθεί στις διαχρονικές εικόνες, η χρονική διαφορά λήψης των εικόνων επιλέγεται έτσι ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση δυναμικών γεγονότων και μπορεί να είναι ημέρες, εβδομάδες, μήνες ακόμη και έτη.

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

Το πρώτο βήμα για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση για τη δημιουργία χάρτη κάλυψης/χρήσης γης είναι η τροφοδότηση του ταξινομητή με δεδομένα από τα οποία θα εξαχθούν οι αναγκαίες στατιστικές πληροφορίες που θα συνδυαστούν με ολόκληρη την εικόνα για να ταξινομηθεί κάθε εικονοστοιχείο της σε μία κλάση. Το πιο σημαντικό και θεσμικό τμήμα της όλης διαδικασίας είναι ο σαφής καθορισμός κλάσεων ταξινόμησης (χρήσης/κάλυψης γης): αυτό απαιτεί εξάσκηση για την απόκτηση εμπειρίας.



Εικόνα 8.8 Επάνω: ψευδέγχρωμη εικόνα περιοχής μελέτης έτους 1993. Σύνθεση RGB 4,3,2. Κάτω: χάρτης επιβλεπόμενης ταξινόμησης μέγιστης πιθανοφάνειας Μεγάρων 1993 (Καρπούζας 2014).

## 8.6 Παρακολούθηση και εκτίμηση της εδαφικής παραμόρφωσης

Οι ενεργητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν τη διαφορά φάσης για τη μέτρηση της παραμόρφωσης της γήινης επιφάνειας. Η τεχνική αυτή, όπως ήδη έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο για τα radar, ονομάζεται διαφορική συμβολομετρία (συντομογραφία DInSAR) και χρησιμοποιεί τα δεδομένα των οργάνων Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (SAR). Επί του παρόντος υπάρχουν αρκετοί δορυφόροι απόκτησης δεδομένων SAR κατάλληλων για InSAR, ιδίως του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος Envisat, ο καναδικός Radarsat-1 και 2, η γερμανική TerraSAR-X και οι ιταλικοί δορυφόροι Cosmo-Skymed, και ο αριθμός των προγραμματισμένων μελλοντικών αποστολών SAR είναι μεγαλύτερος ακόμα.

Η τεχνική DInSAR έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη μέτρηση μετατοπίσεων που σχετίζονται με τους σεισμούς, τα ηφαίστεια και πολλά φαινόμενα που προκαλούν στην επιφάνεια παραμόρφωσης.

Ωστόσο, παρά την επιτυχή εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας σε πολλές περιπτώσεις μελέτης αντικειμένων ή φαινομένων, τα προβλήματα που οφείλονται στις αλλαγές των ιδιοτήτων σκέδασης της επιφάνειας της Γης με τον χρόνο και τη γωνία πρόσπτωσης του σήματος περιορίζουν τη δυνατότητα εφαρμογής της τεχνικής.

Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1990 διάφορες ερευνητικές ομάδες έψαχναν τρόπους αντιμετώπισης για τους περιορισμούς της συμβατικής μεθόδου μέσω της επεξεργασίας μεγάλου αριθμού εικόνων της περιοχής μελέτης

Η ανάλυση μιας χρονοσειράς από εικόνες SAR επεκτείνει τις δυνατές εφαρμογές όπου η συμβολομετρία μπορεί συνεισφέρει με επιτυχία και επίσης επιτρέπει την ανίχνευση των μικρών μετατοπίσεων σε κλίμακα ολίγων χιλιοστών, μέσω της μείωσης των πηγών σφάλματος. Δύο είναι οι βασικές τεχνικές:

α) Η τεχνική SBAS (Berardino et al., 2002) απαιτεί πολλές εικόνες από τις οποίες θα δημιουργηθούν πολλά απλά συμβολογράμματα, που μέσα από μια διαδικασία επεξεργασίας θα δώσουν τη δυνατότητα καταγραφής της παραμόρφωσης με μεγάλη ακρίβεια.

β) Η τεχνική των σταθερών ή μόνιμων σκεδαστών, η οποία απαιτεί επίσης μεγάλο αριθμό εικόνων SAR, δηλαδή επίγειων χαρακτηριστικών που παραμένουν σταθερά στον χρόνο (Ferretti et al., 2001). Η τεχνική αυτή δίνει σημειακή πληροφορία σχετικά με την παραμόρφωση και όχι χωρικά συνεχή. Οι σκεδαστές συνήθως αντιπροσωπεύουν ανθρώπινες κατασκευές, κυρίως οικίες, αλλά μπορεί να είναι και γυμνά πετρώματα.

Οι δυο αυτές τεχνικές εφαρμόζονται βασικά στις περιπτώσεις όπου η ταχύτητα παραμόρφωσης είναι μικρή και σε βάθος χρόνου, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην καθίζηση των εδαφών λόγω υπόγειων εξορύξεων ή πύκνωσης των εδαφών. Αντίθετα, η συμβατική μέθοδος, DInSAR, εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις σεισμών ή στην περίπτωση καταγραφής παραμορφώσεων σε έντονη φάση δραστηριοποίησης ηφαιστείου. Όπως είναι φυσικό, ένα μεγάλο φάσμα μελετών εστιάζει στην τεκτονική δραστηριότητα και κατ' επέκταση στο σεισμικό φαινόμενο.

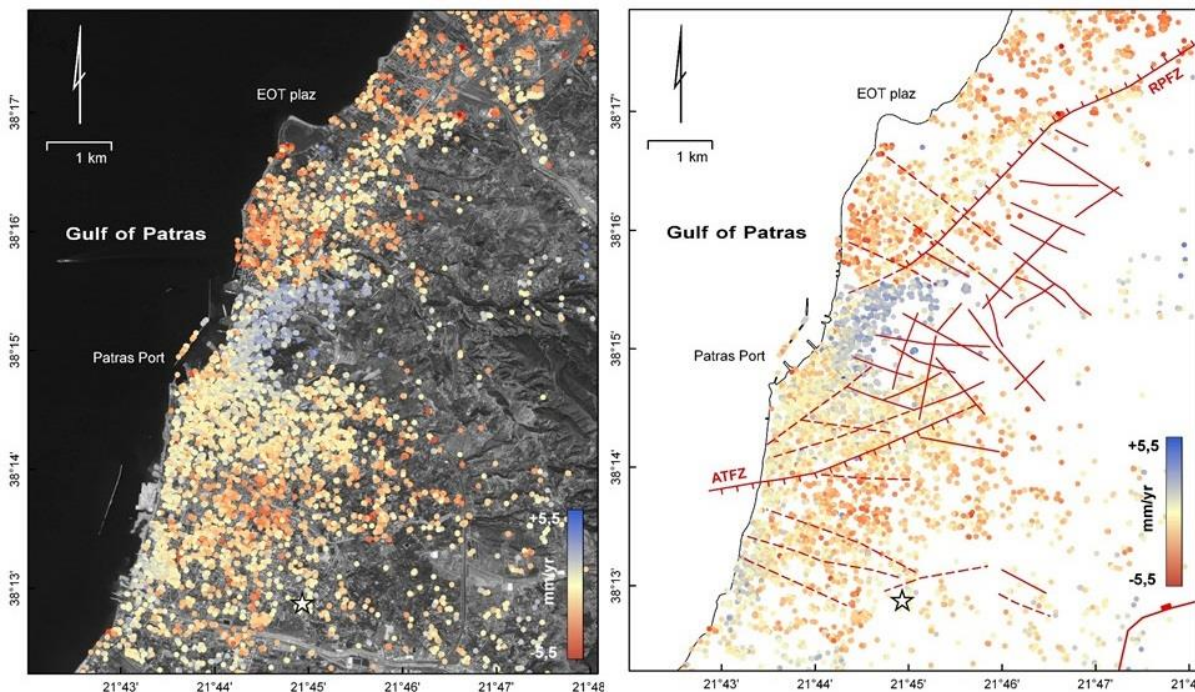
Η καταγραφή της μετατόπισης κατά μήκος ενεργών ρηγμάτων, η οποία μπορεί να είναι της τάξης και των ολίγων χιλιοστών ετησίως, είναι μια περίπτωση μελέτης στην οποία η συμβολομετρία των σταθερών σκεδαστών δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα, ειδικά όταν αφορά τη μελέτη ενεργών ρηγμάτων σε αστικό περιβάλλον όπου, λόγω του συνεχούς δομημένου κελύφους, άλλες τεχνικές αδυνατούν να δώσουν στοιχεία.

Μια τέτοια περίπτωση μελέτης αποτελεί η παρακολούθηση μέσω της τεχνικής των σταθερών ανακλαστήρων του ενεργού ρήγματος της Αγίας Τριάδας, το οποίο διαπερνά την πόλη της Πάτρας (Parcharidis et al. 2009).

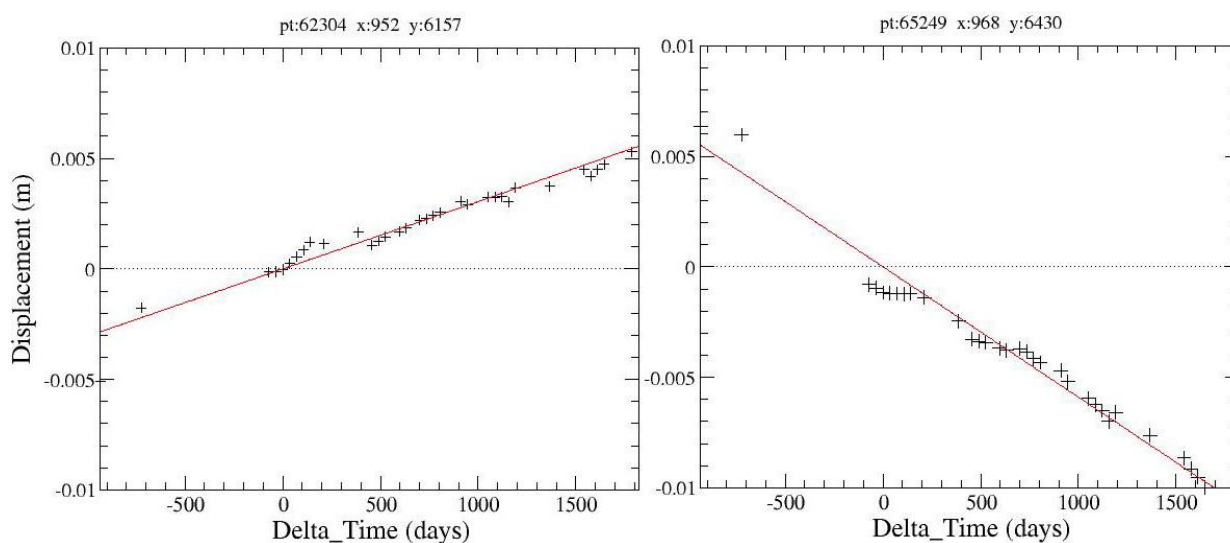
Η κατανόηση των ενεργών τεκτονικών διεργασιών και της σχετικής ενέργειας που απελευθερώνεται, μέσω της παρακολούθησης της παραμόρφωσης λόγω της διαδικασίας συσσώρευσης τάσεων, έχει καταστεί θεμελιώδης για πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες. Επιπλέον, ο τύπος της παραμόρφωσης του ρήγματος και η περιοχή κοντά στο ρήγμα μπορούν να καθορίσουν το μέγεθος της σεισμικής επικινδυνότητας. Αυτό επιτρέπει να ληφθούν μέτρα μετριασμού της σεισμικής επικινδυνότητας. Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς ενεργών ρηγμάτων στις αστικές περιοχές έχει μεγάλη σημασία, καθώς η τοπική έκθεση (πληθυσμού, υποδομών κ.λπ.) αυξάνει τον κίνδυνο. Στη περίπτωση αυτή εφαρμόστηκε η συμβολομετρία των σταθερών σκεδαστών και χρησιμοποιήθηκαν 42 εικόνες SAR των δορυφόρων ERS 1 και ERS 2 με περίοδο λήψεων 1992-2000.

Μια πρόσθετη πληροφορία που προσφέρεται από την επεξεργασία των σταθερών ανακλαστήρων σχετίζεται με την «ιστορική» παραμόρφωση των σκεδαστών, δηλαδή των κτιρίων. Συγκεκριμένα, έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε έναν σκεδαστή-σημείο και να λάβουμε την πληροφορία της εξέλιξης της παραμόρφωσης για τον

σκεδαστή-σημείο για όλη την περίοδο που καλύπτεται από τις εικόνες και στην περίπτωση αυτή είναι το διάστημα 1992-2000.



**Εικόνα 8.9** Αριστερά: γραμμική παραμόρφωση του εδάφους στην πόλη της Πάτρας. Οι σκεδαστές-σημεία αποτυπώνονται σε παγχρωματική εικόνα Landsat-7 ETM<sup>+</sup> και αντιπροσωπεύουν σχεδόν αποκλειστικά κτίρια της πόλης. Δεξιά: το αποτέλεσμα της συμβολομετρίας των σταθερών σκεδαστών επί του τεκτονικού χάρτη της περιοχής Πατρών (ATFZ: ρήγμα Αγ. Τριάδας, Koukis et al. 2005.) (Parcharidis et al. 2009).



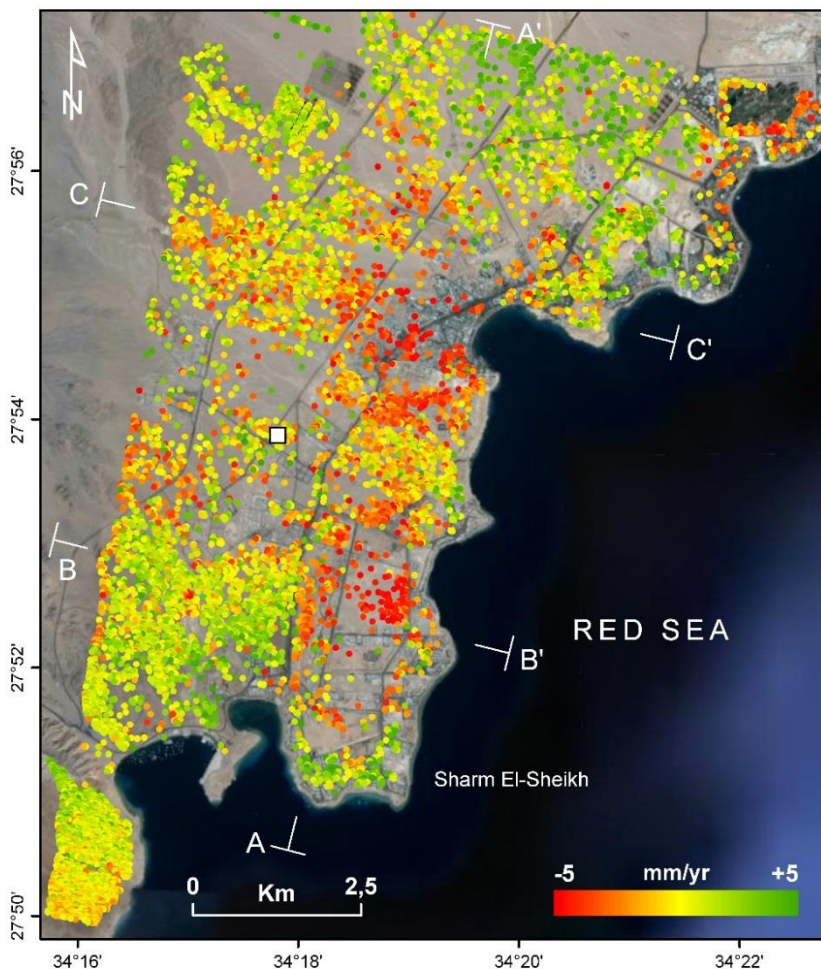
**Εικόνα 8.10** Τυπικές περιπτώσεις ιστορικής παραμόρφωσης για δυο συγκεκριμένους σκεδαστές-σημεία από το ανερχόμενο ρηξιτέμαχος (αριστερό διάγραμμα) και από το κατερχόμενο (δεξιά διάγραμμα) της ρηξιγενούς ζώνης της Αγίας Τριάδας. Στον άξονα X αντιπροσωπεύεται ο χρόνος σε ημέρες και στον άξονα Y η παραμόρφωση σε μέτρα (Parcharidis et al. 2009)

Μια άλλη εφαρμογή, που αφορά όμως την καταγραφή της εδαφικής παραμόρφωσης η οποία εξελίσσεται αργά στον χρόνο, είναι στη νότια παράκτια περιοχή Sharm El-Sheikh-Ras Nasrani της χερσονήσου του Σινά (Seleem et al 2011).

Η περιοχή χαρακτηρίζεται ως μια μοναδική τοποθεσία στην Ερυθρά Θάλασσα μεταξύ του Sharm El-Sheikh στα νότια και του Ras Nasrani στον βορρά. Εκτείνεται ως επιμήκης στενή παράκτια λωρίδα στη νοτιοδυτική ακτή του κόλπου της Άκαμπα στην άκρη της χερσονήσου του Σινά. Θεωρείται ένα από τα πιο δημοφιλή τουριστικά θέρετρα στον κόσμο, λόγω της γεωγραφικής του θέσης. Η περιοχή είχε ταχεία ανάπτυξη και σχεδιασμός πριν χρόνια συμπεριλάμβανε νέους οικισμούς, ξενοδοχεία, οργανωμένες παραλίες καθώς και νέο οδικό δίκτυο, τα οποία και έχουν κατασκευαστεί. Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 26 ENVISAT ASAR, σκηνές που καλύπτουν την περίοδο μεταξύ 2002 και 2008 και εφαρμόστηκε η συμβολομετρία των σταθερών σκεδαστών. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας εμφανίζεται στην Εικόνα 8.11.

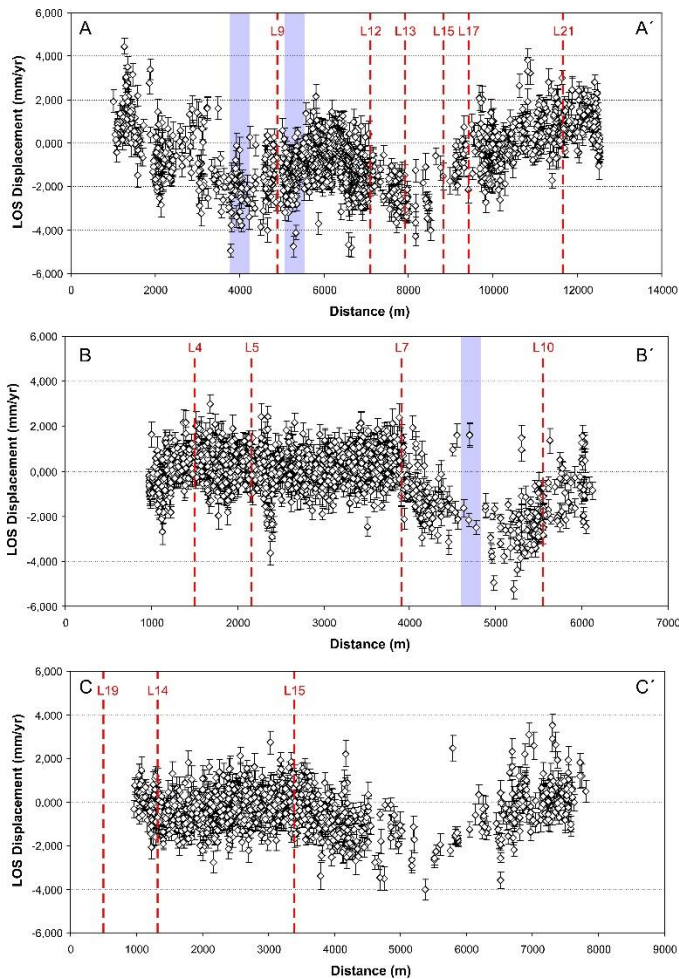
Η περιοχή που παρουσιάζει πρόβλημα εδαφικής παραμόρφωσης περιορίζεται στην παράκτια ζώνη μεταξύ του Ras Um Sid στον νότο και του Ras Nasrani στον βορρά, όπου οι ρυθμοί παραμόρφωσης είναι σχετικά υψηλοί, ενώ μειώνονται προς το εσωτερικό, δηλαδή προς τους ορεινούς όγκους.

Με βάση τα αποτελέσματα αλλά και τα ανθρωπογενή και φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής, φαίνεται ότι η άντληση υπόγειων υδάτων είναι η κύρια αιτία της εδαφικής παραμόρφωσης, και όχι άλλες πηγές· εκεί όπου εμφανίζεται η υψηλή τιμή καθίζησης είναι οι περιοχές με τον μεγαλύτερο αριθμό γεωτρήσεων. Επίσης στη χωρική πληροφορία που παρέχει το αποτέλεσμα μπορούν να χαραχθούν τομές με σκοπό τη χωρική διάσταση της παραμόρφωσης και πιθανή συσχέτισή της με τις θέσεις των γεωτρήσεων ή με ρηξιγενείς ζώνες (Εικόνα 8.12).



**Εικόνα 8.11** Χάρτης μέσης ετήσιας παραμόρφωσης της ευρύτερης περιοχής του Sharm El-Sheikh, ο οποίος παράγεται με τη μέθοδο της συμβολομετρίας των σταθερών σκεδαστών. Το λευκό τετράγωνο αντιπροσωπεύει το σημείο αναφοράς (Seleem et al 2011).





**Εικόνα 8.12** Χωρικά προφίλ A-A', B-B' και C-C' (για τη θέση τους βλ. εικόνα 8.11) που δείχνουν το πεδίο των μετατοπίσεων όπως παρατηρείται με την τεχνική της συμβολομετρίας και περιλαμβάνουν σκεδαστές σε απόσταση 150 m εκατέρωθεν της τομής. Με κόκκινες γραμμές είναι τα πιθανά ρήγματα και οι μπλε λωρίδες αντιστοιχούν σε ζώνες πιθανής άντλησης νερού (Seleem et al 2011).

## 8.7 Καταγραφή και εκτίμηση των βλαβών μετά από σεισμό

Το αποτέλεσμα ενός σεισμού μπορεί να είναι καταστροφικό και μερικές φορές είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η καταστροφή είναι εκτεταμένη γεωγραφικά ή σε απομονωμένες περιοχές. Η εκτίμηση των βλαβών και η χαρτογράφησή τους είναι σημαντική για τα συνεργεία διάσωσης και τις υπηρεσίες πολιτικής προστασίας, όμως θα πρέπει να γίνει με όρους επιχειρησιακούς, δηλαδή σε σύντομο χρονικό διάστημα και με ακρίβεια.

Η ταξινόμηση εικόνων χρησιμοποιώντας την τεχνική «ανίχνευση αλλαγών» βασίζεται σε αντικείμενα (πριν και μετά τον σεισμό) είναι ένας γρήγορος τρόπος για να γίνουν εκτιμήσεις των ζημιών.

Καθώς οι διαστημικές τεχνολογίες βελτιώνονται σε θέματα αναγνώρισης και επιχειρησιακής συμμετοχής στη διαχείριση καταστροφής, υπάρχει η τάση να ενσωματωθούν στο περιεχόμενο των δράσεων οποιοσδήποτε οργάνωσης ή μηχανισμού που διαχειρίζεται παραδοσιακά τις φυσικές ή τεχνολογικές καταστροφές. Γεγονός είναι ότι ελάχιστα κατανοείται η υποστήριξη με διαστημικές τεχνικές της διαχείρισης αυτής από την πλειοψηφία των φορέων και κυρίως από τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και πολιτικής προστασίας, και είναι ακόμα «άγνωστο θέμα» στις διασκέψεις και στα φόρουμ σχετικά με τη διαχείριση των κινδύνων και των καταστροφών.

Ο σεισμός είναι ένας τρόπος εκτόνωσης ενέργειας από τη γη και μεταφοράς της στην επιφάνειά της. Όταν συμβαίνει ένας σεισμός, είναι πολύ σημαντικό να εξεταστούν τα αποτελέσματα και οι επιδράσεις του στην πληγείσα περιοχή. Οι εικόνες που μεταδίδονται από δορυφόρους αποτελούν ένα μοναδικό εργαλείο για «φωτογράφιση» πληγέντων περιοχών μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Αυτές οι μέθοδοι είναι πολύ σημαντικές, αφού και παρέχουν γρήγορη εκτίμηση ζημιών με τη χρήση διαστημικών δεδομένων.

Η εκτίμηση των ζημιών μετά από ένα σεισμικό γεγονός θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις παρακάτω παραμέτρους:

1. Τη χωρική διακριτική ικανότητα των διαστημικών δεδομένων παρακολούθησης της γης, που χρησιμοποιούνται σε σχέση με τα χαρακτηριστικά των δομημένων περιοχών (πυκνή ή αραιή δόμηση κ.λπ.).

2. Την επαναληψιμότητα του συστήματος (δηλαδή την περίοδο κατά την οποία απεικονίζει την ίδια περιοχή ο δορυφόρος). Ένα σύστημα παρουσιάζει υψηλή επαναληψιμότητα, αλλά δεν μπορεί να γίνει η λήψη των δεδομένων από τους ερευνητές σε χρόνο μικρότερο των 24 ωρών (απόκτηση των δεδομένων σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο).

3. Την ικανότητα ανίχνευσης και αναγνώρισης του συστήματος που χρησιμοποιούμε. Υψηλές ικανότητες ανίχνευσης και αναγνώρισης επιτυγχάνονται ειδικά σε περιοχή με αραιή οικοδόμηση.

Με δεδομένο την ύπαρξη περισσότερων δορυφόρων πολύ υψηλής ευκρίνειας, στα επόμενα χρόνια θεωρείται βέβαιο ότι η χρήση των διαστημικών δεδομένων για την πρώτη αποτίμηση των ζημιών θα είναι ένα ουσιαστικό επιχειρησιακό εργαλείο.

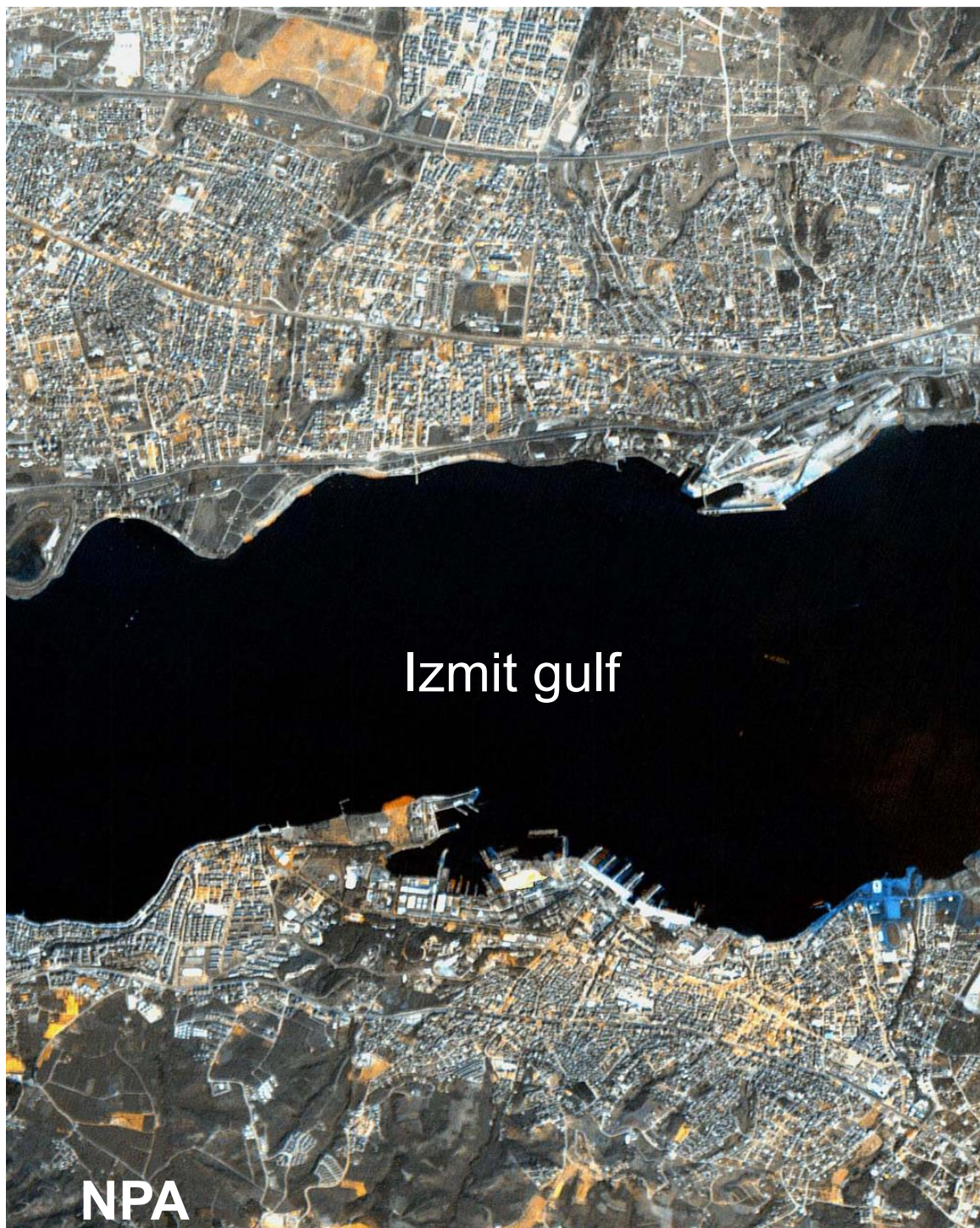


**Εικόνα 8.13** Στη μέση της δορυφορικής εικόνας *Ikonos* φαίνονται καθαρά δύο κτίρια που έχουν υποστεί ολική ή μερική κατάρρευση στην περίπτωση του σεισμού της Ινδίας (*Parcharidis et al. 2002*).

Σήμερα οι νέες αυτές τεχνικές χρησιμοποιούνται για να απογραφούν και να εκτιμηθούν οι ζημιές που προκαλούνται από σεισμούς σε απόμακρες περιοχές του πλανήτη, όπως στις περιπτώσεις των σεισμών του Αφγανιστάν, του Ιράν ή της Ινδίας, ή σε περιπτώσεις σεισμών όταν η πληγείσα περιοχή είναι εκτεταμένη και δύσβατη. επίσης, δορυφορικά δεδομένα χρησιμοποιούν οι ανθρωπιστικές αποστολές του ΟΗΕ για την εκτίμηση

της κατάστασης και αναγνώριση της περιοχής σε περιοχές όπου η πληροφορία σχετικά με τις επιπτώσεις αργεί ή δεν φθάνει ποτέ στις διεθνείς οργανώσεις παροχής βοήθειας.

Για τη μελέτη της πόλης Adapazarı, χρησιμοποιήθηκαν δυο εικόνες ραντάρ: η μία πριν από τον σεισμό και η άλλη μετά τον σεισμό. Το ποσό του ανακλώμενου σήματος είναι διαφορετικό πριν και μετά τον σεισμό, αφού τα επιφανειακά χαρακτηριστικά έχουν αλλάξει εξαιτίας του σεισμού (καταρρεύσεις κτιρίων, ρευστοποιήσεις του εδάφους κ.λπ.) προκαλώντας αλλαγές στη φωτεινότητα των εικόνων.

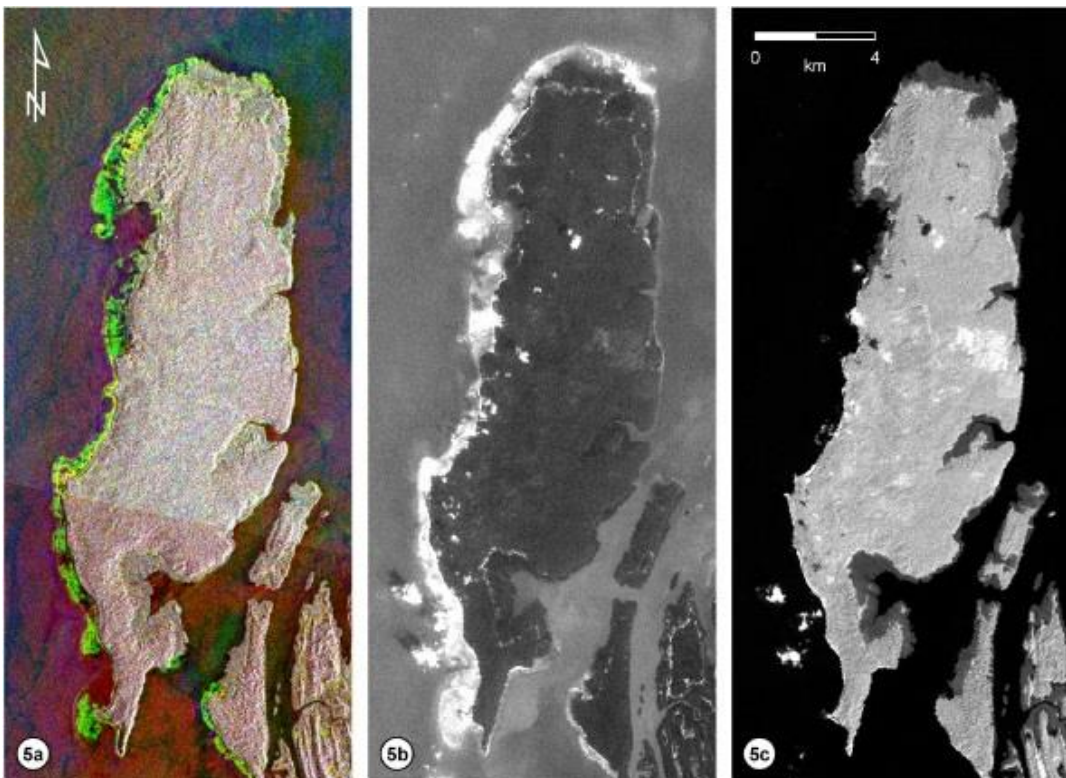


**Εικόνα 8.14** Τμήμα του κόλπου του Izmit με τις παράκτιες οικιστικές ζώνες. Με το μπεζ χρώμα, τα σημεία όπου υπήρξαν σοβαρές ζημιές από τον σεισμό (καταρρεύσεις) και με το μπλε χρώμα, παράκτιες περιοχές που καλύφθηκαν από τη

θάλασσα. Η ανάδειξη των ζημιών έγινε με τη μέθοδο «ανίχνευση αλλαγών» και με τη χρήση παγχρωματικών εικόνων (Πηγή: NPA).

Για την πόλη Βhuj χρησιμοποιήθηκε μια εικόνα Ikonos υψηλής διακριτικής ικανότητας (Εικόνα 8.13). Αυτή η εικόνα παρέχει πολύ καλά αποτελέσματα καθώς δεν χρειάζεται ιδιαίτερη επεξεργασία. Δείχνει μόνο την πληγείσα περιοχή καθαρά, ειδικά σε σημεία της πόλης με σχετικά αραιή αστική δόμηση (Parcharidis et al. 2002).

Επίσης μια μελέτη σχετικά με την εκτίμηση των επιπτώσεων του σεισμού του Izmit στην Τουρκία χρησιμοποίησε χρονοσειρά εικόνων πανγχρωματικών του δορυφόρου SPOT και εφάρμοσαν οι ερευνητές την μέθοδο της «ανίχνευσης των αλλαγών» (Εικόνα 8.14).

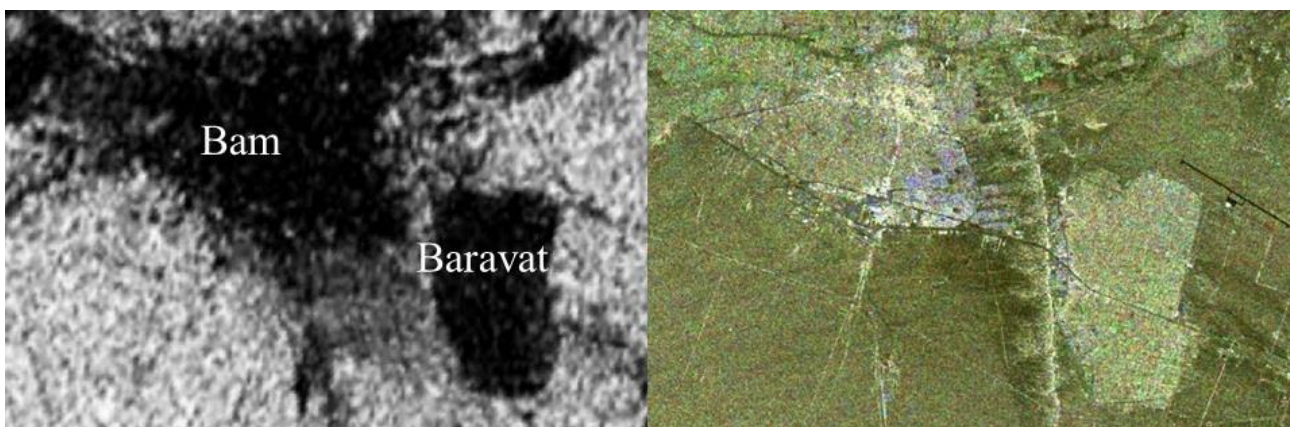


**Εικόνα 8.15.** Παράδειγμα καταγραφής κατακόρυφης παραμόρφωσης κατά μήκος της βόρειας ακτής της νήσου Andaman με τη χρήση διαχρονικών εικόνων SAR (a) και Landsat ETM + φασματικό κανάλι 5 και 1– εικόνες b και c αντίστοιχα (Parcharidis et al. 2007).

Στις 26 Δεκεμβρίου 2004 ένας από τους μεγαλύτερους σεισμούς που έχει καταγραφεί ποτέ από τη σύγχρονη σεισμολογία ( $M_w > 9,0$ ) σημειώθηκε στην περιοχή Sumatra-Andaman. Με τη χρήση διαχρονικών εικόνων ραντάρ πριν και μετά τον σεισμό ανιχνεύθηκε η κατακόρυφη μεταβολή των ακτών στα νησιά Andaman (Εικόνα 8.15) και στη συνέχεια με τη χρήση οπτικών εικόνων Landsat εκτιμήθηκαν οι επιπτώσεις στο δομημένο και φυσικό περιβάλλον (Parcharidis et al. 2007). Ιδιαίτερη βαρύτητα είχαν τα υψηλής ανάλυσης οπτικά δεδομένα από τους δορυφόρους IKONOS και QuickBird (Εικόνα 8.16) λόγω του γεγονότος ότι οι ακτές οι οποίες δέχθηκαν τα βαρυντικά κύματα ήταν αρκετές και σε όλη την έκταση του Ινδικού Ωκεανού (Lekkas et al 2007). Σε πολλές περιπτώσεις η πρόσβαση ήταν δύσκολη και έτσι η αποτύπωση των επιπτώσεων στις εικόνες έδωσε στα σωστικά συνεργεία τη δυνατότητα να έχουν σε σύντομο χρόνο εικόνα της κατανομής τους.

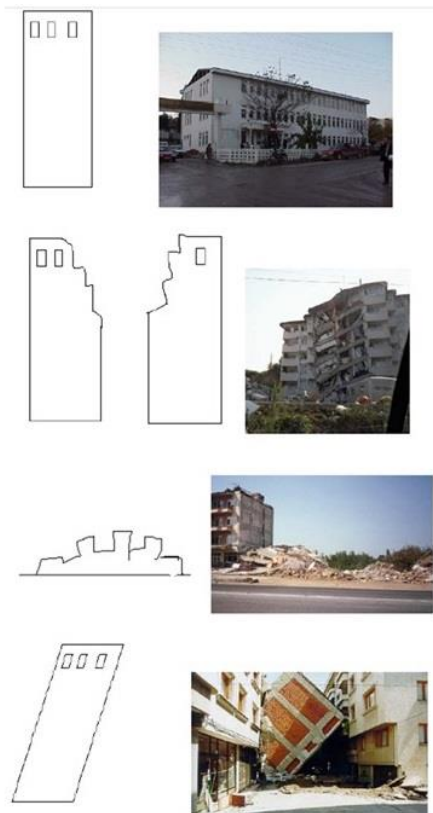


**Εικόνα 8.16** Απόψεις από δορυφόρο IKONOS της περιοχής Khao Lak της Ταϊλάνδης πριν και μετά την προσβολή από το Παλιρροϊκό Κύμα Βαρύτητας. Διακρίνονται οι καταστροφές κατά μήκος της ακτής σε μεγάλες ξενοδοχειακές μονάδες (Lekkas et al., 2007).



**Εικόνα 8.17** Αριστερά: εικόνα συμβολομετρικής συνοχής. Δεξιά: διαχρονική εικόνα χρησιμοποιώντας εικόνες Envisat-ASAR\_IMP, R: 11/6/2003, G: 03.12.2003 & B: 7/1/2004 (Parcharidis et al.2005)

Ο σεισμός του Bam (Ιράν) στις 26/12/2003 ( $M_w = 6,5$ ) κατεδάφισε σχεδόν ολοσχερώς την πόλη Bam και προκάλεσε σοβαρές βλάβες στην πόλη Baravat. Στην περίπτωση αυτή και με σκοπό την ανίχνευση των πιθανών βλαβών χρησιμοποιήθηκαν εικόνες SAR και δημιουργήθηκαν διαχρονικές εικόνες, αλλά και εικόνες συνοχής (Εικόνα 8.17). Όσον αφορά τη χαρτογράφηση των ζημιών, τα αποτελέσματα ήταν πολύ φτωχά όσον αφορά την αναγνώριση· απλώς ανιχνεύεται ότι πιθανότατα υπάρχουν καταρρεύσεις, ολικές ή μερικές, σε αντίθεση με τα οπτικά δεδομένα που δίνουν τη δυνατότητα και της αναγνώρισης, ειδικά όταν πρόκειται για δεδομένα υψηλής ανάλυσης. Συμπερασματικά, η αναγνώριση των ζημιών στο κτιριακό απόθεμα μετά από έναν σεισμό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εικόνας αλλά και από το είδος της επίπτωσης στο κτίριο (Εικόνα 8.18).



**Εικόνα 8.18.** Στην περίπτωση των σεισμών αλλά και σε άλλες καταστροφές, αυτές είναι οι 4 βασικές επιπτώσεις στο κτιριακό απόθεμα και αντίστοιχα γίνεται η καταγραφή είτε από οπτικά συστήματα είτε από radar (Parcharidis et al. 2002).

## 8.8 Ανίχνευση και χαρτογράφηση αρχαιολογικών χώρων

Η χρήση τηλεπισκοπικών μέσων με σκοπό την εξαγωγή πληροφοριών αρχαιολογικής φύσης αναπτύχθηκε κατά πολύ τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς προσφέρει μια λιγότερο δαπανηρή και επεμβατική μέθοδο διεξαγωγής των αρχαιολογικών ερευνών.

Οι εφαρμογές της τηλεπισκόπησης στην αρχαιολογία περιλαμβάνουν τη χρήση υπέρυθρων εικόνων και στερεοσκοπικών ζευγών εικόνων. Η υπέρυθρη ακτινοβολία έχει μεγάλα μήκη κύματος και μπορεί να διεισδύσει περίπου ένα μέτρο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι στερεοσκοπικές εικόνες δείχνουν μικρές διακυμάνσεις στο υψόμετρο του εδάφους. Συνήθως, τα τηλεπισκοπικά δεδομένα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν υποψίες ως προς την ύπαρξη αρχαίων καταλοίπων σε μια περιοχή ενδιαφέροντος,

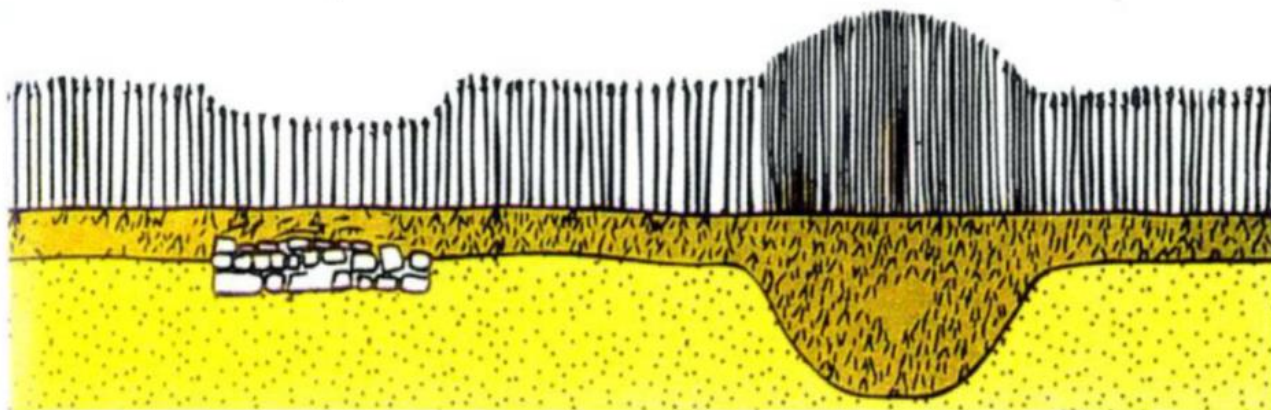
έτσι ώστε οι αρχαιολόγοι να έχουν έναν βαθμό βεβαιότητας ως προς τις μορφές και τις θέσεις που θα ερευνηθούν, προτού οδηγηθούν σε μια επεμβατική και δαπανηρή ανασκαφή στην υπό μελέτη περιοχή.

Γενικότερα, οι τηλεπισκοπικές απεικονίσεις αποκαλύπτουν καταρχάς τις σχέσεις μιας αρχαιολογικής περιοχής με το φυσικό της περιβάλλον. Επίσης αποκαλύπτουν οικισμούς που σήμερα έχουν εξαφανιστεί, το δίκτυο των εσωτερικών οδών του οικισμού καθώς και τη θέση ορισμένων δημόσιων οικοδομημάτων. Σε περίπτωση οικισμών που κατοικούνται διαρκώς, ο φωτοερμηνευτής αναδημιουργεί την ιστορία και την εξέλιξη του οικισμού, αποκαλύπτει τον αρχικό πυρήνα του, καθώς και την ένταση της ανάπτυξης υπό το πρίσμα της προοπτικής μιας συνεχούς εξέλιξης.

Είναι αναγκαίο ο φωτοερμηνευτής-αρχαιολόγος να αποκτήσει καλή γνώση της περιοχής ή των θέσεων στις οποίες αναζητά αρχαία ευρήματα. Γι' αυτόν τον λόγο, τα βασικά είδη πληροφοριών που είναι απαραίτητα πριν από τη διεξαγωγή της εργαστηριακής επεξεργασίας και ερμηνείας: α) γνώση της απόλυτης γεωγραφικής θέσης της περιοχής μελέτης, β) γνώση της θέσης των καταλοίπων που έχουν ήδη ανασκαφεί για την περιοχή αυτή, καθώς αν είναι δυνατό και τις θέσεις για τις οποίες υπάρχει υποψία συνέχειας των καταλοίπων αυτών και γ) γνώση και εξοικείωση με τη φύση της περιοχής στη σημερινή εποχή. Απαραίτητη στην ανίχνευση αρχαιολογικών θέσεων διά της μεθόδου της φωτοερμηνείας και τηλεπισκόπησης είναι η γνώση των γεωλογικών δεδομένων της υπό μελέτη περιοχής, δεδομένου ότι θα συμβάλει ουσιαστικά στην αποδοχή ή όχι από τον ερευνητή, στην περίπτωση εντοπισμού κάποιων ιχνών, των συγκεκριμένων ιχνών ως αρχαιολογικών καταλοίπων, δεδομένου ότι θα είναι πλέον γνωστή η αλληλεξάρτησή τους με το φυσικό περιβάλλον και την εξέλιξή του (Χρόνη, 2011).

Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, οι κυρίες ενδείξεις που καθοδηγούν τον φωτοερμηνευτή στο συμπέρασμα της ύπαρξης ή μη αρχαίων κατάλοιπων αφορούν τα εξής χαρακτηριστικά εικόνων:

- Χρωματικές διαφοροποιήσεις ή τονικές διαφορές: όπως είναι κατανοητό, οι χρωματικές διαφοροποιήσεις σε μια πολυφασματική εικόνα, είτε αυτή είναι ψευδέγχρωμη είτε φυσικού χρώματος, καθώς και οι διαφορές στους τόνους του γκρι για μια ασπρόμαυρη εικόνα, δύνανται να αποτελούν ενδείξεις ύπαρξης αρχαίων καταλοίπων ή ιχνών.
- Μορφές συγκεκριμένου σχήματος: είναι από τις ισχυρότερες ενδείξεις ύπαρξης καταλοίπων καθώς με αυτό τον τρόπο αναγνωρίζονται περιγράμματα αρχαίων δομών, οντοτήτων ή ιχνών, π.χ. δίκτυα μεταφορών.
- Μέγεθος μορφών: αυτό το χαρακτηριστικό είναι συμπληρωματικό των μορφών που φέρουν ένα συγκεκριμένο σχήμα. Όταν μια αρχαία δομή χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο σχήμα και μέγεθος, τότε αναγνωρίζεται μέσα σε ένα σύγχρονο ανάγλυφο.
- Τυποποίηση οντοτήτων: η τυποποίηση οντοτήτων ή ιχνών αφορά ένα είδος ταξινόμησης για συγκεκριμένους τύπους μορφών. Εάν ο ερμηνευτής έχει εκπαιδευτεί στην αναγνώριση αρχαίων τύπων, τότε η διαδικασία της ερμηνείας διευκολύνεται αισθητά, π.χ. η αναγνώριση ταφικών τύπων ή τύπων οχύρωσης.
- Υφή: η υφή αφορά τα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου κάθε περιοχής. Στην περίπτωση μιας περιοχής όπου πιθανολογείται η ύπαρξη αρχαίων ευρημάτων, η αλλαγή υφής μέσα σε ένα γνωστό ανάγλυφο με δεδομένη υφή των χαρακτηριστικών του δύναται να υποδεικνύει την ύπαρξη αρχαίων μορφών (Χρόνη, 2011).



**Εικόνα 8.19** Σχέδιο που αποδίδει τον τρόπο με τον οποίο η υπερκείμενη βλάστηση επηρεάζεται από τα θαμμένα αρχαιολογικά κατάλοιπα (Renfrew & Bahn, 1996).

Οι ισχυρότερες ενδείξεις στην πλειοψηφία των τηλεπισκοπικών ερευνών που αποσκοπούν στην αναγνώριση αρχαίων δομών προκύπτουν κατά κύριο λόγο από μεταβολές στην ανάπτυξη ή τη φωτεινότητα της βλάστησης, καθώς η υπόγεια ύπαρξη καταλοίπων επηρεάζει την απόκριση της υπέργεια φυτοκάλυψης. Όπως προκύπτει, επομένως, οι ιδανικότερες απεικονίσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως στις τηλεπισκοπικές αναζητήσεις αρχαιοτήτων αφορούν τις απεικονίσεις του θερμικού και υπέρυθρου μέρους του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, μιας και η απόκριση της βλάστησης είναι ιδιαίτερα υψηλή για τα συγκεκριμένα μήκη κύματος.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εικόνα 8.19, στην οποία η βλάστηση αναπτύσσεται διαφορετικά όταν υπογείως απαντώνται αρχαία κατάλοιπα ή βαθιές εδαφικές μορφές, όπως μια αρχαία τάφος, γεγονός που κατ' επέκταση επηρεάζει και την απόκριση που θα έχει η βλάστηση στη συγκριμένη περιοχή στα δεδομένα του δορυφόρου.

Τέλος, η φωτοερμηνεία μπορεί να παρέχει αρκετά στοιχεία σχετικής χρονολόγησης, κι αυτό λόγω της δυνατότητας ένταξης της μορφής του υπό μελέτη στοιχείου στην εξέλιξη της σειράς στην οποία ανήκει. Αν κάποιο στοιχείο αυτής της σειράς είναι ακριβώς χρονολογημένο, τότε η σχετική χρονολόγηση των υπόλοιπων είναι πιο εύκολη και ασφαλής. Με τις δορυφορικές εικόνες ο αρχαιολόγος μπορεί να μελετήσει ευρύτερες περιοχές από ό,τι με τις αεροφωτογραφίες, έτσι οι δορυφορικές λήψεις καθιστούν πιο εύκολο τον σχεδιασμό της αρχαιολογικής αποστολής, αφού επιτρέπουν στην ομάδα έρευνας να έχει μια ευρύτερη άποψη (από πλευράς οπτικής) της υπό μελέτη περιοχής, των οδών καθώς και άλλων πληροφοριών απαραίτητων για την οργάνωση και πραγματοποίηση αρχαιολογικών ανασκαφών.

Τον Οκτώβριο του έτους 2001, η UNESCO πέτυχε τη συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA), με αποτέλεσμα την εισαγωγή της διαστημικής τεχνολογίας στην παρατήρηση και καταγραφή τοποθεσιών πολιτιστικής κληρονομιάς. Σήμερα στον οργανισμό αυτόν έχουν ενταχθεί πλήθος διεθνών Διαστημικών Υπηρεσιών, Ερευνητικών Ινστιτούτων και Πανεπιστημίων, όπως επίσης και ένας μεγάλος αριθμός ειδικών επιστημόνων σε αυτή την προσπάθεια, εισάγοντας ένα σύνολο σύγχρονων τεχνολογικών μεθόδων.



**Εικόνα 8.20.** Σύγκριση της εικόνας του ορθομωσαϊκού (αριστερά) και της συγχωνευμένης δορυφορικής εικόνας Quickbird (δεξιά) για την ανάδειξη τμήματος της Εγνατίας Οδού (Georgoula et al. 2003)

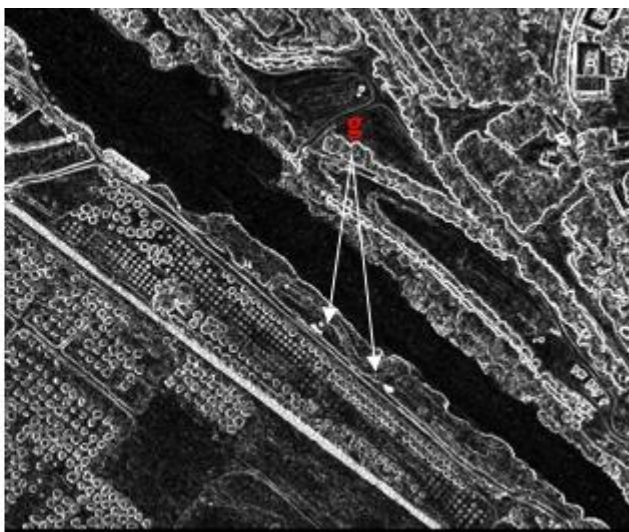
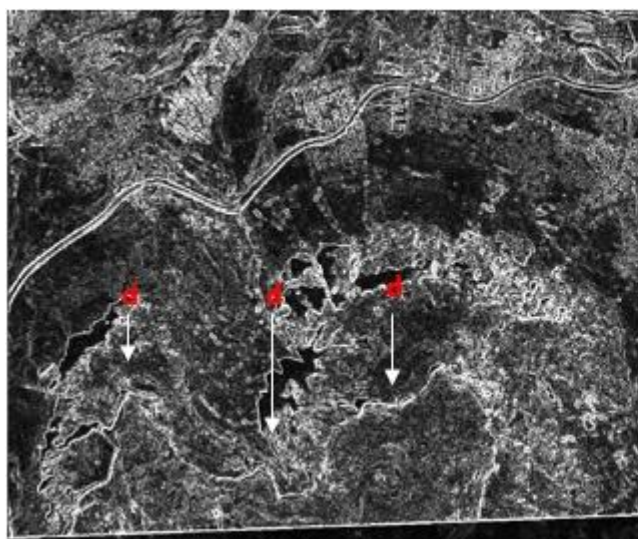
Σε μελέτη η οποία πραγματοποιήθηκε από το τμήμα του Κτηματολογίου, Φωτογραμμετρίας και Χαρτογραφίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Georgoula et al. 2003) με σκοπό την αξιολόγηση της χρήσης εικόνων του Quickbird στην ανάδειξη θαμμένων αρχαιολογικών οντοτήτων, κατέστη δυνατή η ανεύρεση ενός μικρού τμήματος της Εγνατίας Οδού με βάση τα πλεονεκτήματα των εικόνων της υψηλής χωρικής διακριτικής για την ανάδειξη των αρχαιολογικών οντοτήτων τόσο στις παγχρωματικές εικόνες (PAN) όσο και στις πολυφασματικές (MS), μέσω διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας τους όπως μίξης εικόνων (Εικόνα 8.20).

Η εφαρμογή δορυφορικών εικόνων πολύ υψηλής ανάλυσης και η επεξεργασία τους (Παντέρας 2007) βοηθούν στην ανάδειξη και αναγνώριση ήδη γνωστών αρχαιολογικών οντοτήτων. Αποτελεί μια εξολοκλήρου νέα προσέγγιση στην αρχαιολογική έρευνα, παρόλο που και άλλα τηλεπισκοπικά δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν, όπως οι αεροφωτογραφίες. Η χρήση των αεροφωτογραφιών ήταν περιορισμένη στη λήψη δεδομένων μόνο στο ορατό φάσμα, περιορίζοντας έτσι την αναγνώριση των οντοτήτων σε οπτικές μεθόδους. Τα πολυφασματικά δεδομένα των δορυφόρων παρέχουν τη δυνατότητα για βαθύτερη ανάλυση και επεξεργασία της εικόνας, όπως η εφαρμογή χωρικών φίλτρων (Εικόνα 8.22).





**Εικόνα 8.21** Εικόνα αριστερά: Ακροκόρινθος (d: τείχη του Ακροκορίνθου). Εικόνα δεξιά: περιοχή του Διόλκου (g), με την προσθήκη φίλτρου Chavez. (Παντέρας 2007)



**Εικόνα 8.22** Εικόνα αριστερά: Ακροκόρινθος (d: τείχη του Ακροκορίνθου). Εικόνα δεξιά: περιοχή του Διόλκου (g), με την προσθήκη φίλτρου Prewitt. (Παντέρας 2007)

## 8.9 Παρατήρηση ενεργών ηφαιστειών με τη χρήση θερμικής ακτινοβολίας

Τα ηφαιστεια σχηματίζονται όταν ζεστά, λιωμένα πετρώματα από τον ανώτερο μανδύα βρίσκουν διέξοδο προς την επιφάνεια. Υπάρχουν πάνω από 600 ενεργά ηφαιστεια στη Γη. Τα ηφαιστεια είναι συχνά απρόσιτα, καθιστώντας έτσι τις εφαρμογές της τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιούν τη θερμική και τη μέση-υπέρυθρη ακτινοβολία σαφείς λύσεις για την κατανόηση της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Οι δορυφόροι AVHRR και MODIS είναι οι πλέον κατάλληλοι για την παρακολούθηση του ηφαιστείου.

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν μερικές από τις πιο έντονες και βίαιες διεργασίες στη Γη. Σε πολλές περιπτώσεις αναγκάζουν τους κατοίκους περιοχών κοντά σε ενεργά ηφαιστεια να εγκαταλείψουν τη γη και τις οικίες τους, μερικές φορές για πάντα. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα τα τελευταία 300 χρόνια έχει σκοτώσει

πάνω από 250.000 ανθρώπους, καταστρέφοντας ολόκληρες πόλεις και δάση και διαταράσσοντας έντονα τις τοπικές οικονομίες. Τα ηφαιστειακά μπορεί να ενέχουν σημαντικούς κινδύνους σε ανθρώπους που βρίσκονται κοντά σε αυτά για διάφορους λόγους όπως: α) πυροκλαστικές εκρήξεις που είναι ικανές να καλύψουν εκτενείς περιοχές με καυτή τέφρα, σκόνη και καπνό μέσα σε λίγες ώρες ή λεπτά, β) φλεγόμενα υλικά, εκτοξευόμενα από το στόμιο του ηφαιστείου, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές σε πόλεις και δάση ενώ ποτάμια λάβας μπορούν να καταστρέψουν τα πάντα στο πέρασμά τους αλλάζοντας το τοπίο, γ) καταρρακτώδεις βροχοπτώσεις ή το λιώσιμο του χιονισμένου φορτίου του ηφαιστείου μπορούν να εκκινήσουν τεράστιες λασποροές για ολόκληρα χιλιόμετρα καλύπτοντας πόλεις και χωριά στο πέρασμά τους, δ) τεράστιες ποσότητες αερίων και στάχτης απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, όπου μερικές φορές μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα σε παγκόσμια κλίμακα.

Εκκινώντας από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, μια νέα αναπτυξιακή κατεύθυνση άρχισε να εξελίσσεται. Η διαδικασία αυτή ξεκίνησε για να αντιμετωπιστεί το γεγονός ότι η παρακολούθηση της δυναμικής φύσης των ηφαιστειακών εκρήξεων επωφελείται από την τακτική συλλογή των θερμικών δεδομένων σε υψηλή συχνότητα. Ως αποτέλεσμα, οι επιστήμονες άρχισαν να βρίσκουν λύσεις χρησιμοποιώντας δεδομένα χαμηλής χωρικής ανάλυσης από μετεωρολογικούς δορυφόρους, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα είτε σε ωριαία είτε σε καθημερινή βάση.

Χρησιμοποιώντας τους αισθητήρες AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) και ATSR (Along-Track Scanning Radiometer), οι επιστήμονες έδειξαν ότι με την προσαρμογή των τεχνικών που αναπτύχθηκαν με τη χρήση των δεδομένων Landsat TM, αυτοί οι χαμηλής χωρικής ανάλυσης αισθητήρες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για συγκεντρώσουν και να καταγράψουν όλες τις χρονολογίες εκρήξεων και να εκτελέσουν αναδρομικές αναλύσεις ολόκληρων εκρηκτικών επεισοδίων. (Higgins et al., 1997· Wooster and Rothery, 1997) Παράλληλα με το έργο αυτό, κατά τη δεκαετία του 1990 έγιναν προσπάθειες για τη χρήση θερμικών δορυφορικών δεδομένων ώστε να συμβάλουν στην παρακολούθηση των ηφαιστειών σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αλγόριθμων για την αυτόματη ανίχνευση και την έγκαιρη ειδοποίηση σε περίπτωση έντονης ηφαιστειακής δραστηριότητας ή σε αλλαγές των εκάστοτε δραστηριοτήτων ενός ηφαιστείου. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αυξανόμενη χρήση των δεδομένων AVHRR σε ένα επιχειρησιακό περιβάλλον ως μέρος των προσπαθειών για την παρακολούθηση του ηφαιστείου στο Πανεπιστήμιο Fairbanks της Αλάσκας (Dean et al., 2000).

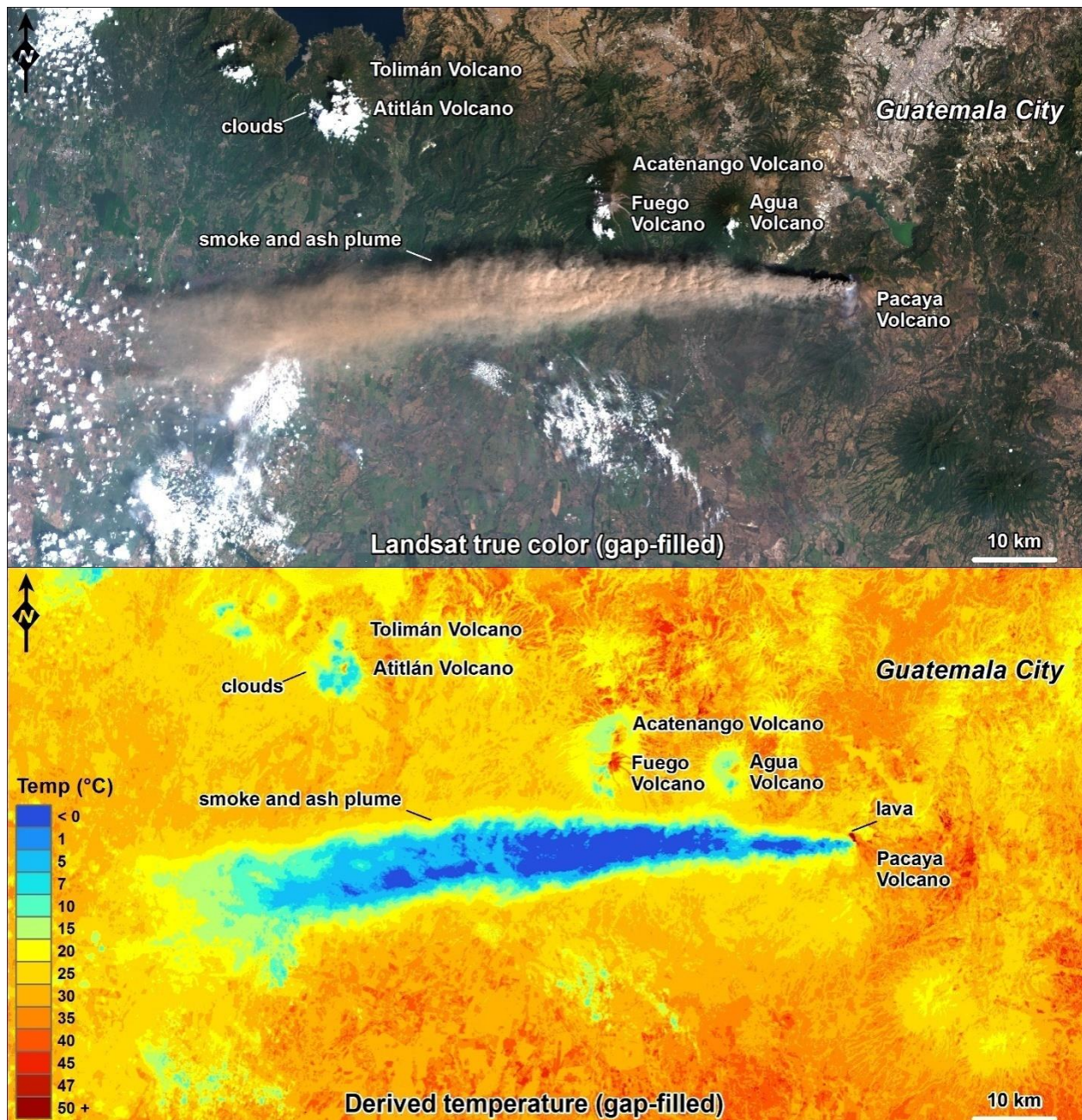
Δεν υπάρχει μέχρι στιγμής κάποιος δορυφόρος ή επίγειος αισθητήρας ο οποίος να έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για ηφαιστειακές εφαρμογές. Ωστόσο υπάρχουν πολλοί θερμικοί αισθητήρες σχεδιασμένοι για στρατιωτικές, αστικές και βιομηχανικές εφαρμογές, οι οποίοι μπορούν να προσαρμοστούν και για ηφαιστειακές εφαρμογές. Έτσι, οι ηφαιστειολόγοι έπρεπε να χρησιμοποιήσουν αισθητήρες και δεδομένα που δεν προορίζονταν γι' αυτόν τον σκοπό. Για παράδειγμα, τα δεδομένα από μετεωρολογικούς δορυφόρους παρέχουν δεδομένα σε μήκη κύματος που είναι κατάλληλα για την εξέταση ηφαιστειακών hot-spots, επειδή όμως οι μετεωρολόγοι ενδιαφέρονται συνήθως για χαμηλές θερμοκρασίες που σχετίζονται με τις κορυφές σύννεφων και θερμοκρασίες περιβάλλοντος που συνδέονται με την επιφάνεια του εδάφους, το ανώτερο όριο αυτών των αισθητήρων (σε όρους μέτρησης θερμοκρασίας) είναι συχνά χαμηλό, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και από ένα αρκετά μικρό ηφαιστειογενές hot-spot η μέτρηση της θερμοκρασίας δεν είναι σωστή. Οι ηφαιστειολόγοι που χρησιμοποιούν τηλεπισκοπικά δεδομένα πρέπει να εργαστούν με αυτούς τους περιορισμούς, όπως επίσης να προσαρμόζονται στα όρια των διαθέσιμων δεδομένων· μέχρι να γίνει διαθέσιμος ένας κατάλληλα σχεδιασμένος αισθητήρας με κατάλληλα μήκη κύματος, ιδανικές ρυθμίσεις, χωρική ανάλυση και τροχιακή διαμόρφωση, θα πρέπει να συνεχίζουν να προσαρμόζονται σε δεδομένα που προορίζονται για άλλες εφαρμογές (Harris 2013).

Η έναρξη της νέας χιλιετίας έφερε ένα μεγάλο βήμα προς το εύρος των διαθέσιμων πόρων για την ανάλυση των θερμικών φασματικών ταυτοτήτων των ηφαιστειών, με την εκτόξευση ορισμένων δορυφόρων της NASA όπως είναι ο δορυφόρος Terra, ο Landsat-7, ο Aqua και ο EO-1. Όλοι αυτοί οι δορυφόροι μεταφέρουν αισθητήρες που επιτρέπουν τη θερμική καταγραφή των ενεργών ηφαιστειών που επρόκειτο να μελετηθούν από το Διάστημα. Ως αποτέλεσμα, καθιερώθηκε το πρώτο παγκόσμιο σύστημα δορυφορικής παρακολούθησης ηφαιστειών, με το οποίο παρακολουθούνται όλα τα ενεργά και δυνητικά ενεργά ηφαιστειακά της Γης σε καθημερινή βάση (Wright et al., 2004).

Σήμερα, τα θερμικά δεδομένα από δορυφορικούς αισθητήρες γίνονται όλο και πιο φθηνά και σε πολλές περιπτώσεις διατίθενται ελεύθερα. Για παράδειγμα, τα δεδομένα MODIS είναι διαθέσιμα σε διάφορες μορφές

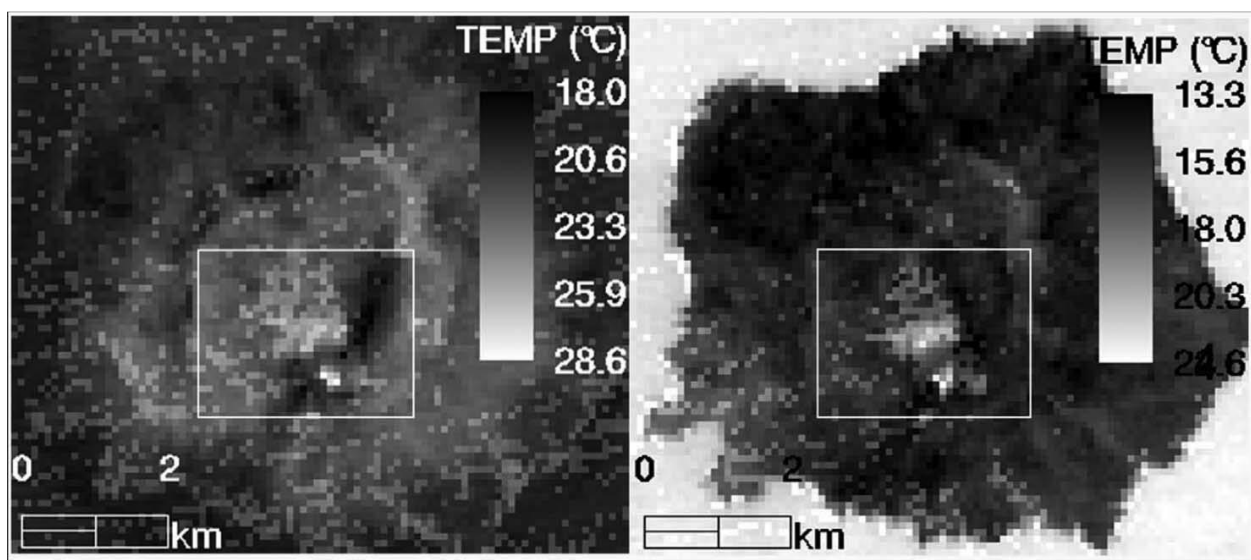
βαθμονομήσεων και γεωμετρικών διορθώσεων χωρίς κόστος από τη NASA μέσα σε λίγες ώρες από τη λήψη των δεδομένων, επίσης τα δεδομένα από δορυφόρους της σειράς Landsat είναι διαθέσιμα δωρεάν.

Γενικότερα, η θερμική τηλεπισκόπηση έχει προσφέρει μοναδικά και διαφωτιστικά στιγμιότυπα της συμπεριφοράς των ηφαιστείων, τόσο γνωστά και ασαφή, τόσο επικίνδυνα και αθόρυβα, για πολλές δεκαετίες (Εικόνα 8.23). Παρά τη μη ύπαρξη κάποιου αισθητήρα αυτή τη στιγμή σε τροχιά αποκλειστικά για την παρακολούθηση ηφαιστείων, οι εξελίξεις στην τεχνολογία σημαίνουν ότι περισσότερες πληροφορίες και λεπτομέρειες θα γίνονται διαθέσιμες από την άποψη της παρατήρησης της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Πράγματι, το ισχύον καθεστώς είναι ότι όλες οι ηφαιστειακές επιφάνειες μπορεί να εποπτεύονται, αποκαλύπτοντας τις τάσεις της δραστηριότητας που βοηθούν στη δυνατότητα πρόβλεψης και επιτρέπουν την εξ αποστάσεως αξιολόγηση της επικινδυνότητας (Blackett 2014).



**Εικόνα 8.23** Εικόνες του δορυφόρου Landsat-7 πάνω από το ηφαίστειο Pacaya στη Γουατεμάλα λίγο πριν την έκρηξη στις 2 Μαρτίου 2014 (Πηγή: NASA).

Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου GEOWARN χρησιμοποιήθηκε μια χρονοσειρά θερμικών εικόνων ASTER νυχτερινής λήψης με στόχο την παρακολούθηση της θερμοκρασιακής διαφοροποίησης του ηφαιστείου της Νισύρου στο χρόνο (Ganas et al. 2012). Χρησιμοποιήθηκαν νυχτερινές λήψεις για να εξαλειφθεί η επίδραση της τοπογραφίας επί της περιοχής του κρατήρα. Το αποτέλεσμα της μελέτης έδειξε ότι ο κρατήρας Στέφανος ακτινοβολεί περισσότερη ροή θερμότητας σε σύγκριση με τον κρατήρα του Πολυβώτη (Εικόνα 8.24). Επιπλέον, η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει σαφώς μια σχεδόν σταθερή κατάσταση της ροής θερμότητας κατά την περίοδο 2001-2005. Αυτή ήταν μια σημαντική παρατήρηση για την κατάσταση του ηφαιστείου σε συνδυασμό με άλλες γεωφυσικές παραμέτρους.



**Εικόνα 8.24** Θερμικός χάρτης του ηφαιστείου της Νισύρου μετά την εφαρμογή την επεξεργασία των εικόνων. Αύξηση φωτεινότητα υποδηλώνει υψηλότερες θερμοκρασίες της επιφάνειας. Ο χάρτης δείχνει τις τιμές θ για τις 13 Ιουνίου 2002 (αριστερά) και της 26ης Οκτωβρίου 2002 (δεξιά), αντίστοιχα. Το λευκό πλαίσιο δείχνει την τοποθεσία των κρατήρων (Ganas et al. 2012).

## Βιβλιογραφικές αναφορές

### Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), pp. 2375-2383.

Blackett, M. (2014). Thermal remote sensing of active volcanoes: a user's manual, by A. Harris. *International Journal of Remote Sensing*, 35(10), pp. 3915-3916.

Dehn, J., Dean, K., & Engle, K. (2000). Thermal monitoring of North Pacific volcanoes from space. *Geology*, 28(8), pp. 755-758.

- Engman, E.T., & Chauhan, N. (1995). Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51(1), pp. 189-198.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 39, pp. 8–20.
- Georgoula O., Kaimaris D., Tsakiri M., & Patiaw P. (2003). From the aerial photos to satellite image: Tools for the archaeological research. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 35 (B7), pp. 1055-1060.
- Harris, A. (2013). *Thermal Remote Sensing of Active Volcanoes: A User's Manual*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Higgins, J., & Harris, A. (1997). VAST: a program to locate and analyse volcanic thermal anomalies automatically from remotely sensed data. *Computers & Geosciences*, 23(6), pp. 627-645.
- Jackson, T.J., O'Neill, P.E., Kustas, W.P., Bennett, E., & Swift, C.T. (1995). Passive microwave observation of diurnal soil moisture at 1.4 and 2.65 GHz. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1, pp. 492-494.
- Koukis, G., Sabatakakis, N., Tsiambaos, G., & Katrivesis, N. (2005). Engineering geological approach to the evaluation of seismic risk in metropolitan regions: Case study of Patras, Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, pp. 219-235.
- Lekkas, E., Parcharidis, I., Skourtsos, E.M.M. & Foumelis, M. (2007). Management of syn-catastrophic phase for world scale natural disasters in third world countries: The December 24 2004 earthquake M9.2R in the Indian Ocean and the October 8 2005 earthquake M7.6R in North Pakistan. 8th Pan-Hellenic Geographical Conference, Hellenic Geographical Association, Athens, 8 pages.
- Liu, J., Chen, J. M., & Cihlar, J. (2003). Mapping evapotranspiration based on remote sensing: An application to Canada's landmass. *Water Resour. Res.*, 39, pp. 1189, doi:10.1029/2002WR001680, 7
- Parcharidis I., Lagios E. & Levanti C., (2002). Earthquake damage assessment using space techniques. *Proceedings of 6th Pan-Hellenic Geographical Conference*, vol. II, 208-215.
- Parcharidis I., Kokkalas, S., Fountoulis, I. & Foumelis, M. (2009). Detection and monitoring of active faults in urban environments: Time series interferometry on the cities of Patras and Pyrgos (Peloponnese, Greece). *Remote Sensing Journal* 1, pp. 676-696.
- Parcharidis I., Zare M., Foumelis M., & Psomiadis E. (2005). Investigation on Bam (Iran) earthquake 26/12/03 based on interferometric coherence. *Proceedings of SPIE*, Volume 5983 (8 pages).
- Renfrew, C., & Bahn, P. G. (2004). *Archaeology: theories, methods and practice* London: Thames & Hudson.
- Seleem, T.A., Parcharidis, I., Foumelis, M. & Kourkouli, P. (2011). Detection of ground deformation over Sharm El-Sheikh – RasNasrani coastal zone, South Sinai (Egypt), by time series SAR interferometry. *Journal of African Earth Sciences* 59, pp. 373-383.
- Walker, J. P., Willgoose, G. R. & Kalma, J. D. (1998). Towards Profile Soil Moisture Retrieval from Remote Sensing, *EOS. Transactions American Geophysical Union*, 79(17): S41.

Wooster, M. J., & Rothery, D. A. (1997). Time-series analysis of effusive volcanic activity using the ERS along track scanning radiometer: The 1995 eruption of Fernandina Volcano, Galapagos Islands. *Remote sensing of environment*, 62(1), pp. 109-117.

### Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

Ανυφαντή, Α. (2015). Αναγνώριση ζωνών εξαλλοίωσης στη νήσο Λήμνο Νομός Λέσβου. Αθήνα: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Μεταπτυχιακή Διατριβή.

Καραγιαννοπούλου, Α. (2015). Διαχρονική ανάλυση του Ηφαιστείου της Αίτνας με τη χρήση Υπερφασματικών δεδομένων Hypersion. Αθήνα: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Πτυχιακή Διατριβή.

Καρπούζας, Σ. (2014). Χρήση χρονολογικής σειράς δορυφορικών εικόνων LANDSAT (1993-2001-2010) για τη χαρτογράφηση των αλλαγών χρήσης/κάλυψης γης του δήμου Μεγάρων. Αθήνα: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Μεταπτυχιακή Διατριβή.

Μπενέκος, Γ. (2012). Διαφορική συμβολομετρία ραντάρ για την ανίχνευση της εδαφικής παραμόρφωσης στην ευρύτερη περιοχή της λίμνης Τριχωνίδας για την περίοδο (2003-2010). Αθήνα: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Μεταπτυχιακή Διατριβή.

Παντέρας, Γιώργος (2007). Χαρτογράφηση αρχαιολογικών θέσεων με τη χρήση δορυφορικών εικόνων. Αθήνα: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Διατριβή.

Χρόνη, Α. (2011). Εφαρμογές της Φωτοερμηνείας και Τηλεπισκόπησης στην Αρχαιολογία Αθήνα: Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Διδακτορική Διατριβή.