

Η Τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης
Ιωάννης Ν. Φαρασλής
Αθανάσιος Κ. Μωυσιάδης



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

HEALLINK
Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
αυτοδίδαξη στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΕΣΠΑ
2007-2013
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΠΕΡΑΚΗΣ
Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

ΙΩΑΝΝΗΣ Ν. ΦΑΡΑΣΛΗΣ
Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Κ. ΜΩΥΣΙΑΔΗΣ
Επιστημονικός Συνεργάτης Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Η Τηλεπισκόπηση σε 13 Ενότητες

Θεωρία, Μέθοδοι και Εφαρμογές



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

Η Τηλεπισκόπηση σε 13 Ενότητες

Συγγραφή

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης (Κύριος Συγγραφέας)

Ιωάννης Ν. Φαρασλής

Αθανάσιος Κ. Μουσιάδης

Κριτικός αναγνώστης

Ισαάκ Παρχαρίδης

Συντελεστές έκδοσης

ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: Κωνσταντίνος Περάκης

ΓΡΑΦΙΣΤΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: Κωνσταντίνος Περάκης

ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ: Αθανάσιος Μουσιάδης

Copyright © ΣΕΑΒ, 2015



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 3.0.

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

www.kallipos.gr

ISBN: 978-960-603-295-0

Αφιερώνεται στους δασκάλους μας και στις οικογένειές μας

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων.....	6
Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνύμια	12
Ευρετήριο επιστημονικών όρων	15
Πρόλογος.....	17
Εισαγωγή	18
Κεφάλαιο 1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και Τηλεπισκόπηση	20
1.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	20
1.2 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα.....	21
1.3 Απεικονιστική φασματομετρία και Τηλεπισκόπηση	23
1.4 Δομή πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων	23
1.5 Διακριτική ικανότητα (χωρική, φασματική, ραδιομετρική, χρονική)	24
Βιβλιογραφία/Αναφορές	24
Κεφάλαιο 2 Στοιχεία Φωτογραμμετρίας – Φωτοερμηνείας.....	25
2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Στοιχεία Φωτογραμμετρίας	26
2.2.1 Στοιχεία αεροφωτογραφιών.....	26
2.2.1.1 Κατηγορίες αεροφωτογραφιών	27
2.2.1.2 Τύποι αεροφωτογραφιών	28
2.2.2 Κλίμακα αεροφωτογραφίας.....	29
2.2.2.1 Μέθοδοι υπολογισμού κλίμακας αεροφωτογραφίας.....	30
2.2.3 Πηγές αεροφωτογραφιών για την Ελλάδα.....	32
2.2.4 Αρχές φωτογραμμετρικής επεξεργασίας.....	33
2.2.4.1 Στερεοσκοπία	33
2.2.4.2 Υπολογισμός συντεταγμένων σημείων από μετρήσεις σε εικόνες.....	35
2.2.4.3 Φωτογραμμετρική αναγωγή εικόνας	37
2.2.5. Φωτογραμμετρικά προϊόντα.....	38
2.2.5.1 Φωτογραμμετρικά προϊόντα αναλογικής μορφής.....	38
2.2.5.2 Φωτογραμμετρικά προϊόντα ψηφιακής μορφής	40
2.3 Στοιχεία Φωτοερμηνείας.....	44
2.3.1 Φάσεις Φωτοερμηνείας.....	44
2.3.2 Φωτοερμηνευτικά χαρακτηριστικά	45
Βιβλιογραφία/Αναφορές	47
Κεφάλαιο 3 Δορυφόροι και αισθητήρες.....	49

3.1 Γενικά.....	49
3.2 Ιστορικό	49
3.3 Η κίνηση των δορυφόρων γύρω από τη γη.....	50
3.4 Παθητικοί και Ενεργητικοί Αισθητήρες	51
3.4.1 Παθητικοί Αισθητήρες.....	51
3.4.2 Ενεργητικοί Αισθητήρες	52
3.5 Οι Μετεωρολογικοί δορυφόροι	52
3.5.1 Γεωστατικοί Μετεωρολογικοί Δορυφόροι	52
3.5.2 Μετεωρολογικοί δορυφόροι πολικών τροχιών.....	53
3.5.3 Οι δορυφόροι ERS.....	56
3.5.4 Ο δορυφόρος Envisat.....	57
3.6 Το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα COPERNICUS.....	59
3.6.1 Οι δορυφόροι Sentinel	59
3.6.2 Ο δορυφόρος Sentinel-1.....	60
3.6.3 Ο δορυφόρος Sentinel-2.....	60
3.6.4 Ο δορυφόρος Sentinel-3.....	61
3.7 Δορυφόροι έρευνας κυρίως των φυσικών πόρων της γης.....	62
3.7.1 Οι δορυφόροι TERRA και AQUA.....	62
3.7.2 Οι δορυφόροι Landsat	65
3.7.3 Οι δορυφόροι SPOT	68
3.7.4 Οι δορυφόροι της Εταιρείας DigitalGlobe.....	72
3.7.4.1 Ο δορυφόρος IKONOS.....	72
3.7.4.2 Ο δορυφόρος WorldView3	75
3.7.4.3 Ο δορυφόρος Geoeye 1	76
3.7.4.4 Ο δορυφόρος Quickbird	77
3.7.5 Οι δορυφόροι Pleiades	80
3.8 Σημαντικοί ιστότοποι με καταλόγους δορυφόρων τηλεπισκόπησης και άλλων χρήσεων.....	81
Βιβλιογραφία/Αναφορές	81
Κεφάλαιο 4 Προεπεξεργασία δορυφορικών εικόνων.....	83
4.1 Χρωματικές συνθέσεις δορυφορικών εικόνων	83
4.2 Σφάλματα δορυφορικών εικόνων	87
4.2.1 Γενικά.....	87
4.2.2 Γεωμετρικά σφάλματα	87
4.2.3 Γενική μέθοδος διόρθωσης γεωμετρικών σφαλμάτων	89
4.2.3.1 Διάφορες περιπτώσεις	89
4.2.3.2 Μεθοδολογία γεωμετρικής διόρθωσης	90
4.3 Συστήματα Συντεταγμένων για τον Παγκόσμιο, τον Ευρωπαϊκό και τον Ελληνικό χώρο.....	91
4.3.1 Συστήματα Συντεταγμένων.....	91

4.3.2 Συστήματα συντεταγμένων στην Ελληνική Επικράτεια	93
4.3.2.1 Οι χαρτογραφικές προβολές στην Ελλάδα	93
4.3.2.1 Το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ87)	94
4.4 Παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης	95
4.4.1 NAVSTAR/G.P.S	95
4.4.2 Πρόγραμμα GALILEO.....	96
4.4.3 Εφαρμογές των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης	96
Βιβλιογραφία/Αναφορές	97
Κεφάλαιο 5 Ραδιομετρικές και ατμοσφαιρικές διορθώσεις	99
5.1 Ραδιομετρικά Σφάλματα	99
5.1.1 Εσωτερικά σφάλματα των αισθητήρων.....	100
5.1.1.1 Τυχαία χαλασμένα pixels (Shot Noise)	100
5.1.1.2 Αστοχία καταγραφής στην αρχή ή στο τέλος της εικόνας.....	101
5.1.1.3 Λωριδοποίηση (striping)	102
5.1.1.4 Βαθμιαία μείωση της φωτεινότητας («vignetting»).....	103
5.1.2 Εξωτερικά σφάλματα	104
5.1.2.1 Ατμοσφαιρικές Επιδράσεις	104
5.1.2.2 Θέση ήλιου και τοπογραφία	109
5.2 Ραδιομετρικές Διορθώσεις σφαλμάτων	110
5.2.1 Διορθώσεις σφαλμάτων αισθητήρων – Θέσης Δορυφόρου	111
5.2.1.1 Απόλυτη Βαθμονόμηση	111
5.2.1.2 Σχετική Ραδιομετρική Διόρθωση	114
5.2.2 Ατμοσφαιρικές Διορθώσεις.....	115
5.2.2.1 Απόλυτες Ατμοσφαιρικές Διορθώσεις	116
5.2.2.2 Σχετικές Ατμοσφαιρικές διορθώσεις	120
5.2.3 Τοπογραφικές Διορθώσεις	120
Βιβλιογραφία/Αναφορές	123
Κεφάλαιο 6 Ιστογράμματα δορυφορικών εικόνων	125
6.1 Γενικά.....	125
6.2 Παραδείγματα σχέσης ιστογράμματος εικόνας	126
6.3 Γραμμικός τανυσμός (διάταση- έκταση – εφελκυσμός) ιστογράμματος (Linear stretching).....	128
6.3.1 Τμηματικά γραμμικός τανυσμός	130
6.3.2 Λογαριθμικός και Εκθετικός τανυσμός	131
6.3.3 Με σημεία κορεσμού	132
6.4 Εξισορρόπηση - ισοστάθμιση ιστογράμματος (Histogram equalization)	133
6.5 Προσαρμογή - συμφωνία ιστογραμμάτων (Histogram matching).....	135
6.6 Τεμαχισμός ή κατάτμηση (density slicing) σε ομάδες συχνοτήτων του ιστογράμματος.....	136

Βιβλιογραφία/Αναφορές	137
Κεφάλαιο 7 Μετασχηματισμοί πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων	138
7.1 Εισαγωγή	138
7.1 Αριθμητικές πράξεις	138
7.2 Δείκτες	139
7.2.1 Οι δείκτες στην Τηλεπισκόπηση	139
7.2.2 Δείκτες Βλάστησης	140
7.2.2.1 Η φασματική συμπεριφορά της βλάστησης	140
7.2.2.2. Κατηγορίες δεικτών βλάστησης	141
7.3 Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες (Principal Component Analysis, PCA)	146
7.4 Ο μετασχηματισμός Kauth & Thomas (Tasseled Cap)	152
Βιβλιογραφία/Αναφορές	155
Κεφάλαιο 8 Φίλτρα.....	156
8.1 Γενικά.....	156
8.2 Τα φίλτρα «χαμηλής προσπέλασης»	158
8.2.1 Το φίλτρο της μέσης τιμής.....	158
8.2.2 Το φίλτρο της διαμέσου τιμής (median filter).....	160
8.2.3 Το φίλτρο του Gauss.....	162
8.2.4 Το φίλτρο της ελάχιστης (ραδιομετρικής) τιμής.....	164
8.2.5 Το φίλτρο της μέγιστης ραδιομετρικής τιμής	165
8.2.6 Το προσαρμοσμένο φίλτρο – πλαίσιο (Adaptive box)	166
8.2.7 Το φίλτρο της μέγιστης συχνότητας (mode filter)	167
8.3 Τα φίλτρα «υψηλής προσπέλασης»	168
8.3.1 Το φίλτρο Laplace.....	169
8.3.2 Το φίλτρο υψηλής προσπέλασης αντίστοιχο της μέσης τιμής	170
8.3.3 Τα φίλτρα του διανύσματος κλίσης (Roberts και Sobel)	171
8.3.4 Τα φίλτρα ανίχνευσης των ακμών και των γραμμών.....	173
8.4 Το αρνητικό φίλτρο	174
Βιβλιογραφία/Αναφορές	174
Κεφάλαιο 9 Σύμπτυξη εικόνων.....	176
9.1 Βασικές Έννοιες	176
9.2 Πλεονεκτήματα σύμπτυξης εικόνων	178
9.3 Τεχνικές σύμπτυξης εικόνων.....	180
9.3.1 Βασικές τεχνικές σύμπτυξης	181
9.3.2 Μέθοδοι Αξιολόγησης της σύμπτυξης	185
9.4 Εφαρμογές των εικόνων σύμπτυξης.....	186

Βιβλιογραφία/Αναφορές	190
Κεφάλαιο 10 Φασματικές υπογραφές	192
10.1 Εισαγωγή	192
10.2 Προσδιορισμός των φασματικών υπογραφών. Αριθμητικά παραδείγματα.....	193
10.3 Φασματικές υπογραφές των βασικών καλύψεων γης.....	195
10.3.1 Η βλάστηση	195
10.3.2 Το νερό	196
10.3.3 Το έδαφος	196
Βιβλιογραφία/Αναφορές	197
Κεφάλαιο 11 Ταξινομήσεις	198
11.1 Εισαγωγή	198
11.2 Μη επιβλεπόμενες ταξινομήσεις	199
11.2.1 Η μέθοδος των μέγιστων συχνοτήτων των ιστογραμμάτων (Histogram peaks)	199
11.2.2 Μέθοδοι των κ-μέσων (K-MEANS cluster) και ισο-δεδομένων (ISODATA).....	200
11.3. Επιβλεπόμενες ταξινομήσεις	201
11.3.1 Η ταξινόμηση της ελάχιστης ραδιομετρικής απόστασης από την μέση (ραδιομετρική) τιμή των ομάδων (Minimum distance to means).....	201
11.3.2 Η ταξινόμηση των παραλληλεπιπέδων	203
11.3.3 Η ταξινόμηση της μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood)	204
11.3.1 Η μέγιστη πιθανοφάνεια βασισμένη στο θεώρημα του TOY BAYES.....	205
11.4. Γενική απογραφή των κατηγοριών των ταξινομήσεων (Lu & Weng, 2007)	210
Βιβλιογραφία/Αναφορές	211
Κεφάλαιο 12 Δειγματοληψία και αποτίμηση ακρίβειας	212
12.1 Δειγματοληψία και αξιοπιστία.....	212
12.2 Ακρίβεια των ταξινομήσεων	213
12.2.1 Ομογένεια - ακρίβεια δειγματοληπτικών περιοχών	213
12.2.2 Ακρίβεια ταξινόμησης ως προς την πραγματικότητα.....	214
Βιβλιογραφία/Αναφορές	215
Κεφάλαιο 13 Εφαρμογές	216
13.1 Εφαρμογή 1η: Σύγκριση δύο μεθόδων ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων: Μελέτη περίπτωσης στην περιοχή των Φαρσάλων.....	216
13.1.1 Εισαγωγή	216
13.1.2 Εφαρμογή των δύο μεθόδων ταξινόμησης.....	217
13.1.3 Συμπεράσματα	219
13.2 Εφαρμογή 2η: Διαχρονικές αλλαγές της αστικής διάχυσης της Αττικής με Τηλεπισκόπηση	220
13.2.1 Εισαγωγή	220
13.2.2 Δεδομένα και μέθοδοι	220

13.2.3 Συμπεράσματα	223
13.3 Εφαρμογή 3η: Χρήση Μη Επανδρωμένων Πτητικών Μέσων για χαρτογράφηση πόρων	224
13.3.1 Εισαγωγή	224
13.3.2 Εφαρμογή χαρτογράφησης πολιτιστικής & φυσικής κληρονομιάς με χρήση UAV.....	225
13.3.2.1 Μεθοδολογία Χαρτογράφησης	226
13.3.2.2 Αποτελέσματα	228
13.3.2.3 Συμπεράσματα	230
Βιβλιογραφία/Αναφορές	231

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνύμια

ΑΚΣ	Ανάλυση σε Κύριες Συνιστώσες
Α/Φ	Αεροφωτογραφία
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ΓΥΣ	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού
ΕΓΣΑ 87	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987
ΕΡΤ	Ελάχιστη Ραδιομετρική Τιμή
ΗΜΑ	Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία
ΗΜΦ	Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα
ΚΡΤ	Καινούργια Ραδιομετρική Τιμή
ΜΡΤ	Μέγιστη Ραδιομετρική Τιμή
ΤΡΤ	Τρέχουσα Ραδιομετρική Τιμή
ΧΔΙ	Χωρική Διακριτική Ικανότητα
AMI	Active Microwave
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ASTR	Along Track Scanning Radiometer
ATS	Applications Technology Satellite
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BRDF	Bi-directional Reflectance Distribution Function
CRSS	Commercial Remote Sensing System
DEM	Digital Elevation Model
DSM	Digital Surface Model
ERTS.A	Earth Resources Technology Satellite
ESA	European Space Agency
EVI	Enhance Vegetation Index
FCC	Federal Communications Commission
FIR	Far Infrared
GCP	Ground Control Point
GLONASS	GLOBAL NAVIGATION Satellite Systems
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
GPS	Global Positioning System
GSFC	Goddard Space Flight Center
HCMM	Heat Capacity Mapping Mission
HiRI	High Resolution Optical Imager
HRV	Haute Resolution Visible
HSV	Hue, Saturation, Value

IHS	Intensity, Hue, Saturation
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
LWIR	Long Wavelength Infrared
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding
MISR	Multi-angle Imaging Spectro Radiometer
MLP	Multi-Layer Perceptron
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOPITT	Measurement of Pollution In The Troposphere
MSAVI2	Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2
MSS	Multispectral Scanner
MWIR	Mid Wavelength Infrared
MWR	Microwave Radiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	Navigation System with Time and Ranging
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OLCI	Ocean and Land Colour Instrument
ORFEO	Optical & Radar Federated Earth Observation
OSA	Optical Sensor Assembly
PCA	Principal Components Analysis
PIXEL	Picture Element
PVI	Perpendicular Vegetation Index
RA	Radio Altimeter
RATIO	Ratio Vegetation Index
RBV	Return Beam Vidicon
RDI	Ratio Drought Index
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SIR-A	Shuttle Imaging Radar - A
SLAVI	Specific leaf area vegetation index
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer
SNR	Signal to Noise Ratio
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre
SRAL	SAR Altimeter
SWIR	Short Wavelength Infrared
TCT	Tasseled Cap Transform
TIN	Triangular Irregular Network

TM	Thematic Mapper
TOA	Top of Atmosphere
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UTM	Universal Transverse Mercator
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index

Ευρετήριο επιστημονικών όρων

Accuracy Assessment	Αποτίμηση της Ακρίβειας (των Ταξινομήσεων)
Bilinear Interpolation	Διγραμμική Παρεμβολή
Bit	Δυαδικό ψηφίο
Byte	Ψηφιακή λέξη
Cluster Classification	Ταξινόμηση κατά Συστάδες
Color Composites	Χρωματικές Συνθέσεις
Crossclassification Table	Πίνακας διασταυρούμενων Ταξινομήσεων
Cubic Convolution	Κυβική Συνέλιξη
Density Slicing	Τεμαχισμός της (Συνάρτησης) Πυκνότητας (του Ιστογράμματος)
Digital Elevation Model	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους
Error Matrix	Πίνακας Σφαλμάτων
European Space Agency	Ευρωπαϊκή Επιτροπή Διαστήματος
Exponential Stretching	Εκθετικός Τανυσμός
Fuzzy Classification	Ασαφής Ταξινόμηση
GLOBAL NAVIGATION Satellite Systems	Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης
Global Positioning System	Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης
Ground Control Point	Σημεία Ελέγχου στο Έδαφος
High Pass Filter	Φίλτρο Υψηλής Προσπέλασης
Histogram Equalization	Εξισορρόπηση Ιστογράμματος
Histogram Matching	Συντάυτιση Ιστογραμμάτων
Histogram Peaks Classification	Ταξινόμηση (βάσει) των Μέγιστων (Συχνοτήτων) του Ιστογράμματος
Hybrid Classification	Υβριδική Ταξινόμηση
Image Fusion	Σύμπτυξη Εικόνων
Isodata Classification	Ταξινόμηση των Ισο-δεδομένων
Linear Stretching	Γραμμικός Τανυσμός
Low Pass Filter	Φίλτρο Χαμηλής Προσπέλασης
Maximum Likelihood Classification	Ταξινόμηση της Μέγιστης Πιθανοφάνειας
Mean Filter	Φίλτρο της Μέσης Τιμής
Median Filter	Φίλτρο της Διαμέσου
Minimum Distance to Means Classification	Ταξινόμηση της Ελάχιστης Απόστασης από την Μέση Ραδιομετρική (τιμή των ομάδων)
Mode Filter	Φίλτρο της Μέγιστης Συχνότητας
Multispectral Band	Πολυφασματική Ζώνη
Multispectral Scanner	Πολυφασματικός Σαρωτής
Nearest Neighbor	Πλησιέστερος Γείτονας (μέθοδος)
Neural Network Classification	Ταξινόμηση με Νευρωνικά Δίκτυα
Normalized Differences Vegetation Index	Δείκτης Βλάστησης Τυπικών (Κανονικοποιημένων) Διαφορών
Parallelepiped Classification	Ταξινόμηση των Παραλληλεπιπέδων
Photointerpretation	Φωτοερμηνεία
Principal Component Analysis	Ανάλυση σε Κύριες Συνιστώσες
Radiometric value	Ραδιομετρική Τιμή
Random Sampling	Τυχαία Δειγματοληψία
Remote Sensing	Τηλεπισκόπηση ή Τηλεανίχνευση, ή Τηλεδιερεύνηση
Resolution	Διακριτική Ικανότητα (Χωρική,

(Spatial, Spectral, Radiometric, Temporal)	Φασματική, Ραδιομετρική, Χρονική)
Saturation Points	Σημεία Κορεσμού
Sensor	Αισθητήρας
Spectral Band	Φασματικό Κανάλι (ή Δίαυλος ή Ζώνη)
Spectral Signature	Φασματική Υπογραφή
Stratified Sampling	Στρωματοποιημένη Δειγματοληψία
Thematic Mapper	Θεματικός Χαρτογράφος
Training sites	Περιοχές Εκπαίδευσης
Universal Transverse Mercator	Παγκόσμιο Εγκάρσιο Μερκατορικό Σύστημα (Αναφοράς)

Πρόλογος

Πολλά και ποικίλα βιβλία τηλεπισκόπησης περιέχονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Η ελληνική αντίστοιχα βιβλιογραφία, περιέχει αρκετά αξιόλογα βιβλία τηλεπισκόπησης, γραμμένα υπό διαφορετική οπτική γωνία. Ωστόσο, μέχρι σήμερα, δεν υπήρξε κάποιο ελληνικό βιβλίο το οποίο να είναι προσαρμοσμένο σε κάποιο διδακτικό εξάμηνο της τριτοβάθμιας εκπαίδευσης Σχολών ή Τμημάτων, που περικλείουν στο Πρόγραμμα Σπουδών τους την τηλεπισκόπηση.

Για τον λόγο αυτόν, το σύγγραμμα «Η Τηλεπισκόπηση σε 13 Ενότητες, θεωρία, μέθοδοι και εφαρμογές», δεν φιλοδοξεί να πάρει κυρίαρχη θέση στη βιβλιογραφία, αλλά να συμπληρώσει το κενό ενός συστηματικού διδακτικού βοηθήματος της τριτοβάθμιας εκπαίδευσης.

Οι συγγραφείς εκφράζουν τις ευχαριστίες τους, σε όλους τους συναδέλφους και φίλους που συνέβαλλαν ποικιλοτρόπως στην έκδοση του ηλεκτρονικού αυτού συγγράμματος και ιδιαιτέρως στους από χρόνια δασκάλους τους, που τους παρείχαν τις απαραίτητες και πολύτιμες γνώσεις για τη συγγραφή του.

Τέλος, εκφράζουν την ευγνωμοσύνη και την αγάπη τους στις οικογένειες τους, για την αμέριστη συμπαράσταση κατά τη διάρκεια της συγγραφής του βιβλίου.

Εισαγωγή

Η τηλεπισκόπηση είναι μία επιστήμη, ή καλύτερα ένα σύνολο θεωρητικών – τεχνικών και εφαρμοσμένων μεθόδων με κύριο σκοπό την ανάλυση της επιφάνειας της γης. Πολλές και διαφορετικές επιστήμες συνετέλεσαν στη δημιουργία της. Ωστόσο, θα έλεγε κανείς ότι μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: το θεματικό και το μεθοδολογικό.

Η θεματική πλευρά της τηλεπισκόπησης απασχολεί και ενδιαφέρει ένα μεγάλο τμήμα θετικών επιστημών όπως την τοπογραφία, τη γεωπονία, τη γεωλογία, τη χωροταξία, την πολεοδομία, τη μετεωρολογία, την ωκεανογραφία, την αρχαιολογία, τη συγκοινωνιολογία, τις περιβαλλοντικές επιστήμες ακόμη και τις στρατιωτικές εφαρμογές.

Η μεθοδολογική πλευρά περιλαμβάνει επιστήμες όπως η τοπογραφία, τα μαθηματικά, η φυσική και η πληροφορική. Εν κατακλείδι, δεν θα μπορούσε να υπάρξει τηλεπισκόπηση, εάν δεν υπήρχε αλληλεπίδραση των δύο αυτών μερών. Όντας λοιπόν μία πολύ-τομεακή ειδικότητα δεν θα είχε λόγο ύπαρξης εάν δεν υπήρχε η συνεργασία επιστημόνων των περισσοτέρων από τις παραπάνω ειδικότητες.

Στο παρόν ψηφιακό σύγγραμμα έγινε προσπάθεια να συμπεριληφθούν οι απαραίτητες γνώσεις τόσο από τις βασικές μεθοδολογικές επιστήμες που συνεισφέρουν στο τεχνικό υπόβαθρο της τηλεπισκόπησης, όσο και από κάποιες θεματικές επιστήμες υπό τύπον εφαρμογών και παραδειγμάτων.

Τοιουτοτρόπως, τα κεφάλαια έχοντας πάντα ως βασικό γνώμονα το διδακτικό στόχο, περιέχουν γνώσεις τόσο φυσικών όσο και εφαρμοσμένων επιστημών.

Πιο αναλυτικά:

Στο πρώτο κεφάλαιο, οι συγγραφείς θεωρώντας απαραίτητο ένα υπόβαθρο γνώσεων τόσο σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία όσο και με τη δομή, τη σύσταση και τη διακριτική ικανότητα των δορυφορικών εικόνων, εκθέτουν αναλυτικά τον τρόπο που συνδέονται μεταξύ τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνονται οι βασικές αρχές και μέθοδοι της φωτογραμμετρίας – φωτοερμηνείας. Αρχικά αναλύονται οι αρχές της αεροφωτογραφίας ενώ στη συνέχεια περιγράφονται οι θεμελιώδεις φωτογραμμετρικοί προσδιορισμοί καθώς και οι τύποι φωτογραμμετρικών προϊόντων σε αναλογική και ψηφιακή μορφή. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου περιγράφονται οι φάσεις της φωτοερμηνευτικής διαδικασίας και γίνεται ανάλυση στα φωτοερμηνευτικά χαρακτηριστικά. Το κεφάλαιο αυτό στοχεύει στην παροχή θεμελιωδών γνώσεων για τη διαχείριση γεωχωρικών δεδομένων και την ανάλυσή τους με τη χρήση γεωχωρικών επιστημών, όπως τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.

Σήμερα, μία πλειάδα δορυφόρων τηλεπισκόπησης καταγράφει τη γήινη επιφάνεια. Επιλεκτικά και με στόχο τη σημαντικότερη εκπροσώπηση από αυτούς, χωρίστηκε το τρίτο κεφάλαιο σε κατηγορίες δορυφόρων, κυρίως ανάλογα με τη χωρική διακριτική τους ικανότητα. Έγινε προσπάθεια να παρατεθούν τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε δορυφόρου, ώστε ο αναγνώστης να δημιουργήσει μία εικόνα απαραίτητη για τις ανάγκες χρήσης.

Η ασυνήθης συνένωση των χρωματικών συνθέσεων και των γεωμετρικών σφαλμάτων και διορθώσεων στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε σκόπιμα. Οι συγγραφείς θεωρούν ότι αυτά τα δύο τμήματα είναι αναπόσπαστα συνδεδεμένα με την προεπεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων και διαχωρίζονται σαφώς από τα σφάλματα υψής των δορυφορικών εικόνων, που είναι τα ραδιομετρικά.

Ως λογική συνέχεια του προηγούμενου κεφαλαίου, ακολουθεί το πέμπτο κεφάλαιο, το οποίο εκθέτει λεπτομερώς τα είδη των ραδιομετρικών σφαλμάτων και τις κατηγορίες τους. Έτσι, χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, στα εσωτερικά και τα εξωτερικά σφάλματα. Εσωτερικά είναι κυρίως αυτά που προέρχονται από τα όργανα καταγραφής, ενώ εξωτερικά θεωρούνται εκείνα τα σφάλματα που δημιουργούνται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η ατμόσφαιρα, το υψόμετρο, κ.ά.

Πάντα στο πλαίσιο της προεπεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων, το έκτο κεφάλαιο συνδέει την ποσοτική κατανομή των ραδιομετρικών τιμών των δορυφορικών εικόνων με την οπτική εμφάνιση των φασματικών καναλιών, παρουσιάζοντας τα ιστογράμματα. Παρατίθενται χαρακτηριστικά παραδείγματα ιστογραμμάτων ανάλογα με τις καλύψεις γης της εικόνας, με σκοπό την εξοικείωση του αναγνώστη με την ποσοτική πληροφορία της εικόνας. Τέλος, παρατίθενται ειδικά παραδείγματα της χρωματικής ενίσχυσης με τον τανυσμό του ιστογράμματος της εικόνας ή του διαχωρισμού των pixels της εικόνας σε ομάδες, με τον τεμαχισμό του ιστογράμματος της.

Περνώντας στο στάδιο μετασχηματισμών των δορυφορικών εικόνων, το έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζει κάποιους δείκτες βλάστησης, καθώς και τον μετασχηματισμό Kauth-Thomas που χαρακτηρίζει

επίσης τη βλάστηση και κλείνει με την αναλυτική παρουσίαση ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου μετασχηματισμού στην τηλεπισκόπηση, που είναι η ανάλυση σε κύριες συνιστώσες, η οποία χαρακτηρίζεται κυρίως για τη συμπίεση του μεγάλου όγκου των δορυφορικών δεδομένων.

Ιδιαίτερη σχέση με τις ραδιομετρικές διορθώσεις έχουν και τα φίλτρα που εκτίθενται στο όγδοο κεφάλαιο. Κατηγοριοποιούνται σε δύο μεγάλες κλάσεις σύμφωνα με την επίδραση που έχουν στα δορυφορικά φασματικά κανάλια. Η πρώτη κατηγορία χαρακτηρίζεται από φίλτρα που μειώνουν τόσο τον θόρυβο όσο και την οπτική όξυνση της εικόνας και περιλαμβάνει τα φίλτρα χαμηλής προσπέλασης, ενώ η δεύτερη χαρακτηρίζεται από εκείνα που οξύνουν τις οπτικές αντιθέσεις εικόνων με χαμηλή οπτική δυναμική και αναφέρεται στα φίλτρα υψηλής προσπέλασης. Εικόνες που προήλθαν από την εφαρμογή διαφόρων από τα παραπάνω φίλτρα παρουσιάζονται σε κάθε τμήμα του κεφαλαίου αυτού με σκοπό την ευκολότερη αντίληψη της επίδρασης των φίλτρων από τον αναγνώστη.

Η ποικιλομορφία των δορυφόρων ως προς όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους αλλά κυρίως ως τη χωρική διακριτική ικανότητα, οδήγησε στην παροχή εικόνων διαφορετικής ευκρίνειας. Η ανάγκη συγκερασμού εικόνων με διαφορετικό μέγεθος pixel δημιούργησε τεχνικές σύμπτυξης των εικόνων μεταξύ τους η οποίες και παρουσιάζονται στο ένατο κεφάλαιο. Μ' αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης εκμεταλλεύεται την πολυφασματικότητα εικόνων μέσης χωρικής διακριτικής ικανότητας, σε συνδυασμό με εικόνες υψηλότερης χωρικής διακριτικής ικανότητας, στην έρευνα των διαχρονικών αλλαγών των καλύψεων γης και άλλων θεμάτων.

Έχοντας ολοκληρώσει τη μονοφασματική επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων, στο δέκατο κεφάλαιο υπολογίζονται δειγματοληπτικά οι μέσοι όροι των ραδιομετρικών τιμών των φασματικών καναλιών, για κάθε κάλυψη γης και συνθέτουν χαρακτηριστικές καμπύλες οι οποίες ονομάζονται φασματικές υπογραφές και περιγράφονται στο κεφάλαιο αυτό. Οι φασματικές υπογραφές των τριών κυριότερων καλύψεων γης, ήτοι του νερού, του εδάφους και της βλάστησης παρουσιάζονται αναλυτικότερα.

Το ενδέκατο κεφάλαιο, ίσως από τα πιο σημαντικά του βιβλίου αυτού, παρουσιάζει την έννοια των ταξινομήσεων και αφού τις διαχωρίσει σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την προσβασιμότητα, την ύπαρξη βοηθητικών υποβάθρων της περιοχής μελέτης και τη δυνατότητα παρέμβασης του χρήστη, εκθέτει τις βασικότερες από αυτές. Έτσι, στην κατηγορία των μη επιβλεπόμενων ταξινομήσεων παρουσιάζονται η ταξινόμηση κατά συστάδες και η ταξινόμηση των ισο-δεδομένων. Αντίθετα, στην κατηγορία των πιο «αξιόπιστων ταξινομήσεων» δηλαδή των επιβλεπόμενων, παρουσιάζονται η μέθοδος της ελάχιστης ραδιομετρικής απόστασης από τον μέσο όρο των ομάδων, των παραλληλεπιπέδων και της μέγιστης πιθανοφάνειας. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται μία σύνοψη των διαφόρων κατηγοριών των ταξινομήσεων με διάφορα κριτήρια.

Σημαντικό γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των ταξινομήσεων είναι η εκτίμηση της ακρίβειάς τους, που παρουσιάζεται στο δωδέκατο κεφάλαιο υπό τύπον εφαρμογών. Οι δειγματοληψίες στην τηλεπισκόπηση παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο που συντελεί στην ακρίβεια των ταξινομήσεων. Μία γενική παράθεση του ρόλου του μεγέθους του δείγματος και της χωρικής διακριτικής ικανότητας, δείχνει το μέγεθος της απόκλισης από τα ακριβή αποτελέσματα.

Στο δέκατο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται επιλεκτικά τρεις πρόσφατες και αντιπροσωπευτικές εφαρμογές. Η πρώτη αφορά τη σύγκριση δύο από τις πιο αποτελεσματικές και χρησιμοποιούμενες μεθόδους ταξινόμησης, δηλαδή την ταξινόμηση της μέγιστης πιθανοφάνειας και την ταξινόμηση με τη χρήση νευρωνικών δικτύων και καταδεικνύει την υπεροχή της δεύτερης. Η επόμενη εφαρμογή επικεντρώνεται στο επίκαιρο θέμα της αστικής εξάπλωσης με εφαρμογή στην Αττική και η τρίτη εκθέτει αρκετά λεπτομερώς τη χρήση των μη επανδρωμένων πτητικών μέσων για την καταγραφή της γήινης επιφάνειας παραθέτοντας αναλυτικά μία μελέτη περίπτωσης.

Κεφάλαιο 1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και Τηλεπισκόπηση

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης

Σύνοψη

Αρχικά εξηγείται πώς γίνεται η αποτύπωση αντικειμένων της επιφάνειας της γης χάρις στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος τα οποία στη συνέχεια κατηγοριοποιούνται και παρουσιάζονται σχηματικά σε όλα τα μήκη ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στη συνέχεια αναλύεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα και παρατίθενται οι μονάδες μήκους χρήσιμες για την κατηγοριοποίηση των μικροκυμάτων. Στη συνέχεια αφού δοθεί μία περιληπτική περιγραφή των οργάνων που απεικονίζουν την επιφάνεια της γης με την βοήθεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, παρουσιάζεται και εξηγείται η δομή μιας πολυφασματικής εικόνας και τέλος αναλύονται οι τέσσερις ιδιότητες –που χαρακτηρίζουν την ποιότητα των δορυφορικών εικόνων- της διακριτικής ικανότητας (των αισθητήρων) ενός δορυφόρου.

1.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Φωτοερμηνεία είναι ο οπτικός προσδιορισμός της ταυτότητας των αντικειμένων στην επιφάνεια της γης, καθώς και η ανάλυση και κρίση της σημασίας τους από αεροφωτογραφίες.

Η αποτύπωση για τον προσδιορισμό των αντικειμένων γίνεται με την βοήθεια ειδικών οργάνων, των τηλε-απεικονιστών (στους οποίους περιέχεται και η φωτογραφική μηχανή-camera) οι οποίοι χρειάζονται να απορροφήσουν κάποια ενέργεια για να παράγουν εικόνες.

Η κυριότερη πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος και η ενέργεια που δίνει είναι γνωστή σαν ηλεκτρομαγνητική. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια απεικονίζεται αναλόγως του μήκους κύματος που έχει σε κάποιο φάσμα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται σε κάποιο μέσο (ατμόσφαιρα, νερό, υλικά σώματα) λόγω της περιοδικής διαταραχής του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου συγχρόνως, με την ταχύτητα του φωτός που είναι $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s, και χαρακτηρίζονται από την συχνότητα και το μήκος κύματός τους, το γινόμενο των οποίων δίνει την ταχύτητα του φωτός.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιέχει ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών μηκών κύματος, εκ των οποίων μόνον ένα μικρό εύρος μηκών κυμάτων καταλαμβάνει το ορατό (μεταξύ 400 και 700nm).

Έχει κατηγοριοποιηθεί σε:

- Ράδιο-κύματα που έχουν μήκος κύματος από 10cm έως 10km.
- Μικροκύματα που έχουν μήκος κύματος από 1mm έως 1m.

Τα μικροκύματα διαιρούνται επίσης στις εξής 8 φασματικές ζώνες (1 GHz = 10⁹ Hz)

- P ζώνη: 0.3 - 1GHz (30 - 100cm).
- L ζώνη: 1 - 2GHz (15 - 30cm).
- S ζώνη: 2 - 4GHz (7.5 - 15cm).
- C ζώνη: 4 - 8GHz (3.8 - 7.5cm).
- X ζώνη 8 - 12.5GHz (2.4 - 3.8cm).
- Ku ζώνη: 12.5 - 18GHz (1.7 - 2.4cm).
- K ζώνη: 18 - 26.5GHz (1.1 - 1.7cm).
- Ka ζώνη: 26.5 - 40GHz (0.75 - 1.1cm).

Υπέρυθρα μικροκύματα που έχουν μήκος κύματος από 0.7 έως 300 μm και διαιρούνται στις ακόλουθες 5 κατηγορίες:

- Εγγύς υπέρυθρα μήκη κύματος (Near Infrared, NIR): από 0.7 έως 1.5μm.
- Υπέρυθρα μικρά μήκη κύματος (Short Wavelength Infrared, SWIR): από 1.5 έως 3μm.
- Υπέρυθρα μεσαία μήκη κύματος (Mid Wavelength Infrared, MWIR): από 3 έως 8μm.

- Υπέρυθρα μεγάλα μήκη κύματος (Long Wavelength Infrared, LWIR): από 8 έως 15 μm .
- Υπέρυθρα απομακρυσμένα μήκη κύματος (Far Infrared, FIR): με μεγαλύτερο μήκος κύματος από 15 μm .

The NIR and SWIR είναι γνωστά ως Ανακλώμενα υπέρυθρα (Reflected Infrared), ενώ τα MWIR and LWIR είναι γνωστά ως θερμικά υπέρυθρα (Thermal Infrared).

Τέλος τα ορατά μήκη κύματος κυμαίνονται από 400 nm (απόχρωση του μωβ) έως περίπου 700nm (απόχρωση του κόκκινου) και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το χρώμα στο οποίο αντιστοιχούν στις παρακάτω 6 φασματικές ζώνες.

- Ζώνη του κόκκινου : 610 - 700nm.
- Ζώνη του πορτοκαλί: 590 - 610nm.
- Ζώνη του κίτρινου: 570 - 590nm.
- Ζώνη του πράσινου: 500 - 570nm.
- Ζώνη του μπλε: 450 - 500nm.
- Ζώνη απόχρωσης του μπλε (indigo): 430 - 450nm.
- Ζώνη του βιολετί: 400 - 430nm.

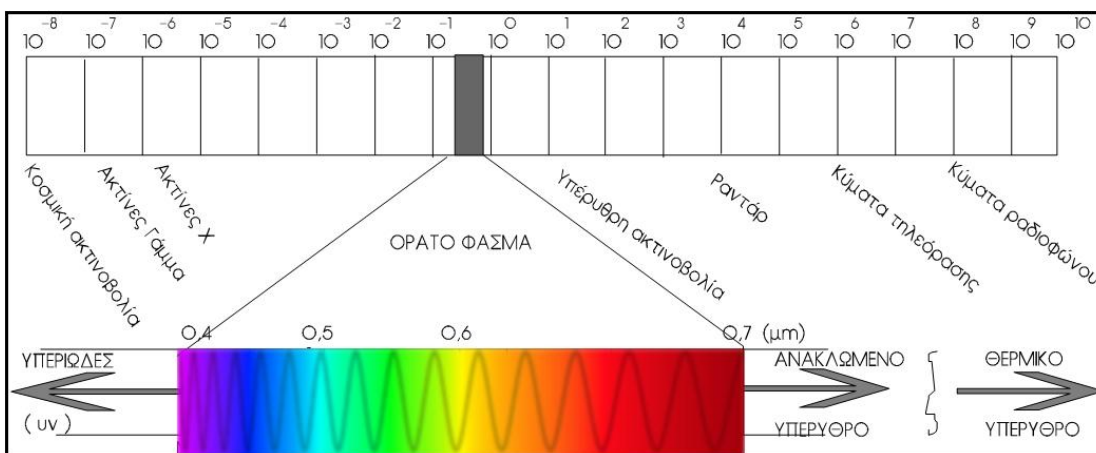
Τέλος οι φασματικές ζώνες με τα μικρότερα μήκη κύματος είναι:

- Ζώνη του υπεριώδους : από 3 έως 400nm.
- Ζώνες των ακτίνων X και των ακτίνων Γάμμα (Gamma Rays).

Το κομμάτι εκείνο του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που είναι ορατό από το ανθρώπινο μάτι και δυνατό να καταγραφεί από τους τηλε-απεικονιστές λέγεται ορατό φάσμα. Εκτός από το οπτικό φάσμα, είναι γνωστές και διάφορες άλλες περιοχές των μηκών κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος κυρίως από τις διάφορες χρήσεις τους.

Μία πιο γενική σχηματική κλίμακα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος γενικά και ειδικότερα του ορατού παρουσιάζεται στην εικόνα 1.

Σημειώτέο ότι το μήκος κύματος μετριέται από μια κορυφή ενός κύματος έως την επόμενη και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα λ .



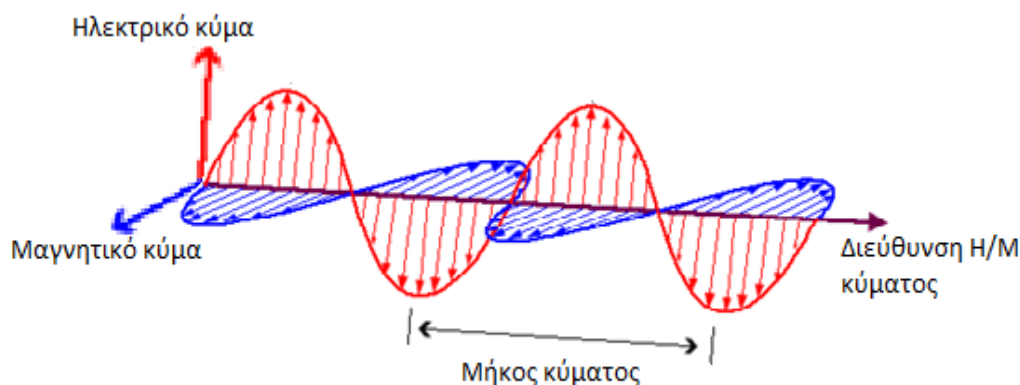
Εικόνα 1.1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

1.2 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσπίπτει σε μία επιφάνεια (στην περίπτωση μας στην επιφάνεια της γης) υπάρχει περίπτωση ένα μέρος της να ανακλαστεί, ένα άλλο να διαχυθεί και ένα άλλο να απορροφηθεί και να μεταδοθεί στη συνέχεια σ' ένα άλλο μέσο (περίπτωση του νερού).

Επειδή η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ανιχνεύεται μόνον κατόπιν αντίδρασής της με οποιοδήποτε υλικό σώμα, οι τηλε-απεικονιστές δέχονται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια η οποία δεν προέρχεται κατευθείαν από την πηγή της (ήλιος), αλλά κατόπιν ανάκλασης, διάχυσης και μετάδοσης κατόπιν απορρόφησης της σε άλλα υλικά μέσα (σύννεφα, καθαρή ατμόσφαιρα, επιφάνεια ξηράς, επιφάνεια νερού κ.ά.).

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μέσω του οποίου μεταδίδεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δημιουργείται από την σύνθεση δύο διαφορετικών κυμάτων τα οποία βρίσκονται σε δύο επίπεδα κάθετα μεταξύ τους: του ηλεκτρικού και του μαγνητικού κύματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Εικόνα 1.2 Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Η διέγερση φορτισμένων σωματιδίων (ατόμων) προκαλεί την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από όλα τα υλικά σώματα (CRISP 2015). Η κυρίως πηγή μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στη γη είναι ο ήλιος αλλά υπάρχουν και πάρα πολλές τεχνητές πηγές ακτινοβολίας όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι παλιού τύπου τηλεοράσεις, οι φούρνοι μικροκυμάτων ακόμη και οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες, κ.ά. Ωστόσο τα διάφορα υλικά σώματα εκτός από το να ακτινοβολούν, μπορούν και να μεταφέρουν, να απορροφούν ή να ανακλούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προέρχεται από τον ήλιο ξεκινά από τις γάμα (γ) και χ (X) ακτίνες με μήκη κύματος περίπου της τάξης των εκατοστών του μικρόμετρου και αφού περιλαμβάνει και το ορατό μήκος κύματος (που αντιλαμβανόμαστε εμείς οι άνθρωποι χωρίς την χρήση ειδικών οργάνων μέτρησης) φθάνει στα αριστερά του ορατού φάσματος στα μήκη κύματος που λειτουργούν το ραδιόφωνο και η τηλεόραση τα οποία έχουν περίπου ως μήκος κύματος μερικά χιλιόμετρα.

Οι χρησιμοποιούμενες παράγωγες μονάδες του μέτρου είναι οι:

- pm πικόμετρο = 10^{-12}m
- Α άγκστρομ = 10^{-10}m
- nm νανόμετρο = 10^{-9}m
- μm μικρόμετρο = 10^{-6}m
- mm χιλιοστόμετρο = 10^{-3}m
- cm εκατοστόμετρο = 10^{-2}m
- dm δεκατόμετρο = 10^{-1}m
- km χιλιόμετρο = 10^3m

1.3 Απεικονιστική φασματομετρία και Τηλεπισκόπηση

Από την ανακάλυψη του Νεύτωνα το 1664 για την σύνθετη υπόσταση του φωτός μέχρι σήμερα αλλά και από την μέχρι σήμερα έρευνα σε όλο το φάσμα της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας που έδειξε ότι κάθε σώμα (οργανικό ή ανόργανο) αντιδρά με σαφώς διαφορετικό τρόπο στα διάφορα μήκη κύματος οδήγησε και στην ραγδαία ανάπτυξη της τηλεπισκόπησης και συναφών επιστημών που ασχολούνται με την καταγραφή και ανάλυση της γήινης επιφάνειας.

Η απεικονιστική φασματομετρία είναι μια σχετικά καινούργια τεχνική που βασίζεται στις μετρήσεις με φασματόμετρα σε σχετικά συνεχείς και κοντινές περιοχές του Η/Μ φάσματος. Οι μετρήσεις αυτές για κάθε εικονοστοιχείο, που αντιπροσωπεύει μία ορισμένη έκταση της επιφάνειας της γης, στον τομέα της Τηλεπισκόπησης αντιστοιχούν σε διάφορα μήκη κύματος. Τα διάφορα εικονοστοιχεία, τοποθετημένα με χωρική συνέχεια, που αντιστοιχούν στην ευρύτερη περιοχή σάρωσης και που καταγράφονται στο ίδιο μήκος κύματος δημιουργούν με αυτόν τον τρόπο μια φασματική «μπάντα» (ή φασματικό κανάλι) που με την σειρά του είναι το ένα από τα πολλά φασματικά κανάλια που συνθέτουν μία δορυφορική εικόνα.

Τα φασματόμετρα χρησιμοποιούνται και στα εργαστήρια και σε μετρήσεις πεδίου και σε αερομεταφερόμενες πλατφόρμες όπως αεροπλάνα και δορυφόροι. Ουσιαστικά καταγράφουν την ανάκλαση της μοριακής δομής των αντικειμένων στην επιφάνεια της γης λόγω της προσπίπτουσας Η/Μ ακτινοβολίας και των φωτονίων της. Τα φασματόμετρα αυτά έχουν το πλεονέκτημα ότι αντιδρούν και στην κρυσταλλική και στην άμορφη δομή των υλικών σωμάτων σε αντίθεση από άλλα όργανα που μετρούν σε άλλα μήκη κύματος όπως στις ακτίνες Χ.

Η υπερ-φασματική Τηλεπισκόπηση αναφέρεται σε δορυφορικές εικόνες με πολλά φασματικά κανάλια (περισσότερα από 15). Η ουλτρα-φασματική Τηλεπισκόπηση αν και σήμερα αποτελεί ένα μελλοντικό σχέδιο θα αναφέρεται σε δορυφορικές εικόνες που θα αποτελούνται από εκατοντάδες φασματικά κανάλια (CSIRO 2015).

1.4 Δομή πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων

Εάν φανταστούμε ότι φωτογραφίζουμε μία περιοχή αλλά από πολλές διαφορετικές γωνίες φωτισμού και ίσως σε διαφορετικές στιγμές της ημέρας τότε τα αντικείμενα που περιέχονται στην εικόνα που θα προκύψει, θα φωτίζονται με διαφορετική ένταση για κάθε φωτογραφία που θα δημιουργηθεί. Δηλαδή περιοχές της εικόνας που εμφανίζονται σκοτεινές στην μία φωτογραφία θα εμφανίζονταν φωτεινές σε μία άλλη, που όμως θα απεικόνιζε την ίδια ακριβώς περιοχή. Εάν τώρα θελήσουμε να χρωματίσουμε με τα τρία βασικά χρώματα δηλ. το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο τρεις οποιεσδήποτε από τις πολλές φωτογραφίες που έχουμε με διαφορετικούς φωτισμούς, η εικόνα που θα χρωματιστεί με μπλε χρώμα θα έχει πιο έντονες τις αποχρώσεις του μπλε εκεί που η αρχική εικόνα ήταν πιο φωτεινή και αντίστοιχα με το πράσινο και το κόκκινο χρώμα. Έτσι δημιουργείται μια τριάδα εικόνων που απεικονίζει ακριβώς την ίδια περιοχή στα τρία βασικά χρώματα που όμως κάθε διαφορετική υπο-περιοχή έχει και διαφορετική ένταση στο κάθε χρώμα.

Μια πολυφασματική δορυφορική εικόνα αποτελείται από πολλές εικόνες της ίδιας περιοχής της επιφάνειας της γης καταγεγραμμένες την ίδια χρονική στιγμή αλλά σε διαφορετικό μήκος κύματος. Τα διάφορα αντικείμενα στην επιφάνεια της γης (δηλαδή ουσιαστικά οι διαφορετικές καλύψεις γης) αντιδρούν διαφορετικά στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (του ήλιου-στις περισσότερες περιπτώσεις και για τους παθητικούς αισθητήρες) και εμφανίζονται φωτεινότερα ή σκοτεινότερα ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που προσπίπτει σε αυτά. Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουμε να έχουμε εικόνες ακριβώς της ίδιας περιοχής καταγεγραμμένες την ίδια χρονική στιγμή αλλά με διαφορετική φωτεινή ένταση στις διαφορετικές περιοχές τους. Η διαφορετικότητα αυτή της καταγραφής στα διαφορετικά μήκη κύματος (όχι μόνον του ορατού φάσματος αλλά και στο υπέρυθρο και στις θερμικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος) είναι μία σημαντική αρχή επάνω στην οποία βασίστηκε η Τηλεπισκόπηση.

Επειδή θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι ένας από τους βασικότερους στόχους της Τηλεπισκόπησης είναι να εντοπίσει το **ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΤΙ** στην επιφάνεια της γης(ταξινομήσεις), η διαφοροποίηση καλύψεων γης που θα ήταν σχετικά αδύνατο να εντοπιστεί μόνον σε κάποια εικόνα καταγεγραμμένη σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, επιτυγχάνεται με την πολυφασματικότητα.

Συνεπώς μία πολυφασματική δορυφορική εικόνα αποτελείται από τόσες επιμέρους εικόνες όσες και τα μήκη κύματος που καταγράφεται ή ίδια ακριβώς περιοχή την ίδια ακριβώς χρονική στιγμή και οι εικόνες αυτές είναι απολύτως υπερθέσιμες μεταξύ τους δηλαδή το κάθε εικονοστοιχείο απεικονίζει ακριβώς την ίδια

περιοχή στα διαφορετικά μήκη κύματος. Κάθε μια από τις πολλές (μονοφασματικές) εικόνες που αποτελείται μια πολυφασματική δορυφορική εικόνα ονομάζεται φασματικό κανάλι (κατά άλλους συγγραφείς φασματικός διάυλος) ή φασματική μπάντα (κατά άλλους συγγραφείς φασματική ζώνη). Στο ψηφιακό αυτό βιβλίο θα χρησιμοποιείται από εδώ και στο εξής όρος φασματικό κανάλι.

1.5 Διακριτική ικανότητα (χωρική, φασματική, ραδιομετρική, χρονική)

Η ποιότητα των δορυφορικών εικόνων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των φασματόμετρων που διαθέτουν οι αντίστοιχοι δορυφόροι. Τέσσερις είναι οι βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν μια δορυφορική εικόνα οι οποίες συνθέτουν με ένα όνομα την **διακριτική ικανότητα** του αισθητήρα κάποιου δορυφόρου

Η χωρική διακριτική ικανότητα (spatial resolution)

Αναφέρεται στο ελάχιστο μέγεθος της γήινης επιφάνειας που μπορεί να διακρίνει ο συγκεκριμένος αισθητήρας, δηλαδή στην γήινη έκταση που αντιπροσωπεύει ένα εικονοστοιχείο (pixel) της εικόνας του συγκεκριμένου αισθητήρα (του συγκεκριμένου δορυφόρου). Pixel ονομάζουμε το στοιχειώδες κομμάτι εικόνας ή εικονοστοιχείο, συνήθως στην οθόνη του υπολογιστή, (αλλά και στις ψηφιακές εικόνες γενικότερα) και που αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο μέγεθος της γήινης επιφάνειας. Προέρχεται από τη συντόμευση και συγκοπή Pict-el από το Picture Element. Π.χ. για τον δορυφόρο Landsat και για τον αισθητήρα Thematic Mapper (Θεματικό Χαρτογράφο) το μέγεθος του pixel στην γήινη επιφάνεια είναι μία τετράγωνη επιφάνεια 30μ X 30μ .

Η φασματική διακριτική ικανότητα (spectral resolution)

Αναφέρεται στον αριθμό των μηκών κύματος που μπορεί να καταγράψει την επιφάνεια της γης ο συγκεκριμένος αισθητήρας συνεπώς ουσιαστικά αναφέρεται στον αριθμό των φασματικών καναλιών από τα οποία αποτελείται η συγκεκριμένη δορυφορική εικόνα.

Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα (radiometric resolution)

Αναφέρεται στον αριθμό των διαφορετικών διαβαθμίσεων της έντασης της καταγεγραμμένης ακτινοβολίας που μπορεί να καταγράψει ο συγκεκριμένος αισθητήρας (του συγκεκριμένου δορυφόρου). Ουσιαστικά πρόκειται για τον αριθμό των bits που περιέχει η τιμή του εικονοστοιχείου στο δυαδικό σύστημα και που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο ακέραιο αριθμό στο δεκαδικό σύστημα. Π.χ. οι εικόνες του δορυφόρου Landsat είναι καταγεγραμμένες σε οκτώ (8) bits = 1 byte δηλαδή κάθε εικονοστοιχείο μιας εικόνας του δορυφόρου Landsat παίρνει 256 ακέραιες τιμές (από το 0 έως και το 255) και άρα μπορεί κατ' αντιστοιχία να φωτιστεί με 256 διαφορετικές εντάσεις κάποιου χρώματος (ή της ασπρόμαυρης κλίμακας).

Η χρονική διακριτική ικανότητα (temporal resolution)

Αναφέρεται στον χρόνο επαναδιέλευσης (και άρα επανεγγραφής) από την ίδια γήινη περιοχή.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

CRISP, 2015. *National University of Singapore, Electromagnetic Waves*. Διαθέσιμο στο: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/em.htm> [Πρόσβαση 28/05/2015].

CSIRO, 2015. *Earth Observation Center*. Διαθέσιμο στο: <http://www.cossa.csiro.au/hswww/Overview.htm> [Πρόσβαση 22/04/2015].

Κεφάλαιο 2 Στοιχεία Φωτογραμμετρίας – Φωτοερμηνείας

Αθανάσιος Κ. Μουσιάδης

Σύνοψη

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει τις βασικές αρχές και μεθόδους της φωτογραμμετρίας – φωτοερμηνείας. Αρχικά αναλύονται οι αρχές της αεροφωτογραφίας (κατηγορίες, τύποι, τρόποι υπολογισμού της κλίμακας των αεροφωτογραφιών και πηγές προμήςθειας). Στη συνέχεια περιγράφονται οι θεμελιώδεις φωτογραμμετρικοί προσδιορισμοί (στερεοσκοπική παρατήρηση, υπολογισμός συντεταγμένων σημείων από μετρήσεις σε εικόνες, αναγωγή εικόνων) και παρουσιάζονται οι τύποι φωτογραμμετρικών προϊόντων σε αναλογική και ψηφιακή μορφή. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου περιγράφονται οι φάσεις της φωτοερμηνευτικής διαδικασίας και αναλύονται τα φωτοερμηνευτικά χαρακτηριστικά τα οποία αποτελούν τις τυπικές ιδιότητες της φωτοερμηνευτικής γνώσης.

2.1 Εισαγωγή

Φωτογραμμετρία είναι η τέχνη, η επιστήμη και η τεχνική απόκτησης αξιόπιστων μετρητικών πληροφοριών του σχήματος, της διάστασης και της θέσης οποιουδήποτε αντικειμένου στο χώρο και στο περιβάλλον, μέσω διαδικασιών καταγραφής και μέτρησης σε μία ή περισσότερες εικόνες (ISPRS 2015). Η Φωτοερμηνεία αποτελεί κλάδο της Φωτογραμμετρίας. Σκοπός της είναι η αναγνώριση και ο προσδιορισμός φυσικών ή ανθρωπογενών χαρακτηριστικών, μέσω διαδικασιών ανάλυσης και ερμηνείας εικόνων. Η τυποποίηση της φωτοερμηνευτικής γνώσης για ένα συγκεκριμένο αντικείμενο γίνεται μέσω μιας σειράς ιδιοτήτων που ονομάζονται φωτοερμηνευτικά χαρακτηριστικά, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών (Μηλιαρέσης 2003).

Ενώ η Φωτογραμμετρία αποσκοπεί στη χρήση εικόνων για τη συλλογή ποσοτικών πληροφοριών, η Φωτοερμηνεία χρησιμοποιεί τις εικόνες για τη λήψη ποιοτικών πληροφοριών.

Ο όρος φωτογραμμετρία (photogrammetry, photogrammétrie, photogrammetrie) είναι ελληνική λέξη και προέρχεται από τη σύνθεση των λέξεων φως, γραμμή και μέτρηση. Ήδη από το 1858, ο Γερμανός μηχανικός Albrecht Meydenbauer χρησιμοποίησε φωτογραφίες στη γεωμετρική τεκμηρίωση κτιρίων για να υποστηρίξει την αναγκαιότητα καταγραφής και αποτύπωσης της πολιτιστικής κληρονομιάς σε περίπτωση καταστροφής (Blachut and Burkhardt 1988). Η Φωτογραμμετρία παρέχει ταχύτητα, οικονομία, ακρίβεια και αξιοπιστία στη μέτρηση αντικειμένων χωρίς τη φυσική επαφή με αυτά και η εφαρμογή της εκτείνεται από την αποτύπωση μικρών αντικειμένων έως και τη χαρτογράφηση χωρών και ηπείρων (Μπαντέκας 1980).

Οι εφαρμογές της Φωτογραμμετρίας - Φωτοερμηνείας είναι πολλαπλές. Ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω:

- αρχιτεκτονική (αποτύπωση κτιρίων και συνόλων),
- αρχαιολογία (αποτύπωση αρχαιολογικών χώρων και μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς),
- γεωλογία (στρωματογραφικές και γεωμορφολογικές μελέτες, σχεδιασμός γεωλογικών χαρτών, καταγραφή ζημιών από σεισμό),
- δασολογία (σύνταξη δασικών χαρτών, διαχείριση πυρκαγιών),
- γεωργία (προσδιορισμός τύπων εδαφών, οριοθέτηση καλλιεργούμενων εκτάσεων),
- κατασκευές (χωροθέτηση έργων, μελέτη και κατασκευή τεχνικών έργων),
- οδοποιία (χάραξη δρόμων),
- πολεοδομία (πράξεις εφαρμογής),
- τοπογραφία (σύνταξη τοπογραφικών διαγραμμάτων και χαρτών, γεωμετρική τεκμηρίωση κτιρίων και μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς),
- κτηματολόγιο (σύνταξη κτηματολογικών χαρτών),
- στρατιωτικές εφαρμογές (αναγνωρίσεις, σχεδιασμός στρατιωτικών κινήσεων),
- ιατρική (εντοπισμός και μέτρηση ξένων σωμάτων).

2.2 Στοιχεία Φωτογραμμετρίας

Η επιστήμη της Φωτογραμμετρίας αποσκοπεί στην απόκτηση αξιόπιστης ποσοτικής πληροφορίας (σχήμα, διάσταση και θέση) οποιουδήποτε αντικειμένου του χώρου και του περιβάλλοντος, μέσω διαδικασιών καταγραφής και μέτρησης σε μία ή περισσότερες εικόνες.

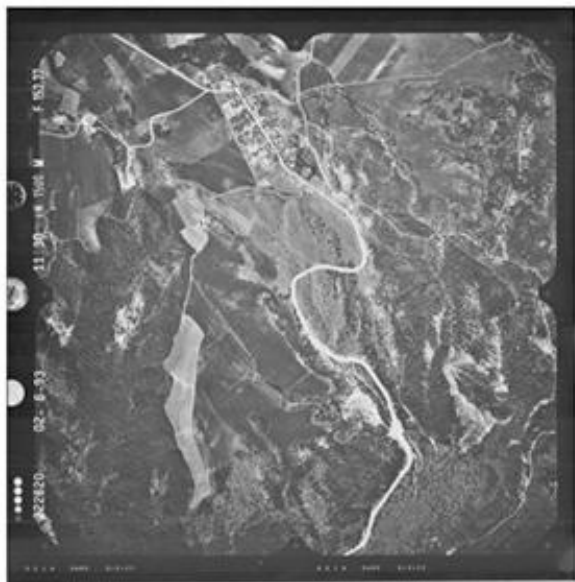
2.2.1 Στοιχεία αεροφωτογραφιών

Οι αεροφωτογραφίες αποτελούν τα πρωταρχικά δεδομένα της Φωτογραμμετρίας και της Τηλεπισκόπησης. Για να χαρακτηριστεί μια φωτογραφία της γης ως αεροφωτογραφία, θα πρέπει η φωτογράφιση να μην είναι επίγεια αλλά να πραγματοποιείται από ορισμένο ύψος, δηλαδή η φωτογραφική μηχανή να βρίσκεται σε πλατφόρμα αερομεταφοράς που μπορεί να είναι δορυφόρος, αεροπλάνο, ελικόπτερο, αερόστατο και γερανός.

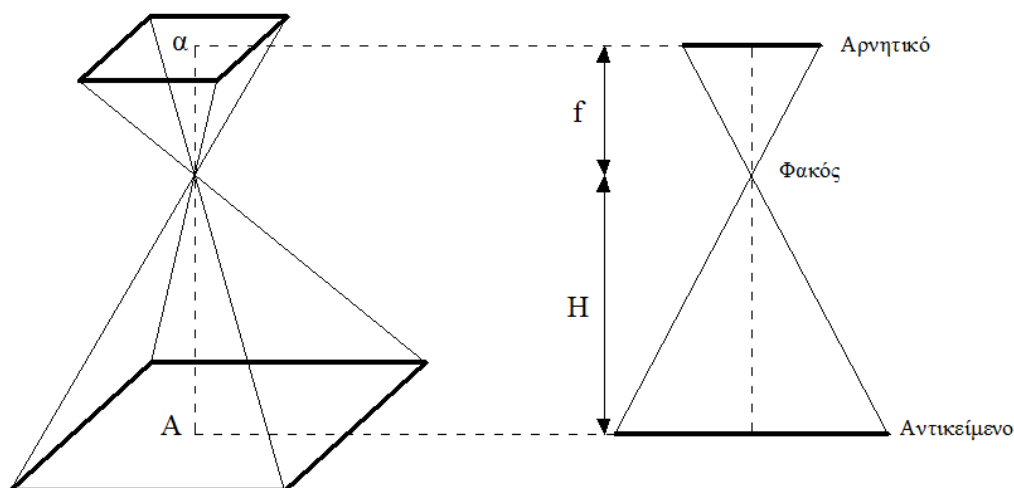
Ιστορικές ημερομηνίες της αεροφωτογραφίας είναι οι παρακάτω:

- Το 1945 που έγινε η πρώτη κάλυψη ολόκληρης της χώρας με αεροφωτογραφίες κλίμακας περίπου 1:40.000.
- Το 1960 που έγινε μία δεύτερη αεροφωτογράφιση της χώρας σε κλίμακα 1:30.000,
- και από το 1963 και μετά που γίνεται περιοδικά αεροφωτογράφιση της χώρας σε κλίμακα 1:15.000 καθώς και σε άλλες κλίμακες.

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά μιας αεροφωτογραφίας είναι ο αύξοντας αριθμός, η ημερομηνία και ώρα λήψης, η εστιακή απόσταση (f), το ύψος πτήσης (H), η κλίμακα, η επικάλυψη και τα εικονοσημεία.



Εικόνα 2.1 Αναλογική αεροφωτογραφία και τα χαρακτηριστικά της.



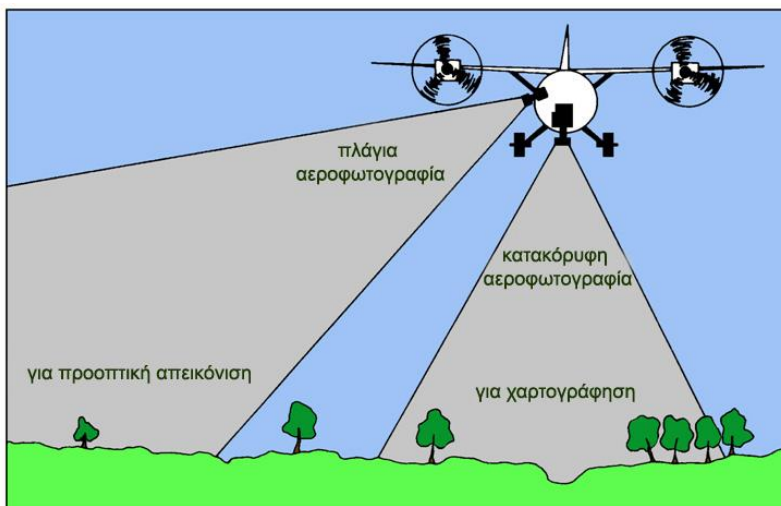
Σχήμα 2.1 Εστιακή απόσταση (f) και ύψος πτήσης (H).

2.2.1.1 Κατηγορίες αεροφωτογραφιών

Οι αεροφωτογραφίες ανάλογα με την κλίση του οπτικού άξονα της φωτογραφικής μηχανής και της κατακόρυφου στο ίδιο σημείο, διακρίνονται σε:

- αυστηρώς κατακόρυφες (όταν η διεύθυνση του οπτικού άξονα ταυτίζεται με την κατακόρυφο),
- κατακόρυφες (κλίση έως 5°),
- λίγο πλάγιες (κλίση από 5° έως 30°),
- πλάγιες (κλίση από 30° έως 60°),
- πολύ πλάγιες (όταν περιλαμβάνεται ο ορίζοντας),
- οριζόντιες (οπτικός άξονας επί ορίζοντα),
- ζενίθιες (όταν ο άξονας κατευθύνεται προς το ζενίθ).

Στα κυριότερα πλεονεκτήματα των κατακόρυφων αεροφωτογραφιών περιλαμβάνεται το γεγονός ότι η κλίμακα είναι σχεδόν η ίδια σε όλη την αεροφωτογραφία και μπορεί έως ένα βαθμό να υποκαταστήσει τον συμβατικό χάρτη (Περάκης 1999). Παρόλα αυτά, τόσο οι κατακόρυφες όσο και οι πλάγιες αεροφωτογραφίες συνεισφέρουν σε όλες τις φάσεις της φωτοερμηνευτικής διαδικασίας για μία πληρέστερη και έγκυρη εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Κατακόρυφη και πλάγια αεροφωτογραφία και οι κύριες εφαρμογές τους.

2.2.1.2 Τύποι αεροφωτογραφιών

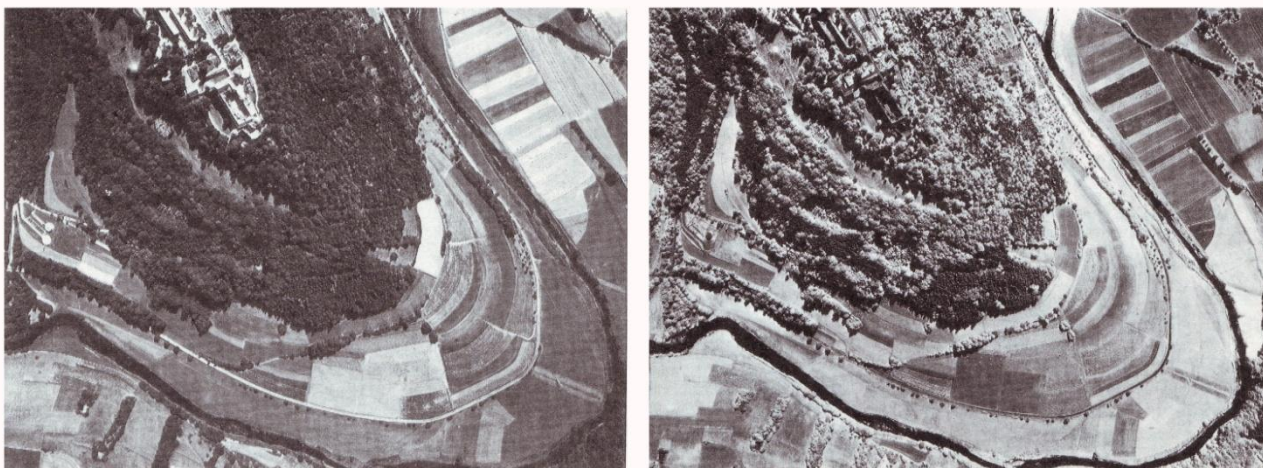
Οι αεροφωτογραφίες ανάλογα με τον τύπο του φιλμ ή/και του ψηφιακού αισθητήρα που χρησιμοποιείται, διακρίνονται στους παρακάτω τύπους:

Α) ασπρόμαυρες παγχρωματικές

Είναι οι αεροφωτογραφίες που χρησιμοποιούνται περισσότερο. Το φιλμ που χρησιμοποιείται για την αποτύπωσή τους είναι ευαίσθητο στο ορατό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στις ασπρόμαυρες παγχρωματικές αεροφωτογραφίες είναι δυνατόν να διακριθούν αντικείμενα που έχουν στην πραγματικότητα διαφορετικό χρώμα. Είναι δύσκολο όμως να διακριθούν, με βάση μόνο τον τόνο του γκρι, χαρακτηριστικά όπως οι διάφοροι τύποι βλάστησης, γιατί η ευαισθησία του φιλμ στην πράσινη ακτινοβολία δεν είναι μεγάλη. Μετρήσεις επιφανειών, υψών αντικειμένων κ.λπ. είναι δυνατόν να γίνουν με αποδεκτή ακρίβεια, εφόσον η κλίμακα των αεροφωτογραφιών βρίσκεται εντός ορισμένων ορίων. Επίσης, μπορούν να συλλέγουν αρκετές πληροφορίες μέσα από τις σκιαζόμενες επιφάνειες και από το νερό.

Β) ασπρόμαυρες υπέρυθρες

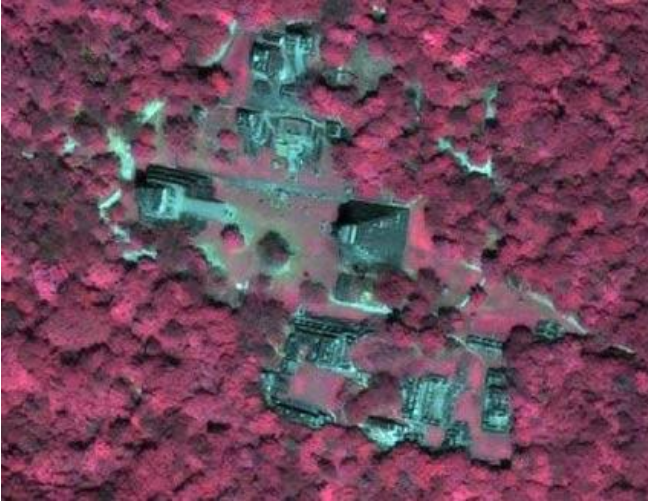
Στις αεροφωτογραφίες αυτές αποτυπώνεται το ορατό και ένα μέρος του υπέρυθρου φάσματος στους τόνους του γκρι. Οι ασπρόμαυρες υπέρυθρες αεροφωτογραφίες είναι πολύ σημαντικές για τη χαρτογράφηση του περιβάλλοντος, αφού σε αυτές αποτυπώνονται με μεγάλη σαφήνεια οι διαφορετικοί τύποι βλάστησης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2., η πλατύφυλλη βλάστηση ανακλά περισσότερη υπέρυθρη ακτινοβολία από την κωνοφόρα βλάστηση και αποτυπώνεται με πιο φωτεινούς τόνους από τα κωνοφόρα, που αποτυπώνονται σκουρότερα. Επίσης, η προσβεβλημένη από ασθένειες πλατύφυλλη βλάστηση αποτυπώνεται με σκουρότερους τόνους από την υγιή. Περιοχές με καθαρό νερό καταγράφονται με πολύ σκούρο τόνο και έτσι γίνεται εύκολη η αποτύπωση και χαρτογράφηση του υδρογραφικού δικτύου και άλλων υδάτινων επιφανειών. Τέλος, οι σκιές των αντικειμένων είναι σχεδόν μαύρες στις υπέρυθρες αεροφωτογραφίες.



Εικόνα 2.2 Ασπρόμαυρη παγχρωματική (αριστερά) και υπέρυθρη (δεξιά) αεροφωτογραφία της ίδιας περιοχής (Μπαντέκας 1980).

Γ) έγχρωμες στο ορατό και έγχρωμες στο υπέρυθρο φάσμα

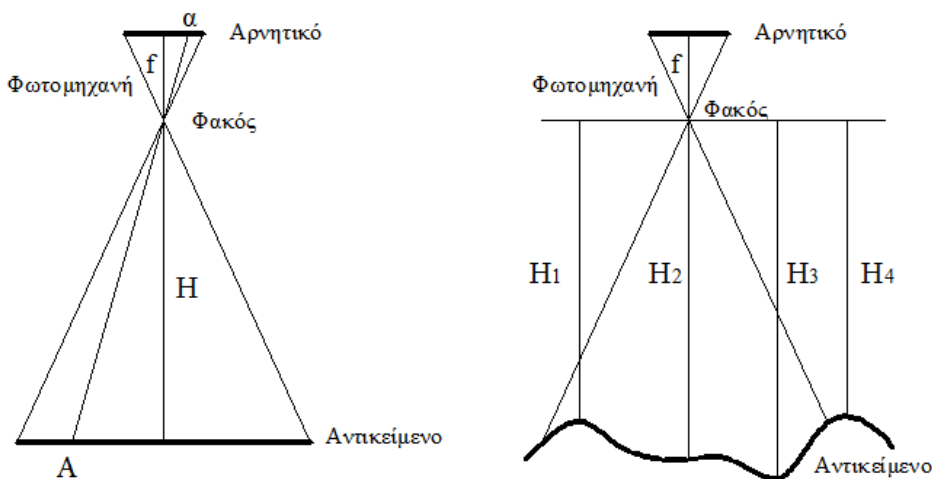
Το ανθρώπινο μάτι έχει τη δυνατότητα να διακρίνει 64 διαβαθμίσεις του γκρι και 20.000 χρωματικές αποχρώσεις. Το φιλμ που χρησιμοποιείται στις αεροφωτογραφίες αυτές είναι ευαίσθητο στην μπλε, πράσινη, κόκκινη και ανακλώμενη υπέρυθρη ακτινοβολία. Οι υπέρυθρες αεροφωτογραφίες είναι πολύ χρήσιμες για τον προσδιορισμό ειδών βλάστησης, τη διάκριση υδάτινων επιφανειών και τη χαρτογράφηση της περιεχόμενης υγρασίας στο έδαφος.



Εικόνα 2.3 Έγχρωμη υπέρυθρη αεροφωτογραφία.

2.2.2 Κλίμακα αεροφωτογραφίας

Η κλίμακα αεροφωτογραφίας εκφράζει τον αριθμό των μονάδων πραγματικού μήκους στο έδαφος, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από τις αντίστοιχες μονάδες της αεροφωτογραφίας. Στην πραγματικότητα η κλίμακα αεροφωτογραφίας δεν είναι ενιαία αλλά σημειακή, αφού είναι συνάρτηση του ύψους πτήσης, του αναγλύφου του εδάφους, της εστιακής απόστασης και της κλίσης της αεροφωτογραφίας. Για τον λόγο αυτόν όταν αναφερόμαστε σε κλίμακα αεροφωτογραφίας, στην πραγματικότητα κάνουμε αναφορά στη μέση κλίμακα της αεροφωτογραφίας.



Σχήμα 2.3 Κλίμακα αεροφωτογραφίας και σημειακή κλίμακα.

Αεροφωτογραφίες μεγαλύτερης κλίμακας καλύπτουν μικρότερη έκταση και τα αντικείμενα είναι μεγαλύτερα απ' ό,τι σε αεροφωτογραφίες μικρότερης κλίμακας.



Εικόνα 2.4 Παράδειγμα προσεγγιστικά μικρής 1:20.000 (αριστερά) και μεγάλης 1:1.000 (δεξιά) κλίμακας αεροφωτογραφίας της πόλεως των Τρικάλων (Google Earth 2015).

2.2.2.1 Μέθοδοι υπολογισμού κλίμακας αεροφωτογραφίας

Ο προσδιορισμός της κλίμακας μιας κατακόρυφης αεροφωτογραφίας γίνεται με διάφορες μεθόδους. Παρακάτω αναφέρονται τρεις από αυτές βάσει:

A) Της εστιακής απόστασης φακού - ύψος πτήσης πάνω από το έδαφος

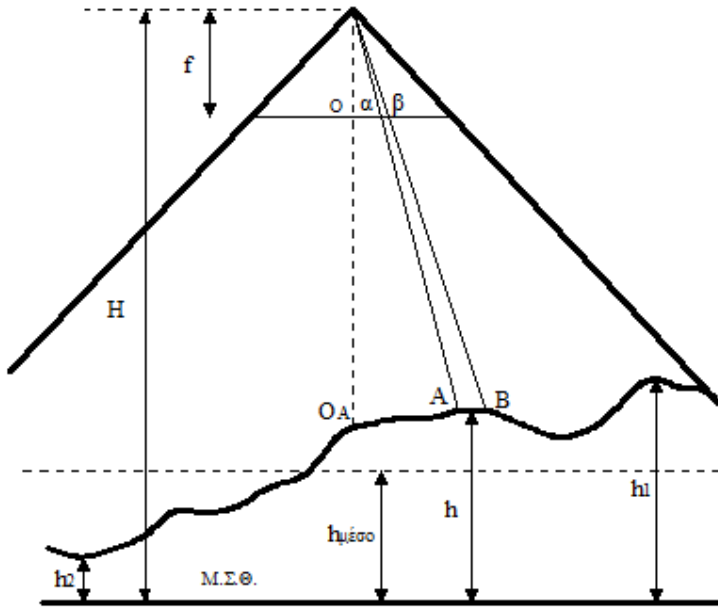
Η φωτοκλίμακα σημείου βρίσκεται με τη διαίρεση της εστιακής απόστασης του φακού δια του ύψους πτήσης του αεροπλάνου πάνω από το έδαφος. Η εστιακή απόσταση του φακού και το ύψος πτήσης του αεροπλάνου πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας αναγράφονται πάνω στην αεροφωτογραφία ή καταγράφονται από τα φωτογραφικά όργανα στο περιθώριο της αεροφωτογραφίας. Το υψόμετρο του σημείου βρίσκεται συνήθως από τον ανάλογο χάρτη. Επομένως, η κλίμακα (στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται το αντιπροσωπευτικό κλάσμα) δίνεται από τον τύπο:

$$ΚΦ = \frac{1}{T} = \frac{f}{H - h} \quad (2.1)$$

Όπου:

- ΚΦ η κλίμακα της αεροφωτογραφίας
- T ο παρονομαστής του αντιπροσωπευτικού κλάσματος
- f η εστιακή απόσταση του φακού
- H το ύψος πτήσης του αεροπλάνου από τη μέση στάθμη της θάλασσας
- h το υψόμετρο του σημείου από τη μέση στάθμη της θάλασσας
- H-h το ύψος πτήσης του αεροπλάνου για συγκεκριμένο σημείο του εδάφους

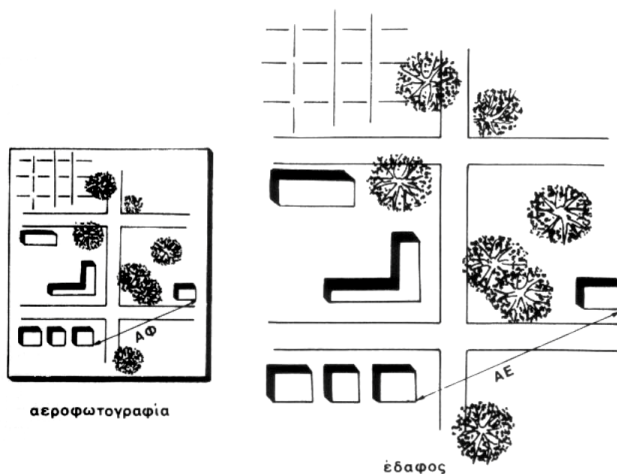
Για τον καθορισμό της μέσης κλίμακας μιας περιοχής θα πρέπει να υπολογιστεί το μέσο υψόμετρο της (Σχήμα 2.4). Στο αποτέλεσμα των υπολογισμών θα πρέπει να γίνεται στρογγυλοποίηση των δεκαδικών ψηφίων και πολλές φορές και των μονάδων.



Σχήμα 2.4 Υπολογισμός μέσης κλίμακας.

B) Των επίγειων μετρήσεων

Πολλές φορές η εστιακή απόσταση του φακού ή το ύψος πτήσης του αεροπλάνου είναι άγνωστα μεγέθη σε μια αεροφωτογραφία. Στην περίπτωση αυτήν, η κλίμακα μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέθοδο των επίγειων μετρήσεων. Η συγκεκριμένη μέθοδος δίνει ακριβή αποτελέσματα. Σύμφωνα μ' αυτήν επιλέγονται δύο ζεύγη σημείων (πολλές φορές και ένα) τα οποία οπτικά εντοπίζονται εύκολα και με ακρίβεια πάνω στην αεροφωτογραφία. Τα σημεία αυτά πρέπει να βρίσκονται σε τέτοιες θέσεις, ώστε η γραμμή που ενώνει κάθε ζεύγος να περνά κοντά από το κύριο σημείο και να είναι περίπου κάθετη με τη γραμμή του άλλου ζευγους. Επίσης, οι θέσεις των σημείων κάθε ζεύγους πρέπει να βρίσκονται στο ίδιο περίπου υψόμετρο και σε περίπου ίσες αποστάσεις από το κύριο σημείο (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Προσδιορισμός της κλίμακας της αεροφωτογραφία με τη μέθοδο των επίγειων μετρήσεων.

Με τον τρόπο αυτόν μειώνεται στο ελάχιστο η επίδραση της τυχόν επίκλισης της αεροφωτογραφίας, καθώς και της μετατόπισης των αντικειμένων [η οποία εξαρτάται από το ύψος τους και την απόστασή τους από το κύριο σημείο (ναδίρ)]. Ωστόσο, για να μειωθεί ακόμη περισσότερο η επίδραση της μετατόπισης η οποία πολλές φορές επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις, θα ήταν προτιμότερο τα σημεία που εντοπίζονται να

βρίσκονται κατά το δυνατόν, σε επίπεδα τμήματα της επιφάνειας του εδάφους. Τέλος, για μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της κλίμακας και για συντόμευση των διαδικασιών, προτιμούνται αντικείμενα γνωστών διαστάσεων, όπως ένα γήπεδο ποδοσφαίρου, το πλάτος ενός δρόμου κ.λπ. Οι τιμές από τη μέτρηση των αποστάσεων ενός ζεύγους σημείων εκφράζονται στις ίδιες μονάδες και χρησιμοποιούνται στον παρακάτω τύπο για τον προσδιορισμό της κλίμακας:

$$ΚΦ = \frac{1}{T} = \frac{ΑΦ}{ΑΕ} \quad (2.2)$$

Όπου:

- ΚΦ η κλίμακα αεροφωτογραφίας
- T ο παρονομαστής του αντιπροσωπευτικού κλάσματος
- ΑΦ η απόσταση μεταξύ δυο σημείων στην αεροφωτογραφία
- ΑΕ η απόσταση μεταξύ των ίδιων δύο σημείων στο έδαφος

Για το δεύτερο ζεύγος σημείων υπολογίζεται μια νέα κλίμακα, οπότε η κλίμακα της αεροφωτογραφίας είναι ο μέσος όρος των δυο τιμών.

Γ) Των μετρήσεων πάνω στο χάρτη

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν δεν είναι γνωστές οι απαραίτητες μεταβλητές για τον υπολογισμό της κλίμακας με την πρώτη μέθοδο ή όταν δεν είναι εύκολο, λόγω της έλλειψης χρόνου ή χρημάτων, να γίνουν επίγειες μετρήσεις για να εφαρμοστεί η δεύτερη μέθοδος. Προϋπόθεση για τον ακριβή υπολογισμό της κλίμακας με τη μέθοδο αυτή, είναι η ύπαρξη ενός λεπτομερούς και καλά ενημερωμένου χάρτη. Η διαδικασία προσδιορισμού της κλίμακας είναι περίπου ίδια με αυτή των επίγειων μετρήσεων. Δηλαδή, εκλέγονται δυο σημεία τα οποία πρέπει να είναι ορατά πάνω στην αεροφωτογραφία και να εντοπίζονται εύκολα και με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια πάνω στο χάρτη. Τα σημεία αυτά, όπως και στην προηγούμενη μέθοδο, πρέπει να βρίσκονται περίπου στο ίδιο υψόμετρο και κατά προτίμηση σε περίπου ίσες αποστάσεις από τη μία και την άλλη πλευρά του κυρίου σημείου.

Μετά τον εντοπισμό των σημείων, γίνεται μέτρηση των αποστάσεων τόσο στο χάρτη όσο και στην αεροφωτογραφία και οι τιμές τους εκφράζονται στις ίδιες μονάδες.

Ο τύπος που δίνει την κλίμακα είναι:

$$ΚΦ = \frac{1}{T} = \frac{ΑΦ}{ΑΧ} \cdot ΚΧ = \frac{ΑΦ}{ΑΧ} \cdot \frac{1}{M} \quad (2.3)$$

Όπου:

- ΚΦ η κλίμακα αεροφωτογραφίας
- T ο παρονομαστής του αντιπροσωπευτικού κλάσματος
- ΑΦ η απόσταση μεταξύ δυο σημείων στην αεροφωτογραφία
- ΑΧ η απόσταση μεταξύ των δύο ίδιων σημείων πάνω στο χάρτη
- ΚΧ η κλίμακα του χάρτη
- M ο παρονομαστής της κλίμακας του χάρτη

2.2.3 Πηγές αεροφωτογραφιών για την Ελλάδα

Ο κύριος δημόσιος φορέας προμήθειας αεροφωτογραφιών είναι η Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.). Κάθε ενδιαφερόμενος μπορεί να αποκτήσει αεροφωτογραφίες για προσωπικούς, εκπαιδευτικούς ή επαγγελματικούς σκοπούς (Γ.Υ.Σ. 2015). Επίσης, υπάρχουν ιδιωτικές εταιρίες που εκτελούν αεροφωτογραφίες με κύριο πλεονέκτημα την αεροφωτογράφιση περιοχών της Ελλάδος σε περιοδικότερη βάση και σε ποικίλες κλίμακες. Ωστόσο, η ολοένα και μεγαλύτερη χρήση των μη επανδρωμένων πτητικών μέσων δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα ιδιωτικών αεροφωτογραφίσεων σε μεγαλύτερες κλίμακες.

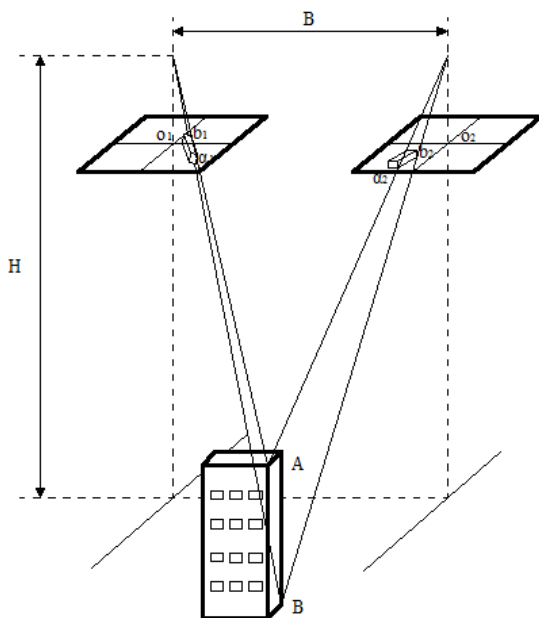
2.2.4 Αρχές φωτογραμμετρικής επεξεργασίας

2.2.4.1 Στερεοσκοπία

Η εφαρμογή της στερεοσκοπίας σχετίζεται με τη στερεοσκοπική όραση ή την τρισδιάστατη παρατήρηση των αεροφωτογραφιών. Η ικανότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης είναι ουσιώδης για την αποδοτικότερη χρησιμοποίηση των αεροφωτογραφιών, η οποία συνεπάγεται:

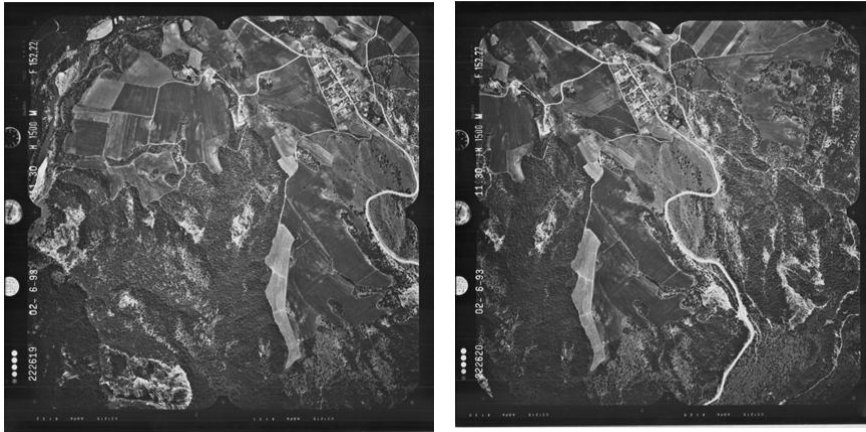
- την οπτική διάκριση της τρίτης διάστασης των αντικειμένων και τη μέτρηση των διαφορών τους,
- την ευκολότερη και ακριβέστερη αναγνώριση των αντικειμένων.

Η στερεοσκοπική παρατήρηση - αντίληψη του βάθους οφείλεται στη σύγκλιση των ματιών, ώστε να βλέπουν το ίδιο αντικείμενο.

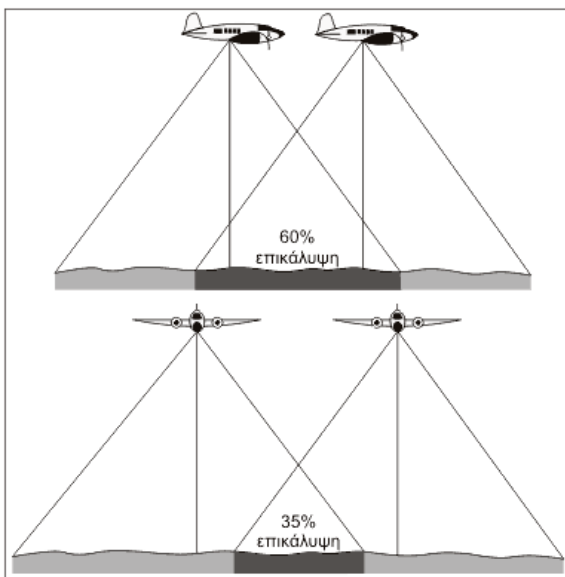


Σχήμα 2.6 Σχέση μεταξύ της στερεοσκοπικής αντίληψης του βάθους και της γωνίας σύγκλισης.

Η στερεοσκοπική παρατήρηση αεροφωτογραφιών, δηλαδή η δημιουργία της τρισδιάστατης παρατήρησης των αντικειμένων, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση ενός ζεύγους διαδοχικών αεροφωτογραφιών (Kraus 2000). Οι δύο αεροφωτογραφίες που έχουν ληφθεί από διαφορετικά σημεία αλλά με κοινή επικάλυψη καλούνται στερεοζεύγος (Εικόνα 2.5). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, σ' ένα στερεοζεύγος υπάρχει συνήθως 60% κατά μήκος επικάλυψη και 35% κατά πλάτος επικάλυψη. Η κοινή επικαλυπτόμενη περιοχή μπορεί να παρατηρηθεί τρισδιάστατα. Τοιουτοτρόπως, τα στερεογράμματα είναι δύο φωτογραφίες του ίδιου αντικειμένου, οι οποίες πάρθηκαν από διαφορετική θέση την ίδια σχεδόν χρονική στιγμή και οι οποίες έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα για στερεοσκοπική παρατήρηση.



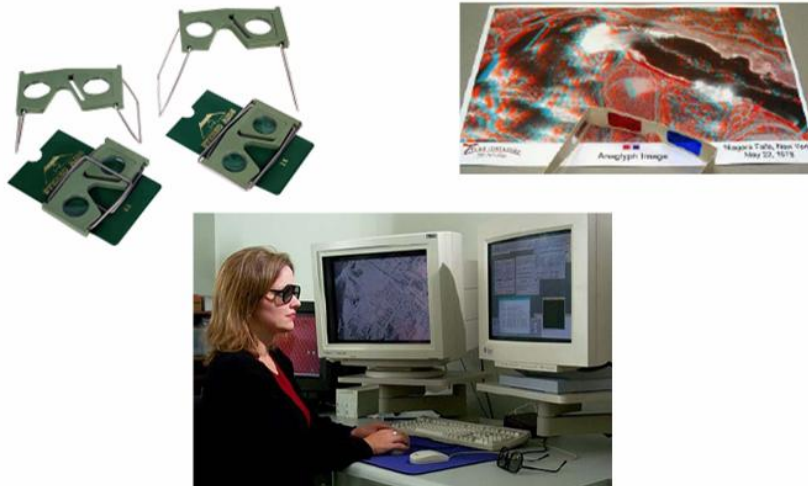
Εικόνα 2.5 Στερεοζεύγος αεροφωτογραφιών.



Σχήμα 2.7 Κατά μήκος και κατά πλάτος επικάλυψη στερεοζεύγους.

Συνεπώς, απαραίτητη προϋπόθεση για την τρισδιάστατη παρατήρηση είναι η ύπαρξη στερεοζεύγους ή στερεογραμμάτων, σε συνδυασμό με τον κατάλληλο εξοπλισμό, που είναι:

- στερεοσκόπια (στερεοσκόπια φακών ή τσέπης, κατοπτρικά στερεοσκόπια και zoom στερεοσκόπια),
- στερεοσκοπικά γυαλιά που δείχνουν το μέθοδος του αναγλύφου (μπλε-κόκκινο),
- ηλεκτρονικές διατάξεις με πόλωση (φίλτρα οθόνης για στερεοσκοπική παρατήρηση).



Εικόνα 2.6 Στερεοσκόπια, μέθοδος αναγλύφου και ψηφιακός φωτογραμμετρικός σταθμός.

2.2.4.2 Υπολογισμός συντεταγμένων σημείων από μετρήσεις σε εικόνες

Το χαρακτηριστικό της κεντρικής προβολής κατά τη φωτογράφιση είναι ότι κάθε ακτίνα σημείου που φωτογραφίζεται διέρχεται από το κέντρο προβολής του φακού. Σε ένα ιδεατό σύστημα φακών, χωρίς παραμορφώσεις, όλες οι ακτίνες σημείων του αντικειμένου που φωτογραφίζεται περνούν από το κέντρο προβολής του φακού για να δημιουργηθούν τα είδωλα των σημείων αυτών στον αισθητήρα της φωτογραφικής μηχανής (Kraus 2000).

Για τον υπολογισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων στο χώρο από μετρήσεις σε στερεοζεύγος εικόνων, η γενική μεθοδολογία περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- τη χρήση στερεοσκοπικών εικόνων.
- τον εσωτερικός προσανατολισμός (γεωμετρία φωτομηχανής και συστήματος των φακών).
- τη βαθμονόμηση της φωτομηχανής.
- τον εξωτερικός προσανατολισμός (φωτογραμμετρική οπισθοτομία).
- τον υπολογισμό τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων (φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία).

Ο εσωτερικός προσανατολισμός περιγράφει την εσωτερική γεωμετρία της φωτομηχανής και τη διαστροφή του συστήματος των φακών. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για την ανάπλαση της δέσμης των φωτεινών ακτινών του αντικειμένου στο χώρο από τα αντίστοιχα σημεία της εικόνας. Οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού είναι η εστιακή απόσταση c , η θέση του κυρίου σημείου x_0, y_0 στο επίπεδο του αρνητικού ή του ψηφιακού αισθητήρα καθώς και οι διαστροφές του φακού. Η βαθμονόμηση της φωτομηχανής αποσκοπεί στην αντιστάθμιση των διαστροφών του φακού καθώς και στην εκτίμηση της σταθερότητας και λειτουργίας της (Kraus 2000, Ziemann and El-Halkim 1982).

Η θέση του κέντρου προβολής X_0, Y_0, Z_0 και οι στροφές ω, ϕ, κ των αξόνων του επίγειου συστήματος, ώστε να συμπίσουν με τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής, αποτελούν στοιχεία της θέσης και του προσανατολισμού της φωτογραφικής λήψης στο επίγειο σύστημα συντεταγμένων. Ο προσδιορισμός των έξι αυτών παραμέτρων ονομάζεται εξωτερικός προσανατολισμός. Ο εξωτερικός προσανατολισμός περιγράφεται από τη συνθήκη της συγγραμμικότητας (Mikhail *et.al.* 2001).

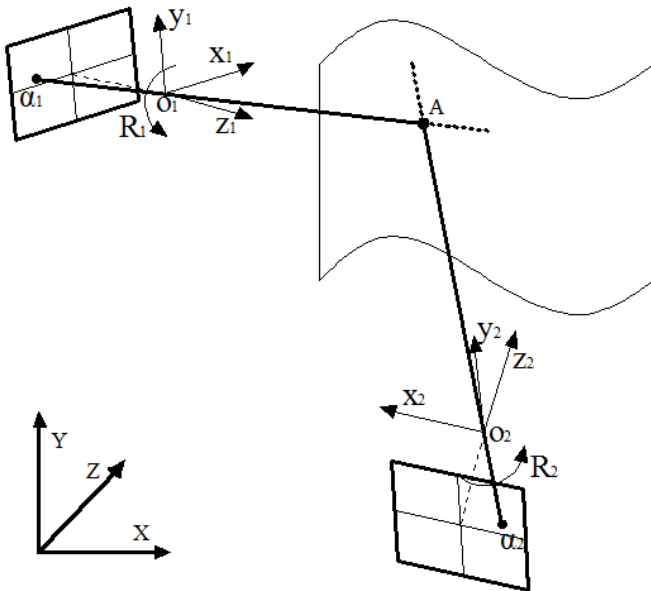
$$x = x_0 - c \frac{(X - X_0)R_{11} + (Y - Y_0)R_{12} + (Z - Z_0)R_{13}}{(X - X_0)R_{31} + (Y - Y_0)R_{32} + (Z - Z_0)R_{33}}$$

$$y = y_0 - c \frac{(X - X_0)R_{21} + (Y - Y_0)R_{22} + (Z - Z_0)R_{23}}{(X - X_0)R_{31} + (Y - Y_0)R_{32} + (Z - Z_0)R_{33}}$$

(2.4)

Η παραπάνω συνθήκη της συγγραμμικότητας συνδέει τις φωτογραφικές συντεταγμένες x, y ενός σημείου της εικόνας στο φωτογραφικό επίπεδο, με τις επίγειες συντεταγμένες του X, Y, Z μέσω των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής c, x_0, y_0 , των συντεταγμένων στάσης X_0, Y_0, Z_0 της φωτομηχανής στο επίγειο σύστημα συντεταγμένων και των γωνιών στροφής ω, ϕ, κ ανάμεσα στα δύο τρισδιάστατα συστήματα συντεταγμένων (στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού).

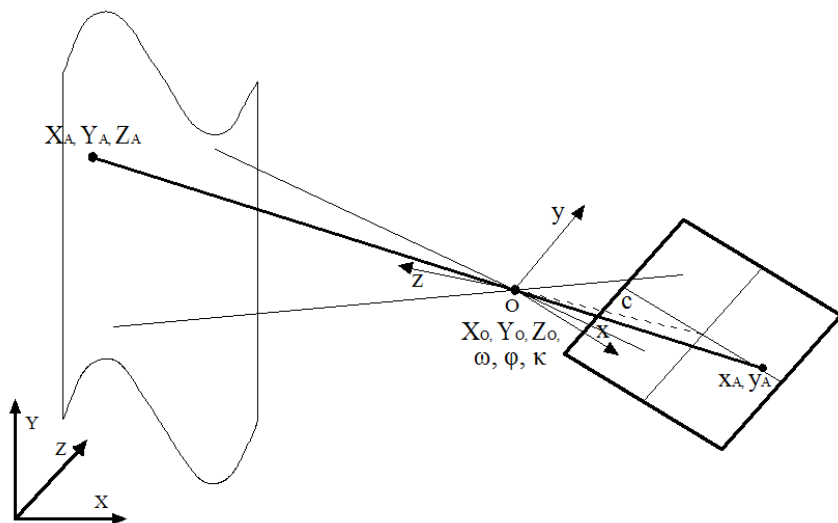
Με τη χρήση ενός στερεοζεύγους και τη μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων x, y του ίδιου σημείου στις δύο εικόνες, προκύπτουν δύο ζεύγη εξισώσεων της παραπάνω μορφής που επιλύονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και υπολογίζουν τη θέση του σημείου στο χώρο, δηλαδή τις συντεταγμένες X, Y, Z . Η τεχνική αυτή ονομάζεται φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία (Σχήμα 2.8). Επομένως, γνωρίζοντας τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού εικόνων, τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού και τις εικονοσυντεταγμένες του σημείου αποτύπωσης, υπολογίζονται οι συντεταγμένες του σημείου αποτύπωσης στο εκάστοτε γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.



Σχήμα 2.8 Φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία.

Βασική προϋπόθεση για την επίλυση της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας είναι ο πρότερος προσδιορισμός της θέσης και της στροφής της φωτομηχανής (δηλαδή η σχέση των αξόνων της φωτομηχανής με τους άξονες του επίγειου συστήματος συντεταγμένων). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται φωτογραμμετρική οπισθοτομία, κατά την οποία υπολογίζονται οι διαφορετικές θέσεις λήψης της φωτομηχανής στο χώρο, δηλαδή προσδιορίζονται τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού μιας λήψης $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ γνωρίζοντας τις συντεταγμένες των φωτοσταθερών σημείων ελέγχου, τις αντίστοιχες μετρήσεις στην εικόνα καθώς και τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού. Τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της φωτεινής δέσμης προκύπτουν από τον προσδιορισμό του σημείου τομής των ακτίνων της στο χώρο, αλλά και του προσανατολισμού της ως στερεού. Η επίλυση της φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας γίνεται και πάλι με την βοήθεια των εξισώσεων της συνθήκης συγγραμμικότητας, για την οποία απαιτείται να είναι γνωστή η θέση τριών τουλάχιστον σημείων που εντοπίζονται σε κάθε εικόνα στο τρισσορθογώνιο σύστημα

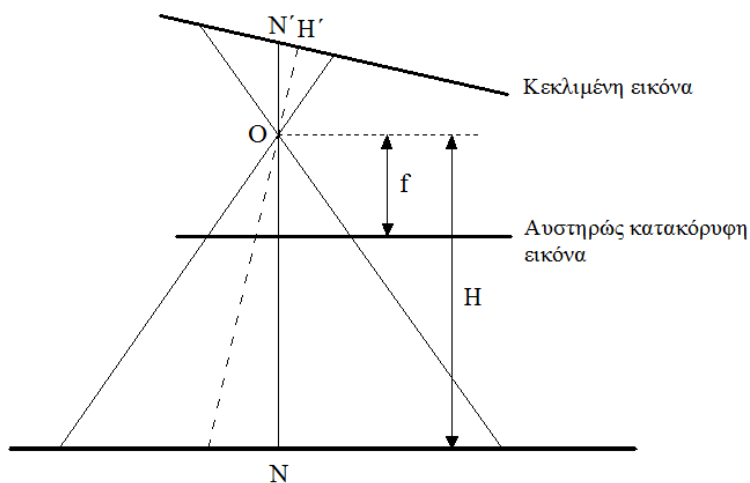
συντεταγμένων του εδάφους. Η επάρκεια των τριών σημείων για την επίλυση της φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας οφείλεται στο γεγονός ότι οι έξι άγνωστοι παράμετροι του προσανατολισμού των εικόνων ($X, Y, Z, \omega, \phi, \kappa$) μπορούν να υπολογιστούν, καθώς από κάθε ένα από τα τρία σημεία δημιουργούνται 2 εξισώσεις άρα συνολικά έχουμε $2 \times 3 = 6$ εξισώσεις για 6 αγνώστους.



Σχήμα 2.9 Φωτογραμμετρική οπισθοτομία.

2.2.4.3 Φωτογραμμετρική αναγωγή εικόνας

Η οριζοντιογραφική αποτύπωση επιτυγχάνεται μέσω μεμονωμένων αεροφωτογραφιών που να καλύπτουν την περιοχή μελέτης, δίχως να είναι απαραίτητη η ύπαρξη στερεοζεύγους εικόνων. Στην περίπτωση αυτήν αναφερόμαστε σε μονοεικονική φωτογραμμετρική αποτύπωση. Η διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιείται μία εικόνα για την ακριβή οριζοντιογραφική αποτύπωση επιπέδου εδάφους καλείται αναγωγή (Μπαντέκας 1980). Τα αίτια τα οποία προκαλούν γεωμετρικές διαφορές μεταξύ του χάρτη και της εικόνας, είναι οι στροφές της εικόνας, το ανάγλυφο του εδάφους, η ακτινική διαστρόφη του φακού, η διάθλαση και η διαφορά κλίμακας μεταξύ της εικόνας και του χάρτη. Στην προκειμένη οριζοντιογραφική αποτύπωση η ακτινική διαστρόφη και η διάθλαση δεν λαμβάνονται υπόψη, το δε έδαφος θεωρείται επίπεδο. Οι μόνες αιτίες γεωμετρικών παραμορφώσεων που απομένουν μεταξύ χάρτη και εικόνας, είναι η ύπαρξη στροφών της εικόνας και η διαφορά κλίμακας. Αρχικά, πρέπει να γίνει ο κατάλληλος μετασχηματισμός ώστε να προκύψει αυστηρή κατακόρυφη εικόνα που να αντιστοιχεί στο σημείο λήψης (Σχήμα 2.10). Δηλαδή, η εικόνα που προκύπτει μετά τη διαδικασία της αναγωγής προσεγγίζει τον χάρτη της περιοχής που απεικονίζει.



Σχήμα 2.10 Αναγωγή εικόνας.

Συνεπώς, η αναγωγή περιλαμβάνει δύο μετασχηματισμούς: τις στροφές της εικόνας και την αλλαγή της κλίμακας. Στην ψηφιακή ή αναλυτική αναγωγή χρησιμοποιείται μαθηματικός τύπος με τον οποίο προσδιορίζονται οι συντελεστές μετατροπής των συντεταγμένες του εκάστοτε σημείου της κεκλιμένης εικόνας σε συντεταγμένες της αυστηρώς κατακόρυφης εικόνας ή σε χαρτογραφικές συντεταγμένες ορισμένης κλίμακας.

Για την αναγωγή χρησιμοποιείται η εξίσωση συγγραμμικότητας της μορφής:

$$\frac{X - X_0}{Z - Z_0} = \frac{R_{11}x + R_{12}y - R_{13}c}{R_{31}x + R_{32}y - R_{33}c}$$

$$\frac{Y - Y_0}{Z - Z_0} = \frac{R_{21}x + R_{22}y - R_{23}c}{R_{31}x + R_{32}y - R_{33}c}$$

(2.5)

όπου R_{ij} είναι τα στοιχεία του πίνακα στροφής βάσει των οποίων η εικόνα καθίσταται παράλληλη προς το έδαφος.

Σύμφωνα με την προηγούμενη υπόθεση, ότι το έδαφος είναι επίπεδο και οριζόντιο, προκύπτει ότι ο όρος $Z - Z_0$ είναι σταθερός και επομένως η συνθήκη λαμβάνει τη μορφή:

$$X = \frac{\alpha'_1 x + \beta'_1 y + d'_1}{\alpha'_3 x + \beta'_3 y + d'_3} = \frac{\alpha_1 x + \beta_1 y + d_1}{\alpha_3 x + \beta_3 y + 1}$$

$$Y = \frac{\alpha'_2 x + \beta'_2 y + d'_2}{\alpha'_3 x + \beta'_3 y + d'_3} = \frac{\alpha_2 x + \beta_2 y + d_2}{\alpha_3 x + \beta_3 y + 1}$$

(2.6)

η οποία αποτελεί τη γενική προβολική σχέση μεταξύ δύο επιπέδων που βρίσκονται σε προοπτική αντιστοιχία. Οι εξισώσεις αυτές περιλαμβάνουν οκτώ συντελεστές δεδομένου ότι κάθε γνωστό σημείο επί της αεροφωτογραφίας και του χάρτη επιτρέπει τον σχηματισμό δύο τέτοιων εξισώσεων. Απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερα φωτοσταθερά σημεία, τα οποία εντοπίζονται και οπτικά στην αεροφωτογραφία και οι συντεταγμένες τους στο εκάστοτε γεωδαιτικό σύστημα είναι γνωστές, για τον προσδιορισμό των συντελεστών των παραπάνω εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές μετατρέπουν τις συντεταγμένες οποιοδήποτε σημείου της κεκλιμένης εικόνας σε συντεταγμένες της ανοιγμένης εικόνας.

2.2.5. Φωτογραμμετρικά προϊόντα

Ο τοπογραφικός χάρτης σε έντυπη μορφή αποτελεί το αρχικό συμβατικό φωτογραμμετρικό προϊόν. Μέρος των ψηφιακών γεωχωρικών δεδομένων αποτελούν τα φωτογραμμετρικά προϊόντα τα οποία χρησιμοποιούνται για κάθε είδους χαρτογραφική απεικόνιση με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.). Ακολουθεί η περιγραφή των βασικών φωτογραμμετρικών προϊόντων με την κατηγοριοποίησή τους σε αναλογική ή ψηφιακή μορφή.

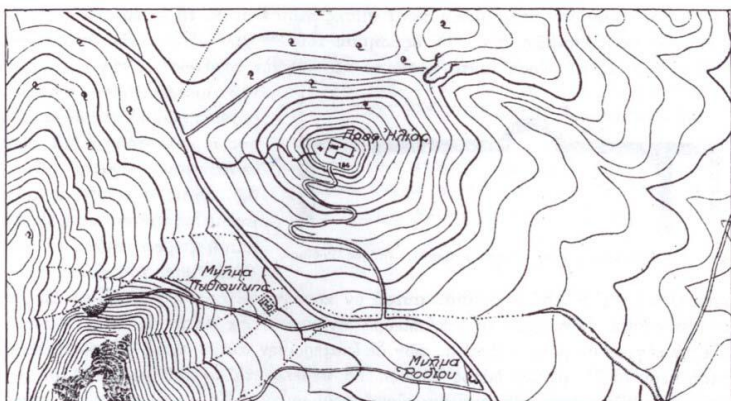
2.2.5.1 Φωτογραμμετρικά προϊόντα αναλογικής μορφής

Στις μέρες μας, αν και τα ψηφιακά φωτογραμμετρικά προϊόντα υπερισχύουν των συμβατικών σε αναλογική μορφή, εντούτοις τα τελευταία χρησιμοποιούνται ακόμη. Αυτά είναι τα παρακάτω:

A) Χάρτες ισοϋψών

Ισοϋψής καμπύλη είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του εδάφους, τα οποία έχουν το ίδιο υψόμετρο (Εικόνα 2.7). Η υψομετρική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών ισοϋψών καμπυλών ονομάζεται ισοδιάσταση

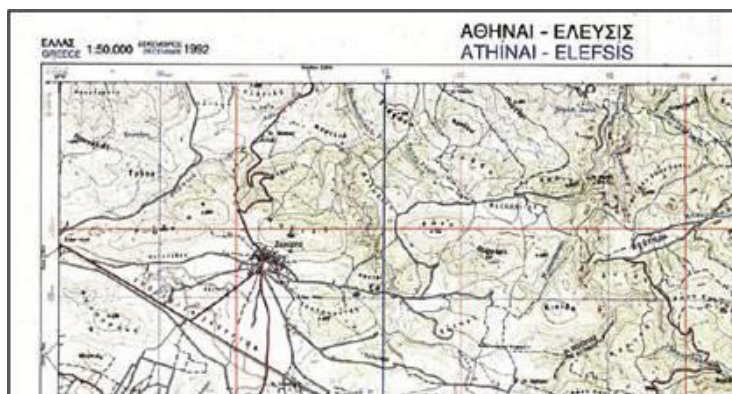
και είναι συνάρτηση της κλίμακας του χάρτη και του αναγλύφου της περιοχής. Επομένως, όσο μικρότερη είναι η κλίμακα του χάρτη τόσο μεγαλύτερη είναι η ισοδιάσταση του. Για την εκτίμηση του μέγιστου ύψους πτήσης για την παραγωγή χάρτη με συγκεκριμένη ισοδιάσταση, χρησιμοποιείται ο συντελεστής C, που είναι ο λόγος του ύψους πτήσης προς την ισοδιάσταση.



Εικόνα 2.7 Χάρτης με ισοψείς καμπύλες.

Β) Χάρτες

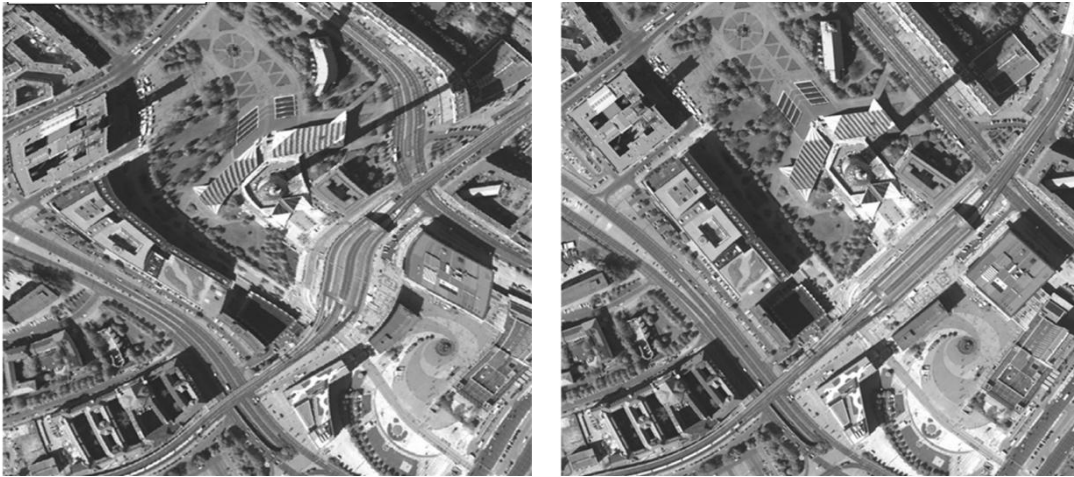
Οι χάρτες απεικονίζουν γεωγραφικά χαρακτηριστικά όπως το οδικό δίκτυο, τα τοπωνύμια, τα διοικητικά όρια κ.λπ. Ο σκοπός δημιουργίας και η κλίμακα του χάρτη καθορίζουν την πληροφορία την οποία θα περιέχει ο κάθε χάρτης. Συνήθως στα παραπάνω χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται και οι ισοψείς καμπύλες για την παροχή της υψομετρικής πληροφορίας.



Εικόνα 2.8 Τμήμα χάρτη Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.).

Γ) Ανοιγμένες εικόνες

Οι ανοιγμένες εικόνες αποτελούν ένα άλλο φωτογραμμετρικό προϊόν. Πρόκειται για την αναγωγή μιας πλάγιας αεροφωτογραφίας σε κατακόρυφη, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η ανοιγμένη εικόνα απεικονίζει επίπεδα σε ορθή προβολή και έχει ενιαία κλίμακα. Εάν το έδαφος είναι σχετικά ομαλό, η ανοιγμένη εικόνα χρησιμοποιείται ως χάρτης μικρής ακρίβειας.



Εικόνα 2.9 Κεκλιμένη και ανοιγμένη εικόνα.

Δ) Φωτομωσαϊκά

Τα φωτομωσαϊκά αποτελούν χάρτες μικρής ακρίβειας και κατασκευάζονται τοποθετώντας διαδοχικά στερεοζεύγη αεροφωτογραφιών για τη δημιουργία ενός συνολικού χάρτη της περιοχής μελέτης (Εικόνα 2.10). Για μεγαλύτερη ακρίβεια και συνοχή του μωσαϊκού παλαιότερα ήταν συνηθισμένη η χρήση ανοιγμένων εικόνων αντί απλών αεροφωτογραφιών. Ωστόσο, στις μέρες μας ο παραπάνω τρόπος κατασκευής φωτομωσαϊκών είναι σπάνιος και πλέον αυτά κατασκευάζονται από ορθοφωτοχάρτες με τη χρήση φωτογραμμετρικών λογισμικών βάσει αυτόματων διαδικασιών.



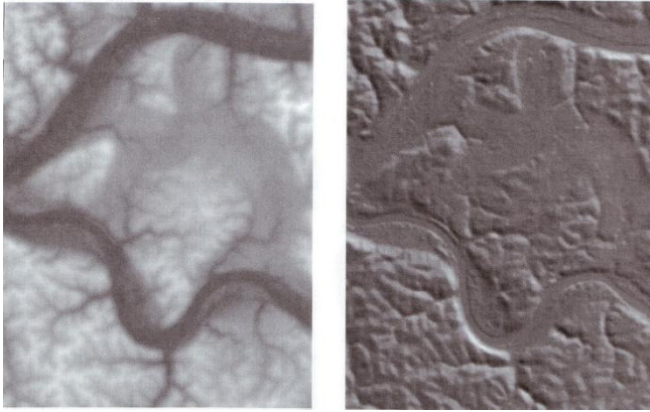
Εικόνα 2.10 Φωτομωσαϊκό από στερεοζεύγη αεροφωτογραφιών.

2.2.5.2 Φωτογραμμετρικά προϊόντα ψηφιακής μορφής

Α) Ψηφιακά Μοντέλα Αναγλύφου [Digital Elevation Models (DEM's)]

Ένα από τα κοινά φωτογραμμετρικά προϊόντα είναι το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου [Digital Elevation Model (DEM)], το οποίο χρησιμοποιείται είτε σαν πρωτογενές δεδομένο ή για την παραγωγή ορθοφωτοχαρτών. Το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου αναπαριστά τα υψόμετρα της επιφάνειας της γης μέσω ενός συνόλου σημείων. Η αναπαράσταση του υψόμετρου γίνεται μέσω των τιμών φωτεινότητας ή με τη μέθοδο του σκιασμένου αναγλύφου (Mikhail *et.al.* 2001) (Εικόνα 2.11).

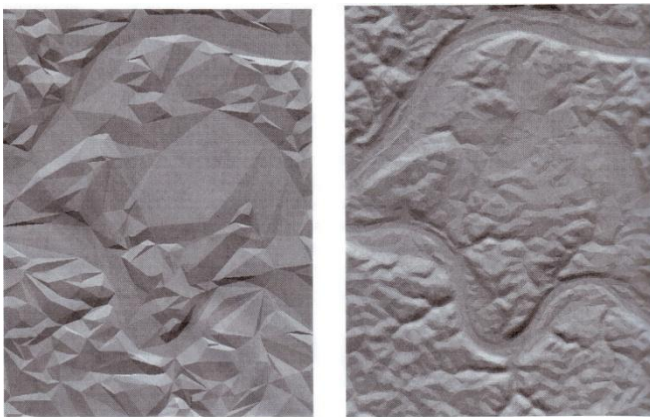
Η συνηθέστερη δομή ενός Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου είναι η ψηφιδωτή μορφή (raster grid) με υψομετρική πληροφορία σε κάθε pixel. Η αξιοπιστία με την οποία αναπαριστάται η γήινη επιφάνεια εξαρτάται από τη διάσταση του pixel του Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου και τον τρόπο υπολογισμού του υψόμετρου. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα Ψηφιακά Μοντέλα Αναγλύφου αποτελούν διακριτές αναπαραστάσεις της γήινης επιφάνειας. Αυτό έχει ως μειονέκτημα όταν πρόκειται για μεγάλες εναλλαγές υψόμετρου στο έδαφος, ώστε αυτές να μην μπορούν να αναπαρασταθούν πιστά στα Ψηφιακά Μοντέλα Αναγλύφου ψηφιδωτής μορφής.



Εικόνα 2.11 Διαφορετικές αναπαραστάσεις Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου, τιμές φωτεινότητας (αριστερά) και μέθοδος σκιασμένου αναγλύφου (δεξιά).

Ένας άλλος τρόπος δόμησης του Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου είναι τα δίκτυα ακανόνιστων τριγώνων [Triangular Irregular Networks (TINs)] σύμφωνα με τα οποία χρησιμοποιούνται ομάδες ακανόνιστων σημείων υψομετρικής πληροφορίας και βάσει των οποίων σχηματίζονται τρίγωνα για να αναπαρασταθεί η γήινη επιφάνεια (Mikhail *et.al.* 2001) (Εικόνα 2.12). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τη δημιουργία του δικτύου τριγώνων. Το κύριο πλεονέκτημα των TINs είναι ότι για συγκεκριμένη ακρίβεια, απαιτούνται πολύ λιγότερα σημεία στην αναπαράσταση της γήινη επιφάνεια. Το μειονέκτημα τους είναι η πολυπλοκότητα υπολογισμού του υψομέτρου σε κάθε σημείο.

Ο υπολογισμός ενός Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου γίνεται αυτόματα με τη χρήση ειδικών λογισμικών ωστόσο, η αναπαράσταση συγκεκριμένων περιοχών (αστικές ή δασικές) ενδεχομένως να μην είναι ακριβής. Αυτό συνήθως οφείλεται στο θόρυβο των δεδομένων ή στα σφάλματα παρεμβολής και τελικά το μοντέλο διορθώνεται με την παρέμβαση του χρήστη.



Εικόνα 2.12 Τμήμα δικτύου ακανόνιστων τριγώνων [Triangular Irregular Network (TINs)], που δημιουργήθηκαν από Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου, με τη χρήση 700 (αριστερά) και 7000 (δεξιά) σημείων.

Β) Ψηφιακά διανυσματικά δεδομένα

Τα ψηφιακά διανυσματικά δεδομένα αναπαριστώνται ως σημεία, γραμμές και πολύγωνα (Εικόνα 2.13). Στην πιο απλή τους μορφή τα ψηφιακά διανυσματικά δεδομένα αποτελούνται από τις συντεταγμένες σε δύο ή τρεις διαστάσεις για να περιγράψουν τη δομή τους. Συνήθως τα δεδομένα αυτά συνοδεύονται από διάφορες περιγραφικές πληροφορίες. Για παράδειγμα, το οδικό δίκτυο ανήκει στην κατηγορία διανυσματικών δεδομένων γραμμικής μορφής. Περιγραφικά χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου αποτελούν η ονομασία της οδού, η κατηγορία του δρόμου, ή ένας κωδικός αριθμός που να υποδηλώνει την κατηγορία του., Η αναπαράσταση κάθε διανυσματικού δεδομένου είναι συνάρτηση της κλίμακας απόδοσης. Για παράδειγμα η πόλη σε έναν χάρτη κλίμακας 1:50.000 αναπαριστάται ως σημείο, ενώ στην κλίμακα 1:5.000 ως σειρά πολυγώνων.

Κατά τη διαδικασία ένωσης γραμμών για τη δημιουργία πολυγώνων συνήθως προκύπτουν λάθη ψηφιοποίησης. Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν ένα πολύγωνο δεν είναι κλειστό ή όταν η γραμμή κλεισίματος του πολυγώνου είναι μεγαλύτερη από την κανονική. Αυτά τα λάθη διορθώνονται ένα προς ένα από τον χρήστη και η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα, ή ημιαντόματα μέσω της τοπολογίας, μέθοδο ιδιαίτερα ακριβή και λιγότερο χρονοβόρα. Τοπολογία είναι μία μαθηματική διαδικασία που χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τη σύνδεση, τη συνέχεια και τη γειτνίαση των χαρακτηριστικών στοιχείων ενός ψηφιακού χάρτη. Άρα μέσω της δόμησης, της χρήσης και του ελέγχου της τοπολογίας, διορθώνονται λάθη ψηφιοποίησης που αναφέρθηκαν παραπάνω.

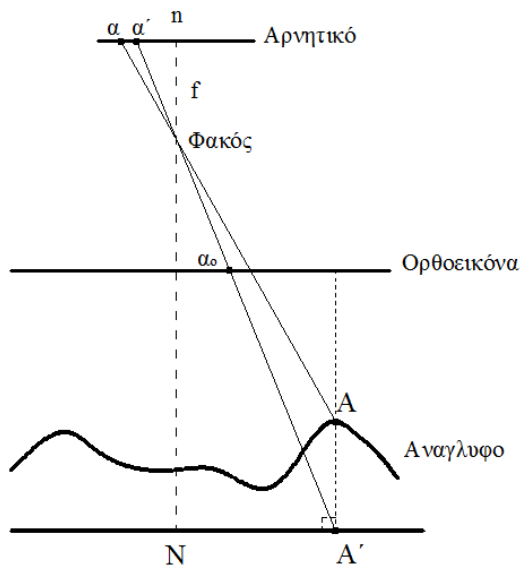


Εικόνα 2.13 Ψηφιακά διανυσματικά δεδομένα (Εθνικό Κτηματολόγιο).

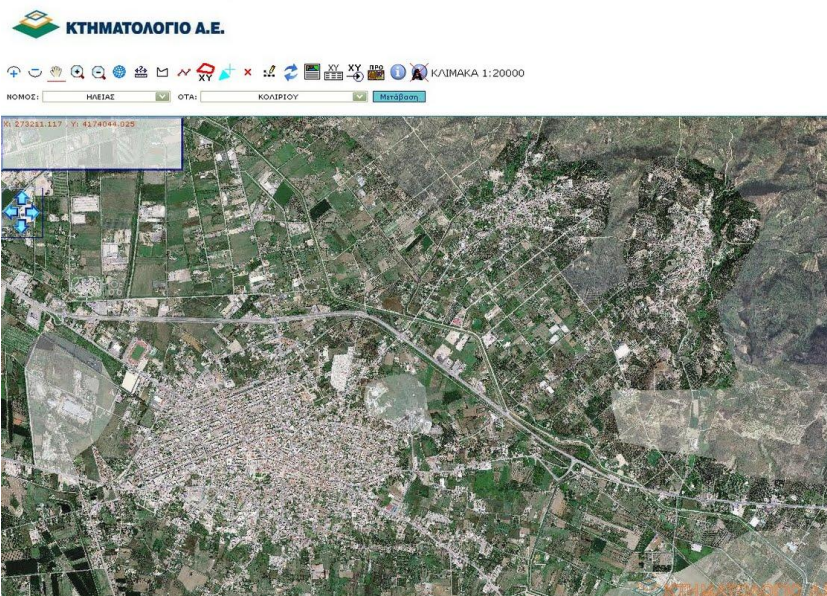
Γ) Ορθοφωτοχάρτες

Μία φωτογραφία η οποία είναι ορθογραφική προβολή της περιοχής που απεικονίζει καλείται ορθοφωτογραφία ή ορθοεικόνα. Η κλίμακα μιας εικόνας είναι συνάρτηση του ύψους πτήσης και του αναγλύφου της περιοχής εξαιτίας της κεντρικής προβολής. Στην ορθογραφική προβολή, οι ακτίνες προβολής κάθε σημείου είναι κάθετες σε ένα οριζόντιο επίπεδο αναφοράς (Σχήμα 2.11) που σημαίνει ότι το υψόμετρο κάθε σημείου δεν επηρεάζει την προβολική απεικόνισή της, άρα και ότι η κλίμακα στην εικόνα είναι συνεχής. Απαραίτητη προϋπόθεση για την παραγωγή ορθοφωτογραφιών είναι η χρήση ενός ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου από το οποίο γίνεται η εξάλειψη του αναγλύφου.

Ο εμπλουτισμός της ορθοφωτογραφίας με χαρτογραφικά στοιχεία όπως π.χ. συντεταγμένες και τοπωνύμια ονομάζεται ορθοφωτοχάρτης (Εικόνα 2.14). Ο ορθοφωτοχάρτης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος διότι περιλαμβάνει τη χαρτογραφική πληροφορία που εμπεριέχεται στους συμβατικούς χάρτες όπως επίσης και το σύνολο των πληροφοριών που περιέχει η αεροφωτογραφία προέλευσης.



Σχήμα 2.11 Η αρχή δημιουργία της ορθοεικόνας.



Εικόνα 2.14 Ορθοφωτοχάρτης (Κτηματολόγιο Α.Ε. 2015).

2.3 Στοιχεία Φωτοερμηνείας

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η επιστήμη της Φωτοερμηνείας έχει ως σκοπό την αναγνώριση και τον προσδιορισμό φυσικών ή ανθρωπογενών χαρακτηριστικών μέσω διαδικασιών ανάλυσης και ερμηνείας αεροφωτογραφιών, συνεπώς τις χρησιμοποιεί για τη λήψη ποιοτικών πληροφοριών.

2.3.1 Φάσεις Φωτοερμηνείας

Η διαδικασία της φωτοερμηνείας διακρίνεται στις παρακάτω φάσεις:



Σχήμα 2.12 Φάσεις φωτοερμηνείας.

Κατά την «Προκαταρκτική εξέταση» αποφασίζεται ποιά τεχνική ή διαδικασία θα εφαρμοστεί ώστε να προσδιοριστούν όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά όπως είδος φωτισμού, μεγέθυνση ή είδος παρατήρησης (στερεοσκοπική ή μονοσκοπική) ενώ κατά τον «Εντοπισμό» διαπιστώνεται σε ποιά περιοχή υπάρχει χρήσιμη πληροφορία. Στη φάση της «Αναγνώρισης» παρατηρούνται τα χαρακτηριστικά του αντικείμενου (μέγεθος, σχήμα κ.λπ.) και σύμφωνα με αυτά αναγνωρίζεται ως γνωστό αντικείμενο, ενώ κατά την «Ταυτοποίηση» το αντικείμενο που έχει αναγνωρισθεί, ταξινομείται βάσει του ονόματος συγκεκριμένης ομάδας. Η «Ανάλυση» είναι η διαδικασία που περιλαμβάνει τον διαχωρισμό ενός συνόλου, σε επί μέρους τμήματα. Πριν αρχίσει η ανάλυση, επιλέγονται τα αντικείμενα και τα χαρακτηριστικά που θα αποτελέσουν μέρος της. Με βάση συγκεκριμένα ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία των αντικειμένων ή των χαρακτηριστικών τους, οριοθετούνται αυτά σε ομοιογενείς ομάδες. Κατά την «Ταξινόμηση» τα αντικείμενα σύμφωνα με κάποιο κοινό αλλά σημαντικό χαρακτηριστικό, ανάλογα με την εφαρμογή, ομαδοποιούνται σε ένα αριθμό κατηγοριών. Τέλος, κατά τη φάση των «Πορισμάτων - Συμπερασμάτων» συνδυάζονται οι παρατηρήσεις και τα στοιχεία που ελήφθησαν από τις αεροφωτογραφίες με τις γνώσεις από άλλες πηγές και εξάγονται τα συμπεράσματα.

2.3.2 Φωτοερμηνευτικά χαρακτηριστικά

Η τυποποίηση της φωτοερμηνευτικής γνώσης για ένα συγκεκριμένο αντικείμενο γίνεται με μια σειρά από ιδιότητες, τα φωτοερμηνευτικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι τα παρακάτω (Philipson eds. 1997):

1. Φωτογραφικός τόνος

Ο φωτογραφικός τόνος του γκρι είναι μια παράμετρος που εκφράζει τη σχετική ποσότητα του φωτός που ανακλάται από ένα αντικείμενο και καταγράφεται από το συγκεκριμένο καταγραφικό όργανο (φωτογραφική μηχανή, πολυφασματικός σαρωτής, κ.ά.). Στις ασπρόμαυρες αεροφωτογραφίες ο τόνος κυμαίνεται από άσπρο έως μαύρο με ενδιάμεσες διαβαθμίσεις του γκρι. Το ανθρώπινο μάτι έχει την ικανότητα να διακρίνει μικρές αλλαγές του τόνου του γκρι (συνήθως μέχρι 64). Σε πολλές όμως περιπτώσεις, πιο σημαντικό για τη φωτοερμηνεία δεν είναι ο τόνος του γκρι, αλλά η διαφορά τόνου. Ο τόνος ενός αντικειμένου δεν είναι πάντοτε ο ίδιος σε όλες τις αεροφωτογραφίες αλλά υφίσταται σημαντικές μεταβολές. Οι αιτίες των αλλαγών αυτών είναι οι εξής:

- Το είδος του καταγραφικού μέσου (ευαισθησία φωτογραφικού φιλμ, κανάλι πολυφασματικού σαρωτή κ.ά.)
- Οι κλιματολογικές συνθήκες κατά τη στιγμή της λήψης των αεροφωτογραφιών. Όταν για παράδειγμα η γωνία του ήλιου είναι μικρή, τότε η προσπίπτουσα ακτινοβολία μειώνεται. Επομένως ανάλογα μειώνεται και η ανακλώμενη από τα αντικείμενα ακτινοβολία και κατ' επέκταση η αποτύπωσή τους με σκουρότερους τόνους πάνω στο φιλμ.
- Οι τοπογραφικές συνθήκες της περιοχής. Η έκθεση και η κλίση του αναγλύφου επηρεάζουν την ποσότητα της προσπίπτουσας και επομένως και της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Επίσης, οι συνθήκες υγρασίας του εδάφους επηρεάζουν τον τόνο. Όσο περισσότερη είναι η υγρασία, τόσο σκουρότερος είναι ο τόνος.
- Η θέση του αντικειμένου πάνω στην αεροφωτογραφία. Όσο πιο μακριά είναι το αντικείμενο από το κέντρο της αεροφωτογραφίας, τόσο σκουρότερος είναι ο τόνος. Αυτό σε μεγάλο βαθμό διορθώνεται με τη χρήση αντισταθμιστικών φίλτρων.

Για τους παραπάνω λόγους, η ταξινόμηση των αντικειμένων με κριτήριο μόνο τις απόλυτες τιμές του τόνου εμπεριέχει τα στοιχεία της υποκειμενικότητας και γι' αυτό πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή.

Έχει αποδειχθεί ότι το ανθρώπινο μάτι έχει τη δυνατότητα να διακρίνει πολύ περισσότερες διαβαθμίσεις ενός χρώματος απ' ό,τι του γκρι. Αυτό δείχνει ότι η δυνατότητα συλλογής λεπτομερειών από έγχρωμες αεροφωτογραφίες είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι στις ασπρόμαυρες. Επομένως, όπως στις ασπρόμαυρες αεροφωτογραφίες έτσι και στις έγχρωμες, η αντίθεση του χρώματος, η οποία μπορεί να μεταβληθεί μέσα σε ορισμένα όρια κατά την εκτύπωση του φιλμ, έχει μεγάλη σημασία για τη φωτοερμηνεία των αντικειμένων. Η απόδοση του χρώματος επηρεάζεται από τους παραπάνω παράγοντες όπως για παράδειγμα ο τόνος του γκρι, με αποτέλεσμα τυχόν διαφορές να μην έχουν σε πολλές περιπτώσεις πρακτική αξία από πλευράς φωτοερμηνείας.



Εικόνα 2.15 Φωτογραφικοί τόνοι του γκρι (Μπαντέκας 1980).

2. Μέγεθος

Το μέγεθος ενός αντικειμένου είναι ένα από τα πιο σημαντικά ποσοτικά στοιχεία της φωτοερμηνείας. Το μέγεθος διακρίνεται σε σχετικό και απόλυτο. Ως σχετικό μέγεθος, καλείται το μέγεθος ενός αγνώστου αντικειμένου σε σχέση με ένα γνωστό. Το απόλυτο μέγεθος ενός αντικειμένου είναι επίσης σημαντικό στη φωτοερμηνεία και υπολογίζεται με φωτογραμμετρικές μεθόδους. Γενικά το μέγεθος εξαρτάται από την κλίμακα της αεροφωτογραφίας. Για παράδειγμα, το μέγεθος ενός θάμνου σε σχέση με το μέγεθος ενός δέντρου, ή ενός μονοπατιού σε σχέση με ένα δρόμο.

3. Σχήμα

Το σχήμα των αντικειμένων δίνει σημαντικές πληροφορίες στον φωτοερμηνευτή. Πολλά αντικείμενα αναγνωρίζονται εύκολα μόνο από το σχήμα τους μετά από μονοσκοπική ή στερεοσκοπική παρατήρηση των αεροφωτογραφιών. Το σχήμα των αντικειμένων επηρεάζεται από τη θέση που έχουν αυτά στην αεροφωτογραφία (κυρίως μεγάλης κλίμακας). Για παράδειγμα στην περίπτωση ενός κτιρίου που βρίσκεται στο κέντρο της αεροφωτογραφίας, παρατηρείται μόνο σε κάτοψη. Αν όμως το κτίριο βρίσκεται προς τα άκρα της αεροφωτογραφίας, τότε λόγω της τοπογραφικής μετατόπισης το κτίριο παρατηρείται υπό λοξή γωνία, οπότε φαίνεται και το ύψος του κτιρίου.

4. Σκιά

Οι σκιές των αντικειμένων αποτελούν ένα πολύ σημαντικό στοιχείο της φωτοερμηνείας. Το μέγεθος και το σχήμα της σκιάς εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του αντικειμένου. Το μέγεθος της σκιάς εξαρτάται επίσης και από τη θέση του ηλίου.

Στην περίπτωση όμως των αεροφωτογραφιών, το μέρος της σκιάς που φαίνεται εξαρτάται από το μέγεθος της τοπογραφικής μετατόπισης που υφίσταται το αντικείμενο και από τη θέση του αντικειμένου σε σχέση με το ναδίρ. Δηλαδή αν η θέση του αντικειμένου είναι με τρόπο ώστε η κατεύθυνση της μετατόπισης να συμπίπτει με την κατεύθυνση της σκιάς του, τότε ένα μέρος της ή ακόμα και ολόκληρη η σκιά καλύπτεται από το μετατοπισμένο αντικείμενο.

Η ύπαρξη της σκιάς αφενός μεν διευκολύνει αφετέρου δε δημιουργεί προβλήματα στη φωτοερμηνεία.

Τα πλεονεκτήματα μπορεί να συνοψιστούν στα παρακάτω:

- Είναι δυνατή η μέτρηση του ύψους φυσικών και ανθρωπογενών χαρακτηριστικών.
- Είναι δυνατή η αναγνώριση μεμονωμένων ή ομαδοποιημένων αντικειμένων.
- Βελτιώνεται η αίσθηση του αναγλύφου.

Αντίθετα τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Είναι αδύνατη ή πολύ δύσκολη η συλλογή πληροφοριών από τις περιοχές που καλύπτονται από σκιά. Η περίπτωση αυτή είναι αρκετά σοβαρή, γιατί ορισμένες φορές λόγω του αναγλύφου ή του νέφους, καλύπτονται ολόκληρες περιοχές από τη σκιά.
- Γίνεται υπερεκτίμηση της κάλυψης φυσικών και ανθρωπογενών χαρακτηριστικών από τη σκιά.



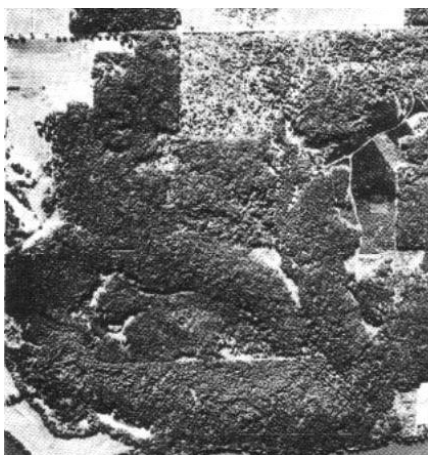
Εικόνα 2.16 Σχήμα - Σκιά (Μπαντέκας 1980)

5. Φωτογραφική υφή

Υφή είναι η συχνότητα αλλαγών του τόνου σε μία αεροφωτογραφία, η οποία προκύπτει όταν ένας αριθμός πολύ μικρών αντικειμένων παρατηρούνται ως σύνολο. Διακρίνεται σε στιλπνή (επιφάνεια ήρεμου νερού), απαλή (γυμνό έδαφος), λεπτή (εγκαταλειμμένοι για χρόνια αγροί, αναγέννηση δάσους), τραχεία (πυκνό δάσος), κυματοειδής (επιφάνεια ελαφρώς ταραγμένης θάλασσας), γραμμική (καλλιέργειες σε γραμμική διάταξη) και κηλιδωτή. Γενικά η υφή είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού του τόνου, του μεγέθους, του σχήματος και της σκιάς των «μικρών αντικειμένων». Λόγω της ασάφειας των ορίων η περιγραφική αυτή ταξινόμηση της υφής έχει μεγαλύτερη αξία όταν σε κάθε περίπτωση συνοδεύεται από φωτογραφικά παραδείγματα.

6. Διάταξη

Ως διάταξη ορίζεται η κατά χώρο διεύθυνση των αντικειμένων. Αυτή μπορεί να είναι φυσική ή ανθρωπογενής. Ο προσδιορισμός και η μελέτη της διάταξης γίνεται ευκολότερα στις αεροφωτογραφίες απ' ό,τι στο έδαφος. Όταν η διάταξη είναι δύσκολο να αναγνωρισθεί, όπως στην περίπτωση της πολύ μικρής κλίμακας αεροφωτογραφιών, τότε μιλάμε για φωτογραφική υφή.



Εικόνα 2.17 Η διαφορετική πυκνότητα του δάσους ερμηνεύεται από τον τόνο, την υφή και τη διάταξη (Μπαντέκας 1980)

7. Σχέση με το περιβάλλον/Συσχέτιση

Το στοιχείο αυτό δεν σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Ο φωτοερμηνευτής συσχετίζει τα αντικείμενα ή τη θέση αυτών με άλλα αντικείμενα ή με τον περιβάλλοντα χώρο. Για παράδειγμα, η ύπαρξη κτιρίων μπορεί να βοηθήσει και να προσανατολίσει την αναγνώριση άλλων ανθρωπογενών κατασκευών (δρόμοι, μονοπάτια). Επομένως, η συσχέτιση αναφέρεται στην ερμηνεία που δίνουμε βασισμένη στη γνώση και στην εμπειρία μας κατά τη φωτοερμηνευτική διαδικασία.

Πολλά από τα παραπάνω φωτοερμηνευτικά χαρακτηριστικά έχουν σχετικές τιμές γιατί εξαρτώνται από άλλα χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα ο φωτογραφικός τόνος που εξαρτάται από το ύψος του ήλιου, τη στιγμή της λήψης, την εποχή κ.ά.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Ελληνόγλωσση

Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.), 2015. Διαθέσιμο στο: <http://www.gys.gr> [Πρόσβαση 20/06/2015].

Κτηματολόγιο Α.Ε., 2015. Διαθέσιμο στο: <http://www.ktimatologio.gr> [Πρόσβαση 20/06/2015].

Μηλιαρέσης, Γ., 2003. *Φωτοερμηνεία - Τηλεπισκόπηση*, Αθήνα: Ίων.

Μπαντέκας, Ι., 1980. *Φωτογραμμετρία, τόμος Ι*. 2η έκδ., Αθήνα: Γραφικάί Τέχναι «ΑΤΤΙΚΑ».

Περάκης, Κ., 1999. *Φωτοερμηνεία και Τηλεπισκόπηση*, (με ανανεώσεις μέχρι το 2009). Βόλος: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας.

Ξενόγλωσση

Blachut, T.J. and Burkhardt, 1988. *Historical Development of Photogrammetric Methods and Instruments*. ASPRS Publications.

Google Earth, 2015.

Kraus, K., 2000. *Photogrammetry, Volume 1: Fundamentals and Standard Processes*. 4th ed., Köln: Dümmler.

Manuel de Photo-interprétation, 1970. Paris: Éditions Technip.

Mikhail, E.M., Bethel, J.S. and McGlone, J.C., 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*. New York: John Wiley & Sons.

International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2015. Διαθέσιμο στο: <http://www.isprs.org> [Πρόσβαση 21/06/2015].

Philipson, W. Editor, 1997. *The Manual of Photographic Interpretation*. 2nd ed., ASPRS Publications.

Ziemann, H. and El Hakim, S.F., 1982. On the definition of lens distortion reference data with odd power polynomials. *The International Archives of Photogrammetry*, 24 (1), 123-130.

Κεφάλαιο 3 Δορυφόροι και αισθητήρες

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης

Σύνοψη

Η έννοια των τεχνητών δορυφόρων και η σχέση τους με την Τηλεπισκόπηση παρουσιάζονται στην εισαγωγή και μετά από ένα σύντομο ιστορικό περιγράφονται η κίνηση και οι κατηγοριοποίησή τους σε δύο ομάδες σε αναφορικά με τον ήλιο και τη γη. Αφού ορισθούν και κατηγοριοποιηθούν οι παθητικοί αισθητήρες, παρουσιάζονται και οι ενεργητικοί και οι κυριότερες εφαρμογές τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότεροι γεωστατικοί και μετεωρολογικοί δορυφόροι πολιτικής τροχιάς, οι πρώτοι δορυφόροι ERS της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Επιτροπής (European Space Agency - ESA) και ο δορυφόρος ENVISAT. Το Ευρωπαϊκό Επιστημονικό Πρόγραμμα Κοπέρνικος, θεωρείται η βάση για τη δημιουργία των σύγχρονων δορυφόρων Sentinel που παρουσιάζονται στη συνέχεια και δημιουργήθηκαν για την παροχή διαφόρων τύπων δορυφορικών δεδομένων όπως κλιματικά, ωκεανογραφικά, χρήσεων γης κ.ά. Οι δορυφόροι κυρίως καταγραφής των γήινων πόρων μεσαίας και υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας παρουσιάζονται στη συνέχεια με το δίδυμο των δορυφόρων TERRA –AQUA πρώτα και τους πλέον γνωστούς και χρησιμοποιούμενους Landsat και SPOT μετά. Αφού παρουσιαστούν αναλυτικά οι δορυφόροι υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας IKONOS, WorldView3, GeoEye-1 και Quickbird της Εταιρείας Digital Globe, παρουσιάζονται τέλος και οι δορυφόροι Pleiades που δημιουργήθηκαν από τον Γαλλικό Κέντρο Διαστημικών Μελετών (Centre Nationale d'Etudes Spatiales – CNES). Η ανάγκη των ειδικών και μη για την ύπαρξη καταλόγων ει δυνατόν όλων των δορυφόρων Τηλεπισκόπησης οδήγησε στη δημιουργία διαφόρων ιστότοπων που περιέχουν την μεγαλύτερη πληθώρα δορυφόρων Τηλεπισκόπησης (και όχι μόνον) σε παγκόσμια κλίμακα και που εκτίθενται στο τέλος του κεφαλαίου αυτού.

3.1 Γενικά

Παρόλο που ο όρος Τηλεπισκόπηση μπορεί να γενικευθεί σε οποιαδήποτε ενέργεια καταγραφής από απόσταση και ανάλυσης των εικόνων που προκύπτουν (ακόμη και αυτή των ανθρώπινων ματιών), λόγω της πολυφασματικότητάς της και της προγενέστερης ύπαρξης των αεροφωτογραφιών έχει κυριαρχήσει η χρήση του όρου για την καταγραφή και την ανάλυση δορυφορικών εικόνων.

Ουσιαστικά χάρις στην εξέλιξη και ανάπτυξη των δορυφόρων γεννήθηκε η (δορυφορική) τηλεπισκόπηση. Έτσι το κυρίως μέρος της τηλεπισκόπησης είναι στενά συνδεδεμένο με τους (τεχνητούς) δορυφόρους και τις δορυφορικές εικόνες που καταγράφουν και μας παρέχουν.

Η έννοια της λέξης «δορυφόρος» εστιάζεται κυρίως στους τεχνητούς δορυφόρους που είναι τεχνητά συστήματα που πετούν γύρω από την γη ή γενικότερα από κάποιο ουράνιο σώμα και έχουν κατασκευαστεί για ποικίλες χρήσεις, οι κυριότερες των οποίων είναι οι τηλεπικοινωνίες και η παρατήρηση μέσω δορυφορικών εικόνων. Γενικά όμως δορυφόρος είναι ένα φυσικό ή τεχνητό αντικείμενο ή σώμα που κινείται γύρω από ένα άλλο μεγαλύτερο ουράνιο σώμα.

Τι είναι όμως ακριβώς οι τεχνητοί δορυφόροι; Είναι ένα σύστημα που στην γενική μορφή του αποτελείται από μια πηγή ενέργειας που μπορεί να είναι κάποιου είδους ηλεκτρικού συσσωρευτή (μπαταρίας) ή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος που παράγει ηλεκτρική ενέργεια (από την ηλιακή που συλλέγει) και μίας κεραίας (αντένα) η οποία δέχεται και εκπέμπει πληροφορίες υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικού σήματος (NASA 2015).

3.2 Ιστορικό

Με μια απλή φωτογραφική μηχανή μεταδόθηκαν οι πρώτες αεροφωτογραφίες της γης. Δυστυχώς ήταν καταγεγραμμένες για στρατιωτικούς σκοπούς, αφού ελήφθησαν από ένα γερμανικό πύραυλο V-2 αμέσως μετά τη λήξη του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου.

Αναφέρουμε τους πυραύλους που εκτοξεύθηκαν πρώτοι χωρίς να μεταφέρουν επάνω τους φωτογραφικά συστήματα:

1957 Sputnik 1: ΕΣΣΔ

Στις 3 Νοεμβρίου 1957 ο Sputnik 2 μετέφερε ένα αδέσποτο σκυλί που ήταν το πρώτο έμβιο ον που στάλθηκε στο διάστημα, τη διάσημη Laica.

1958 Explorer 1: ΗΠΑ

Αντίθετα, εφδιασμένοι με φωτογραφικές μηχανές ή ακόμα και TV κάμερες πέταξαν οι εξής δορυφόροι: COSMOS 4 - ΕΣΣΔ, οι δορυφόροι Discover (1959-60) - ΗΠΑ και TIROS (1960) - ΗΠΑ (με TV κάμερα ο πρώτος).

Τέλος, μετά από αυτές τις επιτυχημένες πτήσεις, έχουμε τις εξής επανδρωμένες πτήσεις δορυφόρων:

Από τις ΗΠΑ, τους δορυφόρους Mercury, Gemini και Apollo της NASA και από την ΕΣΣΔ Vostok, Voskod και Soyuz.

Εκτός αυτών, υπάρχουν και οι πτήσεις των διαστημικών εργαστηρίων Skylab και Space Shuttles της NASA από τις ΗΠΑ και του Salut από την πρώην ΕΣΣΔ.

3.3 Η κίνηση των δορυφόρων γύρω από τη γη

Εντελώς διαφοροποιημένοι από τα άλλα συστήματα παρατήρησης της επιφάνειας της γης, όπως τα μετεωρολογικά μπαλόνια και τα αεροπλάνα, οι δορυφόροι έχουν γενικά μια καθορισμένη εκ των προτέρων τροχιά. Η τροχιά αυτή υπακούει στους νόμους του Κέπλερ, που είναι οι εξής:

- Η τροχιά ενός δορυφόρου βρίσκεται σε ένα επίπεδο. Για την ακρίβεια, ο δορυφόρος διαγράφει μια έλλειψη της οποίας μια εστία (από τις δύο) κατέχει η γη.
- Ο δορυφόρος διαγράφει ίσες επιφάνειες σε ίσους χρόνους.

Αρα, η κίνηση του είναι περιοδική και οι αρχικές συνθήκες της κίνησής του, δηλ. θέση και ταχύτητα τη στιγμή που ο δορυφόρος εγκαταλείπεται από τον πύραυλο που τον μεταφέρει, προσδιορίζουν πλήρως την κίνησή του. Αντίστροφα, σύμφωνα με τις παραμέτρους της τροχιάς που θέλουμε, κανονίζουμε και τα διάφορα στοιχεία στην αποστολή του δορυφόρου (Couzy 1981).

Παρ' όλο όμως που η τροχιά του δορυφόρου είναι έλλειψη, δε συμβαίνει το ίδιο και με την προβολή της στην επιφάνεια της γης, δηλ. με το ίχνος της. Έτσι στην διάρκεια μιας περιόδου T του δορυφόρου, η γη έχει γυρίσει γύρω από τον άξονά της κατά μία γωνία ίση με $2\pi(T/24)$ όπου T σε ώρες.

Μπορούμε να φανταστούμε ότι η τροχιά του δορυφόρου μοιάζει με μια κλωστή που τυλίγεται γύρω από ένα κουβάρι, όταν αυτό γυρίζει γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα.

Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- 1ον Η περίοδος T να είναι πολλαπλάσιο του 24.
- 2ον Η περίοδος T να είναι υποπολλαπλάσιο του 24.

Για τους χαμηλά (σε ύψος) ευρισκόμενους δορυφόρους, δηλ. γι' αυτούς που βρίσκονται μεταξύ 500 και 1500Km, η περίοδος τους μεταβάλλεται, ανάλογα με το δορυφόρο από 1,5 έως 2 ώρες.

Οι δορυφόροι αυτοί διαγράφουν 12 έως 16 κύκλους γύρω από τη γη σε 24 ώρες και οι τροχιές αυτές κόβουν τον ισημερινό σε αποστάσεις από 2500 έως 3350Km, γεγονός που οδηγεί τους κατασκευαστές των συλλεκτών (οργάνων) εικόνων που βρίσκονται στον δορυφόρο να δημιουργούν αρκετά μεγάλα ανοίγματα κάλυψης της επιφάνειας του εδάφους, με σκοπό να καλύψουν ολόκληρο τον ισημερινό.

Γενικά, η περίοδος ενός δορυφόρου καθορίζεται από τον τύπο $T = 24/(E + p/n)$ όπου E είναι ένας ακέραιος και p/n ένα ανάγωγο κλάσμα.

Ο δορυφόρος καταγράφει εκ νέου τα ίδια σημεία στην επιφάνεια της γης σε n ημέρες, έχοντας διαγράψει $nE + P$ τροχιές, των οποίων οι προβολές στην επιφάνεια της γης είναι μετατοπισμένες ως προς αυτές της προηγούμενης ημέρας.

Εάν θεωρήσουμε $P=1$ ή $P=n-1$ οι τροχιές αυτές συμπίπτουν μεταξύ τους. (Γιατί;)

Το ίχνος της τροχιάς (η προβολή της στη γη) κόβει τον ισημερινό σε $P+nE$ σημεία που απέχουν κατά $2\pi/p+nE$ σε γωνιακή απόσταση, ή $40000\text{km}/p+nE$ σε μήκος, μειώνοντας έτσι αισθητά το πλάτος κάλυψης του δορυφόρου σε κάθε πέρασμα.

Διακρίνουμε δύο ειδών δορυφόρους, ως προς τις τροχιές τους:

1) Δορυφόροι ηλιοσύγχρονοι

Η μη σφαιρικότητα της γης δημιουργεί μια μετάπτωση στο επίπεδο της τροχιάς του δορυφόρου, κατά μια ορισμένη γωνία κλίσης, ως προς τον άξονα περιστροφής της γης. Εκμεταλλευόμενοι το γεγονός αυτό και δίνοντας π.χ. μια γωνία μετάπτωσης 2π το χρόνο στο επίπεδο της τροχιάς του δορυφόρου, πετυχαίνουμε μια κλίση κατά 99° που οδηγεί στον ηλιοσυχρονισμό του δορυφόρου.

Αυτό σημαίνει ότι, κατά την διάρκεια των διαφόρων εποχών του χρόνου που ο ήλιος φωτίζει τα ίδια αντικείμενα (στη διάρκεια κάθε ημέρας) αλλά υπό διαφορετική γωνία, ο δορυφόρος είναι τοποθετημένος κατά τέτοιο τρόπο, ώστε οι συνθήκες φωτισμού στα διάφορα περάσματά του να είναι οι ίδιες και να μην εξαρτώνται από τη σχετική θέση του ήλιου. Αυτού του είδους οι δορυφόροι είναι σχεδόν πολικής τροχιάς και η κάλυψή τους (της επιφάνειας της γης) είναι σχεδόν καθολική.

Οι περισσότεροι από τους δορυφόρους που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση είναι τέτοιου είδους.

2) Δορυφόροι γεωστατικοί

Οι δορυφόροι που ακολουθούν τους παραλλήλους προς τον ισημερινό και έχουν περίοδο τροχιάς 24 ώρες λέγονται γεωστατικοί.

Έχοντας τέτοιου είδους χαρακτηριστικά φαίνονται ακίνητοι από την επιφάνεια της γης. Αυτό όμως, από την πλευρά της Φυσικής, είναι δυνατόν μόνον στο ύψος των 36.000Km, με αποτέλεσμα η διακριτική τους ικανότητα να είναι αρκετά μικρή. Σε αντίποδα, αυτού του ελαττώματος έχουμε δύο σημαντικά προτερήματα:

- Μια συνεχή παρατήρηση της ίδιας περιοχής της επιφάνειας της γης.
- Μια μεγάλη επιφάνεια κάλυψης.

Είναι δε τόσο μεγάλη η κάλυψη που μπορούμε να πετύχουμε με τέτοιους δορυφόρους, ώστε τρεις δορυφόροι να αρκούν για την ολοκληρωτική κάλυψη της επιφάνειας της γης.

Τέτοιοι δορυφόροι στην Τηλεπισκόπηση χρησιμοποιούνται κυρίως για μετεωρολογικούς σκοπούς, αλλά και για τις τηλεπικοινωνίες και την τηλεόραση.

Τέλος, η διάρκεια ζωής τους είναι σαφώς μεγαλύτερη από τους ηλιοσύγχρονους δορυφόρους, που πετούν μεταξύ 500 και 1000Km και των οποίων η ζωή συνήθως κυμαίνεται περισσότερα χρόνια.

3.4 Παθητικοί και Ενεργητικοί Αισθητήρες

3.4.1 Παθητικοί Αισθητήρες

Οι παθητικοί αισθητήρες δεν εκπέμπουν οι ίδιοι ακτινοβολία αλλά ανιχνεύουν και καταγράφουν την ανακλώμενη ηλιακή και την θερμική ακτινοβολία στα ορατά και στα υπέρυθρα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι περισσότεροι δορυφόροι –μεταξύ των οποίων και ο Landsat, ένας από τους πιο αντιπροσωπευτικούς δορυφόρους - είναι εφοδιασμένοι με έναν πολυφασματικό σαρωτή ο οποίος καταγράφει το ηλεκτρομαγνητικό σήμα που προέρχεται από την ίδια περιοχή της γήινης επιφάνειας, την ίδια χρονική στιγμή αλλά σε διάφορα μήκη κύματος, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο τα διαφορετικά φασματικά κανάλια μιας πολυφασματικής δορυφορικής εικόνας (SEOS 2011).

Οι δορυφόροι αυτοί περιλαμβάνουν διαφόρων τύπων όργανα τα κυριότερα των οποίων καταγράφουν στα ορατά, εγγύς υπέρυθρο, θερμικό υπέρυθρο, και τμήματα της περιοχής των μικροκυμάτων του Η/Μ φάσματος. Αυτά είναι:

Επιταχυνσιόμετρο: καταγράφει την γραμμική επιτάχυνση σε μία ή περισσότερες διαστάσεις καθώς και την γωνιακή επιτάχυνση.

Ραδιόμετρο: μετρά ποσοτικά την ένταση της Η/Μ ακτινοβολίας σε ορισμένα τμήματα του Η/Μ φάσματος. Υπάρχουν ραδιόμετρα για το ορατό, το υπέρυθρο ή τα μικροκύματα.

Απεικονιστικό Ραδιόμετρο: έχει την ιδιότητα να σαρώνει και να δημιουργεί έναν δισδιάστατο πίνακα εικονοστοιχείων από τον οποίο δημιουργείται και η δορυφορική εικόνα ενός φασματικού καναλιού. Η σάρωση πραγματοποιείται ηλεκτρονικά ή μηχανικά

Φασματόμετρο: είναι ένα όργανο που ανιχνεύει, μετρά και αναλύει το φασματικό περιεχόμενο της προσπίπτουσας Η/Μ ακτινοβολίας. Τα συνήθη απεικονιστικά φασματόμετρα χρησιμοποιούν σχάρες ή πρίσματα για τον διασπορά της ακτινοβολίας στον φασματικό διαχωρισμό.

Φασματο-ραδιόμετρο: μετρά την ένταση της ακτινοβολίας σε πολλαπλά φασματικά κανάλια (πολυφασματικό). Μερικές φορές τα φασματικά κανάλια είναι υψηλής φασματικής ανάλυσης σχεδιασμένα για την μέτρηση ειδικών γεωφυσικών παραμέτρων.

Υπερφασματικό ραδιόμετρο: είναι ένας εξελιγμένος πολυφασματικός αισθητήρας που ανιχνεύει εκατοντάδες φασματικά κανάλια πολύ μικρού εύρους, στο ορατό, το υπέρυθρο και το μέσο υπέρυθρο μήκος κύματος του Η/Μ φάσματος. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνει τον διαχωρισμό διαφορετικών καλύψεων γης που αλλάζουν φασματικές ιδιότητες ανά πολύ μικρά διαστήματα μήκους κύματος στο Η/Μ φάσμα (π.χ. στην γεωργία).

Ηχώμετρο: είναι ένα όργανο που μετρά τις κατακόρυφες κατανομές ατμοσφαιρικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική πίεση και συνθετική πολυφασματική πληροφορία.

3.4.2 Ενεργητικοί Αισθητήρες

Οι ενεργητικοί αισθητήρες έχουν την δυνατότητα να εκπέμπουν δική τους ακτινοβολία, το σήμα της οποίας ανακλάται, διαθλάται ή διαχέεται στην γήινη επιφάνεια ή ατμόσφαιρα και να το καταγράφουν στην επιστροφή του. Οι πιο γνωστοί είναι οι αισθητήρες φθορισμού με ακτίνες Laser και τα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar/SAR). Τα ραντάρ (Radar-Radio Detection and Ranging) μπορεί να είναι απεικονιστικά (imaging radars), ραντάρ μετρήσεων των υψομετρικών διαφορών (altimeters) καθώς και σκεδασίμετρα (scatterometers) (Natural Resources Canada 2013).

Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι μπορούν να διαπεράσουν τα σύννεφα, την σχετικά χαμηλή βροχή και το χιόνι και άρα δεν εξαρτώνται από καιρικές συνθήκες, ούτε από συνθήκες φωτισμού του ήλιου δηλαδή είναι επιχειρησιακά ημέρα και νύκτα. Έχουν επίσης την δυνατότητα να διαπερνούν την βλάστηση και το έδαφος μέχρι βάθους περίπου ενός μέτρου. Με μεθόδους αρκετά περίπλοκες και ακριβές μπορούν να εκτιμήσουν την υγρασία του επιφανειακού στρώματος του εδάφους. Τέλος χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές όπως η γεωργία και η δασολογία, η γεωλογία, η υδρολογία, η ωκεανογραφία και η καταγραφή και μελέτη των πάγων στην γήινη επιφάνεια. Επίσης η καταμέτρηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ του εκπεμπόμενου και του επιστρέφοντος σήματος χρησιμεύει για τον υπολογισμό αποστάσεων (και υψομετρικών διαφορών). Βέβαια τα κυριότερα ελαττώματα των ραντάρ είναι ότι λόγω της χαμηλής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας το σήμα που καταγράφουν μπορεί να αλλοιωθεί από παρεμβολές και επιπλέον το σήμα τους δεν έχει πολυφασματικά χαρακτηριστικά (NASA 2014).

Ο ευρωπαϊκός δορυφόρος ERS 2 που πέταξε το 1995 με την πλατφόρμα ARIANNE είναι από τους πιο γνωστούς.

3.5 Οι Μετεωρολογικοί δορυφόροι

Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι και οι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των γήινων πόρων δίνουν πληροφορίες περίπου για τα ίδια μήκη κύματος.

Ίσως η πιο σημαντική διαφορά μεταξύ τους είναι το επί του εδάφους μέγεθος του pixel. Στους μετεωρολογικούς το εικονοστοιχείο είναι της τάξης 1Km x 1Km, ενώ στους υπόλοιπους συνήθως δεν ξεπερνά τα 100m x 100m. Ως προς τις πληροφορίες που αναφέρονται στην έκταση κάλυψης της γήινης επιφάνειας, η σημαντική διαφορά των παραπάνω κατηγοριών είναι ότι εικόνες από μετεωρολογικούς δορυφόρους είναι απαραίτητες για μεγάλες καλύψεις της γήινης επιφάνειας, πράγμα που είναι αδύνατο για τους υπόλοιπους δορυφόρους.

3.5.1 Γεωστατικοί Μετεωρολογικοί Δορυφόροι

Το Δεκέμβριο του 1966, η NASA (National Aeronautics and Space Administration) των ΗΠΑ πέταξε τον πρώτο Δορυφόρο Τεχνολογικών Εφαρμογών (Applications Technology Satellite - ATS 1) που είχε την ικανότητα, με μια φωτογραφική μηχανή που σάρωνε κατά μια διεύθυνση και περιστρεφόταν, να δίνει την εικόνα του γήινου δίσκου κάθε είκοσι λεπτά. Στη συνέχεια η NASA πέταξε τον ATS 3 το Νοέμβριο του 1967, με αποτέλεσμα η Εθνική Διεύθυνση Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA) να θέσει σε εφαρμογή ένα πρόγραμμα «Γεωστατικών Επιχειρησιακών

Περιβαλλοντικών Δορυφόρων» (Geostationary Operational Environmental Satellite - GOES) που από τον Οκτώβριο του 1975 έχει πετάξει πέντε δορυφόρους. Εξαιτίας ατελειών όμως, κατασκευάστηκε και μπήκε σε τροχιά ο δορυφόρος GOES 6, ο οποίος είναι πλήρως λειτουργικός. Η καταγραφή της γήινης επιφάνειας πραγματοποιείται από ένα Ραδιόμετρο Σάρωσης-Στροφής στο Ορατό και το Υπέρυθρο Φάσμα (0,66 - 0,7μm και 10,5 - 12,6μm).

Στην Ευρώπη, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (European Space Agency - ESA) πέταξε το 1973 και το 1981 δύο δορυφόρους, τον METEOSAT 1 και 2, που καλύπτουν 55° πάνω και κάτω από τον Ισημερινό και έχουν πολύ καλή κάλυψη της Αφρικής και της Νότιας Ευρώπης, αλλά φτωχή της Βόρειας. Τα κανάλια και η Χωρική Διακριτική Ικανότητα (ΧΔΙ) που διαθέτουν είναι τα παρακάτω:

Κανάλι	Εύρος Μήκος Κύματος σε μm	ΧΔΙ σε Km σε 0ο Γεωγρ. Πλάτος και Μήκος
Ορατό - Εγγύς υπέρυθρο	0,4 - 1,1	2,5
Υδατικής εξάτμισης	5,7 - 7,1	5,0
Θερμικό Υπέρυθρο	10,5 - 12,5	5,0

Πίνακας 3.1 Φασματικά κανάλια και Χωρική Διακριτική Ικανότητα των δορυφόρων Meteosat 1 και 2.

Τέλος, στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος EUMETSAT πέταξαν 3 δορυφόροι METEOSAT με τον πύραυλο Αριάδνη το 1988, το 1989 και το 1990.

Εκτός των ΗΠΑ και της Ευρώπης, η Ιαπωνία και η Ινδία έχουν πετάξει γεωστατικούς μετεωρολογικούς δορυφόρους.

Η Ιαπωνία, τον Ιούνιο του 1977, πέταξε τον Himawari 1 (GMS 1), το διάδοχό του GMS 2, τον Αύγουστο του 1981, και το διάδοχο του τελευταίου, τον GMS 3, τον Αύγουστο του 1984.

Είναι τοποθετημένοι σε 140° Ανατ. γεωγρ. μήκος και 0° πλάτος και ιδιαίτερα χρήσιμοι στην προειδοποίηση για καταιγίδες και τυφώνες που προέρχονται από τη Δυτική Ασία.

Τέλος, η Ινδία πέταξε τους Insat 1A και 1B το 1982 με τοποθετήσεις 0° πλάτος και 74° και 94° ανατολικά μήκος και που συνδυάζουν τρία βασικά πλεονεκτήματα: τηλεπικοινωνιακή σύνδεση, απευθείας ραδιοφωνικές εκπομπές και μετάδοση μετεωρολογικών εικόνων. Είναι εφοδιασμένοι (ο πρώτος σταμάτησε το Σεπτέμβριο του 1982) με ένα Πολύ Υψηλής Επίλυσης Ραδιόμετρο (Ultra High Resolution Radiometer) με δύο κανάλια στο ορατό και στο θερμικό υπέρυθρο και με μέγεθος pixel 2,75Km και 11Km αντίστοιχα.

Σημειώνουμε ότι ο τυφώνας Έλενα, που χτύπησε τις ακτές του Μισισσιπή με ταχύτητες μεγαλύτερες από 100 μίλια ανά ώρα, έτυχε παρακολούθησης από τον GOES δορυφόρο και έτσι περισσότεροι από ένα εκατομμύριο άνθρωποι που θα ήταν εκτεθειμένοι στον κίνδυνο προειδοποιήθηκαν από τις αρχές και εγκατέλειψαν τα σπίτια τους. Το ίδιο και σε μεγαλύτερο βαθμό συνέβη λίγο αργότερα με τον τυφώνα Γκλόρια.

3.5.2 Μετεωρολογικοί δορυφόροι πολικών τροχιών

Πρώτα πέταξε από τις ΗΠΑ ο δορυφόρος TIROS 1 τον Απρίλιο του 1960 και από το 1960 έως το 1965, δέκα δορυφόροι TIROS πέταξαν έχοντας στον εξοπλισμό τους μια μικρή video-κάμερα και μερικοί ένα Ραδιόμετρο με σαρωτή στο θερμικό υπέρυθρο φάσμα. Οι TIROS 1-4 είχαν κλίση 48 με τον Ισημερινό, ενώ οι 5-8 είχαν 58 κλίση. Έτσι, έδιναν πολύ καλές εικόνες των τροπικών και υποτροπικών ζωνών αλλά δεν έδιναν εικόνες για πιο βόρειες περιοχές.

Η επόμενη σειρά ήταν οι TOS δορυφόροι που ονομάστηκαν δορυφόροι ESSA από τη Διεύθυνση Υπηρεσιών της Επιστήμης του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (US Environmental Science Services Administration). Αυτοί πέταξαν μεταξύ 1966 και 1969 και ήταν εννέα στον αριθμό. Οι τροχιές τους είχαν κλίση με τον Ισημερινό 100, έτσι ώστε κάθε δορυφόρος περνούσε κοντά από τους πόλους. Από αυτούς, άλλοι είχαν τη δυνατότητα εκπομπής των συλλεγμένων δεδομένων απευθείας στη γη (οι 2, 4, 6 και 8), ενώ οι άλλοι (οι 1, 3, 5, 7 και 9) αποθήκευαν τα δεδομένα κατά τη διάρκεια περιφοράς τους.

Η δεύτερη γενιά μετεωρολογικών δορυφόρων πολικών τροχιών που ονομάστηκαν ITOS (Improved Tiros Operational System) ξεκίνησε το 1970 και είχε δυνατότητα και μετάδοσης και αποθήκευσης των δεδομένων. Είχαν δυνατότητα καταγραφής την ημέρα στο ορατό και υπέρυθρο κανάλι και τη νύκτα στο υπέρυθρο με διακριτική ικανότητα του pixel 4Km x 4Km και 0,9Km x 0,9Km.

Η τρίτη γενιά δορυφόρων αυτού του είδους, που ονομάστηκε TIROS-N και κατ' επέκταση NOAA και που υπάρχουν μέχρι σήμερα, τοποθετήθηκαν σε τροχιά το 1978 και οι NOAA 8, 9 και 10 φέρουν ένα Εξελιγμένο Πολύ Υψηλής Επίλυσης Ραδιόμετρο (Advanced Very High Resolution Radiometer - AVHRR) που μας δίνει πληροφορίες στα κανάλια (διαύλους) που αντιστοιχούν στο ορατό, στο εγγύς, στο μεσαίο και θερμικό υπέρυθρο φάσμα με χωρική διακριτική ικανότητα 1,1 Km.

Ιστορικά το πρώτο ραδιόμετρο AVHRR τέθηκε σε λειτουργία στην πλατφόρμα TIROS-N τον Οκτώβριο του 1978 και είχε 4 φασματικά κανάλια μετά από αυτό υπήρξε το AVHRR 2 το οποίο μεταφερόταν από τον δορυφόρο NOAA 7 τον Ιούνιο του 1981 και είχε 5 φασματικά κανάλια ενώ το τελευταίο AVHRR 3 μεταφέρεται στον NOAA 15 και έχει 6 φασματικά κανάλια.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στους NOAA με τέσσερα και στους μεταγενέστερους NOAA με πέντε κανάλια.

Διάυλος (κανάλι)	NOAA με 4 κανάλια	NOAA με 5 κανάλια
1	0,55 - 0,68μm	0,58 - 0,68 (ορατό)
2	0,725 - 1,10 μm	0,725 - 1,10μm(εγγύς, υπέρυθρο)
3	3,55 - 3,93μm	3,55 - 3,93μm
4	10,5 - 11,5μm	10,3 - 11,3μm
5		11,5 - 12,5μm

Πίνακας 3.2 Μήκη κύματος των φασματικών καναλιών των δορυφόρων NOAA με 4 και 5 κανάλια.

Έτσι τα κανάλια 1 και 2 των πιο προσφάτων δορυφόρων NOAA δηλ. αυτά που αντιστοιχούν στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό νεφών, ορίων μεταξύ ξηράς και θάλασσας, της έκτασης πάγων και χιονιών και τέλος η σύγκριση μεταξύ αυτών των καναλιών μας δίνει ενδείξεις για τις περιοχές τήξης των πάγων.

Επίσης ο συνδυασμός των καναλιών 1 και 2 μας δίνει τον λεγόμενο δείκτη βλάστησης, οι υψηλές τιμές του οποίου μας δείχνουν την ύπαρξη βλάστησης. Μ' αυτόν τον τρόπο, η υπηρεσία NOAA παράγει χάρτες εβδομαδιαίας του δείκτη βλάστησης για τα δύο ημισφαίρια.

Αριθμός φασματικού καναλιού	Χωρική Διακριτική ικανότητα στο Ναδίρ	Μήκος κύματος σε μm	Συνήθης χρήση
1	1.09 km	0.58 - 0.68	Ημερήσια νέφωση και χαρτογράφηση της γήινης επιφάνειας
2	1.09 km	0.725 - 1.00	Χαρτογράφηση των ορίων ξηράς-θάλασσας
3A	1.09 km	1.58 - 1.64	Ανίχνευση χιονιού και πάγου
3B	1.09 km	3.55 - 3.93	Χαρτογράφηση νεφών την νύκτα, καταγραφή θερμοκρασιών της επιφάνειας της θάλασσας
4	1.09 km	10.30 - 11.30	Χαρτογράφηση νεφών την νύκτα, καταγραφή θερμοκρασιών της επιφάνειας της θάλασσας
5	1.09 km	11.50 - 12.50	Καταγραφή θερμοκρασιών της επιφάνειας της θάλασσας

Πίνακας 3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των φασματικών καναλιών του ραδιομέτρου AVHRR.

Δεδομένα από τα θερμικά υπέρυθρα κανάλια χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους ή των νεφών, ενώ ένας συνδυασμός των δύο θερμικών υπέρυθρων καναλιών (4 και 5) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας.

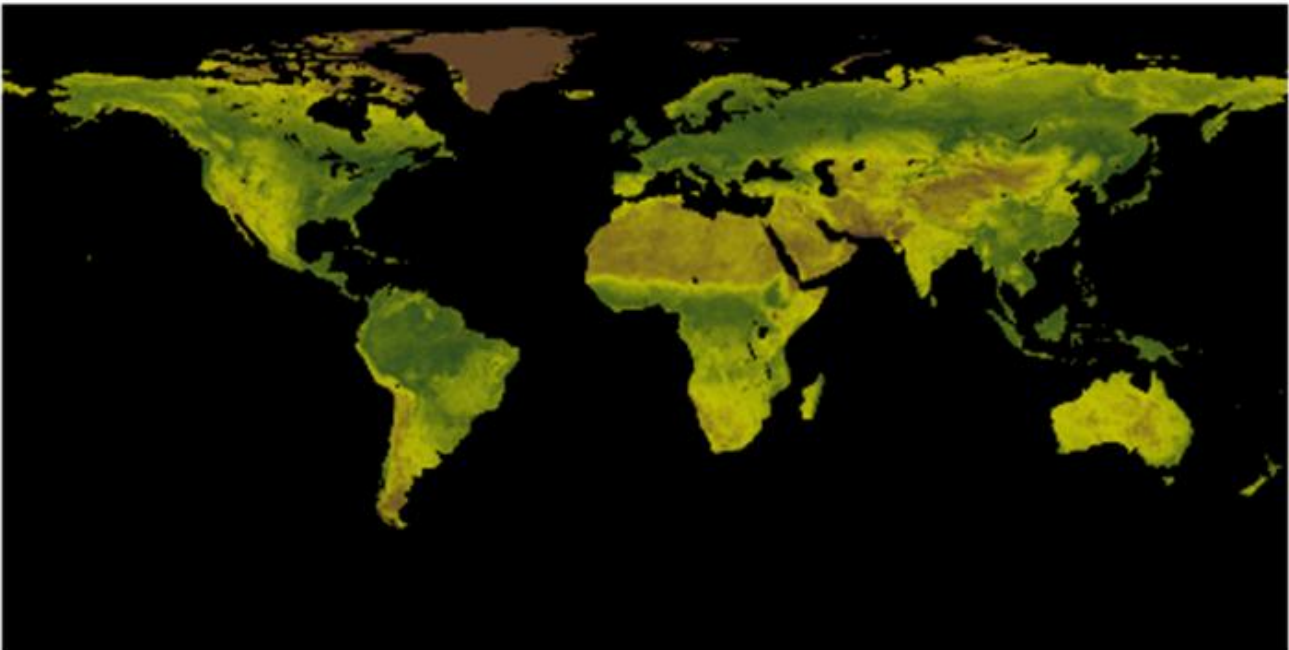
Τέλος, το κανάλι 3 είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις κατανομές της εξάτμισης του νερού στην ατμόσφαιρα και στις υψηλές θερμοκρασίες (>50o) όπως αυτές που παράγονται από διάφορες πυρκαγιές της επιφάνειας της γης (δασικές, κ.ά.)

Πρέπει να τονιστεί ότι το «Εξελιγμένο Πολύ Υψηλής Διακριτικής Ικανότητας Ραδιόμετρο - Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR» καταγράφει την ανώτερη επιφάνεια είτε της επιφάνειας της γης είτε πυκνών αερίων μαζών όπως τα σύννεφα ή η υπερβολική αέρια ρύπανση κ. ά.

Ο συγκεκριμένος τύπος του ραδιομέτρου AVHRR με τα παραπάνω φασματικά κανάλια δίνει την δυνατότητα πολυφασματικής ανάλυσης κυρίως στον προσδιορισμό υδρολογικών, ωκεανογραφικών και μετεωρολογικών παραμέτρων. Η σύγκριση δύο καναλιών μεταξύ τους χρησιμοποιείται επίσης και στην μέτρηση περιβαλλοντικών μεταβλητών όπως επίσης και για την γενικότερη παρατήρηση του περιβάλλοντος.

Ειδικότερα τα τρία κανάλια του υπέρυθρου χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της εκπομπής και της απορρόφησης της θερμικής ακτινοβολίας, και την μέτρηση των θερμοκρασιών της επιφάνειας της γης, της θαλάσσιας επιφάνειας και εν γένει του νερού και των νεφών και σε μεγαλύτερα υψόμετρα από αυτά

Πάρα πολύ χρήσιμες και εκτενέστερες πληροφορίες σχετικά με τον δορυφόρο αυτό μπορεί κανείς να βρει στους δικτυακούς ιστότοπους NOAA-KLM User's Guide και USGS AVHRR.



Εικόνα 3.1 Εικόνα της γης, του τυπικού Δείκτη Βλάστησης (NDVI) από τους δορυφόρους NOAA.

Η εικόνα 3.1 δείχνει σε αύξουσες αποχρώσεις του πράσινου τις υψηλότερες τιμές του τυπικού Δείκτη Βλάστησης (NDVI) και προήλθαν από τα αρχαία δεδομένα των δορυφόρων NOAA Climate Data Record (CDR) του ραδιομέτρου Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Surface Reflectance. Προέρχεται από δεδομένα κάθε δέκα ημερών από το 1981 έως πρόσφατα από τους δορυφόρους πολιτικής τροχιάς NOAA-7, -9, -11, -14, -16, -17, and -18. Τα δεδομένα έχουν προβληθεί σε έναν καθολικό κλίμακα 0.05X0.05 βαθμών. Τα προϊόντα παρήχθησαν από NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) και το πανεπιστήμιο University of Maryland (Vermote *et al.* 2014).

Στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, στο Βόλο, στη Γεωπονική Σχολή και στην Έδρα της Αγρο-μετεωρολογίας υπήρξε την δεκαετία του 1990 εγκατεστημένος πλήρης Σταθμός λήψης δορυφορικών δεδομένων NOAA και METEOSTAT. Εκτός από το μηχανικό μέρος του εξοπλισμού του σταθμού αυτού (ρυθμιζόμενες αντένες λήψης δεδομένων, αυτόματα και σύμφωνα με τη θέση του δορυφόρου) υπήρξε και ένα ισχυρό λογισμικό που μας δίνει τη δυνατότητα εκτός άλλων και

Bradford University, Research Limited, “NOAA AVHRR Receiving and Processing System”.

1ο Λήψη ξεχωριστά κανάλι με κανάλι και εξαγωγή μικρών παραθύρων (5 x 5 pixel)

2ο Επειδή τα δεδομένα είναι σε 10-bit μορφή (1024 επίπεδα)

- μετασηματισμό σε 8-bit δεδομένα (256 τιμές)
- 3ο Γεωμετρικές διορθώσεις των εικόνων
- 4ο Ραδιομετρικές διορθώσεις των εικόνων
- 5ο Με συνδυασμούς των καναλιών 3, 4 και 5 ανίχνευση θερμών περιοχών και καταγραφή των θερμοκρασιών.
- 6ο Με τα 4 και 5 κανάλια καταγραφή των θερμοκρασιών της επιφάνειας της θαλάσσης.
- 7ο Καταγραφή του δείκτη βλάστησης με τα 1 και 2 κανάλια.

3.5.3 Οι δορυφόροι ERS

Ο ERS-1 εκτοξεύτηκε στις 17 Ιουλίου του 1991, αποτελώντας τον πρώτο δορυφόρο της ESA, που πραγματοποίησε ηλιοσύγχρονη και πολική τροχιά. Ο ERS-1 κατέγραψε πάνω από 1,5 εκατομμύρια δορυφορικές εικόνες με το “Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος” (Synthetic Aperture Radar – SAR), οι οποίες διατέθηκαν μαζί με δεδομένα από άλλα όργανα του δορυφόρου, στην παγκόσμια επιστημονική κοινότητα. Επίσης, τα δορυφορικά δεδομένα του ERS-1 παρασχέθηκαν σε μετεωρολογικές υπηρεσίες σε όλο τον κόσμο.

Κατά τη διάρκεια της αποστολής του δορυφόρου ERS-1, οι επιστήμονες παρατήρησαν πολλά φαινόμενα σχετικά με τον τυφώνα Ελ Νίνιο, που αφορούν επιφανειακά ρεύματα, θερμοκρασία, ανέμους και τοπογραφία. Ειδικότερα δε, οι μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας υπήρξε ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της κλιματικής αλλαγής. Τον Μάρτιο του 2000, μια δυσλειτουργία του υπολογιστή και του γυροσκοπίου οδήγησαν το δορυφόρο ERS-1 στο τέλος της αποστολής του, ξεπερνώντας κατά πολύ την προγραμματισμένη διάρκεια ζωής του.

Οι παρακάτω πίνακες δίνουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου ERS 1 και η εικόνα που παρουσιάζεται στον ιστότοπο του [FAO Document Repository](http://www.fao.org/docrep/003/t0355e/t0355e05.htm), 2015, είναι μια σχηματική απεικόνιση του δορυφόρου.

Φασματικά Κανάλια	Χωρική Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)
Κανάλι C band (5,3 GHz) (SAR-C)	30 (50.000)	100 (500)

Πίνακας 3.4 Κανάλια αισθητήρων AMI (Active Microwave) του ERS-1.

Φασματικά Κανάλια	Μήκος κύματος (μm)	Εύρος ζώνης (μm)	Χωρική Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)
Κανάλι 1 (SWIR)	1,46 – 1,76	0,3	1000	500
Κανάλι 2 (MWIR)	3,55 – 3,85	0,3	1000	500
Κανάλι 3 (TIR)	10,35 – 11,35	1	1000	500
Κανάλι 4 (TIR)	11,5 – 12,5	1	1000	500

Πίνακας 3.5 Κανάλια αισθητήρων του ASTR-1 (Along Track Scanning Radiometer) του ERS-1.

Κανάλια	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)
Κανάλι 1 (330 MHz) (Radio)	16 (20)
Κανάλι 2 (82,5 MHz)	16 (20)

Πίνακας 3.6 Κανάλια αισθητήρων του RA (Radio Altimeter) του ERS-2.

Ο δορυφόρος ERS-2, ο οποίος θεωρείται ο διάδοχος του δορυφόρου ERS-1, εκτοξεύτηκε το 1995 εφοδιασμένος με ένα επιπλέον αισθητήρα για την έρευνα του όζοντος στην ατμόσφαιρα. Οι δύο δορυφόροι ERS είναι τα πιο εξελιγμένα διαστημικά σκάφη παρατήρησης της Γης που έχουν αναπτυχθεί και ξεκινήσει από την Ευρώπη. Αυτοί οι δύο εξαιρετικά πετυχημένοι δορυφόροι της ESA έχουν συλλέξει μεγάλο πλήθος πολύτιμων στοιχείων από την επιφάνεια του εδάφους, του ωκεανούς και τους πόλους της γης, ενώ παράλληλα κλήθηκαν να παρακολουθήσουν διάφορες φυσικές καταστροφές, όπως πλημμύρες και σεισμοί σε διάφορα σημεία του πλανήτη.

Και οι δύο δορυφόροι της ERS (ERS-1 και ERS-2) σχεδιάστηκαν με ένα πυρήνα ωφέλιμου φορτίου με δύο εξειδικευμένα ραντάρ και ένα αισθητήρα απεικόνισης υπέρυθρων. Η σημαντική διάφορα μεταξύ των δύο δορυφόρων είναι το γεγονός πως ο ERS-2 περιλάμβανε ένα επιπλέον όργανο, το οποίο παρακολουθεί τα επίπεδα του όζοντος στην ατμόσφαιρα. Η σχηματική αναπαράσταση του δορυφόρου ERS 2 δίνεται στον ιστότοπο ERS-2, 2015. <http://www.k3pgp.org/Notebook/Mlrs/ers2.htm>

Λίγο μετά την εκτόξευση του ERS-2 το 1995, η ESA αποφάσισε να συνδέσει τους δορυφόρους ERS-1 και ERS-2 στην ίδια αποστολή, η οποία είχε συνολική διάρκεια εννέα μήνες. Κατά τη διάρκεια αυτή παρουσιάστηκε αυξημένη συχνότητα στα διαθέσιμα δεδομένα, τα οποία πρόσφεραν την ευκαιρία στους επιστήμονες να παρατηρήσουν τις αλλαγές σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Τον Ιούλιο του 2011 η αποστολή του δορυφόρου ERS-2 έφτασε στο τέλος της. Οι παρακάτω πίνακες δίνουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου ERS-2 και των αισθητήρων του.

Ημερομηνία εκτόξευσης	21 Απριλίου 1995
Αρχική μάζα διαστημικού οχήματος	2.516 κιλά
Τροχιά	Ηλιοσύγχρονη, με υψόμετρο 800 χιλιόμετρα
Κλίση	98,5 deg
Χρόνος για μία τροχιά	100 λεπτά

Πίνακας 3.7 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του δορυφόρου ERS 2.

Φασματικά Κανάλια	Χωρική Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)
Κανάλι C band (5,3 GHz) (SAR-C)	30 (50.000)	100 (500)

Πίνακας 3.8 Φασματικά Κανάλια του αισθητήρα AMI (Active Microwave) του ERS-2.

Φασματικά Κανάλια	Μήκος κύματος (μm)	Εύρος ζώνης (μm)	Χωρική Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)
Κανάλι 1 (SWIR)	1,6	0,3	1.000	500
Κανάλι 2 (MWIR)	3,55 έως 3,85	0,3	1.000	500
Κανάλι 3 (NIR)	10,35 έως 11,35	1	1.000	500
Κανάλι 4 (TIR)	11,5 έως 12,5	1	1.000	500
Κανάλι 5 (VIS)	0,55	0,02	1.000	500
Κανάλι 6 (VIS)	0,659	0,02	1.000	500
Κανάλι 7 (NIR)	0,865	0,02	1.000	500

Πίνακας 3.9 Φασματικά Κανάλια του αισθητήρα ASTR-2 (Along Track Scanning Radiometer) του ERS-2.

Φασματικά Κανάλια	Μήκος κύματος (μm)	Χωρική Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)	Χρόνος επανέπισκεψης (ημέρες)
Κανάλι 1 (UV)	0,24 έως 0,295	40.000 (1.700)	40 (32)	(3)
Κανάλι 2 (UV)	0,29 έως 0,405	40.000 (1.700)	40 (32)	(3)
Κανάλι 3 (VIS)	0,4 έως 0,605	40.000 (1.700)	40 (32)	(3)
Κανάλι 4 (VIS)	0,59 έως 0,79	40.000 (1.700)	40 (32)	(3)

Πίνακας 3.10 Φασματικά Κανάλια αισθητήρων του GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) του ERS-2.

Φασματικά Κανάλια	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)
Κανάλι 1 (330 MHz) (Radio)	16 (20)
Κανάλι 2 (82,5 MHz)	16 (20)

Πίνακας 3.11 Φασματικά Κανάλια του αισθητήρα RA (Radio Altimeter) του ERS-2.

3.5.4 Ο δορυφόρος Envisat

Ο Envisat είναι ένας δορυφόρος πολικής τροχιάς και αποτελεί τον διάδοχο του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) μετά τους δορυφόρους ERS. Ο Envisat εκτοξεύτηκε το Μάρτιο του 2002

μεταφέροντας 10 όργανα, ενώ το βάρος του ήταν 8 τόνοι, αποτελώντας έτσι τη μεγαλύτερη μη στρατιωτική αποστολή για την παρατήρηση της Γης. Επίσης, διαθέτει περισσότερο εξελιγμένα συστήματα απεικόνισης, ραντάρ για τη μέτρηση του υψομέτρου και της θερμοκρασίας. Στα παραπάνω μέσα προστίθεται ένα φασματόμετρο μεσαίας ανάλυσης, το οποίο είναι ευαίσθητο στα χρώματα της Γης και των ωκεανών. Ακόμη, ο Envisat είναι εξοπλισμένος με δύο ατμοσφαιρικούς αισθητήρες παρακολούθησης αερίων (ίχνη αερίων). Παρέχει μετρήσεις για την ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς αλλά και για τους πάγους. Επιπροσθέτως, επιτρέπει την παρακολούθηση της εξέλιξης των περιβαλλοντικών και κλιματικών αλλαγών, ενώ τα δεδομένα που παρέχει διευκολύνουν την ανάπτυξη των επιχειρησιακών και εμπορικών εφαρμογών. Η αποστολή του Envisat έληξε στις 8 Απριλίου του 2012, μετά την απροσδόκητη απώλεια επαφής με το δορυφόρο.

Από τα προγράμματα της Πολικής Πλατφόρμας (PPF) και του δορυφόρου Envisat προκύπτουν δύο βασικά πράγματα:

Η ανάπτυξη μίας πολυλειτουργικής Πολικής Πλατφόρμας για μελλοντικές αποστολές παρακολούθησης της Γης, που αρχικά είχε ξεκινήσει ως στοιχείο από το πρόγραμμα του Διαστημικού Σταθμού Columbus.

Η POEM-1 σχεδιάστηκε σαν συνδυαστική αποστολή, με όργανα επιστημονικής εφαρμογής, έρευνας και επιχειρησιακής μετεωρολογίας. Η παραπάνω αποστολή θα βασίζεται στην Πολική Πλατφόρμα, σαν διάδοχος των δορυφόρων ERS.

Μία αναλυτική σχηματική περιγραφή του δορυφόρου Envisat και των οργάνων του υπάρχει στον ιστότοπο <http://robustdesignconcepts.com/files/envisat/files/ENVISAT-1%20Instruments.htm>

Τα όργανα που διαθέτει ο δορυφόρος Envisat είναι τα ακόλουθα (Short 2013):

ASAR

Είναι ένα Εξελιγμένο Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος και εξασφαλίζει την συνέχεια από το ραντάρ SAR και τον αισθητήρα AMI των δορυφόρων ERS 1 και ERS 2.

MERIS

Όντας ίσως το πιο σημαντικό όργανο του Envisat, το MERIS έχει την δυνατότητα να προγραμματιστεί τόσο ως προς το εύρος των μηκών κύματος των δέκα πέντε φασματικών καναλιών μέσης φασματικής διακριτικής ικανότητας, όσο και στην τοποθέτησή τους στα μήκη κυμάτων με φασματικό εύρος από 390 nm έως 1040 nm.

AATSR: Οι αποστολές των δορυφόρων ERS 1 και ERS 2 με τα όργανα ATSR-1 and ATSR-2 Κατά μήκος Τροχιάς Ραδιόμετρα Σάρωσης παροχής δεδομένων της Θερμοκρασίας της Επιφάνειας της Θάλασσας, με το όργανο αυτό απέκτησαν το διάδοχο όργανο Εξελιγμένο κατά Μήκος Τροχιάς Ραδιόμετρο Σάρωσης - Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR)- εξασφαλίζοντας μία συνεχόμενη ροή δεδομένων για δέκα έτη.

RA-2: Σε λιγότερο από ένα nanosecond το Ραντάρ μέτρησης Ύψους -Radar Altimeter 2 (RA-2)- προσδιορίζει την διπλής διαδρομής καθυστέρηση του ανακλώμενου σήματος που στέλνει στην επιφάνεια της γης.

MWR: Το μικροκυματικό αυτό ραδιόμετρο - microwave radiometer (MWR) - μετρά τους ατμοσφαιρικούς υδρατμούς και το περιεχόμενο σε νερό των νεφών, και προσδιορίζει την εκπεμπόμενη υγρασία της επιφάνειας της γης.

GOMOS: Μετρά τα ατμοσφαιρικά συστατικά με φασματική ανάλυση στα μήκη κύματος 250 nm ως 675 nm, 756 nm ως 773 nm, και 926 nm ως 952 nm. Επιπλέον τα δύο φωτόμετρα που έχει λειτουργούν στα μήκη κύματος 470 nm ως 520 nm και 650 nm ως 700 nm.

MIPAS: Το Ιντερφερόμετρο Michelson Παθητικών Ατμοσφαιρικών Ηχοκυμάτων -Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS)- είναι ένα φασματόμετρο μετασχηματισμού Fourier για την μέτρηση υψηλής φασματικής απόκρισης εκπομπές αερίων

SCIAMACHY: Πρόκειται για ένα απεικονιστικό φασματόμετρο που μετρά τα παγκόσμια ίχνη αερίων στην τροπόσφαιρα και στην στρατόσφαιρα.

DORIS: Πρόκειται για έναν Τροχιογράφο Doppler που βασισμένος σε ένα Σύστημα Μικροκυματικού προσδιορισμού καταγράφει την ακριβή θέση του δορυφόρου ENVISAT.

LRR: Πρόκειται για ένα ανακλαστήρα των ισχυρής έντασης παλμών Laser που εκπέμπονται από Σταθμούς Εδάφους εκπομπής Laser. Κατασκευάστηκε για τον ακριβή προσδιορισμό της τροχιάς αλλά δεν είναι λειτουργικός.

Στον ιστότοπο <https://www.siliconrepublic.com/innovation/2012/04/13/esas-envisat-satellite-stops-sending-data-to-earth#> δίνεται μία Απεικόνιση του Φασματόμετρου Sciamachy του Envisat που δείχνει το διοξείδιο του αζώτου πάνω από την Ευρώπη. (Siliconrepublic 2015).

Επίσης, μία πολύ ενδιαφέρουσα εικόνα δίνεται στον ιστότοπο http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2003/09/A_mosaic_of_satellite_images_showing_a_cloud-free_Europe Αυτής της εικόνας που αποτελεί ένα μωσαϊκό από 85 χρωματικές συνθέσεις δορυφορικών εικόνων της 18/06/2003 σε φυσικά χρώματα του φασματομέτρου MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) με το οποίο είναι εξοπλισμένος ο δορυφόρος Envisat, τα δικαιώματα έχει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Διαστήματος (ESA 2015).

3.6 Το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα COPERNICUS

Με πρωτοβουλία της Επιτροπής Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων (European Commission) και σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος δημιουργήθηκε το Ευρωπαϊκό επιστημονικό Πρόγραμμα «Κοπέρνικος» το οποίο ουσιαστικά αποτελεί την συνέχεια του προγράμματος GMES (Global Monitoring for Environment and Security) δηλαδή του Ευρωπαϊκού Προγράμματος για την «Παγκόσμια Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος και της Ασφάλειας».

Έχοντας ως βασικό σκοπό την μελέτη και παρακολούθηση του περιβάλλοντος της γης και πιο στοχευμένα της επιφάνειας της γης (ξηρά-θάλασσα), της ατμόσφαιρας, της αλλαγής του κλίματος, την διαχείριση έκτακτων καταστάσεων και την ασφάλεια το πρόγραμμα «Κοπέρνικος» έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών όπως παρακολούθηση κλιματικών αλλαγών, αιεφόρο ανάπτυξη, προστασία του περιβάλλοντος διαχείριση αστικών περιοχών, τοπικό και περιφερειακό σχεδιασμό, γεωργία, δασολογία, ιχθυολογία, υγεία, μεταφορές, πολιτική προστασία και τουρισμό, κ.ά.

Από τεχνολογικής πλευράς, πρόκειται για ένα σύνολο συστημάτων που αποτελείται από διάφορων τύπων συστήματα και όργανα συλλογής δεδομένων από διαφορετικές πηγές: δορυφόρους παρατήρησης της γήινης επιφάνειας, αερομεταφερόμενες πλατφόρμες εφοδιασμένες με ειδικούς αισθητήρες και καταγραφείς της γήινης επιφάνειας και τέλος σταθερούς αισθητήρες συλλογής και καταγραφής των διαφόρων παραμέτρων και μεταβλητών που αφορούν το γήινο περιβάλλον (Copernicus, Earth Observation Satellites 2015).

Αλλά υπάρχει και ένα δευτερεύον και εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα του προγράμματος Κοπέρνικος. Χάρη στις πολλαπλές αποστολές και στην ποικιλία των δεδομένων που μπορούν να προμηθεύσουν οι δορυφόροι και οι αισθητήρες στα πλαίσια του προγράμματος, πολλές επιπλέον υπηρεσίες οι οποίες προσαρμόζονται στις εκάστοτε ιδιωτικές ή δημόσιες ανάγκες δημιουργούν νέα πλαίσια και θέσεις εργασίας σε εθνικά και πολυεθνικά επίπεδα. Πολλές μελέτες οικονομικού χαρακτήρα έχουν εστιαστεί και αποδεικνύει τις χρηστικές αυτές ιδιότητες των δορυφορικών δεδομένων του συγκεκριμένου (αλλά και άλλων) επιστημονικών προγραμμάτων.

3.6.1 Οι δορυφόροι Sentinel

Ο δορυφόρος Sentinel 1 μεταφέρει ραντάρ πολικής τροχιάς το οποίο δεν επηρεάζεται από καιρικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες και λειτουργεί ημέρα και νύκτα. Είναι κατασκευασμένος για έρευνα τόσο στις χερσαίες περιοχές όσο και στους ωκεανούς.

Ο δορυφόρος Sentinel 2 εκτός της σημαντικής ιδιότητας που έχει από κατασκευής για την διαχείριση έκτακτων αναγκών, περιλαμβάνει όργανα πολυφασματικής απεικόνισης για την παρακολούθηση και διαχείριση του περιβάλλοντος γενικά και ειδικότερα για την μελέτη των υδάτων και υδρογραφικών δικτύων, της κάλυψης των εδαφών και της βλάστηση σε παράκτιες περιοχές.

Ο δορυφόρος Sentinel 3 είναι εφοδιασμένος με διάφορα όργανα και έχει την δυνατότητα να μετρά τις επιφανειακές θερμοκρασίες της γης, τόσο σε ξηρά όσο και θάλασσα, τις υψομετρικές διαφορές της θαλάσσιας επιφάνειας και τις χρωματικές αποχρώσεις των ωκεανών και της χερσαίας γης με καλή ακρίβεια.

Οι δορυφόροι Sentinel 4, Sentinel 5 και ο δορυφόρος Sentinel 6 Precursor είναι σχεδιασμένοι για την ανάλυση ατμοσφαιρικών εφαρμογών, ενώ ο δορυφόρος Sentinel 6 είναι εφοδιασμένος με ραντάρ που καταγράφει με μεγάλη ακρίβεια και χρονική συνέχεια τις υψομετρικές διαφορές της θάλασσας στους ωκεανούς και χρησιμοποιείται στην μελέτη των κλιματικών αλλαγών.

3.6.2 Ο δορυφόρος Sentinel-1

Ο δορυφόρος Sentinel-1A εκτοξεύτηκε στις 3 Απριλίου 2014 και ο Sentinel-1B προγραμματίζεται να εκτοξευτεί το 2016. Η προσδοκώμενη διάρκεια αποστολής είναι τα 7 έτη. Είναι ηλιοσύγχρονου τύπου και κυκλικής τροχιάς, το υψόμετρο τροχιάς είναι 693 χιλιόμετρα και η κλίση του είναι 98,18ο ενώ το όχημα εκτόξευσης είχε την ονομασία Soyuz rocket. Οι διαστάσεις του σκάφους είναι: 3.9 x 2.6 x 2.5 m με το βάρος να φτάνει τα 2.300 κιλά. Διάφορες εικόνες του δορυφόρου Sentinel-1 διατίθενται στο διαδίκτυο (ESA, Space for Educators 2015).

Ο Sentinel-1 είναι ένας δορυφόρος που έχει ως πρωταρχικούς στόχους την παρακολούθηση της γης και των ωκεανών. Ο στόχος της αποστολής είναι να δώσει συνέχεια στον C-Band SAR μετά από την αποχώρηση του ERS-2 και το τέλος της αποστολής του δορυφόρου Envisat. Για να επιτευχθεί αυτό, οι δορυφόροι μεταφέρουν έναν αισθητήρα C-SAR, ο οποίος προσφέρει μέσης και υψηλής ευκρίνειας απεικόνιση σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Το C-SAR είναι σε θέση να λάβει εικόνες και τη νύχτα αλλά και να ανιχνεύει κινήσεις επί του εδάφους, που το καθιστά χρήσιμο για χερσαία και θαλάσσια παρακολούθηση.

Οι στόχοι αυτής της αποστολής είναι οι ακόλουθοι:

- Την παρακολούθηση της γης, των δασών, των υδάτων, του εδάφους και της γεωργίας.
- Υποστήριξη χαρτογράφησης έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση φυσικών καταστροφών.
- Παρακολούθηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος.
- Παρατηρήσεις του πάγου και των παγόβουνων.
- Παραγωγή υψηλής ανάλυσης διαγράμματα πάγου.
- Πρόβλεψη συνθηκών πάγου στη θάλασσα.
- Χαρτογράφηση πετρελαιοκηλίδων.
- Εντοπισμός σκαφών στη θάλασσα.
- Παρακολούθηση της κλιματικής αλλαγής.

3.6.3 Ο δορυφόρος Sentinel-2

Ο δορυφόρος Sentinel 2 τέθηκε σε τροχιά στις 23/06/2015 μέσω ενός πυραύλου Vega από τον Ευρωπαϊκό Διαστημικό Σταθμό που βρίσκεται κοντά στο Κούρου στην Γαλλική Γουινέα. Προβλέπεται δε, η δημιουργία ενός διαδόχου δορυφόρου Sentinel-2B ο οποίος θα πετάξει το δεύτερο εξάμηνο του 2016.

Έχει έναν υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας πολυφασματικό σαρωτή με δέκα τρία φασματικά κανάλια, εύρος ανοίγματος σάρωσης 290 Km, και συχνή επαναδιέλευση και καταγραφή της επιφάνειας της γης.

Ουσιαστικά συνίσταται στην συνύπαρξη και στην συνέργεια δύο όμοιων δορυφόρων που καλύπτουν όλη την γήινη επιφάνεια. Κάθε ένας από τους δορυφόρους αυτούς ζυγίζει 1140 Kg. Έχουν σχεδιαστεί για 7 έτη και προοπτικές για ακόμη μεγαλύτερη διάρκεια ύπαρξης. Πετάνε σε ύψος 786 Km από την επιφάνεια της γης και έχουν γωνιακή απόκλιση 180° μεταξύ τους. Επειδή υπάρχει επικάλυψη των δορυφορικών δεδομένων τους με τον δορυφόρο Landsat 8, η NASA και η ESA σε συνεννόηση οδήγησαν τους δύο δορυφόρους σε επαναδιέλευση 3 ημερών (από τον Ισημερινό).

Οι δορυφόροι Sentinel 2 είναι προϊόντα συνεργασίας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Διαστήματος (European Space Agency – ESA), μιας κοινοπραξίας 60 εταιρειών με επικεφαλής την Airbus Defense and Space και υποστηρίζονται από το Εθνικό Κέντρο Διαστημικών Μελετών (Centre National d'Études Spatiales – CNES) της Γαλλίας και το Γερμανικό κέντρο Διαστημικής DLR, για την βελτιστοποίηση των καλύψεων της γήινης επιφάνειας.

Οι δορυφόροι αυτοί είναι κατασκευασμένοι για να παρέχουν δεδομένα τόσο για αγροτικές όσο και για δασικές περιοχές με σκοπό την διατροφική ασφάλεια του πλανήτη. Ειδικότερα από τα δεδομένα που παρέχουν προσδιορίζονται παράγοντες πολύ σημαντικοί για την ανθρώπινη διαβίωση και επιβίωση όπως δείκτες περιεκτικότητας νερού και χλωροφύλλης στις φυτοκοινωνίες.

Θεωρείται κατάλληλος για τις παρακάτω εφαρμογές:

- Διαχείριση των αλλαγών των καλύψεων – χρήσεων γης.
- Καταγραφή δασικών περιοχών και δασικών καταστροφών.
- Διαχείριση και καταγραφή ανάπτυξης φυτικών πληθυσμών.

- Καταγραφή της μόλυνσης παράκτιων και λιμναίων περιοχών.
- Καταγραφικές και συνεχείς απεικονίσεις φυσικών καταστροφών όπως των πλημμυρών, φηαιστειακών εκρήξεων και καθιζήσεων-ολισθήσεων εδαφών.

3.6.4 Ο δορυφόρος Sentinel-3

Το πρόγραμμα του Sentinel-3 περιλαμβάνει τρεις ευέλικτους δορυφόρους, με την κύρια αποστολή να είναι η παρατήρηση των ωκεανών, ωστόσο η αποστολή θα είναι επίσης σε θέση να παράσχει εφαρμογές για την ατμόσφαιρα και τη γη. Ακόμη, μέσω αυτής της αποστολής θα εξασφαλιστεί η συνέχεια των δεδομένων για την ERS και τους δορυφόρους Envisat και SPOT. Η επιχειρησιακή διάρκεια ζωής του Sentinel-3 είναι 7 χρόνια.

Ο δορυφόρος Sentinel-3 θα κάνει χρήση πολλών μέσων ανίχνευσης προκειμένου να εκπληρώσει τους στόχους που έχουν τεθεί. Τα μέσα αυτά είναι τα ακόλουθα:

SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer)

- OLCI (Ocean and Land Colour Instrument)
- SRAL (SAR Altimeter)
- DORIS
- MWR (Microwave Radiometer)

Τα SLSTR και OLCI είναι οπτικά όργανα που θα χρησιμοποιηθούν για την εξασφάλιση της συνέχειας των δεδομένων των οργάνων MERIS και AATSR (είναι όργανα του Envisat), επιτρέποντας παράλληλα νέες συνδυασμένες εφαρμογές. Το όργανο OLCI είναι ένα φασματόμετρο απεικόνισης μεσαίας ανάλυσης και χρησιμοποιεί πέντε κάμερες προκειμένου να παρέχει ευρύ οπτικό πεδίο. Τα SRAL, DORIS, MWR και LRR θα χρησιμοποιηθούν για τοπογραφικές μετρήσεις των ωκεανών και των χερσαίων υδάτων. Πιο συγκεκριμένα, το αλτίμετρο SRAL θα είναι το κύριο τοπογραφικό όργανο και το ραδιόμετρο MWR θα μετρά τους υδρατμούς και την περιεκτικότητα των νεφών σε νερό, καθώς επίσης και τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη γη.

Αναλυτικά οι στόχοι αυτής της αποστολής είναι οι ακόλουθοι:

- Η μέτρηση της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας, το υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας και το ύψος των κυμάτων.
- Η μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας των ωκεανών και του εδάφους.
- Η μέτρηση του επιφανειακού χρώματος των ωκεανών και του εδάφους.
- Η μέτρηση της τοπογραφίας της θάλασσας και των χερσαίων πάγων.
- Η ποιότητα του θαλασσινού νερού και η παρακολούθηση της ρύπανσης.
- Η παρακολούθηση των χερσαίων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων των ποταμών και των λιμνών.
- Η παρακολούθηση του κλίματος και η μοντελοποίησή του.
- Η παρακολούθηση της αλλαγής χρήσης γης.
- Η χαρτογράφηση της δασικής κάλυψης.
- Η πυρανίχνευση.
- Η πρόβλεψη του καιρού.
- Η μέτρηση της θερμικής ακτινοβολίας της γης.

Τύπος τροχιάς	Ηλιοσύγχρονη, σχεδόν πολική
Ύψος τροχιάς	814 χιλιόμετρα
Κλίση	98,6ο
Επανάληψη του κύκλου	Κάθε 27 ημέρες

Διαστάσεις του σκάφους	3.7 x 2.2 x 2.2 m με το βάρος κατά τη στιγμή της εκτόξευσης να είναι 1250 κιλά
Όχημα εκτόξευσης	Rockot vehicle (Sentinel-3A) Vega rocket (Sentinel-3B)

Πίνακας 3.12 Χαρακτηριστικά της τροχιάς του Sentinel-3.

Μία ακριβής αναπαράσταση του δορυφόρου Sentinel-3 και των οργάνων του δίνονται από την Eumetsat (Eumetsat Future Satellites 2015).

3.7 Δορυφόροι έρευνας κυρίως των φυσικών πόρων της γης

Παρακάτω, αναφέρονται συνοπτικά διάφορες πλατφόρμες-δορυφόροι που έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην καταγραφή της επιφάνειας της γης.

Το 1978 πέταξε ο δορυφόρος SEASAT εφοδιασμένος με ένα Συνθέτου Ανοίγματος Ραντάρ (SAR - Synthetic Aperture Radar) και με υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα επί του εδάφους.

Έχοντας μια σχεδόν πολική τροχιά 108ο γωνίας με τον Ισημερινό και πετώντας σε ύψος 790Km, είχε διακριτική ικανότητα 25m και πλάτος λωρίδας κάλυψης επί του εδάφους 100Km*. Εκτός από το παραπάνω ραντάρ ήταν εφοδιασμένος και με τα παρακάτω όργανα (Rees 2001):

Υψομετρικό ραντάρ για τα ύψη των κυμάτων, ραντάρ με μετρητή διάχυσης για εντοπισμό διευθύνσεων και μέτρηση ταχυτήτων των ανέμων, Ραδιόμετρο μικροκυμάτων για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θαλάσσης, ρυθμού βροχόπτωσης και εξάτμισης του νερού και τέλος Ραδιόμετρο του ορατού και υπέρυθρου φάσματος για καταγραφή των ακτών και μέτρηση των θερμοκρασιών της θαλάσσιας επιφάνειας.

Δυστυχώς, λόγω σημαντικής βλάβης του ηλεκτρικού του συστήματος ο δορυφόρος λειτούργησε μόνον 106 ημέρες. Πριν ακόμη από τη μελανή ημερομηνία της 28/01/1986 της έκρηξης και καταστροφής του διαστημικού space shuttle λεωφορείου Challenger που προκάλεσε το θάνατο και των επτά αστροναυτών του πληρώματος, δύο επιτυχείς εφοδιασμοί του διαστημικού λεωφορείου της NASA έγιναν το 1981 και το 1984. Την πρώτη φορά με το 1ο ραντάρ απεικόνισης του διαστημικού λεωφορείου SIR-A (Shuttle Imaging Radar - A) με διακριτική ικανότητα 40m, πλάτος λωρίδας κάλυψης 50Km, μήκος κύματος καταγραφής στο L-κανάλι, όπως και το SAR, αλλά μόνον με οπτικό καταγραφέα (optical recorder) και τη δεύτερη με το ραντάρ SIR-B με διακριτική ικανότητα 25m, και με ικανότητα καταγραφής δεδομένων της επιφάνειας της γης, τόσο σε οπτική μορφή, όσο και σε ψηφιακή. Δυστυχώς, για τις διάφορες χώρες τα δεδομένα δεν ήταν ομοιόμορφα καλής ποιότητας (όπως π.χ. για την Αγγλία). Μέχρι σήμερα πιο τελειοποιημένα ραντάρ έχουν λειτουργήσει.

Επίσης, αναφέρουμε τη Μετρική Κάμερα που τοποθετήθηκε στο διαστημικό λεωφορείο της NASA σαν ένα μέρος του εξοπλισμού του Spacelab 1 που ήταν η ευρωπαϊκή συμμετοχή στο πρόγραμμα από την ESA το Νοέμβριο του 1983. Έτσι, διατέθηκαν στερεοφωτογραφίες σε κλίμακα 1:826.000 και διακριτικής ικανότητας 20m. Ο αμερικάνικος ανταγωνιστής της παραπάνω μηχανής υπήρξε η αντίστοιχη Μεγάλου φορμάτ κάμερα με διακριτική ικανότητα 5m (Large Format Camera).

Τέλος, για ειδικές εφαρμογές υπήρξε ο δορυφόρος Αποστολής Θερμικής Ικανότητας Χαρτογράφησης (1978) (Heat Capacity Mapping Mission HCMM) σε πολική τροχιά στο ορατό 0,5 - 1,1μm και το θερμικό υπέρυθρο 10,5 - 12,5 με διακριτική ικανότητα αντίστοιχα 500 x 500m και 600 x 600m. Χρησιμοποιήθηκε ιδιαίτερα για το διαχωρισμό πετρωμάτων.

3.7.1 Οι δορυφόροι TERRA και AQUA

Ο δορυφόρος Terra αποτελεί τη ναυαρχίδα του συστήματος παρατήρησης της γης (EOS) και αντιπροσωπεύει τις δυνατότητες της NASA στην διαστημική παρατήρηση της γης. Ο δορυφόρος Terra συλλέγει πολλαπλά δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιούνται στην έρευνα που ασχολείται με τους τρόπους με τους οποίους λειτουργούν η επιφάνεια της γης, ο αέρας, οι ωκεανοί και οι πάγοι. Επίσης, ο Terra με κάθε πέρασμα που

πραγματοποιεί συλλέγει πληθώρα δεδομένων. Ο δορυφόρος Terra εκτοξεύτηκε στις 18 Δεκεμβρίου του 1999, με ηλιοσύγχρονη τροχιά, όμως άρχισε να στέλνει δεδομένα προς τη γη το Φεβρουάριο του 2000.

Η αρχική διάρκεια ζωής του δορυφόρου ήταν τα 6 χρόνια, όμως ο Terra συνεχίζει μετά από 15 χρόνια να δίνει πολύτιμες πληροφορίες για τον πλανήτη (2,5 φορές μεγαλύτερη διαρκεί ζωής σε σχέση με την αρχικά προγραμματισμένη). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην εξαιρετική κατασκευή του δορυφόρου, δηλαδή τους επιστήμονες και μηχανικούς που συνεργάστηκαν για την κατασκευή του.

Ο κάθε αισθητήρας έχει μοναδικά χαρακτηριστικά, που επιτρέπουν στους επιστήμονες να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα της επιστήμης της γης. Ο δορυφόρος Terra φέρει συνολικά 5 όργανα, που είναι τα ακόλουθα:

- ASTER
- CERES
- MISR
- MODIS
- MOPITT

Χάρη στα 5 όργανα, ο Terra έχει τη δυνατότητα να συγκεντρώνει συμπληρωματικές παρατηρήσεις από την επιφάνεια της γης και την ατμόσφαιρα.

Μία συνοπτική εικόνα του δορυφόρου Terra των τεχνικών χαρακτηριστικών και των βασικών οργάνων του δίνεται στον ιστότοπο του Satellite Meteorology, 2015, http://cimss.ssec.wisc.edu/satmet/modules/9_global_monitor/gm-8.html.

Οι παρακάτω πίνακες εκθέτουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οργάνων του δορυφόρου.

Ημερομηνία εκτόξευσης	18 Δεκεμβρίου 1999
Πληροφορίες τροχιάς	Ηλιοσύγχρονη, με ύψος τροχιάς 705 χιλιόμετρα, κλίση 98,3 μοίρες (από τον Ισημερινό) και περίοδο 98,88 λεπτά
Χρόνος επαναδιέλευσης	16 ημέρες (233 τροχιές)
Διέλευση από τον Ισημερινό	10:30 π.μ.

Πίνακας 3.13 Προδιαγραφές του δορυφόρου Terra.

Κανάλια	Μήκος κύματος (μm)	Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)	Χρόνος επαναδιέλευσης (ημέρες)
Κανάλι 1 (VIS)	0,52 έως 0,6	15	60	16
Κανάλι 2 (VIS)	0,63 έως 0,69	15	60	16
Κανάλι 3n (NIR)	0,76 έως 0,86	15	60	16
Κανάλι 3b (NIR)	0,76 έως 0,86	15	60	16
Κανάλι 4 (SWIR)	1,6 έως 1,7	30	60	16
Κανάλι 5 (SWIR)	2,145 έως 2,185	30	60	16
Κανάλι 6 (SWIR)	2,185 έως 2,225	30	60	16
Κανάλι 7 (SWIR)	2,235 έως 2,285	30	60	16
Κανάλι 8 (SWIR)	2,295 έως 2,365	30	60	16
Κανάλι 9 (SWIR)	2,36 έως 2,43	30	60	16
Κανάλι 10 (TIR)	8,125 έως 8,475	90	60	16
Κανάλι 11 (TIR)	8,475 έως 8,825	90	60	16
Κανάλι 12 (TIR)	8,925 έως 9,275	90	60	16
Κανάλι 13 (TIR)	10,25 έως 10,95	90	60	16
Κανάλι 14 (TIR)	10,95 έως 11,65	90	60	16

Πίνακας 3.14 Φασματικά κανάλια του ραδιόμετρου ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) του δορυφόρου Terra.

Ζώνες	Μήκος κύματος (μm)	Διακριτική ικανότητα (m)
Ζώνη 1 (SWIR)	0,3 έως 5	20.000 (10.000)
Ζώνη 2 (TIR)	8 έως 12	20.000 (10.000)
Ζώνη 3 (Other)	0,3 έως 100	20.000 (10.000)

Πίνακας 3.15 Φασματικά κανάλια του φασματο-ραδιόμετρου MISR (Multi-angle Imaging Spectro Radiometer) του δορυφόρου Terra.

Κανάλια	Μήκος κύματος (μm)	Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)	Επαναδιέλευση (ημέρες)
Κανάλι 1 (VIS)	0,62 έως 0,67	250	2.330 (10)	2
Κανάλι 2 (NIR)	0,841 έως 0,876	250	2.330 (10)	2
Κανάλι 3 (VIS)	0,459 έως 0,479	500	2.330 (10)	2
Κανάλι 4 (VIS)	0,545 έως 0,565	500	2.330 (10)	2
Κανάλι 5 (NIR)	1,23 έως 1,25	500	2.330 (10)	2
Κανάλι 6 (SWIR)	1,628 έως 1,652	500	2.330 (10)	2
Κανάλι 7 (SWIR)	2,105 έως 2,155	500	2.330 (10)	2
Κανάλι 8 (VIS)	0,405 έως 0,42	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 9 (VIS)	0,438 έως 0,448	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 10 (VIS)	0,483 έως 0,493	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 11 (VIS)	0,526 έως 0,536	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 12 (VIS)	0,546 έως 0,556	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 13 (VIS)	0,662 έως 0,672	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 14 (VIS)	0,673 έως 0,683	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 15 (VIS)	0,743 έως 0,753	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 16 (NIR)	0,862 έως 0,877	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 17 (NIR)	0,89 έως 0,92	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 18 (NIR)	0,931 έως 0,941	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 19 (NIR)	0,915 έως 0,965	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 20 (MWIR)	3,66 έως 3,84	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 21 (MWIR)	3,929 έως 3,989	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 22 (MWIR)	3,929 έως 3,989	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 23 (MWIR)	4,02 έως 4,08	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 24 (MWIR)	4,433 έως 4,498	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 25 (MWIR)	4,482 έως 4,549	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 26 (SWIR)	1,36 έως 1,39	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 27 (TIR)	6,535 έως 6,895	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 28 (TIR)	7,175 έως 7,475	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 29 (TIR)	8,4 έως 8,7	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 30 (TIR)	9,58 έως 9,88	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 31 (TIR)	10,78 έως 11,28	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 32 (TIR)	11,77 έως 12,27	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 33 (TIR)	13,185 έως 13,485	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 34 (TIR)	13,485 έως 13,785	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 35 (TIR)	13,785 έως 14,085	1.000	2.330 (10)	2
Κανάλι 36 (TIR)	14,085 έως 14,385	1.000	2.330 (10)	2

Πίνακας 3.16 Φασματικά κανάλια του φασματο-ραδιομέτρου MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) του δορυφόρου Terra.

Κανάλια	Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)
Κανάλι (Other)	22.000	600

Πίνακας 3.17 Φασματικό κανάλι του αισθητήρα MOPITT (Measurement of Pollution In The Troposphere) του δορυφόρου Terra.

Τέλος ο δορυφόρος AQUA που θεωρείται ο δίδυμος του δορυφόρου TERRA διαθέτει εκτός του φασματο-ραδιομέτρου MODIS και του ραδιομέτρου CERES τα οποία διαθέτει και ο δορυφόρος TERRA, τους ηχητικούς αισθητήρες AIRS και AMSU-A και το ραδιομέτρο σάρωσης μικροκυμάτων AMSR-E.

3.7.2 Οι δορυφόροι Landsat

Τον Ιούλιο του 1972 η NASA πέταξε με το αρχικό όνομα ERTS.A (Earth Resources Technology Satellite) τον πρώτο δορυφόρο της σειράς LANDSAT 1. Ήταν ηλιο-σύγχρονος με σχεδόν πολική τροχιά κλίσης από τον Ισημερινό 99ο, περιόδου 103 λεπτών και ύψους πτήσης 920Km. Πραγματοποιεί έτσι 14 περιστροφές της γης, κάθε μέρα, μετατοπισμένες την κάθε μια από την επόμενη κατά 1,5ο προς τα δυτικά. Έτσι πετά από τα ίδια σημεία και την ίδια ώρα κάθε 18 ημέρες.

Τον Ιανουάριο του 1975 η NASA πέταξε ένα δορυφόρο ίδιο με τον προηγούμενο με διαφορά φάσης εννέα ημερών και τελικά τον Μάρτιο του 1978 έναν τρίτο που αντικαθιστούσε ουσιαστικά τον πρώτο, ο οποίος είχε πάψει να λειτουργεί. Αυτός είχε την ιδιότητα να καλύπτει τις ίδιες τροχιές κάθε εννέα ημέρες. Στην πραγματικότητα όμως, και ενώ φαινόταν ότι λειτουργούν συγχρόνως οι δορυφόροι LANDSAT 2 και 3, η NASA προγραμματίζε πάντα τον έναν μόνον από τους δύο και μάλιστα αυτόν που κατέγραφε το φωτεινό μέρος της γης. Ωστόσο, προβλέφθηκε και για τον LANDSAT 3 να μεταφέρει ένα όργανο καταγραφής του υπέρυθρου (διαύλου) καναλιού που όμως ποτέ δε λειτούργησε πραγματικά, λόγω διαφόρων βλαβών.

Δύο ήταν τα βασικά είδη οργάνων που μετέφεραν για την καταγραφή της επιφάνειας της γης οι δορυφόροι LANDSAT 1-3:

α) Τις Κάμερες Επιστρεφόμενης Δέσμης (Return Beam Vidicon - RBV cameras).

Για τους LANDSAT 1 και 2 οι τρεις RBV κάμερες που μετέφεραν δεν είχαν και ιδιαίτερη επιτυχία. Εστιασμένες στην ίδια περιοχή του εδάφους κάλυπταν τα εξής μήκη κύματος (σε μm: 0,475 - 0,575 (μπλε - πράσινο), 0,58 - 0,68 (κίτρινο- κόκκινο) και 0,69 - 0,83 (κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο)). Ονομάστηκαν κανάλια 1, 2, 3 και είχαν διακριτική ικανότητα 79m και κάλυπταν για κάθε εικόνα μια περιοχή 185Km x 185Km. Επειδή όμως η διάρκεια ζωής τους ήταν μόνον 45 ώρες, στον LANDSAT 3 εφαρμόστηκε διαφορετική τακτική. Δύο ολόιδιες παγχρωματικές RBV κάμερες με φασματικό εύρος 0,5 - 0,75μm (από το πράσινο έως το εγγύς υπέρυθρο), με βελτιωμένη διακριτική ικανότητα επί του εδάφους 24m και περιοχή κάλυψης επί του εδάφους 98Km x 98Km (έτσι τέσσερα ελαφρά υπερκαλυπτόμενες εικόνες έδιναν την ίδια περιοχή με την περιοχή των LANDSAT 1 και 2).

β) Τον Πολυφασματικό Σαρωτή (Multispectral Scanner - MSS).

Είναι ένα σύστημα σάρωσης διασταυρούμενης τροχιάς (cross-track) με έναν ταλαντευόμενο καθρέπτη που σαρώνει μια λωρίδα γης πλάτους 185Km. Για τους LANDSAT 1,2 και 3 η γωνία σάρωσης ήταν 11,56° στα 705Km ύψους πτήσης τους ενώ για τους LANDSAT 4-5 αυξήθηκε στις 14,9° [Sabins f. 1987]

Η διακριτική ικανότητα (το μέγεθος του pixel στην επιφάνεια του εδάφους) ήταν 79m x 79m, και υπήρχε υπερκάλυψη των διαδοχικών pixels κατά 11,5m έτσι ώστε τα κέντρα τους απείχαν 56m. Στους LANDSAT 1 και 2 υπήρχαν τέσσερα κανάλια που ονομάστηκαν 4, 5, 6 και 7 και αντιστοιχούσαν στα μήκη κύματος σε μm 0,5 - 0,6, 0,6 - 0,7, 0,7 - 0,8, και 0,8 - 1,1. Στον LANDSAT 3 έγινε προσπάθεια να προστεθεί ένα 5ο κανάλι από τα 10,4 έως τα 12,5μm με μέγεθος pixel 237m x 237m αλλά δεν έδωσε καλές εικόνες.

γ) Το Θεματικό Χαρτογράφο (Thematic Mapper - TM) - LANDSAT 4 και 5.

Τον Ιούλιο του 1982 και το Μάρτιο του 1984 πέταξαν οι LANDSAT 4 και 5. Εκτός του ότι η πλατφόρμα που μετέφερε τα διάφορα όργανα ήταν τελείως διαφορετική, μια χαμηλότερη τροχιά γύρω στα 700Km προτιμήθηκε για να είναι δυνατές οι επιδιορθώσεις από το διαστημικό λεωφορείο (space shuttle).

Η διακριτική ικανότητα του καινούριου MSS ήταν 82m, τα κανάλια μετονομάστηκαν από 4, 5, 6, 7 σε 1, 2, 3, 4 και η RBV κάμερα εγκαταλείφθηκε.

Επιπλέον, ο θεματικός χαρτογράφος, ένα καινούριο όργανο με ένα ραδιόμετρο υψηλής διακριτικής ικανότητας 30m στα έξι κανάλια του και 120m στο θερμικό υπέρυθρο, αποτέλεσε το νέο όργανο καταγραφής των LANDSAT 4 και 5.

Μια άλλη πολύ σημαντική διαφορά μεταξύ του MSS και του TM είναι ο βαθμός ακρίβειας των δεδομένων, δηλ. ο αριθμός των διαφορετικών επιπέδων (χρωμάτων) τιμών που μπορεί να πάρει ένα pixel: έτσι, ενώ στον MSS έχουμε 26 διαβαθμίσεις (64), στον Thematic Mapper έχουμε 28, δηλ. 256 διαφορετικές ραδιομετρικές τιμές που μπορεί να πάρει ένα pixel, δηλ. από 0 έως 255.

ΦΑΣΜΑ ΤΙΚΟ ΚΑΝΑ- ΛΙ	Μήκος κύματος MSS	Μήκος κύματος TM (μm)	Μήκος Κύματος ETM+(μm)	ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ TM (μόνον)

1	0,5 - 0,6	0,45-0,52	0,45-0,52	Χαρτογράφηση παράκτων υδάτων. Διαφοροποίηση εδάφους - βλάστησης.
2	0,6 - 0,7	0,52 - 0,60	0,53-0,61	Ανάκλαση στο πράσινο από υγιή βλάστηση
3	0,7 - 0,8	0,63 - 0,69	0,63-0,69	Απορρόφηση χλωροφύλλης, διαχωρισμός φυτών
4	0,8 - 1,1	0,76 - 0,90	0,78-0,90	Απογραφή βιομάζας
5		1,55 - 1,75	1,55-1,75	Υγρασία βλάστησης. Διαχωρισμός χιονιού - νεφών
6		10,4 - 11,7	10,4-12,5	Θερμική χαρτογράφηση
7		2,08 - 2,35	2,09-2,35	Φυτική υγρασία - Γεωλογική χαρτογράφηση

Πίνακας 3.18 Συνοπτικός πίνακας των κυρίων σαρωτών των δορυφόρων Landsat.

Στον πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του πολυφασματικού σαρωτή (multispectral scanner, MSS) και του θεματικού χαρτογράφου (thematic mapper, TM) των δορυφόρων LANDSAT 4 και 5.

Μέγεθος pixel στο έδαφος	82m	Κανάλια 1 έως 5 και 7: 30m, κανάλι 6: 120m
Ραδιομετρικές διαβαθμίσεις	64	256
Ρυθμός απόκτησης δεδομένων	15Mbps	85Mbps
Βάρος	68Kg	258Kg
Μέγεθος	0,35 x 0,4 x 0,9m	1,1 x 0,7 x 2m
Ισχύς (ηλεκτρ.)	50 Watts	332 Watts

Πίνακας 3.19 Τεχνικά χαρακτηριστικά του πολυφασματικού σαρωτή των δορυφόρων Landsat 4 και 5.

Στη συνέχεια, ο LANDSAT 6, ενώ σχεδιάστηκε να εκτοξευτεί το 1989, τέθηκε σε τροχιά το 1991 και έφερε και τα εξής όργανα σάρωσης:

Έναν ενισχυμένο θεματικό χαρτογράφο που εκτός από τα επτά κανάλια του προηγούμενου TM περιέχει και ένα όγδοο με εύρος φάσματος από 0,5 έως 0,9 μ m, ειδικός για χαρτογράφηση.

Έναν σαρωτή Sea Wide Field Sensor που έχει τη δυνατότητα καταγραφής του χρώματος και της θερμοκρασίας των ωκεανών της υδρογείου σε 16 ημέρες, με διακριτική ικανότητα 1,13Km. Τέθηκε σε τροχιά με τη βοήθεια πυραύλου σε ύψος 705Km.

Τέλος, το 1993 εκτοξεύτηκε ο LANDSAT 7 που έχει μια σημαντική βελτίωση στο θερμικό υπέρυθρο κανάλι. Έτσι, η διακριτική του ικανότητα αντί 120m είναι 60m και επιπλέον στη φασματική περιοχή από 8 έως 11,6 μ m έχει τέσσερις ζώνες (κανάλια).

Οι χρωματικές συνθέσεις πολυφασματικών εικόνων του δορυφόρου Landsat 7 που ακολουθούν δείχνουν καθαρά τον διαχωρισμό κάποιων καλύψεων γης λόγω του διαφορετικού χρωματισμού ορατών και υπέρυθρων φασματικών καναλιών.



Εικόνα 3.10 Περιοχή της Θεσσαλίας με τον Βόλο στο κέντρο και το δάσος του Πηλίου στα ανατολικά.
Ψευδοχρωματική σύνθεση (φυσικά χρώματα) των φασματικών καναλιών 1,2, και 3 σε B,G,R δορυφορικής εικόνας Landsat 7 της 28/04/2000, PIXEL SIZE 30x30μ.



Εικόνα 3.11 Περιοχή της Θεσσαλίας με τον Βόλο στο κέντρο και το δάσος του Πηλίου στα ανατολικά.
Ψευδοχρωματική σύνθεση (βλάστηση σε κόκκινο χρώμα) των φασματικών καναλιών 2,3 και 4 σε B,G,R δορυφορικής εικόνας Landsat 7 της 28/04/2000, PIXEL SIZE 30x30μ.



Εικόνα 3.12 Περιοχή της Θεσσαλίας με τον Βόλο στο κέντρο και το δάσος του Πηλίου στα ανατολικά. Ψευδοχρωματική σύνθεση των φασματικών καναλιών 1,4 και 7 σε B,G,R δορυφορικής εικόνας Landsat 7 της 28/04/2000, PIXEL SIZE 30x30μ.

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται και η χρήση των χρωματικών συνθέσεων στην Τηλεπισκόπηση. Παρατηρούμε ότι η χρωματική σύνθεση 1,2,3 σε B,G,R μας δίνει φυσικά χρώματα (ο μόνος συνδυασμός που δίνει φυσικά χρώματα, ενώ η χρωματική σύνθεση 2,3,4 σε B,G,R παρουσιάζει την βλάστηση σε κόκκινο χρώμα(γιατί;) και χρησιμοποιείται σαν η αρχική χρωματική σύνθεση σε διάφορα λογισμικά Τηλεπισκόπησης όπως το Erdas Imagine το Multispec κ.ά. Τέλος η χρωματική σύνθεση 1,4,7 σε B,G,R διαχωρίζει (εκτός της θάλασσας) το αστικό και το δάσος.

3.7.3 Οι δορυφόροι SPOT

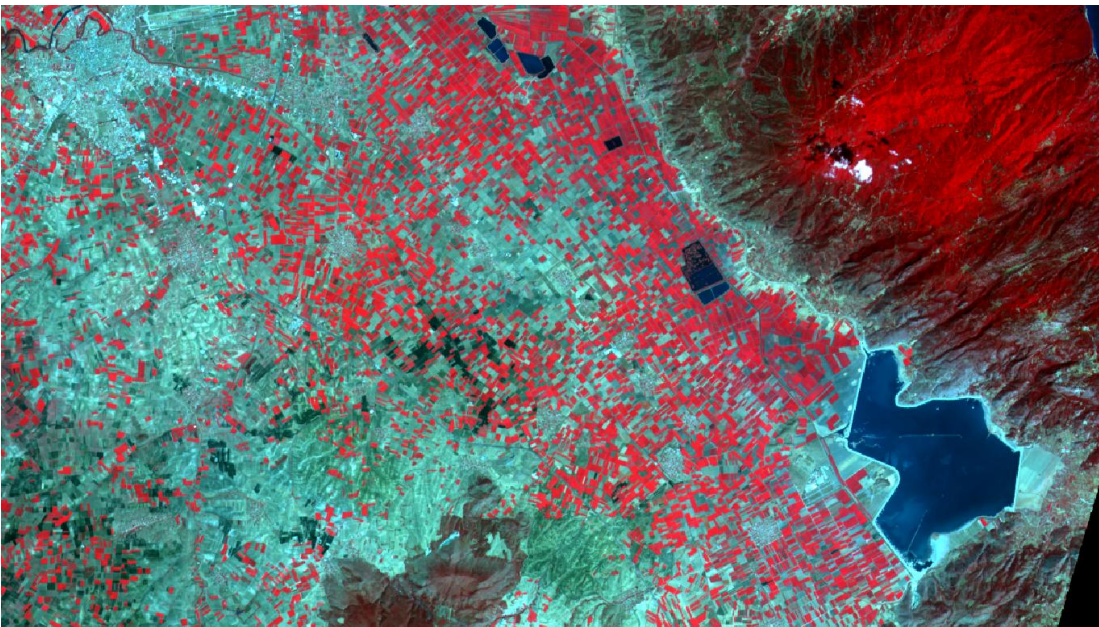
Στις 22 Φεβρουαρίου του 1986 η Γαλλία εκτοξεύει από τη Γαλλική Γουινέα το δορυφόρο SPOT 1 (Système Probatoire d'Observation de la Terre) μέσω του ευρωπαϊκού πυραύλου Αριάννη ο οποίος θα δώσει εικόνες δύο ημέρες αργότερα. Έχει κυκλική τροχιά με κλίση 98,7ο με τον Ισημερινό, καθιστώντας τον έτσι ηλιοσύγχρονο και πετά σε ύψος 822Km. Η περίοδος περιστροφής του είναι 101 λεπτά και πραγματοποιώντας 14+5/26 περιστροφής ημερησίως, επανατοποθετείται στην αρχική του τροχιά σε 26 ημέρες έχοντας πραγματοποιήσει 369 περιστροφές. Μεταφέρει δύο ολόδια ραδιόμετρα που λέγονται Ραδιόμετρα Υψηλής Διακριτικής ικανότητας στο Ορατό φάσμα (HRV - Haute Resolution Visible).

Το πλάτος τροχιάς του είναι 60Km με πλευρική υπερκάλυψη κατά 3Km, και η καταγραφή στα HRV γίνεται στα τρία φασματικά κανάλια του που είναι από 0,5 έως 0,59, από 0,61 έως 0,68 και από 0,79 έως 0,89. Εκτός όμως από την καταγραφή αυτή στα τρία κανάλια, διαθέτει και μια καταγραφή σ' ένα μόνο κανάλι, το λεγόμενο π α ν χ ρ ω μ α τ ι κ ό, που είναι από 0,51 έως 0,73μm.

Μια πλήρης εικόνα scene του SPOT καλύπτει 60 x 60 Km και η διακριτική του ικανότητα είναι στα τρία κανάλια 20m και στο πανχρωματικό στα 10m.



Εικόνα 3.14 Περιοχή της Θεσσαλίας με την Λάρισα στην ΒΔ και την λίμνη Κάρλα στο ΝΑ περιοχή.
Ψευδοχρωματική σύνθεση των φασματικών καναλιών 1,2, και 3 σε B,G,R δορυφορικής εικόνας SPOT της 16/08/2010,
PIXEL SIZE 20x20μ.



Εικόνα 3.15 Περιοχή της Θεσσαλίας με την Λάρισα στην ΒΔ και την λίμνη Κάρλα στο ΝΑ περιοχή.
Ψευδοχρωματική σύνθεση των φασματικών καναλιών 1,2, και 4 σε B,G,R δορυφορικής εικόνας SPOT της 16/08/2010
PIXEL SIZE 20x20μ.

Τα ψηφιακά δεδομένα συλλογής είναι 8bit (δηλ. $2^8 = 256$ διαβαθμίσεις του γκρι) και η ικανότητα αποστολής δεδομένων ανέρχεται σε 48Mb/sec.

Ο SPOT 2 εκτοξεύθηκε το 1990 και έχει κάποιες μικρές τεχνικές διαφορές με το 1 (ανιχνευτές CCD Thomson αντί Fairchild) και ο SPOT 3 που εκτοξεύθηκε το 1993 και διαθέτει ένα κανάλι στο μέσο υπέρυθρο φάσμα μεταξύ 1,5 και 1,7μm, ειδικό για την επίβλεψη της κατάστασης της βλάστησης.

Τα συστήματα καταγραφής του προγραμματίζονται ώστε να μπορούν να σαρώνουν υπό διαφορετική γωνία την ίδια επιφάνεια της γης κατά την διάρκεια δύο γειτονικών τροχιών. Το γεγονός αυτό -που αποτελεί και χαρακτηριστικό της διοφθαλμικής όρασης- δίνει την δυνατότητα στερεοσκοπικής απεικόνισης της γήινης

επιφάνειας, και αποτελεί την βάση για την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους (Digital Elevation Models, DEM) τα οποία είναι απαραίτητα στην δημιουργία τρισδιάστατων ψηφιακών χαρτών.

Μια κατατοπιστική εικόνα από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Διαστήματος παρουσιάζει το σύστημα στερεοσκοπικής καταγραφής του δορυφόρου SPOT, σχηματικά στον ιστότοπο της [ESA](http://www.esa.int/images/17-spot_400.gif), http://www.esa.int/images/17-spot_400.gif.

Το ημερολόγιο των αποστολών των δορυφόρων SPOT είναι:

Για τον δορυφόρο SPOT1 από το 1986 έως το 2003

Για τον δορυφόρο SPOT2 από το 1990 έως το 2009

Για τον δορυφόρο SPOT3 από το 1993 έως το 2006

Για τον δορυφόρο SPOT4 από το 1998

Για τον δορυφόρο SPOT5 από το 2002

Για τον δορυφόρο SPOT6 από τον Σεπτέμβριο του 2012

Για τον δορυφόρο SPOT7 από τον Ιούνιο του 2014

Και οι δορυφόροι εκτόξευσής τους είναι οι Ariane 2, 3 and 4

Στους πίνακες που ακολουθούν βλέπουμε τα γενικά χαρακτηριστικά των πρώτων δορυφόρων SPOT (Πίνακας 3.19) τα όργανα υψηλής ανάλυσης των δορυφόρων SPOT 1-5 καθώς και τα στερεοσκοπικά τους όργανα (πίνακες 3.20 και 3.21)

	Γενικά χαρακτηριστικά		
	SPOT 5	SPOT 4	SPOT 1, 2 & 3
Ημερομηνία εκτόξευσης	4 Μαΐου 2002	24 Μαρτίου 1998	SPOT1: 22 Φεβρουαρίου 1986 SPOT2: 22 Ιανουαρίου 1990 SPOT3: 26 Σεπτεμβρίου 1993
Πλατφόρμα εκτόξευσης	Ariane 4	Ariane 4	Ariane 2/3
Προγραμματισμένη διάρκεια ζωής	5 χρόνια		3 χρόνια
Κατάσταση τροχιάς	Σε τροχιά		SPOT 1 : Δεκεμβρίου 1990 SPOT 2 : 30 Ιουλίου 2009 SPOT 3 : Νοέμβριος 1997 (τέλος ζωής)
Τύπος τροχιάς	Ηλιοσύγχρονη		
Τοπική ώρα διέλευσης από τον Ισημερινό (φθίνουσα)	10:30 π.μ.		
Υψομετρική απόσταση από τον Ισημερινό	822 km		
Κλίση	98,7°		
Ταχύτητα	7.4 km/s		
Ρυθμιστής ύψους	Earth-pointing και ελεγχόμενη εκτροπή άξονα (για αντιστάθμιση επιπτώσεων λόγω περιστροφής της γης)		Earth-pointing
Περίοδος τροχιάς	101.4 λεπτά		
Κύκλος τροχιάς	26 ημέρες		
Συνολική μάζα	3000 kg	2760 kg	1800 kg
Διαστάσεις	3.1 x 3.1 x 5.7 m	2 x 2 x 5.6 m	2 x 2 x 4.5 m
Ηλιακή σειρά (τέλος ζωής)	2400 W	2100 W	1100 W
Χωρητικότητα εγγραφής	90 Gbit μνήμη (210 εικόνες με μέσο μέγεθος αρχείων 144 Mb)	Δύο 120 Gbits μνήμες συν 9 Gbit έξτρα μνήμη (560 εικόνες σε κάθε μνήμη + 40 εικόνες, με μέσο μέγεθος αρχείου 36 Mb)	Δύο 60 Gbit μνήμες (280 εικόνες για κάθε μνήμη, με μέσο μέγεθος αρχείου 36 Mb)
Onboard επεξεργασία εικόνων	Απόκτηση έως 5 εικόνες ταυτοχρόνως, 2	Απόκτηση 2 εικόνων ταυτοχρόνως, που εν συνεχεία	Απόκτηση 2 εικόνων ταυτοχρόνως, που εν συνεχεία καταγράφονται

	downlinked σε πραγματικό χρόνο και 3 αποθηκεύονται επί του σκάφους, χρησιμοποιώντας αναλογία συμπίεσης 2.6 (DCT)	καταγράφονται χρησιμοποιώντας αναλογία συμπίεσης 1.3 (DPCM)	χρησιμοποιώντας αναλογία συμπίεσης 1.3 (DPCM, μόνο παγχρωματικές εικόνες)
Ζεύξη τηλεμετρίας (8 GHz)	2 x 50 Mb/s	50 Mb/s	

Πίνακας 3.20 Γενικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων SPOT 1-5.

	Όργανα υψηλής ανάλυσης		
	SPOT 5	SPOT 4	SPOT 1, 2 & 3
Όργανα	2 HRGs	2 HRVIRs	2 HRVs
Φασματικές ζώνες και διακριτική ικανότητα	2 παγχρωματικές (5m), 3 πολυφασματικές (10 m) 1 υπέρυθρη βραχέων κυμάτων (20 m)	1 παγχρωματική (10 m) 3 πολυφασματικές (20 m) 1 υπέρυθρη βραχέων κυμάτων (20 m)	1 παγχρωματική (10 m) 3 πολυφασματικές (20 m)
Φασματικό εύρος	P: 0,48 – 0.71 μm B1 (πράσινο): 0.50 – 0.59 μm B2 (κόκκινο) : 0.61 – 0.68 μm B3 (εγγύς υπέρυθρο): 0.78 – 0.89 μm B4 (υπέρυθρο βραχέων κυμάτων): 1.58 – 1.75 μm	M: 0.61 – 0.68 μm B1 (πράσινο): 0.50 – 0.59 μm B2 (κόκκινο): 0.61 – 0.68 μm B3 (εγγύς υπέρυθρο): 0.78 – 0.89 μm B4 (υπέρυθρο βραχέων κυμάτων): 1.58 – 1.75 μm	P: 0.51 – 0.73 μm B1 (πράσινο): 0.50 – 0.59 μm B2 (κόκκινο): 0.61 – 0.68 μm B3 (εγγύς υπέρυθρο): 0.78 – 0.89 μm
Εύρος απεικόνισης	60 km x 60 km to 80 km		
Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα	8 bits		

Πίνακας 3.21 Όργανα υψηλής ανάλυσης των δορυφόρων SPOT 1-5.

	SPOT 5		SPOT 4	SPOT 1, 2 & 3
Όργανα	HRS κατά μήκος της τροχιάς stereoviewing	HRG stereoviewing ικανότητα σε όλη την τροχιά	HRVIR stereoviewing ικανότητα σε όλη την τροχιά	HRV stereoviewing ικανότητα σε όλη την τροχιά
Φασματικές ζώνες και διακριτική ικανότητα	1 παγχρωματική (10 m) (δειγματοληψία κάθε 5 m κατά μήκος της τροχιάς) 10 m σε όλη την τροχιά 5 m κατά μήκος της τροχιάς	2 παγχρωματικές (5m), συνδυάστηκαν για να δημιουργήσουν έναν μετρητή 2.5 3 πολυφασματικές (10 m) 1 υπέρυθρη βραχέων κυμάτων (20 m)	1 παγχρωματική (10 m) 3 πολυφασματικές (20 m) 1 υπέρυθρη βραχέων κυμάτων (20 m)	1 παγχρωματική (10 m) 3 πολυφασματικές (20 m)
Φασματικό εύρος	P: 0.49 – 0.69 μm	P: 0.48 – 0.71 μm B1: 0.50 – 0.59 μm B2: 0.61 – 0.68 μm B3: 0.78 – 0.89 μm B4: 1.58 – 1.75 μm	M: 0.61 – 0.68 μm B1: 0.50 – 0.59 μm B2: 0.61 – 0.68 μm B3: 0.78 – 0.89 μm B4: 1.58 – 1.75 μm	P: 0.51 – 0.73 μm B1: 0.50 – 0.59 μm B2: 0.61 – 0.68 μm B3: 0.78 – 0.89 μm

Κανάλια απεικόνισης	600 km x 120 km	60 km x 60 km to 80 km	
Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα	8 bits		
Αναλογία βάσης/ύψους (B/Y)	~ 0,84 ($\pm 20^\circ$)	0.5 έως 1.1	
Ακρίβεια θέσης (δεν υπάρχουν σημεία ελέγχου επί του εδάφους, επίπεδη μορφολογία εδάφους)	10 m *	30 m *	350 m *
Χρόνος μεταξύ δύο εικόνων	90 δευτερόλεπτα (ταυτοχρόνως)	μεταβλητό	

Πίνακας 3.22 Στερεοσκοπικά μέσα των δορυφόρων SPOT.

* Η ακριβής τοποθεσία αξιολογείται με βάση μια στατιστική που υπολογίζει ένα μεγάλο αριθμό σκηνών που αποκτήθηκαν από το Σεπτέμβριο του 2003, σε όλη τη γη.

Οι δορυφόροι SPOT διαθέτουν δύο HRV συστήματα απεικόνισης υψηλής ανάλυσης, η οποία μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα και ταυτόχρονα. Κάθε HRV είναι ικανό να ανιχνεύει είτε σε χωρική ανάλυση παγχρωματικού μονού καναλιού (PLA) είτε σε χωρική ανάλυση τριών καναλιών πολυφασματικής λειτουργία (MLA). Κάθε αισθητήρας σάρωσης HRV κατά μήκος της τροχιάς αποτελείται από τέσσερις γραμμικές συστοιχίες των ανιχνευτών: μια συστοιχία 6000 στοιχείων για την παγχρωματική λειτουργία εγγραφής σε χωρική ανάλυση των 10 m, και μια συστοιχία 3000 στοιχείων για κάθε μία από τις τρεις πολυφασματικές ζώνες σε χωρική ανάλυση 20 m. Το πλάτος ζώνης και για τους δύο τρόπους λειτουργίας είναι 60 km στο ναδίρ.

Τέλος οι δορυφόροι SPOT 6 και SPOT 7 που πέταξαν στις 09/09/2012 και 30/06/2014 προορίζονται για να παρέχουν δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης έως το 2014.

Έχουν ένα τριαξονικό ανιχνευτή της θέσης των αστερών, ένα γυροσκόπιο οπτικών ινών (FOG), ένα γυροσκόπιο ελέγχου των ροπών (CMGs) και τέλος έναν κεντρικά τοποθετημένο οπτικό αισθητήρα. Επειδή οι δίδυμοι δορυφόροι Pleiades θεωρούνται διάδοχοι και συμβατοί με τους δορυφόρους SPOT 6 και 7, τελευταίοι τοποθετήθηκαν σε φάση κάθετης τροχιάς με τους Pleiades δημιουργώντας έτσι έναν τεχνητό αστερισμό.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους είναι, με σύγχρονη πολυφασματική και παγχρωματική καταγραφή, σε φασματικά κανάλια : ένα παγχρωματικό [Panchromatic](#) (450 – 745 nm) με χωρική διακριτική ικανότητα 1,5μ και τέσσερα πολυφασματικά στα μήκη κύματος, Blue (450 – 525 nm), Green (530 – 590 nm), Red (625 – 695 nm) και [Near-infrared](#) (760 – 890 nm) και σε ικανότητα καταγραφής τρία εκατομμύρια τετραγωνικά χλμ. την ημέρα.

3.7.4 Οι δορυφόροι της Εταιρείας DigitalGlobe

3.7.4.1 Ο δορυφόρος IKONOS

Το έτος 1991 η Αμερικανικός ιδιωτικός οργανισμός Lockheed Martin άρχισε ένα πρόγραμμα με το όνομα Εμπορικό Σύστημα Τηλεπισκόπησης (CRSS - Commercial Remote Sensing System) για την υποστήριξη του οποίου δημιουργήθηκε αργότερα, το 1994, η εταιρεία Space Imaging Inc., με την συμβολή διαφόρων εταίρων, και σκοπό την δημιουργία και διάθεση δορυφορικών εικόνων υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (1 μέτρου στο παγχρωματικό και 4 μέτρων στο πολυφασματικό μήκος κύματος) (Digital Globe 2015).

Έχοντας την επίσημη άδεια από την Αμερικανική από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC - Federal Communications Commission) για την κατασκευή και αποστολή ενός εμπορικού συστήματος που θα περιλάμβανε δύο δορυφόρους η Space Imaging Inc. κατασκεύασε και πέταξε στις 27 Απριλίου 1999 τον δορυφόρο Ikonos 1 ο οποίος δυστυχώς λόγω δυσλειτουργίας κατέπεσε στον νότιο Ειρηνικό Ωκεανό.

Ο Ikonos 2 πέταξε σε μικρό χρονικό διάστημα μετά στις 24 Σεπτεμβρίου του 1999 και η διάθεση δορυφορικών εικόνων άρχισε την 01/01/2000. Ο Ikonos 2 είναι ένας ηλιοσύγχρονος δορυφόρος που εκτοξεύτηκε από τη βάση της Πολεμικής Αεροπορίας Vandenberg στην Καλιφόρνια. Η πλατφόρμα του ονομάστηκε Athena 2 και η διάρκεια αποστολής του δορυφόρου είναι τα 12 τουλάχιστον χρόνια. Ο δορυφόρος IKONOS είναι ο πρώτος εμπορικός δορυφόρος στον κόσμο, ο οποίος συλλέγει παγχρωματικές (μαύρο και άσπρο) εικόνες με 0,8 m ανάλυση και πολυφασματικές (έγχρωμες) εικόνες με ανάλυση 3,2 m.

Οι εικόνες από τους παγχρωματικούς και πολυφασματικούς αισθητήρες μπορούν να συγχωνευθούν και να δημιουργήσουν έγχρωμες εικόνες ανάλυσης 0,80 m. (pan-sharpened).



Εικόνα 3.16 Τμήμα της πόλης της Σκιάθου.

Εικόνα του δορυφόρου IKONOS της 21/8/2007, PIXEL SIZE 1 M , χρωματική σύνθεση Blue-green-red στα φασματικά κανάλια 1,2,3,pan-sharpened.

Οι εικόνες που προσφέρει ο δορυφόρος IKONOS χρησιμοποιούνται για θέματα εθνικής ασφάλειας, για στρατιωτική χαρτογράφηση, για εναέριες και θαλάσσιες μεταφορές αλλά και θέματα τοπικού και περιφερειακού χαρακτήρα όπως είναι διάφορες πολεοδομικές εφαρμογές, αστική εξάπλωση καταγραφή χρήσεων-καλύψεων γης σε μεγάλες κλίμακες, καταγραφές διαφόρων δικτύων κ.ά.



Εικόνα 3.17 Νότια Σκιάθος: Περιοχή Πλατανιάς.

Εικόνα του δορυφόρου IKONOS της 21/8/2007, PIXEL SIZE 1 M, χρωματική σύνθεση Blue-green-red στα φασματικά κανάλια 2,3,4 pan-sharpened.

Από τα 700 περίπου Km υψηλής τροχιάς, ο IKONOS έχει χρόνο επανεγγραφής της ίδιας περιοχής κάθε τρεις ημέρες και άμεση εκπομπή σήματος, η οποία είναι μεγαλύτερη και από αυτή που μπορούν να προσφέρουν δώδεκα επίγειοι σταθμοί.

Οι εταιρείες DigitalGlobe, Inc. and GeoEye, Inc. (Dulles, VA) στις 31 Ιανουαρίου του 2013, μετά από συγχώνευση δημιούργησαν την εταιρεία DigitalGlobe η οποία είναι υπεύθυνη για τις αποστολές των δορυφόρων: Ikonos-2 (1999), QuickBird (2001), WorldView-1 (2007), GeoEye-1 (2008), και WorldView-2 (2009).

Το οπτικό Τηλεσκόπιο τύπου Cassegrain με 70 cm διάμετρο του βασικού καθρέπτη και 10cm εστιακή απόσταση συλλέγει εικόνες εύρους 11-13 Km. Η τεχνολογία του ανιχνευτή κατευθυνόμενης δέσμης δημιουργεί 6500 γραμμές από παγχρωματικά και πολυφασματικά δεδομένα συγχρόνως. Τα πολυφασματικά κανάλια του IKONOS αντιστοιχούν στα φασματικά κανάλια του δορυφόρου LANDSAT στο ορατό μήκος κύματος.

Παράμετροι καναλιών	φασματικών	Τιμές των παραμέτρων	Ιδιότητες	Τιμές των Ιδιοτήτων
Παγχρωματικό εύρος σε μικρόμετρα μm	φασματικό	0.45 - 0.90 μm	Εστίαση γωνίας εκτός Ναδύρ	±30° προς όλες τις διευθύνσεις
Πολυφασματικό εύρος σε μικρόμετρα μm	εύρος σε	0.45-0.53, (blue) 0.52-0.61, (green) 0.64-0.72, (red) 0.76-0.86, (NIR)	Δυνατότητα Στερεοσκοπικής Απεικόνισης	Κατά μήκος της τροχιάς
Χωρική Διακριτική Ικανότητα		1 m PAN (0.82 m στο Ναδύρ), 4 m MS (3.2 m στο Ναδύρ)	Πλάτος Σάρωσης (μονή εικόνα) Μήκος σάρωσης	11.3 km x 11.3 km 11 km x 100 km (length)
Ραδιομετρική Ικανότητα	Διακριτική	11 bit	Οπτικό πεδίο (Field Of Regard)	±350 km at 1 m GSD

Πίνακας 3.23 Παράμετροι και ιδιότητες του συνόλου του Οπτικού Απεικονιστή (OSA - Optical Sensor Assembly).

Ο δορυφόρος IKONOS 2 είναι ηλιοσύγχρονος σχεδόν πολικής τροχιάς, πετά σε ύψος 681-709 km, κλίση 98.1°, περίοδο 98 min, επανάληψης κυκλικής τροχιάς 14 ημέρες, με κύκλο επαναδιέλευσης 1-3 ημέρες.

Μέγεθος σκάφους	1,83 m × 1,57 m (σε σχήμα εξαγωνικού πρίσματος)
Χωρική ανάλυση	Παγχρωματικό: 0,82 m, Πολυφασματικό: 3.2 m
Ακρίβεια θέσης	9-15 μέτρα
Εύρος κάλυψης τροχιάς	11.3 km
Off-ναδύρ απεικόνισης	Έως 60°
Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα	11 bits
Χρόνος επανεγγραφής	Περίπου 3 ημέρες
Υψόμετρο τροχιάς	681 km
Επιφάνεια καταγραφής	240.000 km ² / ημέρα (Pan + MS)

Πίνακας 3.24 Χαρακτηριστικές ιδιότητες του δορυφόρου IKONOS.

Τα πλεονεκτήματα του IKONOS είναι:

- Απόκτηση υψηλής ποιότητας δορυφορικές εικόνες για τη δημιουργία χαρτών, αλλαγής ανίχνευσης, υψηλή ανάλυση εικόνων κ.ά.
- η δυνατότητα εντοπισμού των χαρακτηριστικών της γεωγραφικής θέσης για τη δημιουργία χαρτών σε όλο τον κόσμο (EO Portal directory, 2015),
- η συλλογή από ένα ευρύ φάσμα γεωχωρικών πληροφοριών και
- η επέκταση του εύρους των κατάλληλων στόχων απεικόνισης για τη βελτίωση της λήψης αποφάσεων.

Φασματικά Κανάλια/Χαρακτηριστικά	Μήκος κύματος (μm)	Χωρική Διακριτική Ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς(km)	Χρόνος επανεγγραφής (ημέρες)
Κανάλι 1 (VIS)	0,45- 0,52	4	11	3
Κανάλι 2 (VIS)	0,52- 0,6	4	11	3
Κανάλι 3 (VIS)	0,63- 0,69	4	11	3
Κανάλι 4 (NIR)	0,76- 0,9	4	11	3
Παγχρωματικό κανάλι	0,45- 0,9	1	11	3

Πίνακας 3.25 Χαρακτηριστικά των φασματικών καναλιών του IKONOS.

3.7.4.2 Ο δορυφόρος WorldView3

Μετά από άδεια που έλαβε από το Εμπορικό Επιμελητήριο των Ηνωμένων Πολιτειών τον Ιούνιο του 2014, η εταιρεία Digital Globe στο τέλος Φεβρουαρίου του 2015 παρήγαγε και διαθέτει μέσω του δορυφόρου WorldView3 δορυφορικές εικόνες με χωρική διακριτική ικανότητα 1,2 μ για τα πολυφασματικά κανάλια και 30 εκ. στο παγχρωματικό κανάλι (Digital Globe, 2015).

Ο δορυφόρος WorldView3 ο οποίος πέταξε τον Αύγουστο του 2013 και επωνομάζεται (όχι πολυφασματικός ούτε υπερφασματικός αλλά) σουπερφασματικός, θεωρείται σήμερα (2015) ως ένας από τους πλέον εφοδιασμένους και σύγχρονους δορυφόρους καταγραφής της επιφάνειας της γης.

Πετά στα 617 χλμ., είναι ηλιοσύγχρονος, έχει περίοδο 97 λεπτά, και εκτιμάται ότι μπορεί να προσφέρει τα προϊόντα του μέχρι και 12 χρόνια μετά την πρώτη λειτουργία του.

Η ενέργεια που διαθέτει είναι 3.1 KiloWatt χάρις στο ηλιακό πάνελ που διαθέτει αλλά και επιπλέον 100 Αμπερώρια χάριν της μπαταρίας με την οποία είναι εφοδιασμένος. Οι διαστάσεις του είναι 5,7μ ύψος, 2,5 μ πλάτος και 7,1μ μήκος κατά μήκος των ανοικτών ηλιακών πάνελ του, με μάζα 2800 κιλά.

Τα Φασματικά κανάλια που διαθέτει χωρίζονται σε 4 ομάδες:

Το Παγχρωματικό: 450 - 800 nm

Τα 8 Πολυφασματικά που είναι τα:

Ακτογραφικό: 400 - 450 nm, Μπλε: 450 - 510 nm, Πράσινο: 510 - 580 nm,

Κίτρινο: 585 - 625 nm, Κόκκινο: 630 - 690 nm, Κόκκινης ακμής: 705 - 745 nm,

Εγγύς -υπέρυθρο1: 770 - 895 nm, Εγγύς -υπέρυθρο2: 860 - 1040 nm,

Τα 8 Μικροκυματικά Εγγύς υπέρυθρα κανάλια (SWIR) που είναι τα:

SWIR-1: 1195 - 1225 nm, SWIR-5: 2145 - 2185 nm,

SWIR-2: 1550 - 1590 nm, SWIR-6: 2185 - 2225 nm,

SWIR-3: 1640 - 1680 nm, SWIR-7: 2235 - 2285 nm,

SWIR-4: 1710 - 1750 nm, SWIR-8: 2295 - 2365 nm,

Και τα 12 CAVIS κανάλια:

Desert Clouds: 405 - 420 nm, Aerosol-1: 459 - 509 nm, Green: 525 - 585 nm,

Aerosol-2: 635 - 685 nm, Water-1: 845 - 885 nm, Water-2: 897 - 927 nm, Water-3: 930 - 965 nm,

NDVI-SWIR: 1220 - 1252 nm, Cirrus: 1365 - 1405 nm, Snow: 1620 - 1680 nm, Aerosol-3: 2105 -

2245 nm, Aerosol-3: 2105 - 2245 nm

Μπορεί και καταγράφει επιφάνεια 680.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα την ημέρα με συχνότητα επαναδιέλευσης μικρότερη από μία ημέρα και η μέγιστη επιφάνεια καταγραφής (καταγεγραμμένη σε πέντε λωρίδες) είναι 66,5 χλμ. X 112 χλμ. στην απλή εικόνα του και 26,6χλμX112χλμ. για το στερεοζεύγος. Έχει ραδιομετρική διακριτική ικανότητα 11 bit και ικανότητα αποθήκευσης στην πλατφόρμα του 2199Gb.

Τα κυριότερα επιστημονικά πεδία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εικόνες του είναι:

- Ανάλυση και Διαχείριση περιβάλλοντος.
- Πρόληψη και Διαχείριση φυσικών και ανθρωπογενών καταστροφών.
- Ανάλυση εδαφών και βλάστησης.
- Γεωλογικές, μεταλλευτικές και έρευνες για πετρέλαιο και φυσικό αέριο.
- Μελέτες των παράκτιων ζωνών και βαθυμετρικές έρευνες.
- Ταξινομήσεις καλύψεων-χρήσεων γης και χαρτογραφήσεις.

- Εντοπισμός, ανάλυση και προσδιορισμός ανθρωπογενών κατασκευών.
- Μελέτες και έρευνες διαχρονικών μεταβολών.

3.7.4.3 Ο δορυφόρος Geoeye 1

Ο δορυφόρος GeoEye-1 συλλέγει παγχρωματικές εικόνες με χωρική διακριτική ικανότητα 0,41μ. και πολυφασματικές εικόνες σε ανάλυση 1,65μ.



Εικόνα 3.19 Χωριό Αγία Τριάδα, Φαρσάλων. Χρωματική σύνθεση των φασματικών καναλιών 1,2,3 σε B,G,R του δορυφόρου Geoeye της 05/04/2015, PIXEL SIZE 0,5x0,5.



Εικόνα 3.20 Χωριό Αγία Τριάδα, Φαρσάλων
Χρωματική σύνθεση των φασματικών καναλιών 1,2,4 σε B,G,R του δορυφόρου Geoeye της 05/04/2015, PIXEL SIZE 0,5x0,5.

Η δυνατότητα ημερήσιας καταγραφής του σε πολυφασματικές εικόνες ανέρχεται στα 350 τετραγωνικά χιλιόμετρα, ιδιαίτερα κατάλληλη για χαρτογραφήσεις μεγάλης κλίμακας. Ο GeoEye-1 έχει τη δυνατότητα επανεγγραφής κάθε τρεις ημέρες και με ειδικές συνθήκες ταχύτερα.

Πληροφορίες εκτόξευσης	Ημερομηνία: 6 Σεπτεμβρίου 2008 με εκτιμώμενη διάρκεια ζωής περισσότερο από 10 χρόνια, σε πλατφόρμα 4.34 m μήκους και 4186 lbs βάρους Όχημα εκτόξευσης: Delta II Περιοχή εκτόξευσης: Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Vandenberg, Καλιφόρνια
Τροχιά	Ηλιοσύγχρονος, πετά στα 681 χιλιόμετρα, με περίοδο 98 λεπτά
Φασματική και χωρική διακριτική ικανότητα (Δ.Ι.)	Πολυφασματικές εικόνες: Χωρική Δ.Ι. : 1,65 m GSD στο ναδίρ Φασματική Δ.Ι. : Μπλε: 450 - 510 nm Πράσινο: 510 - 580 nm Κόκκινο: 655 - 690 nm Εγγύς υπέρυθρο: 780 - 920 nm Παγχρωματικές εικόνες: Χωρική Δ.Ι. : 41 εκατοστά GSD στο ναδίρ Φασματική Δ.Ι. : Μαύρο & Άσπρο: 450 - 800 nm
Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα	11-bit ανά pixel
Εύρος κάλυψης τροχιάς	15,3 χιλιόμετρα στο ναδίρ
Συστήματα και άλλοι αισθητήρες	Σύστημα σταθεροποίησης 3 αξόνων Αισθητήρες: ανιχνευτές αστερών, στερεάς κατάστασης IRU, GPS
Χρόνος επαναστόχευσης	Χρόνος περιστροφής 200 χιλιομέτρων: 20 δευτερόλεπτα
Δυνατότητα σε όγκο αποθήκευσης δεδομένων	1 Tb

Πίνακας 3.26 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου GeoEye-1.

3.7.4.4 Ο δορυφόρος Quickbird

Ο Quickbird είναι ένας ηλιοσύγχρονος δορυφόρος, ο οποίος εκτοξεύτηκε στις 18 Οκτωβρίου του 2001 από τη βάση της Πολεμικής Αεροπορίας Vandenberg στην Καλιφόρνια. Το όχημα εκτόξευσης έχει το όνομα DELTA II, έχει βάρος 2.400 λίβρες και μήκος 3,04 μέτρα. Η αποστολή του επεκτάθηκε έως τα μέσα του 2014. Ο QuickBird είναι ένας δορυφόρος της DigitalGlobe, ο οποίος προσφέρει υπο-μέτρηση ανάλυσης εικόνες, υψηλή γεωγραφικής ακρίβεια, ενώ διαθέτει και μεγάλο αποθηκευτικό χώρο δεδομένων. Με την παγκόσμια συλλογή παγχρωματικών και πολυφασματικών εικόνων, ο QuickBird έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα γεωχωρικών εφαρμογών. Σε επιχειρησιακό υψόμετρο 482 χιλιομέτρων, ο QuickBird αυτή τη στιγμή λειτουργεί σε υψόμετρο 450 χιλιομέτρων και θα συνεχίσει να λειτουργεί με σταδιακή κάθοδο μέχρι το τέλος της αποστολής του σε υψόμετρο 300 km.

Κανάλια	Μήκος κύματος (μm)	Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)	Χρόνος επανεξέτασης (μέρες)
Κανάλι 1 (VIS)	0,45 έως 0,52	2,44 (2,88)	16,6	3
Κανάλι 2 (VIS)	0,52 έως 0,6	2,44 (2,88)	16,6	3
Κανάλι 3 (VIS)	0,63 έως 0,69	2,44 (2,88)	16,6	3
Κανάλι 4 (NIR)	0,76 έως 0,9	2,44 (2,88)	16,6	3
Παγχρωματικό κανάλι (VIS)	0,45 έως 0,9	0,61 (0,72)	16,6	3

Πίνακας 3.27 Φασματικά Κανάλια του δορυφόρου Quickbird.

Οι εικόνες που ακολουθούν δείχνουν την διαφορά σε χωρική διακριτική ικανότητα των προϊόντων του δορυφόρου Quickbird.



Εικόνα 3.21 Από την βιομηχανική περιοχή του Βόλου, δυτικά, οδός Λαρίσης
Παγχρωματική Δορυφορική εικόνα του δορυφόρου QuickBird της 22/06/2004, PIXEL SIZE 0,6x0,6.



Εικόνα 3.22 Από την βιομηχανική περιοχή του Βόλου, δυτικά, οδός Λαρίσης
Χρωματική σύνθεση των φασματικών καναλιών 1,2,3 σε B,G,R, πολυφασματικής δορυφορικής εικόνας του δορυφόρου QuickBird της 22/06/2004, PIXEL SIZE 2,4x2,4μ.

Μερικά τεχνικά πλεονεκτήματα του δορυφόρου QuickBird είναι:

- Χωρική διακριτική ικανότητα των εικόνων που παρέχει: Στις παγχρωματικές 61cm στο ναδίρ και στις πολυφασματικές 2,44 m στο ναδίρ.
- Υψηλή γεωγραφική ακρίβεια.
- Σταθερή πλατφόρμα για ακριβή τοποθεσία μέτρησης.

- 16,8 km εύρος κάλυψης τροχιάς.
- Εικόνες υψηλής ποιότητας.
- Το τηλεσκόπιο του QuickBird σχεδιάστηκε ώστε να έχει μεγάλο οπτικό πεδίο (απεριόριστο εκτός άξονα).
- Υψηλή αντίθεση (MTF).
- Υψηλή αναλογία σήματος σε σχέση με το θόρυβο.
- Αποθηκευτικός χώρος δεδομένων στο σκάφος.
- 128 gigabits χωρητικότητα αποθήκευσης εικόνων στο σκάφος.

Τα πλεονεκτήματά του είναι (Eo Portal Directory 2015):

- Η απόκτηση υψηλής ποιότητας εικόνων για τη δημιουργία χαρτών, η αλλαγή ανίχνευσης και η ανάλυση των εικόνων.
- Η δυνατότητα εντοπισμού των χαρακτηριστικών της γεωγραφικής θέσης, προκειμένου να δημιουργηθούν χάρτες απομακρυσμένων περιοχών, χωρίς τη χρήση σημείων ελέγχου εδάφους.
- Η τακτική συλλογή παγκόσμιων ενημερωμένων προϊόντων εικόνας και
- Η επέκταση του εύρους των κατάλληλων στόχων απεικόνισης.

	Υψόμετρο 450 km	Υψόμετρο 300 km
Τροχιά	Τύπος: ηλιοσύγχρονος, στις 10 π.μ. φθίνων κόμβος Περίοδος: 93,6 min	Τύπος: ηλιοσύγχρονος, στις 10 π.μ. φθίνων κόμβος Περίοδος: 90,4 min
Ανάλυση αισθητήρα και φασματικό εύρος ζώνης	Παγχρωματικό: 61 cm GSD στο ναδίρ Μαύρο & Άσπρο: 405 - 1053 nm Πολυφασματικό: 2.44 m GSD στο ναδίρ Μπλέ: 430 - 545 nm Πράσινο: 466 - 620 nm Κόκκινο: 590 - 710 nm Κοντά στο υπέρυθρο: 715 - 918 nm	Παγχρωματικό: 41 cm GSD στο ναδίρ Πολυφασματικό: 1,63 m GSD στο ναδίρ
Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα	11bits ανά πίξελ	
Εύρος κάλυψης τροχιάς	Ονομαστικό πλάτος ζώνης: 16,8 km στο ναδίρ	Ονομαστικό πλάτος ζώνης: 11,2 km στο ναδίρ
Προσδιορισμός στάσης και έλεγχος	Τύπος: σύστημα σταθεροποίησης 3 αξόνων, GPS	
Χρόνος επαναστόχευσης	Χρόνος περιστροφής 200 km: 38 sec	Χρόνος περιστροφής 200 km: 44 sec
Αποθηκευτικός χώρος	128 GB χωρητικότητα	
Διαβιβάσεις	Ωφέλιμο φορτίο δεδομένων: 320 Mbps X-band Housekeeping: X-band από 4,16 και 256 Kbps, 2 Kbps S-band uplink	
Συχνότητα επανεπίσκεψης (στους 40° βόρειου γεωγραφικού πλάτους)	2,4 ημέρες σε απόσταση 1 m GSD ή λιγότερο 5,9 ημέρες στους 20 ° στο ναδίρ ή λιγότερο	2,1 ημέρες σε απόσταση 1 m GSD ή λιγότερο 8,7 ημέρες στους 20 ° στο ναδίρ ή λιγότερο
Ακρίβεια μέτρησης	23 m CE90, 17 m LE90 (χωρίς εδαφικό έλεγχο)	
Χωρητικότητα	200.000 km ² ανά ημέρα	100.000 km ² ανά ημέρα

Πίνακας 3.28 Προδιαγραφές του δορυφόρου Quickbird.

3.7.5 Οι δορυφόροι Pleiades

Pleiades είναι ένα οπτικό σύστημα παρατήρησης που αποτελείται από δύο πανομοιότυπους δορυφόρους. Το σύστημα Pleiades περιλαμβάνει τους δορυφόρους 1A και 1B. Ο 1A εκτοξεύτηκε στις 16 Δεκεμβρίου του 2011 και ο 1B εκτοξεύτηκε στις 2 Δεκεμβρίου του 2012. Το σύστημα των δύο δορυφόρων Pleiades σχεδιάστηκε στα πλαίσια του γαλλο-ιταλικού προγράμματος ORFEO (Optical & Radar Federated Earth Observation) μεταξύ των ετών 2001 και 2003. Το πρόγραμμα Pleiades ξεκίνησε αρχικά τον Οκτώβριο του 2003 από τη CNES (γαλλική διαστημική υπηρεσία), ενώ ανάδοχος του διαστημικού τμήματος είναι η EADS Astrium.

Οι δύο δορυφόροι λειτουργούν στην ίδια τροχιά και έχουν διαφορά αντιστάθμισης 1800, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα καθημερινής επανεξέτασης πάνω από οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη. Η τροχιά των δορυφόρων είναι ηλιοσύγχρονη, σχεδόν κυκλική και το υψόμετρο αυτής είναι 694 χιλιόμετρα (Enjoy Space, 2015).

Και οι δύο δορυφόροι ανήκουν στην κατηγορία των μικρών δορυφόρων (η μάζα τους είναι ένας τόνος) και προσφέρουν χωρική ανάλυση στο ναδίρ 0,7 μέτρα σε οπτικό πεδίο 20 χιλιομέτρων. Επίσης, χαρακτηριστικό των δορυφόρων Pleiades είναι η μεγάλη ευκινησία (εκεί οφείλεται το γεγονός της δυνατότητας επανεξέτασης σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη). Ακόμη, παρουσιάζουν εξαιρετική στερεοσκοπική ικανότητα που είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις εφαρμογές χαρτογραφίας.

Συνολικά υπάρχουν τέσσερις επίγειοι σταθμοί που λαμβάνουν και αρχειοθετούν τα δεδομένα των δορυφορικών εικόνων. Αυτοί οι σταθμοί είναι:

Τα δύο κέντρα άμυνας σε Γαλλία και Ισπανία

Δύο αστικοί σταθμοί, ένας στη γαλλική πόλη Τουλούζη και ένας πολιτικός σταθμός που βρίσκεται στην Κιρούνα της Σουηδίας και λαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων.

	Παγχρωματικό	Πολυφασματικό
Φασματικές περιοχές	480 - 830 nm	430 - 550 nm (μπλε) 490-610 nm (πράσινο) 510-580 nm (πράσινο) 600 έως 720 nm (κόκκινο) 750--950nm (εγγύς υπέρυθρο)
Προϊόντα	Χρώμα: 50cm (συγχώνευση) Συνολικά δύο εικόνες: 50cm παγχρωματική δορυφορική, 2m πολυφασματική	
Ακρίβεια	4.5m - 10m CE 90 (αποκλειστική μετατόπιση του εδάφους) με δεδομένα για το υψόμετρο χωρίς Ground Control Points (GCP)	
Εύρος κάλυψης τροχιάς	20 χιλιόμετρα	
Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα	12-bits ανά pixel	
Χρόνος επανέπισκεψης	Καθημερινά	
Υψόμετρο τροχιάς	694 χιλιόμετρα	
Τύπος τροχιάς	Ηλιοσύγχρονη	
Stereo	Ο Pleiades-1 είναι ο πρώτος δορυφόρος υψηλής ανάλυσης που προσφέρει ικανότητα Tristereο	

Πίνακας 3.29 Προδιαγραφές των δορυφόρων Pleiades.

Κανάλια	Μήκος κύματος (μm)	Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)
Παγχρωματικό κανάλι	0,45 έως 0,78	0,7	20
Κανάλι 1 (VIS)	0,45 έως 0,52	2,8	20
Κανάλι 2 (VIS)	0,52 έως 0,59	2,8	20
Κανάλι 3 (VIS)	0,63 έως 0,69	2,8	20
Κανάλι 4 (NIR)	0,77 έως 0,89	2,8	20

Πίνακας 3.30 Κανάλια αισθητήρων του οργάνου HiRI (High Resolution Optical Imager) του δορυφόρου Pleiades 1A.

Κανάλια	Μήκος κύματος (μm)	Διακριτική ικανότητα (m)	Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)
Παγχρωματικό κανάλι (Other)	0,45 έως 0,78	0,7	20
Κανάλι 1 (VIS)	0,45 έως 0,52	2,8	20
Κανάλι 2 (VIS)	0,52 έως 0,59	2,8	20
Κανάλι 3 (VIS)	0,63 έως 0,69	2,8	20
Κανάλι 4 (NIR)	0,77 έως 0,89	2,8	20

Πίνακας 3.31 Κανάλια αισθητήρων του οργάνου HiRI (High Resolution Optical Imager) του δορυφόρου Pleiades 1B.

3.8 Σημαντικοί ιστότοποι με καταλόγους δορυφόρων τηλεπισκόπησης και άλλων χρήσεων

Η παρακάτω διεύθυνση url παρουσιάζει έναν ιδιωτικό ιστότοπο με μια αρκετά μεγάλη λίστα δορυφορικών συστημάτων που μπορεί ο χρήστης να κατεβάσει σε μορφή αρχείου Excel.

http://www.ucsus.edu/nuclear_weapons_and_global_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html#.VWLyMkZMioc.

Επίσης η παρακάτω διεύθυνση ίσως είναι ο πιο πλήρης οδηγός δορυφόρων σε παγκόσμια κλίμακα OSCAR (Observing Systems Capability Analysis and Review Tool).

<http://www.wmo-sat.info/oscar/>.

Επίσης σχεδόν πλήρης θεωρείται και ο κατάλογος δορυφόρων της Σχολής Επιστημών Γεωπληροφοριών και Παρατήρησης της γης του ITC στο Twente της Ολλανδίας

(The Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) of the University of Twente)

<http://www.itc.nl/research/products/sensordb/AllSatellites.aspx>.

Τέλος ο ιστότοπος της ψηφιακής εγκυκλοπαίδειας Wikipedia στο λήμμα Satellite και στον παρακάτω ιστότοπο διαθέτει πάραπολύ χρήσιμους συνδέσμους (links) για τα διάφορα είδη (και τα σχετικά) με δορυφόρους <http://en.wikipedia.org/wiki/Satellite>.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Copernicus, 2015. Earth Observation Satellites, Διαθέσιμο στο: <http://www.copernicus.eu/main/satellites>, [Πρόσβαση 31/03/2015].

Couzy, A., 1981. *LA TELEDETECTION*”, *Que sais-je*. Paris: Presses Universitaires de France.

Digital Globe, Satellite Information. Διαθέσιμο από <https://www.digitalglobe.com/resources/satellite-information>, [Πρόσβαση 08/06/2015].

Digital Globe, 2015. WorldView 3, Διαθέσιμο στο:

<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-3/>

https://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG_WorldView3_DS_forWeb_0.pdf [Πρόσβαση 09/06/2015].

eoPortalDirectory, 2015. QuickBird 2. Διαθέσιμο στο: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/q/quickbird-2> [Πρόσβαση 10/06/2015].

Enjoy Space, 2015. Latest News. Εικόνα διαθέσιμη στο: <http://www.enjoyspace.com/en/news/first-images-from-the-pleiades-1-satellite>, [Πρόσβαση 12/06/2015].

ERS-2, 2015. Διαθέσιμη εικόνα από <http://www.k3pgp.org/Notebook/Mlrs/ers2.htm> [Πρόσβαση 24/05/2015].

- ESA, 2015. Space in Images, εικόνα διαθέσιμη στο: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2003/09/A_mosaic_of_satellite_images_showing_a_cloud-free_Europe [Πρόσβαση 01/06/2015].
- ESA, Space for Educators, Διαθέσιμη εικόνα από http://www.esa.int/Education/Apply_for_Sentinel-1_Student_Transponders_project [ημερομηνία πρόσβασης 31/02/15]
- ESA, 2015. Images, Η εικόνα είναι διαθέσιμη από http://www.esa.int/images/17-spot_400.gif [Πρόσβαση 07/01/2015].
- Eumetsat, Future Satellites, Εικόνα διαθέσιμη από <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/FutureSatellites/index.html> [ημερομηνία πρόσβασης 17/04/15].
- EO Portal directory, 2015. Ikonos 2. Διαθέσιμο στο: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/ikonos-2#foot26%29> [Πρόσβαση 08/06/2015].
- FAO Document Repository, 2015. Διαθέσιμο στο: <http://www.fao.org/docrep/003/t0355e/t0355e05.htm>, [Πρόσβαση 17/03/2015].
- Natural Resources Canada, 2013. Passive vs. Active Sensing. Διαθέσιμο στο: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/14639>, [Πρόσβαση 01/08/2014]
- NASA, 2015. What are passive and active sensors? Διαθέσιμο στο: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt_passive_active.html, [Πρόσβαση 28/04/2015].
- NASA, 2015. What Is a Satellite?, Διαθέσιμο στο: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/what-is-a-satellite-k4.html#.VWL0tkZMioc>, [Πρόσβαση 21/04/2015]
- NOAA KLM, 2015. User's Guide, Section 3.1, Διαθέσιμο στο: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c3/sec3-1.htm>, [Πρόσβαση 17/04/2015].
- Sabins, F.S.JR., 1987. *Remote Sensing Principles and Interpretation*. 2nd eds., New York: W.H. Freeman and Company.
- Satellite Meteorology, 2015. Διαθέσιμο στο: http://cimss.ssec.wisc.edu/satmet/modules/9_global_monitor/gm-8.html [Πρόσβαση 16/04/2015].
- SEOS, 2011. Introduction to Remote Sensing. Διαθέσιμο στο: <http://www.seos-project.eu/modules/remotesensing/remotesensing-c02-p02.html> [Πρόσβαση 12/09/2014].
- Short, N., 2013. The Remote Sensing Tutorial, Διαθέσιμο στο: http://fas.org/irp/imint/docs/rst/Sect16/Sect16_10a.html, [Πρόσβαση 12/09/2013].
- Siliconrepublic, 2015. ESA's Envisat satellite stops sending data to Earth, Διαθέσιμη εικόνα στο: <https://www.siliconrepublic.com/innovation/2012/04/13/esas-envisat-satellite-stops-sending-data-to-earth> [Πρόσβαση 23/03/2015].
- USGS AVHRR, 2015. Διαθέσιμο στο: http://edc2.usgs.gov/1KM/avhrr_sensor.php, [Πρόσβαση 12/03/2015]
- Vermote, E., Justice, C., Csiszar, I., Eidenshink, J., Myneni, R., Baret, F., Ed Masuoka, Wolfe, R., Claverie, M. and NOAA CDR Program, 2014. NOAA Climate Data Record (CDR) of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Version 4. NOAA National Climatic Data Center. doi:10.7289/V5PZ56R6, Διαθέσιμη εικόνα στο: <http://www.ngdc.noaa.gov/docucomp/page?xml=NOAA/NESDIS/NCDC/Geoportal/iso/xml/C00813.xml&view=getDataView&header=none> [Πρόσβαση 02/06/2015].

Κεφάλαιο 4 Προεπεξεργασία δορυφορικών εικόνων

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης

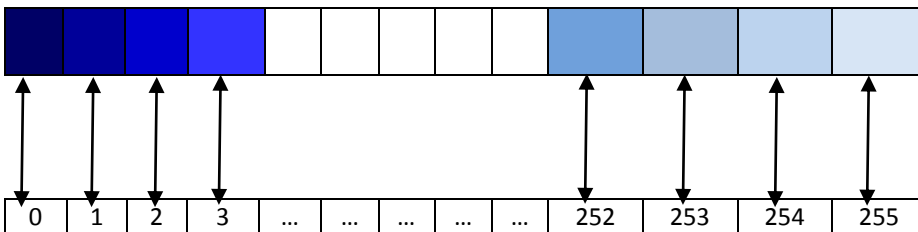
Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται και παρουσιάζονται, οι χρωματικές συνθέσεις που προκύπτουν από τον τριπλό συνδυασμό των φασματικών καναλιών των δορυφορικών πολυφασματικών εικόνων και των τριών βασικών χρωμάτων (μπλε, πράσινο, κόκκινο). Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των γεωμετρικών σφαλμάτων που εμφανίζονται στις δορυφορικές εικόνες καθώς και των μεθόδων διόρθωσής τους. Ακολουθεί η περιγραφή της έννοιας των γεωγραφικών συντεταγμένων με ιδιαίτερη αναφορά στα Ελληνικά συστήματα συντεταγμένων. Τέλος παρουσιάζονται τα παγκόσμια συστήματα πλοήγησης καθώς και οι εφαρμογές τους.

4.1 Χρωματικές συνθέσεις δορυφορικών εικόνων

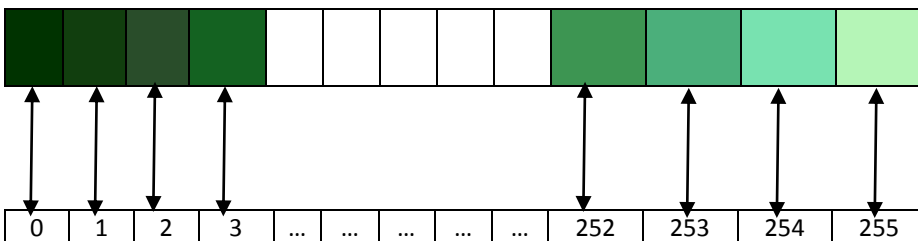
Μπορούμε να αντιστοιχίσουμε μία χρωματική κλίμακα σε μία αριθμητική κλίμακα ακεραίων τιμών έτσι ώστε κάθε διαφορετικό χρώμα ή ακριβέστερα κάθε διαφορετική απόχρωση κάποιου χρώματος να αντιστοιχεί ακριβώς σε μία και μόνον μία ακεραία τιμή. Εάν η αριθμητικές τιμές έχουν κάποιο συγκεκριμένο εύρος π.χ. το διάστημα $[0, 255]$ δηλαδή 256 ακεραίες τιμές, τότε και οι αποχρώσεις του χρώματος που αντιστοιχούμε θα πρέπει να είναι 256 σε αριθμό (8-bit).

Έτσι π.χ. για την αντιστοιχία αυτή στο μπλε χρώμα δημιουργούμε την παρακάτω χρωματική κλίμακα και την αντιστοιχούμε, ένα προς ένα με κάθε τιμή της κλίμακας των ακεραίων στο διάστημα $[0,255]$ όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.



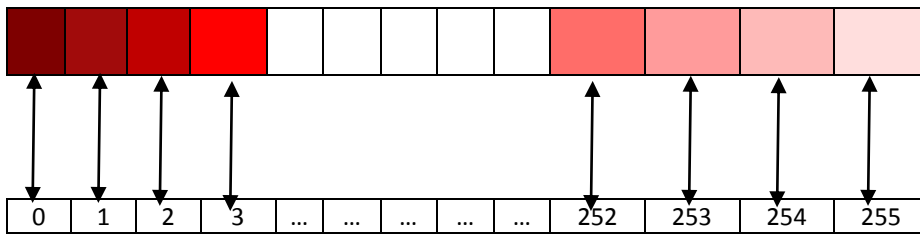
Σχήμα 4.1 Χρωματικές διαβαθμίσεις 8-bit του μπλε χρώματος.

Οι χρωματικές διαβαθμίσεις (αποχρώσεις) του πράσινου χρώματος σε αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία των ακεραίων ραδιομετρικών τιμών που αντιστοιχούν σε μία δορυφορική εικόνα 8-bit, π.χ. του δορυφόρου Landsat, απεικονίζονται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Χρωματικές διαβαθμίσεις 8-bit του πράσινου χρώματος.

Και τέλος η ίδια αντιστοιχία για το κόκκινο χρώμα είναι η ακόλουθη (σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Χρωματικές διαβαθμίσεις 8-bit του κόκκινου χρώματος.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως μία πολυφασματική δορυφορική εικόνα αποτελείται από τόσα φασματικά κανάλια (τόσες εικόνες, της ακριβώς ίδιας περιοχής χωρικά, καταγεγραμμένες την ίδια χρονική στιγμή αλλά σε διαφορετικό μήκος κύματος) όσα και τα διαφορετικά μήκη κύματος στα οποία μπορούν να καταγράψουν οι αισθητήρες του συγκεκριμένου δορυφόρου, (π.χ. η περίπτωση του Landsat 5, ο οποίος διαθέτει 7 διαφορετικά φασματικά κανάλια και ένα παγχρωματικό).

Έχοντας σαν τρία βασικά χρώματα το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο (B,G,R), (τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα διαστήματα μήκους κύματος στην περιοχή του ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος), και τα επτά φασματικά κανάλια του αισθητήρα TM του δορυφόρου Landsat θα μπορούσαμε να επιλέξουμε όποια τριάδα καναλιών θέλουμε (από τα επτά φασματικά κανάλια) και να τα χρωματίσουμε με τα τρία βασικά αυτά χρώματα. Οι δυνατοί συνδυασμοί είναι $\binom{7}{3} = \frac{7!}{3!(7-3)!} = 35$ που όμως δεν διαχωρίζει π.χ. την τριάδα 1,2,3 από την 1,3,2 που είναι ο ίδιος συνδυασμός αλλά μία διαφορετική διάταξη. Το σύνολο των διατάξεων που προκύπτει από τους τριανταπέντε παραπάνω συνδυασμούς είναι 210 (αντιστοιχούν έξι σε κάθε τριάδα).

Όμως όπως θα αναφερθεί και σε επόμενη ενότητα το έκτο ή θερμικό κανάλι έχει διαφορετική χωρική διακριτική ικανότητα από τα υπόλοιπα έξι και για τον λόγο αυτό εξαιρείται από τους δυνατούς χρωματικούς συνδυασμούς (και διατάξεις) των φασματικών καναλιών του Landsat. Έτσι οι δυνατοί συνδυασμοί είναι $\binom{6}{3} = \frac{6!}{3!(6-3)!} = 20$. Λαμβάνοντας λοιπόν όλες τις δυνατές διατάξεις των τριών καναλιών (6 σε κάθε τριάδα) έχουμε σε σύνολο $6 \times 20 = 120$ διαφορετικές χρωματικές συνθέσεις των έξι φασματικών καναλιών 1,2,3,4,5 και 7 του αισθητήρα Thematic Mapper του δορυφόρου Landsat.

Ποια όμως είναι πραγματικά η χρήση όλων αυτών των χρωματικών συνθέσεων;

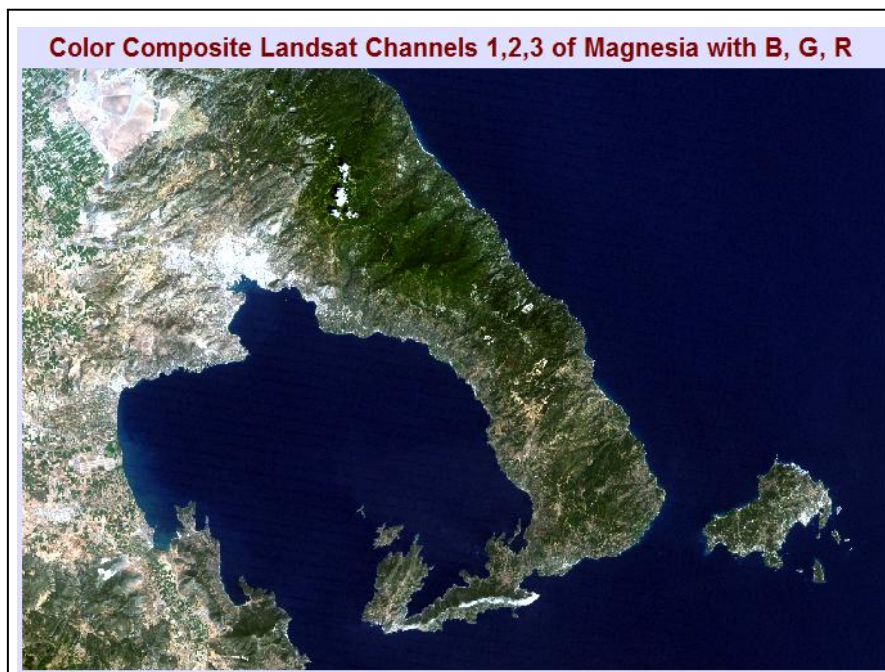
Τα διαφορετικά σώματα και συνεπώς οι διαφορετικές καλύψεις της γήινης επιφάνειας αντιδρούν με διαφορετικό τρόπο στα διάφορα μήκη κύματος. Έτσι για παράδειγμα η βλάστηση που είναι μια από τις καλύψεις γης με μεγάλη σημασία για τον άνθρωπο έχει την ιδιότητα να παρουσιάζει (σχετικά) χαμηλές τιμές στα μήκη κύματος του μπλε και του κόκκινου χρώματος και υψηλότερες τιμές στο μήκος κύματος του πράσινου χρώματος στα μήκη κύματος που βρίσκονται στο ορατό φάσμα. Αλλά η πιο αξιοσημείωτη (και παράξενη για τον άνθρωπο) ιδιότητα είναι ότι στο μήκος κύματος του εγγύς υπέρυθρου εμφανίζει πολύ υψηλές τιμές με αποτέλεσμα το φασματικό αυτό κανάλι να χρησιμοποιείται ιδιαίτερα πολύ (σε συνδυασμό με κάποια άλλα και ιδιαίτερα με το ερυθρό) στον διαχωρισμό της βλάστησης από άλλες καλύψεις γης, ακόμα και στην διάκριση διαφόρων τύπων βλάστησης.

Αλλά πως προκύπτει το χρώμα ενός συγκεκριμένου εικονοστοιχείου μιας ψευδόχρωμης ή ψευδοχρωματική εικόνας (false color composite) ενός δορυφόρου;

Όλες οι μονο-κάναλες δορυφορικές εικόνες των διαφόρων φασματικών καναλιών όλων των γνωστών δορυφόρων -εκτός των παγχρωματικών και αυτών που έχουν διαφορετική χωρική διακριτική ικανότητα (μέγεθος εικονοστοιχείου)- έχουν την ιδιότητα να είναι απολύτως υπερθέσιμες μεταξύ τους. Η ιδιότητα αυτή χαρακτηρίζει κάθε συγκεκριμένο pixel από τις ίδιες χωρικές συντεταγμένες σε όλα τα φασματικά κανάλια. Όμως το κάθε pixel έχει διαφορετική ραδιομετρική τιμή σε κάθε φασματικό κανάλι (γιατί αντιδρά διαφορετικά σε κάθε μήκος κύματος). Έτσι, εάν λάβουμε τρία διαφορετικά κανάλια π.χ. τα 2,3, και 4 και τα χρωματίσουμε με μπλε, πράσινο και κόκκινο χρώμα, το ίδιο pixel (που βρίσκεται σε συγκεκριμένη θέση στην περιοχή μελέτης μας και αποτυπώνει την ίδια ακριβώς κάλυψη γης) θα έχει διαφορετικές ραδιομετρικές τιμές (και για τον δορυφόρο Landsat στην κλίμακα [0,255]) στο κάθε ένα από τα τρία αυτά κανάλια. Σαν συνέπεια θα βαφεί με διαφορετική χρωματική απόχρωση στα τρία βασικά χρώματα. Για παράδειγμα εάν αυτό το pixel είναι καλυμμένο με υγρή βλάστηση τότε στο 4 (εγγύς υπέρυθρο) θα έχει υψηλότερη ραδιομετρική τιμή από τα άλλα δύο φασματικά κανάλια και συνεπώς θα έχει κόκκινο χρώμα.

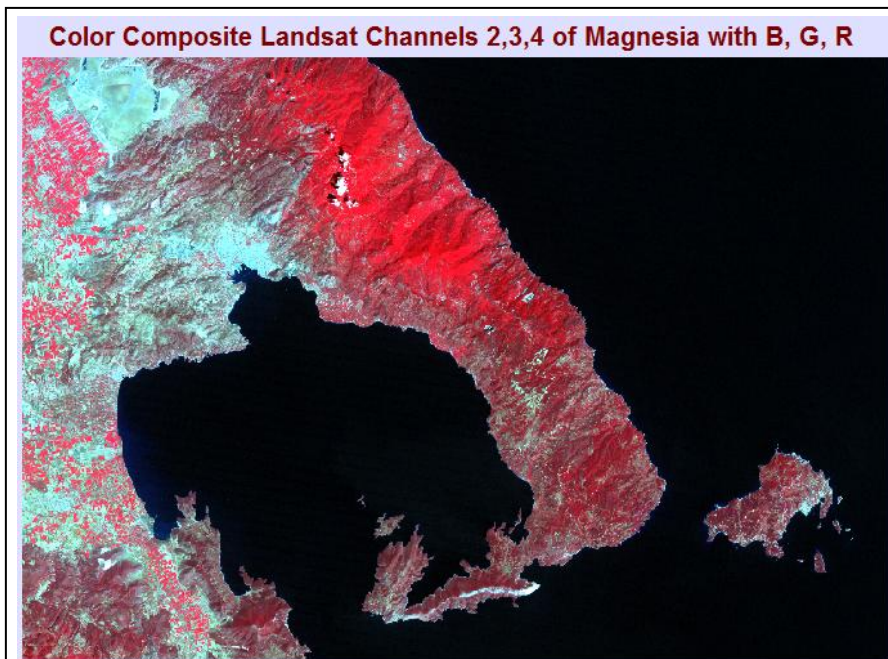
Εν κατακλείδι, ο χρωματισμός των εικονοστοιχείων σε μια χρωματική σύνθεση γίνεται βάσει των τριών ραδιομετρικών τιμών τους στα επιλεγμένα φασματικά κανάλια και της ραδιομετρικής τιμής τους που έχουν σε αυτά. Παραδείγματος χάριν, εάν ένα pixel έχει τις τιμές στα τρία επιλεγθέντα κανάλια 3, 254 και 2 τότε για να καταλάβουμε τι χρώμα θα πάρει τελικά, θα πρέπει να αναφερθούμε στις αποχρώσεις που αντιστοιχούν στην τιμή 3 στην χρωματική κλίμακα του μπλε, 254 στον πράσινο και 2 στον κόκκινο και να θεωρήσουμε ότι αυτές οι τρεις αποχρώσεις του μπλε, του πράσινου και του κόκκινου αναμιγνύονται σε ίσες ποσότητες (άρα το συγκεκριμένο pixel θα έχει πρασινωπό χρώμα. Γιατί;).

Μία κλασσική χρωματική σύνθεση τριών φασματικών καναλιών του Landsat προκύπτει από τον χρωματισμό του με την χρωματική κλίμακα του μπλε, του πράσινου και του κόκκινου του 1ου, 2ου και 3ου φασματικού καναλιού αντίστοιχα, και είναι η μόνη που απεικονίζει μια περιοχή σε φυσικά χρώματα (εικόνα 4.1).



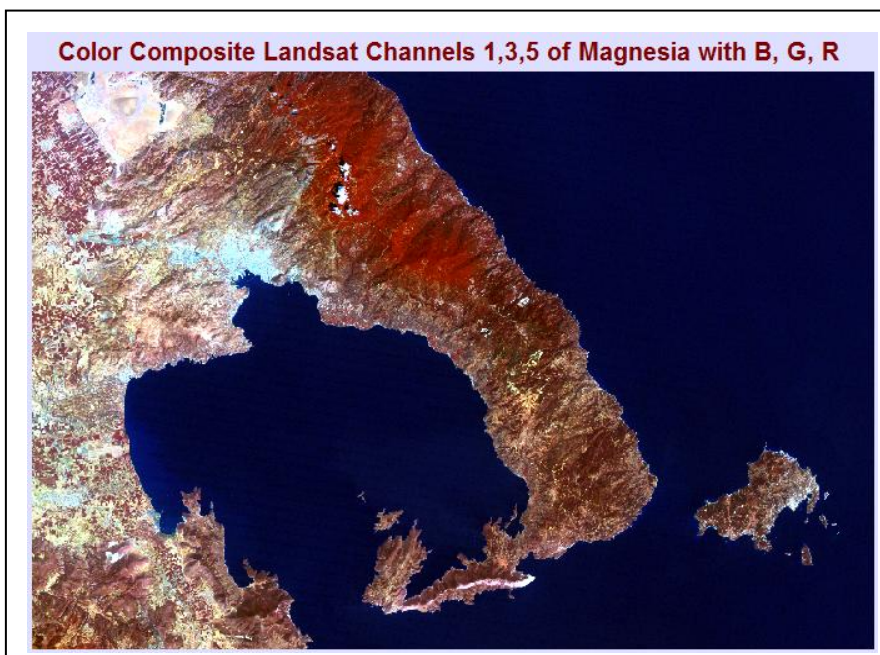
Εικόνα 4.1 Χρωματική σύνθεση με B,G,R των φασματικών καναλιών 1,2,3 του δορυφόρου Landsat.

Σε αντίθεση με αυτήν (και χρησιμοποιούμενη εξ ορισμού σε διάφορα λογισμικά Τηλεπισκόπησης όπως το Erdas Imagine και το Multispec) είναι η χρωματική σύνθεση που προκύπτει από τον χρωματισμό με την χρωματική κλίμακα του μπλε, του πράσινου και του κόκκινου του 2ου, 3ου και 4ου (εγγύς υπέρυθρου) φασματικού καναλιού αντίστοιχα. Η χρωματική αυτή σύνθεση (επειδή στο εγγύς υπέρυθρο η βλάστηση έχει τις υψηλότερες τιμές και επειδή χρωματίζουμε με κόκκινο χρώμα το 4ο κανάλι του Landsat) έχει το χαρακτηριστικό να εμφανίζει με έντονο κόκκινο την υγιή βλάστηση και την υπόλοιπη βλάστηση σε αποχρώσεις του κόκκινου. Τέλος υπάρχουν και άλλες χρωματικές συνθέσεις κατάλληλες για τον διαχωρισμό του πολεοδομικού ιστού, για γεωλογικές χρήσεις (εικόνα 4.2) κ.ά.



Εικόνα 4.2 Χρωματική σύνθεση με B,G,R των φασματικών καναλιών 2,3,4 του δορυφόρου Landsat.

Επίσης χαρακτηριστική είναι και η ψευδοχρωματική σύνθεση σε μπλε, πράσινο και κόκκινο των φασματικών καναλιών 1,3 και 5 του Landsat και του αισθητήρα TM, που φαίνεται να οριοθετεί ικανοποιητικά το πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης του Βόλου αλλά και την βιομηχανική περιοχή και την εθνική οδό που τα συνδέει και συνεχίζει προς τα δυτικά(σε ελαφρά σιέλ απόχρωση). Επίσης το πυκνό δάσος του Πηλίου απεικονίζεται χαρακτηριστικά με καφέ-κοκκινωπό χρώμα στα βόρειο-ανατολικά του Βόλου (εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3 Χρωματική σύνθεση με B,G,R των φασματικών καναλιών 1,3,5 του δορυφόρου Landsat.

4.2 Σφάλματα δορυφορικών εικόνων

4.2.1 Γενικά

Όπως σχεδόν σε κάθε μέτρηση υπεισέρχονται σφάλματα, έτσι και στις ραδιομετρικές μετρήσεις-καταγραφές στην τηλεπισκόπηση έχουμε την εμφάνιση δύο γενικών κατηγοριών σφαλμάτων: των ραδιομετρικών και των γεωμετρικών.

Ο διαχωρισμός μεταξύ τους είναι αρκετά σαφής: Ραδιομετρικά σφάλματα είναι εκείνα που προκαλούν αλλαγή της ραδιομετρικής τιμής ενός pixel μεταξύ της πραγματικής του τιμής στο έδαφος και της καταγραφής του από τους απεικονιστές των δορυφόρων, ενώ γεωμετρικά εκείνα που προκαλούν αλλαγές στο σχήμα των δορυφορικών εικόνων. Εκτενέστατη αναφορά των ραδιομετρικών σφαλμάτων, των ατμοσφαιρικών επιδράσεων καθώς και των τεχνικών διόρθωσης που λαμβάνουν χώρα, θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

4.2.2 Γεωμετρικά σφάλματα

A. Πηγές γεωμετρικών παραμορφώσεων (σφαλμάτων)

Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στη δημιουργία γεωμετρικών σφαλμάτων είναι οι παρακάτω:

1. Η περιστροφή της γης κατά τη διάρκεια της καταγραφής της δορυφορικής εικόνας.
2. Ο περιορισμένος, χρονικά, ρυθμός σάρωσης ορισμένων ανιχνευτών.
3. Το μεγάλο εύρος πεδίο καταγραφής μερικών ανιχνευτών.
4. Η καμπυλότητα της γήινης επιφάνειας.
5. Τα σφάλματα κατασκευής των ανιχνευτών.
6. Οι διάφορες παραλλαγές στο ύψος, στον προσανατολισμό (διεύθυνση) και στην ταχύτητα (της πλατφόρμας) του δορυφόρου.

7. Τα πανοραμικά εφέ (εντυπώσεις) που σχετίζονται με τη γεωμετρία της εικόνας B. Μη συστηματικά γεωμετρικά σφάλματα

Οι παραπάνω παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν συστηματικά ή μη συστηματικά γεωμετρικά σφάλματα.

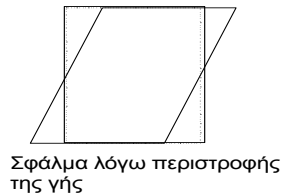
Τα μη συστηματικά σφάλματα προέρχονται συνήθως από απρόβλεπτες μεταβολές στον προσανατολισμό, στο ύψος και την ταχύτητα κίνησης του δορυφόρου, ή αλλαγές στο υψόμετρο της περιοχής που καταγράφεται. Έτσι, για τη διόρθωση των λαθών αυτών είναι απαραίτητη η γνώση μερικών Επίγειων Σημείων Ελέγχου (Ground Control Points) των οποίων γνωρίζουμε και τις γεωγραφικές τους συντεταγμένες (δηλ. είναι δυνατό να προσδιοριστούν στην επιφάνεια του εδάφους) αλλά και την ακριβή θέση τους στη δορυφορική εικόνα (τοποθέτηση κατά γραμμή και κατά κολόνα).

Επειδή η αναγνώρισή τους στη δορυφορική εικόνα προϋποθέτει να είναι εύκολα αναγνωρίσιμα σε οποιαδήποτε εποχή του χρόνου (για διαχρονική μελέτη) αλλά και για οποιοδήποτε φασματικό κανάλι (διαφασματική μελέτη) ακόμα και σε εικόνες διαφορετικών δορυφόρων που έχουν κοντινά μεγέθη pixels (π.χ. Landsat και SPOT), αυτά τα σημεία πρέπει να είναι χαρακτηριστικά και σχετικά αμετάβλητα ως προς τη σχετική τους ραδιομετρία με τα γειτονικά pixels.

Τέτοιου είδους σημεία θα μπορούσαν να είναι οι διασταυρώσεις ασφαλτοστρωμένων δρόμων, χαρακτηριστικά σημεία σε αεροδρόμια, λιμάνια, μεμονωμένα κτίρια ή ακόμα και μικρές ακάλυπτες βραχώδεις εκτάσεις διάφορα άλλα.

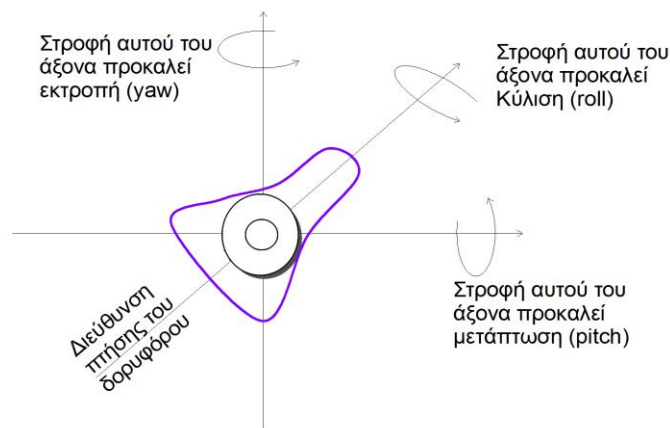
Ωστόσο υπάρχουν και μη συστηματικά σφάλματα τα οποία για να διορθωθούν δε χρειάζεται να γνωρίζουμε Επίγεια Σημεία Ελέγχου. Δύο χαρακτηριστικά τέτοια μη συστηματικά σφάλματα προέρχονται από την περιστροφή της γης, και από την αλλαγή της ταχύτητας του δορυφόρου.

Στο σχήμα 4.4 βλέπουμε τα δύο μη συστηματικά γεωμετρικά σφάλματα για τα οποία δε χρειάζεται Επίγεια Σημεία Ελέγχου.

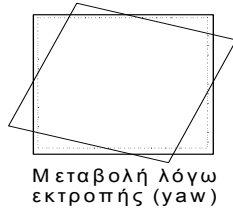
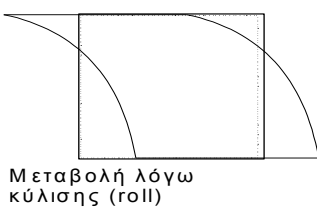
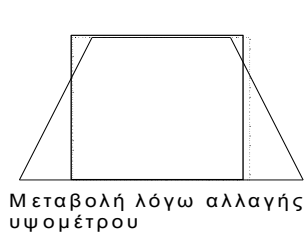


Σχήμα 4.4 Γεωμετρικά σφάλματα λόγω περιστροφής της γης και αλλαγής ταχύτητας του δορυφόρου.

Αντίθετα με τα προηγούμενα, τα γεωμετρικά σφάλματα που για τη διόρθωσή τους χρειάζονται απαραίτητα Επίγεια Σημεία Ελέγχου είναι τα σφάλματα που προέρχονται λόγω αλλαγής της υψομετρίας της καταγραμμένης περιοχής ή λόγω στροφής του ενός από τους τρεις κάθετους άξονες που περνούν από το κέντρο του δορυφόρου. (σχήμα 4.5) Τα τελευταία αυτά τρία σφάλματα προκαλούν την εκτροπή, την κύλιση και τη μετάπτωση (σε μικρό βαθμό) του δορυφόρου και προκαλούν παραμορφώσεις που φαίνονται καθαρά στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.5 Εκτροπή, κύλιση και μετάπτωση του δορυφόρου.



Σχήμα 4.6 Αλλοιώσεις της εικόνας λόγω γεωμετρικών σφαλμάτων.

Γ. Συστηματικά γεωμετρικά σφάλματα

Τέσσερα είναι τα βασικά συστηματικά γεωμετρικά σφάλματα:

α) Η λοξότητα στη σάρωση: Επειδή η σάρωση από τα κάτοπτρα του σαρωτή στο δορυφόρο γίνεται κατά διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση πτήσης του δορυφόρου και επειδή για να ολοκληρωθεί μια σάρωση χρειάζεται κάποιος χρόνος t (κατά τη διάρκεια του οποίου ο δορυφόρος έχει διανύσει κάποιο διάστημα), ενώ η μια διάσταση της καταγραμμένης εικόνας θα έπρεπε να είναι κάθετη προς τη διεύθυνση πτήσης του δορυφόρου, αυτή παρουσιάζει μια σχετική κλίση ως προς τη μια από τις δύο διαστάσεις της,

β) Επίσης, ενώ η ταχύτητα σάρωσης του κατόπτρου θα έπρεπε να είναι σταθερή αυτό δε συμβαίνει και έτσι η συνάρτηση γωνίας σάρωσης (ως προς την αρχική θέση του κατόπτρου) και χρόνου σάρωσης δεν είναι γραμμική όπως θα έπρεπε με συνέπεια σχετικές παραμορφώσεις στη δορυφορική εικόνα.

γ) Η πανοραμική στρέβλωση: Η αποτυπωμένη επιφάνεια του εδάφους είναι ανάλογη (της εφαπτομένης) της γωνίας που σχηματίζει το κάτοπτρο του σαρωτή με την κατακόρυφη. Έτσι, αν ο σαρωτής απεικονίζει μια γήινη περιοχή μήκους x σε χρόνο 1sec , η ταχύτητα καταγραφής του στην επιφάνεια της γης θα είναι

$V = xm/1\text{sec}$ και αν a είναι το ύψος πτήσης του δορυφόρου και θ η γωνία που σχηματίζει το κάτοπτρο του σαρωτή με την κατακόρυφο που περνά από το κάτοπτρο θα έχουμε $V = a \cdot \epsilon\theta(m/\text{sec})$ και αν παραγωγίσουμε ως προς θ

$$\Delta x / \Delta \theta = a / \cos \theta$$

$$\text{και άρα } \Delta x = \Delta \theta (a / \cos \theta)$$

Φυσικά, για σταθερό ύψος πτήσης η γωνία σάρωσης αυξάνει συγχρόνως με την εφαπτομένη της

δ) Η προοπτικότητα της σάρωσης: Σε μερικές εφαρμογές είναι απαραίτητο να έχουμε εικόνες του πολυφασματικού σαρωτή (MSS) που θα προέρχονται από την προβολή σημείων της επιφάνειας της γης επάνω σ' ένα εφαπτόμενο στη γη (και τέτοιο ώστε οι γραμμές προβολής της γήινης επιφάνειας να είναι κάθετες σ' αυτό). Αυτό δημιουργεί παραμορφώσεις

4.2.3 Γενική μέθοδος διόρθωσης γεωμετρικών σφαλμάτων

4.2.3.1 Διάφορες περιπτώσεις

Η γεωμετρική διόρθωση μιας δορυφορικής εικόνας γίνεται αναγκαστικά με βάση κάποιο σύστημα αναφοράς που επιθυμεί ο μελετητής. Το σύστημα αναφοράς αυτό

- ή υπάρχει σε κάποιο άλλο υπόβαθρο (αναφοράς) που απεικονίζει τμήμα ή όλη την περιοχή της δορυφορικής εικόνας
- ή δημιουργείται με την πρόσβαση του χρήστη στο πεδίο (περιοχών της δορυφορικής εικόνας) και τον γεωγραφικό εντοπισμό των γεωγραφικών συντεταγμένων (στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς με την χρήση G.P.S.) χαρακτηριστικών σημείων της περιοχής που εντοπίζονται οπτικά και στην δορυφορική εικόνα (φωτοσταθερά).

Στην πραγματικότητα το 99% των περιπτώσεων ανάγκης διόρθωσης των γεωμετρικών σφαλμάτων στην Τηλεπισκόπηση εμπίπτει σε μία από τις παρακάτω:

1) Υπάρχουν δορυφορικές εικόνες στην αρχική τους μορφή (χωρίς γεω-αναφορά) μίας περιοχής για την οποία δεν υπάρχουν ούτε βοηθητικά υπόβαθρα σε οποιαδήποτε μορφή (ψηφιακά ή σε μορφή χαρτογραφικής εκτύπωσης), ούτε δυνατότητα πρόσβασης στην περιοχή ώστε να εντοπίζονται από τον χρήστη φωτοσταθερά σημεία στην δορυφορική εικόνα και κατόπιν στο πεδίο (με την τη χρήση ενός Συστήματος Προσδιορισμού Γεωγραφικών Συντεταγμένων - Global Positioning System - G.P.S.). Στην περίπτωση αυτή ή, με κάποιον τρόπο βρίσκεται κάποιο παλαιότερο γεωαναφερμένο υπόβαθρο της περιοχής της δορυφορικής εικόνας ή χρησιμοποιούμε άλλες δορυφορικές εικόνες διαφορετικών ημερομηνιών λήψης (παλαιότερες ή πιο πρόσφατες, γεωαναφερμένες ή όχι) ως σύστημα αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο οι εικόνες μας τελικά τοποθετούνται ή όχι σε κάποιο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς, αλλά σε κάθε περίπτωση είναι απολύτως υπερθέσιμες με τις δορυφορικές εικόνες αναφοράς. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για τον εντοπισμό διαχρονικών μεταβολών των καλύψεων γης.

2) Υπάρχουν δορυφορικές εικόνες στην αρχική τους μορφή (χωρίς γεω-αναφορά) μίας περιοχής για την οποία διαθέτουμε βοηθητικά υπόβαθρα σε ψηφιακή ή έντυπη μορφή τα οποία όμως είναι γεωαναφερμένα στο επιθυμητό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς. Τα βοηθητικά αυτά υπόβαθρα μπορεί θεματικά να είναι τελείως διαφορετικά από την δορυφορική εικόνα, όπως χάρτες υδρογραφικοί, οδικών δικτύων, υψομετρικών

καμπύλων κ.ά., ή σχετικά όπως χάρτες καλύψεων γης (CORINE Land Cover) ή ακόμα και δορυφορικές εικόνες διαφορετικών ημερομηνιών λήψης, γεωαναφερόμενες στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς. Σ' αυτή την περίπτωση πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον χρήστη ο οποίος καλείται να εντοπίσει (οπτικά) φωτοσταθερά σημεία στην δορυφορική εικόνα που θα διορθωθεί γεωμετρικά ως προς το βοηθητικό γεωαναφερόμενο υπόβαθρο.

3) Υπάρχουν δορυφορικές εικόνες στην αρχική τους μορφή (χωρίς γεω-αναφορά) μίας περιοχής στην οποία υπάρχει δυνατότητα εύκολης ή σχετικά εύκολης πρόσβασης. Ο χρήστης -μελετητής πρέπει να διαθέτει G.P.S. ικανοποιητικής χωρικής ακρίβειας (ει δυνατόν και αρκετά μικρότερης από την διάσταση του εικονοστοιχείου της αρχικής δορυφορικής εικόνας). Στην περίπτωση αυτή ο χρήστης εντοπίζει πρώτα στην ψηφιακή δορυφορική εικόνα χαρακτηριστικά φωτοσταθερά σημεία της περιοχής μελέτης (με προτίμηση σε σημεία εύκολης πρόσβασης, όπως διασταυρώσεις δρόμων, άκρα λιμενοβραχιόνων, διασταυρώσεις δρόμων με το υδρογραφικό δίκτυο, κ.ά.) και κατόπιν μεταβαίνει στο πεδίο όπου με την χρήση G.P.S. ρυθμισμένου στο επιθυμητό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (για την Ελλάδα είναι το ΕΓΣΑ87 δηλ. το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987), εντοπίζει και καταγράφει στο G.P.S. τις συντεταγμένες των παραπάνω φωτοσταθερών σημείων. Η γεωμετρική διόρθωση υλοποιείται βάσει των φωτοσταθερών αυτών σημείων του πεδίου.

4.2.3.2 Μεθοδολογία γεωμετρικής διόρθωσης

Δύο είναι τα βασικά θέματα που πρέπει να απαντηθούν με την εφαρμογή κάποιων μεθόδων γεωμετρικής διόρθωσης δορυφορικών εικόνων:

1) Ποια θα είναι η καινούργια θέση του κάθε εικονοστοιχείου μετά την γεωμετρική διόρθωση, και

2) Ποια θα είναι η καινούργια ραδιομετρική τιμή που θα λάβει το κάθε εικονοστοιχείο της δορυφορικής εικόνας μετά την γεωμετρική διόρθωση.

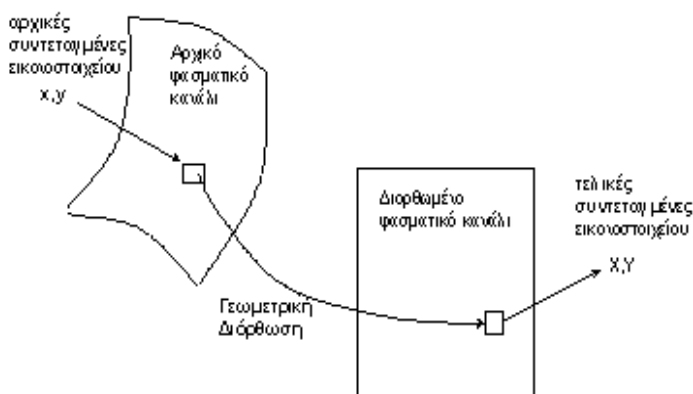
Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου που θα απαντά ικανοποιητικά στο πρώτο ερώτημα πρέπει να γίνει με ενιαίο κριτήριο (εξίσωση μετασχηματισμού συντεταγμένων) για όλα τα εικονοστοιχεία της αρχικής δορυφορικής εικόνας.

Μια αποδεκτά γενική μορφή εξίσωσης μετασχηματισμού των αρχικών συντεταγμένων (x,y) στις τελικές (X,Y) είναι με τη χρήση του πλήρους πολυωνύμου n-οστού βαθμού, που εδώ για χάρη ευκολίας παρουσιάζεται στον δεύτερο βαθμό με το παρακάτω γραμμικό σύστημα:

$$X = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (4.1)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2y + \beta_3xy + \beta_4x^2 + \beta_5y^2 \quad (4.2)$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πως οι αρχικές συντεταγμένες (x,y) της θέσης κάποιου εικονοστοιχείου ενός δορυφορικού καναλιού μετά την γεωμετρική διόρθωση του γίνονται (X,Y) προσδιορίζοντας έτσι την καινούργια του θέση (σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7 Μετασχηματισμός των συντεταγμένων pixel κατά την γεωμετρική διόρθωση.

Η χρήση των φωτοσταθερών σημείων του υποβάθρου αναφοράς (γεωαναφερμένη δορυφορική εικόνα της ίδιας περιοχής ή άλλο ψηφιακό ή όχι γεωαναφερμένο υπόβαθρο ή συγκεκριμένα σημεία από το πεδίο των οποίων καταγράφηκαν οι συντεταγμένες με την χρήση G.P.S.) τα οποία να εντοπίζονται οπτικά και στην δορυφορική εικόνα την οποία επιθυμούμε να διορθώσουμε γεωμετρικά (γεωαναφορά), οδηγεί στην επίλυση του γραμμικού συστήματος των εξισώσεων 4.1 και 4.2.

Πιο συγκεκριμένα και χάριν παραδείγματος, θα θεωρήσουμε ότι οι συντελεστές $a_3 = a_4 = a_5 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$ ότι δηλ. έχουμε ένα διγραμμικό μετασχηματισμό και οι εξισώσεις 4.1 και 4.2 γίνονται :

$$X = a_0 + a_1x + a_2y \quad (4.3)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2y \quad (4.4)$$

Για την επίλυση του συστήματος αυτού με αγνώστους τους συντελεστές $a_0, a_1, a_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2$ πρέπει να εντοπισθούν οπτικά τουλάχιστο τρία φωτοσταθερά σημεία στην δορυφορική εικόνα υπό διόρθωση και στο υπόβαθρο αναφοράς (ή στο πεδίο).

Αφού επιλυθεί το σύστημα των εξισώσεων (4.3) και (4.4) προσδιορίζονται αριθμητικά οι τιμές των συντελεστών $a_0, a_1, a_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2$. Το σύστημα μετασχηματισμού των συντεταγμένων (x,y) στις καινούργιες συντεταγμένες (X,Y) δηλ. το σύστημα των εξισώσεων (4.3) και (4.4) είναι πλέον τελείως καθορισμένο. Οι καθορισμένες πλέον εξισώσεις (4.3) και (4.4) μπορούν να εφαρμοστούν με δεδομένες τις συντεταγμένες (x,y) όλων των εικονοστοιχείων της αρχικής εικόνας και έτσι να βρεθεί η θέση τους στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς (X,Y) και να διορθωθεί πλήρως η αρχική εικόνα. Συνήθως όπως ήδη αναφέρθηκε προηγουμένως, οι αρχικές συντεταγμένες των pixels της αδιόρθωτης γεωμετρικά εικόνας είναι η κολόνα x και η γραμμή y που αυτό καταλαμβάνει.

Οι πλέον γνωστές επιλογές για την απάντηση στο δεύτερο ερώτημα δηλ. ποια θα είναι η καινούργια ραδιομετρική τιμή του εικονοστοιχείου στη νέα του θέση, είναι τρεις (σύμφωνα και με την επιλογή της μεθόδου)

- A) Του πλησιέστερου γείτονα (nearest neighbor)
- B) Της διγραμμικής παρεμβολής (bilinear interpolation) και
- Γ) Της κυβικής συνέλιξης (cubic convolution)

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι του πλησιέστερου γείτονα και το όνομά της οφείλεται στο ότι το εικονοστοιχείο στην νέα του θέση θα πάρει την ραδιομετρική τιμή του εικονοστοιχείου του υποβάθρου αναφοράς στο οποίο ευρίσκεται πιο κοντά (το κέντρο του έχει την μικρότερη απόσταση από το κέντρο του pixel οποίου θα πάρει την ραδιομετρική τιμή). Οι μέθοδοι της διγραμμικής παρεμβολής και της κυβικής συνέλιξης που λαμβάνουν υπόψιν για τον υπολογισμό της ραδιομετρικής τιμής του pixel τις ραδιομετρικές τιμές περισσότερων εικονοστοιχείων στην γειτνίασή του, δεν θα αναλυθούν στο παρόν ψηφιακό βιβλίο, αλλά μια ακριβής (και σύντομη) αναφορά των μεθόδων αυτών υπάρχει στο βιβλίο του J. Richards (Richards, 1986).

4.3 Συστήματα Συντεταγμένων για τον Παγκόσμιο, τον Ευρωπαϊκό και τον Ελληνικό χώρο

4.3.1 Συστήματα Συντεταγμένων

Για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου στο χώρο (πάνω στην επιφάνεια της γης) και στο επίπεδο (χάρτης) απαιτείται ένα γεωμετρικό σύστημα αναφοράς ή ένα σύστημα συντεταγμένων όπως είναι γνωστό. Τα συστήματα συντεταγμένων που αφορούν το χώρο (τριδιάστατο χώρο της Γης) ονομάζονται συστήματα γεωγραφικών συντεταγμένων, ενώ αυτά που αφορούν το επίπεδο ονομάζονται συστήματα επίπεδων συντεταγμένων.

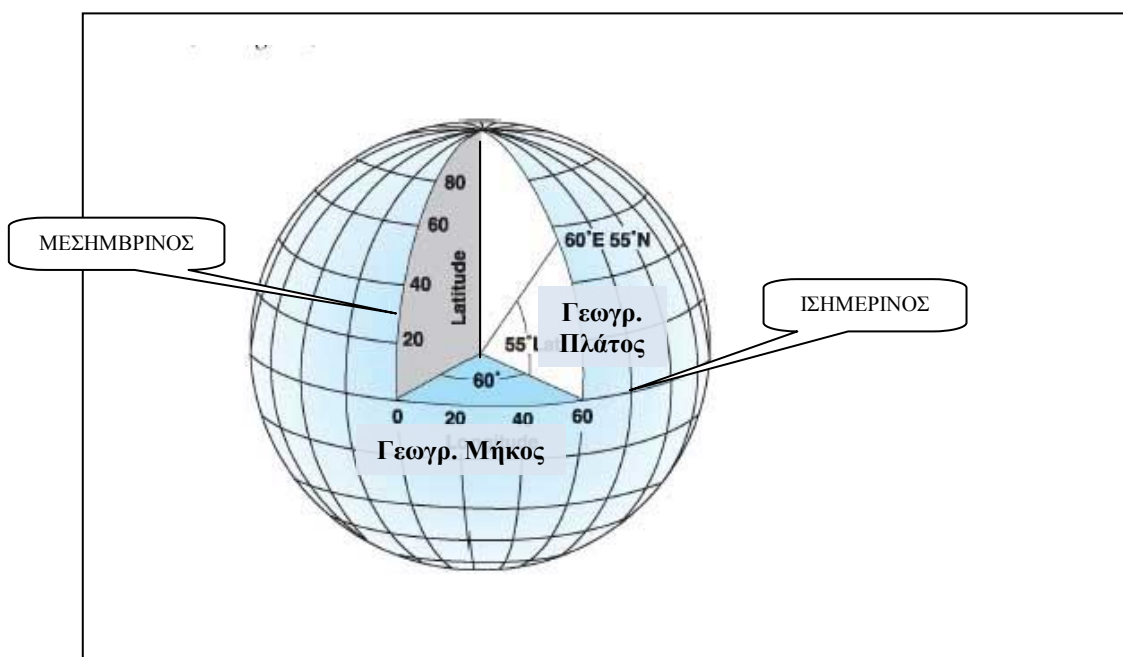
A. Γεωγραφικές συντεταγμένες

Το σύστημα των γεωγραφικών συντεταγμένων είναι το βασικό σύστημα αναφοράς εντοπισμού θέσης στην επιφάνεια της γης χρησιμοποιώντας το γεωγραφικό μήκος και το γεωγραφικό πλάτος. Το σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων δημιουργήθηκε για να καταστεί δυνατός ο μονοσήμαντος προσδιορισμός της θέσης κάθε σημείου. Ο βόρειος και ο νότιος πόλος, αποτελούν τα σημεία εκκίνησης πάνω στα οποία βασίζεται το σύστημα. Ο προσδιορισμός μιας τοποθεσίας πάνω στη γη πραγματοποιείται με τον υπολογισμό

του γεωγραφικού πλάτους, (δηλαδή της γωνιακής απόστασης από τον ισημερινό, στην κατεύθυνση βορρά-νότου) και του γεωγραφικού μήκους, (δηλαδή της γωνιακής απόστασης από έναν πρώτο μεσημβρινό στην κατεύθυνση ανατολής-δύσης). Όλα τα σημεία της γης που έχουν το ίδιο γεωγραφικό πλάτος σχηματίζουν έναν παράλληλο. Ο ισημερινός, δηλαδή η γραμμή όπου όλα τα σημεία της ισαπέχουν από τους δύο πόλους, είναι το φυσικό σημείο εκκίνησης για το γεωγραφικό πλάτος. Όλα τα σημεία του ίδιου γεωγραφικού μήκους σχηματίζουν μεσημβρινό. Το γεωγραφικό μήκος, δηλαδή η θέση στη γη στην κατεύθυνση ανατολή-δύση, είναι συνδεδεμένο με μια άπειρη σειρά μεσημβρινών, τοποθετημένων κάθετα στους παράλληλους (εικόνα 4.4). Έτσι, σχηματίζεται ο γεωγραφικός κάναβος, δηλαδή, το πλέγμα των μεσημβρινών και παράλληλων (Robinson κ.ά. 2002).

Σε αντίθεση με τον ισημερινό στο σύστημα του γεωγραφικού πλάτους, κανένας μεσημβρινός δεν κατέχει κάποια φυσική βάση για να αποτελέσει τη γραμμή εκκίνησης από την οποία να καθοριστούν ανατολικές και δυτικές θέσεις. Η επιλογή της γραμμής αυτής, που ονομάζεται πρώτος μεσημβρινός περνά από το βασιλικό αστεροσκοπείο του Γκρήνουιτς στην Αγγλία και αποφασίστηκε το 1884 στο διεθνές συνέδριο Μεσημβρινών στην Ουάσιγκτον.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το ζεύγος των γεωγραφικών συντεταγμένων ενός σημείου πάνω στη γη. Έτσι, το γεωγραφικό πλάτος (Latitude) είναι 55 μοίρες και είναι η γωνία που μετρείται από τον ισημερινό και μέχρι το συγκεκριμένο σημείο. Το γεωγραφικό μήκος (Longitude) 60 μοιρών, είναι η γωνία που σχηματίζεται στο επίπεδο του ισημερινού από τον μεσημβρινό αναφοράς (Γκρήνουιτς) μέχρι τον μεσημβρινό (το επίπεδό του) που περνάει από το συγκεκριμένο σημείο και τέμνει κάθετα τον ισημερινό. Οι ενδείξεις E σημαίνουν ανατολικά του Γκρήνουιτς και N βόρεια του Ισημερινού.



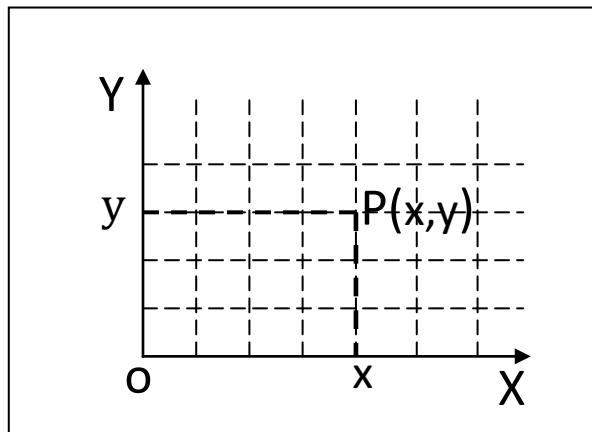
Εικόνα 4.4 Ο Γεωγραφικός κάναβος στη γη.

Β. Επίπεδες (ορθογώνιες) Συντεταγμένες

Στη χαρτογραφία υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για τα επίπεδα συστήματα αναφοράς με αναφορά τους χάρτες. Ο αντίστοιχος τύπος συντεταγμένων χρησιμοποιείται για την εύρεση μιας περιοχής πάνω σε επίπεδη χαρτογραφική αναπαράσταση της επιφάνειας της γης. Στη σύγχρονη μορφή του το επίπεδο σύστημα συντεταγμένων προήλθε από τις Καρτεσιανές συντεταγμένες. Το καρτεσιανό σύστημα αναφοράς αποτελείται από δύο άξονες ΟΧ και ΟΨ (Εικόνα 4.5). Κάθε σημείο πάνω στο επίπεδο ΧΟΨ ορίζεται από δύο συντεταγμένες x, y. Αν από το σημείο Ρ του επιπέδου φέρουμε μια ευθεία παράλληλη προς τον άξονα ΟΨ αυτός τέμνει τον άξονα ΟΧ στο σημείο x που αποτελεί τη συντεταγμένη X του σημείου Ρ. Όμοια μπορούμε να βρούμε τη συντεταγμένη Ψ του σημείου Ρ, που είναι η y. Οι συντεταγμένες του σημείου Ρ συμβολίζονται ως Ρ(x,y).

Αν πάνω στο επίπεδο φέρουμε οριζόντιες και κάθετες ευθείες παράλληλες προς τους άξονες ΟΨ & ΟΧ τότε ορίζουμε ένα πλέγμα ευθειών που ονομάζεται κάναβος και στην περίπτωση που το επίπεδο ορίζει

ένα χάρτη ονομάζεται χαρτογραφικός κάρναβος. Στο ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων ορίζουμε ως αρχή την τομή δύο κάθετων αξόνων και αντιστοιχούμε στην αρχή αυτή ένα γνωστό σημείο στο επίπεδο. Στη συνέχεια διαιρούμε το επίπεδο μ' ένα κάρναβο, με άπειρες ισαπέχουσες γραμμές παράλληλες σε κάθε άξονα (εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5 Ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων.

Η ακρίβεια του επιπέδου συστήματος αναφοράς εξαρτάται άμεσα από την προβολή του χάρτη. Από τις αρχές του 20ου αιώνα χρησιμοποιήθηκαν διαφορές προβολές αλλά σήμερα τα περισσότερα συστήματα επιπέδων συντεταγμένων βασίζονται σε σύμμορφες προβολές (εγκάρσια μερκατορική, σύμμορφη κωνική κ.ά.). Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν επιγραμματικά οι προβολές και τα συστήματα συντεταγμένων που εφαρμόζονται στην ελληνική επικράτεια.

4.3.2 Συστήματα συντεταγμένων στην Ελληνική Επικράτεια

4.3.2.1 Οι χαρτογραφικές προβολές στην Ελλάδα

Τέσσερα είναι τα βασικά χαρτογραφικά συστήματα προβολών που χρησιμοποιήθηκαν ή χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα για πολιτικές και στρατιωτικές εφαρμογές:

- Η ισαπέχουσα αζιμουθιακή προβολή HATT (ΓΥΣ).
- Η παγκόσμια εγκάρσια μερκατορική προβολή (Universal Transverse Mercator- UTM) : για τους Στρατιωτικούς χάρτες.
- Η εγκάρσια μερκατορική προβολή 3 μοιρών (Transverse Mercator): για χάρτες ΥΠΕΧΩΔΕ στο προβολικό σύστημα 3 μοιρών (ΕΜΠ3° ή ΤΜ3°).
- Η εγκάρσια μερκατορική προβολή (Transverse Mercator): για χάρτες στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ87).

Η προβολή Hatt υιοθετήθηκε από το ελληνικό κράτος στο πρώτο τέταρτο του εικοστού αιώνα. Το προβολικό σύστημα Hatt χρησιμοποιεί ένα επίπεδο αναφοράς το οποίο και εφάπτεται σ' ένα σημείο του ελλειψοειδούς της γης και αποτελεί το κέντρο φύλλου χάρτη. Μ' αυτόν τον τρόπο ορίστηκαν, σε όλη την ελληνική επικράτεια, 130 σφαιροειδή τραπέζια διαστάσεων 30' x 30'. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε από την Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ) για τη δημιουργία χαρτών που καλύπτουν όλη την Ελλάδα, κλίμακας 1:100.000, 1:50.000 και 1:5.000 (διανομή 25000 φύλλων χάρτη περίπου). Το μεγάλο μειονέκτημα της προβολής Hatt είναι η χρήση πολλών κέντρων προβολής με συνέπεια να χρειάζονται πολύπλοκοι μετασχηματισμοί όταν πρόκειται να απεικονιστούν μεγάλες εκτάσεις. Για το λόγο αυτό τείνει να καταργηθεί ως σύστημα αναφοράς γεωδαιτικών και τοπογραφικών μετρήσεων και να αντικατασταθεί από το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987.

Η παγκόσμια εγκάρσια μερκατορική προβολή χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες των ενόπλων δυνάμεων. Συντάχθηκαν χάρτες κλίμακας 1:50000 κυρίως, καλύπτοντας το σύνολο του ελλαδικού χώρου (διανομή 387 φύλλων).

Η εγκάρσια μερκατορική προβολή 3 μοιρών χρησιμοποιήθηκε, από το 1983, για τις ανάγκες της ΕΠΑ (Επιχείρηση Πολεοδομικής Ανασυγκρότησης) σε κλίμακες 1:1000 και 1:2000.

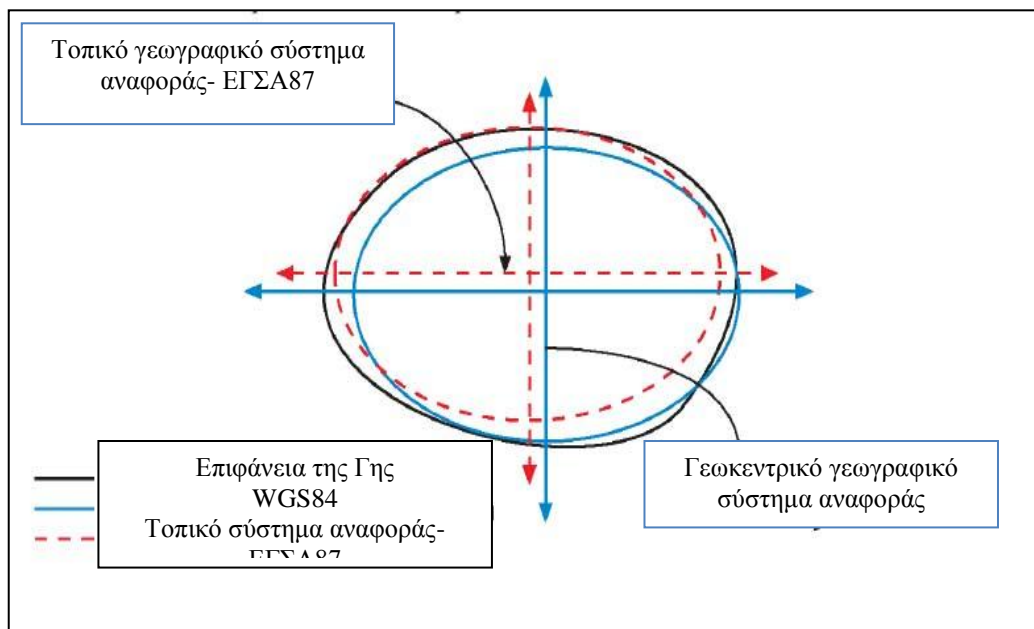
Η εγκάρσια μερκατορική προβολή (με κεντρικό μεσημβρινό στις 24°) αποτελεί την προβολή του Ελληνικού Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς του 1987. Είναι το σύστημα που χρησιμοποιείται ευρέως στην Ελλάδα.

4.3.2.1 Το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ87)

Το ΕΓΣΑ87 αναπτύχθηκε εξαιτίας των νεών αναγκών που παρουσιάστηκαν για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας και ποιότητας στο πλαίσιο της κτηματογράφησης και χαρτογράφησης της Ελληνικής επικράτειας.

Το νέο σύστημα χρησιμοποιεί το γεωκεντρικό ελλειψοειδές GRS-80, προσαρμοσμένο στο γεωειδές του ελληνικού χώρου. Το προβολικό σύστημα που επιλέχθηκε είναι η εγκάρσια μερκατορική προβολή (σύμμορφη προβολή) με συντελεστή κλίμακας 0,9996. Όλη η χώρα θεωρείται μια ενιαία ζώνη με κεντρικό μεσημβρινό $\lambda=24^\circ$ ανατολικά του Greenwich. Αρχή των τεταγμένων είναι ο ισημερινός $\varphi=0^\circ$ και για να αποφευχθούν οι αρνητικές τιμές ο κεντρικός μεσημβρινός έχει ως τεταγμένη 500000 μέτρα. Το σύστημα χρησιμοποιείται για τη σύνταξη του Εθνικού Κτηματολογίου (Βέης 1987).

Στο σχήμα που ακολουθεί παρατηρούμε ότι το γεωγραφικό σύστημα αναφοράς με κέντρο το κέντρο του ελλειψοειδούς (WGS84) μετασχηματίζεται σε τοπικό σύστημα αναφοράς, ΕΓΣΑ87, για να αποδώσει με μεγαλύτερη ακρίβεια μια συγκεκριμένη περιοχή της γης (διακεκομμένη γραμμή). Η μαύρη ακανόνιστη γραμμή είναι η επιφάνεια της γης (εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6 Τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς – ΕΓΣΑ87.

Το ΕΓΣΑ87 χρησιμοποιείται για τη σύνταξη του Εθνικού Κτηματολογίου και έχει υιοθετηθεί από το σύνολο των δημόσιων οργανισμών καθώς και ιδιωτικών εταιρειών.

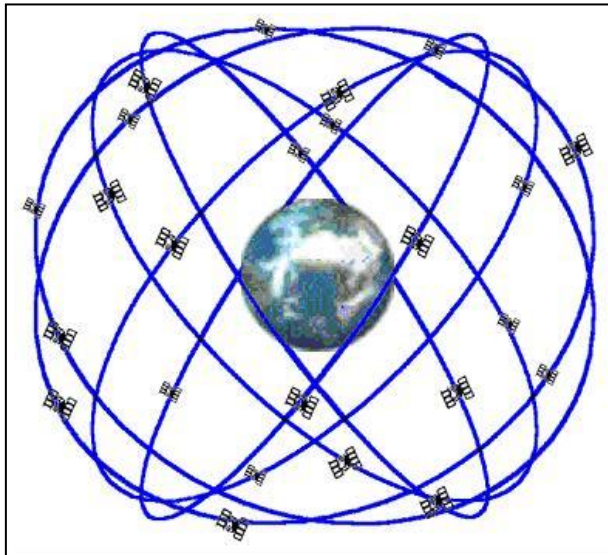
4.4 Παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης

4.4.1 NAVSTAR/G.P.S

Το NAVSTAR/GPS (Navigation System with Time and Ranging/ Global Positioning System) ή GPS, είναι ένα δορυφορικό σύστημα με τη βοήθεια του οποίου προσδιορίζεται η θέση ενός σημείου παρατήρησης X,Y,Z σε ένα κατάλληλο σύστημα αναφοράς. Ανήκει στην κατηγορία των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (GNSS - Global Navigation Satellite Systems) (Βέργος κ.ά. 2003). Το GPS τέθηκε σε πλήρη λειτουργία στις αρχές της δεκαετίας του 1980 αρχικά για στρατιωτικές εφαρμογές με την ευθύνη της λειτουργίας του στο Υπουργείο Αμύνης των Η.Π.Α. Στις επόμενες δεκαετίες με τη πρόοδο της τεχνολογίας και τη βελτίωση της ακρίβειας παρατηρήθηκε αλματώδης αύξηση των εφαρμογών χρήσης του συστήματος GPS, όπως ο έλεγχος της κίνησης πλοίων, οχημάτων και αεροπλάνων αλλά και σε τομείς όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια όπως η μέτρηση γεωδαιτικών δικτύων, τοπογραφικών μετρήσεων, κ.λπ.

Το GPS αποτελείται από τρία τμήματα: το δορυφορικό τμήμα, το τμήμα ελέγχου και το τμήμα χρήσης (Natural Resources Canada 1995).

Το δορυφορικό τμήμα περιλαμβάνει 24 δορυφόρους (21 σε κανονική λειτουργία και 3 εφεδρικούς, αλλά σε λειτουργία) οι οποίοι κατανομούνται σε 6 τροχιακά επίπεδα κλίσης 55° σε ύψος 20.200 χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια της Γης (εικόνα 4.7). Ο συγκεκριμένος τροχιακός σχηματισμός παρέχει πλέον πλήρη κάλυψη σε όλο τον κόσμο (4 τουλάχιστον δορυφόροι ορατοί ταυτόχρονα σε κάθε τόπο) σε όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Κάθε δορυφόρος εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά σήματα στη συχνότητα $L1 = 1575.42$ MHz (με μήκος κύματος περίπου 19 cm) και στη συχνότητα $L2 = 1227.60$ MHz (με μήκος κύματος περίπου 24 cm). Η συχνότητα $L1$ φέρει τον κώδικα C/A^1 και στην συχνότητα $L2$ περιέχεται ο ακριβής κώδικας P^2 , ο οποίος χρησιμοποιείται για την διόρθωση της καθυστέρησης των σημάτων κατά την μετάδοση τους μέσα στην ιονόσφαιρα. Εκτός από τον P και τον C/A κώδικα, υπάρχει και ο κώδικας D^3 που υπερτίθεται και στις δύο συχνότητες και περιέχει τα απαραίτητα στοιχεία για την γνώση της θέσης των δορυφόρων κάθε χρονική στιγμή.



Εικόνα 4.7 Η διάταξη του συστήματος GPS.

Το τμήμα ελέγχου αποτελείται από πέντε σταθμούς παρακολούθησης των δορυφόρων και εκπομπής πληροφοριών προς αυτούς, με κύριο σταθμό ελέγχου αυτόν που βρίσκεται στο Colorado των Η.Π.Α. Εκεί, γίνεται επεξεργασία όλων των παρατηρήσεων που πραγματοποιούνται από τους σταθμούς παρακολούθησης και υπολογίζονται οι δορυφορικές τροχιές καθώς και άλλα στοιχεία.

¹ Coarse Acquisition Code, C/A

² Precise Code, P

³ Data Code, D

Το τμήμα χρήσης αποτελείται από τους δέκτες GPS. Οι δέκτες που χρησιμοποιούνται για τοπογραφικές εφαρμογές είναι πολυκάναλοι, δηλαδή μπορούν να λαμβάνουν σήματα από τέσσερις ή παραπάνω⁴ δορυφόρους την ίδια στιγμή, δεσμεύοντας ένα κανάλι για κάθε συχνότητα L1 ή L2 του δορυφόρου. Οι δέκτες αυτοί μπορούν να παρακολουθούν κάθε στιγμή όλους τους ορατούς δορυφόρους και να υπολογίζουν έτσι τη θέση και την ταχύτητά τους με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης ενός σημείου με τον παραπάνω τρόπο κυμαίνεται μεταξύ ± 15 και 100 μέτρων και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Για γεωδαιτική χρήση, χρησιμοποιούνται πάντοτε δύο δέκτες, με ακρίβεια της τάξης του ± 1 εκατοστού. Όταν γίνεται μέτρηση από δύο δέκτες προς κοινό δορυφόρο την ίδια χρονική στιγμή, τότε ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα του δορυφόρου. Με κοινές μετρήσεις από δύο δέκτες προς δύο δορυφόρους, την ίδια χρονική στιγμή, εξαλείφονται τα σφάλματα των δεκτών. Τέλος, με κοινές μετρήσεις δύο δεκτών προς δύο δορυφόρους σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, βελτιώνεται ακόμη περισσότερο η ακρίβεια.

4.4.2 Πρόγραμμα GALILEO

Εκτός από το GPS έχουν αναπτυχθεί ή βρίσκονται σε ανάπτυξη και άλλα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης όπως:

- Το ρωσικό σύστημα, GLONASS (GLObal NAVigation Satellite Systems).
- Το κινέζικο σύστημα, Compass.
- Το Ευρωπαϊκό σύστημα, GALILEO.

Το ευρωπαϊκό παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού θέσης, του GALILEO θα έχει πολιτικό χαρακτήρα (σε αντίθεση με τα GPS και GLONASS) και θα καλύπτει σχεδόν το 99% της γήινης επιφάνειας. Υποστηρίζεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (European Space Agency - ESA). Το σύστημα GALILEO σε πλήρη λειτουργία θα αποτελείται από 24 δορυφόρους και 6 εφεδρικούς οι οποίοι θα βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη γη σε ύψος περίπου 23 Km.

Οι παρεχόμενες υπηρεσίες του GALILEO αφορούν τρεις κατηγορίες χρηστών:

- Δωρεάν διάθεση σε όλους τους χρήστες με κάποια σχετική ακρίβεια.
- Επί πληρωμή σε όσους χρήστες απαιτούν υψηλή ακρίβεια.
- Δωρεάν διάθεση υψηλής ακρίβειας σήμα σε δημόσιες αρχές- φορείς για εφαρμογές ασφαλείας κ.ά.

Η αρχική διάθεση των υπηρεσιών θα αρχίσει στα τέλη του 2016 και θα αυξάνεται μέχρι την πλήρη υποστήριξη έως το 2020.

4.4.3 Εφαρμογές των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού θέσεως GPS τυχαίνει πολλαπλών εφαρμογών σε διάφορους τομείς, είτε με υψηλότερη είτε με χαμηλότερη ακρίβεια (Wells 1987). Ειδικότερα, εφαρμογές υψηλής ακρίβειας (μερικά χιλιοστά έως λίγα εκατοστά) είναι:

- Η Μέτρηση γεωδαιτικών δικτύων και τοπογραφικών αποτυπώσεων.
- Οι Υδρογραφικές αποτυπώσεις.
- Η Μέτρηση και η πύκνωση τριγωνομετρικών δικτύων.
- Η Μέτρηση των συντεταγμένων μεμονωμένων σημείων.
- Οι Φωτογραμμετρικές και οι κτηματογραφικές αποτυπώσεις.
- Η Αποτύπωση ζώνης οδοποιίας και του υφιστάμενου οδικού δικτύου.
- Η Παρακολούθηση μικρομετατοπίσεων σε τεχνικά έργα.
- Η Παρακολούθηση των μετακινήσεων του φλοιού της γης.

⁴ μέχρι δώδεκα

Υπάρχουν όμως και αρκετές εφαρμογές μικρότερης ακρίβειας (από μερικές δεκάδες εκατοστά μέχρι μερικά μέτρα) όπως:

- Ο Έλεγχος της κίνησης των αεροπλάνων, αυτοκινήτων και πλοίων.
- Η ενημέρωση χαρτών.
- Η χάραξη πορείας.
- Η ενημέρωση γεωχωρικών δεδομένων σε συστήματα GIS.

Τέλος, το νέο σύστημα GALILEO προβλέπεται ότι θα δημιουργήσει μια αγορά προϊόντων και υπηρεσιών περίπου 400 δις. ευρώ έως το 2025. Στην πράσινη βίβλο για τις εφαρμογές τις δορυφορικής πλοήγησης αναφέρονται μια σειρά από τομείς εφαρμογής όπως (Πράσινη Βίβλος 2006):

- Ο Εντοπισμός θέσεων για κλήσεις έκτακτης ανάγκης.
- Η Πολιτική προστασία, και η διαχείριση έκτακτων καταστάσεων.
- Η Γεωργία ακριβείας και η βελτίωση της παραγωγής με ταυτόχρονη μείωση των λιπασμάτων.
- Η Διαχείριση του Περιβάλλοντος.
- Οι Υπηρεσίες υγείας.
- Ο Τουρισμός και η αναψυχή.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Ελληνόγλωσση

Βέης, Γ., 1987. Το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς, Αθήνα: Οργανισμός Κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδας.

Βέργος, Σ.Γ., Κατσουγιαννόπουλος, Σ., 2003. *Εφαρμογές παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος εντοπισμού θέσης (GPS)*. Διδακτικές σημειώσεις Τμήμα Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών.

Πράσινη Βίβλος, 2006. ΠΡΑΣΙΝΗ ΒΙΒΛΟΣ για τις εφαρμογές της δορυφορικής πλοήγησης. Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, Βρυξέλλες.

Robinson, H.A., Morrison, L.J., Muehrcke, C.P., Kimerling, A.J. and Guptill, C.S., 2002. Στοιχεία Χαρτογραφίας, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., trans. Μετάφραση στα Ελληνικά: Τσιαντούλας Τάσος 874.

Τσακίρη – Στρατή, Μ., 1989. Ανάπτυξη Αλγόριθμου για την ψηφιακή επεξεργασία πολυφασματικών εικόνων” *Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ., Επιστημονική Επετηρίδα Πολυτεχνικής Σχολής, Παράρτημα 30, Τόμος ΣΑ, ΤΑΤΜ, Θεσ/νίκη, 1989.*

Ξενόγλωσση

Campbell J.B., 1987. *Introduction to Remote Sensing*, Guilford Press.

Duggin, M.J. and Philipson, W.R., 1985 Relating Ground Aircraft and satellite radiance measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1665-1670.

Floys, S. and Sabins, JR., *Remote Sensing Principles and Interpretation*. 2nd eds. New York: W.H. Freeman and Company.

Natural Resources Canada, 1995. GPS Positioning Guide. Geomatics Canada, Geodetic Survey Division
URL: <http://www.geod.nrcan.gc.ca/>

Harris, R., 1987. *Sattelite Remote Sensing-An Introduction*. London and New York: Routlege and Kegan Paul.

- Jensen, R.J., 1986. *Introductory digital Image Processing - A remote sensing perspective*. Prentice – Hall.
- Richards, A.J., 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis-An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag.
- Showengerdt A.R., 1983. *Techniques for Image Proccessing and Classification in Remote Sensing*. Academic Press.
- Wells, D., 1987. *Guide to GPS positioning*. Canadian GPS Associates.

Κεφάλαιο 5 Ραδιομετρικές και ατμοσφαιρικές διορθώσεις

Ιωάννης Ν. Φαρασλής

Σύνοψη

Τα ψηφιακά δεδομένα που καταγράφονται από αισθητήρες είτε αερομεταφερόμενους είτε από δορυφόρους ενδέχεται να εμπεριέχουν σφάλματα τόσο στην γεωμετρία τους όσο και στις τιμές φωτεινότητας (ραδιομετρικές τιμές των εικονοστοιχείων τους (pixels)). Στη δεύτερη περίπτωση οι αλλοιώσεις των τιμών των pixels αναφέρονται ως ραδιομετρικά σφάλματα και μπορεί να οφείλονται τόσο στους αισθητήρες καταγραφής όσο και στις επιδράσεις της ατμόσφαιρας. Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες ραδιομετρικών σφαλμάτων: (α) Τα εσωτερικά σφάλματα, που προκύπτουν από το ίδιο το σύστημα καταγραφής. Πρόκειται για συστηματικά σφάλματα των αισθητήρων, τα οποία είναι δυνατόν εφόσον εντοπιστούν να διορθωθούν, όπως για παράδειγμα το πρόβλημα απορρύθμισης ανιχνευτών και (β) τα εξωτερικά σφάλματα, που προέρχονται από διαφορετικούς εξωγενείς παράγοντες, όπως η ατμόσφαιρα, το υψόμετρο, οι κλίσεις ή ο προσανατολισμός του εδάφους. Ορισμένα εξωτερικά σφάλματα μπορούν να διορθωθούν με τη βοήθεια επιτόπιων μετρήσεων καθώς και με την εφαρμογή ατμοσφαιρικών μοντέλων. Η διόρθωση των ραδιομετρικών σφαλμάτων αποτελεί μια πολύπλοκη αλλά αναγκαία διαδικασία προ-επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων, για την βελτίωση της ποιότητας των εικόνων και την ασφαλή εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων.

5.1 Ραδιομετρικά Σφάλματα

Τα ψηφιακά δεδομένα που καταγράφονται από αισθητήρες ή αερομεταφερομένους ή δορυφόρων είναι δυνατό να εμπεριέχουν σφάλματα τόσο στη γεωμετρία τους (όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο) όσο και στις τιμές ραδιομετρικές τιμές των εικονοστοιχείων τους. Στη δεύτερη περίπτωση οι αλλοιώσεις των τιμών των pixels αναφέρονται ως ραδιομετρικά σφάλματα και μπορεί να οφείλονται τόσο στους αισθητήρες καταγραφής όσο και στις επιδράσεις της ατμόσφαιρας. Γενικά, δύο είναι οι βασικές κατηγορίες ραδιομετρικών σφαλμάτων (Jensen 1996):

- Τα εσωτερικά σφάλματα, που προκύπτουν από το ίδιο το σύστημα καταγραφής. Πρόκειται για συστηματικά σφάλματα των αισθητήρων, τα οποία αν εντοπιστούν, μπορούν να διορθωθούν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πρόβλημα απορρύθμισης των ανιχνευτών.
- Τα εξωτερικά σφάλματα, που προκύπτουν από διαφορετικούς εξωτερικούς παράγοντες, όπως η ατμόσφαιρα, το υψόμετρο, οι κλίσεις, ο προσανατολισμός του εδάφους. Ορισμένα εξωτερικά σφάλματα μπορούν να διορθωθούν με τη βοήθεια επιτόπιων μετρήσεων καθώς και με την εφαρμογή ατμοσφαιρικών μοντέλων.

Επίσης, όταν τα ραδιομετρικά σφάλματα των εικόνων εξετάζονται υπό το πρίσμα εντοπισμού διαχρονικών αλλαγών, μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες (Paolini *et al.* 2006) σύμφωνα με τις:

- Διαφορές στις ραδιομετρικές αποκρίσεις μεταξύ των δορυφόρων.
- Αλλαγές στην βαθμονόμηση των αισθητήρων των δορυφόρων.
- Διαφορές στη γωνία παρατήρησης και στη φωτεινότητα.
- Ατμοσφαιρικές μεταβολές και επιδράσεις του ανάγλυφου.

Η συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση αφορά την επεξεργασία δύο ή περισσότερων πολυφασματικών εικόνων, σε διαφορετικές ημερομηνίες, που χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση διαχρονικών αλλαγών στη γήινη επιφάνεια. Οι ραδιομετρικές διαφοροποιήσεις των εικόνων εξαιτίας των ανωτέρω σφαλμάτων μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα της ποιοτικής και της ποσοτικής εκτίμησης των μεταβολών των καλύψεων γης.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η διόρθωση των ραδιομετρικών σφαλμάτων αποτελεί μια πολύπλοκη αλλά αναγκαία διαδικασία προεπεξεργασίας των δεδομένων για την βελτίωση της ποιότητας των

εικόνων και την ασφαλή εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων. Η αναγκαιότητα η μη των ραδιομετρικών διορθώσεων εξαρτάται τόσο από τη φύση των δεδομένων όσο και από το είδος των πληροφοριών που πρέπει να εξαχθούν.

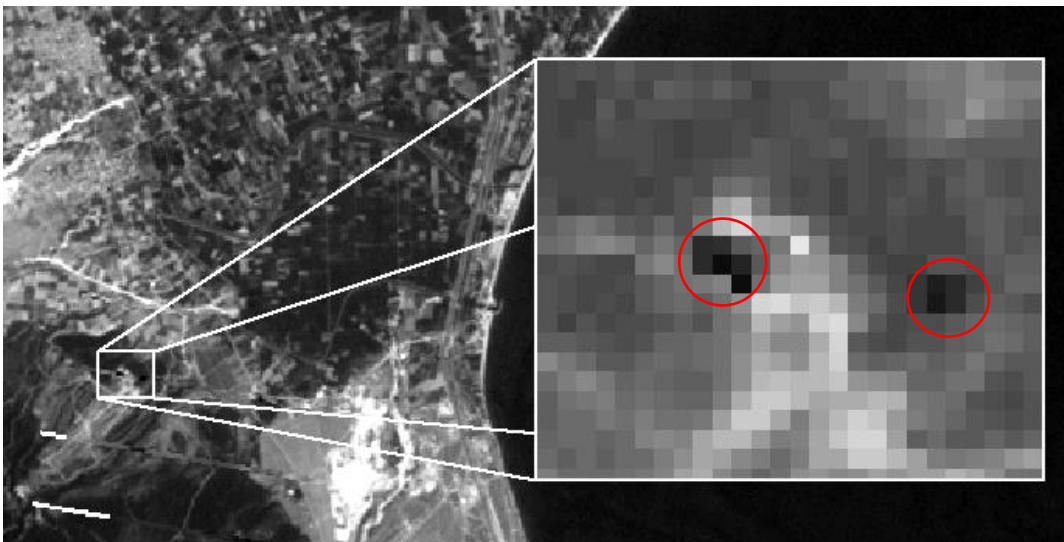
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν, συνοπτικά, οι δύο βασικές κατηγορίες ραδιομετρικών σφαλμάτων (εσωτερικά, εξωτερικά) αναφορικά με τα φωτογραφικά συστήματα καταγραφής καθώς και τους πολυφασματικούς σαρωτές.

5.1.1 Εσωτερικά σφάλματα των αισθητήρων

5.1.1.1 Τυχαία χαλασμένα pixels (Shot Noise)

Μερικές φορές οι ανιχνευτές καταγράφουν εσφαλμένα δεδομένα από pixels που βρίσκονται σε τυχαίες θέσεις μέσα στην εικόνα. Τα pixels αυτά θα έχουν είτε πολύ υψηλές είτε πολύ χαμηλές τιμές προκαλώντας «θόρυβο» στην εικόνα. Ο εντοπισμός του θορύβου γίνεται με τη σύγκριση των γειτονικών pixels. Όταν η διαφορά στην τιμή φωτεινότητας των pixels σε σχέση με τα γειτονικά υπερβεί ένα κατώφλι τότε θεωρείται ότι υπάρχει «θόρυβος» στην εικόνα. Για τη διόρθωση του σφάλματος, μια απλή τεχνική που ακολουθείται είναι η αντικατάστασή του «θορύβου» από την τιμή του μέσου όρου των γειτονικών pixels.

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζονται τα «χαλασμένα» pixels σε δορυφορική εικόνα του Landsat-7 TM (κανάλι 3). Ένας από τους 16 αισθητήρες που διαθέτει ο συγκεκριμένος δορυφόρος δεν κατέγραψε τις σωστές τιμές φωτεινότητας στα συγκεκριμένα pixels με αποτέλεσμα να εμφανίζονται με μαύρο χρώμα. Λαμβάνοντας υπόψη τις γειτονικές τιμές τους θα γίνει αντίστοιχη διόρθωση των χαλασμένων pixels και απομάκρυνση του θορύβου.



Εικόνα 5.8 Χαλασμένα pixels λόγω αστοχίας του ανιχνευτή.

Ακολουθεί αριθμητικό παράδειγμα διόρθωσης θορύβου στις ραδιομετρικές τιμές δορυφορικών εικόνων σε επίπεδο γειτνίασης του χαλασμένου εικονοστοιχείου (Showengerdt 1983).

P.T.1	P.T.4	P.T.7
P.T.2	P.T.5	P.T.8
P.T.3	P.T.6	P.T.9

Πίνακας 5.1 Πλαίσιο 3X3 διόρθωσης θορύβου δορυφορικής εικόνας τοπικά

όπου

P.T. i : ραδιομετρική τιμή i

M.T.Γ. i : μέση τιμή γραμμής i

M.T.Σ. i : Μέση τιμή στήλης i

Αλγόριθμοι διόρθωσης (όπου P. T.' i: η διορθωμένη P. T. i)

1^{ον} Μεμονωμένου κεντρικού pixel (P.T. 5)

Ορίζουμε τις παρακάτω μέσες τιμές

$$MT\ 1 = (PT1 + PT3 + PT7 + PT9)/4$$

$$MT\ 2 = (PT2 + PT4 + PT6 + PT8)/4$$

και τη διαφορά τους $\Delta = |MT1 - MT2|$

Εάν $|PT5 - MT1| > \Delta$ ή $|PT5 - MT2| > \Delta$

τότε $PT'5 = MT2$ ειδάλλως $PT'5 = PT5$

2^{ον} Μεσαίας γραμμής (ότι εφαρμόζεται στον παρακάτω αλγόριθμο για το κεντρικό pixel θα εφαρμοστεί στη συνέχεια με τον ίδιο τρόπο για όλα τα pixels της μεσαίας γραμμής).

Όπως και παραπάνω, ορίζουμε

$$MTG1 = (PT1 + PT4 + PT7)/3 \text{ και } MTG3 = (PT3 + PT6 + PT9)/3$$

και τη διαφορά τους $\Delta = (MTG1 - MTG3)$

Εάν $|PT5 - MTG1| > \Delta$ ή $|PT5 - MTG3| > \Delta$ τότε

$PT'5 = (PT4 + PT6)/2$ αλλιώς $PT'5 = PT5$

3ο Μεσαίας στήλης (ανάλογα με το 2ο)

$$(MTΣ1) = (PT1 + PT2 + PT3)/3$$

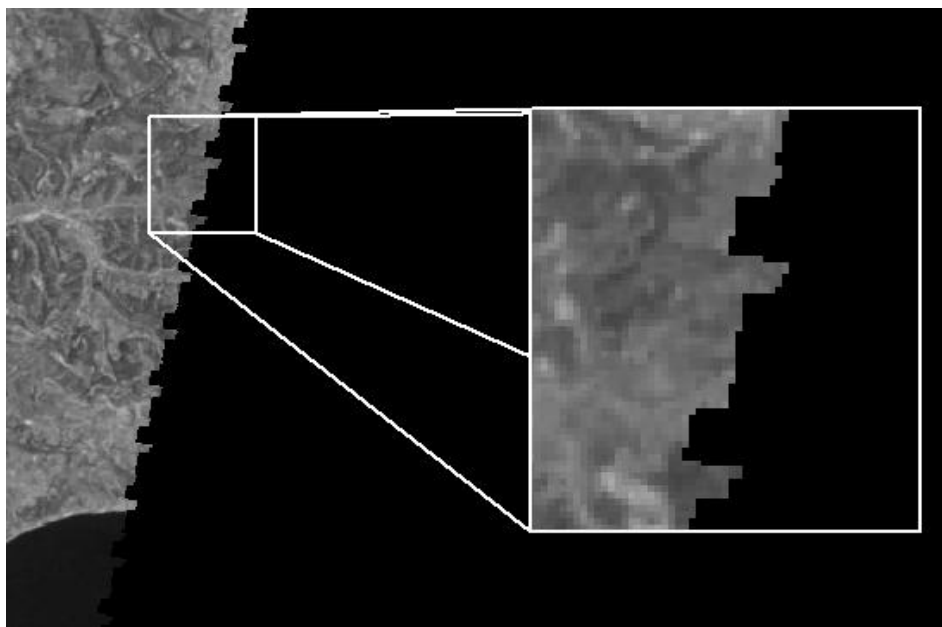
$$(MTΣ3) = (PT7 + PT8 + PT9)/3$$

$$\Delta = (MTΣ1 - MTΣ3)$$

Εάν $|PT5 - MTΣ1| > \Delta$ ή $|PT5 - MTΣ3| > \Delta$ τότε $PT'5 = (PT2 + PT8)/2$ αλλιώς $PT'5 = PT5$

5.1.1.2 Αστοχία καταγραφής στην αρχή ή στο τέλος της εικόνας

Τα συγκεκριμένα σφάλματα προέρχονται από αισθητήρες που αποτυγχάνουν να καταγράψουν τα δεδομένα τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος της γραμμής σάρωσης. Εάν πρόκειται για συστηματικά σφάλματα τότε το πρόβλημα διορθώνεται με οριζόντια μετατόπιση. Στην περίπτωση τυχαίων σφαλμάτων η διόρθωση τους είναι δύσκολη, εάν όχι αδύνατη, γιατί απαιτείται συστηματική σάρωση όλης της εικόνας από εξειδικευμένο προσωπικό. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζονται σφάλματα καταγραφής στην αρχή της εικόνας, στο κανάλι 4, του Landsat-7 TM.



Εικόνα 5.9 Αστοχία του αισθητήρα καταγραφής στην έναρξη κάθε γραμμής της εικόνας

5.1.1.3 Λωριδοποίηση (striping)

Η λωριδοποίηση παρατηρείται στην εικόνα όταν δεν καταγράφεται φασματική πληροφορία σε ολόκληρη γραμμή εξαιτίας της απορρύθμισης των ανιχνευτών των αισθητήρων. Συνήθως πρόκειται για συστηματικό θόρυβο, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στην εικόνα οριζόντιες μαύρες ή λευκές γραμμές. Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο σε περιοχές όπου υπάρχει ομοιόμορφη ανάκλαση όπως για παράδειγμα στις υδάτινες επιφάνειες. Η διαδικασία της από-λωριδοποίησης (destriping) υλοποιείται με τον ορισμό ενός αισθητήρα αναφοράς και την προσαρμογή όλων των υπόλοιπων αισθητήρων σ' αυτόν. Έτσι μετά τον μετασχηματισμό οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των pixels θα ταιριάζουν με τις αντίστοιχες τιμές του αισθητήρα αναφοράς (Ritchards 1986).

Στη συνέχεια αναφέρονται τα πιο γνωστά σφάλματα λωριδοποίησης.

Α) Οι πολλαπλοί ανιχνευτές που υπάρχουν στους απεικονιστές, όπως π.χ. στους MSS ή TM του LANDSAT, έχουν μεταξύ τους μικρές φυσικές διαφορές, έτσι ώστε να εμφανίζονται διαφορές στη ραδιομετρία που καταγράφουν, ακόμη και αν πρόκειται για το ίδιο αντικείμενο, την ίδια ώρα. Έτσι συγκεκριμένα, σε μερικές εικόνες του πολυφασματικού σαρωτή (MSS) του LANDSAT συμβαίνει συχνά τα δεδομένα ενός από τους έξι ανιχνευτές ή να λείπουν, οπότε κάθε έξι γραμμές στην εικόνα να υπάρχει μια που να περιέχει μόνον την τιμή 0 ή τελείως λανθασμένες ραδιομετρικές τιμές. Η επανάληψη αυτή του λάθους λέγεται ή “περιοδική απόρριψη γραμμών” (periodic line dropout) ή κατ’ άλλους συγγραφείς “δημιουργία λωρίδων ανά έξι γραμμές” (six-line banding). Αυτό συμβαίνει επειδή ο πολυφασματικός σαρωτής (MSS) σαρώνει συγχρόνως έξι γραμμές μιας εικόνας. Ανάλογο φαινόμενο συμβαίνει μερικές φορές και στο θεματικό χαρτογράφο TM του Landsat αλλά κάθε δεκαέξι γραμμές, λόγω αντίστοιχης σάρωσης του απεικονιστή αυτού. Η μέθοδος διόρθωσης του περιοδικού αυτού σφάλματος είναι σχετικά απλή και οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Έτσι, ας υποθέσουμε ότι έχουμε το παρακάτω τμήμα δορυφορικής εικόνας (παράθυρο) σε ψηφιακή μορφή (σε μορφή πίνακα αριθμών με τιμές από 0 έως 255 ή 2^8-1) που εμφανίζει το περιοδικό σφάλμα των έξι γραμμών που αναφέρθηκε παραπάνω.

Αριθ γραμμών					
6κ-2	7	8	10	9	12
6κ-1	10	12	11	14	13
6κ	0	0	0	0	0
6κ+1	13	15	14	16	18
6κ+2	12	14	13	10	11

Πίνακας 5.2 Τμήμα δορυφορικής εικόνας που εμφανίζει σφάλμα στη γραμμή 6κ.

Τα βήματα που ακολουθούνται για τη διόρθωση του σφάλματος αυτού (με προσέγγιση δέκατου), είναι τα παρακάτω:

1ο βήμα: Βρίσκουμε τη μέση τιμή των ραδιομετρικών τιμών κάθε γραμμής: έτσι θα έχουμε αντίστοιχα τον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 6.

Γραμμή	Μέση τιμή
6κ-2	9
6κ-1	12
6κ	0
6κ+1	15
6κ+2	12

Πίνακας 5.3 Μέσες ραδιομετρικές τιμές ανά γραμμή του τμήματος δορυφορικής εικόνας του πίνακα 5.2.

2ο βήμα: Βρίσκουμε τη μέση τιμή όλων των ραδιομετρικών τιμών της εικόνας, δηλαδή $\sum(PT_i) / 25 = 242/25$ όπου PT_i η ραδιομετρική τιμή του κάθε pixel και

3ο βήμα: Ορίζουμε ένα διάστημα εμπιστοσύνης για τη μέση τιμή. Αυτό μπορεί να βρεθεί εάν π.χ. θεωρήσουμε ένα παράθυρο μεγέθους μεγαλύτερου από 30 pixels, οπότε και η κατανομή των ραδιομετρικών

τιμών μπορεί να θεωρηθεί κανονική $N(\mu, \frac{\sigma^2}{n})$. Έστω ότι εδώ θεωρούμε ότι η μέση τιμή κάθε γραμμής δεν μπορεί να διαφέρει πάνω από πέντε μονάδες από την συνολική μέση τιμή. Έτσι απορρίπτουμε τη γραμμή 6κ.

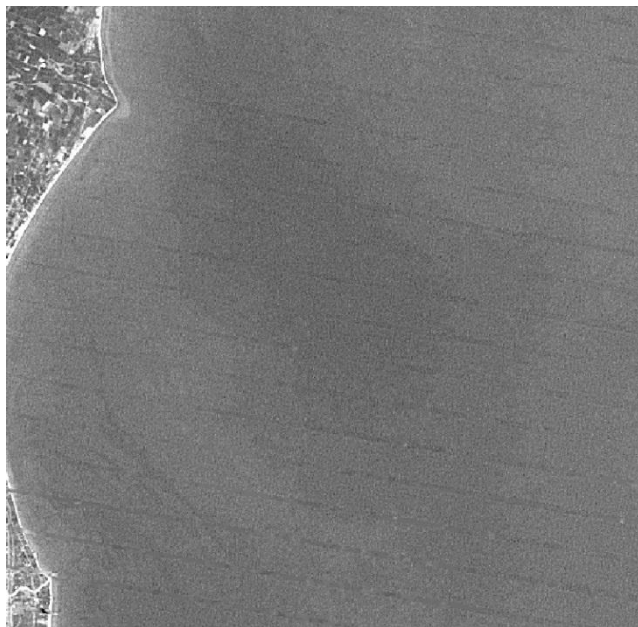
4ο βήμα: Αντικαθιστούμε τις τιμές των pixels της απορριφθείσας γραμμής με το μέσο όρο των τιμών των pixels της προηγούμενης και επόμενης γραμμής. Έτσι η γραμμή γίνεται 12 14 13 15 16 (με προσέγγιση προς την μεγαλύτερη τιμή).

Β) Παραπλήσιο με το προηγούμενο σφάλμα είναι το λεγόμενο “Σφάλμα περιοδικών γραμμωτών ραβδώσεων” (periodic line stripping). Πριν ακόμη από την εκτόξευση του δορυφόρου όπως τα διάφορα όργανα, έτσι και οι ανιχνευτές ελέγχονται και υφίστανται τις απαραίτητες διορθώσεις ώστε να τυποποιηθούν, σύμφωνα με τους κανόνες του κατασκευαστή. Όμως, με την πάροδο του χρόνου και κατά συνέπεια με τη φθορά που υφίστανται, είναι δυνατόν, όπως και προηγουμένως, κάθε γραμμή που καταγράφεται από τον ελαττωματικό ανιχνευτή να εμφανίζει τιμές πολύ υψηλότερες ή πολύ χαμηλότερες από αυτές που θα έπρεπε.

Μια διορθωτική μέθοδος του σφάλματος αυτού είναι ο σχεδιασμός των έξι ιστογραμμάτων για τους έξι ανιχνευτές του σαρωτή MSS (ουσιαστικά για το σύνολο των έξι ομάδων των γραμμών της εικόνας που προκύπτουν εάν τις θεωρήσουμε ανά έξι, δηλ. στην 1η ομάδα (1ος ανιχνευτής)θα ανήκουν οι γραμμές 1η, 7η, 13η, 19η . . ., στην 2η ομάδα οι γραμμές 2η, 8η, 14, . . . κ.λπ.) και σύγκριση των ιστογραμμάτων αυτών με το ιστόγραμμα που προκύπτει από όλη την εικόνα συνολικά.

Έτσι για κάθε ανιχνευτή, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση μετασχηματίζονται ώστε να συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα της εικόνας ολόκληρης. Π.χ. εάν η μέση τιμή ενός ανιχνευτή είναι 45 και όλης της εικόνας 22, τότε όλες οι τιμές των γραμμών που αντιστοιχούν στον ανιχνευτή αυτόν πολνται με 0,5.

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται έντονα το φαινόμενο της λωριδοποίησης στο θαλάσσιο μέτωπο ανατολικά της Κατερίνης. Η εικόνα ανήκει στο πρώτο κανάλι του Landsat-7 TM.



Εικόνα 5.10 Λωριδοποίηση στο καταγραφικό σύστημα Landsat-7 TM, κανάλι 1

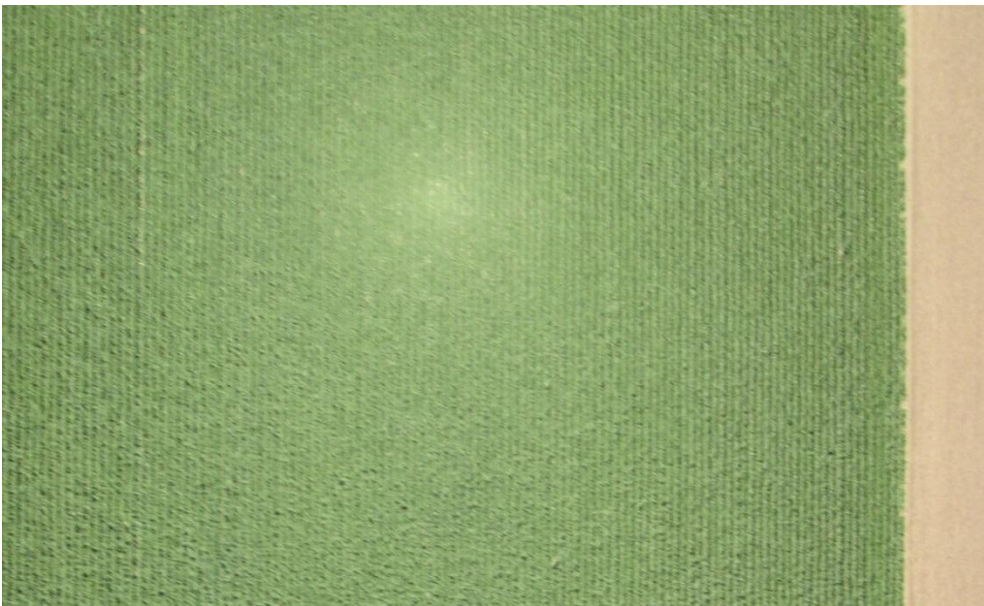
5.1.1.4 Βαθμιαία μείωση της φωτεινότητας («vignetting»)

Το φαινόμενο «vignetting» παρατηρείται συνήθως στα φωτογραφικά συστήματα καταγραφής (δηλαδή αυτά που περιέχουν φακούς) και εκφράζεται ως μείωση της φωτεινότητας της εικόνας από το κέντρο προς τα άκρα της. Υπάρχουν 3 είδη «vignetting»:

- Οπτικό «vignetting»: Προκαλείται εξαιτίας των φυσικών χαρακτηριστικών των πολλαπλών φακών των φωτομηχανών. Τα μπροστινά στοιχεία των φακών σκιάζουν τα πιο πίσω. Το γεγονός αυτό προκαλεί σταδιακή μείωση της έντασης της ακτινοβολίας που εισέρχεται από το κέντρο προς τα άκρα.
- Φυσικό «vignetting»: Το φυσικό «vignetting» είναι αποτέλεσμα της διάθλασης του φωτός. Οι φωτομηχανές διαθέτουν συνήθως φίλτρα για τη μείωση του φαινομένου.
- Pixel «vignetting»: Αφορά τις ψηφιακές μηχανές. Το φως που προσπίπτει κάθετα στον αισθητήρα παράγει ισχυρότερο σήμα σε σχέση με το φως που προσπίπτει υπό γωνία δημιουργώντας πιο φωτεινά pixels στο κέντρο σε σχέση με τα άκρα της εικόνας. Οι περισσότερες ψηφιακές μηχανές έχουν μηχανισμούς εξισορρόπησης του φαινομένου.

Για τη διόρθωση του «vignetting» χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι ανάλογα με το είδος του συστήματος καταγραφής. Έτσι, οι εικόνες που προκύπτουν από ψηφιακές φωτομηχανές μη επανδρωμένου πτητικού μέσου (Unmanned Aerial Vehicle – UAV), διορθώνονται με τη βοήθεια του βαθμονομημένου λευκού στόχου αναφοράς. Για τους πολυφασματικούς σαρωτές χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως οι μετασχηματισμοί Fourier.

Στην εικόνα που ακολουθεί, παρατηρείται η λευκή κηλίδα («vignetting») περίπου στο κέντρο της ψηφιακής αεροφωτογραφίας. Η λήψη πραγματοποιήθηκε από μη επανδρωμένο πτητικό μέσο (UAV), με ψηφιακή φωτομηχανή και από υψόμετρο 100 μέτρων περίπου.



Εικόνα 5.11 Το φαινόμενο «vignetting» σε Αεροφωτογραφία από UAV.

5.1.2 Εξωτερικά σφάλματα

Ακόμα και εάν οι αισθητήρες καταγραφής δεν παρουσιάζουν δυσλειτουργίες, τα εξωτερικά ραδιομετρικά σφάλματα μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα των εικόνων. Τα εξωτερικά σφάλματα είναι συνήθως μη συστηματικά και οφείλονται στην ατμόσφαιρα, στη θέση του ήλιου και στη φύση του ανάγλυφου της επιφάνειας της γης (κλίσεις, προσανατολισμός κ.α.).

5.1.2.1 Ατμοσφαιρικές Επιδράσεις

Τα δεδομένα που καταγράφονται από τους οπτικούς δορυφόρους (παθητικά συστήματα καταγραφής) καθώς και από τα αερομεταφερόμενα συστήματα στην ορατή και στην υπέρυθρη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, επηρεάζονται από την ύπαρξη της ατμόσφαιρας. Ουσιαστικά οι αισθητήρες καταγράφουν την ανακλώμενη-εκπεμπόμενη ακτινοβολία, υπό την επίδραση της ατμόσφαιρας, όπως προκύπτει από το σύστημα

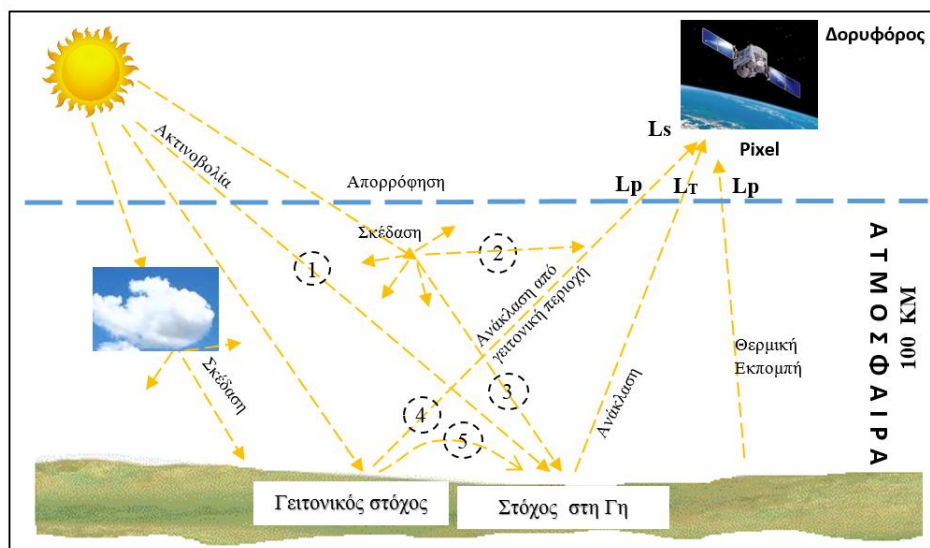
Ήλιος – Στόχος (έδαφος) – Αισθητήρας Καταγραφής (δορυφόροι). Στη συγκεκριμένη ενότητα θα μελετηθεί η ανακλώμενη ακτινοβολία και πως επηρεάζεται από την ατμόσφαιρα.

Η ατμόσφαιρα είναι ένα δυναμικό φυσικό σύστημα και πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την ακτινοβολία που ανακλάται από την επιφάνεια της γης, σε σχέση με την ακτινοβολία που καταγράφεται από τα δορυφορικά συστήματα.

Στην εικόνα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι διεργασίες που υφίσταται η ηλιακή ακτινοβολία:

(α) από την είσοδό της στην ατμόσφαιρα μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια της γης και

(β) από την επιφάνεια της γης (στόχος) μέχρι την καταγραφή της από τους αισθητήρες των δορυφόρων.



Εικόνα 5.12 Απλοποιημένο σχήμα αλληλεπίδρασης ΗΜΑ – Ατμόσφαιρας

Η περιγραφή της αλληλεπίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας (στο ορατό και στο υπέρυθρο τμήμα του Ηλεκτρομαγνητικού Φάσματος) με την ατμόσφαιρα καθώς και η ποσότητα της ακτινοβολίας που καταγράφεται από τους

δορυφορικούς δέκτες δίνεται από τη σχέση:

$$L_s = L_T + L_p \quad (5.1)$$

Όπου:

L_s : Η ακτινοβολία που φτάνει στο καταγραφικό σύστημα.

L_T : Το άθροισμα της ακτινοβολίας της περιοχής μελέτης που καταγράφεται.

L_p : Η ακτινοβολία της ατμοσφαιρικής διαδρομής.

Στην εικόνα 5.5 παρατηρούμε ότι:

Η διαδρομή 1: Περιέχει την Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία (ΗΜΑ) που φτάνει στην επιφάνεια της γης (περιοχή μελέτης-στόχος) μετά από μικρή εξασθένηση (λόγω απορρόφησης).

Η διαδρομή 2: Περιέχει την ΗΜΑ που διαχέεται στην ατμόσφαιρα και δεν φτάνει ποτέ στην επιφάνεια της γης. Τμήμα αυτής της σκεδαζόμενης ΗΜΑ καταγράφεται από τους αισθητήρες των δορυφορικών συστημάτων και πρέπει να απαλειφθεί.

Η διαδρομή 3: Είναι το τμήμα της ΗΜΑ στην ατμόσφαιρα που υφίσταται σκέδαση και φτάνει στην επιφάνεια της γης (στόχος – περιοχή μελέτης).

Η διαδρομή 4: Πρόκειται για την ΗΜΑ που ανακλάται ή σκεδιάζεται από τη γειτονική περιοχή και καταγράφεται από τους αισθητήρες ως ακτινοβολία της περιοχής μελέτης (στόχος). Αυτή η ποσότητα της ακτινοβολίας πρέπει να εξαλειφθεί. Οι διαδρομές 2 & 4 αναφέρονται ως ακτινοβολία ατμοσφαιρικής διαδρομής, L_p . Η ατμοσφαιρική διαδρομή L_p που καταγράφεται σε συγκεκριμένο pixel προκύπτει:

- από τη σκέδαση της ΗΜΑ ανάλογα με το μήκος κύματος και τα σωματίδια – αέρια της ατμόσφαιρας
- από την εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας.
- από την προσθήκη ανακλώμενης ακτινοβολίας από γειτονικές περιοχές.

Η διαδρομή 5: Περιέχει την ΗΜΑ η οποία ανακλάται επίσης από τη γειτονική περιοχή αλλά σκεδάζεται και τελικά προσπίπτει στην περιοχή μελέτης.

Συνοπτικά η ηλιακή ακτινοβολία κατά την είσοδό της στην ατμόσφαιρα και μέχρι την καταγραφή από τους δορυφόρους, επηρεάζεται από την παρουσία αερίων (gases) και αιωρούμενων σωματιδίων (particles) της ατμόσφαιρας με συνέπεια να υφίσταται τρεις βασικές διεργασίες: σκέδαση (scattering) απορρόφηση (absorption) και διάθλαση (refraction).

Α) Σκέδαση

Η σκέδαση υφίσταται όταν αιωρούμενα σωματίδια ή μόρια αερίων της ατμόσφαιρας προκαλούν εκτροπή της πορείας της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας (ΗΜΑ). Το είδος και το μέγεθος της σκέδασης εξαρτάται από παράγοντες όπως:

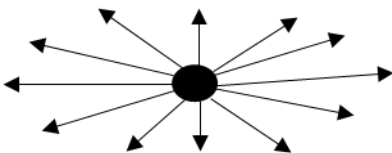
- Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.
- Την ποσότητα των σωματιδίων και των μορίων.
- Την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα.

Για παράδειγμα, στο ορατό τμήμα του Ηλεκτρομαγνητικού Φάσματος (ΗΜΦ), σε περιοχές με νεφοκάλυψη, το 100% της ενέργειας που καταγράφεται από τους αισθητήρες των δορυφόρων προέρχεται από την ατμόσφαιρα. Αντίθετα σε περίπτωση καθαρής ατμόσφαιρας μόνο το 5% της καταγεγραμμένης ενέργειας προέρχεται από την ατμόσφαιρα.

Ο τύποι σκέδασης ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το μήκος κύματος λ και τις διαστάσεις των σωματιδίων: Σκέδαση Rayleigh, Σκέδαση Mie, Μη-επιλεκτική σκέδαση.

Σκέδαση Rayleigh

Η σκέδαση τύπου Rayleigh κυριαρχεί όταν, σε καθαρή ατμόσφαιρα, υπάρχουν μικρά σωματίδια σκόνης και ατμοσφαιρικών αερίων όπως άζωτου ή οξυγόνου κυρίως στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και τα οποία αλληλοεπιδρούν με την ΗΜΑ. Η συγκεκριμένη σκέδαση εμφανίζεται όταν τα σωματίδια της ατμόσφαιρας έχουν πολύ μικρότερες διαστάσεις από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Γενικά ισχύει ότι το ποσοστό της σκέδασης τύπου Rayleigh είναι αντιστρόφως ανάλογο του μήκους κύματος λ της ακτινοβολίας (σκέδαση ανάλογη του $1/\lambda^4$). Τα μικρότερα μήκη κύματος σκεδάζονται περισσότερο σε σχέση με τα μεγαλύτερα. Έτσι, το υπεριώδες σκεδάζεται 16 φορές, ενώ το μπλε φως σκεδάζεται 4 φορές περισσότερο από το κόκκινο φως. Το γεγονός αυτό αιτιολογεί και το μπλε χρώμα που παρατηρείται στον ουρανό.



Εικόνα 5.13 Σκέδαση Rayleigh στα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας.

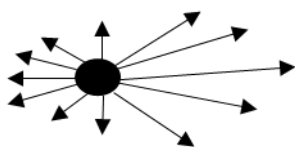
Η απουσία σωματιδίων και σκέδασης θα έδινε στον ουρανό μαύρο χρώμα. Κατά τις μεσημβρινές ώρες η ηλιακή ακτινοβολία διανύει μικρότερη απόσταση στην ατμόσφαιρα άρα το ανθρώπινο μάτι παρατηρεί το μικρότερο μήκος κύματος που σκεδάζεται, δηλαδή το μπλε. Αντίθετα κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου το ανθρώπινο μάτι παρατηρεί το ερυθρώπα χρώματα στην ατμόσφαιρα. Αυτό συμβαίνει γιατί η διαδρομή που διανύει το φως είναι μεγαλύτερη επομένως όλα τα μικρότερα μήκη κύματος σκεδάζονται πολύ και δεν φτάνουν στην επιφάνεια της γης σε αντίθεση με τα μεγαλύτερα μήκη, όπως το πορτοκαλί και το κόκκινο.

Στην περίπτωση της ανάλυσης δορυφορικών εικόνων ή αεροφωτογραφιών με Τηλεπισκόπηση (σε παθητικά συστήματα καταγραφής) ο συγκεκριμένος τύπος σκέδασης θεωρείται αρκετά σημαντικός, ιδιαίτερα στα μικρότερα μήκη κύματος (ορατό) σε σχέση με το υπέρυθρο. Η σκέδαση, προκαλεί αλλοίωση των φασματικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων που καταγράφονται από τους αισθητήρες ως προς τις επίγειες μετρήσεις. Ουσιαστικά υπάρχει μια υπερεκτίμηση κατά την καταγραφή της ΗΜΑ στα μικρότερα μήκη κύματος (ορατό). Το γεγονός αυτό μειώνει την αντίθεση της εικόνας αρά και την διάκριση αντικειμένων ενώ παράλληλα επηρεάζει και τη διαδικασία της ταξινόμησης βάσει των φασματικών χαρακτηριστικών των χρήσεων - καλύψεων γης.

Σκέδαση Mie

Η σκέδαση τύπου Mie κυριαρχεί όταν, στην ατμόσφαιρα υπάρχουν σωματίδια όπως: σταγονίδια νερού, σκόνη, καπνός κ.α.. Εμφανίζεται κυρίως στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας (0-5 χιλιόμετρα) όπου υπάρχει συγκέντρωση μεγαλύτερων σωματιδίων (σε σχέση με τη σκέδαση Rayleigh) ενώ επικρατούν και συνθήκες νεφοκάλυψης.

Ο συγκεκριμένος τύπος σκέδασης επηρεάζει τόσο το ορατό τμήμα του ΗΜΦ όσο και το κοντινό υπέρυθρο.

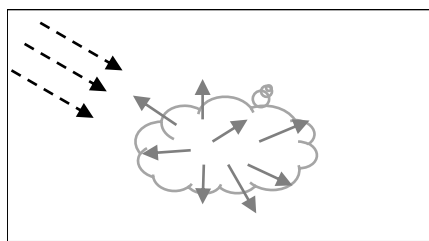


Εικόνα 5.14 Σκέδαση Mie στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Μη-επιλεκτική σκέδαση (non-selective scattering)

Η μη επιλεκτική σκέδαση οφείλεται σε σωματίδια τα οποία είναι πολύ μεγαλύτερα από το μήκος της ΗΜΑ που αλληλοεπιδρούν. Για την τηλεπισκόπηση στο ορατό και υπέρυθρο μήκος του ΗΜΦ χαρακτηριστικά σωματίδια που έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις από αυτά τη μήκη κύματος, είναι οι σταγόνες νερού, μεγάλοι κόκκοι σκόνης κ.α. Τα σύννεφα προκαλούν μη επιλεκτική σκέδαση, και όλα τα μήκη κύματος στο ορατό τμήμα του ΗΜΦ διαχέονται ομοιόμορφα με συνέπεια την εμφάνιση λευκού χρώματος. Επίσης το συγκεκριμένο είδος σκέδασης είναι υπεύθυνο και για τις σχεδόν λευκές αποχρώσεις της ομίχλης.

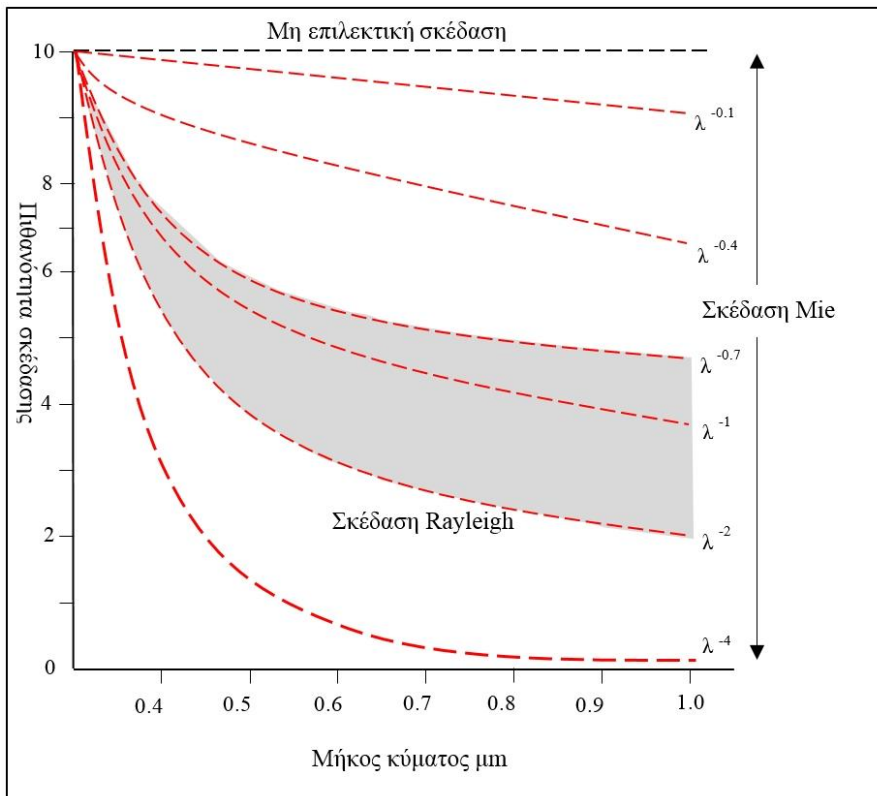
Ο συγκεκριμένος τύπος σκέδασης δημιουργεί προβλήματα στην καταγραφή εικόνων όταν υπάρχουν νέφη. Πιο συγκεκριμένα δεν μπορούν να αποτυπωθούν οι καλύψεις- χρήσεις γης τόσο εξαιτίας της νεφοκάλυψης όσο και των σκιάσεων που αυτή προκαλεί στην επιφάνεια της γης.



Εικόνα 5.15 Μη-επιλεκτική σκέδαση στα νέφη.

Γενικά, η σκέδαση της ΗΜΑ στην ατμόσφαιρα προκαλεί «αχλύδα» (θολούρα) στις εικόνες των παθητικών συστημάτων καταγραφής, με αύξηση των τιμών φωτεινότητάς τους και μείωση της αντίθεσης των εικόνων. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο σε μικρότερα μήκη κύματος (μπλε).

Στην εικόνα που ακολουθεί αποτυπώνεται η σχέση τριών τύπων σκέδασης με την ατμόσφαιρα. Ουσιαστικά παρουσιάζεται ο βαθμός σκέδασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο ορατό και στο υπέρυθρο με διαφορετικού μεγέθους σωματίδια και αέρια της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 5.16 Αλληλεπίδραση της σκέδασης με τα σωματίδια-αέρια της ατμόσφαιρας.

B) Απορρόφηση (Absorption)

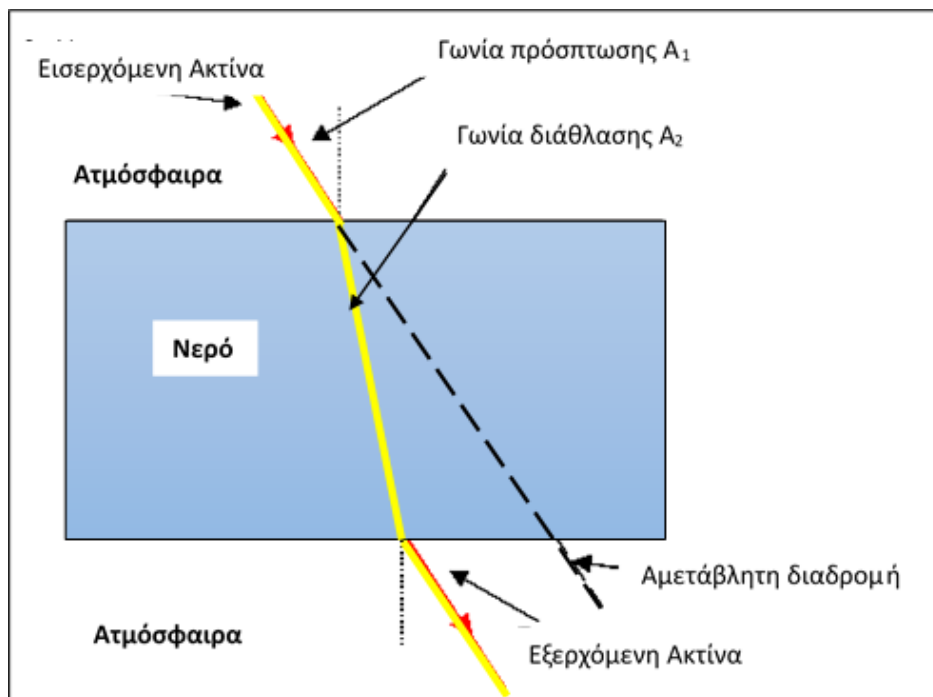
Η απορρόφηση αποτελεί βασικό μηχανισμό αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας. Η απορρόφηση υφίσταται όταν η ατμόσφαιρα εμποδίζει ή μειώνει την μετάδοση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Τρία στοιχεία της ατμόσφαιρας είναι υπεύθυνα για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το μήκος κύματος :

- Το όζον (O_3), που εντοπίζεται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας (20-30 χλμ) και εμποδίζει, κυρίως τη διέλευση ΗΜΑ με μήκος κύματος μικρότερο από 0,24 μm (υπεριώδης ακτινοβολία).
- Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) που εντοπίζεται σε μικρές συγκεντρώσεις στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας. Η ύπαρξη CO_2 δημιουργεί το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη διότι η θερμική ακτινοβολία εγκλωβίζεται στην ατμόσφαιρα της Γης και δεν μπορεί να διαφύγει στο διάστημα (φαινόμενο του θερμοκηπίου). Το CO_2 απορροφά στο μέσο – μακρινό υπέρυθρο της ΗΜΑ και ιδιαίτερα σε μήκη κύματος από 13 έως 17,5 μm.
- Η ατμοσφαιρική υγρασία (H_2O) εντοπίζεται στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας (κάτω από 100 χλμ). Η παρουσία υγρασίας στην ατμόσφαιρα ποικίλει ανάλογα με την εποχή και τον τόπο. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε περιοχές όπως οι έρημοι σε αντίθεση με περιοχές οι οποίες έχουν υγρό κλίμα. Όταν υπάρχει αρκετή υγρασία η απορρόφηση είναι έντονη σε μήκη κύματος μεταξύ 5,5 - 7 μm και πάνω από 27 μm.

Γ) Διάθλαση (Refraction)

Η διάθλαση αναφέρεται στην εκτροπή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την μετάδοσή της από ένα μέσο σ' ένα άλλο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διάθλαση της ακτινοβολίας κατά την είσοδό της από την ατμόσφαιρα στο νερό καθώς και η επιστροφή της στην ατμόσφαιρα. Σε κανονικές συνθήκες η τιμή του συντελεστή διάθλασης του φωτός κατά την είσοδο ή έξοδο του από την ατμόσφαιρα ανέρχεται σε 0,5 μίρες.

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται η γωνία εκτροπής της ΗΜΑ όταν διέρχεται από την ατμόσφαιρα στο νερό.

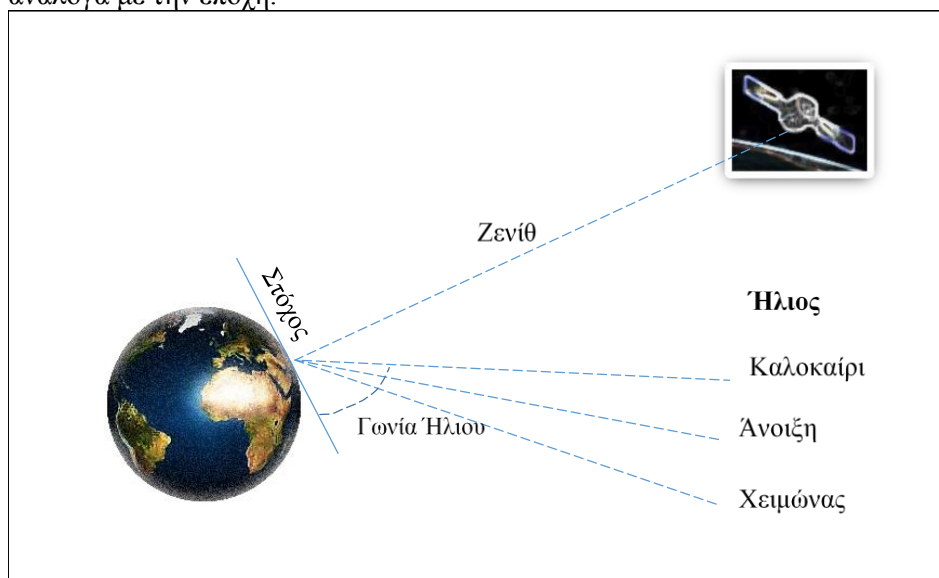


Εικόνα 5.17 Διάθλαση του φωτός στο σύστημα Ατμόσφαιρα – Νερό.

5.1.2.2 Θέση ήλιου και τοπογραφία

Η θέση του ήλιου σε σχέση με τη γήινη επιφάνεια, μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή και με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Έτσι, για το βόρειο ημισφαίριο η γωνία του ηλίου είναι μικρότερη τον χειμώνα από το καλοκαίρι. Αυτό έχει ως συνέπεια εικόνες διαφορετικής εποχής, στην ίδια περιοχή, να έχουν διαφορές στη φωτεινότητα. Η διόρθωση της γωνίας του ηλίου είναι σημαντική σε περιπτώσεις όπου πρέπει να γίνει διαχρονική ανάλυση εικόνων στην περιοχή μελέτης.

Στην εικόνα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης της ΗΜΑ στον στόχο ανάλογα με την εποχή.



Εικόνα 5.18 Γωνία πρόσπτωσης της ΗΜΑ στο σύστημα Ήλιος - Στόχος - Δορυφόρος

Το τοπογραφικό ανάγλυφο επηρεάζει την ποσότητα της ανακλώμενης ΗΜΑ. Το αποτέλεσμα του έντονου ανάγλυφου είναι οι σκιάσεις οι οποίες δημιουργούνται στην εικόνα από τις θέσεις του συστήματος Ήλιος – Επιφάνεια – Δορυφόρος. Οι σκιάσεις αποτελούν βασική πηγή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής. Στην ελληνική επικράτεια η έντονη τοπογραφία επηρεάζει την καταγραφή των υλικών και συνήθως απαιτείται η εφαρμογή τοπογραφικής διόρθωσης.

5.2 Ραδιομετρικές Διορθώσεις σφαλμάτων

Ο στόχος των ραδιομετρικών διορθώσεων των εικόνων είναι η αφαίρεση ή η μείωση των ελαττωματικών λειτουργιών (θόρυβος, κλπ) των αισθητήρων καθώς και των ατμοσφαιρικών και τοπογραφικών επιδράσεων, ώστε να καταγράφονται στην δορυφορική εικόνα οι πραγματικές ιδιότητες της γήινης επιφάνειας.

Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις σχετικά με το ερώτημα εφαρμογής ραδιομετρικών βαθμονομήσεων και ατμοσφαιρικών διορθώσεων σε δεδομένα τηλεπισκόπησης για την εξαγωγή γεωφυσικών πληροφοριών, όπως (Cracknell *et al.* 1993):

- Να αγνοηθούν πλήρως οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις.
- Να γίνει βαθμονόμηση των εικόνων με χρήση επιτόπιων μετρήσεων.
- Να γίνει χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων με παραμέτρους που προέρχονται από ιστορικά στοιχεία.
- Να γίνει χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων με παραμέτρους που προέρχονται από σύγχρονα μετεωρολογικά δεδομένα.

Η πολυπλοκότητα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης εγείρει το ερώτημα σε ποιες περιπτώσεις είναι αναγκαία και σε ποιες όχι. Γενικά δεν υπάρχει ανάγκη ραδιομετρικής διόρθωσης όταν γίνεται ανάλυση και ταξινόμηση της εικόνας σε μια ημερομηνία. Αυτό ισχύει υπό την προϋπόθεση τα δειγματοληπτικά δεδομένα να εξάγονται από την ίδια την εικόνα και όχι από άλλη με διαφορετική ημερομηνία λήψης. Αντίθετα, η ραδιομετρική διόρθωση επιβάλλεται σε περιπτώσεις όπως:

- Σύγκριση εικόνων για εντοπισμό αλλαγών, με διαφορετικές ημερομηνίες λήψης (διαχρονική ανάλυση).
- Σύγκριση δορυφορικών δεδομένων ανάκλασης της γήινης επιφάνειας από διαφορετικούς δέκτες με παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά (Landsat TM κανάλι 3 με SPOT κανάλι 2).
- Σύγκριση και επαλήθευση των τιμών ανάκλασης της γήινης επιφάνειας από δορυφορικά δεδομένα με τις αντίστοιχες επιτόπιες μετρήσεις ανάκλασης στο έδαφος.
- Εξαγωγή ποσοτικών πληροφοριών (τιμές βιομάζας – συγκεντρώσεις ουσιών στο νερό κ.α.).

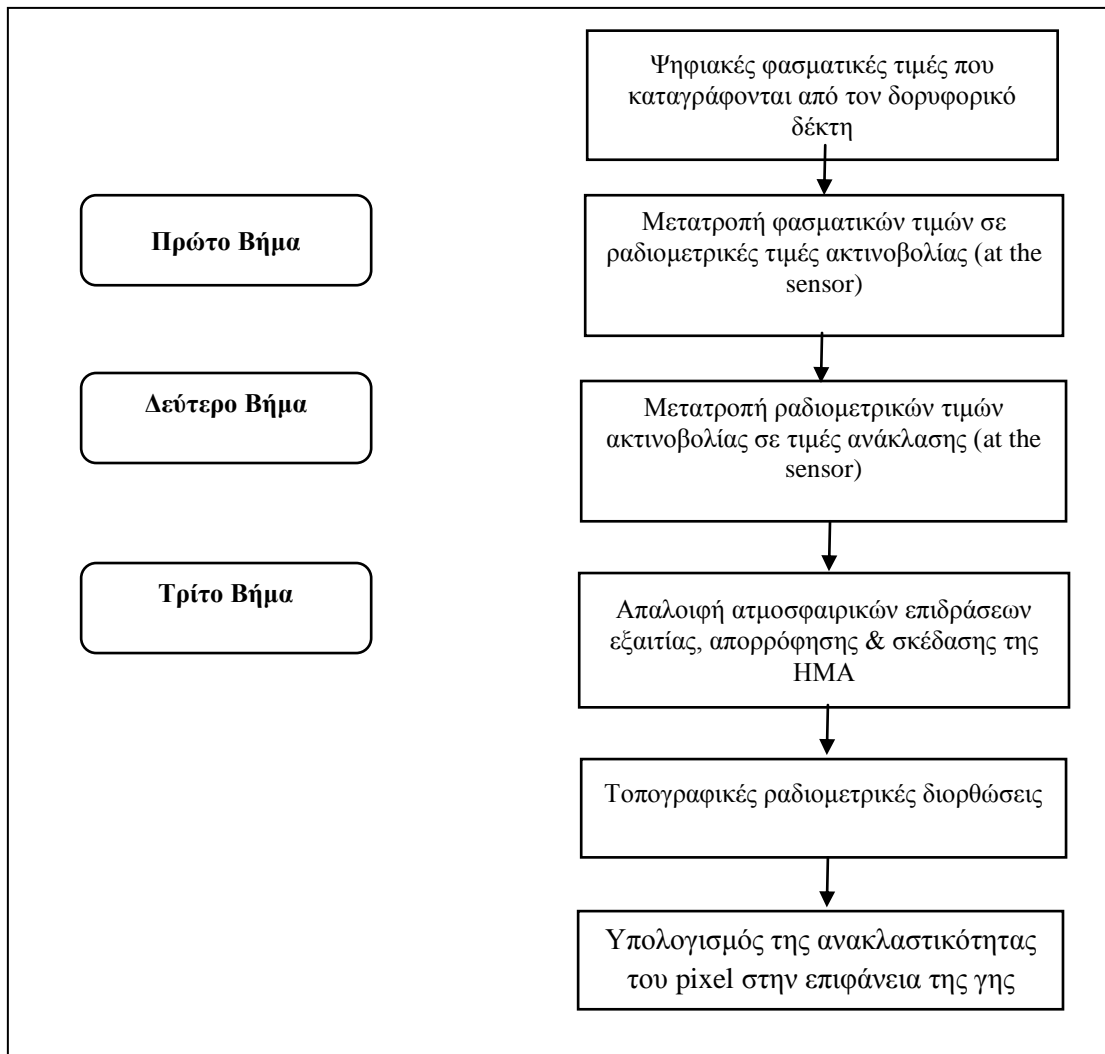
Η επιλογή της μεθόδου διόρθωσης εξαρτάται:

- από το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί,
- από το είδος των δορυφορικών δεδομένων,
- από τις ατμοσφαιρικές πληροφορίες και τέλος
- από τη διαθεσιμότητα σε εξειδικευμένο προσωπικό.

Γενικά, οι ραδιομετρικές διορθώσεις ταξινομούνται σε τρία βήματα:

- Διορθώσεις για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων των αισθητήρων – θέσης δορυφόρου.
- Διορθώσεις για την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων της ατμόσφαιρας (ατμοσφαιρικές διορθώσεις).
- Τοπογραφικές διορθώσεις.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα των ραδιομετρικών διορθώσεων απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 5.19 Απλοποιημένο διάγραμμα ραδιομετρικών- ατμοσφαιρικών διορθώσεων.

Στη συνέχεια θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση των βημάτων που απαιτούνται για την ραδιομετρική - ατμοσφαιρική διόρθωση.

5.2.1 Διορθώσεις σφαλμάτων αισθητήρων – Θέσης Δορυφόρου

Δυο βασικές κατηγορίες έχουν αναπτυχθεί για τη διόρθωση των σφαλμάτων που παρουσιάζονται λόγω της δυσλειτουργίας των αισθητήρων:

- Απόλυτη Βαθμονόμηση
- Σχετική Διόρθωση

5.2.1.1 Απόλυτη Βαθμονόμηση

Η έννοια της βαθμονόμησης εκφράζει τη διαδικασία του ποσοτικού προσδιορισμού της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που καταγράφεται από τους αισθητήρες. Ουσιαστικά πρόκειται για την αντίστροφη διαδικασία μετατροπής των ψηφιακών τιμών των δορυφορικών εικόνων σε απόλυτες τιμές ακτινοβολίας. Η απόλυτη βαθμονόμηση μπορεί να γίνει σε 2 βήματα:

- Μετατροπή σε “at-sensor” ακτινοβολία (spectral radiance)

- Μετατροπή σε εξω-ατμοσφαιρική ανάκλαση (Top of Atmosphere –TOA- reflectance)

A) Μετατροπή σε “at-sensor” ακτινοβολία

Αναφέρεται στην συνολική ακτινοβολία που καταγράφεται από τους ανιχνευτές των δορυφορικών συστημάτων. Αποτελεί βασικό βήμα στη μετατροπή των δορυφορικών δεδομένων που ανήκουν σε διάφορους αισθητήρες και δέκτες, σε κοινή ραδιομετρική κλίμακα σύγκρισης. Η απόλυτη βαθμονόμηση προσδιορίζει την αντιστοιχία που υπάρχει μεταξύ των ελάχιστων και μέγιστων ψηφιακών τιμών σε κάθε εικόνα με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η σχέση που μετατρέπει τις βαθμονομημένες ψηφιακές τιμές (Q_{cal}) των pixels της εικόνας σε τιμές ακτινοβολίας (L_λ) είναι γραμμική και δίνεται από τον τύπο (Chander *et al.* 2009):

$$L_\lambda = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_\lambda \quad (5.2)$$

ή από τη σχέση (που είναι ταυτόσημη με την προηγούμενη):

$$L_\lambda = G_{rescale} \times Q_{cal} + B_{rescale} \quad (5.3)$$

Όπου:

$$G_{rescale} = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) \quad (5.4)$$

$$B_{rescale} = LMIN_\lambda - \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{calmin}) \quad (5.5)$$

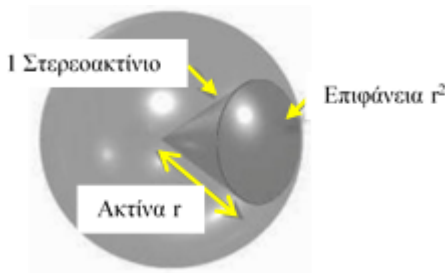
Όπου:

- L_λ : Η ακτινοβολία που καταγράφεται σε κάθε φασματικό κανάλι του δορυφόρου [και μετρείται σε μονάδες $W/(m^2 sr \mu m)$].
- Q_{cal} : Η κανονικοποιημένη ψηφιακή τιμή του pixel.
- Q_{calmin} : Η ελάχιστη κανονικοποιημένη ψηφιακή τιμή του pixel που αντιστοιχεί στην ακτινοβολία $LMIN_\lambda$.
- Q_{calmax} : Η μέγιστη κανονικοποιημένη ψηφιακή τιμή του pixel που αντιστοιχεί στην ακτινοβολία $LMAX_\lambda$.
- $LMIN_\lambda$: Η ελάχιστη φασματική ακτινοβολία που φτάνει στον αισθητήρα και αντιστοιχεί στην τιμή Q_{calmin} [και μετρείται σε μονάδες $W/(m^2 sr \mu m)$].
- $LMAX_\lambda$: Η μέγιστη φασματική ακτινοβολία που φτάνει στον αισθητήρα και αντιστοιχεί στην τιμή Q_{calmax} [και μετρείται σε μονάδες $W/(m^2 sr \mu m)$].
- $G_{rescale}$: Συντελεστής ενίσχυσης (gain) για κάθε φασματικό κανάλι [(και μετρείται σε μονάδες $W/(m^2 sr \mu m)/\text{ψηφιακή τιμή}$].
- $B_{rescale}$: Συντελεστής μετατόπισης (offset) για κάθε φασματικό κανάλι [και μετρείται σε μονάδες $W/(m^2 sr \mu m)$].

Οι τιμές των συντελεστών gain και offset δίνονται από τον κατασκευαστή του δέκτη καταγραφής των δεδομένων.

Στους επίγειους σταθμούς επεξεργασίας τα αρχικά δορυφορικά δεδομένα (raw data) αποτελούνται από ψηφιακές τιμές ή τιμές φωτεινότητας (Q). Οι τιμές αυτές μετατρέπονται σε απόλυτες τιμές ακτινοβολίας και στη συνέχεια σε (για τον Landsat TM) κανονικοποιημένες 8-bit ψηφιακές τιμές (Q_{cal}). Τα δεδομένα αυτά διατίθενται στην αγορά.

Η μονάδα μέτρησης της ακτινοβολίας είναι το $W/m^2 sr$. Αναφέρεται ως η ακτινοβολία σε watt ανά τετραγωνικό μέτρο και στερεο-ακτίνιο (steradian–sr). Όπου στερεοακτίνιο είναι η στερεά γωνία (αδιάστατο μέγεθος) που σχηματίζεται σε σφαίρα με κορυφή το κέντρο της και μήκος την ακτίνα της (radius - r). Η επιφάνεια του στερεο-ακτινίου είναι ίση με r^2 .



Εικόνα 5.20 Παρουσίαση του στερεο-ακτινίου στη σφαίρα

Στην περίπτωση υπολογισμού της ακτινοβολίας σε δεδομένα του Landsat TM (εύρος ακεραίων τιμών 0-255, 8 bits) η σχέση μετατροπής είναι:

$LMAX_\lambda$: Η ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε τιμή 255 (Q_{calmax})

$LMIN_\lambda$: Η ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε τιμή 0 (Q_{calmin})

$$L_\lambda = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{255} \right) (Q_{cal}) + LMIN_\lambda \quad (5.6)$$

Οι αρχικές ψηφιακές τιμές των δορυφορικών εικόνων ονομάζονται “at satellite” δεδομένα. Μετά την μετατροπή σε τιμές ακτινοβολίας τα δεδομένα περιέχουν την ‘φασματική ακτινοβολία του αισθητήρα’ (“at sensor spectral radiance”).

B) Μετατροπή σε εξωατμοσφαιρική (TOA) ανάκλαση

Σε αρκετές περιπτώσεις η σύγκριση εικόνων της ίδιας περιοχής, αλλά από διαφορετικούς αισθητήρες και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές απαιτεί την μετατροπή των εικόνων από τιμές ακτινοβολίας σε τιμές ανάκλασης εκτός της ατμόσφαιρας (TOA Reflection). Τρία είναι τα πλεονεκτήματα από αυτή την μετατροπή:

- Διορθώνονται οι μεταβολές που προκύπτουν εξαιτίας των διαφορετικών θέσεων του συστήματος: Δορυφόρος – Ήλιος κατά τις ημερομηνίες λήψης.
- Διορθώνονται οι μεταβολές που προκύπτουν εξαιτίας διαφορών στα φασματικά κανάλια.
- Διορθώνονται οι διακυμάνσεις στην απόσταση Γη – Ήλιος εξαιτίας των διαφορετικών ημερομηνιών λήψης.

Η επίδραση των παραπάνω μεταβολών στις δορυφορικές εικόνες εξαρτάται από την περιοχή και την εποχή λήψης. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι αρκετά σημαντικές. Η εξίσωση για τον υπολογισμό σε TOA ανάκλαση είναι (Chander *et al.* 2003):

$$\rho_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * \cos\theta_s} \quad (5.7)$$

Όπου,

ρ_λ : Η ανάκλαση εκτός της ατμόσφαιρας (TOA)

(Αδιάστατο μέγεθος)

L_λ : Η ακτινοβολία στο φασματικό κανάλι λ

($W/m^2 sr \mu m$)

d : Η απόσταση Γης – Ήλιου, σε αστρονομικές μονάδες

$ESUN_{\lambda}$: Η μέση εξω-ατμοσφαιρική ηλιακή ακτινοβολία στο φασματικό κανάλι λ ($W/m^2 \mu m$)

θ_s : Η γωνία του ηλίου σε σχέση με το ζενίθ (σε μοίρες)

Οι παράμετροι d & $ESUN$ μπορούν να βρεθούν από τη βιβλιογραφία. Επιπλέον το συνημίτονο της γωνίας θ_s (γωνία μεταξύ της ακτινοβολίας του ήλιου και της κατακορύφου στο σημείο προσπτώσής της) ισούται με το ημίτονο της γωνίας του ύψους του ηλίου με το οριζόντιο επίπεδο πρόσπτωσης. Για παράδειγμα, το ύψος του ηλίου για τον δορυφόρο Landsat δίδεται στα μετα-δεδομένα που συνοδεύουν τις εικόνες.

Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι η μετατροπή σε τιμές ανάκλασης στις δορυφορικές εικόνες θεωρείται εξω-ατμοσφαιρική διόρθωση και δεν απαλείφει τα σφάλματα των ατμοσφαιρικών επιδράσεων όπως η απορρόφηση και η σκέδαση.

5.2.1.2 Σχετική Ραδιομετρική Διόρθωση

Σε ορισμένες περιπτώσεις, αν και έχει πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση των αισθητήρων (απόλυτη βαθμονόμηση) οι δορυφορικές εικόνες εμφανίζουν ανωμαλίες εξαιτίας δυσλειτουργίας των ανιχνευτών. Όπως για παράδειγμα στις πρώτες γενιές Landsat που εμφανίζονται στις εικόνες τους σφάλματα στις γραμμές σάρωσης.

Δύο είναι οι μέθοδοι σχετικής ραδιομετρικής διόρθωσης των αισθητήρων (Μερτίκας 1999):

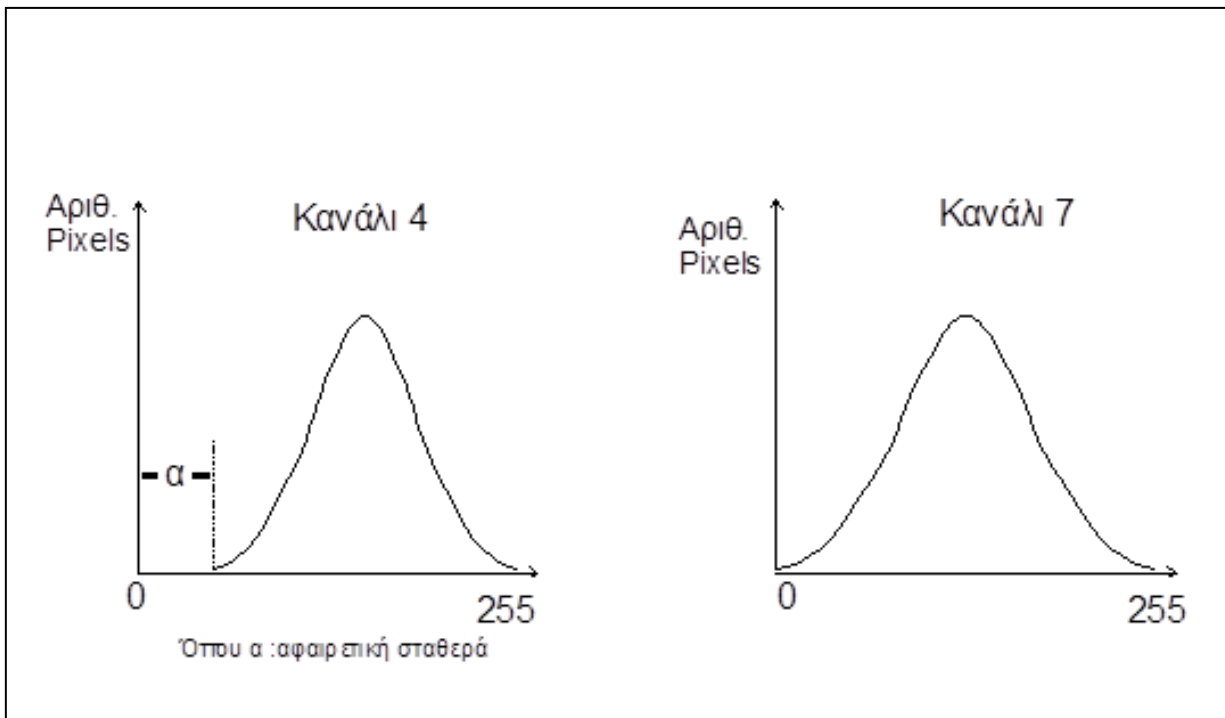
Η γραμμική μέθοδος με βάση τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση. Οι αισθητήρες θα πρέπει να παράγουν εικόνες, στην ίδιο φασματικό κανάλι, όπου οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών των pixels να είναι παρόμοιες. Εάν υπάρχουν διαφορές τότε θα πρέπει να διορθωθούν. Αυτό γίνεται θεωρώντας μια εικόνα ως εικόνα βάσης και διορθώνοντας ως προς αυτή τις μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των υπόλοιπων εικόνων.

Ένα ανάλογο παράδειγμα αποτελούν οι εικόνες του MSS του Landsat. Πιο συγκεκριμένα το κανάλι 4 υφίσταται μεγάλη επιρροή από την ατμοσφαιρική διάχυση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ενώ το κανάλι 7 σχεδόν καθόλου. Γενικά, το κοντράστ της εικόνας είναι χαμηλό από τη διάχυση που προκαλεί θόλωμα (ομίχλη) στην εικόνα. Για το λόγο αυτό, υπολογίζεται ένας διορθωτικός συντελεστής για τα διάφορα κανάλια του MSS.

Μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να εξαλειφθεί το θόλωμα (προς το φωτεινότερο) βασίζεται στη γραμμική (ή άλλη) παλινδρόμηση που εφαρμόζεται μεταξύ των ραδιομετρικών τιμών των καναλιών 4 και 7. Εάν δεν υπάρχει θόλωμα στην εικόνα του καναλιού 4 λόγω ατμοσφαιρικής διάχυσης, η ευθεία της γραμμικής παλινδρόμησης θα περνάει από την αρχή των αξόνων (ουσιαστικά οι ραδιομετρικές τιμές στα αντίστοιχα pixels των δύο καναλιών θα είναι πολλαπλάσια η μία της άλλης).

Εάν όμως υπάρχει διάχυση, στο κανάλι 4 αυξάνει η φωτεινότητα των αντικειμένων και συνεπώς η ραδιομετρία τους. Άρα και η γραμμή παλινδρόμησης θα τέμνει τον άξονα εκείνο που εκφράζει το κανάλι 4. Η σχετικά απλή διόρθωση του φαινομένου αυτού συνίσταται στην αφαίρεση του σταθερού όρου (που εκφράζει το που τέμνει η γραμμή παλινδρόμησης τον αντίστοιχο άξονα του καναλιού 4) από όλες τις ραδιομετρικές τιμές του καναλιού 4.

Μια ακόμη τεχνική που εφαρμόζεται για τη διόρθωση του παραπάνω σφάλματος είναι η αφαίρεση της ραδιομετρίας, που προκαλεί μια ελαφρά μετατόπιση του όγκου του ιστογράμματος στο κανάλι 4, εν σχέση με το 7, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σημειώτέο ότι η απόσταση a μειώνεται από το κανάλι 1 προς το 4. Δηλ. στο 1 είναι μεγαλύτερη, στο 2 λίγο μικρότερη κ.ο.κ.



Εικόνα 5.21 Θόρυβος προερχόμενος στο φασματικό κανάλι 4 του δορυφόρου Landsat λόγω διάχυσης της ατμόσφαιρας.

Τέλος μία άλλη μέθοδος είναι η μέθοδος των ιστογραμμάτων. Εικόνες της ίδιας περιοχής αλλά με διαφορετικές ημερομηνίες λήψεις και στο ίδιο φασματικό κανάλι, θα πρέπει να έχουν παρόμοια συνάρτηση κατανομής των τιμών των pixels. Άρα, τα ιστογράμματα κάθε εικόνας θα είναι ίδια. Όμως, σε ορισμένα δορυφορικά συστήματα παρατηρείται δυσλειτουργία των αισθητήρων, όπως στον Landsat MSS όπου υπάρχει απορρύθμιση της έκτης γραμμής. Γραμμικοί μετασχηματισμοί των ιστογραμμάτων πρέπει να προσδιοριστούν ώστε να διορθωθούν οι τιμές των pixels.

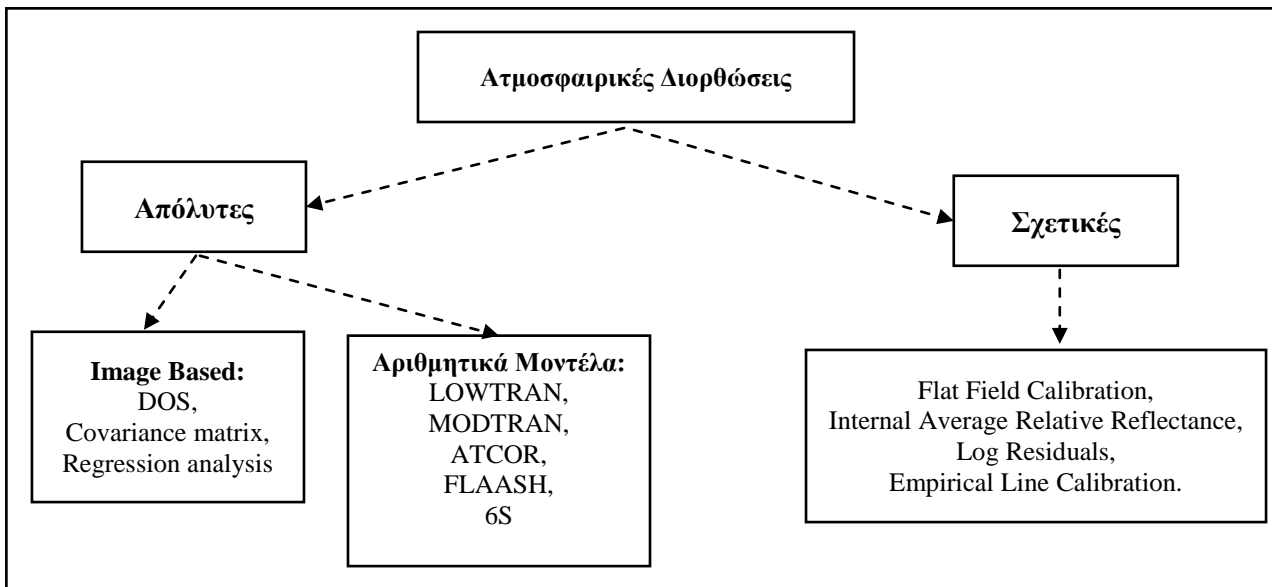
5.2.2 Ατμοσφαιρικές Διορθώσεις

Όπως έχει ήδη αναλυθεί παραπάνω, οι δορυφορικές εικόνες στο ορατό και στο υπέρυθρο μήκος κύματος του ΗΜΦ επηρεάζονται από τα σωματίδια και τα αέρια της ατμόσφαιρας μέσω των διεργασιών της σκέδασης και της απορρόφησης. Ένα καλό μοντέλο διόρθωσης πρέπει να μπορεί να προσομοιάζει τις διεργασίες που υφίσταται η ΗΜΑ στην ατμόσφαιρα και να διορθώνει τις επιπτώσεις στις εικόνες όπως η «θολούρα», η αλλαγή στις ραδιομετρικές τιμές κλπ.

Αρκετές μέθοδοι ατμοσφαιρικών διορθώσεων έχουν αναπτυχθεί και παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Γενικά ταξινομούνται σε 2 κατηγορίες (Lu *et al.* 2002):

- Απόλυτες Ατμοσφαιρικές διορθώσεις.
- Σχετικές Ατμοσφαιρικές διορθώσεις.

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζονται οι κατηγορίες ατμοσφαιρικών διορθώσεων. Ανάλογα με το είδος των εξαγόμενων προϊόντων από τα δορυφορικά δεδομένα και τη διαθεσιμότητα των βοηθητικών στοιχείων χρησιμοποιούνται και οι ανάλογες τεχνικές.



Εικόνα 5.22 Κατηγορίες Ατμοσφαιρικών Διορθώσεων.

5.2.2.1 Απόλυτες Ατμοσφαιρικές Διορθώσεις

Οι διορθώσεις των δορυφορικών εικόνων της συγκεκριμένης κατηγορίας οδηγούν σε τιμές ανάκλασης και θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Βάσει των χαρακτηριστικών και της πολυπλοκότητάς τους υποδιαιρούνται σε 2 υποκατηγορίες:

Α) Μοντέλα βασισμένα στα χαρακτηριστικά της εικόνας (image-based atmospheric corrections)

Η συγκεκριμένη κατηγορία ατμοσφαιρικών διορθώσεων βασίζεται στην εξέταση καλύψεων γης που έχουν γνωστές τιμές ανάκλασης στις πολυφασματικές εικόνες. Οι γνωστές τιμές ανάκλασης των αντικειμένων στην επιφάνεια της γης και η σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες τιμές των pixels των εικόνων μπορεί να συμβάλει στην εκτίμηση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων που υφίστανται. Όμως στην πράξη δεν είναι πάντα εφικτό να υπάρχουν μετρήσεις της ανάκλασης αντικειμένων που εμφανίζονται στις εικόνες. Γι' αυτό έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι όπως το μοντέλο φαινόμενης ανάκλασης (apparent reflectance model) σύμφωνα με το οποίο μετατρέπεται η TOA ανάκλαση (at-satellite reflectance) σε ανάκλαση στην επιφάνεια (surface reflectance). Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν μοντέλα όπως:

- Η Αφαίρεση του Μελανού Σώματος (Dark Object Substraction – DOS)
- Ο Πίνακας συνδιακύμανσης εκτιμώμενων παραμέτρων (covariance matrix)
- Η Παλινδρόμηση (Regression analysis)

Το μοντέλο DOS θα αναλυθεί περαιτέρω εξαιτίας της ευρύτατης εφαρμογής του.

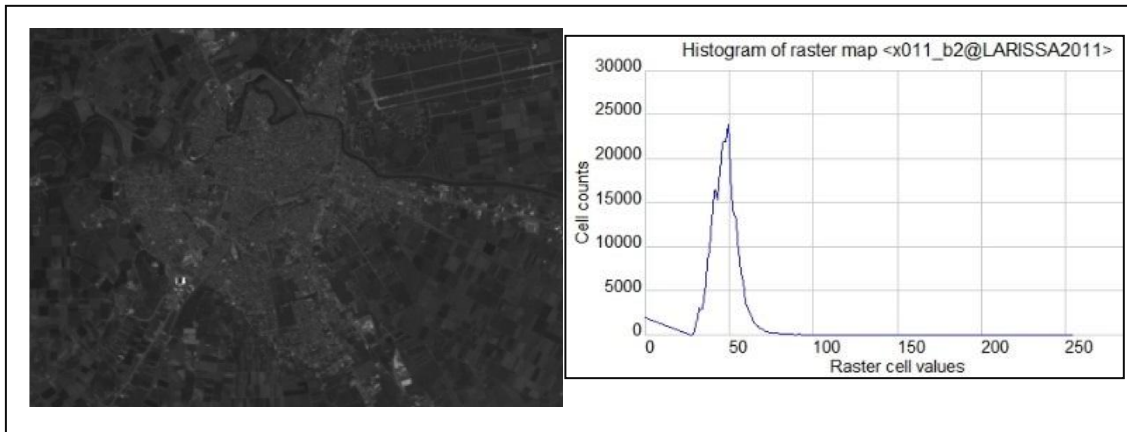
Μοντέλο DOS

Το πιο απλό και ευρέως διαδεδομένο μοντέλο, αυτής της κατηγορίας, ονομάζεται «μέθοδος της αφαίρεσης των σκοτεινών αντικειμένων» (Dark Object Substraction – DOS). Η μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός ότι τα δορυφορικά δεδομένα στο κοντινό υπέρυθρο ($>0.7 \mu\text{m}$) είναι απαλλαγμένα από φαινόμενα ατμοσφαιρικής σκέδασης σε αντίθεση με το ορατό τμήμα του ΗΜΦ (0.4-0.7 μm), όπου κυριαρχεί η σκέδαση Rayleigh. Παράλληλα, θεωρείται, ότι στην εικόνα, υπάρχουν σκοτεινά αντικείμενα (με μηδενική ή ελάχιστη ανάκλαση) ενώ κυριαρχούν ομοιόμορφες ατμοσφαιρικές συνθήκες (Zhang *et al.* 2010). Παράδειγμα σκοτεινών αντικειμένων μπορεί να είναι οι υδάτινες επιφάνειες, οι σκιάσεις από νέφη κ.α. όπου στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος θα πρέπει να έχουν τιμές φωτεινότητας κοντά στο μηδέν.

Οι παραπάνω ιδιότητες χρησιμοποιούνται για τη συνολική διόρθωση των εικόνων. Εξαιτίας των ατμοσφαιρικών επιδράσεων οι τιμές των pixels είναι αρκετά μεγαλύτερες από το μηδέν. Η ανάλυση των ιστογραμμάτων στα διαφορετικά φασματικά κανάλια επιτρέπει τον εντοπισμό, στην αριστερή πλευρά του

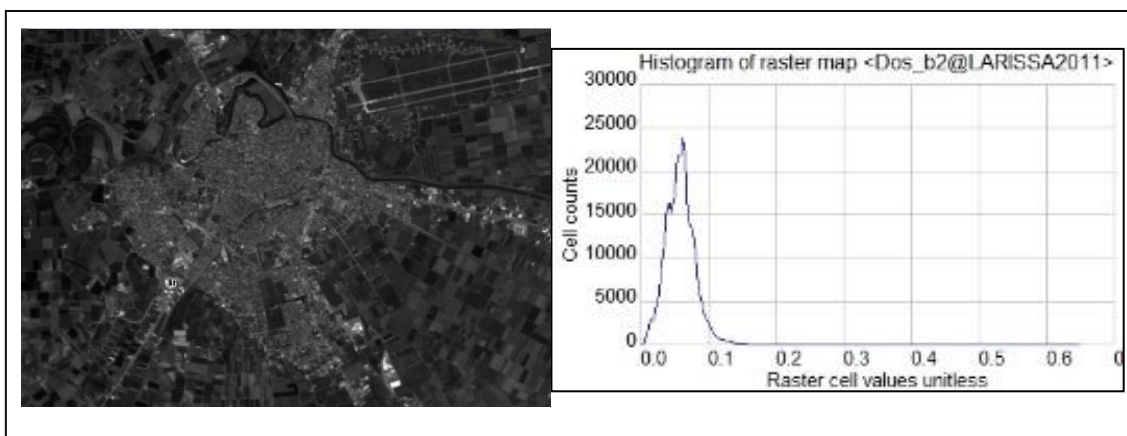
ιστογράμματος, της ποσότητας που οφείλεται στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Κατόπιν γίνεται αφαίρεση αυτής της ποσότητας από κάθε τιμή του pixel στο καθένα φασματικό κανάλι (Campbell 1996).

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται το κανάλι 2 (πράσινο, 0.525-0.605 μm) του Landsat-5 TM καθώς και το ιστόγραμά του. Η θολότητα της εικόνας και η μείωση της αντίθεσής της, οφείλεται στην εκτροπή της ακτινοβολίας προς διάφορες κατευθύνσεις (σκέδαση). Παράλληλα, απεικονίζεται και το ιστόγραμμα του φασματικού καναλιού. Παρατηρείται η μετατόπισή του, προς τα δεξιά, εξαιτίας των ατμοσφαιρικών επιδράσεων.



Εικόνα 5.23 Κανάλι 2 Landsat-5 TM και το ιστόγραμά του.

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται το 2^ο φασματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του μοντέλου DOS. Παρατηρείται η βελτίωση της αντίθεσης (contrast) της εικόνας. Η τιμή κάθε pixel απεικονίζει την τιμή ανάκλασης από την επιφάνεια της γης (εύρος ανάκλασης 0 -1). Το ιστόγραμμα της εικόνας είναι μετατοπισμένο προς τα αριστερά, όπως προέκυψε μετά την αφαίρεση της επιπλέον ποσότητας (ατμοσφαιρικές επιδράσεις) από κάθε τιμή του pixel.



Εικόνα 5.24 Εφαρμογή του μοντέλου DOS στο κανάλι 2. Μετατόπιση του Ιστογράμματος μετά την αφαίρεση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων.

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει πλεονεκτήματα όπως, η απλότητα, η αμεσότητα και η καθολική εφαρμογή σε όλη την εικόνα. Επίσης βασίζεται στις πληροφορίες που υπάρχουν στην ίδια την εικόνα και δεν απαιτούνται επιπλέον δεδομένα πεδίου ή άλλα βοηθητικά δεδομένα. Αντίθετα, βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι μια προσεγγιστική μέθοδος διόρθωσης. Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις μεταβάλουν όχι μόνο τη θέση του ιστογράμματος αλλά και το σχήμα του. Γι' αυτό η καθολική διόρθωση όλων των pixels προσφέρει μια κατ' εκτίμηση διόρθωση από τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Επιπλέον, σε άγρια τοπία ο εντοπισμός σκοτεινών στόχων (υδάτινων επιφανειών, σκιάσεων κ.α.) είναι σπάνιος με συνέπεια η εφαρμογή της μεθόδου να καθίσταται αδύνατη.

B) Αριθμητικά Μοντέλα

Τα αριθμητικά μοντέλα είναι πιο πολύπλοκα αλλά παρέχουν και μεγαλύτερη ακρίβεια στη μετατροπή των ψηφιακών τιμών (ή των τιμών TOA) των εικόνων σε τιμές ανάκλασης στην επιφάνεια της γης. Περιγράφουν με μαθηματικά μοντέλα τη συμπεριφορά της ακτινοβολίας κατά την είσοδό της στην ατμόσφαιρα και την αλληλεπίδρασή της με τα μόρια και τα σωματίδια του αέρα (μετάδοση, σκέδαση, απορρόφηση). Τα αριθμητικά μοντέλα έχουν βασικά πλεονεκτήματα όπως η ακρίβεια και το μεγάλο εύρος εφαρμογής τους. Όμως, έχουν και σημαντικά μειονεκτήματα όπως η ανάγκη για συλλογή λεπτομερών ατμοσφαιρικών πληροφοριών σχετικά με την ατμοσφαιρική υγρασία και τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων του αέρα. Τέτοιου είδους δεδομένα είναι δύσκολο να αποκτηθούν με μεγάλη λεπτομέρεια. Επιπλέον, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες διαφέρουν ανάλογα με το ύψος από την επιφάνεια της γης. Η συλλογή τέτοιων δεδομένων, σε αρκετές περιπτώσεις, είναι αδύνατη με ίσως μοναδική δυνατότητα να μπορούν να υλοποιηθούν μερικές σημειακές μετρήσεις που αφορούν το σύνολο μιας δορυφορικής πολυφασματικής εικόνας (π.χ. Landsat TM). Σ' αυτό το πλαίσιο έχει αναπτυχθεί ένα σύνολο μοντέλων υπό το όνομα «Διόρθωση βάση του μοντέλου διάδοσης της ακτινοβολίας» (Radiative Transfer Model based correction). Τα μοντέλα αυτά υπολογίζουν την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Για την εφαρμογή τους απαιτείται η ύπαρξη πληροφοριών όπως συγκεντρώσεις αερολυμάτων/σωματιδίων καθώς και η ατμοσφαιρική υγρασία. Σε περίπτωση απουσίας τέτοιων πληροφοριών χρησιμοποιούν τυποποιημένα ατμοσφαιρικά προφίλ που καλύπτουν μεγάλο εύρος ατμοσφαιρικών χαρακτηριστικών. Μεταξύ των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων αριθμητικών μοντέλων είναι τα ακόλουθα:

- LOWTRAN (LOW resolution atmospheric TRANsmittance).
- MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmittance).
- ATCOR (Atmospheric and Topographic Correction model).
- FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes).
- 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum).

Το μοντέλο ατμοσφαιρικής διόρθωσης LOWTRAN αναπτύχθηκε από το εργαστήριο γεωφυσικής του στρατού των ΗΠΑ. Το LOWTRAN έχει σχετικά χαμηλή φασματική διακριτική ικανότητα (spectral resolution) 2 cm, ξεκινώντας από 0,2 μm (Van den Bosch *et al.* 1990). Η έκδοση LOWTRAN 7 έχει υποστεί πολλές βελτιώσεις στην ανάπτυξη αλγόριθμων υπολογισμού της σκέδασης στο ορατό και υπέρυθρο τμήμα του ΗΜΦ καθώς και των επιπτώσεων από τα νέφη και τα ατμοσφαιρικά αερολύματα.

Το μοντέλο MODTRAN περιλαμβάνει τις λειτουργίες του LOWTRAN 7 αλλά χρησιμοποιεί μεγαλύτερης ακρίβειας φασματική διακριτική ικανότητα (0,2 cm). Το μοντέλο MODTRAN υπολογίζει τη σκέδαση (Rayleigh - Mie), την απορρόφηση και την εκπομπή μέσα από την περιγραφή συγκεκριμένων ατμοσφαιρικών χαρακτηριστικών όπως: την πυκνότητα υδρατμών, το όζον καθώς άλλα αερολύματα (CO₂, O₂, N₂O, CO, CH₄, NO, SO₂, NO₂, NH₃, HNO₃). Τα μοντέλα ATCOR και FLAASH ενσωματώνουν τις νέες λειτουργίες του μοντέλου MODTRAN-4. Περιλαμβάνουν ατμοσφαιρικές διορθώσεις των pixels εξαιτίας της σκέδασης της HMA από τα γειτονικά pixels (adjacency effect). Επίσης χρησιμοποιούν εξελιγμένους αλγόριθμους για την διαχείριση δύσκολων ατμοσφαιρικών συνθηκών όπως για παράδειγμα την ύπαρξη νεφοκάλυψης (Kawishwar 2007).

Το μοντέλο 6S είναι ένας εξελιγμένος αλγόριθμος μετάδοσης της ακτινοβολίας και περιγράφει τη μετάδοση και τις αλληλεπιδράσεις της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στο σύστημα ατμόσφαιρα – επιφάνεια της γης, για μεγάλη ποικιλία, ατμοσφαιρικών, φασματικών και γεωμετρικών συνθηκών. Το 6S αναπτύχθηκε από τους Vermote κ.α. το 1997 και αποτέλεσε εξέλιξη προηγούμενων εκδόσεων. Δεδομένης της ακτινοβολίας που καταγράφεται σε ένα pixel και τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα, ο αλγόριθμος 6S προσομοιώνει τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας στην HMA (Vermote *et al.* 1997) εξαιτίας:

- της σκέδασης από τα μόρια και τα αερολύματα και
 - της απορρόφησης από : H₂O, CO₂, O₂, O₃, CH₄, N₂O and CO,
- σε ένα εύρος μεταξύ 0,25 και 4,0 μm με φασματική διακριτική ικανότητα 2,5 nm.

Επιπλέον στο 6S μοντέλο λαμβάνονται υπόψη το ύψος του στόχου καθώς και η επιφάνεια της γης ως παράγοντες μη ισότροπης ανάκλασης της ΗΜΑ (non-lambertian surface). Ιδιαίτερα σε περιοχές με απότομες κλίσεις παρουσιάζουν έντονο το φαινόμενο της ανισότροπης συμπεριφοράς της ανάκλασης. Αυτή η συμπεριφορά της ανάκλασης περιγράφεται από τη συνάρτηση κατανομής της ανάκλασης BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) (Vermote *et al.* 2006). Η συνάρτηση BRDF περιγράφει το κλάσμα της ακτινοβολίας που έρχεται από μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και αντανακλάται σε κάποια άλλη κατεύθυνση. Σ' αυτό το πλαίσιο οι επιδράσεις του τοπογραφικού ανάγλυφου, όπως για παράδειγμα οι σκιάσεις, επηρεάζουν τις τιμές ανάκλασης των εικόνων και πρέπει να απαλειφθούν. Η ύπαρξη του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής μελέτης, είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της ανακλαστικότητας του εδάφους σε σχέση με το ανάγλυφο και τη θέση του ηλίου (ύψος και αζιμούθιο).

Γενικά οι παράμετροι που απαιτούνται στο συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνουν:

- Τη γεωμετρία της ορατότητας και της φωτεινότητας: Το ύψος και το αζιμούθιο του Ήλιου.
- Το τυπικό προφίλ της ατμόσφαιρας. Περιέχει το υψομετρικό προφίλ της ατμοσφαιρικής πίεσης, της θερμοκρασίας, καθώς και τη συγκέντρωση των υδρατμών και του όζοντος. Ανάλογα με την περιοχή και την εποχή λήψης υπάρχουν πρότυπα ατμοσφαιρικά προφίλ που μπορούν να επιλεγούν όπως το προφίλ : (α) του μέσου γεωγραφικού πλάτους, (β) της ατμόσφαιρας καλοκαίρι – χειμώνα, (γ) της τροπικής ατμόσφαιρας κ.α..
- Τον τύπο των αερολυμάτων και τη συγκέντρωση. Ανάλογα με την κάλυψη γης στην περιοχή μελέτης έχουν δημιουργηθεί διαφορετικά προφίλ αερολυμάτων όπως: (α) Αγροτικό: λαμβάνει υπόψη τη σκόνη και οργανικά σωματίδια, (β) Αστικό: λαμβάνει υπόψη τα σωματίδια άνθρακα, (γ) Θαλάσσιο: λαμβάνει υπόψη τα σωματίδια θαλασσινού αλατιού, (γ) Έρημος: λαμβάνει υπόψη τα σωματίδια σκόνης μεγάλου μεγέθους.
- Τον τύπο του καναλιού και του αισθητήρα (π.χ. Landsat-5 TM).
- Την ορατότητα στο έδαφος για την εκτίμηση του οπτικού βάθους σε μήκος κύματος 0,555 μm.
- Το Ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

Όλα τα παραπάνω αριθμητικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες συμπεριλαμβανόμενων και εποχιακών και γεωγραφικών μεταβολών παρέχοντας πραγματικές τιμές ανάκλασης της γήινης επιφάνειας, σε διαφορετικά μήκη κύματος.

Στην εικόνα που ακολουθεί αποτυπώνεται το κανάλι 1 του Landsat-5 TM. Η θολότητα της εικόνας οφείλεται στη σκέδαση (Rayleigh) της ακτινοβολίας στο μπλε τμήμα του ΗΜΦ. Το γεγονός αυτό μειώνει την αντίθεση της εικόνας (contrast) άρα και τον εντοπισμό-διάκριση των αντικειμένων στην επιφάνεια της γης.



Εικόνα 5.25 Κανάλι 1 Landsat-5 TM.

Στην επόμενη εικόνα εφαρμόστηκε το μοντέλο 6S για την ατμοσφαιρική διόρθωση του καναλιού 1 του Landsat-5 TM της προηγούμενης εικόνας. Η εικόνα αποτυπώνει την πόλη της Λάρισας και τμήμα του θεσσαλικού κάμπου με ημερομηνία λήψης 19/6/2011. Στην παραμετροποίηση του μοντέλου επιλέχθηκαν στοιχεία όπου προσομοιάζουν αρκετά τις ατμοσφαιρικές συνθήκες της περιοχής. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το ατμοσφαιρικό μοντέλο «μέσου γεωγραφικού πλάτους καλοκαίρι» και ως τύπος αερολυμάτων «αγροτικό». Παρατηρείται ότι μετά την απαλοιφή των ατμοσφαιρικών επιδράσεων η βελτίωση της αντίθεσης της εικόνας είναι αισθητή.



Εικόνα 5.26 Κανάλι 1 Landsat-5 TM, μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση.

5.2.2.2 Σχετικές Ατμοσφαιρικές διορθώσεις

Συχνά οι πληροφορίες που απαιτούνται για τις απόλυτες ατμοσφαιρικές διορθώσεις των δορυφορικών δεδομένων, δεν είναι διαθέσιμες (ατμοσφαιρικές συνθήκες, ημερομηνία λήψης εικόνας, φασματικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα). Έτσι, χρησιμοποιούνται οι σχετικές ατμοσφαιρικές διορθώσεις. Στη συγκεκριμένη κατηγορία διορθώσεων μια συγκεκριμένη εικόνα θεωρείται ως εικόνα αναφοράς και όλες οι άλλες εικόνες διορθώνονται ως προς αυτή. Δηλαδή, ο βασικός σκοπός της μεθόδου αυτής είναι οι εικόνες που καταγράφηκαν σε διαφορετικές ημερομηνίες και από διαφορετικούς αισθητήρες να κανονικοποιηθούν έτσι ώστε οι τελικές διορθωμένες εικόνες να προσομοιάζουν με τον δέκτη τις ατμοσφαιρικές και τοπογραφικές συνθήκες της εικόνας αναφοράς. Οι σχετικές ατμοσφαιρικές επιδράσεις δεν παράγουν τιμές ανάκλασης της επιφάνειας του εδάφους εκτός και εάν η εικόνα αναφοράς έχει ήδη τιμές ανάκλασης.

Σ' αυτή την κατηγορία των ατμοσφαιρικών διορθώσεων ανήκουν οι μέθοδοι: (α) Βαθμονόμηση Επιπέδου Πεδίου (Flat Field Calibration), (β) Εσωτερική, Μέση Σχετική Ανακλαστικότητα (Internal Average Relative Reflectance), (γ) Λογαριθμικά Κατάλοιπα (Log Residuals), (δ) Εμπειρική Γραμμική Βαθμονόμηση (Empirical Line Calibration). Οι παραπάνω τεχνικές χρησιμοποιούν στατιστικές πληροφορίες των φασματικών καναλιών όπως π.χ. τη μέση τιμή καθώς και τα μέγιστα και ελάχιστα.

Οι σχετικές μέθοδοι ατμοσφαιρικής διόρθωσης είναι υπολογιστικά ταχύτερες μέθοδοι, αλλά δεν περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας. Στη διεθνή βιβλιογραφία αυτές οι τεχνικές θεωρούνται περισσότερο ως εργαλεία βαθμονόμησης παρά μοντέλα ατμοσφαιρικής διόρθωσης.

5.2.3 Τοπογραφικές Διορθώσεις

Η τοπογραφική διόρθωση ή τοπογραφική κανονικοποίηση αναφέρεται στην διόρθωση της έντασης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας εξαιτίας του ανάγλυφου του εδάφους. Το πιο εμφανές αποτέλεσμα στις εικόνες, εξαιτίας της έντονης τοπογραφίας, είναι η ύπαρξη σκιάσεων. Εάν και οι σκιάσεις σε αρκετές περιπτώσεις συμβάλουν στην κατανόηση της μορφολογίας της περιοχής μελέτης (υψομετρική πληροφορία, υδροκρίτες κ.α.) γενικά, το έντονο ανάγλυφο προκαλεί μεγάλες διαφορές στην φασματική απόκριση

παρόμοιων καλύψεων γης. Σε περιοχές που έχουν ίδια κάλυψη, οι σκιασμένες εκτάσεις θα δίνουν μικρότερη ανάκλαση σε σχέση με τις εκτάσεις που είναι εκτεθειμένες περισσότερο στο ηλιακό φως. Για τις ταξινομήσεις καλύψεων γης η τοπογραφική διόρθωση, των εικόνων, αποτελεί βασικό προκαταρκτικό βήμα ιδιαίτερα σε εδάφη με έντονο ανάγλυφο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Ελληνική επικράτεια.

Αρκετές μέθοδοι τοπογραφικών διορθώσεων έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία οι οποίες, γενικά, ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες.

- Αυτές που βασίζονται στο πηλίκιο των φασματικών καναλιών (band ratios).
- Το μοντέλο φωτεινότητας που βασίζεται στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM).

Πηλίκιο φασματικών Καναλιών

Είναι η πιο απλή μέθοδος και δεν απαιτεί επιπλέον βοηθητικά δεδομένα για την τοπογραφική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων. Θεωρείται ότι η ανάκλαση αυξάνεται ή ελαττώνεται αναλογικά στα δύο κανάλια με συνέπεια ο λόγος τους να μειώνει τις τοπογραφικές επιδράσεις. Αυτό δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις ιδιαίτερα όταν υπάρχει διάχυση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επίσης, οι λόγοι καναλιών δημιουργούν απώλεια της φασματικής διακριτικής ικανότητας, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα όταν στη συνέχεια ακολουθεί ταξινόμηση των εικόνων.

Μοντέλο φωτεινότητας

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην μοντελοποίηση των συνθηκών φωτεινότητας της γήινης επιφάνειας και για την εφαρμογή της απαιτείται η ύπαρξη ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM). Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με το έδαφος με την κάθετο στην επιφάνεια. Για τον υπολογισμό της ανακλώμενης ακτινοβολίας που καταγράφεται από τον αισθητήρα απαιτούνται (Μηλιαρέσης 2003):

- Η θέση του ήλιου (ύψος, αζιμούθιο) σε σχέση με την επιφάνεια (κλίση, προσανατολισμό) πρόσπτωσης της ακτινοβολίας.
- Η θέση της επιφάνειας πρόσπτωσης (κλίση, προσανατολισμός) και οι ιδιότητες ανάκλασής της ώστε να υπολογιστεί η ανακλώμενη ακτινοβολία.

Αφού υπολογιστεί η γωνία πρόσπτωσης (φ) μεταξύ του διανύσματος του ήλιου και της καθέτου στην επιφάνεια, στην συνέχεια υπολογίζεται η καταγραμμένη ακτινοβολία στο δορυφόρο (ρ) για κάθε pixel. Αυτό γίνεται με δύο μεθόδους:

1. Η πρώτη μέθοδος θεωρεί ότι η επιφάνεια του εδάφους ακολουθεί ισότροπη διάχυση (Lambert επιφάνεια) της ΗΜΑ. Δηλαδή υπό οποιαδήποτε γωνία παρατήρησης η επιφάνεια είναι το ίδιο φωτεινή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η πλέον γνωστή σχέση είναι η μέθοδος του συνημίτονου (Riaño *et al.* 2003):

$$\rho = P * \left(\frac{\text{συν}\theta_Z}{\text{συν}\varphi} \right) \quad (5.8)$$

Όπου

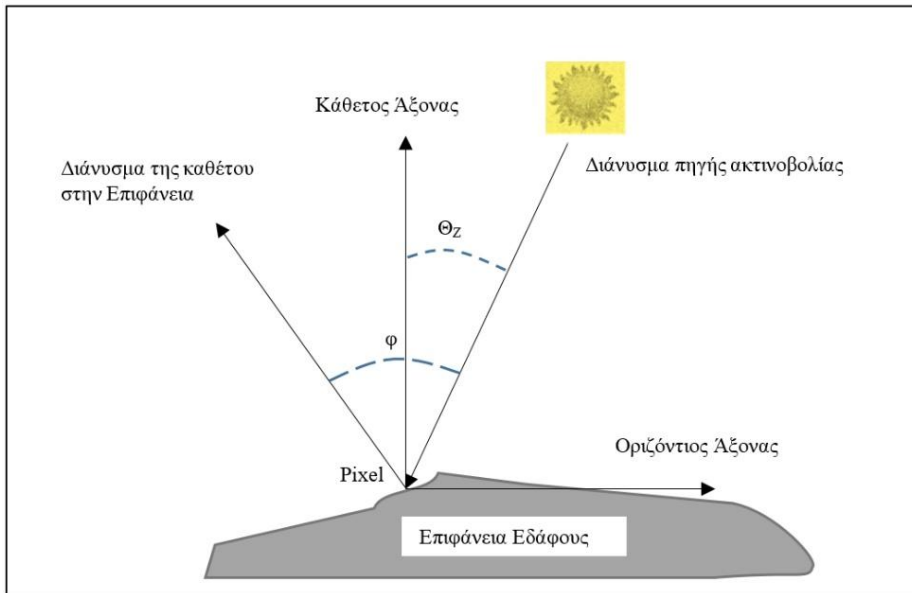
ρ : Η ανάκλαση σε επίπεδη επιφάνεια

P : Η ανάκλαση στην επικλινή επιφάνεια

θ_Z : Η γωνία του Ηλίου (από το ζενίθ)

$\text{συν}\varphi$: Το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ του διανύσματος του ήλιου και της καθέτου της επιφάνειας.

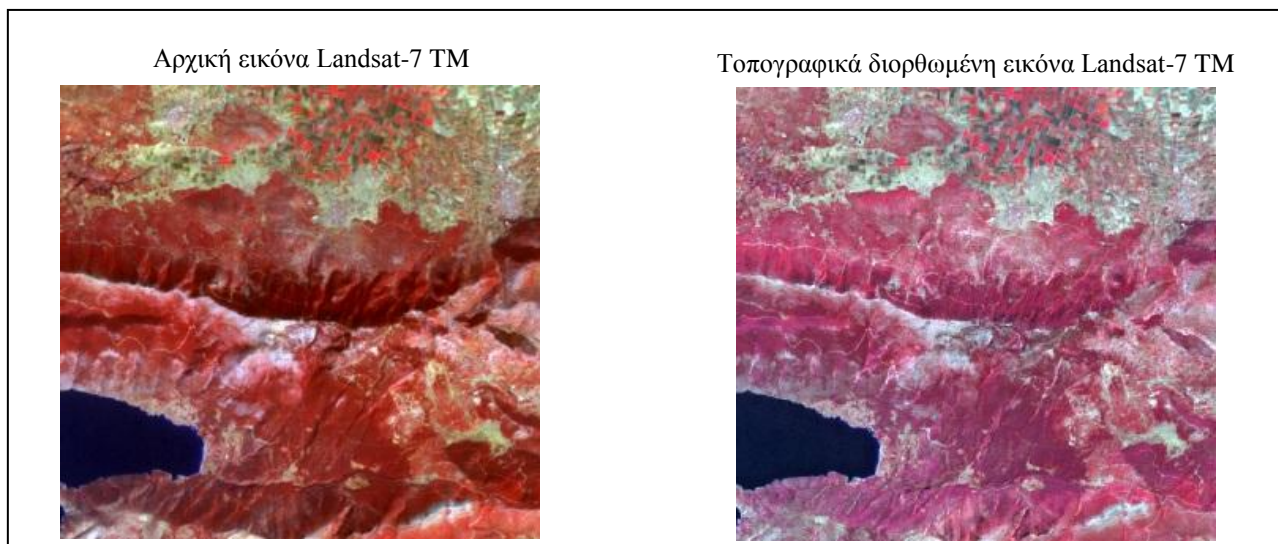
Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται η επίδραση του ανάγλυφου στην φωτεινότητα και στις ραδιομετρικές τιμές των δορυφορικών δεδομένων. Παρουσιάζεται η γωνία πρόσπτωσης (φ) του συστήματος Ήλιου – και της καθέτου στην γήινη επιφάνεια καθώς και η γωνία του Ηλίου (θ_Z).



Εικόνα 5.27 Τοπογραφικές επιδράσεις στην φωτεινότητα των pixels

2. Η δεύτερη μέθοδος προϋποθέτει ότι οι επιφάνειες με έντονο ανάγλυφο δεν παρουσιάζουν ισότροπη ανάκλαση. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα το φαινόμενο αυτό περιγράφεται από την συνάρτηση κατανομής της ανάκλασης BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function). Ο προσδιορισμός της BRDF είναι αρκετά πολύπλοκος και περιγράφει τη συμπεριφορά της ανάκλασης αναφορικά με τις πιθανές γωνίες των διανυσμάτων πρόσπτωσης – ανάκλασης. Αρκετά μοντέλα έχουν εισάγει τη συνάρτηση BRDF στην απαλοιφή των τοπογραφικών επιδράσεων. Ιδιαίτερα στις Ελληνικές συνθήκες θεωρείται αναγκαία η τοπογραφική διόρθωση πριν από την εφαρμογή πολυφασματικών ταξινομήσεων.

Στην εικόνα που ακολουθεί, δορυφορική εικόνα Landsat-7 TM με ημερομηνία 4/10/2003, αποτυπώνει τμήμα της Αττικής (αριστερά). Στην εικόνα απεικονίζεται το όρος Κιθαιρώνας που βρίσκεται στα όρια των νομών Αττικής και Βοιωτίας. Το όρος Κιθαιρώνας διασχίζει την εικόνα από τα δυτικά προς τα ανατολικά και περιέχει κορυφές που φτάνουν μέχρι και τα 1400 μέτρα ύψος. Το έντονο ανάγλυφο δημιούργησε την ανάγκη τοπογραφικής διόρθωσης της φωτεινότητας των pixels (εικόνα δεξιά), με τη βοήθεια ψηφιακού μοντέλου εδάφους ίδιας χωρικής διακριτικής ικανότητας (30X30 μ. διαστάσεις pixel).



Εικόνα 5.28 Τοπογραφική διόρθωση εικόνας Landsat-7 TM σε περιοχή με έντονες κλίσεις.

Σε κάθε περίπτωση οι ραδιομετρικές διορθώσεις αποτελούν πολύπλοκη διαδικασία. Εξαιτίας των αλλαγών που προκαλούν στις τιμές φωτεινότητας των pixels (ραδιομετρικές τιμές) θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με σύνεση και μόνο μετά από επαρκή αιτιολόγηση.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο κεφάλαιο δεν είχε ως στόχο την αναλυτική παρουσίαση όλων περιπτώσεων των ραδιομετρικών διορθώσεων αλλά μια γενική επισκόπηση των βασικών μεθοδολογιών, τεχνικών και μεθόδων που εφαρμόζονται ευρέως για την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Ελληνόγλωσση

Μερτίκας, Π.Σ., 1999. *Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας*. Αθήνα: ΙΟΝ.

Μηλιαρέσης, Χ.Γ., 2003. *Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση*. Αθήνα: ΙΟΝ.

Ξενόγλωσση

Campbell, B.J., 1996. *Introduction to Remote Sensing*. London: Taylor & Francis.

Chander, G., Markham, B.L. and Helder, D.L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113, 893-903.

Chander, G. and Markham B.L., 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, Issue 11, pt. 2, p. 2674-2677.

Cracknell, A.P. and Hayes, L.W.B. 1993. *Introduction to Remote Sensing*. Taylor & Francis.

Jensen, J.R., 1996. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall.

Kawishwar, 2007. *Atmospheric Correction Models for Retrievals of Calibrated Spectral Profiles from Hyperion EO-1 Data*. Thesis submitted to the International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, NETHERLANDS.

- Lu D., Mausel, P., Brondizio, E., Moran, E., 2002. Assessment of Atmospheric Correction Methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (13).
- Paolini, Grings, F., Sobrino, A.J., Muñoz, J.C.J., Karszenbaum, H., 2006. Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies. *International Journal of Remote Sensing*, 27, (4) 6850-704.
- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J. and Aguado, I., 2003. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types. *Geoscience and Remote Sensing. IEEE Transactions on*, 41, (5), 1056-1061.
- Richards, A.J., 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis-An Introduction*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Showengerdt, A.R., 1983, *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*, Academic Press.
- Vermote, E. Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M., and Morcrette, J.J., 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). 6S User Guide Version 2.
- Vermote, E. Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M., Morcrette, J.J. and Kotchenova, S.Y, 2006. Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum-Vector (6SV). 6S User Guide Version 3.
- Van den Bosch, J.M., Alley, R.E, 1990. Application Of Lowtran 7 As An Atmospheric Correction To Airborne Visible/infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '90. 'Remote Sensing Science for the Nineties'*, 10th Annual International.
- Zhang, Z., He G. and Wang X., 2010. A practical DOS model-based atmospheric correction algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 31, (11) 2837-2852.

Κεφάλαιο 6 Ιστογράμματα δορυφορικών εικόνων

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης

Σύνοψη

Μία γενική επισκόπηση με εστίαση στη χρήση των ιστογραμμάτων στην Τηλεπισκόπηση και περιγραφές ειδικών εικόνων με τα χαρακτηριστικά ιστογράμμάτα τους πλαισιώνουν την αρχή του κεφαλαίου αυτού. Οι διάφορων τύπων τανυσμοί ιστογράμματος όπως ο γραμμικός, ο τμηματικά γραμμικός και ο λογαριθμικός και εκθετικός τανυσμός δείχνουν την οπτική ενίσχυση της ψηφιακής φασματικής εικόνας στη συνέχεια. Τέλος η μεθοδολογία της εξισορρόπησης ιστογράμματος εκτίθεται αναλυτικά και πλαισιώνεται με αριθμητικό παράδειγμα 4-bit εικόνας και το κεφάλαιο κλείνει ο τεμαχισμός των ιστογραμμάτων σε ομάδες συχνότητων που συχνά δείχνουν και ξεχωριστές καλύψεις γης στην εικόνα.

6.1 Γενικά

Το ιστόγραμμα είναι ένα στατιστικό διάγραμμα που αναφέρεται στην ποσοτική κατανομή των τιμών μιας τυχαίας μεταβλητής. Έχει τον οριζόντιο άξονά του βαθμονομημένο με όλες τις τιμές που παίρνει μια τυχαία μεταβλητή και τον κάθετο άξονα με τον αριθμό εμφάνισης κάθε τιμής, δηλ. τον κάθετο άξονα να είναι βαθμονομημένος με τις συχνότητες εμφάνισης όλων των τιμών της τυχαίας μεταβλητής. Έτσι το συνολικό άθροισμα όλων των τιμών που θα πάρει η τυχαία μεταβλητή δηλαδή το άθροισμα όλων των συχνότητων δίνει και τον συνολικό αριθμό των μετρήσεων ή ατόμων που μελετάμε. Στην Τηλεπισκόπηση και στην δημιουργία ιστογραμμάτων φασματικών καναλιών και όχι μόνο, η τυχαία μεταβλητή είναι η μεταβλητή που παίρνει ραδιομετρικές τιμές και ο κάθετος άξονας του ιστογράμματος περιλαμβάνει της συχνότητες εμφάνισης (τον αριθμό των pixels) κάθε ραδιομετρικής τιμής. Με αυτόν τον τρόπο το συνολικό άθροισμα των συχνότητων όλων των ραδιομετρικών τιμών που εμφανίζονται στην εικόνα (οι οποίες ραδιομετρικές τιμές δεν θα είναι αναγκαστικά 256, γιατί κάθε φασματικό κανάλι δεν περιέχει απαραίτητα και τις 256 τιμές στο εύρος του) είναι ίσο με τον συνολικό αριθμό των pixels που έχει η εικόνα.

Το ιστόγραμμα οποιασδήποτε ψηφιακής εικόνας δεν έχει χωρική υπόσταση. Κάθε pixel της εικόνας που έχει τοποθετηθεί στην αντίστοιχη με την ραδιομετρική του τιμή, ράβδο του ιστογράμματος, δεν έχει πλέον χωρικές συντεταγμένες. Το ιστόγραμμα περιέχει μόνον τον αριθμό των pixels της εικόνας που αντιστοιχεί σε κάθε ραδιομετρική τιμή αλλά όχι τις συντεταγμένες της θέσης τους μέσα στην εικόνα.

Η ποσοτική κατανομή του συνολικού πλήθους των ραδιομετρικών τιμών που υπάρχουν στο φασματικό κανάλι που μελετάται έχει άμεση σχέση με την φασματική απόκριση των καλύψεων γης. Έτσι καλύψεις που δίνουν μικρές ραδιομετρικές τιμές καταλαμβάνουν τις (αριστερά) μικρότερες τιμές στον οριζόντιο άξονα των ραδιομετρικών τιμών του ιστογράμματος. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα ίσως είναι

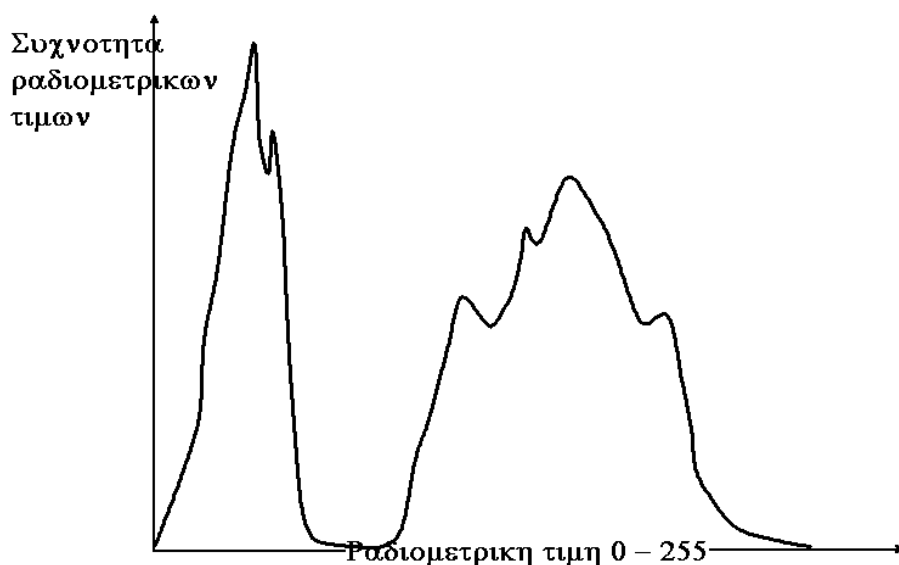
η θάλασσα και γενικότερα το υδάτινο στοιχείο σε φασματικά κανάλια της εγγύς και μέσης υπέρυθρης περιοχής του Η/Μ φάσματος: στον δορυφόρο Landsat π.χ. από το 4ο φασματικό κανάλι (εγγύς υπέρυθρο) και τα πιο αριστερά από αυτό η θάλασσα απομονώνεται στο δεξιό τμήμα του ιστογράμματος.

Για το λόγο αυτό ενώ σε κάθε ψηφιακή εικόνα αντιστοιχεί ακριβώς μόνον ένα ιστογράμμα (η πιθανότητα παραπάνω από μια εικόνες να έχουν το ίδιο ιστογράμμα είναι σχεδόν μηδέν – πρέπει να έχουν τον ίδιο ακριβώς αριθμό pixels σε κάθε ραδιομετρική τιμή τους και επιπλέον να έχουν και το ίδιο εύρος ραδιομετρικών τιμών), ενώ σε κάθε ιστογράμμα μπορεί να αντιστοιχεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός ψηφιακών εικόνων που έχουν τον ίδιο συνολικό αριθμό pixels.

Σχετικά με την έκταση που εκφράζει κάθε συχνότητα του ιστογράμματος, όσο πιο ψηλά βρίσκονται και όσο πιο πολλές συχνότητες τόσο θα αντιπροσωπεύουν μεγαλύτερη έκταση στην εικόνα (μεγαλύτερο αριθμό pixels).

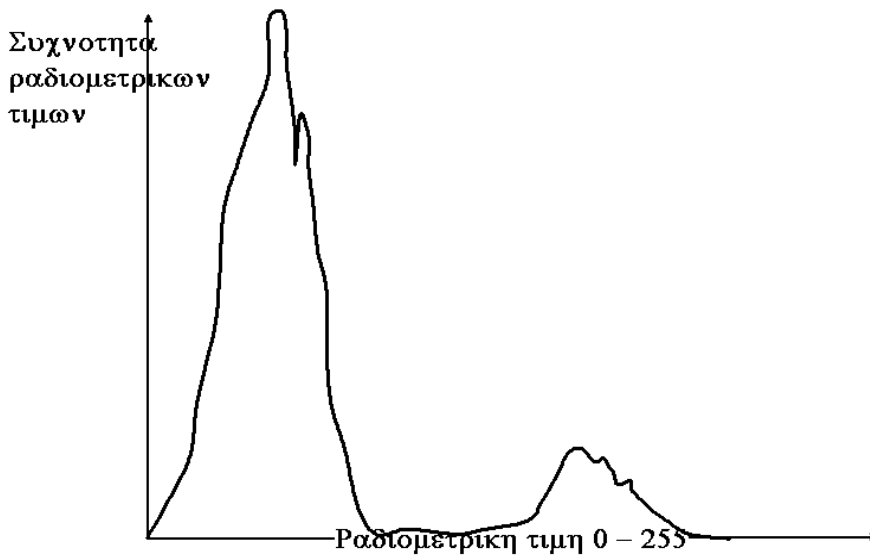
6.2 Παραδείγματα σχέσης ιστογράμματος εικόνας

Τα συγκεκριμένα παραδείγματα που ακολουθούν δείχνουν τις σχετικές θέσεις -σε ποσοτική πάντα (και όχι χωρική) κλίμακα- διαφόρων καλύψεων γης.



Σχήμα 6.1 Φασματικό κανάλι με θάλασσα.

Εδώ πρόκειται για το ιστογράμμα εικόνας (φασματικού καναλιού κυρίως στο εγγύς και μέσο υπέρυθρο όπου το νερό-θάλασσα έχει σαφώς χαμηλότερες τιμές από τις υπόλοιπες καλύψεις) της οποίας ένα μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας καλύπτεται από θάλασσα. Ο όγκος προς τα δεξιά (στις ψηλότερες ραδιομετρικές τιμές του ιστογράμματος) περιέχει διάφορες καλύψεις γης (βλάστηση, καλλιέργειες, πολεοδομικό κ.ά.).



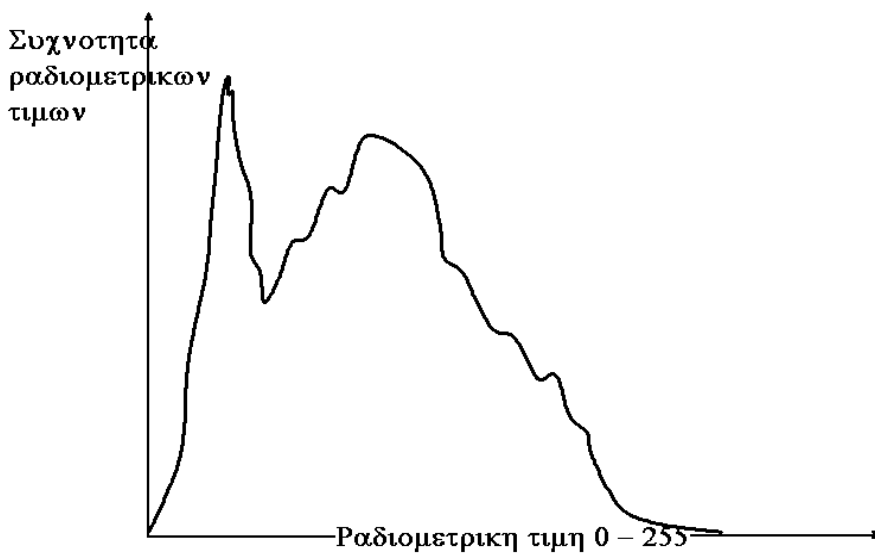
Σχήμα 6.2 Νησί σε μικρή έκταση σχετικά με την θάλασσα.

Στο σχήμα 6.2 και λόγω του ύψους και του όγκου των συχνοτήτων των χαμηλών ραδιομετρικών τιμών (π.χ. από 0 έως 27) η θάλασσα στην αντίστοιχη εικόνα είναι εκτατικά πολύ μεγαλύτερη από την χερσαία γη (νησί).



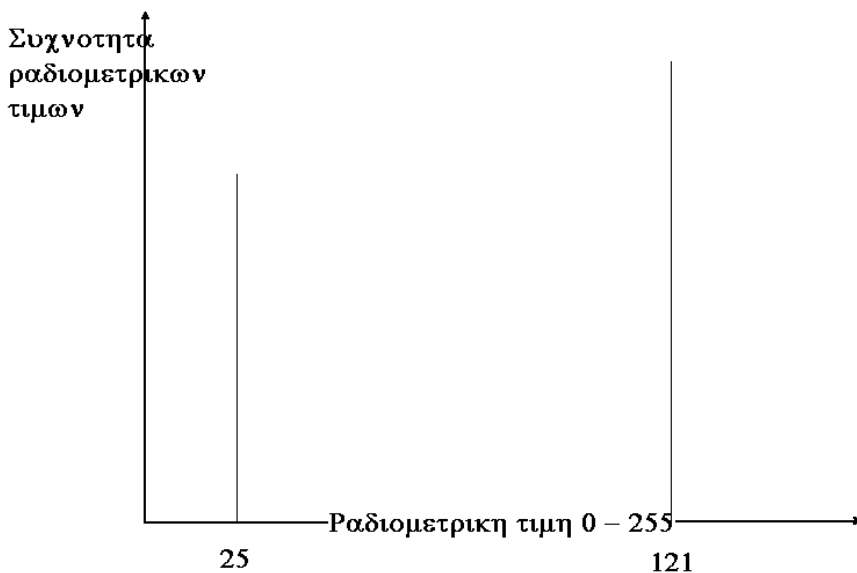
Σχήμα 6.3 Μικρή έκταση του υδάτινου στοιχείου στην εικόνα.

Στο παραπάνω σχήμα το υδάτινο στοιχείο (π.χ. λίμνη) καταλαμβάνει μικρή έκταση (λίγα pixels) στο σύνολο της εικόνας.



Σχήμα 6.4 Σύγκριση των ραδιομετρικών τιμών θάλασσας – βλάστησης.

Στο ορατό φάσμα και ιδιαίτερα στο μήκος κύματος του μπλε οι ραδιομετρικές τιμές των pixels της θάλασσας επηρεάζονται από ατμοσφαιρικούς παράγοντες και εμφανίζουν σχετικά υψηλές τιμές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να συγχέονται με κάποιες σχετικά χαμηλές ραδιομετρικές τιμές των pixels της βλάστησης.



Σχήμα 6.5 Ιστογράμμο εικόνας με μόνον δύο χρωματικούς τόνους.

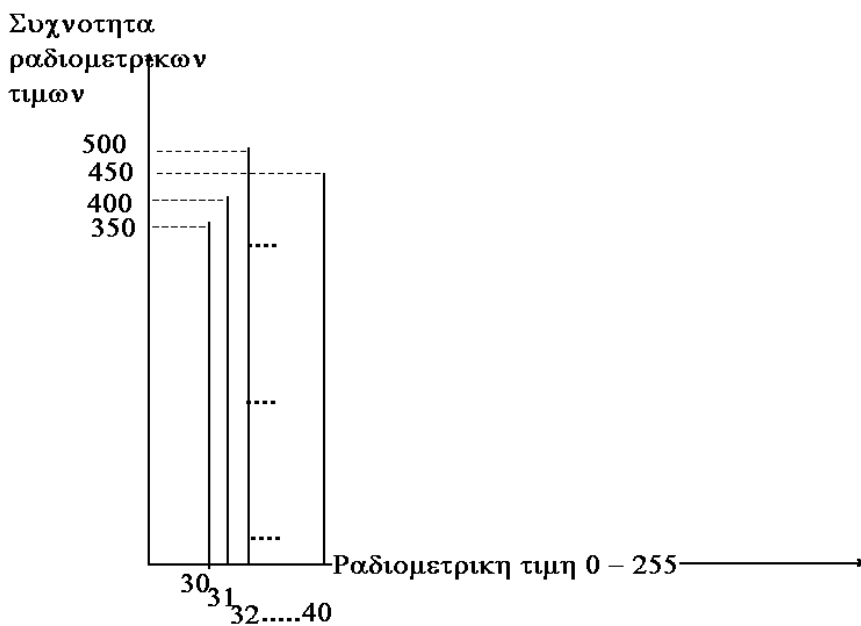
Στην εικόνα αυτή όλα τα pixels της έχουν δύο μόνον ραδιομετρικές τιμές 25 και 121.

6.3 Γραμμικός τανυσμός (διάταση- έκταση – εφελκυσμός) ιστογράμματος (Linear stretching)

Ας υποθέσουμε ότι μία εικόνα έχει ραδιομετρικές τιμές μόνον από το 30 έως το 40. Τότε και αν αναλογιστούμε ότι οι ψηφιακές εικόνες έχουν τόσο μεγαλύτερη αντίθεση (κοντράστ) όσο πιο εκτεταμένο εύρος τιμών έχουν, η προηγούμενη εικόνα έχει χαμηλή χρωματική δυναμική ή αλλιώς χαμηλή αντίθεση (κοντράστ). Η τεχνική που ακολουθείται για να αποκτήσει η εικόνα μεγαλύτερη οπτική αντίθεση χωρίς όμως να αλλάξει ο αριθμός των pixels που αντιστοιχεί σε μια τιμή λέγεται γραμμικός τανυσμός της εικόνας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή οι ραδιομετρικές τιμές που έχει η εικόνα «απλώνονται» σε όλο το εύρος των ραδιομετρικών τιμών που θα μπορούσε να πάρει, δηλ. από ένα εύρος 11 τιμών σε ένα άλλο 256 τιμών. Οι καινούργιες τιμές βρίσκονται εάν διαιρέσουμε το 255 με το πραγματικό εύρος των τιμών - 1. Έτσι π.χ. το ιστόγραμμα του σχήματος 6.6 μετασχηματίζεται στο εκτεταμένο ιστόγραμμα του σχήματος 6.7 βάσει του τύπου που υπολογίζει της νέες ραδιομετρικές τιμές βάσει των παλιών με γραμμικό τρόπο :

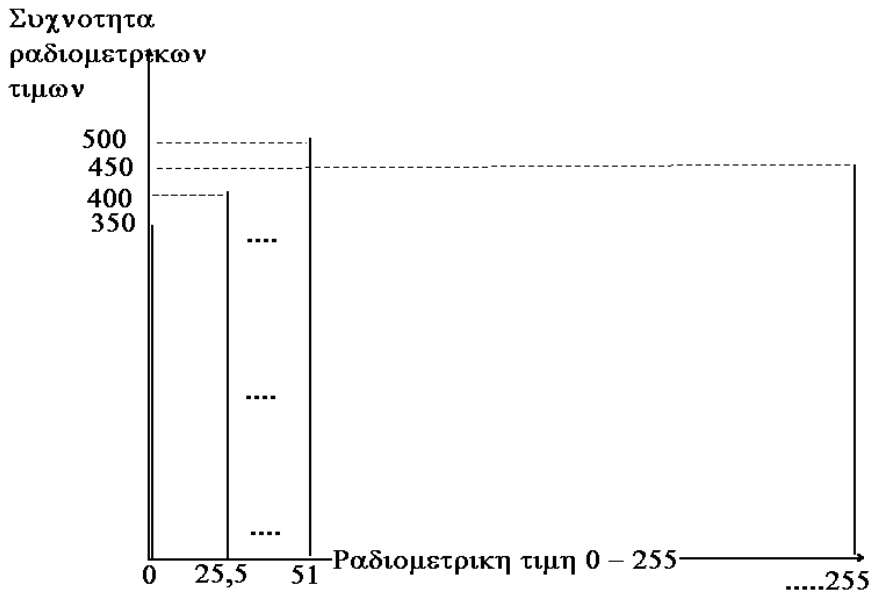
$$K.P.T. = [(T.P.T - E.P.T) / (M.P.T.-E.P.T.) * 255, \text{ όπου}$$

- K.P.T.: η καινούργια ραδιομετρική τιμή
- T.P.T.: η τρέχουσα ραδιομετρική τιμή
- E.P.T.: η ελάχιστη ραδιομετρική τιμή
- M.P.T.: η μέγιστη ραδιομετρική τιμή



Σχήμα 6.6 Αρχικό ιστόγραμμα φασματικού καναλιού με χαμηλή οπτική αντίθεση.

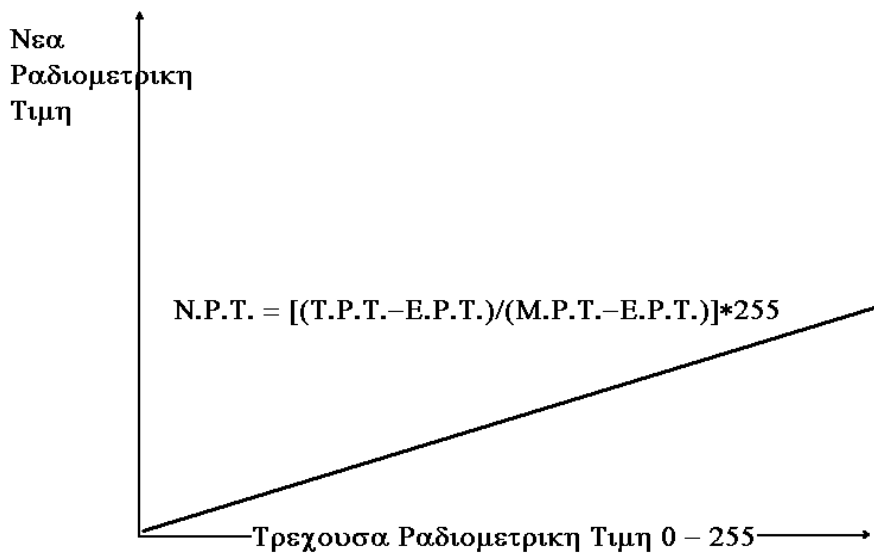
Και μετά την εφαρμογή του τύπου η συχνότητα 350 που βρίσκεται στη τιμή 30 πηγαίνει στην ραδιομετρική τιμή 0, η συχνότητα 400 στην 25,5 (=26) και η τελευταία συχνότητα 450 που αντιστοιχούσε στην ραδιομετρική τιμή 40 μεταφέρεται τελευταία στην ραδιομετρική τιμή 255.



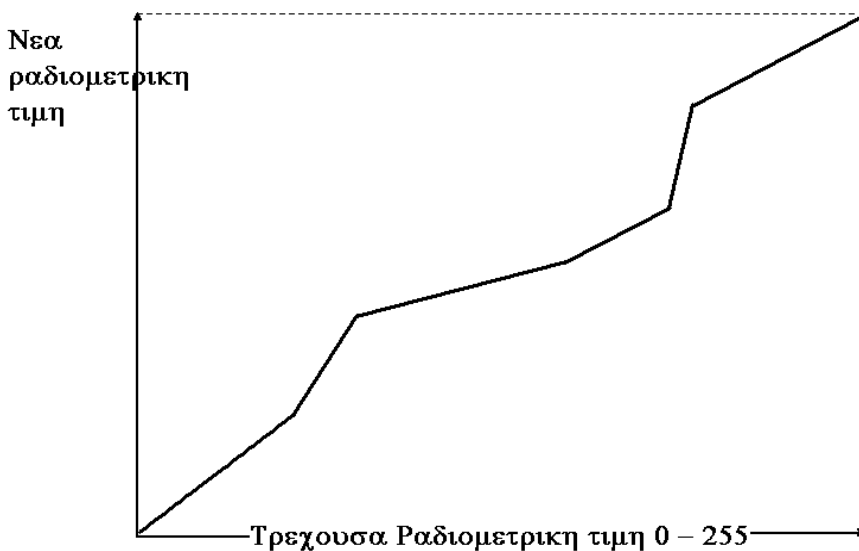
Σχήμα 6.7 Μετασχηματισμένο ιστόγραμμα φασματικού καναλιού με υψηλή οπτική αντίθεση.

6.3.1 Τμηματικά γραμμικός τανυσμός

Μια παραλλαγή του γραμμικού τανυσμού ο οποίος τοποθετεί τις καινούργιες ραδιομετρικές τιμές που έχουν οι συχνότητες του αρχικού ιστογράμματος με γραμμική αντιστοιχία σύμφωνα με το σχήμα 6.8.



Σχήμα 6.8 Γραμμική αντιστοιχία των ραδιομετρικών τιμών αρχικού και μετασχηματισμένου ιστογράμματος. E.P.T.: Ελάχιστη Ραδιομετρική Τιμή και M.P.T.: Μέγιστη Ραδιομετρική Τιμή.

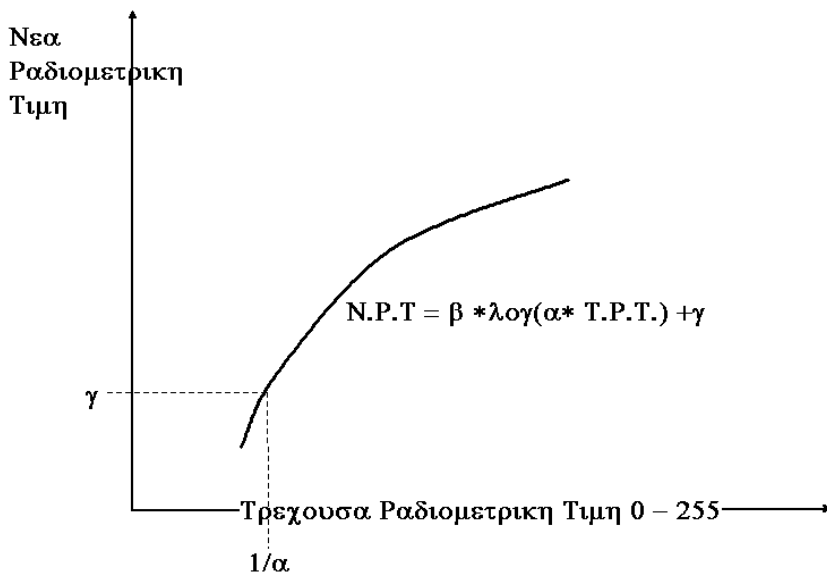


Σχήμα 6.9 Τμηματικά γραμμική αντιστοιχία των ραδιομετρικών τιμών αρχικού και μετασχηματισμένου ιστογράμματος.

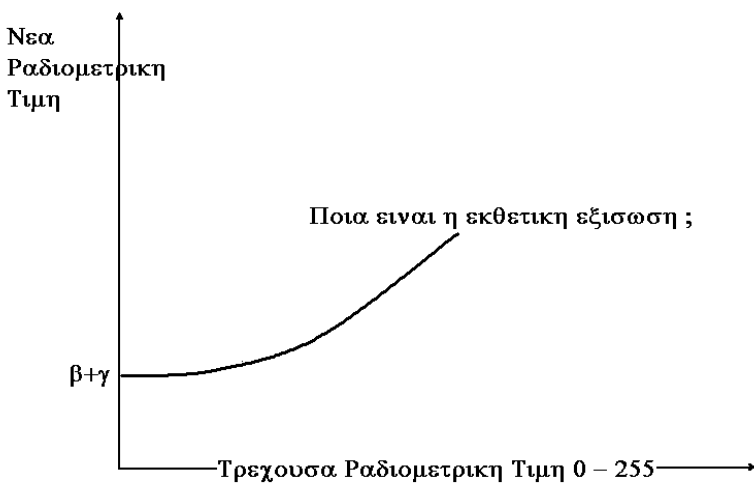
Είναι και κατά την κρίση του χρήστη, η γραμμική συνάρτηση αντιστοιχίας να «σπάει» σε διαφορετικά γραμμικά τμήματα αντιστοιχίας των παλιών με τις νέες ραδιομετρικές τιμές σύμφωνα με το σχήμα 6.9. Η τμηματικά αυτή γραμμική συνάρτηση αντιστοιχίας των αρχικών και των τελικών ραδιομετρικών τιμών του μετασχηματισμένου ιστογράμματος παρέχει την δυνατότητα στον μελετητή να «ανοίξει» περισσότερο (τα ευθύγραμμα τμήματα μεγάλης κλίσης) μερικά τμήματα του ιστογράμματος (που χρειάζονται μεγαλύτερη ενίσχυση) και να αφήσει περίπου το αρχικό κοντράστ σε άλλα (ευθύγραμμα τμήματα περίπου στην κλίση 45°) που δεν έχουν σημασία στον μετασχηματισμό, όπως συμβαίνει αρκετές φορές με την θάλασσα.

6.3.2 Λογαριθμικός και Εκθετικός τανυσμός

Παραλλαγές του γραμμικού τανυσμού αποτελούν ο λογαριθμικός και ο εκθετικός τανυσμός του ιστογράμματος. Στις περιπτώσεις αυτές η συνάρτηση απεικόνισης (αντιστοιχίας) είναι είτε λογαριθμική (δεκαδικού ή νεπέριου λογάριθμου) είτε εκθετική όπως φαίνεται στα σχήματα 6.10 και 6.11. Οι δύο αυτοί τανυσμοί χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της χρωματικής αντίθεσης των τμημάτων των εικόνων με χαμηλές και υψηλές ραδιομετρικές τιμές δηλαδή για τις πολύ σκοτεινές και πολύ φωτεινές περιοχές αντίστοιχα.



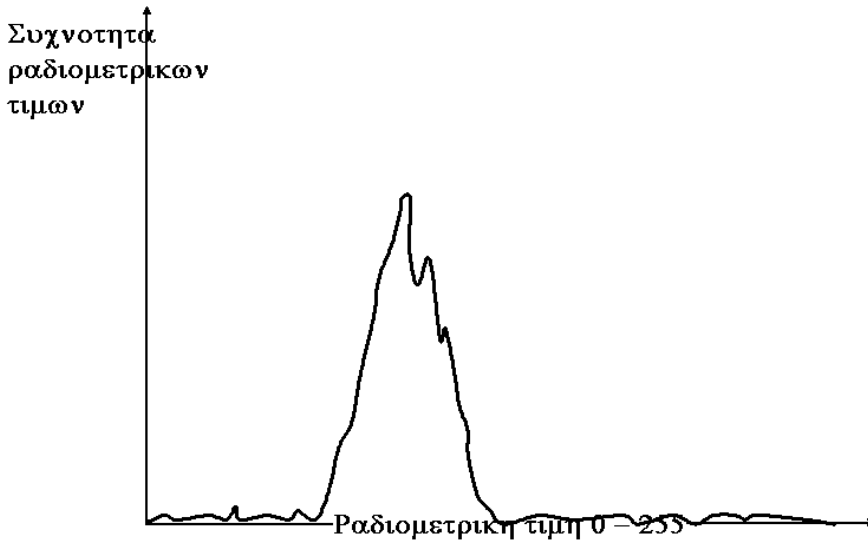
Σχήμα 6.10 Συνάρτηση απεικόνισης Λογαριθμικού τανυσμού ιστογράμματος.



Σχήμα 6.11 Συνάρτηση απεικόνισης Εκθετικού τανυσμού ιστογράμματος.

6.3.3 Με σημεία κορεσμού

Τα όρια των ραδιομετρικών τιμών (άρα και το εύρος των τιμών του ιστογράμματος) της ψηφιακής εικόνας (ψηφιακού καναλιού) που περιγράφηκαν στην παράγραφο 6.3 είναι αρκετά σπάνιο να είναι τόσο περιορισμένα. Στην πραγματικότητα είναι περίπου έτσι, μόνο που η έκταση των ραδιομετρικών τιμών του ιστογράμματος είναι πολύ μεγαλύτερη, ώστε συχνά να καταλαμβάνουν σχεδόν όλο το δυνατό εύρος τιμών (256 τιμές για 8-bit εικόνες). Η ουσιαστική όμως διαφορά με την παράγραφο είναι ότι εκτός του διαστήματος π.χ. 50 έως 60 που υπάρχει η μεγάλη πληθώρα των ραδιομετρικών τιμών, όλες οι υπόλοιπες εμφανίζονται στην εικόνα με πολύ μικρές έως και αμελητέες συχνότητες, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12 Ιστόγραμμα εικόνας με ελάχιστα pixels δεξιά και αριστερά του κύριου όγκου των συχνοτήτων.

Τα σημεία αυτά με χαμηλότερες (αριστερά του κυρίως όγκου των συχνοτήτων) και με υψηλότερες ραδιομετρικές τιμές (δεξιά του κυρίως όγκου των συχνοτήτων), ονομάζονται σημεία κορεσμού (saturation points).

Η διόρθωση της χρωματικής αντίθεσης της παραπάνω εικόνας βασίζεται στην παραδοχή ότι ένα σχετικά μικρό στατιστικά ποσοστό των pixels της εικόνας (δεξιά και αριστερά του κυρίως όγκου) μπορεί να συγχωνευθεί με κάποιες άλλες τιμές χωρίς να αλλάξει ουσιαστικά η μορφή της εικόνας. Έτσι όλες οι μικρές συχνότητες των χαμηλότερων ραδιομετρικών τιμών (από αριστερά) συγχωνεύονται στην μικρότερη συχνότητα του κυρίως όγκου. Αυτό βασίζεται στην λογική ότι αφού αυτά τα pixels έχουν χαμηλότερες ραδιομετρικές τιμές από την χαμηλότερη του κυρίως όγκου του ιστογράμματος, η οποία μετά τον τανυσμό του ιστογράμματος λογικά θα πάρει την τιμή 0 (μηδέν) θα πάρουν και αυτά την ίδια τιμή 0 (άρα την χαμηλότερη ραδιομετρική τιμή). Ακριβώς το ίδιο συμβαίνει και με όλα τα pixels που βρίσκονται από την δεξιά πλευρά του κυρίως όγκου του ιστογράμματος που θα συγχωνευθούν με την υψηλότερη ραδιομετρική τιμή μετά τον τανυσμό δηλ. την τιμή 255. Το μεγαλύτερο συνήθως ποσοστό επί του συνολικού αριθμού των pixels της εικόνας συνήθως είναι 5%. Ωστόσο για συγκεκριμένους λόγους οπτικοποίησης της εικόνας όπως μείωση των επιπέδων χρωματικής διαβάθμισης ή συγχωνεύσεις κάποιων επιπέδων χρωματικού τόνου η τεχνική αυτή μπορεί να φθάσει σε μεγαλύτερα ποσοστά συγχώνευσης ραδιομετρικών τιμών (άρα να περιλαμβάνει και συχνότητες που αντιστοιχούν σε ραδιομετρικές τιμές από τον κυρίως όγκο του ιστογράμματος). Όμως τα μεγαλύτερα ποσοστά συγχώνευσης αλλοιώνουν ή εξαλείφουν οπτικές πληροφορίες που χαρακτηρίζουν την εικόνα.

6.4 Εξισορρόπηση - ισοστάθμιση ιστογράμματος (Histogram equalization)

Η γραμμική ενίσχυση του ιστογράμματος πολλές φορές δεν ενισχύει οπτικά τις διάφορες κλάσεις ραδιομετρικών τιμών με ισοδύναμο τρόπο, γεγονός το οποίο θα ενίσχυε σημαντικά την οπτική αντίθεση της εικόνας και μάλιστα με ένα σχετικά ισοσταθμισμένο τρόπο στο σύνολο των ραδιομετρικών τιμών της εικόνας.

Η εξισορρόπηση ή ισοστάθμιση ιστογράμματος μετασχηματίζει το ιστόγραμμα μιας ψηφιακής εικόνας σε ένα ιστόγραμμα (περίπου) ομοιόμορφης κατανομής μέσω ενός γραμμικού μετασχηματισμού της αθροιστικής του κατανομής.

Εάν PT_i είναι η τρέχουσα ραδιομετρική τιμή με συχνότητα $f(PT_i) = n_i$ στο ιστόγραμμα της εικόνας διαστάσεων $k \times l$, και m διαφορετικών ραδιομετρικών τιμών,

και $F(PT_i) = \sum_{\min_i}^i [f(PT_i)] = \sum_{\min_i}^i [n_i]$ οι τιμές της αθροιστικής κατανομής συχνοτήτων, τότε η συνάρτηση μετασχηματισμού της θα είναι:

$$Y = [(m - 1) / (k \times l)] F(PT_i) = [(m - 1) / (k \times l)] \sum_{\min_i}^i [f(PT_i)]$$

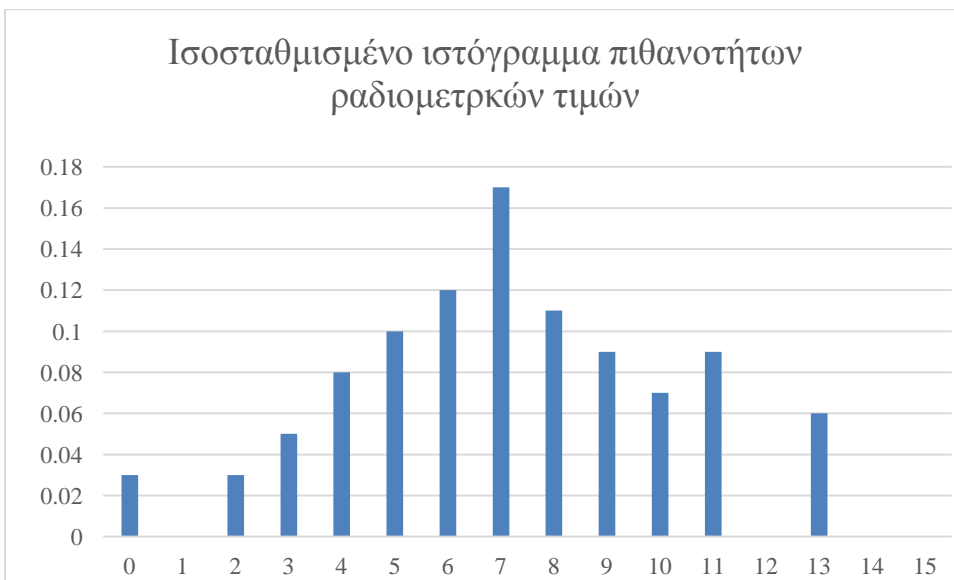
Το παρακάτω αριθμητικό παράδειγμα δείχνει την εφαρμογή της ισοστάθμισης του ιστογράμματος μιας μικρής ψηφιακής εικόνας 4-bit δηλαδή με ακέραιες τιμές από 0 έως 15 και διαστάσεων 10 x 10 δηλαδή 100 pixels.

Ραδιομετρικές τιμές P_{Ti}	Συχνότητες $f(P_{Ti}) = n_i$	Αθροιστικές συχνότητες	Πιθανότητες $f(P_{Ti})/\Sigma n_i$	[Πιθανότητες x (n-1)]	Αθροιστική κατανομή Σ [πιθανότητες x (n-1)]	Προσεγγιστική ραδιομετρική τιμή της προηγούμενης στήλης	Συχνότητες 2ης στήλης. Όταν ≥ 2 συνεχόμενα κελιά της στήλης G είναι ίσα οι αντίστοιχες συχνότητες προστίθενται στην πρώτη από τις ίσες τιμές	H/10 0
0	1	1	0.01	0.15	0.15	0	3	0.03
1	2	3	0.02	0.3	0.45	0		0
2	3	6	0.03	0.45	0.9	1	3	0.03
3	5	11	0.05	0.75	1.65	2	5	0.05
4	8	19	0.08	1.2	2.85	3	8	0.08
5	10	29	0.1	1.5	4.35	4	10	0.1
6	12	41	0.12	1.8	6.15	6	12	0.12
7	17	58	0.17	2.55	8.7	9	17	0.17
8	11	69	0.11	1.65	10.35	10	11	0.11
9	9	78	0.09	1.35	11.7	12	9	0.09
10	7	85	0.07	1.05	12.75	13	7	0.07
11	5	90	0.05	0.75	13.5	14	9	0.09
12	4	94	0.04	0.6	14.1	14		0
13	3	97	0.03	0.45	14.55	15	6	0.06
14	2	99	0.02	0.3	14.85	15		0
15	1	100	0.01	0.15	15	15		0

Πίνακας 6.1 Πίνακας των συχνοτήτων, των αθροιστικών συχνοτήτων και των συχνοτήτων και πιθανοτήτων του ισοσταθμισμένου ιστογράμματος, ψηφιακής εικόνας 10 x 10.

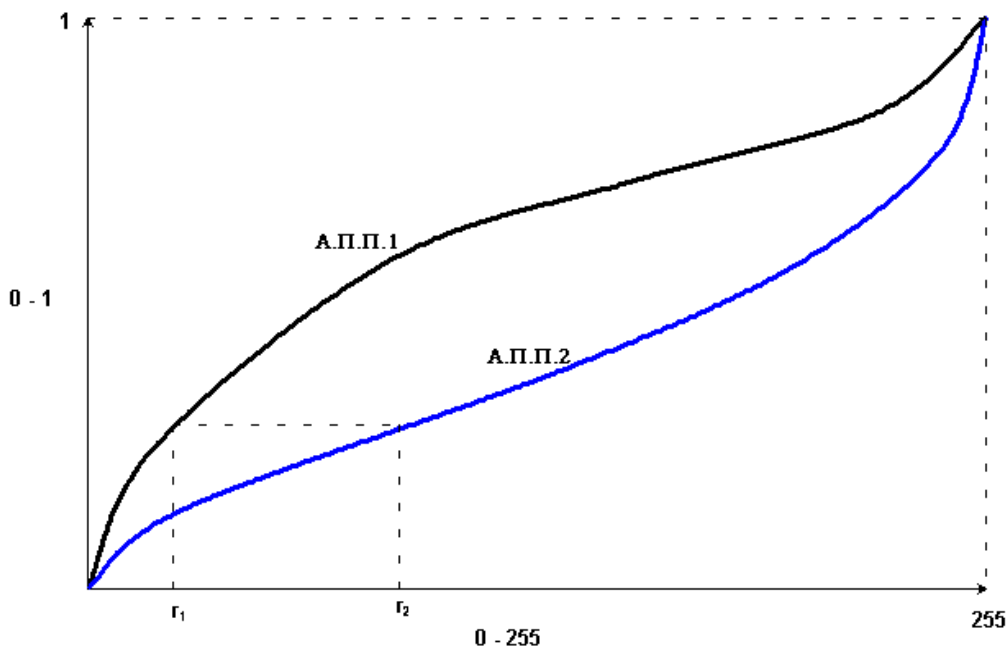


Σχήμα 6.13 Αρχικό ιστόγραμμα πιθανοτήτων των ραδιομετρικών τιμών.



Σχήμα 6.14 Ισοσταθμισμένο ιστόγραμμα πιθανοτήτων ραδιομετρικών τιμών.

6.5 Προσαρμογή - συμφωνία ιστογραμμάτων (Histogram matching)



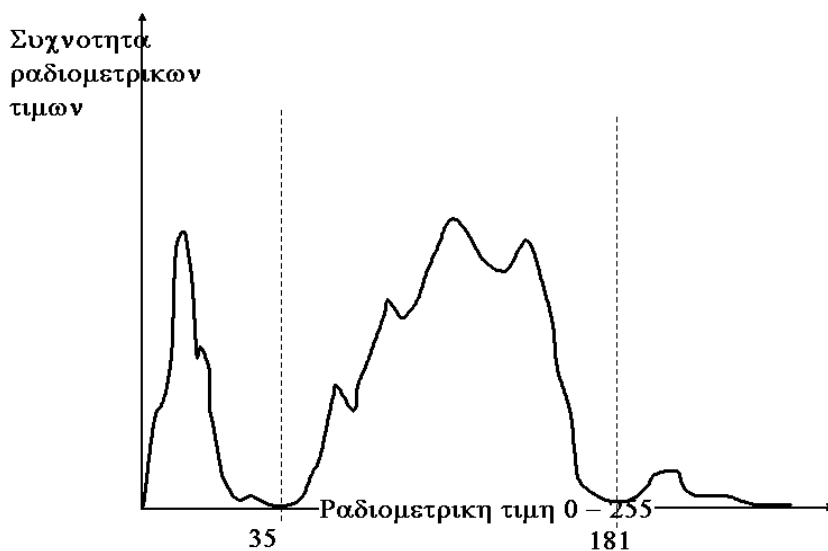
Σχήμα 6.15 Αντιστοίχιση των ραδιομετρικών τιμών δύο ιστογραμμάτων μέσω των αθροιστικών πυκνοτήτων πιθανότητας (Α.Π.Π.1 – Α.Π.Π.2).

Ανάλογη διαδικασία με την ισοστάθμιση ιστογράμματος ακολουθείται και στην προσαρμογή των ιστογραμμάτων δύο ψηφιακών εικόνων-φασματικών καναλιών. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν δεν πρέπει υποχρεωτικά να μετατραπεί κάποιο ιστόγραμμα εικόνας σύμφωνα με κάποια μαθηματική συνάρτηση, αλλά είναι απαραίτητο να προσαρμοστεί στο ιστόγραμμα κάποιας άλλης εικόνας. Ουσιαστικά πρόκειται για μια προσαρμογή των επιπέδων ραδιομετρίας-φωτεινότητας ενός ιστογράμματος σε κάποιο άλλο. Πρακτικά η μέθοδος χρησιμοποιείται ή σε περιπτώσεις εικόνων της ίδιας περιοχής, της ίδιας χρονικής στιγμής (και στο ίδιο μήκος κύματος – φασματικό κανάλι) που καταγράφηκαν από διαφορετικούς δορυφόρους, ή από τον ίδιο δορυφόρο μεν αλλά με διαφορετικούς χρόνους καταγραφής.

6.6 Τεμαχισμός ή κατάτμηση (density slicing) σε ομάδες συχνότητας του ιστογράμματος

Σε μερικές ψηφιακές εικόνες – κανάλια οι συχνότητες τυχαίνει να δημιουργούν σχεδόν ξεχωριστές υποομάδες σε διαφορετικά τμήματα του συνολικού εύρους των ραδιομετρικών τιμών. Για παράδειγμα σε ένα φασματικό κανάλι του μέσου υπέρυθρου, έστω το κανάλι 5 του δορυφόρου Landsat υπάρχει περίπτωση να διαχωρίζονται πλήρως η θάλασσα, η βλάστηση (και κάποιες άλλες καλύψεις μαζί) και τέλος μια κάλυψη με υψηλές ραδιομετρικές τιμές, όπως ορυχεία ή σύννεφα, κ.ά. Το ιστόγραμμα του σχήματος 6.14 αντιστοιχεί σε μια τέτοια εικόνα.

Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι πολύ εύκολο να διαχωρίσουμε σε αρχικό στάδιο τις ομάδες αυτές ορίζοντας ένα κατώφλι (threshold) στις ραδιομετρικές τιμές που αντιστοιχούν στις ελάχιστες συχνότητες του ιστογράμματος όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.14.



Σχήμα 6.16 Ιστόγραμμα με τρείς ξεχωριστές ομάδες pixels (διαχωρισμένων ραδιομετρικών τιμών).

Βιβλιογραφία/Αναφορές

- CNES, *Dossier d'information-SPOT-1, Un satellite pour l'observation de la terre*. CNES-Centre National d'études spatiales.
- Couzy, A., 1981. *La Télédétection, Que sais-je?* Paris: Presses Universitaires de France.
- Floys, S. and Sabins, J.R., 1987. *Remote Sensing Principles and Interpretation*. 2nd ed., New York: W.H. Freeman and Compan.
- Harris, R., 1987. *Satellite Remote Sensing - An Introduction*. London and New York: Routledge and Kegan Paul.
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E., 2001. *Digital Image Processing*. 2nd ed., New Jersey: Prentice Hall.
- Rees, W.G., 2001. *Physical Principles on Remote Sensing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Richards, A.J., 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag.
- Richards, J. and Xiuping, J., 1999. *Remote Sensing Digital Image Analysis, An Introduction*. Berlin: Springer Verlag.
- Showengerdt, A.R., 1983. *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*. Academic Press.

Κεφάλαιο 7 Μετασχηματισμοί πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης και Ιωάννης Ν. Φαρασλής

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι τεχνικές μετασχηματισμών των πολυφασματικών εικόνων οι οποίες οδηγούν στη δημιουργία νέων εικόνων και πληροφοριών. Αρχικά αναφέρονται οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό χρήσεων καλύψεων γης συνδυάζοντας τα διαφορετικά φασματικά κανάλια. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις κατηγορίες δεικτών βλάστησης που υπάρχουν. Παράλληλα παρουσιάζεται, αναλυτικά, ο μετασχηματισμός της Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες και εφαρμόζεται σε συγκεκριμένη δορυφορική εικόνα. Τέλος αναλύεται ο μετασχηματισμός Kauth & Thomas ο οποίος χρησιμεύει στην ανάλυση των καλλιεργείων.

7.1 Εισαγωγή

Οι μετασχηματισμοί πολυφασματικών εικόνων είναι τεχνικές επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων με σκοπό τη δημιουργία νέων εικόνων οι οποίες να παρέχουν περισσότερες πληροφορίες από τις αρχικές εικόνες. Ουσιαστικά οι μετασχηματισμένες εικόνες μπορούν να αναδείξουν χαρακτηριστικά του χώρου τα οποία δεν ήταν διακριτά στις αρχικές εικόνες ή να συμπίεσουν μεγάλο όγκο πληροφοριών σε μικρότερο αριθμό καναλιών. Οι μετασχηματισμοί αυτοί εφαρμόζονται είτε σε μία πολυφασματική εικόνα είτε σε δύο ή περισσότερα φασματικά κανάλια, της ίδιας περιοχής, που έχουν αποκτηθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (διαχρονικά δεδομένα) (Richards 1986).

Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας παρέχει μεγάλο εύρος δυνατών μετασχηματισμών των πολυφασματικών δορυφορικών δεδομένων. Μερικές από τις πιο γνωστές τεχνικές μετασχηματισμού των εικόνων είναι:

- Οι αριθμητικές πράξεις. Αναφέρονται στην πρόσθεση, στην αφαίρεση, στον πολλαπλασιασμό και στην διαίρεση (λόγος) των εικόνων.
- Η ανάλυση σε κύριες συνιστώσες (principal component analysis-PCA).
- Ο μετασχηματισμός Kauth-Thomas.

Οι παραπάνω τεχνικές επιλέγονται ανάλογα με τον στόχο της εκάστοτε εφαρμογής. Για παράδειγμα, δύο εικόνες της ίδιας περιοχής με διαφορετικές ημερομηνίες λήψης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στον έλεγχο και την αξιολόγηση πλημμυρισμένων περιοχών. Ένα άλλο παράδειγμα ευρείας χρήσης των μετασχηματισμών των δορυφορικών εικόνων είναι οι λόγοι μεταξύ των διαφόρων φασματικών καναλιών.

Στις ενότητες που ακολουθούν θα παρουσιαστούν οι βασικές τεχνικές μετασχηματισμού. Επίσης έμφαση θα δοθεί στους δείκτες οι οποίοι προκύπτουν από αριθμητικές πράξεις μεταξύ εικόνων, με σκοπό την εξαγωγή πληροφοριών για τις χρήσεις/καλύψεις γης. Φυσικά οι πιο γνωστοί δείκτες είναι οι δείκτες βλάστησης οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση της φυτικής βιομάζας τόσο σε τοπική όσο και σε παγκόσμια κλίμακα.

7.1 Αριθμητικές πράξεις

Οι αριθμητικές πράξεις της πρόσθεσης, της αφαίρεσης, του πολλαπλασιασμού και της διαίρεσης εφαρμόζονται σε δύο ή περισσότερες εικόνες που έχουν το ίδιο σύστημα αναφοράς και απεικονίζουν την ίδια γεωγραφική περιοχή. Οι πράξεις υλοποιούνται μεταξύ των ψηφιακών τιμών των pixels των φασματικών καναλιών χωρίς να εμπλέκονται γειτονικά pixels.

Οι αριθμητικές πράξεις γίνονται: (α) στα φασματικά κανάλια της ίδιας δορυφορικής εικόνας, (β) στα φασματικά κανάλια εικόνων που προέρχονται από διαφορετικές ημερομηνίες.

Οι τέσσερις βασικές πράξεις μεταξύ εικόνων (φασματικών καναλιών) είναι:

A) Πρόσθεση εικόνων

Η πρόσθεση δημιουργεί ένα σταθμισμένο άθροισμα μεταξύ δύο ή περισσότερων εικόνων. Ο μαθηματικός τύπος είναι:

$$Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n w_i X_i \quad (7.1)$$

Όπου:

- n , ο αριθμός των φασματικών καναλιών.
- w_i , ο συντελεστής στάθμισης (βάρους) της εικόνας X_i .
- k , ο συντελεστής κλίμακας των εικόνων.

Η πιο σημαντική εφαρμογή της πρόσθεσης χρησιμοποιείται για τη μείωση του συνολικού θορύβου στις εικόνες και την αύξηση του λόγου σήματος/θορύβου (signal to noise ratio - SNR) με συνέπεια τη δημιουργία εικόνων καλλίτερης ποιότητας.

Β) Αφαίρεση εικόνων

Η αφαίρεση εφαρμόζεται μεταξύ ζευγών εικόνων της ίδιας περιοχής που ανήκουν στο ίδιο σύστημα αναφοράς αλλά έχουν ληφθεί από διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η αφαίρεση είναι χρήσιμη στον εντοπισμό διαχρονικών αλλαγών. Για την υλοποίηση της αφαίρεσης μεταξύ των εικόνων απαιτούνται δύο προϋποθέσεις:

- Οι εικόνες να έχουν διορθωθεί ραδιομετρικά.
- Να έχει επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια στην γεωμετρική διόρθωση των εικόνων (περίπου το $\frac{1}{4}$ της διάστασης του pixel).

Γ) Πολλαπλασιασμός εικόνων

Συνήθως η πράξη του πολλαπλασιασμού εφαρμόζεται όταν σε μια εικόνα διακρίνονται δύο η περισσότερες καλύψεις γης και υπάρχει στόχος για παρατήρηση και απομόνωση μιας συγκεκριμένης κάλυψης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η δημιουργία «μάσκας» (masking) για τον διαχωρισμό υδάτινων επιφανειών από την ξηρά. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το φασματικό κανάλι του εγγύς υπέρυθρου του οποίου τα φασματικά χαρακτηριστικά δίνουν πολύ μικρή ανάκλαση στις υδάτινες επιφάνειες και μεγάλη ανάκλαση στις περιοχές με βλάστηση. Στη συνέχεια, επιλέγεται κατώφλι μεταξύ των φασματικών τιμών του εγγύς υπέρυθρου για τον διαχωρισμό των δύο κατηγοριών. Ακολούθως, δημιουργείται δυαδική εικόνα με τιμές '1' και '0'. Όλα τα pixels με τιμές κάτω από την τιμή του κατωφλίου έχουν την τιμή '1', διαφορετικά έχουν την τιμή '0'. Τέλος αυτή η δυαδική εικόνα πολλαπλασιάζεται με την αρχική εικόνα για να εξαχθούν μόνο οι περιοχές που αντιστοιχούν σε υδάτινες επιφάνειες.

Δ) Διαίρεση καναλιών

Οι διαιρέσεις ή λόγοι καναλιών όπως είναι γνωστοί, αποτελούν τις πλέον χρησιμοποιούμενες πράξεις μεταξύ των δεδομένων της τηλεπισκόπησης. Από την εφαρμογή της διαίρεσης στις ψηφιακές εικόνες προκύπτουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως: (α) η μείωση των σκιάσεων και των επιδράσεων του ανάγλυφου γενικότερα, και (β) ο περιορισμός των επιπτώσεων από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Πριν την εφαρμογή της διαίρεσης στα φασματικά κανάλια θα πρέπει: (α) να αφαιρεθεί ο τυχαίος θόρυβος, και (β) να γίνει ατμοσφαιρική διόρθωση (Μηλιάρης 2003).

Οι πιο δημοφιλείς εφαρμογές του λόγου των φασματικών καναλιών είναι ο εντοπισμός χαρακτηριστικών καλύψεων γης και η δημιουργία σημαντικών δεικτών όπως οι δείκτες βλάστησης. Ιδιαίτερη αναφορά στους δείκτες βλάστησης θα γίνει στις επόμενες ενότητες.

7.2 Δείκτες

7.2.1 Οι δείκτες στην Τηλεπισκόπηση

Στην κατηγορία των τεχνικών φασματικής ενίσχυσης (spectral enhancement) των εικόνων ανήκουν και οι δείκτες. Ουσιαστικά, οι δείκτες είναι εικόνες οι οποίες προκύπτουν μετά από μαθηματικές πράξεις μεταξύ των φασματικών καναλιών της ίδιας εικόνας ή διαφορετικών εικόνων. Οι μαθηματικές αυτές πράξεις μπορεί να είναι είτε απλές όπως «Κανάλι 1 – Κανάλι 2» είτε πιο σύνθετες όπως λόγος καναλιών «Κανάλι 1 / Κανάλι 2». Οι λόγοι καναλιών βασίζονται ιδιαίτερα στις φασματικές ιδιότητες των υλικών του εδάφους όπως π.χ.

απορρόφηση/ανάκλαση στα διαφορετικά μήκη κύματος. Η απορρόφηση εξαρτάται από τη μοριακή δομή της επιφάνειας που προσπίπτει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ως αποτέλεσμα προκύπτει ότι οι λόγοι των φασματικών καναλιών δίνουν πληροφορίες για τη χημική σύσταση του κάθε στόχου.

Στο πλαίσιο αυτό έχουν δημιουργηθεί αρκετοί δείκτες, από απλοί έως πιο σύνθετοι για τον:

- Εντοπισμό – ανάλυση των διαφορετικών ειδών βλάστησης.
- Εντοπισμό Ορυκτών.
- Εντοπισμό αστικών περιοχών.
- Εντοπισμό της ξηρασίας.
- Εντοπισμό νερού, χιονιού και πάγου.
- Εντοπισμό καμένων εκτάσεων κ.ά.

Οι δείκτες, ανάλογα με την μέθοδο που εφαρμόζεται για τη δημιουργία τους, ταξινομούνται σε 4 κατηγορίες:

- Απλοί δείκτες. Οι δείκτες αυτοί δημιουργούνται από τους λόγους των φασματικών καναλιών και τονίζουν τις φασματικές ιδιότητες των καλύψεων/χρήσεων γης.
- Δείκτες που ελαχιστοποιούν τα προβλήματα που δημιουργούνται εξαιτίας του εδάφους σε σχέση με τις καλύψεις (βλάστηση, νερό κ.ά.).
- Δείκτες που ελαχιστοποιούν τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις.
- Εξειδικευμένοι δείκτες εκτίμησης φαινομένων που συμβαίνουν στο χώρο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι δείκτες: πυκνότητας βλάστησης, εκτίμησης της δριμύτητας της πυρκαγιάς, κ.ά.

Ένας δείκτης για να είναι λειτουργικός πρέπει να ακολουθεί μια σειρά από κριτήρια όπως (Jensen 2000):

- Να μεγιστοποιεί την ευαισθησία σε επιφάνειες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (π.χ. στη χλωροφύλλη της βλάστησης). Παράλληλα πρέπει να μεταβάλλεται γραμμικά στις αλλαγές που συντελούνται και να έχει εφαρμογή σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος περιοχών.
- Να εξομαλύνει και να ελαττώνει τις επιπτώσεις εξαιτίας της γωνίας του ήλιου, της τοπογραφίας, των ατμοσφαιρικών συνθηκών, των σφαλμάτων των αισθητήρων, επιτρέποντας διαχρονικές συγκρίσεις στην περιοχή μελέτης.
- Να συνδέεται με διαδικασίες υπολογισμού ποσοτικών παραμέτρων όπως : ο υπολογισμός της βιομάζας, του δείκτη φυλλικής επιφάνειας κ.ά.

Στην τηλεπισκόπηση οι πιο γνωστοί δείκτες είναι οι δείκτες βλάστησης. Από τη δεκαετία του 1960 εφαρμόζονται για την παρακολούθηση της βιομάζας και άλλων βιοφυσικών παραμέτρων της βλάστησης τόσο σε παγκόσμια όσο και σε τοπική κλίμακα. Οι δείκτες βλάστησης ανήκουν στις πιο δημοφιλείς και χρήσιμες εφαρμογές της τηλεπισκόπησης και εφαρμόζονται στη διαχείριση του δασικού πλούτου, στον εντοπισμό φυτικών ασθενειών, στην παρακολούθηση της ερημοποίησης, κ.α.. Ακολουθεί εκτενής αναφορά στους πιο δημοφιλείς δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιούνται.

7.2.2 Δείκτες Βλάστησης

7.2.2.1 Η φασματική συμπεριφορά της βλάστησης

Οι δείκτες βλάστησης βασίζονται στην αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τα φύλλα των φυτών. Επομένως η κατανόηση της φασματικής συμπεριφοράς των φυτών και ιδιαίτερα των φύλλων, θεωρείται θεμελιώδης για τις εφαρμογές της τηλεπισκόπησης στην διερεύνηση των χαρακτηριστικών της βλάστησης. Τα φύλλα περιέχουν ειδικές χρωστικές ουσίες όπως οι χλωροφύλλες, οι καροτίνες και οι ξανθοφύλλες. Οι χρωστικές αυτές ουσίες περιέχονται στα οργανίδια των φυτικών κυττάρων που ονομάζονται χλωροπλάστες. Οι χλωροφύλλες χρησιμεύουν στην απορρόφηση ενέργειας φωτός για την επιτέλεση της λειτουργίας της φωτοσύνθεσης. Κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, τα φυτά χρησιμοποιώντας ενέργεια

(από συγκεκριμένα μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας), παράγουν τα απαραίτητα για τη θρέψη τους συστατικά όπως διοξείδιο του άνθρακα και νερό.

Βάση της παραπάνω περιγραφής γίνεται φανερό ότι οι βιοφυσικές ιδιότητες της βλάστησης επηρεάζουν την απορρόφηση, ανάκλαση και μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα διαφορετικά μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ΗΜΦ). Η χλωροφύλλη δεν απορροφά όλο το ηλιακό φως. Κατά τη φωτοσύνθεση εμφανίζεται μεγάλη απορρόφηση σε δύο περιοχές του ορατού τμήματος του ΗΜΦ: 0,4 μm (μπλε) και 0,68 μm (κόκκινο). Αντίθετα, στο πράσινο φως (0,55 μm) υπάρχει μικρή απορρόφηση και μεγάλη ανάκλαση, γεγονός που εξηγεί την πράσινη εμφάνιση των φυτών. Για την χρωματική σύνθεση των φασματικών καναλιών 1, 2, 3 στα χρώματα μπλε, πράσινο και κόκκινο στο ορατό που είναι η μοναδική που απεικονίζει σε φυσικά χρώματα, (BGR), κυριαρχεί το ανοικτό πράσινο χρώμα σε νεαρά φυτά. Αυτό συμβαίνει γιατί καθώς τα φυτά αναπτύσσονται, έχουν μικρή συγκέντρωση χλωροφύλλης. Κατά την ωρίμανσή τους, με δεδομένη την αύξηση της χλωροφύλλης, το σκούρο πράσινο χρώμα κυριαρχεί. Τέλος κατά τη γήρανση των φυτών επικρατεί το καφέ/κίτρινο χρώμα.

Στο κοντινό υπέρυθρο εύρος του ΗΜΦ (0,75μm-1,35μm) παρατηρείται ισχυρή ανάκλαση, όχι από τα ανώτερα στρώματα των φύλλων (τα οποία και διαπερνά) αλλά από το εσωτερικό τους (μεσόφυλλο). Δηλαδή, η εσωτερική δομή των φύλλων είναι υπεύθυνη για την ισχυρή ανάκλαση της υγιούς βλάστησης στο κοντινό υπέρυθρο. Επίσης παρατηρήθηκε ότι κατά τη μετάβαση από το κόκκινο στο κοντινό υπέρυθρο η ανάκλαση στα φύλλα αυξάνεται απότομα δημιουργώντας την «κόκκινη ακμή» (Red Edge), χαρακτηριστικό γνώρισμα της βλάστησης. Κατ' αυτό τον τρόπο συμπεραίνεται ότι η υγιής βλάστηση παρουσιάζει μέγιστο στο κοντινό υπέρυθρο (NIR) και όχι στο πράσινο τμήμα του ΗΜΦ. Η ανάκλαση για μεγαλύτερα μήκη κύματος, από 1,35 μm έως 2,5 μm, επηρεάζεται από τη συγκέντρωση του νερού στα φύλλα των φυτών (Campbell 1996).

Το γεγονός αυτό υποδηλώνει και τη μεγάλη σημασία στη μελέτη της βλάστησης, των μεταβολών του υπέρυθρου φάσματος με δυνατότητα να:

- Διευκολύνουν την κατηγοριοποίηση των περιοχών, σε παρουσία ή απουσία βλάστησης.
- Επιτρέπουν την διάκριση των διαφορετικών ειδών βλάστησης.
- Διακρίνουν τις αλλαγές στην υγιή βλάστηση.
- Εντοπίζουν και να χαρτογραφούν την παρουσία και κατανομή των ασθενειών και μολύνσεων στις καλλιέργειες.
- Εντοπίζουν την ωρίμανση των φυτών, κυρίως την περίοδο συγκομιδής των καλλιεργειών.

Πάνω από μισό αιώνα οι επιστήμονες προσπαθούν να μοντελοποιήσουν τις βιοφυσικές παραμέτρους της βλάστησης χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα. Η προσπάθεια αυτή οδήγησε στη δημιουργία δεικτών βλάστησης. Αρκετοί δείκτες βλάστησης αναπτύχθηκαν άσει των φασματικών ιδιοτήτων της βλάστησης. Οι δείκτες αυτοί σχηματίζονται από συνδυασμούς των φασματικών καναλιών τα οποία προστίθενται, διαιρούνται ή πολλαπλασιάζονται με τρόπο ώστε να δώσουν μια τιμή η οποία και εκφράζει το ποσό της υγιούς βλάστησης σ' ένα εικονοστοιχείο (pixel). Οι υψηλές τιμές των δεικτών βλάστησης υποδηλώνουν μεγάλη κάλυψη του εδάφους από υγιή βλάστηση. Η πιο απλή μορφή αυτών των δεικτών είναι ο λόγος μεταξύ δύο φασματικών καναλιών.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται, εν συντομία, οι πιο σημαντικοί και ευρέως διαδεδομένοι δείκτες βλάστησης.

7.2.2.2. Κατηγορίες δεικτών βλάστησης

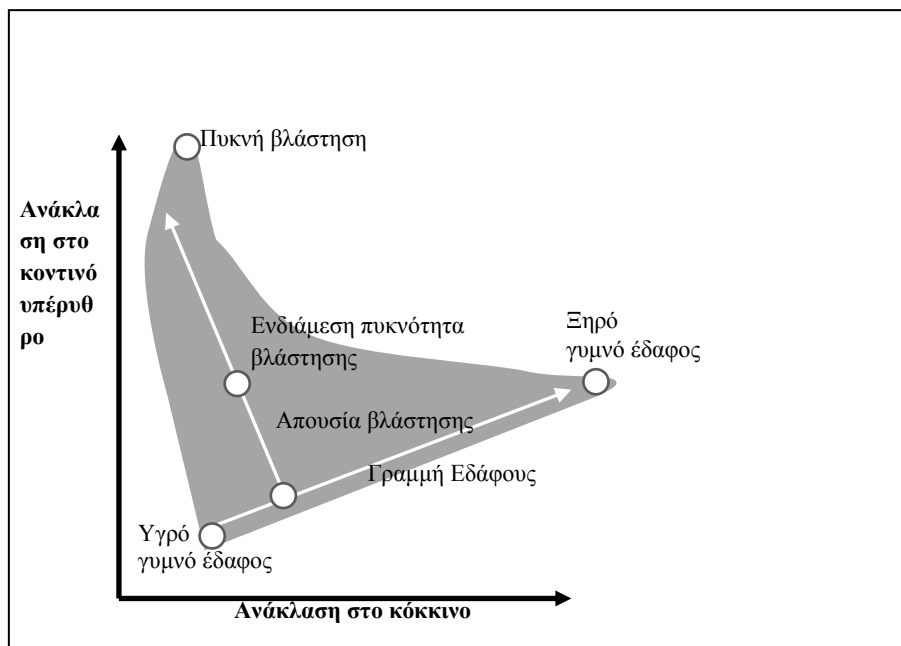
Οι δείκτες βλάστησης ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

(α) Στους δείκτες που προκύπτουν από λόγους των φασματικών καναλιών (ratios) και

(β) στους δείκτες που μετρούν την ραδιομετρική απόσταση από τη γραμμή εδάφους (distance-based).

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι δείκτες που σχηματίζονται από αριθμητικές πράξεις (όπως οι λόγοι) μεταξύ των ραδιομετρικών τιμών των φασματικών καναλιών του κόκκινου και του κοντινού υπέρυθρου τμήματος του ΗΜΦ. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι δείκτες οι οποίοι μετράνε το ποσοστό της βλάστησης σε κάθε pixel λαμβάνοντας ως βάση την διαφορά που προκύπτει από την τιμή ανάκλασης κάθε pixel σε σχέση με την τιμή ανάκλασης του γυμνού εδάφους. Εδώ βασικό ρόλο διαδραματίζει η γνώση της γραμμής του εδάφους (soil line). Καθώς αυξάνεται η βλάστηση και καλύπτει το έδαφος, τα αντίστοιχα pixels της βλάστησης αυξάνουν την κατακόρυφη απόστασή τους από την γραμμή του εδάφους (εικόνα 7.1). Είναι

φανερό ότι, για τους δείκτες αυτής της κατηγορίας απαιτείται η γνώση της κλίσης και του σημείου τομής της γραμμής του εδάφους για τη δορυφορική εικόνα που εξετάζεται (Silleos *et al.* 2006).



Εικόνα 7.1 Κατανομή των pixels στο κόκκινο και κοντινό υπέρυθρο.

Α) Λόγοι φασματικών καναλιών

Οι δείκτες αυτής της κατηγορίας είναι συνδυασμός των φασματικών καναλιών του ορατού κόκκινου (red) και του κοντινού υπέρυθρου (NIR). Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται οι βασικοί δείκτες αυτής της κατηγορίας με τον μαθηματικό τους τύπο (πίνακας 7.1).

RATIO, Ratio Vegetation Index (Birth and McVey, 1968)	NIR/red
NDVI, Normalized Difference Vegetation Index (Rouse, 1973)	$(\text{NIR} - \text{red}) / (\text{NIR} + \text{red})$
SAVI, Soil Adjusted Vegetation Index (Huete, 1988)	$[(\text{NIR} - \text{red}) / (\text{NIR} + \text{red} + L)] * (1 + L)$, όπου $L = 0 - 1$
EVI, Enhance Vegetation Index (Liu and Huete, 1995)	$G * [(\text{NIR} - \text{red}) / (\text{NIR} + C1*\text{red} - C2*\text{blue} + L)]$, όπου $G = 2.5, C1 = 6, C2 = 7.5, L = 1$
RVI, (Richardson and Wiegand, 1977)	red/ NIR

Πίνακας 7.1 Δείκτες που δημιουργούνται από λόγους φασματικών καναλιών.

Ο δείκτης RATIO

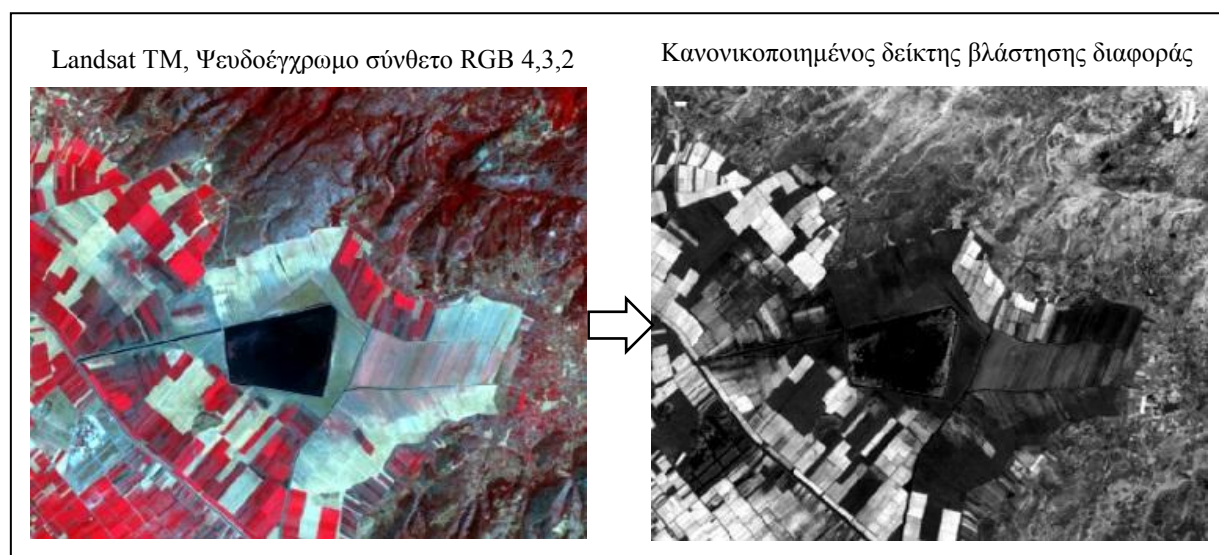
Ο δείκτης βλάστησης RATIO υπολογίζεται από απλή διαίρεση των ραδιομετρικών τιμών του υπέρυθρου καναλιού προς τις τιμές του κόκκινου (Birth *et al.* 1968). Τα pixels με παρουσία βλάστησης εντοπίζονται εύκολα εξαιτίας των διαφορών στην απορρόφηση στις δύο περιοχές του ΗΜΦ (υψηλή στο κόκκινο, χαμηλή στο υπέρυθρο). Επιπλέον ο δείκτης ελαχιστοποιεί τα προβλήματα φωτεινότητας που προκαλούνται από την τοπογραφία της περιοχής. Στα μειονεκτήματα του δείκτη ανήκει οι μη γραμμικότητα των τελικών τιμών του.

Ο δείκτης NDVI

Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης διαφοράς, (NDVI) δημιουργήθηκε το 1974 με στόχο τον διαχωρισμό της βλάστησης από τη φωτεινότητα του εδάφους χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα Landsat MSS (Rouse *et al.* 1974). Αποτελεί τον πιο συχνά χρησιμοποιούμενο δείκτη παγκοσμίως. Στα πλεονεκτήματα του δείκτη είναι η ελαχιστοποίηση των τοπογραφικών επιδράσεων. Επίσης είναι σχεδόν

αναλλοίωτος από τις διάφορες συνθήκες εξαιτίας των κανονικοποιημένων τιμών. Το εύρος τιμών είναι από -1 έως και +1 με το 0 να εκφράζει απουσία βλάστησης ενώ οι αρνητικές τιμές να περιγράφουν καλύψεις γης όπως νερό, ανθρωπογενείς κατασκευές κ.ά. Ο δείκτης βλάστησης περιγράφει πολλές ιδιότητες των φυτών με αποτέλεσμα να χρησιμεύει στην παρακολούθηση της υγείας τους, στην εκτίμηση της βιομάζας, στην απόδοση των καλλιεργειών κ.α.. Στα μειονεκτήματα του δείκτη είναι ότι παρουσιάζει δείγματα κορεσμού (saturation) σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις βλάστησης καθώς και υπερεκτίμηση σε χαμηλές συγκεντρώσεις βλάστησης εξαιτίας της ανακλαστικότητας του εδάφους. Τέλος οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως τα λεπτά σύννεφα, δυνητικά μπορούν να επηρεάσουν τις τιμές του NDVI.

Ο NDVI για τις εικόνες Landsat TM ορίζεται από τον τύπο: $NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$. Όπου TM4 είναι το κοντινό υπέρυθρο (0,7-0,8 μm) και TM3 είναι το κόκκινο (0,6-0,7 μm) φασματικά κανάλια. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του NDVI παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 7.2). Η δορυφορική εικόνα Landsat TM αποτυπώνει την ευρύτερη περιοχή της λίμνης Κάρλας, στη Λάρισα, τον Ιούλιο του 1997. Στον NDVI οι αρδευόμενες εκτάσεις (άρα υψηλά ποσοστά πράσινης βιομάζας) εμφανίζονται με ανοικτότερους τόνους του γκρι σε σχέση με τις μη αρδευόμενες εκτάσεις καθώς και τις υδάτινες επιφάνειες (πολύ σκούροι τόνοι του γκρι στο κέντρο της εικόνας). Παράλληλα στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα της εικόνας αποτυπώνεται η φυσική βλάστηση στις ημιορεινές – ορεινές περιοχές με ενδιάμεσους τόνους φωτεινότητας.

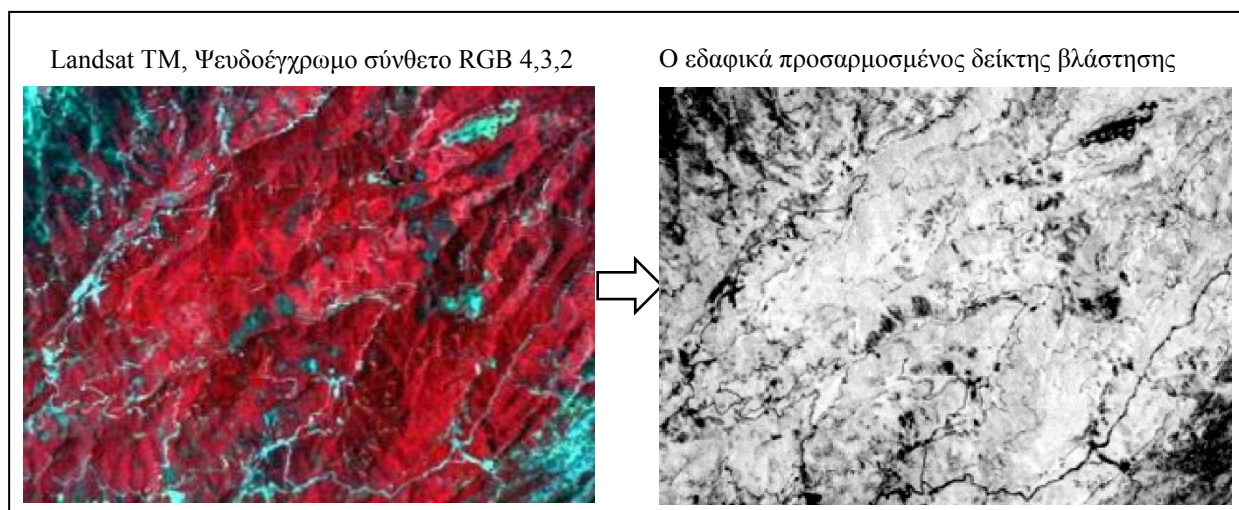


Εικόνα 7.2 Ο δείκτης NDVI του Landsat TM4 στις 14/7/1997.

Ο δείκτης SAVI

Ο «εδαφικά προσαρμοσμένος δείκτης βλάστησης» (Soil-adjusted Vegetation Index, SAVI) δημιουργήθηκε με στόχο την ελάττωση των επιπτώσεων της φωτεινότητας του εδάφους (Huete 1988). Για το σκοπό αυτό υπάρχει ο συντελεστής εδάφους L ο οποίος λαμβάνει τιμές ανάλογα με τα φασματικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Οι τιμές του L εξαρτώνται από την πυκνότητα της βλάστησης. Για πολύ αραιή βλάστηση λαμβάνει την τιμή 1 ενώ για βλάστηση υψηλής πυκνότητας την τιμή 0,25. Σε περιοχές όπου ποικίλη η κάλυψη βλάστησης (ή είναι άγνωστη) προτείνεται η τιμή 0,5.

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 7.3) ο Landsat TM αποτυπώνει δασική έκταση στην περιοχή του Κισσάβου. Εξαιτίας της πυκνής βλάστησης ο συντελεστής L, του δείκτη SAVI, ορίστηκε στο 0,8. Έτσι για τις εικόνες Landsat TM η μαθηματική σχέση του δείκτη είναι: $SAVI = [(TM4 - TM3) / (TM4 + TM3 + 0,8)] * (1 + 0,8)$. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του SAVI απεικονίζονται ως διαβαθμίσεις του γκρι. Διακρίνονται με σκούρους τόνους του γκρι: (α) οι δασικοί και επαρχιακοί δρόμοι ως γραμμικά στοιχεία πάνω στην εικόνα και (β) οι αποψιλωμένες περιοχές ως επιφάνειες. Τέλος οι υψηλοί τόνοι του γκρι αποτυπώνουν την υγιή φυσική βλάστηση.



Εικόνα 7.3 Ο δείκτης SAVI του Landsat TM4 στις 14/7/1997.

Ο δείκτης EVI

Ο «Ενισχυμένος Δείκτης Βλάστησης» (Enhanced Vegetation Index, EVI) αναπτύχθηκε για εφαρμογές δορυφορικών δεδομένων του δορυφόρου MODIS. Ουσιαστικά αποτελεί τροποποίηση του NDVI με σκοπό να δώσει καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή προσαρμογής για το έδαφος, (L) και δύο συντελεστές C1 & C2 που διορθώνουν τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις στο μπλε και κόκκινο τμήμα του ΗΜΦ. Ο EVI εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία σε περιοχές με υψηλά ποσοστά βιομάζας ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις (Huete *et al.* 1999).

Β) Απόσταση από τη γραμμή εδάφους

Σ' αυτή την κατηγορία οι δείκτες έχουν ως στόχο να ελαχιστοποιήσουν τις επιπτώσεις από την φωτεινότητα του εδάφους, η οποία παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει διάσπαρτη βλάστηση και τα pixels περιέχουν ταυτόχρονα μικτή κάλυψη από βλάστηση και γυμνό έδαφος. Οι δείκτες αυτοί έχουν ιδιαίτερη εφαρμογή σε άνυδρες και ημι-άνυδρες περιοχές. Η διαδικασία περιλαμβάνει την έννοια της γραμμής του εδάφους όπως περιεγράφηκε στην αρχή της ενότητας. Η γραμμή εδάφους υπολογίζεται με τη βοήθεια της γραμμικής παλινδρόμησης του φασματικού καναλιού προς το κόκκινο κανάλι λαμβάνοντας δείγματα εικονοστοιχείων εδάφους.

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται οι βασικοί δείκτες, με τον μαθηματικό τους τύπο (πίνακας 7.2).

PVI, Perpendicular Vegetation Index (Richardson and Wiegand, 1977)	$PVI = [(NIR-a) * (red-b)]/\sqrt{a^2 + 1}$
MSAVI2, Modified Soil Adjusted Vegetation Spectral Index (Qi et al. 1994)	$\frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - red)}}{2}$
WDVI, Weighted Difference Vegetation Index	$WDVI = NIR - \gamma * red$

Πίνακας 7. 2 Δείκτες βλάστησης εξαρτώμενοι από τη γραμμή του εδάφους.

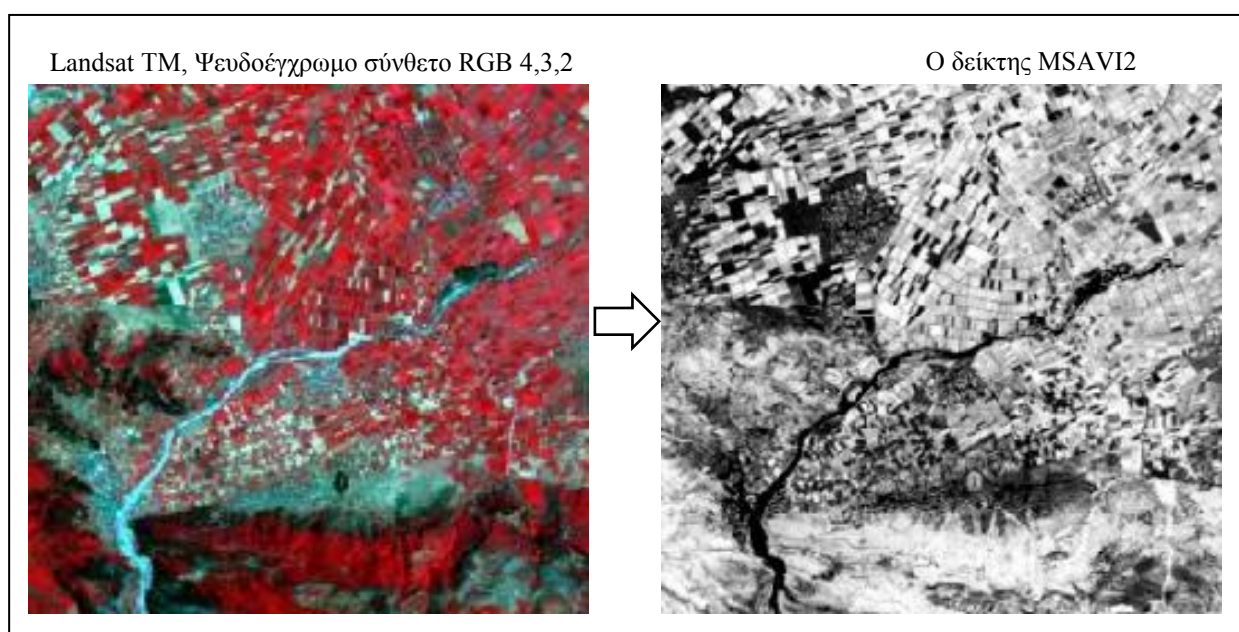
Ο δείκτης PVI

Ο «κατακόρυφος δείκτης βλάστησης» (Perpendicular Vegetation Index, PVI) υπολογίζει την κατακόρυφη απόσταση της ραδιομετρικής τιμής κάθε pixel από τη γραμμή των ραδιομετρικών τιμών του εδάφους. Οι περιοχές με απουσία βλάστησης χαρακτηρίζονται όταν η κατακόρυφη απόσταση των pixels από τη γραμμή εδάφους είναι μικρότερη του 7, ενώ σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει παρουσία βλάστησης. Για τον υπολογισμό του PVI απαιτείται ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων γιατί είναι αρκετά ευαίσθητος στις ατμοσφαιρικές μεταβολές. Οι συντελεστές a και b αντιπροσωπεύουν την κλίση και το σημείο τομής αντίστοιχα της γραμμής του εδάφους (Richardson *et al.* 1977).

Ο δείκτης MSAVI2

Ο «τροποποιημένος εδαφικά προσαρμοσμένος δείκτης βλάστησης 2» (Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2, MSAVI2), δημιουργήθηκε με στόχο τη διόρθωση της φωτεινότητας του εδάφους σε διαφορετικές συνθήκες κάλυψης της βλάστησης. Αναλυτικότερα πετυχαίνει: (α) την απομάκρυνση του «θορύβου» από την ανάκλαση του εδάφους όταν δεν το κατορθώνουν άλλοι δείκτες βλάστησης όπως ο NDVI και (β) την κανονικοποιημένη διόρθωση ώστε οι τιμές να μην είναι εκτός του διαστήματος [-1, 1], γεγονός που παρατηρείται σε άλλους δείκτες. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του δείκτη MSAVI2 είναι ότι δεν απαιτείται εμπειρικός προσδιορισμός της γραμμής του εδάφους. Οι τιμές κάτω από 0 υποδηλώνουν απουσία βλάστησης ενώ πάνω από 0 παρουσία βλάστησης (Qi *et al* 1994).

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 7.4) η ευρύτερη περιοχή του Μουζακίου (Καρδίτσα) αποτυπώνεται με δορυφορική εικόνα Landsat TM (24/7/1997) και χρωματική σύνθεση R, G, B: 4, 3, 2. Οι κόκκινες περιοχές χαρακτηρίζουν την παρουσία υγιούς βλάστησης. Αντίστοιχα η δημιουργία του δείκτη MSAVI2 προσδιορίζει τις περιοχές με υψηλή βιομάζα άρα τα αντίστοιχα pixels θα εμφανίζονται με υψηλούς τόνους του γκρι. Δύο είναι οι βασικές καλύψεις που παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά βιομάζας στην εικόνα: (α) οι καλλιεργούμενες εκτάσεις που βρίσκονται στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της εικόνας και (β) η φυσική βλάστηση που εντοπίζεται στο νότιο τμήμα της εικόνας. Το σκούρο γκρι γραμμικό στοιχείο είναι ο Πάμισος ποταμός που διασχίζει την πεδιάδα του Μουζακίου.



Εικόνα 7.4 Ο δείκτης MSAVI2 του Landsat TM4 στις 14/7/1997.

Ο δείκτης WdVI

Ο «δείκτης βλάστησης σταθμισμένης διαφοράς» (Weighted Difference Vegetation Index, WdVI) αποτελεί ένα απλό σχετικά αλλά αρκετά αποδοτικό δείκτη. Ο συντελεστής γ εκφράζει την κλίση της γραμμής του εδάφους. Η στάθμιση του κόκκινου φασματικού καναλιού με τον συντελεστή κλίσης συμβάλει στην ενίσχυση του σήματος της βλάστησης στο κοντινό υπέρυθρο κανάλι και αντίστοιχα στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της φωτεινότητας του εδάφους. Ο WdVI δείκτης είναι αρκετά ευαίσθητος στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις γι' αυτό και οι αρχικές εικόνες πρέπει να έχουν υποστεί ατμοσφαιρική διόρθωση (Richardson *et al.* 1977), (Clevers 1988).

Φυσικά η λίστα με τους δείκτες βλάστησης δεν περιορίζεται στις παραπάνω αναφορές. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού δέκτη αλλά και τις ανάγκες εφαρμογής, έχουν αναπτυχθεί αρκετές δεκάδες δεικτών όπως οι δείκτες ξηρασίας (Ratio Drought Index-RDI), οι δείκτες φυλλικής επιφάνειας (Specific leaf area vegetation index – SLAVI) κ.ά.

7.3 Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες (Principal Component Analysis, PCA)

Σε πολλές εφαρμοσμένες και όχι μόνο, επιστήμες υπάρχει ανάγκη διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων. Συνήθως τα δεδομένα αυτά είναι ή μπορούν να καταγραφούν στην μορφή δισδιάστατου πίνακα του οποίου οι γραμμές εκφράζουν μετρήσεις ή εγγραφές ατόμων μονάδων του τμήματος του πληθυσμού που καταγράφηκε (items ή records) (και οι στήλες ποσοτικοποιημένες ιδιότητες ή χαρακτηριστικά δηλ. συγκεκριμένες μεταβλητές αυτού του τμήματος του πληθυσμού που μελετάται. Κλασικό παράδειγμα είναι ένα δείγμα ανθρώπινου πληθυσμού στο οποίο μελετώνται φυσικά χαρακτηριστικά όπως το ύψος, το βάρος, η ηλικία κ.ά.

Στην Τηλεπισκόπηση την τελευταία δεκαετία έχουν δημιουργηθεί δεκάδες καινούργιοι δορυφόροι οι οποίοι καθιερώνουν ολοένα και περισσότερο υψηλά πρότυπα στις ιδιότητες των δορυφορικών εικόνων. Οι αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών για υψηλά επίπεδα ποιότητας των δορυφορικών εικόνων και συνεπώς της διακριτικής ικανότητας των σαρωτών των δορυφόρων, οδήγησαν στην δημιουργία υψηλών φασματικών (υπερφασματική τηλεπισκόπηση-καταγραφή σε πολλά φασματικά κανάλια-), ραδιομετρικών (11bit δορυφορικές εικόνες) αλλά κυρίως χωρικών ιδιοτήτων των δορυφορικών εικόνων. Η υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα ενός δορυφόρου μεταφράζεται σε μικρής επιφάνειας εικονοστοιχεία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της εξέλιξης αυτής αποτελεί η δημιουργία του 15μετρου pixel του παγχρωματικού καναλιού των δορυφόρων Landsat των τελευταίων γενεών, το οποίο καταλαμβάνει το ένα τέταρτο της επιφάνειας των pixels του ίδιου δορυφόρου στα πολυφασματικά κανάλια. Έτσι, την περιοχή που κατελάμβανε ένα pixel στο πολυφασματικό μήκος κύματος την καταλαμβάνουν στο παγχρωματικό τέσσερα pixels. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την αύξηση του όγκου των δεδομένων τέσσερις φορές περισσότερο για την κάλυψη της ίδιας ακριβώς περιοχής. Και βέβαια δεν αναφερόμαστε στο μέγεθος του pixel του παγχρωματικού καναλιού των δορυφόρων Pleiades με χωρική διακριτική ικανότητα μικρότερη από ένα μέτρο ή Quickbird ή Geoeye με χωρική διακριτική ικανότητα ανάλογη.

Σε πολυφασματικές επεξεργασίες δορυφορικών καναλιών κατά την διάρκεια των οποίων οι επεξεργαστές των ηλεκτρονικών υπολογιστών εκτελούν πράξεις σε όλα τα φασματικά κανάλια ενός δορυφόρου και μερικές φορές και στα παράγωγά τους ο όγκος των δεδομένων (εκατομμύρια pixels επί τον αριθμό των φασματικών καναλιών) που διαχειρίζονται και των πράξεων που εκτελούν αυξάνει σημαντικά. Θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να υπήρχε η δυνατότητα να συμπιεστεί ο τεράστιος αυτός όγκος των δεδομένων - με τις μικρότερες δυνατές απώλειες πληροφορίας- σε λιγότερα φασματικά κανάλια.

Η ανάγκη για συμπίεση του μέγιστου δυνατού όγκου πληροφορίας οδήγησε στην χρήση μιας μεθόδου που συνίσταται στην δημιουργία ενός αριθμού φασματικών νεο-καναλιών (τα οποία προκύπτουν από γραμμικούς συνδυασμούς των αρχικών φασματικών καναλιών) μικρότερου ή ίσου από τον αρχικό αριθμό των φασματικών καναλιών και τα οποία, όντας τελείως ασυσχέτιστα μεταξύ τους συγκεντρώνουν ήδη από τα πρώτα δύο ή τρία, το μέγιστο ποσοστό της διακύμανσης των ραδιομετρικών τιμών των pixels. Τα φασματικά αυτά νέο - κανάλια φυσικά δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα αλλά πολλές φορές χρησιμοποιούνται με σκοπό τον διαχωρισμό και την εμφάνιση των υπαρχουσών καλύψεων γης. Η μέθοδος αυτή λέγεται Ανάλυση σε Κύριες Συνιστώσες (ΑΚΣ).

Τα στάδια της εφαρμογής της μεθόδου της ΑΚΣ στην Τηλεπισκόπηση είναι τα ακόλουθα (Russell 2011):

1. Μετασχηματισμός των δορυφορικών δεδομένων (φασματικών καναλιών)

με τρόπο ώστε το σύνολο της δορυφορικής εικόνας να αποτελεί έναν πίνακα διπλής εισόδου στον οποίο τις γραμμές θα καταλαμβάνουν τα φασματικά κανάλια και τις στήλες τα pixels. Για να συμβεί αυτό τοποθετούμε όλες τις ραδιομετρικές τιμές κάθε καναλιού στην σειρά έτσι ώστε να αποτελούν μία γραμμή, η οποία θα έχει διάσταση (μήκος) ίση με τον συνολικό αριθμό των pixels της δορυφορικής εικόνας. Για παράδειγμα εάν οι διαστάσεις της δορυφορικής μας εικόνας είναι $k \times l$ τότε και το μήκος κάθε γραμμής του πίνακα θα είναι $k \times l$ (δηλαδή ίσο με τον συνολικό αριθμό των ραδιομετρικών τιμών των εικονοστοιχείων που περιέχει κάθε φασματικό κανάλι)

Έτσι δημιουργείται ένας πίνακας που έχει την παρακάτω δομή: Οι κολώνες του είναι οι ραδιομετρικές τιμές του κάθε pixel στην εικόνα και οι στήλες του είναι τα φασματικά κανάλια.

Έτσι το τυχόν στοιχείο του πίνακα ψ_{ij} είναι η ραδιομετρική τιμή του j -οστού pixel στο i -οστό φασματικό κανάλι.

Συγκεκριμένα, η μορφή του πίνακα αυτού, είναι συνήθως η παρακάτω:

ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ	Ψ_{o1}	\dots	Ψ_{oj}	\dots	Ψ_{op}
ΦΑΣΜ.ΚΑΝΑΛΙΑ					
Ψ_{1o}	Ψ_{11}	\dots	\dots	\dots	\vdots
\vdots	\vdots	\ddots			\vdots
Ψ_{io}	Ψ_{i1}		Ψ_{ij}		\vdots
\vdots			\ddots		\vdots
Ψ_{no}	\dots	\dots	\dots	\dots	Ψ_{np}

όπου $\Psi_{i.}$ το διάνυσμα γραμμή – φασματικό κανάλι της γραμμής i με τιμές pixels

$$(\Psi_{i1}, \dots, \Psi_{ij}, \dots, \Psi_{ip}) \text{ και } \Psi_{.j} \text{ το διάνυσμα στήλη του pixel } j \text{ με ραδιομετρικές τιμές } \begin{pmatrix} \Psi_{1j} \\ \vdots \\ \Psi_{ij} \\ \vdots \\ \Psi_{nj} \end{pmatrix} \text{ στο}$$

κάθε φασματικό κανάλι

Άρα το μέγεθος του πίνακά μας είναι $n \times p$ (n : ο αριθμός των φασματικών καναλιών και p : ο αριθμός των pixels κάθε φασματικού καναλιού)

2. Τυποποίηση του αρχικού πίνακα δεδομένων $Y = (\Psi_{ij})$

Μετασχηματίζουμε κάθε στοιχείο Ψ_{ij} αφαιρώντας την μέση τιμή $\overline{\Psi_{oj}}$ της μεταβλητής Ψ_{oj} (pixel) στην οποία ανήκει και διαιρώντας με την τυπική απόκλιση $S_{\Psi_{oj}}$ επίσης της μεταβλητής που ανήκει επί \sqrt{n} , όπου n , ο αριθμός των καναλιών (γραμμών) του αρχικού πίνακα ΔΗΛΑΔΗ:

$$x_{ij} = \frac{\Psi_{ij} - \overline{\Psi_{oj}}}{\sqrt{n} \cdot S_{\Psi_{oj}}}$$

Τα νέα στοιχεία, δημιουργούν τον ΤΥΠΙΚΟ ΠΙΝΑΚΑ X.

3. Δημιουργία του πίνακα συσχετίσεων

Ο πίνακας συσχετίσεων των μεταβλητών (correlation matrix) είναι ο $C = XX^t$ και το τυχόν στοιχείο του c_{jk} δίνει την συσχέτιση κάθε μιας μεταβλητής-φασματικού καναλιού με τα υπόλοιπα.

$$\text{Έχουμε: } c_{jk} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Psi_{ij} - \overline{\Psi_{oj}}}{\sqrt{n} \cdot S_{\Psi_{oj}}} \right) \left(\frac{\Psi_{ik} - \overline{\Psi_{ok}}}{\sqrt{n} \cdot S_{\Psi_{ok}}} \right) \text{ και είναι ένας τετραγωνικός πίνακας } n \times n. \text{ (και}$$

ο αρχικός πίνακας δεδομένων Ψ και ο τυπικός X είναι διαστάσεων $n \times p$)

4. Εύρεση των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα συσχετίσεων C .

Οι ιδιοτιμές είναι οι λ_i , $i=1, \dots, n$ και υπολογίζονται από την χαρακτηριστική εξίσωση του πίνακα C δηλ. από την εξίσωση $|C - \lambda I| = 0$ και τα ιδιοδιανύσματα είναι τόσα σε πλήθος όσες και οι ιδιοτιμές και προκύπτουν από τις μη μηδενικές λύσεις του ομογενούς συστήματος $(C - \lambda I)X = \bar{0}$ για κάθε ιδιοτιμή λ . Τέλος ο πίνακας των ιδιοδιανυσμάτων u_i , $i = 1, \dots, n$ είναι $u = [(u_1) \dots (u_n)]$,

5. Υπολογισμός του ποσοστού αδράνειας (διασποράς) του νέφους των σημείων (γραμμών) στον κάθε έναν από τους νέους παραγοντικούς άξονες $i=1, \dots, n$

Η συνολική διασπορά Δ δίνεται από το ίχνος της διαγωνίου του πίνακα των συσχετίσεων C , δηλαδή

$$\Delta = \text{Iχν.}(XX^t) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$$

Άρα, το ποσοστό διασποράς σε κάθε έναν από τους νέους παραγοντικούς άξονες (νέο-κανάλια) είναι $\Pi_i = \frac{\lambda_i}{\Delta}$, $i=1, \dots, n$. Συνήθως αυτό το ποσοστό διακύμανσης είναι πολύ υψηλό αθροιστικά για τα πρώτα δύο ή τρία νέο-κανάλια πολλές φορές μεγαλύτερο και του 95% (Ravi 2013).

Οι δύο πρώτοι άξονες συγκεντρώνουν το $\lambda_1 + \lambda_2$ ποσό της συνολικής αδράνειας του νέφους, δηλαδή το 1ο ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ συγκεντρώνει το $\pi_1 + \pi_2$ ποσοστό διασποράς του αρχικού νέφους, και δίνει την λιγότερο παραμορφωμένη προβολή του αρχικού νέφους, σε σύγκριση με όλα τα άλλα παραγοντικά επίπεδα.

6. Επαλήθευση της ορθότητας των υπολογισμών (μέχρι αυτό το σημείο)

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{Iχνος}(XX^t), (= n)$$

(με μια πολύ καλή προσέγγιση)

7. Υπολογισμός των συντεταγμένων των σημείων στους νέους άξονες

Επειδή ο πίνακας X από κατασκευής είναι τυπικός, η διαγωνοποίηση του επιτυγχάνεται από τον πίνακα των συσχετίσεων C και έτσι:

Ο 1ος παραγοντικός άξονας εντοπίζεται (κατά διεύθυνση) από το 1ο ιδιοδιάνυσμα του πίνακα των συσχετίσεων που αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη ιδιοτιμή του πίνακα, ο 2ος στην αμέσως μικρότερη ιδιοτιμή και ούτω καθ' εξής.

Έτσι, οι συντεταγμένες των αρχικών σημείων στους νέους άξονες, ενώ για το σημείο 1 (1η γραμμή) ήταν $(\psi_{11}, \psi_{12}, \dots, \psi_{1n})$, τώρα π.χ. για τρεις διαστάσεις είναι

$$(\psi_{11} \cdot u_{11} + \psi_{12} \cdot u_{12} + \psi_{13} \cdot u_{13}), \text{ όπου } u_1 = \begin{pmatrix} u_{11} \\ u_{12} \\ u_{13} \end{pmatrix}. \text{ Δηλαδή οι συντεταγμένες των προβολών κάθε}$$

σημείου στους παραγοντικούς άξονες δηλ. στα νέο-φασματικά κανάλια, δίνονται από το γινόμενο των πινάκων $\Psi \times U$ διαστάσεων $(1 \times n) \times (n \times 1)$.

Γενικά, η συντεταγμένη του pixel i του αρχικού πίνακα στο νέο άξονα j είναι:

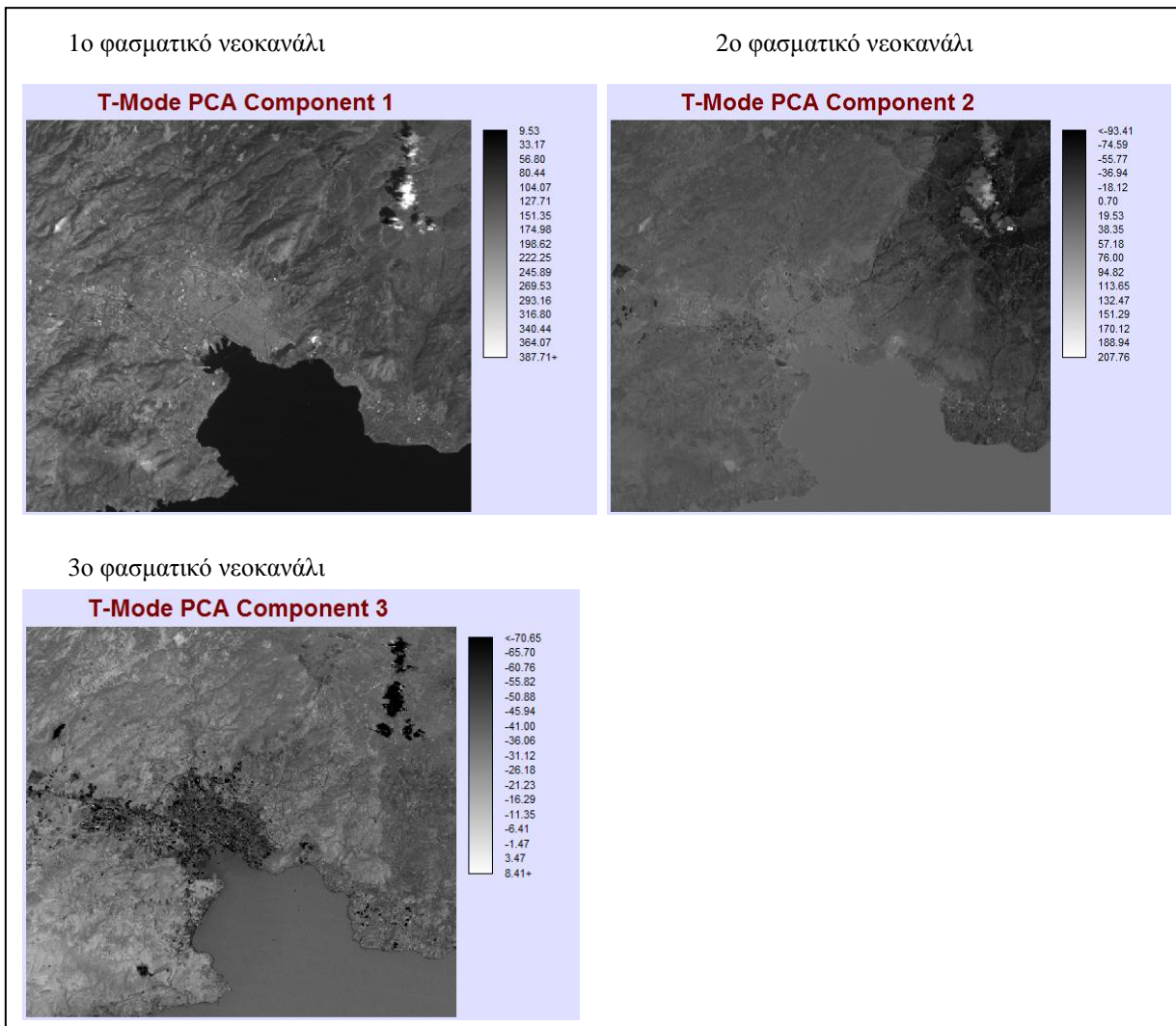
$$d_{ij} = \sum_{j=1}^n \psi_{ij} u_{ij}$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται, μετά την εφαρμογή της μεθόδου της Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες (με τη χρήση του λογισμικού Idrisi) τα τρία πρώτα φασματικά νεοκανάλια (εικόνα 7.5) της δορυφορικής εικόνας Landsat της Μαγνησίας της ευρύτερης αστικής και περιαστικής περιοχής του Βόλου και στη συνέχεια τα έξι αρχικά φασματικά κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση (εικόνες 7.6 & 7.7).

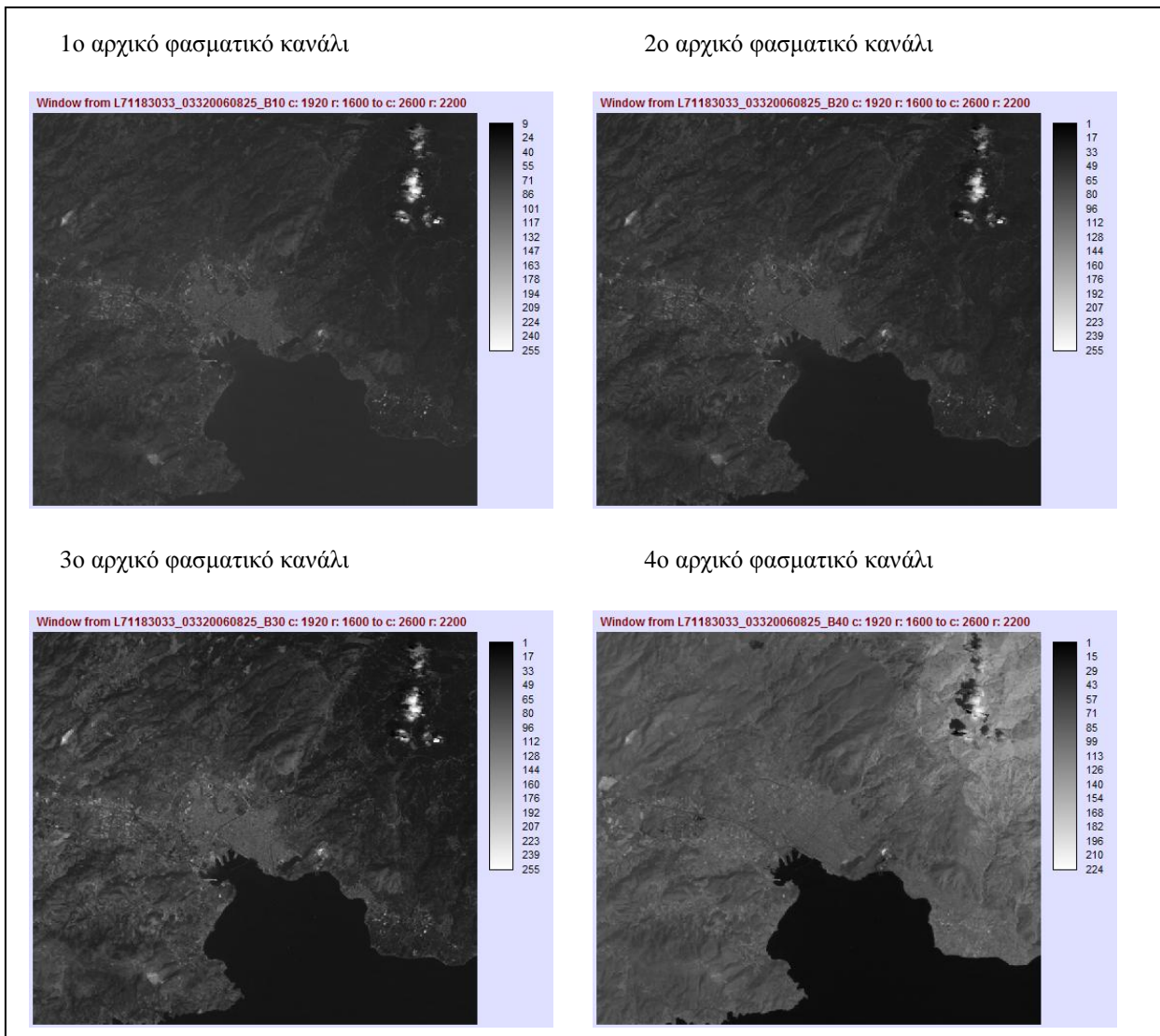
1ο φασματικό νεοκανάλι : Παρατηρούμε τον έντονο διαχωρισμό των νεφών και των σκιάσεών τους τα οποία εμφανίζονται μόνον στα υπέρυθρα αρχικά φασματικά κανάλια.

2ο φασματικό νεοκανάλι: Εδώ εμφανίζεται πιο σκοτεινή και αρκετά διαχωρισμένη η ανατολική πλευρά της εικόνας που διαθέτει και την πλουσιότερη βλάστηση και που φαίνεται με εντελώς αντίθετο φωτισμό (φωτεινή) στο εγγύς υπέρυθρο αρχικό φασματικό κανάλι.

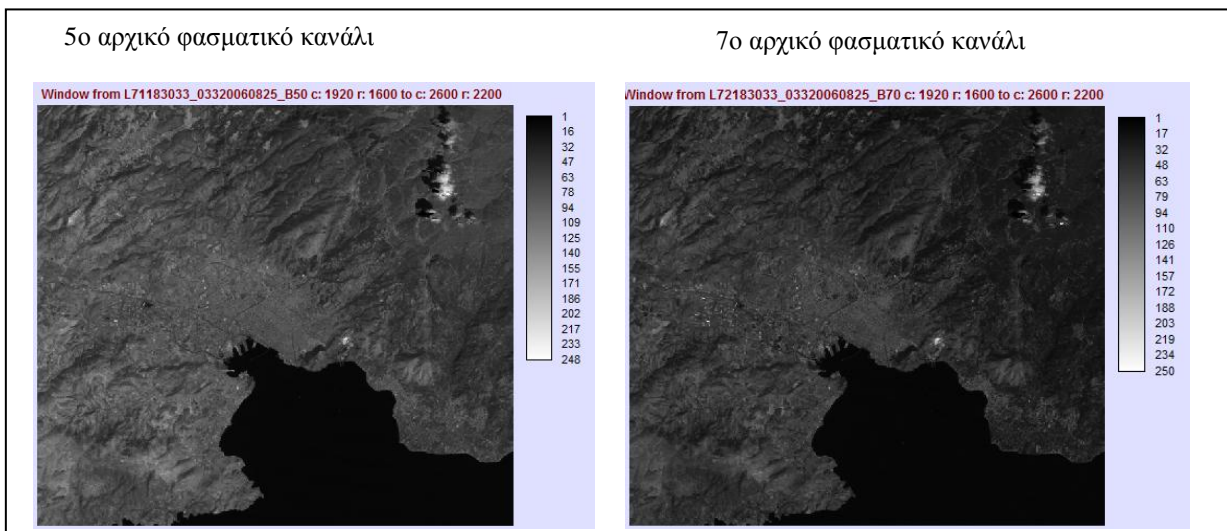
3ο φασματικό νεοκανάλι: Είναι σαφής ο εντοπισμός-διαχωρισμός του πολεοδομικού συγκροτήματος και γενικότερα των εικονοστοιχείων με υψηλές ραδιομετρικές τιμές (νέφη).



Εικόνα 7.5 Τα τρία πρώτα νεοκανάλια της δορυφορικής εικόνας Landsat TM μετά την εφαρμογή της Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες.



Εικόνα 7.6 Τα φασματικά κανάλια 1-4 του Landsat TM.



Εικόνα 7.7 Τα φασματικά κανάλια 5 & 7 του Landsat TM.

Στη συνέχεια παρατίθενται 4 πίνακες που περιέχουν και τα αριθμητικά αποτελέσματα της μεθόδου της ΑΚΣ.

Αρχικά παρουσιάζεται ο πίνακας Διακυμάνσεων - Συνδιακυμάνσεων των αρχικών φασματικών καναλιών (πίνακας 7.3), ο οποίος επειδή δεν είναι τυποποιημένος δεν δείχνει καθαρά τη συσχέτιση μεταξύ των αρχικών φασματικών καναλιών.

Var_Covar	Φ. Κ. 1	Φ. Κ. 2	Φ. Κ. 3	Φ. Κ. 4	Φ. Κ. 5	Φ. Κ. 7
Φ. Κ. 1	150,1	171,8	246,9	68,8	226,5	202,4
Φ. Κ. 2	171,8	223,3	327,1	199,4	369,0	294,4
Φ. Κ. 3	246,6	327,1	499,0	273,9	575,8	458,9
Φ. Κ. 4	68,8	199,4	273,9	879,8	645,7	349,8
Φ. Κ. 5	226,5	369,0	576,0	645,7	902,2	625,5
Φ. Κ. 7	202,4	294,4	458,9	349,8	625,5	472,3

Πίνακας 7.3 Η Διακύμανση - Συνδιακύμανση των αρχικών φασματικών καναλιών.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας των συσχετίσεων μεταξύ των αρχικών φασματικών καναλιών (πίνακας 7.4). Παρατηρούμε ισχυρές συσχετίσεις (κοντά στο 1,00) στα τρία πρώτα φασματικά κανάλια του ορατού, αλλά και μεταξύ του 5ου και 7ου υπέρυθρων φασματικών καναλιών.

Correlation	Φ. Κ. 1	Φ. Κ. 2	Φ. Κ. 3	Φ. Κ. 4	Φ. Κ. 5	Φ. Κ. 7
Φ. Κ. 1	1,00	0,94	0,90	0,19	0,62	0,76
Φ. Κ. 2	0,94	1,00	0,98	0,45	0,82	0,91
Φ. Κ. 3	0,90	0,98	1,00	0,41	0,86	0,95
Φ. Κ. 4	0,19	0,45	0,41	1,00	0,71	0,54
Φ. Κ. 5	0,62	0,82	0,86	0,71	1,00	0,96
Φ. Κ. 7	0,76	0,91	0,95	0,54	0,96	1,00

Πίνακας 7.4 Οι συσχετίσεις των αρχικών φασματικών καναλιών.

Ο πίνακας της συγκέντρωσης της διακύμανσης στα νέα φασματικά κανάλια Ν.Κ (πίνακας 7.5) παροσιάζεται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι ήδη στα δύο πρώτα νεοκανάλια έχει συγκεντρωθεί ποσοστό μεγαλύτερο από 95% της συνολικής διακύμανσης.

	N. Κ. 1	N. Κ. 2	N. Κ. 3	N. Κ. 4	N. Κ. 5	N. Κ. 7
% ΔΙΑΚΥΜ.	78,22	18,28	3,05	0,23	0,19	0,04
ΙΔΙΟΤΙΜΗ	2445.51	571.55	95.25	7,13	5,84	1,37

Πίνακας 7.5 Η συγκέντρωση της διακύμανσης στα νέα φασματικά κανάλια.

Τέλος εκτίθεται ο πίνακας που δείχνει τους γραμμικούς συνδυασμούς των αρχικών καναλιών που δημιούργησαν τα νεοκανάλια (πίνακας 7.6). Έτσι π.χ. κάθε ραδιομετρική τιμή κάποιου ρixel στο νέο κανάλι 2 δημιουργείται με την τιμή του ίδιου ρixel στο 1ο αρχικό φασματικό κανάλι επί 0,58 συν την τιμή του στο 2ο αρχικό φασματικό κανάλι επί 0,37 κ.λπ. (στήλη Ν.Κ.2).

Νέο- Φ.Κ. Αρχικό Φ.Κ.	N. Κ. 1	N. Κ. 2	N. Κ. 3	N. Κ. 4	N. Κ. 5	N. Κ. 7
Α.Φ. Κ. 1	0,70	0,58	-0,40	0,14	-0,04	0,04
Α.Φ. Κ. 2	0,89	0,37	-0,26	0,02	0,01	-0,07

A.Φ. Κ .3	0,90	0,42	-0,11	-0,01	0,04	0,02
A.Φ. Κ .4	0,75	-0,65	-0,11	-0,01	-0,01	0,00
A.Φ. Κ .5	0,98	-0,00	0,19	0,04	0,03	-0,00
A.Φ. Κ .7	0,96	0,24	0,12	-0,03	-0,01	0,00

Πίνακας 7. 6 *Ο γραμμικοί συνδυασμοί των αρχικών καναλιών που δημιούργησαν τα νεοκανάλια.*

7.4 Ο μετασχηματισμός Kauth & Thomas (Tasseled Cap)

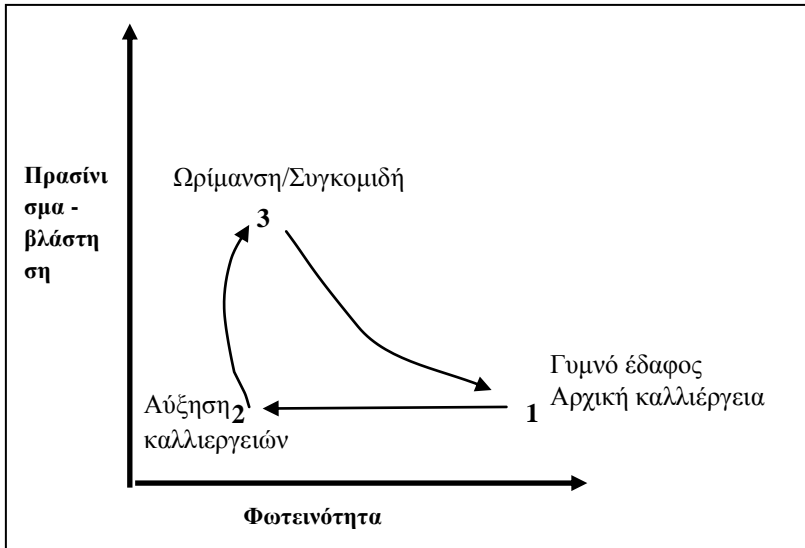
Ο μετασχηματισμός «καπέλου με θύσανο» Tasseled Cap Transform (TCT) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1976 από τους R.J. Kauth and G.S. Thomas με στόχο την ανάλυση των καλλιεργειών από δορυφορικές εικόνες Landsat. Πρόκειται για γραμμικό μετασχηματισμό των δορυφορικών δεδομένων ο οποίος προβάλλει την ραδιομετρική πληροφορία του εδάφους και της βλάστησης σε ένα επίπεδο. Εάν και αρχικά ο TCT χρησιμοποιήθηκε για τις εικόνες του Landsat MSS, σήμερα πλέον χρησιμοποιείται και στα έξι φασματικά κανάλια του Landsat TM (εκτός του θερμικού) καθώς και σε άλλους δορυφορικούς δέκτες. Ο μετασχηματισμός αυτός βελτιώνει την εμφάνιση της εικόνας συμβάλλοντας στη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων των φυτών (Kauth et al, 1976). Τρία είναι τα στάδια ανάπτυξης των φυτών μιας καλλιέργειας:

(α) το γυμνό έδαφος, (β) η υγιής βλάστηση και (γ) ωρίμανση της καλλιέργειας με το κιτρίνισμα των φύλων. Για την παρακολούθηση των σταδίων ανάπτυξης των φυτών ορίστηκαν 4 συνιστώσες για τον Landsat MSS (Campbell 1996):

- Η πρώτη συνιστώσα, ορίζεται ως η φωτεινότητα εδάφους (soil brightness) και είναι το σταθμισμένο άθροισμα όλων των καναλιών (π.χ. 6 για τον Landsat TM). Ορίζεται από εδάφη χωρίς κάλυψη βλάστησης.
- Η δεύτερη συνιστώσα, ορίζεται ως πρασίνισμα (βλάστηση/greenness) και προσδιορίζει την υγιή βλάστηση. Εξαρτάται από την φασματική υπογραφή της βλάστησης.
- Η τρίτη συνιστώσα ορίζεται το κιτρίνισμα/ωρίμανση των φυτών (yellowness) και προσδιορίζει την παρουσία υγρασίας (wetness).
- Η τέταρτη συνιστώσα αναφέρεται ως θόρυβος και ενδεχομένως να περιέχει πληροφορίες της ατμόσφαιρας, συστηματικό θόρυβο κ.ά.

Οι δύο πρώτες συνιστώσες (φωτεινότητα και βλάστηση) περιέχουν το 95% περίπου της πληροφορίας για τις καλλιέργειες σε μια εικόνα. Έτσι όλα τα στάδια ανάπτυξης των φυτών μιας καλλιέργειας μπορούν να περιγραφούν από ένα δισδιάστατο γράφημα χρησιμοποιώντας τις παραπάνω συνιστώσες. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται διαγραμματικά ο κύκλος ανάπτυξης μιας καλλιεργούμενης έκτασης (εικόνα 7.8):

- Αρχικά, κυριαρχεί η φασματική υπογραφή του εδάφους (γραμμή εδάφους/soil line) διότι στο χωράφι γίνονται όλες οι προετοιμασίες φύτευσης όπως όργωμα, σπορά, κλπ (σημείο 1).
- Καθώς η καλλιέργεια αναπτύσσεται, αυξάνεται το πράσινο χρώμα της βλάστησης ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η φωτεινότητα του εδάφους (σημείο 2).
- Ακολουθεί η ωρίμανση και η συγκομιδή της καλλιέργειας. Παρατηρείται μείωση της βλάστησης (σημείο 3) και αύξηση της φωτεινότητας του εδάφους (επιστροφή στην αρχή του διαγράμματος, στο σημείο 1).



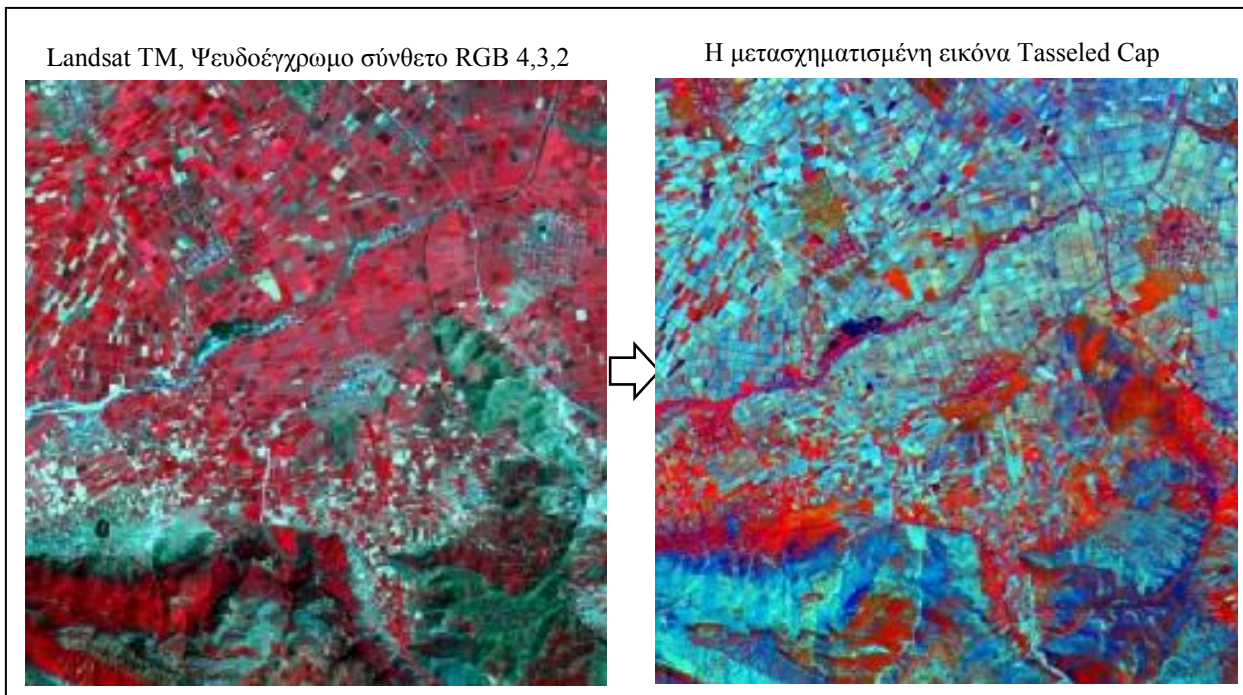
Εικόνα 7.8 Εποχιακές μεταβολές μια καλλιέργειας από τις συνιστώσες φωτεινότητα και πρασίνισμα.

Με την εφαρμογή του μετασχηματισμού TCT, δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης είτε της ανάπτυξης μιας καλλιέργειας σε όλη την καλλιεργητική περίοδο είτε του προσδιορισμού των διαφορετικών σταδίων ανάπτυξης των διαφόρων καλλιεργειών σε μια δορυφορική εικόνα.

Ένας από τους μεγαλύτερους περιορισμούς του TCT είναι ότι εφαρμόζεται σε εικόνες δορυφόρων για τους οποίους έχουν ήδη υπολογιστεί οι συντελεστές μετασχηματισμού (Landsat, MODIS, ASTER, Ikonos και SPOT). Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου οι συντελεστές μετασχηματισμού του ενός δορυφόρου έχουν εφαρμογή σε κάποιον άλλο. Για παράδειγμα οι συντελεστές του Landsat εφαρμόζονται σε δεδομένα του δορυφόρου Quickbird. Όμως, γενικά αυτή η διαδικασία δεν προτείνεται. Παράλληλα ο TCT επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (θολότητα, γωνία φωτισμού κ.α.). Αυτές οι παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, όταν χρησιμοποιείται ο TCT, ιδιαίτερα κατά τις διαχρονικές μελέτες.

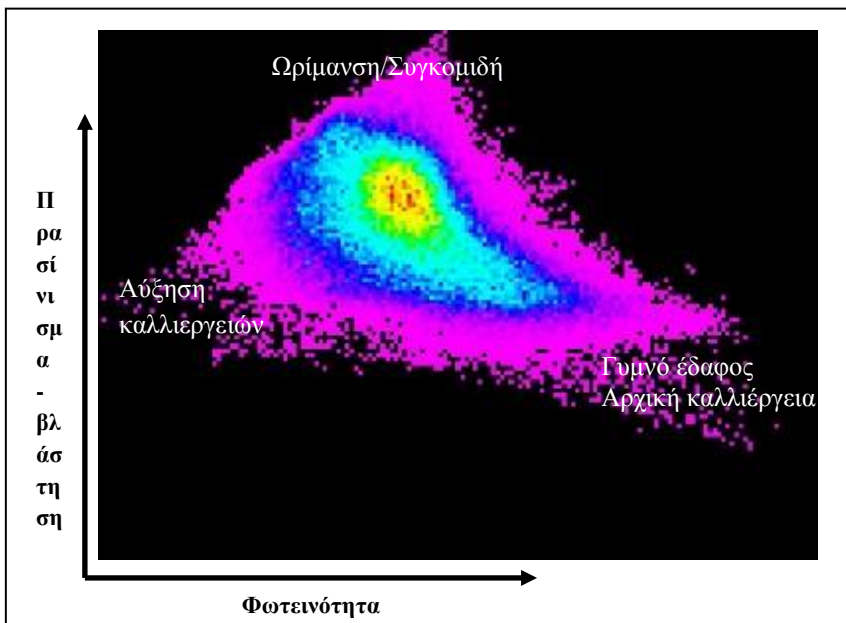
Ένα παράδειγμα εφαρμογής του TCT παρουσιάζεται στη συνέχεια. Η δορυφορική εικόνα Landsat TM4 με ημερομηνία λήψης 14/7/1997 (εικόνα 7.9) αποτυπώνει τμήμα του κάμπου της Καρδίτσας (περιοχή Φαναρίου) καθώς και τμήμα του ορεινού όγκου των Αγράφων (νότια της εικόνας). Στην ψευδοχρωματική σύνθεση (R – G – B : NIR - Red - Green) του Landsat (αριστερή εικόνα) αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα οι αρδευόμενες καλλιεργούμενες εκτάσεις (υψηλή βιομάζα). Κατά το μετασχηματισμό της εικόνας του Landsat TM, τονίζονται τρεις βασικές συνιστώσες: η φωτεινότητα, η βλάστηση και η εδαφική υγρασία. Ο χρωματικός συνδυασμός της εικόνας Tasseled Cap (RGB: 1^η συνιστώσα - 2^η συνιστώσα - 3^η συνιστώσα) φανερώνει πληροφορίες για τα διάφορα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών της εικόνας. Αντίστοιχα η χρωματική ερμηνεία έχει ως εξής (δεξιά εικόνα):

- Με κόκκινο απεικονίζονται, η άγονη γη, οι οικισμοί, το οδικό δίκτυο και το υδρογραφικό δίκτυο απουσία νερού.
- Με πράσινο ή κυανό χρώμα απεικονίζονται οι καλλιεργούμενες εκτάσεις.
- Με καφέ χρώμα απεικονίζονται τα οργωμένα χωράφια.
- Με έντονο μπλε χρώμα απεικονίζονται οι υδάτινες επιφάνειες.



Εικόνα 7.9 Ο μετασχηματισμός Tasseled Cap, του Landsat TM4, σε καλλιεργούμενες εκτάσεις στην Καρδίτσα.

Παράλληλα δημιουργείται και το δισδιάστατο γράφημα όπου περιγράφεται ο κύκλος ανάπτυξης των καλλιεργειών στην περιοχή της εικόνας. Στον άξονα των X είναι η 1η συνιστώσα (φωτεινότητα) και στον άξονα των Y η 2^η συνιστώσα (πρασίνισμα). Παρατηρείται η σχηματική απεικόνιση Tasseled Cap όπως περιγράφηκε από τους Kauth and Thomas (εικόνα 7.10).



Εικόνα 7. 10 Ο φασματικές τιμές των καλλιεργειών μιας περιοχής, στις 2 πρώτες συνιστώσες του TCT.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Ελληνική

Μηλιαρέσης, Χ. Γ., 2003, *Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση*. Αθήνα ΙΩΝ.

Ξενόγλωσση

Birth, G.S., and McVey, G. 1968. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectroradiometer. *Agronomy Journal*, 60 640-643.

Campbell, B.J., 1996. *Introduction to Remote Sensing*. London: Taylor & Francis.

Clevers, J.P.G.W., 1988. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*, 25 (1), 53-69.

Jensen, J.R., 2000. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice-Hall.

Huete, A.R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25 (3) 295-309.

Huete, A.R., Justice, C. and van Leeuwen, W., 1999. MODIS Vegetation Index (MOD13) Algorithm Theoretical Basis Document, NASA Goddard Space Flight Center, http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.

Kauth, R.J. and Thomas, G.S., 1976. The Tasseled Cap - A Graphic Description of the Spectral Temporal Development of Agricultural Crops As Seen By Landsat. Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 41-51.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. and Sorooshian, A., 1994. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index, *Remote Sensing of Environment*, 48 (2) 119-126.

Ravi P. Gupta, Reet K. Tiwari, Saini, V. and Srivastava, N. 2013. A Simplified Approach for Interpreting Principal Component Images. *Advances in Remote Sensing*, 2, 111-119.

Rouse, J.W. Jr., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A. and Harlan, J.C. 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation, NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, MD.

Richards, A.J., 1986, *Remote Sensing Digital Image Analysis-An Introduction*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Russell, B., 2011. A simple principal component analysis example, http://www.cgg.com/technicaldocuments/cggv_0000014063.pdf

Richardson, A.J. and Wiegand, C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil back-ground information. *Photogrammetry of Engineering and Remote Sensing* 43, 1541-1552.

Silleos, N., Alexandridis, T., Gitas, I. and Perakis, K., 2006 Vegetation indices: 30 years advances in biomass estimation and vegetation monitoring. *Geocarto International*, 21 (4), p.21.

Κεφάλαιο 8 Φίλτρα

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης

Σύνοψη

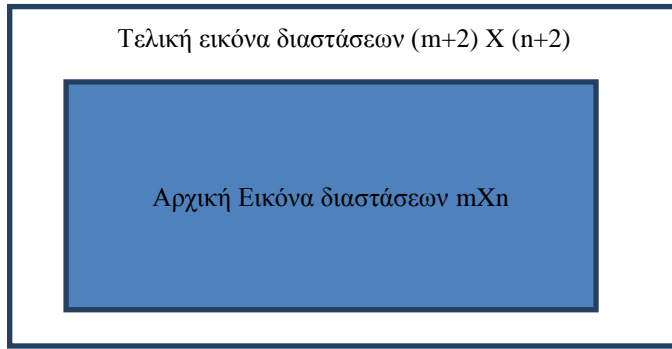
Στην αρχή του κεφαλαίου εκτίθενται αναλυτικά η δομή των φίλτρων, ο τρόπος προσπέλασης της ψηφιακής εικόνας από τα φίλτρα, και η μαθηματική πράξη της συνέλιξης που χαρακτηρίζει κυρίως τη λειτουργία των φίλτρων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα φίλτρα «χαμηλής προσπέλασης» που μειώνουν τις έντονες χρωματικές αντιθέσεις στην ψηφιακή εικόνα που είναι το φίλτρο της μέσης τιμής και το φίλτρο Gauss, το φίλτρο της διαμέσου και το φίλτρο της μέγιστης συχνότητας, το φίλτρο της ελάχιστης συχνότητας και το φίλτρο του προσαρμοσμένου τετραγώνου. Αντίθετα τα φίλτρα όξυνσης όπως το φίλτρο Laplace, το φίλτρο όξυνσης το αντίστοιχο με το φίλτρο της μέσης τιμής τα φίλτρα διανύσματος κλίσης, και τα φίλτρα ανίχνευσης γραμμών ή ακμών, που εκτίθενται στη συνέχεια, τονίζουν σύνολα από pixels τα οποία έχουν σημαντική ραδιομετρική διαφοροποίηση με κάποια γειτονικά τους. Τα παραπάνω θεωρητικά τμήματα πλαισιώνονται από τμήματα δορυφορικών καναλιών στα οποία έχουν εφαρμοστεί τα αντίστοιχα φίλτρα.

8.1 Γενικά

Τα χωρικά φίλτρα αποτελούν μία από τις δύο τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων με σκοπό τον διαχωρισμό ειδικών ομάδων (ραδιομετρικών τιμών) εικονοστοιχείων που αφορούν κάποιες συγκεκριμένες καλύψεις γης και μάλιστα σε συγκεκριμένη κλίμακα. Η άλλη τεχνική συνίσταται από τον διαχωρισμό της εικόνας στις χωρικές της συχνότητες και επιτυγχάνεται με τον μετασχηματισμό Fourier (Mather 1987). Τα χωρικά φίλτρα -σε αντίθεση με τις σημειακές ραδιομετρικές διορθώσεις που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5 και που επενεργούν σε κάποιο μεμονωμένο pixel, ανεξάρτητα από τις ραδιομετρικές τιμές των γειτονικών του εικονοστοιχείων- αποτελούνται από ένα ορθογώνιο (συνήθως τετράγωνο) πλαίσιο (παράθυρο) το οποίο σαρώνει την εικόνα, οριζόντια. Συγχρόνως σε κάθε θέση που βρίσκεται (που αντιστοιχεί σε κάθε pixel της εικόνας), εκτελούνται προκαθορισμένοι υπολογισμοί βάσει των ραδιομετρικών τιμών των γειτονικών εικονοστοιχείων του καθορισμένου ως κεντρικού εικονοστοιχείου του πλαισίου-φίλτρου. Το κεντρικό εικονοστοιχείο αποτελεί το κέντρο του φίλτρου που γι' αυτό το λόγο το φίλτρο είναι μονών διαστάσεων, συνήθως 3X3 ή 5X5 ή και 7X7. Μετά τους προκαθορισμένους υπολογισμούς το κεντρικό εικονοστοιχείο αντικαθίσταται (ή όχι μερικές φορές) από την τιμή η οποία υπολογίστηκε βάσει των ραδιομετρικών τιμών των εικονοστοιχείων που απαρτίζουν το φίλτρο, δηλ. ουσιαστικά βάσει των ραδιομετρικών τιμών των γειτονικών του εικονοστοιχείων. Η κίνηση του πλαισίου φίλτρου είναι οριζόντια με τρόπο ώστε να σαρώνει γραμμή-γραμμή την εικόνα αρχίζοντας από το εικονοστοιχείο στο επάνω αριστερό άκρο της εικόνας το οποίο και έχει συντεταγμένες κατά γραμμή και στήλη (0,0).

Το τεχνικό πρόβλημα που προκύπτει από την συγκεκριμένη μεθοδολογία έγκειται στην επίτευξη της σάρωσης των ακραίων γραμμών και στηλών της εικόνας. Εάν θεωρήσουμε π.χ. ότι κάποιο pixel της πρώτης στήλης πρέπει να διορθωθεί με την εφαρμογή κάποιου φίλτρου, πρέπει αναγκαστικά να προσθέσουμε μια στήλη πιο αριστερά από την πρώτη στήλη της εικόνας κατά τρόπο ώστε το πλαίσιο-φίλτρο που έχει ως κεντρικό του pixel κάποιο pixel της πρώτης στήλης να περιέχει ραδιομετρικές τιμές και στην αριστερή του στήλη (η οποία όμως είναι έξω από την εικόνα) για να προχωρήσει στους προκαθορισμένους υπολογισμούς.

Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την παραδοχή ότι σχεδόν πάντα υπάρχει μια χωρική συνέχεια στις ραδιομετρικές τιμές των εικονοστοιχείων μιας δορυφορικής εικόνας και άρα με μια ορισμένη προσέγγιση μπορούμε να προσθέσουμε αριστερά και δεξιά δύο στήλες στην εικόνα μας, και το ίδιο, δύο γραμμές επάνω και κάτω ίδιες ακριβώς με τις αρχικές ακραίες γραμμές και στήλες της εικόνας κατά τρόπον ώστε οι αρχικές διαστάσεις της εικόνας από $m \times n$ να γίνουν $(m+2) \times (n+2)$. Με τον τρόπο αυτό εάν η σάρωση της καινούργιας εικόνας με το φίλτρο που επιλέχθηκε, αρχίσει από την δεύτερη στήλη και δεύτερη γραμμή και τελειώσει στην προτελευταία γραμμή και προτελευταία στήλη της εικόνας, τότε η αρχική εικόνα έχει σαρωθεί πλήρως και οι ραδιομετρικές τιμές όλων των pixels της αρχικής εικόνας έχουν υποστεί την επιθυμητή τροποποίηση μέσω του επιλεγμένου φίλτρου.



Σχήμα 8.1 Η μετασχηματισμένη εικόνα με επιπλέον δύο γραμμές και δύο στήλες για την εφαρμογή φίλτρων.

Η διαδικασία εφαρμογής των φίλτρων σε μια ψηφιακή εικόνα έχει άμεση σχέση με την εφαρμογή των φίλτρων σε ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα το οποίο έχει την μορφή μιας συνάρτησης $\psi(t)$ με μεταβλητή τον χρόνο και στην οποία ενεργεί το φίλτρο υπό την μορφή της συνάρτησης $\varphi(t)$ και την μεταβάλλει κατά ένα προκαθορισμένο τρόπο ώστε να προκύψει η τελική συνάρτηση $\omega(t)$, δηλαδή:

$$\psi(t) \xrightarrow{\varphi(t)} \omega(t) \quad (8.1)$$

Η μαθηματική πράξη που εκφράζει την επίδραση του (προκαθορισμένου) φίλτρου $\varphi(t)$ επάνω στην συνάρτηση $\psi(t)$ με τελικό αποτέλεσμα την συνάρτηση $\omega(t)$ λέγεται συνέλιξη (convolution) και εκφράζεται μαθηματικά για τις συνεχείς συναρτήσεις ως το ολοκλήρωμα συνέλιξης των συναρτήσεων $\psi(t)$ και $\varphi(t)$ με τη μορφή

$$\omega(t) = \int \psi(t)\varphi(t - \tau)d\tau \quad (8.2)$$

και για τις διακριτές συναρτήσεις υπό μορφή αθροισμάτων

$$\omega(t) = \sum \psi(t)\varphi(t - \tau) \quad (8.3)$$

όπου τα όρια της ολοκλήρωσης και αντίστοιχα του αθροίσματος εξαρτώνται από το πεδίο ορισμού της συνάρτησης $\varphi(t)$.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση της ψηφιακής εικόνας και επειδή επιθυμούμε το φίλτρο, δηλ. η συνάρτηση φ να διατρέξει όλη την εικόνα (της οποίας οι ραδιομετρικές τιμές των pixels δίνονται από την συνάρτηση $\psi(r, s)$ των δύο μεταβλητών στο χώρο των δύο διαστάσεων κατά x και κατά y , αντί στο χρόνο t της αρχικής συνάρτησης $\psi(t)$ του σήματος) το παραπάνω ολοκλήρωμα γίνεται

$$\omega(x, y) = \iint \psi(r, s)\varphi(x - r, y - s)drds \quad (8.4)$$

Και το άθροισμα μετατρέπεται σε διπλό άθροισμα

$$\omega(x, y) = \sum \sum \psi(r, s)\varphi(x - r, y - s) \quad (8.5)$$

με όρια, εάν οι δείκτες της θέσης του κεντρικού pixel του φίλτρου είναι i, j

για το φίλτρο 3X3 από $i-1$ έως $i+1$ και από $j-1$ έως $j+1$

για το φίλτρο 5X5 από $i-2$ έως $i+2$ και από $j-2$ έως $j+2$

για το φίλτρο 7X7 από $i-3$ έως $i+3$ και από $j-3$ έως $j+3$.

Η πράξη της συνέλιξης έχει τις εξής σημαντικές ιδιότητες:

Αντιμεταθετικότητα, Γραμμικότητα, Προσεταιριστικότητα και Επιμεριστικότητα, (Elgammal 2015).

Στη συνέχεια θα περιγραφούν μερικά από τα βασικά φίλτρα στην επεξεργασία ψηφιακών εικόνων και κατά συνέπεια στην επεξεργασία των φασματικών καναλιών μιας δορυφορικής εικόνας, και θα εκτεθούν δορυφορικές εικόνες-παραδείγματα εφαρμογής των φίλτρων αυτών.

8.2 Τα φίλτρα «χαμηλής προσπέλασης»

Τα κυρίως φίλτρα «λείανσης» της ραδιομετρικής οξύτητας της εικόνας, κυριότερα από τα οποία είναι το φίλτρο της μέσης τιμής και το φίλτρο Gauss, το φίλτρο της διαμέσου και το φίλτρο της μέγιστης συχνότητας, το φίλτρο της ελάχιστης συχνότητας και το φίλτρο του προσαρμοσμένου τετραγώνου. Τα φίλτρα «χαμηλής προσπέλασης» ουσιαστικά μειώνουν τις οξείες χρωματικές αντιθέσεις τόνου στην ψηφιακή εικόνα.

8.2.1 Το φίλτρο της μέσης τιμής

Το φίλτρο της μέσης τιμής ίσως είναι το πιο γνωστό και το πιο διαδεδομένο φίλτρο «λείανσης» των ραδιομετρικών διαφορών της ψηφιακής εικόνας.

Η γενική εξίσωση της συνέλιξης σε διακριτή μορφή

$$\omega(x, y) = \sum \sum \psi(r, s) \varphi(x - r, y - s) \quad (8.6)$$

γίνεται:

$$\omega(x, y) = \sum_{r=1}^k \sum_{s=1}^l \psi(r, s) \varphi(r, s) \quad (8.7)$$

Όπου $\omega(x, y)$ είναι η μετασηματισμένη ραδιομετρική τιμή της ψηφιακής εικόνας στην κεντρική θέση του φίλτρου, το οποίο βρίσκεται στη θέση x, y

Οι δείκτες r, s για ένα φίλτρο 3X3 παίρνουν τις τιμές από 1 έως 3

για ένα φίλτρο 5X5 παίρνουν τις τιμές από 1 έως 5

για ένα φίλτρο 7X7 παίρνουν τις τιμές από 1 έως 7

και η συνάρτηση του φίλτρου $\varphi(r, s)$ είναι ίση με $1/(k \times l)$ για ένα φίλτρο διαστάσεων $k \times l$, και η οποία στην περίπτωση του φίλτρου 3X3 είναι ίση με $1/9$.

Έτσι το φίλτρο της μέσης τιμής στην περίπτωση διαστάσεων 3X3 έχει την μορφή του πίνακα

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Και ο τύπος

$$\omega(x, y) = \sum_{r=1}^k \sum_{s=1}^l \psi(r, s) \varphi(r, s) \quad (8.8)$$

Γίνεται

$$\omega(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{r=1}^3 \sum_{s=1}^3 \psi(r, s) \quad (8.9)$$

Όπου $\psi(r, s)$ η ραδιομετρική τιμή του pixel στη θέση (r, s) πριν την εφαρμογή του φίλτρου.

Η τελευταία εξίσωση γίνεται

$$\omega(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{r=1}^3 [\psi(r, 1) + \psi(r, 2) + \psi(r, 3)] = \frac{1}{9} [\sum_{r=1}^3 \psi(r, 1) + \sum_{r=1}^3 \psi(r, 2) + \sum_{r=1}^3 \psi(r, 3)] = \frac{1}{9} [\psi(1,1) + \psi(2,1) + \psi(3,1) + \psi(1,2) + \psi(2,2) + \psi(3,2) + \psi(1,3) + \psi(2,3) + \psi(3,3)],$$

Ουσιαστικά πρόκειται για την μέση τιμή των 9 ραδιομετρικών τιμών επάνω στις οποίες τοποθετείται το φίλτρο όταν το κεντρικό του pixel βρίσκεται στην θέση x, y .

Εάν για παράδειγμα όταν το φίλτρο της μέσης τιμής βρίσκεται στη θέση ενός πλαισίου 3X3 pixels της εικόνας με ραδιομετρικές τιμές

23	27	24
26	44	28
22	24	25

τότε η τιμή του κεντρικού pixel 44 θα αντικατασταθεί με την μέση τιμή όλων των τιμών του πλαισίου δηλ. $243/9 = 27$.

Στη συνέχεια εκτίθενται η αρχική εικόνα του παγχρωματικού καναλιού (κανάλι 8 με την μικρότερη χωρική διακριτική ικανότητα 15μ) της πολυφασματικής εικόνας του δορυφόρου Landsat TM της 16^{ης} 8^{ου}

2006, και η αντίστοιχη φιλτραρισμένη εικόνα με το φίλτρο της μέσης τιμής διαστάσεων 3X3 και στη συνέχεια η αντίστοιχη εικόνα μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μέσης τιμής 7X7 για να γίνει εμφανές το «θόλωμα» που προκαλεί.



Εικόνα 8.1 Η αρχική εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.



Εικόνα 8.2 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μέσης τιμής διαστάσεων 3 X 3 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.



Εικόνα 8.3 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μέσης τιμής διαστάσεων 7 X 7 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

Το φίλτρο της μέσης τιμής είναι κατάλληλο για την εξάλειψη του τυχαίου θορύβου (pixels που εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλές ή χαμηλές ραδιομετρικές τιμές σε σχέση με τα γειτονικά τους αλλά έχει κάποια μειονεκτήματα:

1ο Η μέση τιμή ως γνωστό επηρεάζεται ιδιαίτερα από ακραίες τιμές και άρα ραδιομετρικές τιμές, στα όρια του πλαισίου – φίλτρου, πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές θα επηρεάσουν την μέση τιμή «τραβώντας» την προς την τιμή τους με αποτέλεσμα στις περιοχές που υπάρχουν τέτοιες τιμές να εμφανίζονται πιο φωτεινές ή πιο σκοτεινές από τις αρχικές περιοχές μετά την εφαρμογή του φίλτρου.

2ο Εάν υπάρχουν όρια με διαφορετική φωτεινότητα (ακμές ή ακόμα και λεπτές γραμμές) που περιγράφουν ή χαρακτηρίζουν την γεωμετρία κάποιων αντικειμένων ή τμημάτων καλύψεων γης (αγροτεμάχια, κτίρια, κ.ά.) επηρεάζονται από το φίλτρο με αποτέλεσμα να αμβλύνονται πολύ ή ακόμη και να εξαφανίζονται.

8.2.2 Το φίλτρο της διαμέσου τιμής (median filter)

Τα παραπάνω μειονεκτήματα καλύπτει το φίλτρο της διαμέσου τιμής (median filter) το οποίο παρόλο που απαιτεί περισσότερο χρόνο υπολογισμού στον Η/Υ, διατηρεί γενικότερα καλύτερα κάποιες λεπτομέρειες στην εικόνα και κυρίως δεν επηρεάζεται από πολύ ακραίες τιμές.

Ωστόσο, ενώ το φίλτρο της διαμέσου 3X3 αντικαθιστά το κεντρικό pixel με την διάμεσο τιμή του φίλτρου πλαισίου για το φίλτρο της διαμέσου διαστάσεων 5X5 στο λογισμικό Idrisi Selva εφαρμόζεται η παρακάτω μέθοδος.

Δεν αντικαθίσταται το κεντρικό pixel με την διάμεσο ραδιομετρική τιμή των 25 pixels που το περιβάλλουν αλλά με την διάμεσο

1ο της κεντρικής τιμής του πλαισίου – φίλτρου 5X5

2ο τη διάμεσο των ραδιομετρικών τιμών του πλαισίου- φίλτρου όπως στο παρακάτω σχήμα (οι τιμές που λαμβάνονται υπ' όψη σημειώνονται με X).

X				X
	X		X	
	X		X	
X				X

3^ο την διάμεσο των ραδιομετρικών τιμών του πλαισίου- φίλτρου όπως στο παρακάτω σχήμα (οι τιμές που λαμβάνονται υπ' όψη σημειώνονται με X).

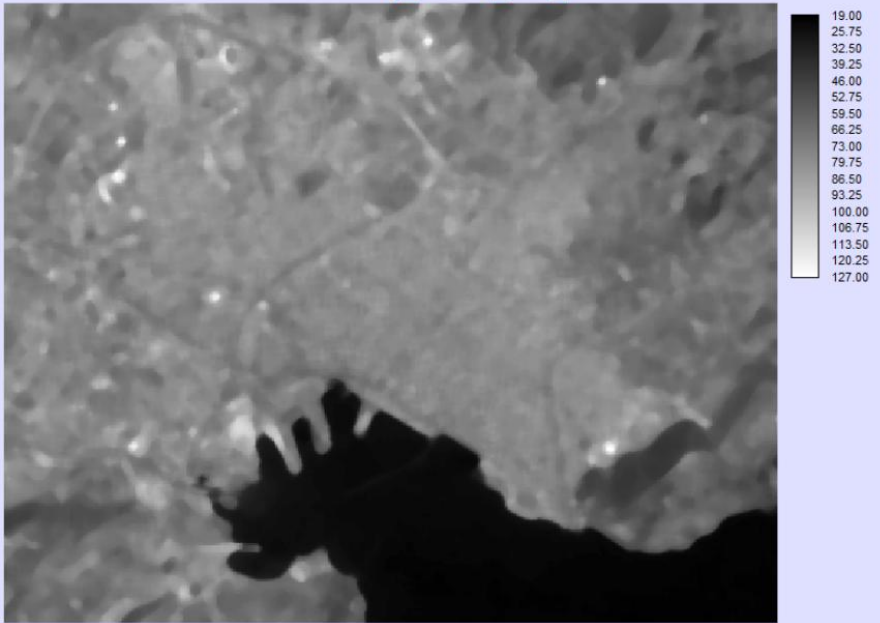
		X		
		X		
X	X		X	X
		X		
		X		

Στη συνέχεια παρουσιάζονται η φιλτραρισμένη εικόνα με το φίλτρο της διαμέσου τιμής διαστάσεων 3X3 και στη συνέχεια για να γίνει εμφανές το «θόλωμα» με την διατήρηση των ακμών που προκαλεί η αντίστοιχη εικόνα μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μέσης τιμής 7X7.



Εικόνα 8.4 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου της διαμέσου τιμής διαστάσεων 3 X 3 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

7 x 7 Median filter of city_Volos_ch8_25082006



Εικόνα 8.5 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου της διαμέσου τιμής διαστάσεων 7 X 7 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

8.2.3 Το φίλτρο του Gauss

Στην κατηγορία των φίλτρων λείανσης ανήκει και το φίλτρο χαμηλής προσπέλασης του Gauss το οποίο λειτουργεί ως ένα φίλτρο συνέλιξης πρώτα κατά x και μετά κατά y χάρις σε μία από κάποιες σημαντικές ιδιότητες που έχει.

Οι βασικές ιδιότητες του φίλτρου Gauss είναι:

- Είναι κυκλικά συμμετρικό δηλαδή ενεργεί με τον ίδιο τρόπο κατά x και κατά y.
- Είναι γραμμικό φίλτρο χαμηλής προσπέλασης.
- Απαιτεί μικρότερο χρόνο υπολογισμού διότι μεγαλύτερα φίλτρα δύο διαστάσεων ενεργούν με τον ίδιο τρόπο με μονοδιάστατα φίλτρα (της μιας κι κατόπιν της άλλης διάστασης).
- Επιτυγχάνει μεγαλύτερη λείανση (smoothing) της εικόνας για μεγαλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης σ .
- Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό για την εξάλειψη θορύβου ο οποίος ακολουθεί (ή περίπου) κανονική κατανομή.
- Τα βάρη που προσαρτώνται στο φίλτρο – πλαίσιο διατηρούν περισσότερο από άλλα φίλτρα τις ακμές των αντικειμένων στην εικόνα (μειώνουν το θόλωμα των ακμών).

Ο τύπος της κανονικής (ή Gauss) κατανομής μιας συνάρτησης $f(x)$ μιας μεταβλητής x είναι:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8.10)$$

ενώ στην περίπτωση της διδιάστατης χωρικής κατανομής με μεταβλητές τις χωρικές συντεταγμένες (x,y) ο τελευταίος τύπος γίνεται

$$f(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (8.11)$$

στην περίπτωση που η διδιάστατη κατανομή έχει μέσες τιμές κατά x και κατά y ίσες με μηδέν. Στην περίπτωση δε μιας διδιάστατης κατανομής με τυπική απόκλιση $\sigma=1$ ένα φίλτρο-πλαίσιο κατά Gauss με προσεγγιστικές τιμές είναι το:

1/273 *

1	4	7	4	1
4	16	26	16	4
7	26	41	26	7
4	16	26	16	4
1	4	7	4	1

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εφαρμογές του φίλτρου του Gauss 3X3 και 7X7 στην αρχική εικόνα του παγχρωματικού καναλιού (κανάλι 8 με την μικρότερη χωρική διακριτική ικανότητα 15μ.) της πολυφασματικής εικόνας του δορυφόρου Landsat TM της 16-8-2006.



Εικόνα 8.6 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου του Gauss διαστάσεων 3 X 3 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.



Εικόνα 8.7 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου του Gauss διαστάσεων 7 X 7 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

8.2.4 Το φίλτρο της ελάχιστης (ραδιομετρικής) τιμής

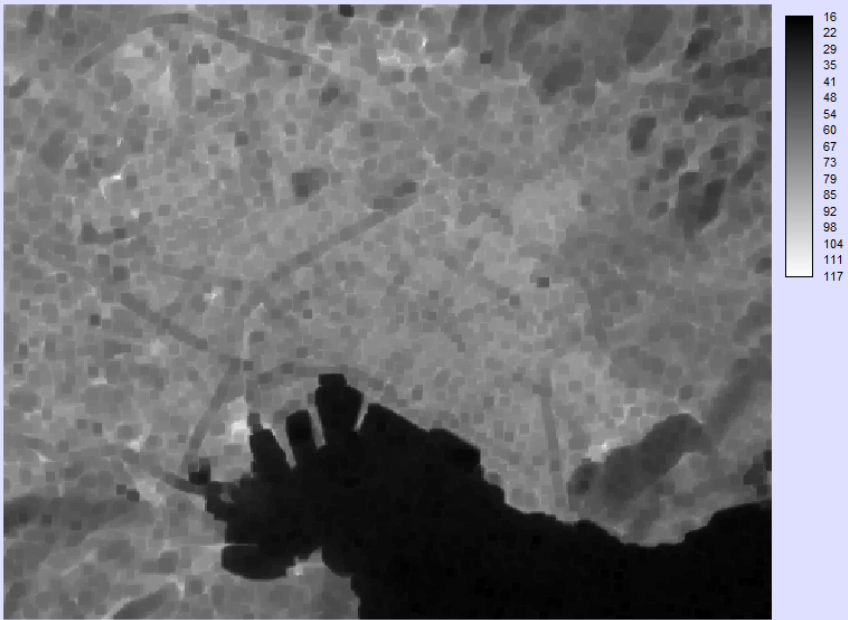
Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο εικόνες από το ίδιο παγχρωματικό κανάλι με την ίδια ημερομηνία λήψης μετά την εφαρμογή του φίλτρου της ελάχιστης (ραδιομετρικής) τιμής το οποίο αντικαθιστά το κεντρικό pixel του πλαισίου –φίλτρου στη θέση που βρίσκεται με την ελάχιστη ραδιομετρική τιμή μεταξύ των τιμών των pixels του πλαισίου – φίλτρου. Εδώ επιτυγχάνεται η καλύτερη οριοθέτηση των σκοτεινότερων περιοχών και μία σχετική ομαδοποίηση (σε περιορισμένη έκταση) των pixels χαμηλών ραδιομετρικών τιμών.



Εικόνα 8.8 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου της ελάχιστης ραδιομετρικής τιμής διαστάσεων 3 X 3 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

Παρακάτω, η ίδια εικόνα με την εφαρμογή ενός 5X5 φίλτρου της ελάχιστης τιμής.

5 x 5 Minimum filter of city_Volos_ch8_25082006

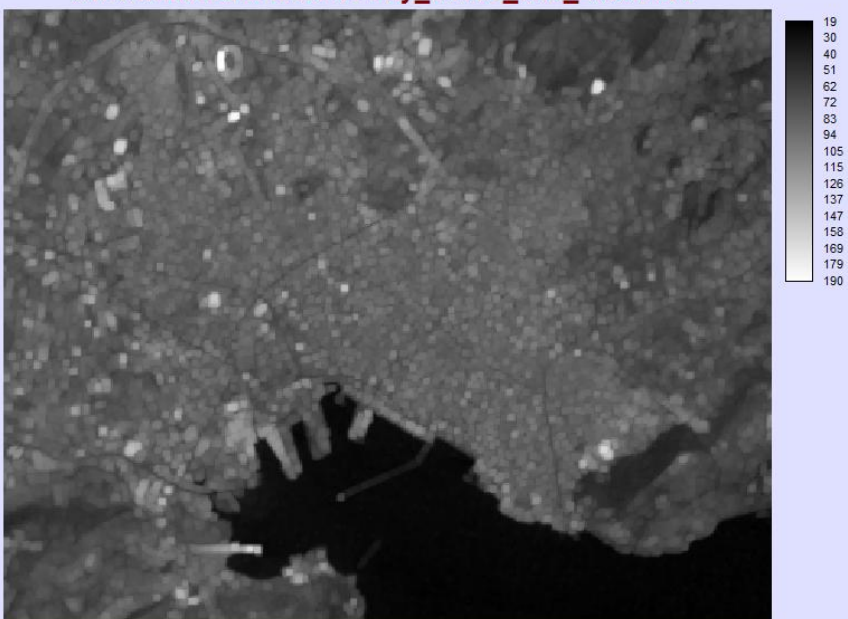


Εικόνα 8.9 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου της ελάχιστης ραδιομετρικής τιμής διαστάσεων 5 X 5 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

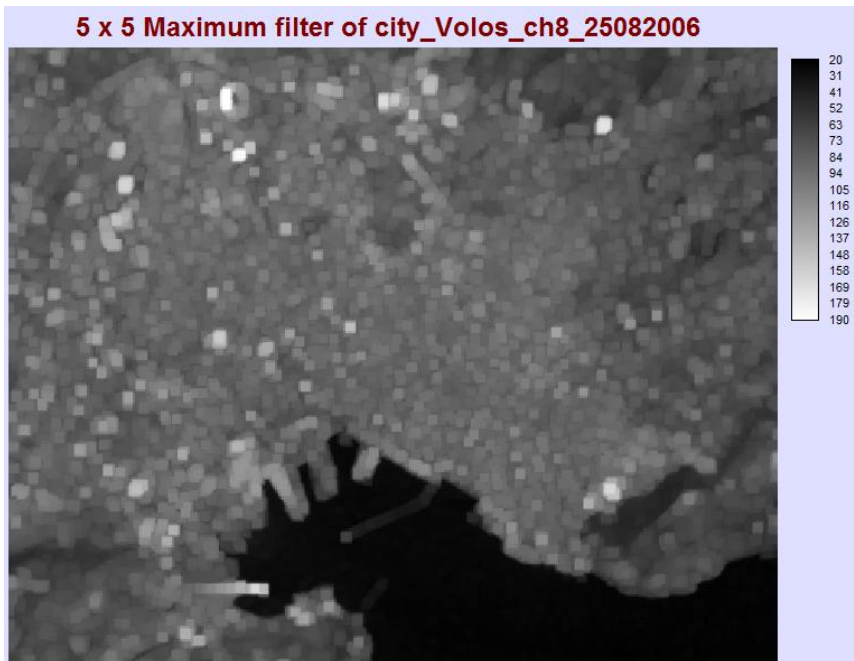
8.2.5 Το φίλτρο της μέγιστης ραδιομετρικής τιμής

Αντίστοιχο είναι και το φίλτρο της μέγιστης ραδιομετρικής τιμής στις επόμενες δύο εικόνες (με αρχική την ίδια όπως και προηγουμένως) που όμως τονίζει αντίστοιχα τις πιο φωτεινές περιοχές. Χαρακτηριστικά και στην ΒΔ περιοχή της εικόνας και στο ύψος της περιφερειακής οδού του Βόλου διακρίνεται καθαρότατα το Πανθεσσαλικό Στάδιο ιδιαίτερα μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μέγιστης ραδιομετρικής τιμής (ενώ προηγουμένως κατά την εφαρμογή του φίλτρου της ελάχιστης τιμής είχε σχεδόν χαθεί).

3 x 3 Maximum filter of city_Volos_ch8_25082006



Εικόνα 8.10 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μέγιστης ραδιομετρικής τιμής διαστάσεων 3 X 3 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.



Εικόνα 8.11 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μέγιστης ραδιομετρικής τιμής διαστάσεων 5 X 5 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

8.2.6 Το προσαρμοσμένο φίλτρο – πλαίσιο (Adaptive box)

Ουσιαστικά πρόκειται για ένα πλαίσιο – φίλτρο στο οποίο ο χρήστης εισάγει κάποιες συνθήκες οι οποίες εάν πληρούνται τότε το κεντρικό pixel αντικαθίσταται ή με μηδέν ή με την μέση τιμή των υπολοίπων pixels του πλαισίου – φίλτρου εφόσον αυτή δεν είναι έξω από το διάστημα των τυπικών αποκλίσεων από την μέση τιμή που ορίζει ο χρήστης. Οι συνθήκες που πρέπει να πληρούνται για να πραγματοποιηθεί η αντικατάσταση αυτή είναι 1) η κεντρική ραδιομετρική τιμή του πλαισίου να είναι έξω από το διάστημα(των $\pm k$ τυπικών αποκλίσεων που καθορίζει ο χρήστης όπου $k = 1,2,3$) και

2) Η διαφορά μεταξύ της ραδιομετρικής τιμής του κεντρικού pixel και της μέσης τιμής των υπολοίπων pixels του φίλτρου να είναι μεγαλύτερη από κάποια τιμή διαφοράς που προκαθορίζεται από τον χρήστη.

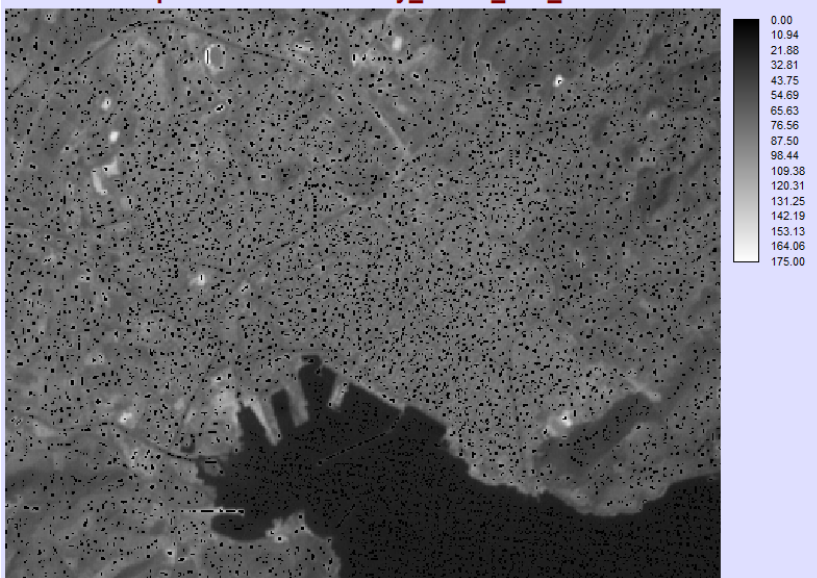
Οι παρακάτω εικόνες προέρχονται από την εφαρμογή των 3X3 και 7X7 προσαρμοσμένου φίλτρου στην εικόνα του Βόλου της Landsat TM της 16-8-2006.

3 x 3 Adaptive box filter of city_Volos_ch8_25082006



Εικόνα 8.12 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του προσαρμοσμένου φίλτρου διαστάσεων 3 X 3 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

7 x 7 Adaptive box filter of city_Volos_ch8_25082006



Εικόνα 8.13 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του προσαρμοσμένου φίλτρου διαστάσεων 7 X 7 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

8.2.7 Το φίλτρο της μέγιστης συχνότητας (mode filter)

Το φίλτρο της μέγιστης συχνότητας (mode filter) αντικαθιστά την ραδιομετρική τιμή του κεντρικού pixel με την τιμή που εμφανίζεται τις περισσότερες φορές (που έχει την μέγιστη συχνότητα) μέσα στο φίλτρο – πλαίσιο των 3X3 ή 5X5 ή 7X7 pixels.



Εικόνα 8.14 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μέγιστης συχνότητας διαστάσεων 3 X 3 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.



Εικόνα 8.15 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου της μέγιστης συχνότητας διαστάσεων 5 X 5 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

8.3 Τα φίλτρα «υψηλής προσπέλασης»

Σε αντίθεση με τα φίλτρα λείανσης των ψηφιακών εικόνων τα φίλτρα όξυνσης τονίζουν τα στοιχεία ή σύνολα από pixels (γραμμές, ακμές, όρια μεταξύ επιφανειών διαφορετικής ραδιομετρίας, ακόμη και σημειακές διαφορές) τα οποία έχουν σημαντική ραδιομετρική διαφοροποίηση με κάποια γειτονικά τους.

Τέτοια στοιχεία της εικόνας μπορεί να προέρχονται από:

- Απότομη αλλαγή των ραδιομετρικών τιμών.

- Ριζική αλλαγή χρήσεων-καλύψεων γης και μάλιστα με ισχυρές διαφορές φωτεινότητας.
- Σημαντικές αλλαγές στον φωτισμό περιοχών της εικόνας (π.χ. σκίαση).
- Εμφάνιση τυχαίου ή συστηματικού θορύβου.

Συγχρόνως όμως με τον τονισμό των περιοχών που εμφανίζουν ραδιομετρικές ασυνέχειες, υποβαθμίζουν οπτικά τις ελαφρά διαφοροποιημένες ραδιομετρικά περιοχές.

8.3.1 Το φίλτρο Laplace

Εάν θεωρήσουμε ότι η συνάρτηση των ραδιομετρικών τιμών $r(x,y)$ στην εικόνα μας είναι διακριτή κατά x και κατά y και έχει μερικές παραγώγους κατά x και κατά y τότε αυτές θα προσεγγίζονται από τις παρακάτω διαφορές:

$$\frac{\partial r(x,y)}{\partial x} = r(x + 1, y) - r(x, y)$$

$$\frac{\partial r(x,y)}{\partial y} = r(x, y + 1) - r(x, y)$$

με δεύτερες παραγώγους τις συναρτήσεις

$$\frac{\partial^2 r(x,y)}{\partial x^2} = r(x + 1, y) + r(x - 1, y) - 2r(x, y)$$

$$\frac{\partial^2 r(x,y)}{\partial y^2} = r(x, y + 1) + r(x, y - 1) - 2r(x, y)$$

Ισότροπο φίλτρο χαρακτηρίζεται ένα τέτοιο που η επίδρασή του είναι ανεξάρτητη από την διεύθυνση της ραδιομετρικής ασυνέχειας της ψηφιακής εικόνας στην οποία εφαρμόζεται. Η Λαπλασιανή μίας ραδιομετρικής συνάρτησης $r(x, y)$ (στην περίπτωση των φασματικών καναλιών κάποιου δορυφόρου) στο σημείο (x, y) , χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα αυτή είναι αριθμητικό μέγεθος και δίνεται από τον τύπο:

$$\nabla^2 r(x, y) = \frac{\partial^2 r(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r(x,y)}{\partial y^2} =$$

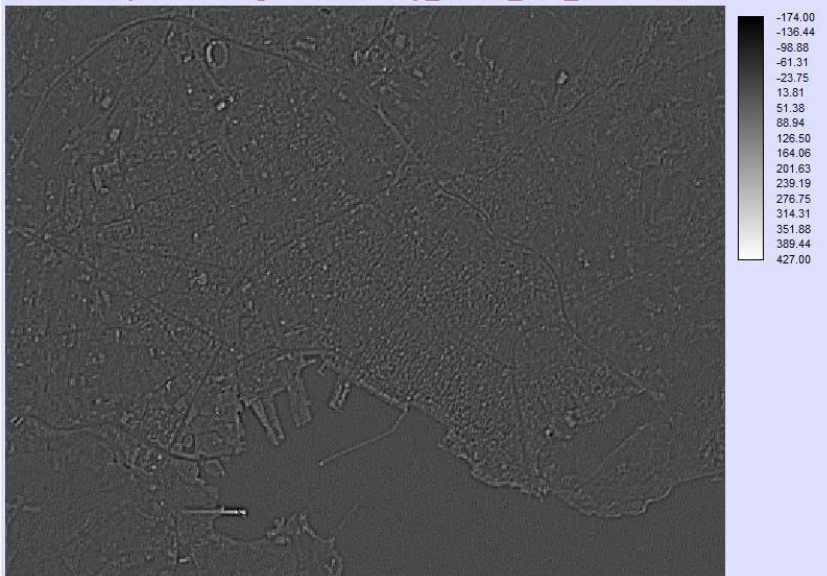
$$= r(x + 1, y) + r(x - 1, y) + r(x, y + 1) + r(x, y - 1) - 4 r(x, y).$$

Στη συνέχεια παρατίθενται τα φίλτρα – πλαίσια Λαπλασιανής 3X3 και 5X5 που προτείνονται από το λογισμικό Idrisi Selva και οι αντίστοιχες φιλτραρισμένες εικόνες με το φίλτρο της Λαπλασιανής διαστάσεων 3X3 (Niblack 1986) και 7X7.

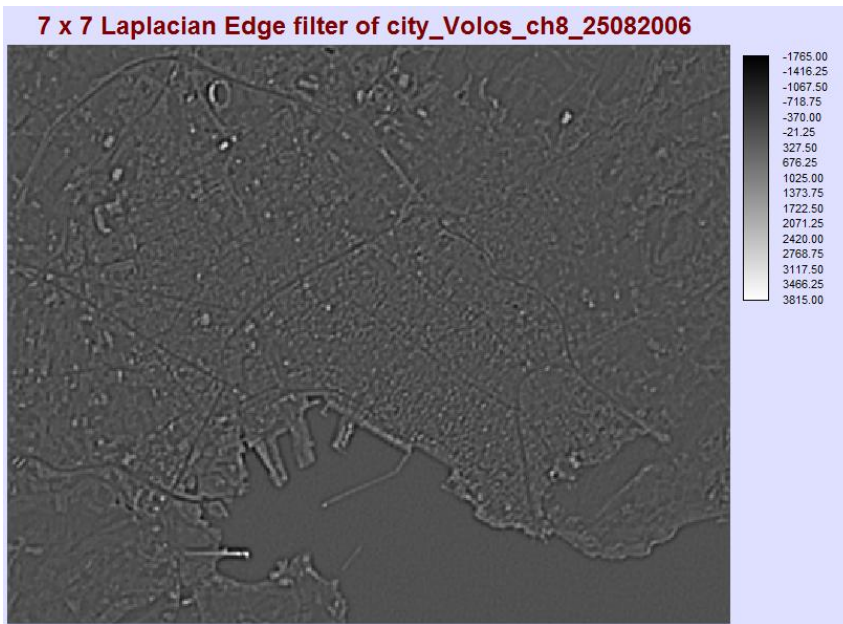
-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

0	-1	-1	-1	0
-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	20	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1
0	-1	-1	-1	0

3 x 3 Laplacian Edge filter of city_Volos_ch8_25082006



Εικόνα 8.16 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου του Laplace διαστάσεων 3 X 3 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.



Εικόνα 8.17 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου του Laplace διαστάσεων 7 X 7 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

8.3.2 Το φίλτρο υψηλής προσπέλασης αντίστοιχο της μέσης τιμής

Ακριβώς όπως και με το φίλτρο της μέσης τιμής και βάσει της εξίσωσης της συνέλιξης στις ψηφιακές εικόνες που σε κάθε τους εικονοστοιχείο αντιστοιχεί μία συγκεκριμένη ραδιομετρική τιμή $\psi(r, s)$ Εφαρμόζεται όπως και για τη μέση τιμή η εξίσωση 8.8

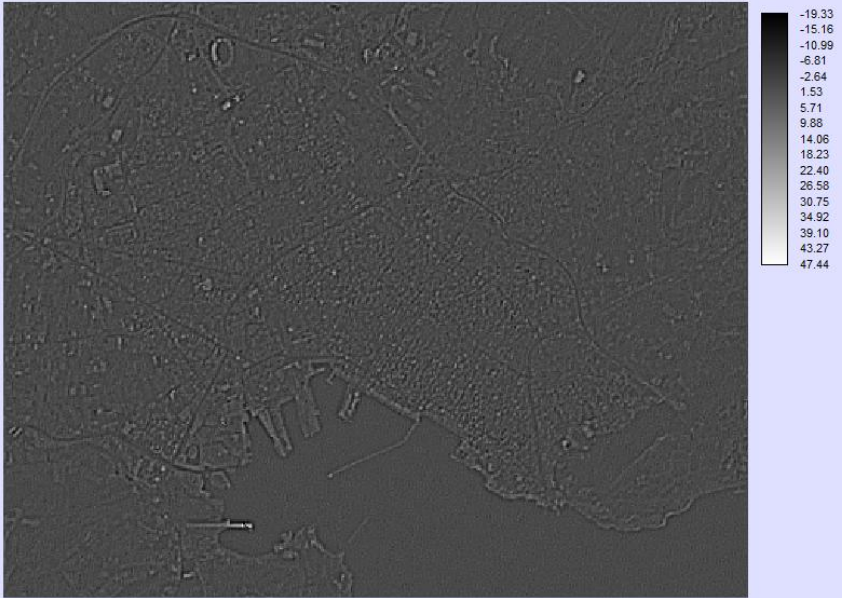
$$\omega(x, y) = \sum_{r=1}^k \sum_{s=1}^l \psi(r, s) \varphi(r, s),$$

θεωρώντας σαν τιμές της συνάρτησης $\psi(r, s)$ τις ραδιομετρικές τιμές σε ένα πλαίσιο 3X3, και αντίστοιχα ως φίλτρο $\varphi(r, s)$ διαστάσεων 3X3, το

-1/9	-1/9	-1/9
-1/9	8/9	-1/9
-1/9	-1/9	-1/9

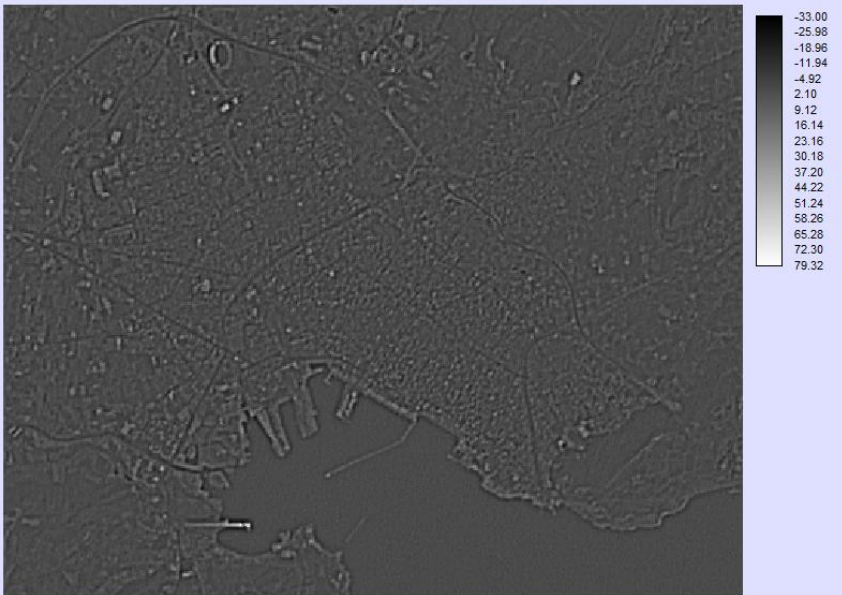
Παρακάτω παρουσιάζονται δύο εικόνες που είναι τα αποτελέσματα του φίλτρου high pass 3X3 και 7X7 στην εικόνα του παγχρωματικού καναλιού της πολυφασματικής εικόνας του δορυφόρου Landsat TM της 16-8-2006.

3 x 3 High Pass filter of city_Volos_ch8_25082006



Εικόνα 8.18 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου υψηλής προσπέλασης διαστάσεων 3 X 3 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

5 x 5 High Pass filter of city_Volos_ch8_25082006



Εικόνα 8.19 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου υψηλής προσπέλασης διαστάσεων 5 X 5 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

8.3.3 Τα φίλτρα του διανύσματος κλίσης (Roberts και Sobel)

Πρόκειται για φίλτρα ανίχνευσης ακμών ή γραμμών (ουσιαστικά για φίλτρα ανίχνευσης των περιγραμμάτων καλύψεων γης στην εικόνα οι οποίες διαφέρουν σημαντικά ως προς τις ραδιομετρικές τους τιμές από τις γειτονικές τους περιοχές).

Είναι μία εφαρμογή προσέγγισης της παραγωγίσις συνεχούς συνάρτησης με την διακριτή συνάρτηση των ραδιομετρικών τιμών της εικόνας σε δύο διαστάσεις.

Το διάνυσμα της κλίσης (gradient) μιας συνάρτησης δύο μεταβλητών $\psi(x, y)$ ορίζεται ως

$$\nabla\psi(x, y) = \frac{\partial\psi(x, y)}{\partial x} \bar{x} + \frac{\partial\psi(x, y)}{\partial y} \bar{y} = \nabla_1\bar{x} + \nabla_2\bar{y}$$

Ο τελεστής κλίσης που εφαρμόζεται σε μια συνεχή συνάρτηση σε κάποιο σημείο (x, y) παράγει ένα διάνυσμα του οποίου η διεύθυνση είναι η διεύθυνση της μέγιστης αλλαγής σε αυτό το σημείο και το μέτρο του εκφράζει το μέγεθος της αλλαγής στο ίδιο σημείο. Στην περίπτωση της ψηφιακής εικόνας η συνάρτηση της ραδιομετρίας $\psi(x, y)$ είναι διακριτή με διαφορετική τιμή (x, y) σε κάθε θέση του pixel.

Και κατά την εφαρμογή του φίλτρου του Roberts και του φίλτρου του Sobel το κεντρικό pixel του πλαισίου της εικόνας που διατρέχει το φίλτρο, αντικαθίσταται με το μέτρο του διανύσματος κλίσης που είναι:

$$|\nabla| = \sqrt{\nabla_1^2 + \nabla_2^2}$$

Η διαφορά των δύο φίλτρων έγκειται στην θεώρηση των συνιστωσών ∇_1 και ∇_2 του μέτρου του διανύσματος κλίσης και είναι:

στο φίλτρο του Roberts

$$\nabla_1 = \psi(x, y) - \psi(x + 1, y + 1) \quad \text{και} \quad \nabla_2 = \psi(x + 1, y) - \psi(x, y + 1)$$

στο δε φίλτρο του Sobel

$$\nabla_1 = [\psi(x - 1, y + 1) + 2(x - 1, y) + (x - 1, y - 1)] - [\psi(x + 1, y + 1) + 2(x + 1, y) + (x + 1, y - 1)]$$

$$\nabla_2 = [\psi(x - 1, y + 1) + 2(x, y + 1) + (x + 1, y + 1)] - [\psi(x - 1, y - 1) + 2(x, y - 1) + (x + 1, y - 1)]$$

Βέβαια και τα δύο φίλτρα προκύπτουν από την εφαρμογή του τύπου της συνέλιξης (εξίσωση 8.8) με την εφαρμογή των παρακάτω πλαισίων-φίλτρων:

Για το φίλτρο του Roberts

$$\nabla_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\nabla_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

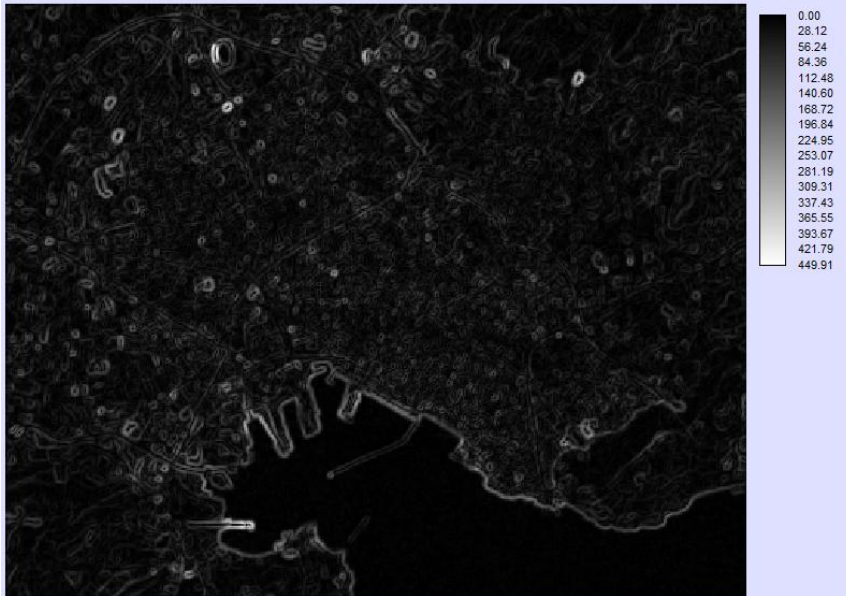
Και για το φίλτρο του Sobel

$$\nabla_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\nabla_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Στη συνέχεια εμφανίζεται η εφαρμογή του φίλτρου του Sobel με πλαίσιο-φίλτρο 3X3 με την ίδια δορυφορική εικόνα με τα προηγούμενα.

3 x 3 Sobel Edge Detector filter of city_Volos_ch8_25082006



Εικόνα 8.20 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του φίλτρου του Sobel διαστάσεων 3 X 3 με ημ/νία καταγραφής 25-08-2006.

8.3.4 Τα φίλτρα ανίχνευσης των ακμών και των γραμμών

Συχνά υπάρχει σύγχυση μεταξύ των εννοιών των γραμμών και των ακμών. Η ακμή βασικά δεν έχει υπόσταση (δεν περιέχει pixels) και προσδιορίζεται σαν το όριο μεταξύ δύο διαφορετικών επιφανειών (συγκεκριμένα δύο διαφορετικών –σε ραδιομετρικές τιμές-καλύψεων γης). Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα ακμής στην γήινη επιφάνεια (παρόλο που περιέχει στην ονομασία της την λέξη γραμμή) είναι η ακτογραμμή.

Αντίθετα η γραμμή έχει οντότητα δηλ. στις δορυφορικές εικόνες συγκεκριμένα περιέχει στο πλάτος της ένα pixel. (και ίσως δύο ή και τρία, ανάλογα με την χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφόρου, τότε όμως αποτελεί κάλυψη γης με ακμές στις δύο πλευρές της). Οι δε καλύψεις γης που περιβάλλουν την γραμμή από τις δύο πλευρές της μπορεί να είναι οι ίδιες αλλά και διαφορετικές (π.χ. ένας δρόμος στα όρια μεταξύ αγροτικής και δασικής κάλυψης).

Εφαρμόζοντας την πράξη της συνέλιξης σύμφωνα με την εξίσωση 8.8 και διατρέχοντας κάθε παράθυρο 3X3 του ψηφιακού καναλιού που επεξεργαζόμαστε, στην περίπτωση της ανίχνευσης των γραμμικών ακμών ορίζουμε τα εξής φίλτρα:

Για κάθετες ακμές

Για οριζόντιες ακμές

Για διαγώνιες ακμές από ΒΔ προς ΝΑ

Για διαγώνιες ακμές από ΝΑ προς ΒΔ

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

0	1	1
-1	0	1
-1	-1	0

1	1	0
1	0	-1
0	-1	-1

Και αντίστοιχα τα 3X3 φίλτρα για ευθείες (και όχι μόνο) γραμμές είναι:

Για κάθετες γραμμές

-1	2	-1
-1	2	-1
-1	2	-1

Για οριζόντιες γραμμές

-1	-1	-1
2	2	2
-1	-1	-1

Για διαγώνιες γραμμές από ΒΔ προς ΝΑ

2	-1	-1
-1	2	-1
-1	-1	2

Για διαγώνιες γραμμές από ΝΑ προς ΒΔ

-1	-1	2
-1	2	-1
2	-1	-1

8.4 Το αρνητικό φίλτρο

Τέλος έγκειται στις γνώσεις και στην εμπειρία του ειδικού ή μη που εφαρμόζει τα φίλτρα σε μια δορυφορική εικόνα να εφαρμόσει κάποιο από τα γνωστά ή κάποιο δικής του δημιουργίας φίλτρο. Σαν τελευταίο φίλτρο εφαρμόζεται το αρνητικό φίλτρο το οποίο δεν είναι τίποτε άλλο παρά η εφαρμογή ενός φίλτρου –πλαισίου που έχει παντού την τιμή -1. Αυτό αντιστρέφει την κλίμακα φωτεινότητας της εικόνας που εφαρμόζεται με αποτέλεσμα οι πιο υψηλές ραδιομετρικές τιμές να γίνονται οι πιο χαμηλές και το αντίστροφο (π.χ. 211 σε -211 και 5 σε -5).



Εικόνα 8.21 Η εικόνα του πολεοδομικού ιστού του Βόλου στο παγχρωματικό κανάλι μετά την εφαρμογή του αρνητικού φίλτρου διαστάσεων 3 X 3 με ημενία καταγραφής 25-08-2006.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Ελληνόγλωσση

Καρτάλης, Κ. και Φειδας, Χ., 2013, *Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης*. Εκδόσεις Τζιόλα.

Μερτίκας, Σ., 2006. *Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας*. Εκδόσεις Ίων.

Παπαμάρκος, Ν., 2013. *Ψηφιακή Επεξεργασία και Ανάλυση Εικόνας*. Β. Γκιούρδας Εκδοτική.

Σκιάνης, Γ., Νικολακόπουλος, Κ., Βαϊόπουλος, Δ., 2012. *Τηλεπισκόπηση: Αρχές, Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας, Εφαρμογές*. Εκδοτικός Όμιλος Ίων.

Ξενόγλωσση

- Elgammal, A., 2015. Digital Imaging and Multimedia: Filters Διαθέσιμο στο: <http://www.cs.rutgers.edu/~elgammal/classes/cs334/Filters.pdf> [Πρόσβαση 20/06/2015].
- Eliason, E.M. and McEwan, A.S., 1990. Adaptive Box Filters for Removal of Random Noise from Digital Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, (4), 453-458.
- Gose, E., Johnsonbaugh R. and Jost, S., 1996. *Pattern Recognition and Image Analysis*. Prentice Hall PTR.
- Mather, P., 1987. *Computer Processing of Remotely Sensed Images, An Introduction*. John Wiley and Sons.
- Niblack, W., 1986. *An Introduction to Digital Image Processing*. Prentice Hall International (UK) Ltd.
- Richards, J. and Xiuping, J., 1999. *Remote Sensing Digital Image Analysis, An Introduction*. Berlin: Springer Verlag.
- Schowengerdt, R., 1997. *Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing*. Academic Press.
- Schowengerdt, R. 1983. *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*. Academic Press.
- Zhou, H., Wu, J. and Zhang, J., 2010. Digital Image Processing: Part I, <http://finddoc.blog.com/files/2010/08/digital-image-processing-part-one.pdf>.

Κεφάλαιο 9 Σύμπτυξη εικόνων

Ιωάννης Ν. Φαρασλής

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η σύμπτυξη των δορυφορικών εικόνων. Αρχικά, αναλύονται τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν, από την εφαρμογή των τεχνικών της σύμπτυξης των εικόνων, στον εντοπισμό και χαρτογράφηση των χρήσεων - καλύψεων γης καθώς και στη συμβολή της σύμπτυξης στις διάφορες επιστήμες που σχετίζονται με την ανάλυση του χώρου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικές τεχνικές σύμπτυξης εικόνων με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Τέλος, περιγράφονται συγκεκριμένες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται η σύμπτυξη εικόνων στην τηλεπισκόπηση, για την επίλυση χωρικών προβλημάτων όπως η διαχείριση αγροτικών/δασικών εκτάσεων και η χαρτογράφηση των οικισμών.

9.1 Βασικές Έννοιες

Η σύμπτυξη εικόνων έγκειται στη διαδικασία συγχώνευσης εικόνων διαφορετικών χωρικών διακριτικών ικανοτήτων για τη δημιουργία μιας τελικής εικόνας. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί η συγχώνευση παγχρωματικής εικόνας υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας με πολυφασματική εικόνα χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης. Γενικά, οι αισθητήρες που έχουν υψηλή φασματική διακριτική ικανότητα και καταγράφουν την ακτινοβολία των διαφορετικών καλύψεων γης σε μεγάλο αριθμό φασματικών καναλιών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (πολυφασματικές εικόνες), δεν έχουν αντίστοιχα υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα. Αντίθετα οι παγχρωματικές εικόνες έχουν υψηλότερη χωρική διακριτική ικανότητα επιτρέποντας μεν τον εντοπισμό στοιχείων του χώρου παρέχοντας δε μικρότερη φασματική πληροφορία σε σχέση με τις πολυφασματικές εικόνες. Με χρήση κατάλληλων αλγόριθμων είναι δυνατός ο συνδυασμός των δύο εικόνων (πολυφασματικής – παγχρωματικής) και η δημιουργία μιας πολυφασματικής εικόνας υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας, η οποία έχει τα καλύτερα χαρακτηριστικά των αρχικών εικόνων (Fonseca et al, 2011). Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως σύμπτυξη (ή συγχώνευση) εικόνων (multisensor merging, fusion, or sharpening) και ανήκει στην κατηγορία της χωρικής ενίσχυσης των εικόνων (spatial enhancement). Η χωρική ενίσχυση τροποποιεί τις τιμές των pixels βασιζόμενη στις γειτονικές τιμές τους. Βασικό στοιχείο της χωρικής ενίσχυσης είναι η χωρική συχνότητα δηλαδή η διαφορά μεταξύ των μέγιστων και ελάχιστων τιμών σε μια συνεχόμενη ομάδα pixels (Jensen, 1986).

Η έννοια της σύμπτυξης εικόνων ξεκίνησε από τα τέλη της δεκαετίας του '70 με την επεξεργασία εικόνων radar και πολυφασματικών εικόνων Landsat MSS. Το 1991 ξεκίνησαν πειράματα σύμπτυξης εικόνων Landsat ενώ μετά το 1990 με την επιχειρησιακή λειτουργία πολλών χαρτογραφικών δορυφόρων, η συγκεκριμένη τεχνική (fusion) αποτέλεσε βασικό πεδίο ερευνητικού ενδιαφέροντος στην επεξεργασία και ανάλυση δορυφορικών εικόνων (Yang, 2015). Από τότε αρκετοί ορισμοί της σύμπτυξης εικόνων έχουν δοθεί όπως (Jiang et al, 2013):

- Η σύμπτυξη εικόνας είναι συνδυασμός δύο ή περισσότερων εικόνων δίνοντας μια νέα εικόνα με χρήση συγκεκριμένων αλγόριθμων.
- Η σύμπτυξη εικόνας είναι η διαδικασία συνδυασμού πληροφοριών από δύο ή περισσότερες εικόνες της ίδιας περιοχής, σε μια σύνθετη εικόνα η οποία περιέχει περισσότερη πληροφορία, από τις αρχικές, ενώ παράλληλα είναι κατάλληλη για οπτική αναγνώριση αλλά και αλγοριθμική επεξεργασία.
- Η σύμπτυξη εικόνας είναι η διαδικασία συνδυασμού εικόνων της ίδιας περιοχής, που λαμβάνονται από αισθητήρες διαφορετικών μηκών κύματος για να δομήσουν μια συνθετική εικόνα. Η συνθετική εικόνα διευκολύνει τον χρήστη στον εντοπισμό, αναγνώριση και ταυτοποίηση στοιχείων του εδάφους ενώ ταυτόχρονα αυξάνει την αντίληψή του για το χώρο.

Η σύμπτυξη ψηφιακών εικόνων εφαρμόζεται σε διάφορους τύπους δορυφορικών δεδομένων τα οποία προκύπτουν από:

- Ενεργητικά συστήματα καταγραφής (εικόνες ραντάρ). Για διαχρονική μελέτη με παγχρωματική εικόνα και πολυφασματική εικόνα ραντάρ (SAR).
- Οπτικούς αισθητήρες. Για διαχρονική μελέτη με πολυφασματικές εικόνες.
- Οπτικούς αισθητήρες. Για χαρτογράφηση περιοχών με χωρική ενίσχυση των πολυφασματικών εικόνων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η συγχώνευση εικόνων Spot με Landsat.
- Δορυφορικά δεδομένα σε συνδυασμό με βοηθητικά δεδομένα όπως, για παράδειγμα τοπογραφικοί χάρτες.

Οι τεχνικές σύμπτυξης ταξινομούνται σε τρία επίπεδα ανάλογα με το επίπεδο στο οποίο η σύμπτυξη (fusion) λαμβάνει χώρα (Hall 1997):

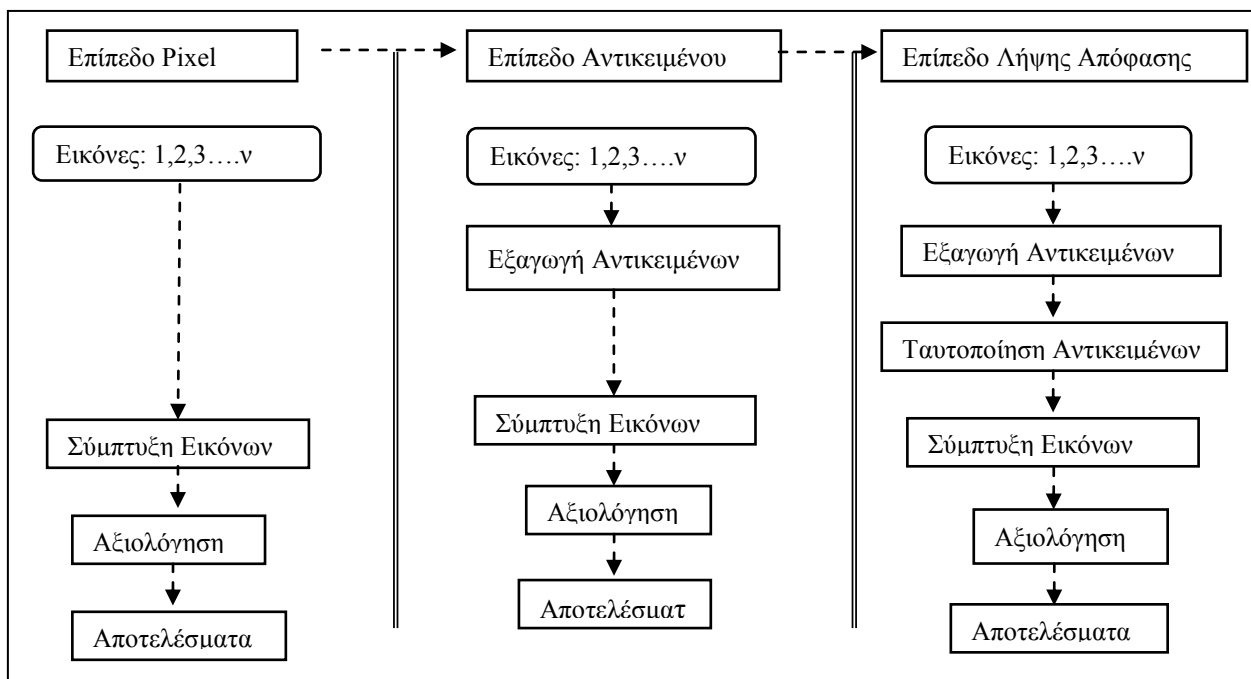
- Εικονοστοιχείο (Pixel).
- Αντικείμενο (Feature).
- Επίπεδο απόφασης (Decision level).

Η σύμπτυξη σε επίπεδο pixel αποτελεί το χαμηλότερο επίπεδο επεξεργασίας και υλοποιείται σε δεδομένα που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά (π.χ. δύο οπτικοί αισθητήρες κ.λπ.). Βασική προϋπόθεση είναι οι αρχικές εικόνες να έχουν κοινό σύστημα αναφοράς και υψηλής ακρίβειας χωρική ταύτιση για την αποφυγή σφαλμάτων μετατόπισης στην τελική εικόνα.

Η σύμπτυξη σε επίπεδο αντικειμένου, συνίσταται στην εξαγωγή πληροφοριών αναγνωρίσιμων στις αρχικές εικόνες βάσει χαρακτηριστικών όπως το σχήμα, το μέγεθος και η γειτνίασή των αντικειμένων αυτών. Τα αντικείμενα που εξάγονται από διαφορετικές εικόνες συνδυάζονται και αποτελούν δεδομένα εισόδου σε τεχνικές αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition).

Η σύμπτυξη σε επίπεδο λήψης απόφασης προϋποθέτει την εξαγωγή πληροφορίας από κάθε αισθητήρα χωριστά, έτσι ώστε να συνδυάζονται στη συνέχεια όλες οι υφιστάμενες πληροφορίες συμβάλλοντας στην καλύτερη κατανόηση των υπό εξέταση αντικειμένων.

Τα τρία επίπεδα επεξεργασίας σύμπτυξης εικόνων, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, απεικονίζονται στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 9.1).



Εικόνα 9.1 Τα τρία επίπεδα επεξεργασίας σύμπτυξης των εικόνων.

Η σύμπτυξη ψηφιακών εικόνων εφαρμόζεται ευρέως σε διάφορους τομείς της τηλεπισκόπησης. Στις παρακάτω ενότητες θα δοθεί έμφαση στους σκοπούς – τεχνικές και στις εφαρμογές της σύμπτυξης εικόνων από την επεξεργασία οπτικών δορυφορικών δεδομένων (παθητικά συστήματα καταγραφής).

9.2 Πλεονεκτήματα σύμπτυξης εικόνων

Η τελική εικόνα μετά τη σύμπτυξη δύο ή περισσότερων εικόνων καθίσταται κατάλληλη για οπτική αναγνώριση αντικειμένων καθώς και για εφαρμογή εξελιγμένων αλγόριθμων για περαιτέρω επεξεργασία και εξαγωγή πληροφοριών (αλγόριθμοι εντοπισμού αντικειμένων κ.λπ.). Γενικά η συγχωνευμένη πληροφορία από αισθητήρες με διαφορετικά χαρακτηριστικά ενισχύει την κατανόηση των στοιχείων του χώρου που υπάρχουν στην εικόνα και έχει εφαρμογές σε αρκετές επιστήμες (Jiang 2013). Ειδικότερα συμβάλει:

- Στη χαρτογράφηση στοιχείων του χώρου (οδικό – υδρογραφικό δίκτυο κ.ά.)
- Στην εκτίμηση ζημιών σε δασικές εκτάσεις, αγροτικές καλλιέργειες κ.α.
- Στην αστική εξάπλωση.
- Σε περιβαλλοντικά ζητήματα (χαρτογράφηση πλημμυρών κ.α.).
- Στη διαχρονική παρακολούθηση αλλαγών χρήσεων - καλύψεων γης.
- Στη λήψη αποφάσεων.
- Στην ενίσχυση του συμμετοχικού σχεδιασμού.

Είναι αποδεκτό ότι τα δεδομένα σύμπτυξης παρέχουν ισχυρή λειτουργικότητα στο χρήστη και αυξάνουν τη χρηστικότητα και αποδοτικότητα των δορυφορικών εικόνων, ενώ παράλληλα ενισχύουν την εμπιστοσύνη, μειώνουν την ασάφεια και βελτιώνουν την αξιοπιστία. Σ' αυτό το πλαίσιο οι τεχνικές σύμπτυξης που εφαρμόζονται έχουν ως σκοπό :

A) Την οπτική βελτίωση & ενίσχυση χαρακτηριστικών των αρχικών εικόνων

Με την οπτική βελτίωση επιτυγχάνεται η αύξηση της ευκρίνειας της τελικής εικόνας με αποτέλεσμα τον εντοπισμό στοιχείων και χαρακτηριστικών που δεν ήταν ευδιάκριτα στις αρχικές εικόνες. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η συγχώνευση παγχρωματικής εικόνας υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας με πολυφασματική εικόνα χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν:

- Η συγχώνευση παγχρωματικής με πολυφασματική εικόνα SPOT.
- Η συγχώνευση παγχρωματικής με πολυφασματική εικόνα Landsat.
- Η συγχώνευση παγχρωματικής εικόνας SPOT με πολυφασματική Landsat.

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 9.2) απεικονίζεται το προϊόν που προέκυψε από τη συγχώνευση της παγχρωματικής εικόνας με χωρική διακριτική ικανότητα 15x15 μ. και της πολυφασματικής εικόνας (7 κανάλια) του δορυφόρου Landsat TM7. Η επεξεργασία αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό γραμμικών στοιχείων όπως το οδικό και υδρογραφικό δίκτυο και τους οικισμούς που αποτυπώνονται στην εικόνα.



Εικόνα 9.2 Συγχώνευση Παγχρωματικής Πολυφασματικής εικόνας Landsat TM7.

Β) Τη βελτίωση της γεωμετρικής ακρίβειας

Κατά τη γεωμετρική διόρθωση ο εντοπισμός κοινών σημείων μεταξύ της εικόνας που θα γεωαναφερθεί και της εικόνας με γνωστές συντεταγμένες, σε πολλές περιπτώσεις, είναι απαραίτητος. Η χρήση συγχωνευμένων εικόνων αυξάνει την ευκρίνεια και άρα συμβάλει στον ευκολότερο (και ακριβέστερο) εντοπισμό των ζευγών των φωτοσταθερών σημείων (GCPs – Ground Control Points), μεταξύ των εικόνων, βελτιώνοντας τελικά την ακρίβεια της γεωμετρικής διόρθωσης.

Γ) Τη δημιουργία στερεοσκοπικών δεδομένων

Ο συνδυασμός εικόνων ραντάρ με εικόνες παθητικών συστημάτων καταγραφής παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας στερεοσκοπικών δεδομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εξαγωγή τοπογραφικών δεδομένων από την επεξεργασία εικόνων Landsat TM 4-5 και SIR-B (Shuttle Image Radar) οι οποίες έχουν παραπλήσια γεωμετρία ενώ η εγγραφή τους (co-registration) γίνεται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και διεργασίες (Bloom et al., 1988).

Δ) Τη βελτίωση της ταξινόμησης

Η βελτίωση της ταξινόμησης των δορυφορικών εικόνων επιτυγχάνεται από την επιλογή των κατάλληλων φασματικών καναλιών, καθώς και την ενίσχυσή τους με πολλαπλή πληροφορία από τη συγχώνευση διαφορετικών δεδομένων (εικόνες ραντάρ με εικόνες παθητικής καταγραφής). Οι τεχνικές σύμπτυξης δημιουργούν δεδομένα υψηλής ευκρίνειας τα οποία και συμβάλλουν καλύτερα:

- στον εντοπισμό δειγματικών περιοχών,
- στην περιγραφή των προτύπων κάλυψης γης,
- στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης.

Επιπλέον τα δεδομένα από τη συγχώνευση εικόνων γίνονται όλο και πιο δημοφιλή με την εφαρμογή νέων μεθοδολογιών ταξινόμησης, όπως π.χ. την αντικειμενοστραφή ταξινόμηση. Οι νέοι αλγόριθμοι βασίζονται όχι μόνο στις φασματικές ιδιότητες των pixels αλλά και στο σχήμα και την υφή τους, οριοθετώντας παράλληλα στην εικόνα ένα σύνολο πρωτογενών αντικειμένων. Τέτοιου είδους αλγόριθμοι παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την ταξινόμηση συμπυκνωμένων εικόνων σε σχέση με τις παραδοσιακές στατιστικές τεχνικές (π.χ. της μέγιστης πιθανοφάνειας) (Lalit et al., 2014).

ε) Τον εντοπισμό αλλαγών από διαχρονικά δεδομένα

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των χαρτογραφικών δορυφόρων, η χρονική διακριτική ικανότητα των εικόνων ποικίλει από μερικές εβδομάδες (Landsat, SPOT) έως δεκαπέντε λεπτά της ώρας (meteosat). Δηλαδή

συγκεκριμένες περιοχές της γης χαρτογραφούνται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και φυσικά με διαφορετικές χωρικές διακριτικές ικανότητες (pixel size). Ο συνδυασμός αυτών των διαχρονικών εικόνων, με τεχνικές σύμπτυξης, βοηθάει στον εντοπισμό των αλλαγών που μπορεί να λαμβάνουν χώρα σε μια περιοχή. Για τη συμβατότητα των αρχικών εικόνων απαιτούνται ραδιομετρικές και ατμοσφαιρικές διορθώσεις καθώς και διορθώσεις στη φωτεινότητα. Παράλληλα, για τον αξιόπιστο υπολογισμό των διαχρονικών αλλαγών οι αρχικές εικόνες θα πρέπει να καταγράφονται σε παρόμοια εποχή ώστε να εξαλείφονται οι εποχιακές διακυμάνσεις των καλύψεων-χρήσεων γης (Pohl et al., 1998).

ζ) Την αντικατάσταση ελαττωματικών δεδομένων

Σε αρκετές περιπτώσεις οι εικόνες από τα παθητικά συστήματα καταγραφής έχουν πρόβλημα χαρτογράφησης της γήινης επιφάνειας εξαιτίας των νεφών καθώς και των σκιάσεών τους. Παράλληλα οι εικόνες ραντάρ, ενώ δεν επηρεάζονται από τη νεφοκάλυψη περιέχουν αρκετές παραμορφώσεις εξαιτίας του ανάγλυφου του εδάφους. Οι τεχνικές σύμπτυξης επιτρέπουν τον συνδυασμό των διαφορετικών χαρακτηριστικών των παραπάνω εικόνων και την δημιουργία δεδομένων που ξεπερνούν τα προαναφερθέντα προβλήματα, με τη διάθεση επιπλέον πληροφορίας στον χρήστη.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη αρκετών αλγόριθμων σύμπτυξης εικόνων. Στη συνέχεια θα αναλυθούν, εν συντομία, οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την συγχώνευση εικόνων καθώς και οι προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν για την επιτυχημένη δημιουργία τελικού προϊόντος με υψηλό ποσοστό νέων πληροφοριών.

9.3 Τεχνικές σύμπτυξης εικόνων

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών αρκετές τεχνικές σύμπτυξης εικόνων έχουν προταθεί από τους ερευνητές. Οι περισσότερες από αυτές βασίζονται στη σχέση μεταξύ της χωρικής ενίσχυσης και της φασματικής συνοχής. Είναι γνωστό ότι στις παγχρωματικές εικόνες η χωρική πληροφορία βρίσκεται στις υψηλής συχνότητας συνιστώσες ενώ η φασματική πληροφορία των πολυφασματικών εικόνων βρίσκεται στις χαμηλής συχνότητας συνιστώσες. Έτσι, εάν οι συνιστώσες υψηλών συχνοτήτων της πολυφασματικής εικόνας αντικατασταθούν από τις υψηλές συχνότητες των παγχρωματικών η χωρική διακριτική ικανότητα της πολυφασματικής εικόνας θα βελτιωθεί (Zhou et al., 1998). Φυσικά οι τεχνικές συγχώνευσης εικόνων είναι σύνθετες διαδικασίες και για την εξασφάλιση υψηλής ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μια σειρά από παράγοντες όπως (Fonseca et al., 2011):

- Οι παγχρωματικές και οι πολυφασματικές εικόνες πρέπει να καταγράφονται σε κοντινές ημερομηνίες. Όπως είναι φυσικό η πιθανότητα αλλαγών, στις χρήσεις - καλύψεις γης, αυξάνει όσο αυξάνει και το διάστημα λήψης μεταξύ των εικόνων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι αλλαγές στη βλάστηση (εποχικότητα, πυρκαγιές), οι διαφορετικές συνθήκες φωτεινότητας, η δημιουργία ανθρωπογενών κατασκευών, οι αλλαγές εξαιτίας φυσικών καταστροφών (πλημμύρες, σεισμοί), κ.α.
- Το φασματικό εύρος της παγχρωματικής εικόνας το οποίο πρέπει να καλύπτει όλα τα κανάλια της πολυφασματικής εικόνας για την αποφυγή χρωματικών αλλοιώσεων της παραγόμενης εικόνας.
- Η φασματική ανάλυση της εικόνας υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας η οποία πρέπει να είναι, όσο το δυνατόν, παρόμοια με την πολυφασματική εικόνα.
- Οι αρχικές εικόνες οι οποίες πρέπει να έχουν ταυτόσημες ραδιομετρικές αντιθέσεις στα ιστογράμματά τους, για τη μείωση των ραδιομετρικών καταλοίπων στην τελική εικόνα.
- Οι αρχικές εικόνες οι οποίες πρέπει να έχουν τέλεια υπέρθεση μεταξύ τους. Η χωρική ακρίβεια πρέπει να είναι μικρότερη του 0,5 pixel για την αποφυγή σφαλμάτων στην τελική εικόνα.

Φυσικά, ανάλογα με τις εφαρμογές, κάποιιοι παράγοντες είναι πιο σημαντικοί από άλλους. Επίσης, οι τεχνικές σύμπτυξης εικόνων που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτώνται και από τις πληροφορίες που πρέπει να συλλεχθούν. Σε κάθε περίπτωση, μια σειρά από ερωτήματα πρέπει να απαντηθούν για την επιτυχή υλοποίηση της συγχώνευσης των εικόνων όπως (Hall et al. 1997):

- Ποιες μέθοδοι δίνουν το βέλτιστο αποτέλεσμα της συγκεκριμένης τεχνικής.

- Πως θα πρέπει να επεξεργαστούν τα δεδομένα για να επιτευχθεί η βέλτιστη εξαγωγή πληροφορίας.
- Τι ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί στα τελικά δεδομένα.
- Με ποιο τρόπο το περιβάλλον συλλογής των δεδομένων (χαρακτηριστικά του στόχου, ανάκλαση σήματος κ.α.) επιδρά στη διαδικασία σύμπτυξης.
- Κάτω από ποιες συνθήκες η συγχώνευση πολυφασματικών εικόνων γίνεται με ποιο σύντομο και λειτουργικό τρόπο.

Βάσει των παραπάνω, η γεωμετρική και ραδιομετρική διόρθωση των εικόνων αποτελεί θεμελιώδη προ-επεξεργασία ιδιαίτερα στις εικόνες των παθητικών συστημάτων καταγραφής. Στη συνέχεια θα εκτεθούν τεχνικές σύμπτυξης όπως έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 20 έτη.

9.3.1 Βασικές τεχνικές σύμπτυξης

Γενικά οι τεχνικές σύμπτυξης των δεδομένων τηλεπισκόπησης διαιρούνται σε δύο κατηγορίες (Pohl *et al.*, 1998):

- Τεχνικές που σχετίζονται με το χρώμα.
- Στατιστικές ή αριθμητικές τεχνικές.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τεχνικές χρωματικής σύνθεσης τριών καναλιών της εικόνας στο χρωματικό μοντέλο RGB (Red, Green, Blue) καθώς και πιο πολύπλοκους μετασχηματισμούς όπως για παράδειγμα η τεχνική της έντασης, απόχρωσης, κορεσμού (Intensity, Hue, Saturation - IHS) και η τεχνική της απόχρωσης, κορεσμός, ραδιομετρική τιμή (Hue, Saturation, Value - HSV).

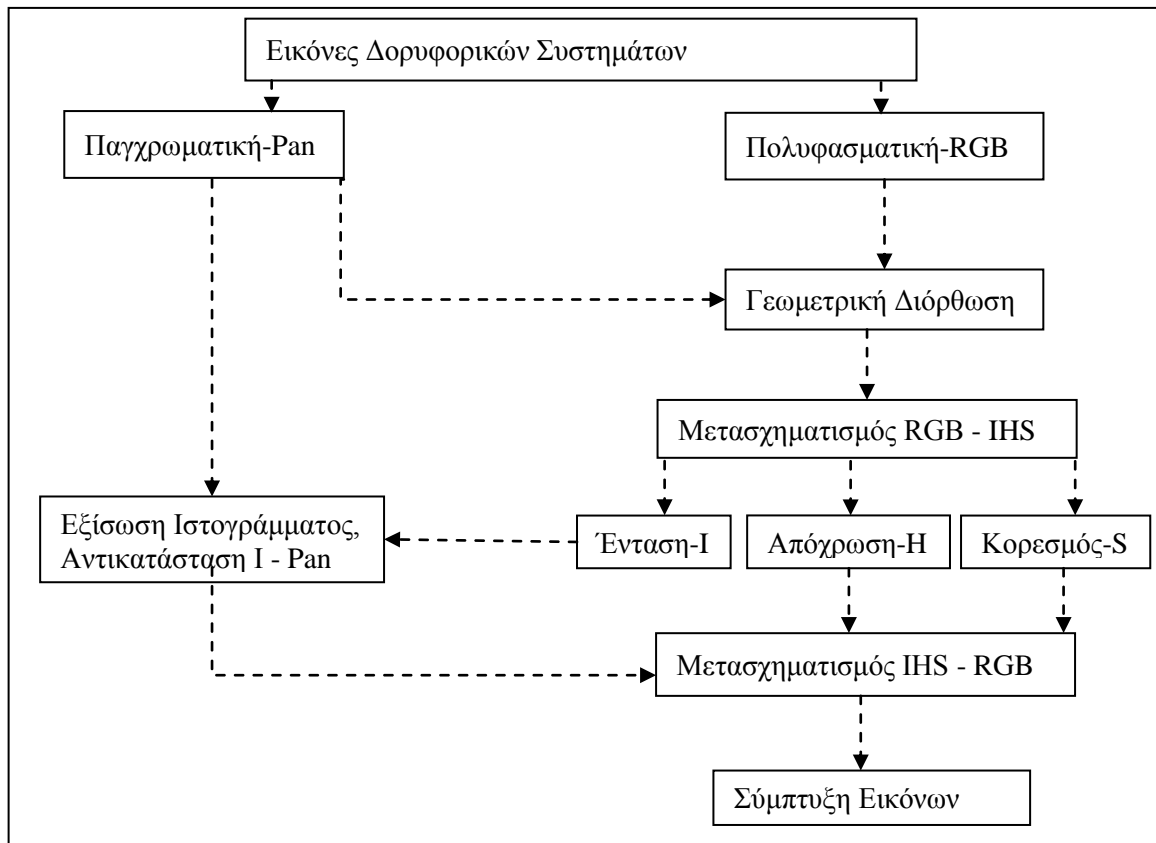
Η δεύτερη κατηγορία στηρίζεται σε στατιστικές αναλύσεις των φασματικών καναλιών των εικόνων όπως οι συσχετίσεις και τα φίλτρα. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές όπως: (α) η ανάλυση σε κύριες συνιστώσες (PCA – Principal Components Analysis), (β) η παλινδρόμηση (regression) και (γ) το φίλτρο υψηλής προσπέλασης (High Pass filter). Αντίστοιχα οι αριθμητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν πράξεις μεταξύ των φασματικών καναλιών των εικόνων όπως η πρόσθεση, ο πολλαπλασιασμός, η αφαίρεση και η διαίρεση (λόγοι καναλιών). Μια εξελιγμένη μέθοδος της συγκεκριμένης κατηγορίας, που χρησιμοποιείται σε πολυφασματικές εικόνες, είναι η τεχνική του μετασχηματισμού των κυματιδίων (wavelets) (Andreja *et al.*, 2006).

Στη συνέχεια, ακολουθεί γρήγορη επισκόπηση των δύο τεχνικών σύμπτυξης εικόνων που χρησιμοποιούνται ευρέως.

A) Χρωματικό μοντέλο Έντασης-Απόχρωσης- Κορεσμού (IHS)

Αρχικά, το χρωματικό μοντέλο IHS (Intensity-Hue-Saturation) μετασχηματίζει τα κανάλια Κόκκινο, Πράσινο, Μπλε (RGB) της πολυφασματικής εικόνας στις συνιστώσες Ένταση, Απόχρωση, Κορεσμός (IHS). Ακολούθως, η συνιστώσα ένταση αντικαθίσταται από την παγχρωματική εικόνα ενώ έπειτα εκτελείται ο αντίστροφος μετασχηματισμός (από IHS σε RGB) για την δημιουργία της τελικής πολυφασματικής εικόνας με υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα (Carper *et al.* 1990).

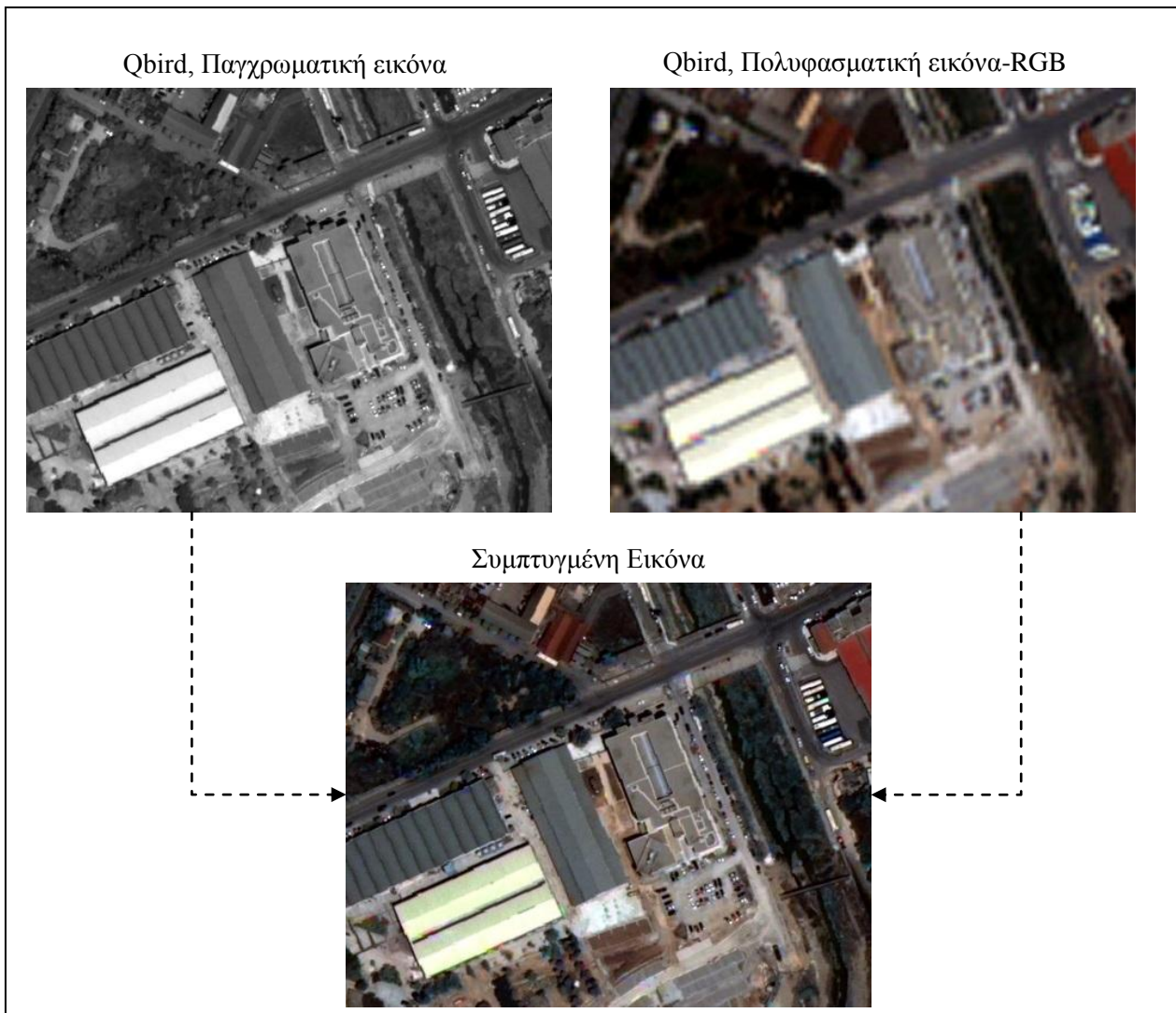
Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 9.3) απεικονίζονται σχηματικά τα βήματα που απαιτούνται για την παραγωγή συμπτυγμένης εικόνας από πολυφασματικά και παγχρωματικά δεδομένα.



Εικόνα 9.3 Σχηματική απεικόνιση του χρωματικού μοντέλου IHS.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως ιδιαίτερα στη χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο περιορισμός της επεξεργασίας μέχρι τρία πολυφασματικά κανάλια. Παράλληλα, σε αρκετές περιπτώσεις, έχουν παρατηρηθεί χρωματικές παραμορφώσεις των εικόνων κατά τους μετασχηματισμούς από RGB σε IHS και το αντίστροφο. Τέλος, η αδυναμία αποδόμησης της εικόνας σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες δεν επιτρέπει τον εντοπισμό συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί βελτιωμένες μέθοδοι όπως το τροποποιημένο IHS χρωματικό μοντέλο (Siddiqui 2003).

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 9.4) απεικονίζεται η διαδικασία σύμπτυξης εικόνων με χρήση του χρωματικού μοντέλου IHS. Οι αρχικές εικόνες είναι από τον δορυφόρο QuickBird. Η παγχρωματική εικόνα έχει χωρική διακριτική ικανότητα 0,6 μέτρα ενώ η πολυφασματική 2,4 μέτρα. Το τελικό προϊόν είναι πολυφασματική εικόνα υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (0,6 μέτρα).



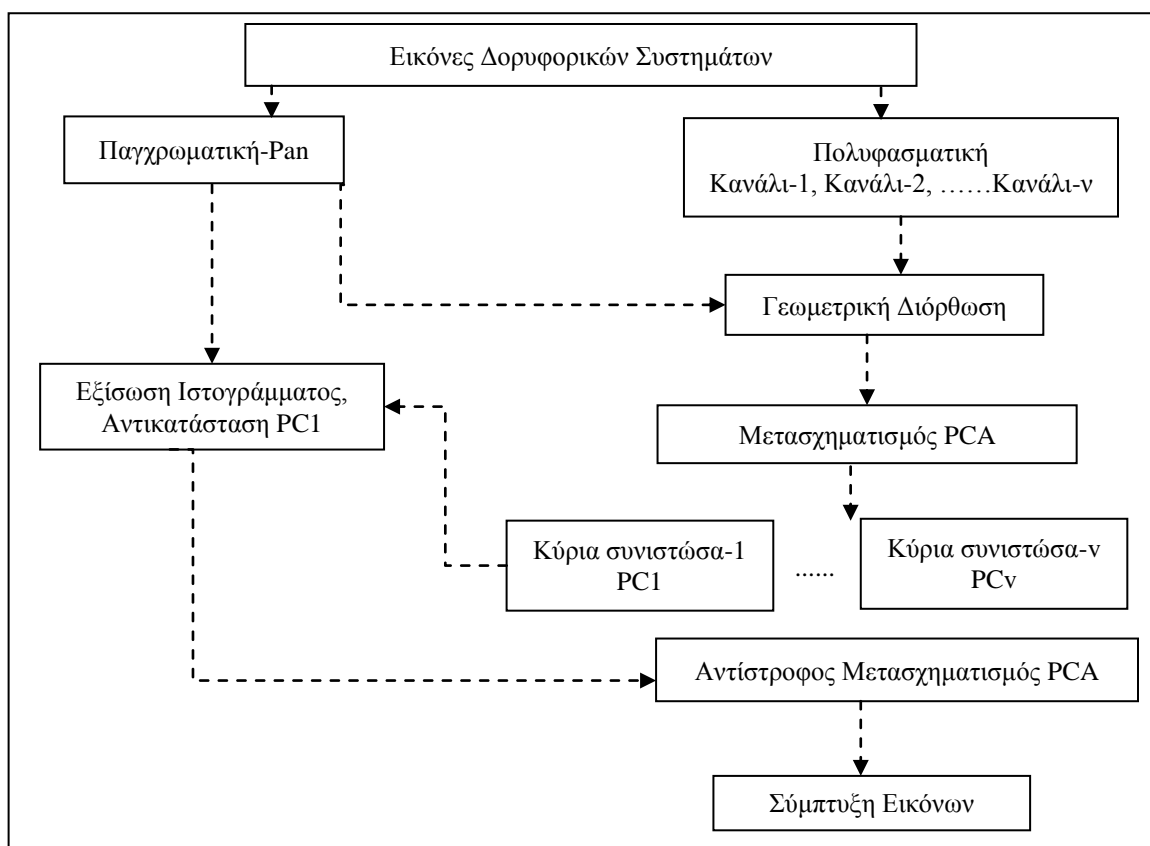
Εικόνα 9.4 Σύμπτυξη εικόνων με χρήση του χρωματικού μοντέλου IHS

Β) Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες

Γενικά η τεχνική της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες (PCA) χρησιμοποιείται στις εικόνες για τη συμπίεση, την ενίσχυση, τη διαχρονική ανάλυση καθώς και τη σύμπτυξή τους. Η συγκεκριμένη τεχνική στοχεύει να ελαττώσει τα πολυδιάστατα δεδομένα (παγχρωματική – πολυφασματική εικόνα) ενώ ταυτόχρονα να διατηρήσει, όσο είναι εφικτό, την πληροφορία που υπάρχει. Ουσιαστικά απαλείφει τα δεδομένα με υψηλή συσχέτιση μειώνοντας την επανάληψη και δημιουργώντας νέα, ασυσχέτιστα δεδομένα. Έτσι μεγάλος όγκος αρχικών δεδομένων συμπιέζεται σε μικρότερο όγκο χωρίς την απώλεια πληροφορίας.

Αρχικά η πολυφασματική εικόνα μετασχηματίζεται στις κύριες συνιστώσες της. Στη συνέχεια η πρώτη κύρια συνιστώσα αντικαθίσταται από την παγχρωματική εικόνα. Τέλος, η νέα κύρια συνιστώσα μαζί με τις υπόλοιπες μετασχηματίζονται με αντίθετο μετασχηματισμό PCA για τη δημιουργία της νέας εικόνας. (Chavez *et al.* 1989).

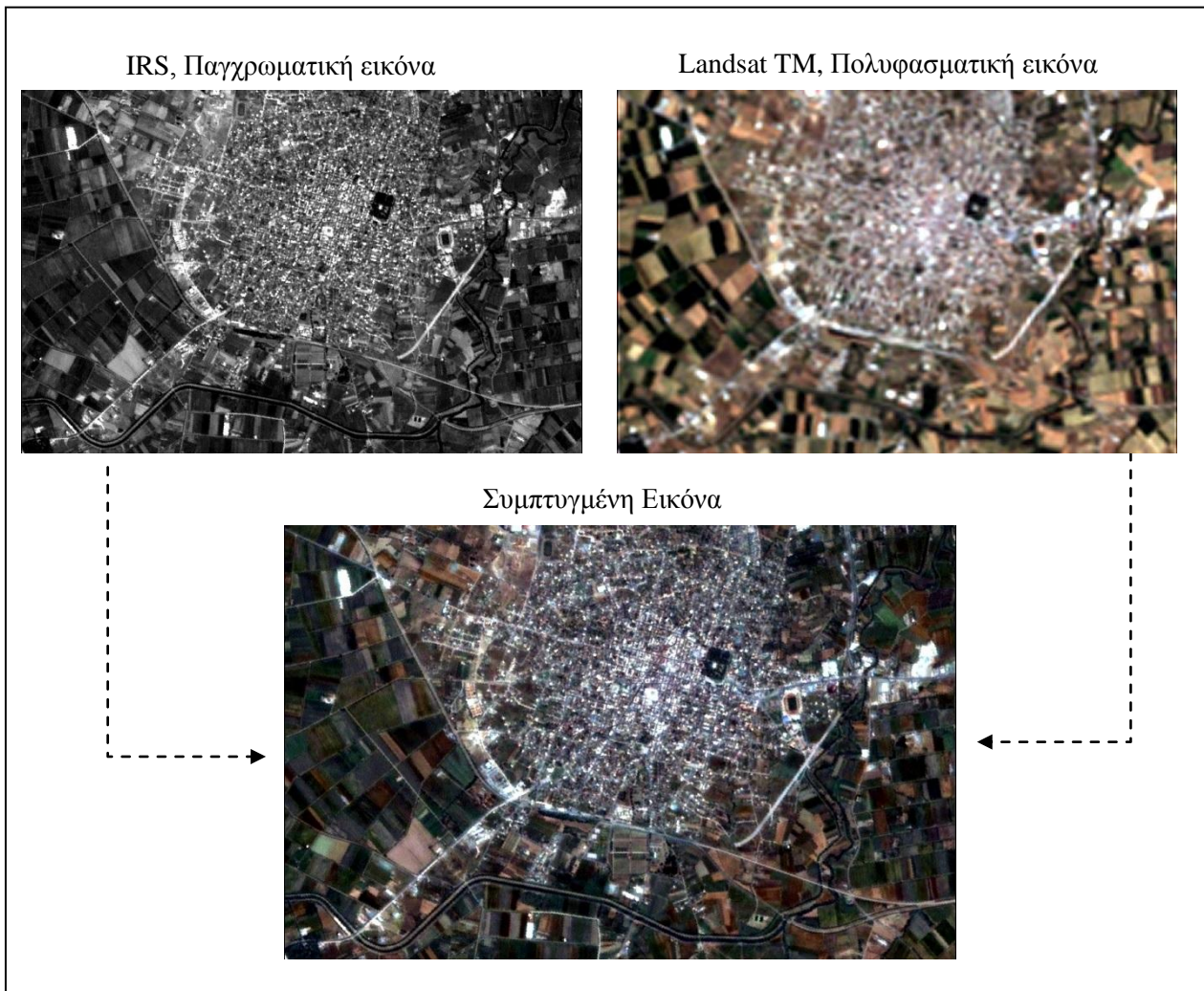
Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 9.5) απεικονίζονται σχηματικά τα βήματα που απαιτούνται για την παραγωγή συμπτυγμένης εικόνας από πολυφασματικά και παγχρωματικά δεδομένα βάση της τεχνικής PCA.



Εικόνα 9.5 Σχηματική απεικόνιση της τεχνικής PCA.

Αν και ευρέως διαδεδομένη η τεχνική της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες δεν εμφανίζει πάντα τα επιθυμητά αποτελέσματα ιδιαίτερα όταν γίνεται σύμπτυξη πολύ υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας παγχρωματικής εικόνας με πολυφασματική εικόνα πολύ χαμηλής διακριτικής ικανότητας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται αλλοίωση των φασματικών χαρακτηριστικών της πολυφασματικής εικόνας. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί νέες μέθοδοι οι οποίες ελαχιστοποιούν τις ανωμαλίες όπως ο προσαρμοσμένος μετασχηματισμός PCA (Shah *et al.* 2008).

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 9.6) απεικονίζεται η διαδικασία σύμπτυξης εικόνων με χρήση του μετασχηματισμού PCA. Η παγχρωματική εικόνα προέρχεται από τον δορυφόρο IRS με χωρική διακριτική ικανότητα 6 μέτρα. Η πολυφασματική εικόνα προέρχεται από τον Landsat TM με χωρική διακριτική ικανότητα 30 μέτρα και 7 φασματικούς διαύλους (κανάλια). Το τελικό αποτέλεσμα είναι πολυφασματική εικόνα με 7 κανάλια και διαστάσεις pixel 6X6 μέτρα. Πιο συγκεκριμένα απεικονίζεται η συμπτυγμένη εικόνα με τρία κανάλια στην περιοχή του ορατού φάσματος (RGB). Η έγχρωμη εικόνα που προκύπτει βοηθάει στον οπτικό εντοπισμό περισσότερων στοιχείων που εγγράφονται στο χώρο. Ιδιαίτερα συμβάλει στον εντοπισμό των διαφορετικών καλλιεργειών που υπάρχουν περιμετρικά της πόλης της Καρδίτσας.



Εικόνα 9.6 Σύμπτυξη εικόνων με χρήση του μετασχηματισμού PCA.

9.3.2 Μέθοδοι Αξιολόγησης της σύμπτυξης

Η επιτυχής ή όχι σύμπτυξη των εικόνων μπορεί να αξιολογηθεί συγκρίνοντας την τελική εικόνα με τις αρχικές εικόνες οι οποίες και θεωρούνται ως εικόνες αναφοράς. Αυτή η σύγκριση βασίζεται στα χωρικά και φασματικά χαρακτηριστικά των αρχικών εικόνων τα οποία ελέγχονται είτε οπτικά είτε ποσοτικά. Για την αξιολόγηση της ποιότητας της εικόνας μετά την συγχώνευση, πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένοι παράγοντες όπως, η χωρική-φασματική ανάλυση, η διαθέσιμη πληροφορία, η αντίθεση και η δυνατότητα διάκρισης λεπτομερειών των στοιχείων ενδιαφέροντος. Γενικά οι μέθοδοι αξιολόγησης των διαφορετικών τεχνικών σύμπτυξης των εικόνων διακρίνονται σε ποιοτικές (ή υποκειμενικές) και οι ποσοτικές (ή αντικειμενικές) (Fonseca *et al.* 2011).

A) Ποιοτικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας στηρίζονται στην εμπειρία ή σε ορισμένα προκαθορισμένα κριτήρια για τον έλεγχο της ποιότητας της εικόνας. Η αξιολόγηση γίνεται με οπτική σύγκριση μεταξύ των εικόνων προέλευσης και της εικόνας που προκύπτει από τη σύμπτυξη. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται ο τόνος, η αντίθεση (ανάλυση ιστογράμματος), η ευκρίνεια, ο κορεσμός του χρώματος και η υφή των εικόνων. Φυσικά ο συγκεκριμένος τρόπος αξιολόγησης εμπεριέχει κάποιο ποσοστό σφάλματος ανάλογα με την εμπειρία του παρατηρητή (Shi *et al.* 2005).

A) Ποσοτικές μέθοδοι

Εξαιτίας της υποκειμενικότητας της ποιοτικής ανάλυσης, έχει γίνει σημαντική προσπάθεια στην ανάπτυξη ποσοτικών μεθόδων αξιολόγησης. Αυτές οι μέθοδοι εξετάζουν τις εικόνες με εφαρμόζοντας ποσοτικά κριτήρια όπως:

- ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και η συσχέτιση,
- οι δείκτες ελέγχου της φασματικής και χωρικής ποιότητας των εικόνων όπως, ο συντελεστής συσχέτισης,
- ο δείκτης απόκλισης,
- ο κανονικοποιημένος δείκτης μέσου τετραγωνικού σφάλματος, κ.ά.

Οι δείκτες αυτοί προσδιορίζουν τη διαφορά που υπάρχει σε φασματική πληροφορία για κάθε κανάλι μεταξύ των εικόνων προέλευσης (αρχικές εικόνες) και της εικόνας που προκύπτει μετά τη διαδικασία συγχώνευσης (Zhou *et al.* 1998).

Μια καλή μέθοδος σύμπτυξης θα πρέπει να επιτρέπει την προσθήκη της υψηλής χωρικής ανάλυσης (της παγχρωματικής εικόνας) στην πολυφασματική εικόνα. Παράλληλα λεπτομερείς πληροφορίες σε σχέση πάντα με τις αρχικές πρέπει να είναι ανιχνεύσιμες στην παραγόμενη εικόνα.

9.4 Εφαρμογές των εικόνων σύμπτυξης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τεχνικές σύμπτυξης εικόνων χρησιμοποιούνται ευρέως σε αρκετά πεδία εφαρμογών στο τομέα της τηλεπισκόπησης. Ιδιαίτερα σε περιοχές με πολύπλοκες μορφολογικές δομές, όπως αγροτικές εκτάσεις με μικρές ιδιοκτησίες, ετερογενείς δασικές εκτάσεις και αστικές περιοχές απαιτούνται δορυφορικά δεδομένα υψηλής χωρικής και φασματικής διακριτικής ικανότητας. Όταν τέτοιου είδους δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα, αντίστοιχες τεχνικές συγχώνευσης εικόνων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία νέων εικόνων οι οποίες περιέχουν λεπτομερείς πληροφορίες (χωρικές και φασματικές). Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται, εφαρμογές σύμπτυξης εικόνων για τη διαχείριση γεωργικών εκτάσεων, την ταξινόμηση αστικών περιοχών και την παρακολούθηση δασικών εκτάσεων.

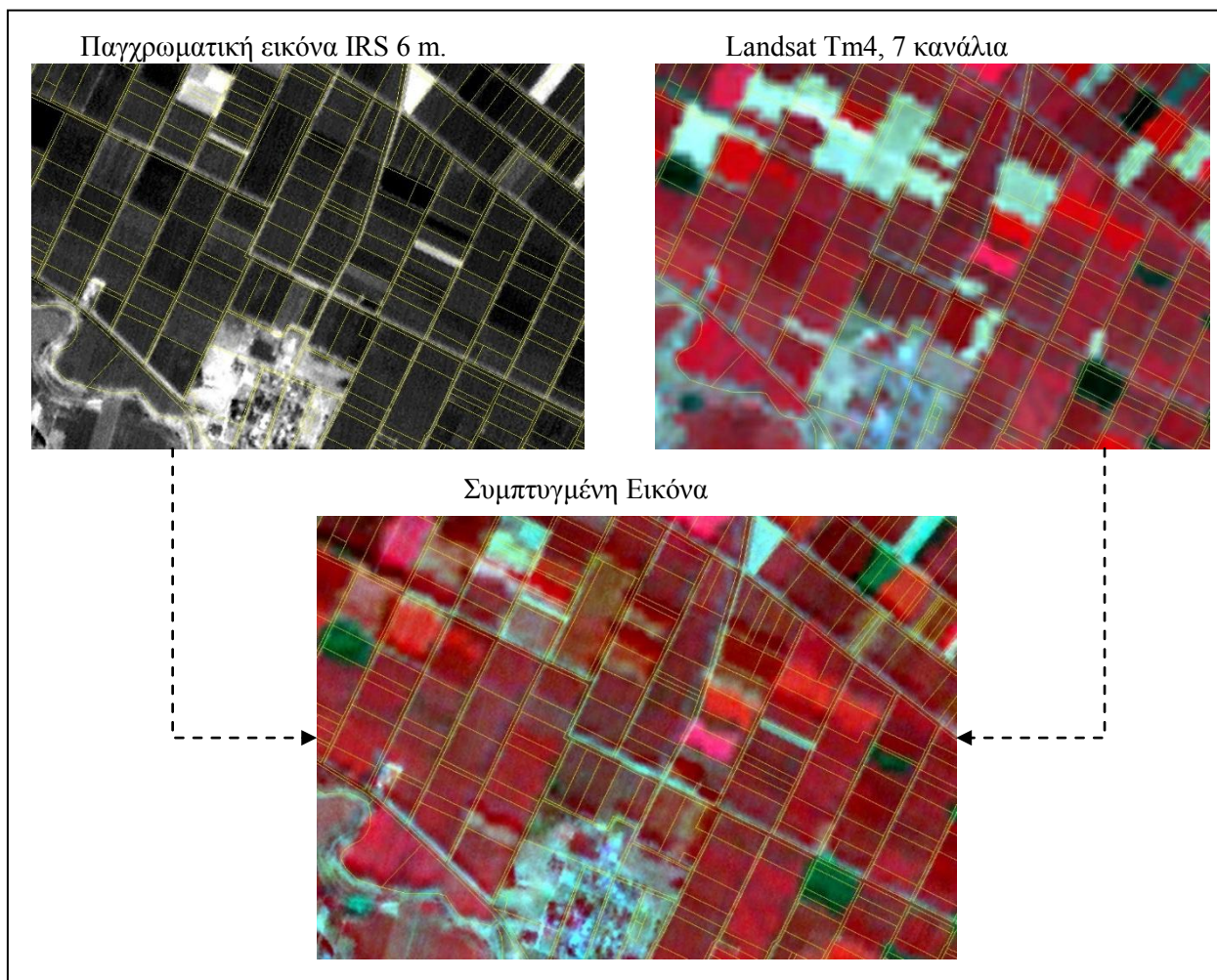
A) Διαχείριση αγροτικών εκτάσεων

Η τηλεπισκόπηση προσφέρει πολύτιμες ποσοτικές και ποιοτικές πληροφορίες στην γεωργία τόσο στον εντοπισμό καλλιεργήσιμων εκτάσεων και μη, όσο και κατά τα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών (εντοπισμός ασθeneιών-ξηρασίας κ.α.). Ειδικότερα για την παρακολούθηση της βλαστητικής κατάστασης των καλλιεργειών με χρήση δορυφορικών δεδομένων απαιτείται η γνώση του καλλιεργητικού ημερολογίου καθώς και η χαρτογράφηση των ιδιοκτησιών.

Παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η μελέτη περίπτωσης της κτηματικής περιοχής της κοινότητας Ευυδρίου – Φαρσάλων. Πρόκειται για πεδινή κοινότητα, στον κάμπο των Φαρσάλων, της Περιφερειακής Ενότητας Λάρισας. Στη δεκαετία του 1990, κυριαρχούσαν οι αρδευόμενες καλλιέργειες όπως βαμβάκι και καλαμπόκι και σε μικρότερο ποσοστό οι μη αρδευόμενες όπως το σκληρό σιτάρι. Βασικός στόχος υπήρξε η παρακολούθηση της ποιότητας των καλλιεργειών, στην περιοχή μελέτης, με χρήση δορυφορικών δεδομένων.

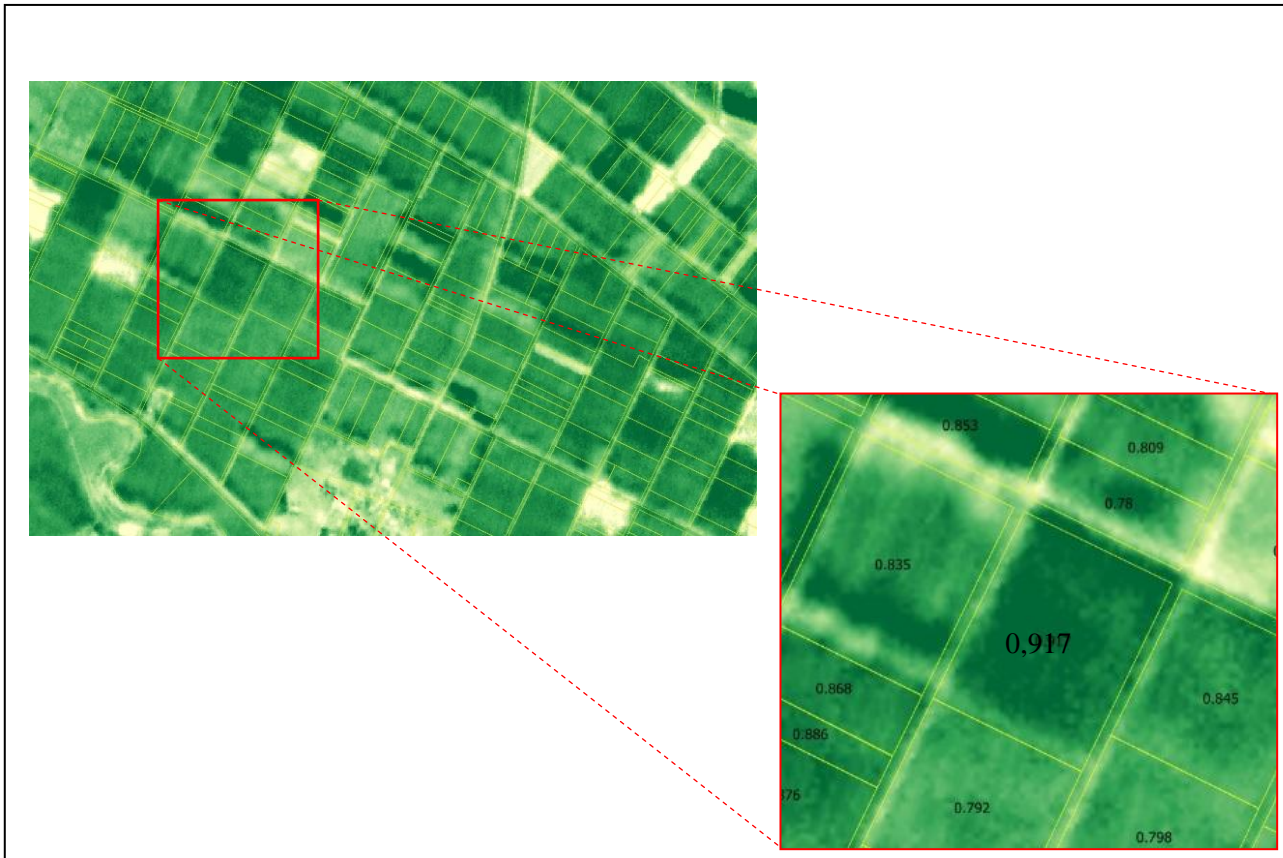
Αρχικά χαρτογραφήθηκαν οι ιδιοκτησίες της κτηματικής περιοχής. Διαθέσιμες ήταν δύο δορυφορικές εικόνες, μια παγχρωματική του δορυφόρου IRS με χωρική διακριτική ικανότητα 6 μέτρων και μια πολυφασματική του δορυφόρου Landsat TM4 με ημερομηνία λήψης και των δύο εικόνων τον Ιούλιο του 1997. Ακολούθησε η προ-επεξεργασία των εικόνων (γεωμετρική, ραδιομετρική διόρθωση) ενώ στη συνέχεια εφαρμόστηκε η τεχνική συγχώνευσης εικόνων με την μέθοδο της Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες (PCA).

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 9.7) απεικονίζεται η διαδικασία σύμπτυξης των δύο δορυφορικών εικόνων. Σε όλες τις εικόνες περιλαμβάνεται και η χαρτογράφηση των ιδιοκτησιών (με κίτρινο χρώμα). Η συγχώνευση των δύο εικόνων δημιουργεί πολυφασματική εικόνα 7 καναλιών με χωρική διακριτική ικανότητα 6 μέτρα. Συγκεκριμένα απεικονίζεται η ψευδοχρωματική εικόνα με χρωματική σύνθεση καναλιών (RGB) στα μήκη κύματος του υπέρυθρου, το ερυθρού και του πράσινου. Το έντονο κόκκινο χρώμα υποδηλώνει υψηλά ποσοστά βιομάζας σε αρδευόμενες εκτάσεις. Αντίθετα το πράσινο και γκρι χρώμα υποδηλώνει μη αρδευόμενες εκτάσεις. Στο νότιο τμήμα της εικόνας βρίσκεται ο οικισμός του Ευυδρίου ο οποίος και περιβάλλεται από κοινοτικό βοσκότοπο.



Εικόνα 9.7 Δημιουργία εικόνας σύμπτυξης από IRS και Landsat TM

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (NDVI) ως μια προσπάθεια αξιολόγησης της βιομάζας καθώς και της ποιότητας της βλάστησης στην κτηματική περιοχή της κοινότητας. Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 9.8) απεικονίζεται ο NDVI με εύρος τιμών 0,4-0,95. Το σκούρο πράσινο χρώμα αντιστοιχεί σε υψηλές τιμές του δείκτη ενώ το ανοιχτό χρώμα σε χαμηλότερες. Τέλος έγινε ανάλυση της ποιότητας των καλλιεργειών σε επίπεδο ιδιοκτησίας. Στη μεγεθυμένη εικόνα δεξιά απεικονίζονται οι ιδιοκτησίες καθώς και οι μέσες τιμές του δείκτη βλάστησης (NDVI). Για παράδειγμα η ιδιοκτησία με μέση τιμή NDVI 0,917 υποδηλώνει υγιή βλάστηση στο σύνολό της. Όμως, στο εσωτερικό της ιδιοκτησίας, παρατηρούνται, διαφοροποιήσεις στη βιομάζα (περιοχές με διαφορετική χρωματική σύνθεση). Το γεγονός αυτό φανερώνει πρόβλημα στην καλλιέργεια, σε συγκεκριμένες ζώνες του χωραφιού και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση (ανεπάρκεια άρδευσης, έναρξη ασθένειας κ.ά.).



Εικόνα 9.8 Ποιοτική αξιολόγηση καλλιεργειών με τη βοήθεια του δείκτη βλάστησης - NDVI

Β) Χαρτογράφηση στο εσωτερικό οικισμών

Η χαρτογράφηση καλύψεων – χρήσεων γης στο εσωτερικό των οικισμών στην ελληνική επικράτεια αποτελεί επίπονο έργο και πρόκληση για την επιστήμη της τηλεπισκόπησης. Έως τη δεκαετία του 2000 οι επιτόπιες έρευνες με τη βοήθεια αεροφωτογραφιών (που ήταν διαθέσιμες σε κατάλληλη χωρική και χρονική ανάλυση) χρησιμοποιούνταν ευρέως για τη χαρτογράφηση των βασικών καλύψεων γης των οικισμών. Όμως στην αρχή της δεκαετίας του 2000 άρχισαν να εμφανίζονται δορυφορικά συστήματα πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης (Ikonos, QuickBird, Spot5, WorldView, GeoEye κ.ά.). Τα συστήματα αυτά προσφέρουν συνήθως, παγχρωματικές εικόνες με χωρική ανάλυση ενός μέτρου (και μικρότερη) και πολυφασματικές εικόνες με φασματική ανάλυση από τέσσερα έως και οκτώ κανάλια. Οι σχετικά χαμηλές τιμές πώλησής τους, ο υψηλός ρυθμός επαναδιέλευσης των δορυφόρων στην περιοχή μελέτης, καθώς και ο μικρός χρόνος παράδοσης καθιστά την αγορά τους ελκυστική για επιχειρησιακές εφαρμογές και ιδιαίτερα για πολεοδομικές εφαρμογές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα περιγράφεται στη συνέχεια.

Στόχος της εφαρμογής ήταν ο εντοπισμός και η χαρτογράφηση κατοικιών με κεραμοσκεπή, στο πλαίσιο μιας πολεοδομικής μελέτης.

Για το σκοπό διατέθηκαν οι παρακάτω δορυφορικές εικόνες QuickBird:

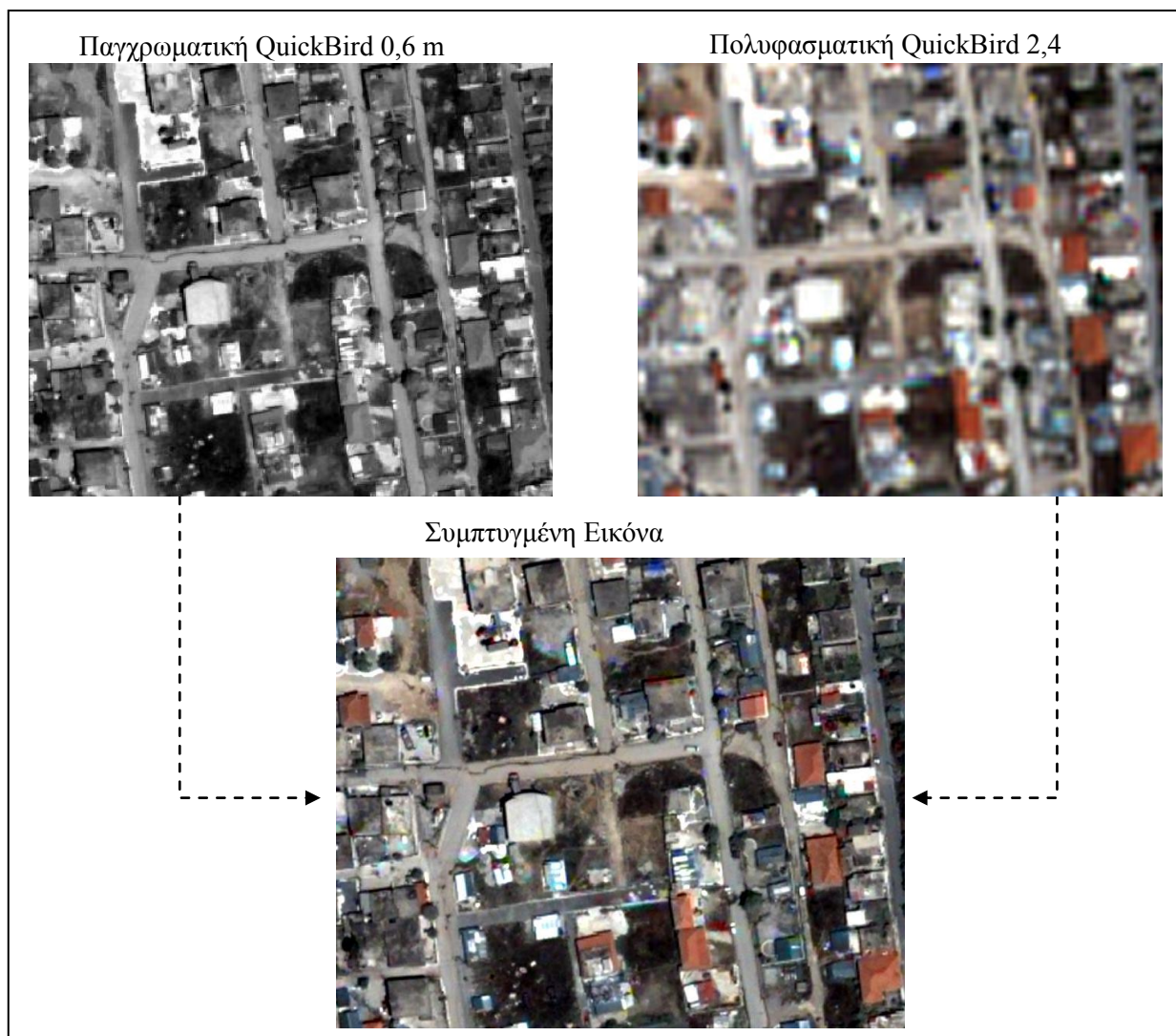
(α) μια παγχρωματική με χωρική ανάλυση 60cm και

(β) μια πολυφασματική εικόνα τεσσάρων καναλιών με χωρική ανάλυση 2,4m.

Εάν και πρόκειται για εικόνες πολύ υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας δεν ήταν δυνατόν ο εντοπισμός των κατοικιών με κεραμοσκεπή σε κάθε μια από τις δύο διαθέσιμες εικόνες. Έτσι, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία σύμπτυξης των εικόνων με χρήση της τεχνικής της ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες (PCA). Η συμπυκνωμένη εικόνα που προέκυψε επέτρεψε τον εύκολο εντοπισμό και την ψηφιοποίηση των υπό εξέταση κατοικιών.

Στη συμπυκνωμένη εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 9.9) απεικονίζονται, με μεγάλη ευκρίνεια οι κεραμοσκεπές. Παράλληλα είναι πιο ευδιάκριτες οι χρήσεις/καλύψεις γης του οικισμού όπως: το οδικό δίκτυο, οι κατοικίες, οι αδόμητες εκτάσεις, η ύπαρξη πρασίνου κ.α. Το γεγονός αυτό επέτρεψε την λεπτομερή

χαρτογράφηση/ψηφιοποίηση των στοιχείων του οικισμού και την κωδικοποίηση σε μια γεωγραφική βάση δεδομένων.



Εικόνα 9.9 Σύμπτυξη εικόνων QuickBird για τον εντοπισμό κατοικιών με κεραμοσκεπή.

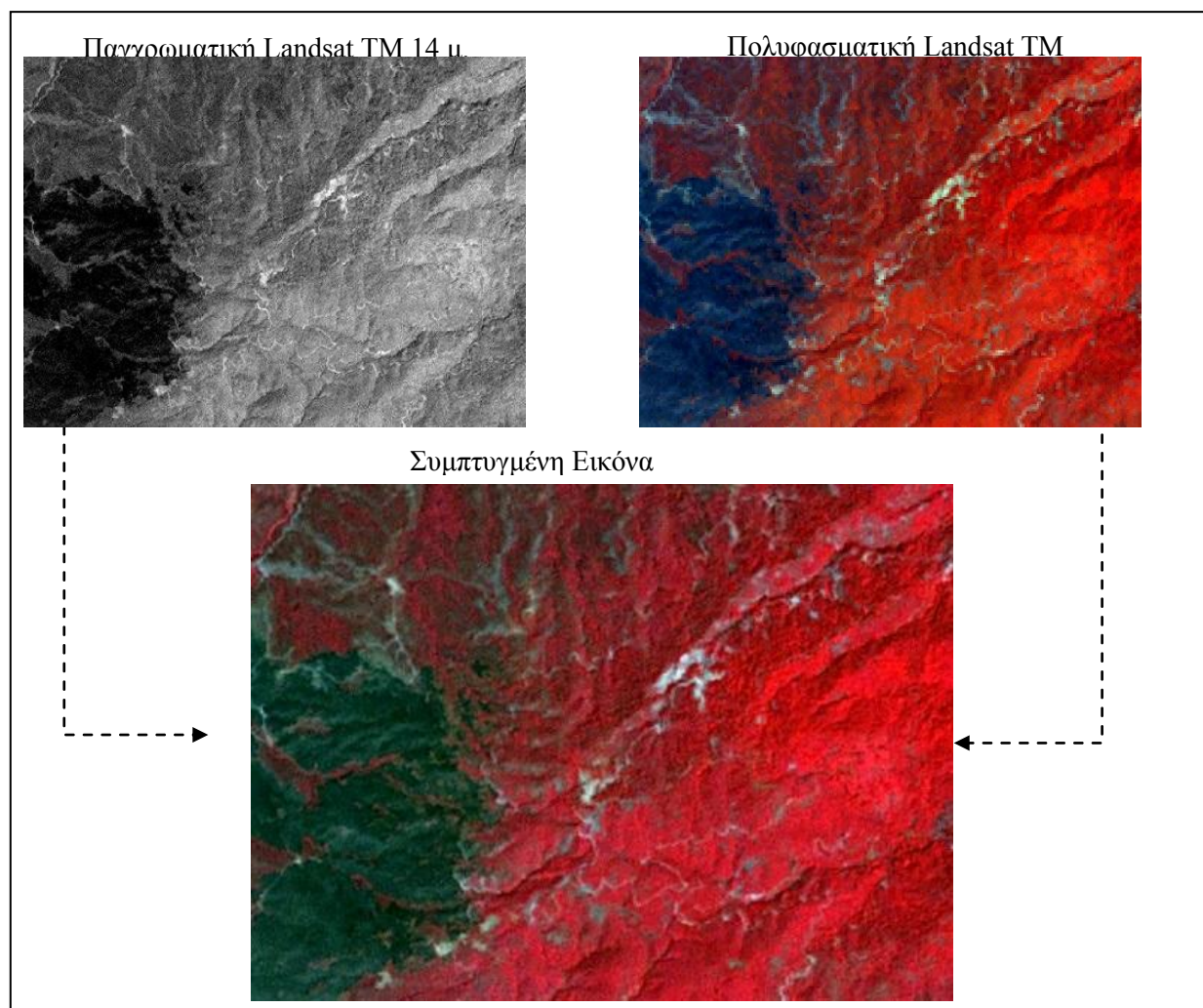
Β) Διαχείριση δασικών εκτάσεων

Η διαχείριση του δασικού πλούτου τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε εθνικό επίπεδο αποτελεί βασική πρόκληση για τους ειδικούς και θεμελιώδες στοιχείο ενημερίας της παγκόσμιας οικονομίας. Η παραγωγή ξυλείας, η βιοποικιλότητα, οι πλημμύρες, η αποθήκευση του CO₂, η αναψυχή, οι πυρκαγιές, οι υποβάθμιση των ειδών κ.α. είναι μερικοί από τους τομείς δραστηριοτήτων που πρέπει να διαχειριστούν οι ειδικοί επιστήμονες (δασολόγοι, γεωπόνοι, περιβαλλοντολόγοι, βιολόγοι κ.α.). Επιπλέον η κλιματική αλλαγή, με τις νέες πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για αειφορική διαχείριση των δασικών πόρων κάνουν επιτακτική την ανάγκη χρήσης δορυφορικών δεδομένων. Μια σημαντική πηγή δορυφορικών δεδομένων που συμβάλουν στη διαχείριση του δασικού πλούτου είναι οι εικόνες του προγράμματος Landsat.

Στο παράδειγμα που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκαν εικόνες Landsat TM για την χαρτογράφηση δασικής έκτασης στο όρος Μαυροβούνι της Περιφερειακής Ενότητας Λάρισας. Οι εικόνες ήταν μια παγχρωματική με διαστάσεις pixel 15 μέτρα και μια πολυφασματική (7 κανάλια) με αντίστοιχες διαστάσεις 30 μέτρα. Για την καλύτερη χαρτογράφηση της δασικής έκτασης εφαρμόστηκε η τεχνική της σύμπτυξης των εικόνων. Το τελικό προϊόν χρησιμοποιήθηκε στην λεπτομερέστερη (α) οριοθέτηση της καμένης έκτασης, (β) εντοπισμό των δασικών δρόμων, (γ) καταγραφή της βιομάζας και υγιούς βλάστησης της περιοχής μελέτης.

Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 9.10) αποτυπώνονται οι εικόνες Landsat που χρησιμοποιήθηκαν για την σύμπτυξη καθώς και η παραχθείσα εικόνα. Χωρίς την παραπάνω μεθοδολογία δεν θα ήταν εφικτή η

χαρτογράφηση ιδιαίτερα γραμμικών στοιχείων στο εσωτερικό της δασικής έκτασης όπως το δασικό οδικό δίκτυο.



Εικόνα 9. 10 Σύμπτυξη παγχρωματικής και πολυφασματικής εικόνας Landsat TM.

Φυσικά, οι εφαρμογές σύμπτυξης των εικόνων δεν περιορίζονται στα παραπάνω παραδείγματα. Ο μεγάλος αριθμός διαθέσιμων χαρτογραφικών δορυφόρων υψηλής χωρικής και πολυφασματικής διακριτικής ικανότητας αντίστοιχα δίνει τη δυνατότητα του συνδυασμού των πλεονεκτημάτων των εικόνων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ιδιαίτερα στην επιστήμη της πολεοδομίας/χωροταξίας η σύμπτυξη εικόνων αποτελεί σημαντικό εργαλείο στη διαχείριση των χρήσεων/καλύψεων γης καθώς και για τον σχεδιασμό γενικότερα.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Ξενόγλωσση

Svab, A. and Ostir, K., 2006. High resolution Image Fusion: Methods to Preserve Spectral and Spatial Resolution. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, (5), 565-572.

Bloom, A., Fielding, E. and Fu, X., 1988. A demonstration of stereo photogrammetry with combined SIR-B and Landsat-TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 1023-1038.

- Carper, W.J., Lillesand, T.M. and 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, 459-467.
- Chavez, P.S. and Kwarteng, A.Y., 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55, 339-348.
- Daily, R.I., Farr, T. and Elachi, C., 1979. Geological Interpretation from Composite Radar and Landsat Imagery. *Photogrammetric Engineering*, 45 (8), 1109-1116.
- Dong Jiang, Dafang Zhuang and Yaohuan Huang, 2013. Investigation of Image Fusion for Remote Sensing Application, *New Advances in Image Fusion*, Dr. Qiguang Miao (Ed.), ISBN: 978-953-51-1206-8, InTech, DOI: 10.5772/56946. Available from: <http://www.intechopen.com/books/new-advances-in-image-fusion/investigation-of-image-fusion-for-remote-sensing-application>.
- Fonseca Leila, Namikawa Laercio, Castejon Emiliano, Carvalho Lino, Pinho Carolina and Pagamisse Aylton, 2011. Image Fusion for Remote Sensing Applications, *Image Fusion and Its Applications*, Dr. Yufeng Zheng (Ed.), ISBN: 978-953-307-182-4, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/image-fusion-andits-applications/image-fusion-for-remote-sensing-applications>.
- Jensen, J.R., 1986. *Digital Image Processing, an Introductory Perspective*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Hall, D.L. and Llinas, J., 1997. An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, Volume: 85, Issue: 1, 6-23.
- Lalit, Kumar, Priyakant, Sinha, and Subhashni, Taylor, 2014. Improving image classification in a complex wetland ecosystem through image fusion techniques, *Journal of Applied Remote Sensing*, 8 (1), doi: 10.1117/1.JRS.8.083616.
- Pohl, C., Genderen Van J.L., 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (5), 823-854.
- Qiang, Yang, Hua, Jun, Wang, and Xuegang, Luo, 2015. Research on Remote Sensing Image Fusion Algorithm Based on Compressed Sensing. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 8 (5) 283-292.
- Shah, V.P, Younan, N.H. and King, R.L., 2008. An efficient Pansharpening method via a combined Adaptive PCA approach and Contourlets. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 46 (5), 1323-1335.
- Shi, W., Zhu, C., Tian, Y, and Nichol, J., 2005. Wavelet-based image fusion and quality assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6, 241-251.
- Siddiqui, Y., 2003. The Modified IHS Method for Fusing Satellite Imagery. ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings, May 5-9.
- Wald, L., Ranchin, T. and Mangolini, M., 1997. Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: *Assessing the Quality of Resulting Images*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63 691-699.
- Zhou, J., Civico, D.L. and Silander, J.A., 1998. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 743-757.

Κεφάλαιο 10 Φασματικές υπογραφές

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης

Σύνοψη

Η σύνδεση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τα φασματικά κανάλια των δορυφόρων και η σχηματική αναπαράσταση της από την κύρια πηγή εκπομπής της, τον ήλιο, έως τους αισθητήρες του δορυφόρου πλαισιώνουν την εισαγωγή του κεφαλαίου αυτού. Στη συνέχεια ο προσδιορισμός κάποιας φασματικής υπογραφής σχηματικά και με αριθμητικό παράδειγμα στα φασματικά κανάλια οδηγούν στην δημιουργία της φασματικής υπογραφής της βλάστησης. Τέλος αφού περιγραφεί αναλυτικά η φασματική συμπεριφορά της βλάστησης το κεφάλαιο αυτό κλείνει με σύντομες περιγραφές των φασματικών υπογραφών του νερού και του εδάφους.

10.1 Εισαγωγή

Η προσπίπτουσα στην επιφάνεια της γης Η/Μ ακτινοβολία μπορεί να ανακλαστεί, να διαχυθεί ή να απορροφηθεί. Η ποσότητα της διαχεόμενης και ανακλώμενης ακτινοβολίας εκτός από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο των ραδιομετρικών διορθώσεων, εξαρτάται και από τον τύπο κάλυψης γης της επιφάνειας που καλύπτει η προσπίπτουσα ακτινοβολία.

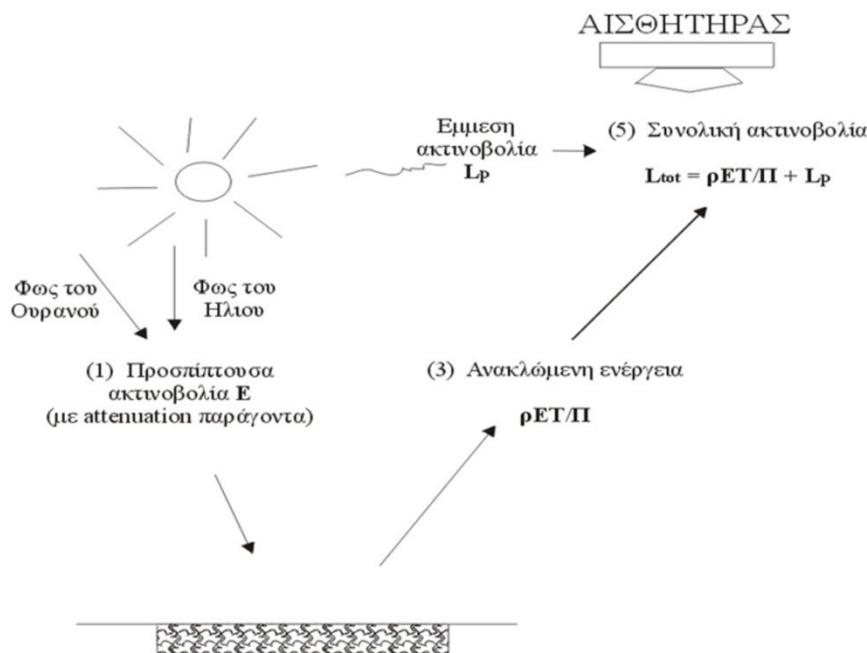
Οι αισθητήρες του δορυφόρου καταγράφουν ένα μέρος της διαχεόμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια της γης, διότι η διαχεόμενη και εκπεμπόμενη Η/Μ ακτινοβολία επηρεάζονται και αντιδρούν με τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας .

Έτσι, μία συγκεκριμένη κάλυψη γης παρέχει για κάθε συγκεκριμένο εύρος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (φασματικό κανάλι που διαθέτει ο κάθε δορυφόρος), -μετά από την διαδρομή της στην ατμόσφαιρα και με τις αντίστοιχες απώλειες- μία ποσότητα Η/Μ ακτινοβολίας στον αντίστοιχο αισθητήρα του δορυφόρου.

Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε κάποια ραδιομετρική τιμή. Ωστόσο κάθε pixel της ίδιας κάλυψης γης δεν παρέχει αναγκαστικά την ίδια ραδιομετρική τιμή στο ίδιο φασματικό κανάλι [οι ραδιομετρικές τιμές τους όμως, εάν η μελετώμενη κάλυψη γης είναι ομογενής, είναι κοντινές]. Για τον λόγο αυτό, η εξαγωγή του μέσου όρου των ραδιομετρικών τιμών όσο το δυνατό μεγαλύτερης συγκέντρωσης (αριθμού) pixels της ίδιας κάλυψης γης, θα δώσει πιο σωστά αποτελέσματα για την ραδιομετρία μιας κάλυψης γης από ότι ένα ή έστω και λίγα pixels.

Το παραπάνω γεγονός ενισχύεται σημαντικά εάν οι ραδιομετρικές τιμές των pixels που αντιστοιχούν σε μία συγκεκριμένη κάλυψη γης, εμφανίζουν μικρή διακύμανση πράγμα που σημαίνει ότι η θεωρούμενη κάλυψη γης είναι αρκετά ομογενής.

Οι Lillesand και Kiefer (1994) δίνουν σχηματικά και ποσοτικά το σύνολο της ακτινοβολίας που φθάνει στον αισθητήρα του δορυφόρου από μία συγκεκριμένη κάλυψη γης.



Εικόνα 10.1 Σχηματική αναπαράσταση της παραγόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την γη και τους αισθητήρες του δορυφόρου.

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται πώς επηρεάζεται άμεσα η ακτινοβολία που καταγράφεται από τον αισθητήρα από τα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Η ποσοτικοποίηση του γεγονότος αυτού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$L_{tot} = \rho ET/\Pi + L_p \quad (10.1)$$

- Όπου L_{tot} η συνολική ακτινοβολία που φτάνει στον αισθητήρα του δορυφόρου
- ρ η συνολική ακτινοβολία μιας κάλυψης γης ή πιο ακριβέστερα, ενός αντικειμένου
- E η προσπίπτουσα ακτινοβολία
- T η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα
- L_p η έμμεσα παρεχόμενη ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα και όχι από τα αντικείμενα
- $\Pi = 3,14159$.

10.2 Προσδιορισμός των φασματικών υπογραφών. Αριθμητικά παραδείγματα

Είναι ασύμφορο και πρακτικά πολύ δύσκολο να βρούμε την φασματική υπογραφή μιας κάλυψης γης μελετώντας όλη την έκταση γης που κατέχει σε μία δορυφορική εικόνα. Γι' αυτό και επιλέγουμε δειγματοληπτικές περιοχές ή όπως θα δούμε στις επιβλεπόμενες ταξινομήσεις «περιοχές εκπαίδευσης» [training sites] αντιπροσωπευτικές της κάλυψης γης που μελετούμε.

Χωρικά, οι δειγματοληπτικές αυτές περιοχές είναι οι ίδιες σ' όλα τα φασματικά κανάλια ενός δορυφόρου.

Η μέσες ραδιομετρικές τιμές των pixels μιάς κάλυψης γης όλων των δειγματοληπτικών περιοχών όλων των καναλιών δημιουργεί ένα διάγραμμα το οποίο είναι χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης κάλυψης γης [με τόσες συνιστώσες όσα και τα φασματικά κανάλια].

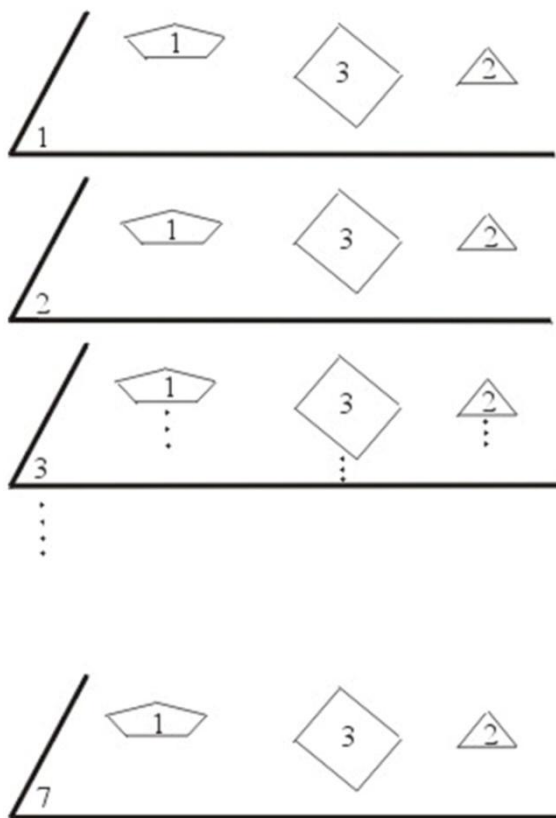
Εάν τοποθετήσουμε τις μέσες αυτές τιμές σ' ένα σχεδιάγραμμα, δεχθούμε ότι η κλίμακα των ραδιομετρικών τιμών είναι από 0 έως 255 [για 8-bit ψηφιακές δορυφορικές εικόνες], αντιστοιχεί σε μία κλίμακα ανακλαστικότητας από 0 έως 100%, θεωρήσουμε σαν οριζόντιο άξονα του σχεδιαγράμματος το μήκος κύματος και κάθετο την ανακλαστικότητα, δημιουργούμε την φασματική υπογραφή (Φ/Y) της κάλυψης γης που μελετούμε.

Παράδειγμα: Έστω ότι οι μέσες ραδιομετρικές τιμές όλων των pixels που περιέχονται από τρεις δειγματοληπτικές περιοχές μίας κάλυψης γης [στα 6 κανάλια 1, 2, 3, 4, 5 και 7 και όχι στο 6ο] του δορυφόρου Landsat, δίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 10.1 Παράδειγμα μέσων ραδιομετρικών τιμών δειγματοληπτικών περιοχών στα φασματικά κανάλια 1, 2, 3, 4, 5, 7 του δορυφόρου Landsat.

Αριθμ. Φασμ. Καναλιών	Μέση ραδιομ. Τιμή	≈Αντίστοιχη % ανακλαστικότητα
1	31	12
2	20	8
3	51	20
4	123	48
5	110	43
7	46	18

Σχηματικά οι δειγματοληπτικές περιοχές στην πολυφασματική εικόνα παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

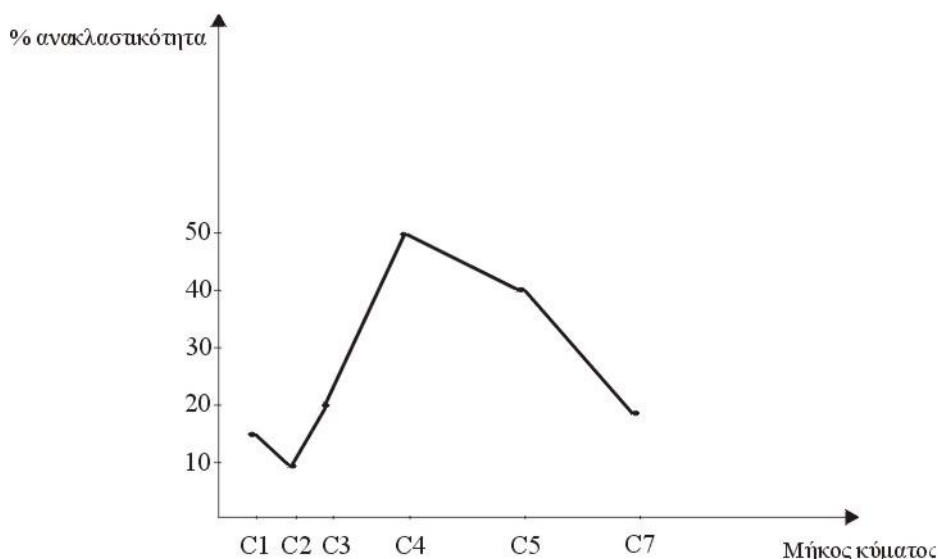


Εικόνα 10.2 Σχηματική αναπαράσταση δειγματοληπτικών περιοχών μίας κάλυψης γης στα φασματικά κανάλια 1, 2, 3, 4, 5 και 7 του δορυφόρου Landsat.

Πιο αναλυτικά έστω ότι για το 1ο μόνο κανάλι η μία δειγματοληπτική περιοχή περιείχε 4 pixels με τιμές 28, 34, 29, 33 η δεύτερη 3 pixels με τιμές 34, 30, 29 και η τρίτη 6 pixels με τιμές 33, 31, 34, 28, 29, 31.

Έτσι η μέση ραδιομετρική τιμή για το 1^ο κανάλι θα είναι $[28+34+29+33+34+30+29+33+31+34+28+29+31 / 13] = 31$.

Το τελικό σχεδιάγραμμα που μας δίνει προσεγγιστικά την φασματική υπογραφή της συγκεκριμένης κάλυψης γης (όπου C1, C2, C3, C4, C5 και C7 τα μήκη κύματος των αντίστοιχων φασματικών καναλιών) δίνεται παρακάτω:



Εικόνα 10.3 Φασματική υπογραφή της κάλυψης γης που προέκυψε από τις δειγματοληπτικές περιοχές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

όπου οι διαβαθμίσεις C1, C2, C3, C4, C5 και C7 παριστάνονται σημειακά και αντιστοιχούν στα εύρη των μηκών κύματος των φασματικών καναλιών -σε μικρόμετρα- του δορυφόρου Landsat δηλαδή:

C1: 0,45 – 0,52 C2: 0,52 – 0,60 C3: 0,63 – 0,69

C4: 0,75 – 0,90 C5: 1,55 – 1,75 C7: 2,08 – 2,35

Όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο για την φασματική υπογραφή που βρήκαμε, υπάρχουν σοβαρές πιθανότητες να είναι η φασματική υπογραφή της βλάστησης.

10.3 Φασματικές υπογραφές των βασικών καλύψεων γης

10.3.1 Η βλάστηση

Η έντονη αίσθηση του πράσινου ως συγκεκριμένου και αμιγούς χρώματος από κάποια κάλυψη γης προκύπτει από το γεγονός ότι η βλάστηση παρουσιάζει υψηλή απορρόφηση της ενέργειας που αντιστοιχεί στο μπλε και κόκκινο χρώμα ενώ αντίθετα, ανακλά πολύ στην περιοχή του φάσματος που αντιστοιχεί στο πράσινο χρώμα. Μία φυτική κάλυψη με έντονη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη παρουσιάζει αυτά τα χαρακτηριστικά.

Έτσι σχηματικά, περιμένουμε να δούμε στην φασματική υπογραφή της υγιούς βλάστησης και στην περιοχή του ορατού φάσματος μία καμπύλη που θα εμφανίζει τοπικά ελάχιστα στις περιοχές του ορατού φάσματος που αντιστοιχούν στο μπλε και κόκκινο χρώμα και τοπικό μέγιστο στο πράσινο χρώμα. Ωστόσο, η ανακλαστικότητα της υγιούς βλάστησης σ' όλο το ορατό φάσμα είναι σχετικά χαμηλή και αυτό οφείλεται κυρίως στα συστατικά [pigments] των φύλλων. Ουσιαστικά, η απορρόφηση του μπλε και κόκκινου χρώματος στο ορατό κυμαίνεται σε ποσοστά 70-90% για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της φωτοσύνθεσης.

Στην συνέχεια, η φασματική υπογραφή της υγιούς βλάστησης και προς το τέλος της περιοχής του κόκκινου φάσματος αυξάνει απότομα και φθάνει μεταξύ στο 40 με 50% της συνολικής ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο. Το κομμάτι της φασματικής υπογραφής της βλάστησης που αντιστοιχεί σ' αυτήν την απότομη αύξηση είναι γνωστό και σαν «κόκκινη ακμή» (Mather 1987). Κατόπιν στα αμέσως μεγαλύτερα μήκη κύματος, η υγιής βλάστηση διατηρεί τις ψηλές τιμές ανακλαστικότητας στην φασματική της υπογραφή δημιουργώντας έτσι ένα πλατό που διατηρείται από 0,75 έως 1,35 μm και που οφείλεται κυρίως στην

εσωτερική δομή των φύλλων των φυτών. Έτσι, ειδικά αυτή η περιοχή του φάσματος είναι ιδανική για τον διαχωρισμό των διαφόρων φυτικών ειδών.

Πιο αριστερά στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, η φασματική υπογραφή της βλάστησης εμφανίζει μία αλληλοδιαδοχή τοπικών ελάχιστων και μέγιστων.

Γενικά η μορφή της φασματικής υπογραφής της βλάστησης στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από 1,35 έως και 2,7 μm οφείλεται σε δύο παράγοντες που είναι θετικά συσχετισμένοι μεταξύ τους: στην περιεκτικότητα των φύλλων σε νερό [υγρασία] και στο πάχος τους. Οι παράγοντες αυτοί ενεργούν αντίστροφα από την ανακλαστικότητα των φυτών.

Έτσι παρατηρούμε τοπικά ελάχιστα στις περιοχές των 1,4 μm, 1,9 μm και 2,65 μm που οφείλονται στην απορρόφηση από το νερό και δύο τοπικά μέγιστα ανάμεσα από αυτά.

Αξιοσημείωτο είναι ότι ενώ οι ασθένειες των φυτών επηρεάζουν σημαντικά την φασματική υπογραφή της βλάστησης στο ορατό, με την αύξηση της ηλικίας τους δεν συμβαίνει το ίδιο. Έτσι, για ηλικιωμένα φυτά το πλατό που αναφέρθηκε στο εγγύς υπέρυθρο εμφανίζεται σε χαμηλότερη ανακλαστικότητα, ενώ η φασματική υπογραφή στο ορατό επηρεάζεται μόνο λίγο.

Σημαντικό είναι ότι όσο περισσότερο αυξάνει η περιεκτικότητα σε υγρασία στα φυτά τόσο το ποσοστό ανακλαστικότητας μειώνεται σ' όλα τα μήκη κύματος (Thomas, Benning and Ching 1987).

Επίσης, η παρουσία οξειδίων του σιδήρου στο έδαφος μειώνει την επί τις % ανακλαστικότητα της βλάστησης τουλάχιστον στο ορατό φάσμα.

Τέλος, στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται και άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την φασματική υπογραφή της βλάστησης όπως:

- α. Το ποσοστό φυτοκάλυψης στην επιφάνεια του εδάφους.
- β. Η γεωμετρία και η δομή της φυτοκάλυψης.
- γ. Χαρακτηριστικά του φυτού εκτός από τα φύλλα όπως μίσχοι, ρίζες κ.ά.
- δ. Εδαφικά χαρακτηριστικά κατά την διάρκεια της λήψης της δορυφορικής εικόνας.
- ε. Σκιάσεις και επιμέρους περιβαλλοντικοί παράγοντες κατά την διάρκεια της δορυφορικής λήψης επίσης..

10.3.2 Το νερό

Η τυπική φασματική υπογραφή του νερού εμφανίζεται σαν μία καμπύλη που παρουσιάζει μόνον ένα τοπικό μέγιστο γύρω στα 0,5μm με τιμή προσεγγιστικά στο 10% της ανακλαστικότητας [η καμπύλη φαίνεται μετατοπισμένη παράλληλα ως προς τον οριζόντιο άξονα των μηκών κύματος στις διάφορες βιβλιογραφικές αναφορές για λόγους διαφορετικής ανακλαστικότητας του νερού που θα αναφερθούν παρακάτω (Lillesand and Kiefer 1994, Schowenkerdt 1983, Mather, 1984).

Η Φ/Υ μηδενίζεται σχεδόν στις περιοχές των μηκών κύματος 0,8-0,9 μm. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την Φ/Υ του νερού είναι: Η θολότητα που μπορεί να οφείλεται σε ρύπους ή ιζήματα, η αναταραχή της υδάτινης επιφάνειας από την οποία εξήχθη η Φ/Υ, η περιεκτικότητα του νερού σε βιομηχανικά ή γεωργικά απόβλητα που ευνοούν την ανάπτυξη μικροοργανισμών [όπως π.χ. συνέβη με την εμφάνιση ύπαρξης πλαγκτόν σε μεγάλο βαθμό στον Παγασητικό κόλπο, λόγω φυτοφαρμάκων που εξέρρεαν στον κόλπο] και τέλος η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη [π.χ. φύκια] με αποτέλεσμα η Φ/Υ του νερού να αυξάνεται στο μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο πράσινο χρώμα.

10.3.3 Το έδαφος

Η Φ/Υ του εδάφους είναι μία μάλλον ομαλή αύξουσα καμπύλη που αρχίζει περίπου από το 20 % της συνολικής ανακλαστικότητας και φθάνει περίπου στο 45% [στις περιοχές γύρω στα 1,8 μm και 2,1 μm του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος]. Έχει μερικά όχι ιδιαίτερα σημαντικά μέγιστα και ελάχιστα που οφείλονται σε διάφορους παράγοντες όπως: την τραχύτητα του εδάφους, τις σκιάσεις, την περιεκτικότητά του εδάφους σε διάφορα στοιχεία όπως οξείδια του σιδήρου ή οργανικές ουσίες και την υφή του που οφείλεται σε διάφορους τύπους εδαφών [όπως αμμώδη, αλατούχα, αργιλώδη εδάφη κ.λπ.].

Βιβλιογραφία/Αναφορές

ESA, Eduspace, 2015. Διαθέσιμο στο:

http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_EN/SEMPNQ3Z2OF_0.html, [Πρόσβαση 18/10/2015].

Lillesand, T., Kiefer, R.W. and Chipman, J., 2015. *Remote Sensing and Image Interpretation*, 7th ed., Wiley.

NASA, Earth Observatory, 2015. Διαθέσιμο στο:

http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RemoteSensing/remote_05.php, [Πρόσβαση 18/10/2015].

SEOS project: Introduction to Remote Sensing, 2015. Διαθέσιμο στο: [http://www.seos-](http://www.seos-project.eu/modules/remotesensing/remotesensing-c01-p05.html)

[project.eu/modules/remotesensing/remotesensing-c01-p05.html](http://www.seos-project.eu/modules/remotesensing/remotesensing-c01-p05.html), [Πρόσβαση 18/10/2015].

Richards, J. and Xiuping, J., 1999. *Remote Sensing Digital Image Analysis, An Introduction*. Berlin: Springer Verlag.

Κεφάλαιο 11 Ταξινομήσεις

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης

Σύνοψη

Στην εισαγωγή του ενδεκάτου κεφαλαίου αναλύεται η έννοια της ταξινόμησης στην Τηλεπισκόπηση και διαχωρίζονται οι ταξινομήσεις σε δύο μεγάλες κατηγορίες των οποίων η χρήση εξηγείται σε γενικές γραμμές. Ακολούθως εκτίθενται οι δύο βασικότερες μέθοδοι των μη επιβλεπόμενων ταξινομήσεων η ταξινόμηση κατά συστάδες και των ισοδομημένων (isodata). Από τις επιβλεπόμενες ταξινομήσεις αναλύονται οι πλέον γνωστές που είναι η ταξινόμηση της ελάχιστης απόστασης από τη μέση (ραδιομετρική) τιμή των ομάδων, η ταξινόμηση των παραλληλεπιπέδων και η ταξινόμηση της μέγιστης πιθανοφάνειας. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται μια αναλυτική ομαδοποίηση των ταξινομήσεων με ορισμένα κριτήρια. Το κεφάλαιο αυτό πλαισιώνεται από σχήματα αλλά κυρίως ταξινομημένες εικόνες για κάθε ταξινόμηση που παρουσιάζεται αναλυτικά.

11.1 Εισαγωγή

Η έννοια της ταξινόμησης και η εφαρμογή μεθόδων ταξινόμησης είναι γνωστές και χρησιμοποιούνται σε πολλές επιστήμες.

Η, κατά κάποιον τρόπο, διαφοροποιούμενη έννοια της ταξινόμησης στην Τηλεπισκόπηση οφείλεται στο γεγονός ότι η ταξινόμηση που εφαρμόζεται εδώ είναι πολυφασματική. Με την έννοια πολυφασματική εννοούμε ότι:

- η ταξινόμηση ομαδοποιεί pixels τα οποία βάσει κάποιου αλγόριθμου ανήκουν στην ίδια φασματική ομάδα.
- για κάθε pixel που ταξινομείται ο αλγόριθμος ταξινόμησης έχει χρησιμοποιήσει όλες τις πληροφορίες [τις ραδιομετρικές τιμές] που έχει το pixel σε κάθε φασματικό κανάλι [πολύ φασματική].

Γενικότερα όμως η ταξινόμηση έχει σαν σκοπό την ομαδοποίηση pixels σε ορισμένο αριθμό φασματικών ομάδων που κατά κανόνα μετά την εφαρμογή κάποιας συγκεκριμένης μεθόδου ταξινόμησης, αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες κατηγορίες κάλυψης γης (Niblack 1986).

Έτσι, η αρχική πληροφορία που περιέχεται σε κάθε pixel μπορεί να γραφεί σαν ένα διάνυσμα n -διαστάσεων (ραδιομετρικών ακέραιων τιμών από 0 έως και 255 για τους δορυφόρους που δίνουν 8-bit εικόνες) όπου n είναι ο αριθμός των φασματικών καναλιών. Μετά την εφαρμογή κάποιας μεθόδου ταξινόμησης το ίδιο pixel χωρικά, χαρακτηρίζεται από μία μόνο αριθμητική τιμή και μάλιστα από 1 έως k , η οποία αντιστοιχεί ακριβώς σε κάποια κάλυψη γης και άρα το k εκφράζει τον αριθμό των διαφορετικών καλύψεων γης που ορίστηκαν από τον χρήστη, είτε προσδιορίστηκαν με την ταξινόμηση της δορυφορικής εικόνας.

Η πρώτη κατηγορία ταξινομήσεων γνωστή ως Επιβλεπόμενες Ταξινομήσεις [Supervised Classifications] αναπτύχθηκε βάσει της εκ των προτέρων γνώσης αλλά και της δυνατότητας πρόσβασης στις υπάρχουσες κατηγορίες καλύψεις γης ώστε να εντοπισθούν χωρικά δειγματοληπτικές περιοχές. Ο όρος «επιβλεπόμενες (ή κατ' άλλους συγγραφείς καθοδηγούμενες)» προέκυψε από το γεγονός ότι ο αλγόριθμος εύρεσης των ραδιομετρικών τιμών (διαστημάτων τιμών) κάθε κάλυψης γης εκπαιδεύεται σύμφωνα με τις ομογενείς, ή όχι, δειγματοληπτικές περιοχές που έχουν επιλεγεί από πριν για κάθε κατηγορία κάλυψης γης. Με αυτόν τον τρόπο στη συνέχεια, δημιουργούνται από τις δειγματοληπτικές περιοχές οι φασματικές υπογραφές [βλ. Φασματικές υπογραφές] για κάθε κάλυψη γης βάσει των οποίων θα αποφασιστεί και η ταυτότητα κάθε pixel σε σχέση με τις κατηγορίες κάλυψης γης.

Σε αντίποδα με τις προηγούμενες αναπτύχθηκε η δεύτερη κατηγορία ταξινομήσεων γνωστή ως «Μη Επιβλεπόμενες Ταξινομήσεις» [Unsupervised Classifications].

Στην κατηγορία αυτή οι κλάσεις που θα προκύψουν μετά την ταξινόμηση δεν είναι γνωστές αρχικά.

Άρα και διαδικαστικά διαφέρουν μεταξύ τους οι δύο βασικές κατηγορίες ταξινόμησης.

Στις επιβλεπόμενες ταξινομήσεις:

- Ορίζονται ή προσδιορίζονται αρχικά οι κλάσεις κάλυψης-χρήσης γης που θα χωριστεί η εικόνα
- Εντοπίζονται χωρικά δειγματολογικές περιοχές από κάθε κάλυψη γης [στην εικόνα ή και στο πεδίο που αντιστοιχεί στη διαθέσιμη δορυφορική εικόνα].
- Εξάγεται η φασματική υπογραφή κάθε κατηγορίας κάλυψης γης που ορίστηκε εξ' αρχής από τις δειγματοληπτικές περιοχές που επιλέχθηκαν για την κατηγορία αυτή (άρα θα έχουμε τόσες φασματικές υπογραφές όσες και καλύψεις γης) και
- Ταξινομείται κάθε pixel της εικόνας βάσει ενός αλγόριθμου σε μία από τις κατηγορίες κάλυψης γης που ορίστηκαν (ή δεν ταξινομείται).

Στις μη επιβλεπόμενες ταξινομήσεις:

- Εφαρμόζεται μία μέθοδος π.χ. της ιεραρχικής ή μη ιεραρχικής ταξινόμησης κατά συστάδες [hierarchical or partitional clustering], κατά την οποία η δορυφορική εικόνα ταξινομείται σε ομάδες που προσδιορίζει ο αλγόριθμος που εφαρμόστηκε (ή ο χρήστης) χωρίς όμως να είναι γνωστό σε ποια κατηγορία κάλυψης γης αντιστοιχεί κάθε ταξινομημένη ομάδα.
- Ο χρήστης -μετά το πέρας της ταξινόμησης- ορίζει τί αντιπροσωπεύει κάθε ομάδα ως προς τις καλύψεις -χρήσης γης που υπάρχουν στη συγκεκριμένη περιοχή.

Διάφορες μέθοδοι ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί εκτός των παραπάνω, που πολλές από αυτές αποτελούν συνδυασμό των παραπάνω ή παραλλαγές τους. Οι Lillesand και Kiefer [1994] τις αναφέρουν ως 'υβριδικές' μεθόδους.

Ενδεικτικά αναφέρουμε την παρακάτω μέθοδο 'υβριδικής μη επιβλεπόμενης' ταξινόμησης .

Η πολυφασματική εικόνα σαρώνεται από ένα παράθυρο μικρών διαστάσεων έστω 3x3. Η διακύμανση των ραδιομετρικών τιμών του παραθύρου (σ' όλα τα κανάλια) για κάθε θέση που καταλαμβάνει σε όλη την εικόνα, θεωρείται 'ήπια' (μικρή) εάν δεν υπερβαίνει ένα όριο που ορίζεται από τον χρήστη αλλιώς 'τραχειά' (μεγάλη).

Η μέση τιμή του πρώτου παραθύρου με ήπια διακύμανση που θα βρεθεί θεωρείται το 1ο κέντρο συστάδας (cluster) , του δεύτερου 2ο κέντρο κ.ο.κ. Ο χρήστης ορίζοντας τον μέγιστο αριθμό των συστάδων (clusters) που πρέπει να δημιουργηθούν (που ουσιαστικά αποτελεί και τον αριθμό των καλύψεων γης στην εικόνα), συνενώνει τα δύο κοντινότερα σε (ραδιομετρική – μέση) απόσταση παράθυρα και συνεχίζει έως ότου φθάσει στον επιθυμητό αριθμό συστάδων-clusters (καλύψεων γης). Φυσικά κάθε φορά που πραγματοποιείται μια συνένωση ανανεώνονται τα στατιστικά μεγέθη του κάθε νέου cluster.

11.2 Μη επιβλεπόμενες ταξινομήσεις

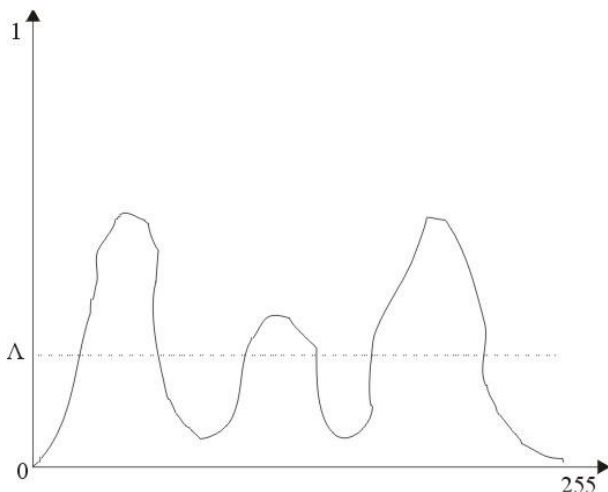
11.2.1 Η μέθοδος των μέγιστων συχνοτήτων των ιστογραμμάτων (Histogram peaks)

Κάθε ιστόγραμμα των ραδιομετρικών τιμών μιας ψηφιακής εικόνας – φασματικού καναλιού στην Τηλεπισκόπηση, εμφανίζει ορισμένο αριθμό τοπικών μεγίστων γύρω από τα οποία υπάρχει κάποια μικρή ή μεγάλη συγκέντρωση pixels.

Ορίζοντας (ο χρήστης ή ο αλγόριθμος) μια συχνότητα πάνω από την οποία μια τιμή θεωρείται μέγιστο και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα γύρω της pixels με κριτήρια ραδιομετρικής απόστασης και διακύμανσης του cluster ορίζονται τα κέντρα (οι μέγιστες τιμές του ιστογράμματος) και υπολογίζονται τα pixels που ανήκουν σε κάθε cluster.

Στο σχήμα 11.1 βλέπουμε σχηματικά για ένα κανάλι τον διαχωρισμό τριών clusters. Αυτό γενικεύεται στον χώρο των κ-καναλιών.

Λ: Ελάχιστη συχνότητα επάνω από την οποία θεωρείται τοπικό μέγιστο ιστογράμματος (κέντρο cluster).



Σχήμα 11.1 Μονοδιάστατο ιστόγραμμα (ένα κανάλι) με τρεις διακριτές κατηγορίες κάλυψης γης. Η διακεκομμένη γραμμή ορίζει το κατώφλι για την διάκριση των τοπικών μεγίστων (και άρα των διαφορετικών κλάσεων).

11.2.2 Μέθοδοι των κ-μέσων (K-MEANS cluster) και ισο-δεδομένων (ISODATA)

Η K-means μέθοδος μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης στην Τηλεπισκόπηση, συνίσταται από τα παρακάτω στάδια τα οποία επαναλαμβάνονται έως ότου σταθεροποιηθεί η ομαδοποίηση (clustering) δηλ. έως ότου δεν υπάρχουν pixels που να αλλάζουν ομάδα στην επόμενη επανάληψη (ή τα κέντρα των ομάδων – μέσες ραδιομετρικές τιμές των ομάδων- να μην μεταβάλλονται στις επόμενες επαναλήψεις του αλγόριθμου).

Τα στάδια εφαρμογής της μεθόδου είναι:

- Ορίζονται αυθαίρετα κ- κέντρα ομάδων χωρικά (κ τυχαία ζεύγη συντεταγμένων x,y στα όρια των διαστάσεων της δορυφορικής εικόνας κατά γραμμή και κατά στήλη). Τα κ αυτά ζεύγη προσδιορίζουν κ pixels στα m κανάλια (δηλ. κ διάνυσματα με m ραδιομετρικές τιμές το καθένα). Έτσι, το κάθε κέντρο είναι ένα διάνυσμα που περιέχει τις ραδιομετρικές τιμές ενός συγκεκριμένου pixel στα m κανάλια.
- Κάθε pixel ταξινομείται σε μια από τις κ ομάδες και συγκεκριμένα σε αυτήν που η ραδιομετρική απόστασή του είναι η μικρότερη. Ως απόσταση είναι συνήθως η Ευκλείδεια.
- Στις ομάδες που δημιουργούνται τελικά βρίσκεται το κέντρο βάρους (διάνυσμα με τις μέσες ραδιομετρικές τιμές όλων των pixels της ομάδας σ' όλα τα κανάλια).
- Τα βήματα 2 και 3 επαναλαμβάνονται έως ότου σταθεροποιηθούν οι ομάδες (δεν αλλάζουν τιμές τα κέντρα τους ή που είναι το ίδιο δεν μετακινείται κανένα pixel σε άλλη ομάδα με την επανάληψη του αλγορίθμου).

Παραλλαγή και εξέλιξη της K-means ταξινόμησης είναι η ISODATA ταξινόμηση που διαφέρει στο ότι (MATHER) συνενώνει, διαχωρίζει και απορρίπτει ομάδες σε κάθε επανάληψη που γίνεται στην εφαρμογή της K-means μεθόδου. Επιπλέον απαιτούνται μερικές παραμετροποιήσεις στην ISODATA μέθοδο.

Η ISODATA μέθοδος λοιπόν, διαφοροποιείται στο ότι στο τέλος κάθε επανάληψης παρεμβαίνει με τρεις τρόπους τροποποιώντας ελαφρά το αποτέλεσμα.

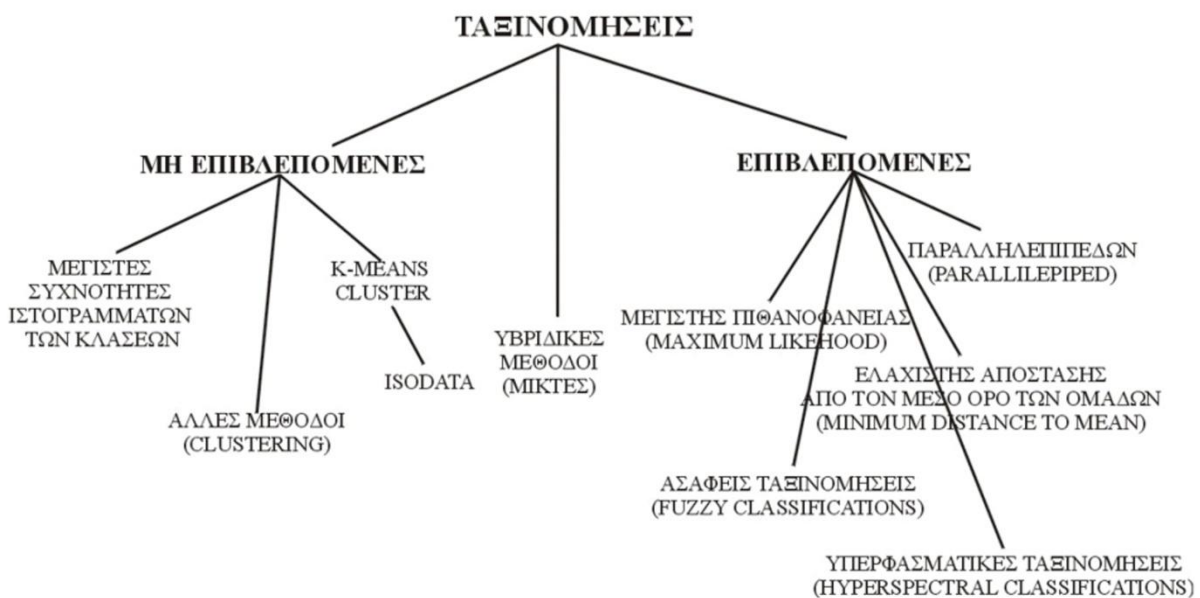
- Συνενώνει τις ομάδες που τα κέντρα βάρους τους είναι πολύ κοντά (ορίζεται ένα όριο για την ελάχιστη ραδιομετρική απόσταση διαφορετικών ομάδων).
- Διαχωρίζει σε δύο ομάδες κάποια ομάδα που έχει μεγάλη τυπική απόκλιση ραδιομετρικών τιμών (ορίζεται ένα όριο τυπικής απόκλισης ώστε πάνω από το οποίο μια ομάδα δεν θεωρείται ομογενής).
- Θεωρεί αταξινόμητα τα pixels που δημιουργούν μικρές σε αριθμό pixels ομάδες (ορίζεται ένας ελάχιστος αριθμός pixels αρκετός για να δημιουργηθεί μια ομάδα)

11.3. Επιβλεπόμενες ταξινομήσεις

Στην αρχή του κεφαλαίου των ταξινομήσεων αναφέρθηκαν τα βήματα που ακολουθούνται σε μια επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Ωστόσο πρέπει μετά το 4ο βήμα όπου κάθε pixel της εικόνας ταξινομείται ή όχι να τονιστεί ότι αυτό ισχύει για τους αλγόριθμους ταξινόμησης γνωστούς ως λεγόμενες ‘αυστηροί’ ή ‘σκληροί’ ταξινομητές (hard classifiers).

Σ’ αντίποδα μ’ αυτούς, οι λεγόμενοι ‘μαλακοί’ ταξινομητές (soft classifiers) υπολογίζουν μια ‘συνάρτηση συμμετοχής’ ή ‘συνάρτηση προσάρτησης’ (membership function) η οποία χαρακτηρίζει κάθε pixel ως προς τον βαθμό που ανήκει σε κάθε ομάδα. Δηλ. μπορεί κάποιο pixel ύπαιθρου χώρου να αποτελείται από 80% οργωμένου αγρού και 20% αγροτικού χωματόδρομου. Τέτοιου είδους ταξινόμηση είναι η λεγόμενη **ασαφής ταξινόμηση (Fuzzy classification)**.

Αν και θα έπρεπε να αναφερθεί στα γενικά περί ταξινομήσεων παρατίθεται παρακάτω στο σχήμα 11.2 ένα γενικό σχεδιάγραμμα, εκτός των ταξινομήσεων με την χρήση των νευρωνικών δικτύων που είναι εκτός των ορίων αυτής της διδακτικής ενότητας, με τα βασικότερα είδη των ταξινομήσεων που εφαρμόζονται σήμερα :



Σχήμα 11.2 Σχεδιάγραμμα των ταξινομήσεων.

11.3.1 Η ταξινόμηση της ελάχιστης ραδιομετρικής απόστασης από την μέση (ραδιομετρική) τιμή των ομάδων (Minimum distance to means)

A. η Ευκλείδεια απόσταση

Η μέθοδος αυτή δεν λαμβάνει υπόψη την στατιστική κατανομή (στον χώρο των κ-καναλιών) κάθε κατηγορίας κάλυψης γης. Αντίθετα ταξινομεί το κάθε pixel στην κατηγορία εκείνη της οποίας η μέση (ραδιομετρική) τιμή είναι πλησιέστερα στην τιμή του pixel. Εφ’ όσον φυσικά βρισκόμαστε στον χώρο των κ-καναλιών η μέση ραδιομετρική τιμή κάποιας κατηγορίας όπως και η ραδιομετρία του pixel εκφράζονται σαν διανύσματα με κ-συνιστώσες. Επειδή όμως η μέση τιμή κάποιας κατηγορίας κάλυψης γης δεν είναι γνωστή, εκτιμάται από τις μέσες ραδιομετρικές τιμές των δειγματοληπτικών περιοχών που έχουν επιλεγεί για την κατηγορία αυτή και για όλα τα κανάλια.

Παράδειγμα

Έστω τα διανύσματα των μέσων ραδιομετρικών τιμών σε τρία φασματικά κανάλια που προέκυψαν από τις τιμές pixels δειγματοληπτικών περιοχών

$$\text{για μεν τον αστικό χώρο είναι } M_A = \begin{pmatrix} 90 \\ 100 \\ 110 \end{pmatrix} \quad \text{για δε το δάσος } M_\Delta = \begin{pmatrix} 30 \\ 50 \\ 40 \end{pmatrix}$$

Όπως φαίνεται το παραπάνω παράδειγμα αναφέρεται σε πολυφασματικό σαρωτή, με 3 κανάλια δηλαδή 3 συνιστώσες.

$$\text{Ένα pixel με ραδιομετρικό διάνυσμα } X = \begin{pmatrix} 60 \\ 70 \\ 70 \end{pmatrix} \quad \text{θα καταχωρηθεί στην}$$

κατηγορία 'ΔΑΣΟΣ' γιατί : Η Ευκλείδεια απόστασή του από τον αστικό χώρο είναι:

$$d_A^2 = (X - M_A)^T (X - M_A) = (-30 - 30 - 40) \begin{pmatrix} -30 \\ -30 \\ -40 \end{pmatrix} = 900 + 900 + 1600 = 3200 \Rightarrow d_A = \sqrt{3200} \\ = \sqrt{2 \cdot 1600} = 40\sqrt{2}$$

ενώ από το δάσος είναι

$$d_M^2 = (X - M_\Delta)^T (X - M_\Delta) = (30 \cdot 20 \cdot 30) \begin{pmatrix} 30 \\ 20 \\ 30 \end{pmatrix} = 900 + 400 + 900 = 2200 \Rightarrow d_\Delta = \sqrt{2200} \\ = 10\sqrt{22}$$

και παρατηρούμε ότι $d_\Delta < d_A$

Μπορούμε να εκφράσουμε και με πιο απλό τρόπο την Ευκλείδεια απόσταση

$$\text{ενός σημείου } X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad \text{από μια ομάδα } M_A = \begin{pmatrix} m_{A1} \\ m_{A2} \\ m_{A3} \end{pmatrix}$$

στο χώρο των τριών (ή και περισσότερων) καναλιών.

$$d^2(X, M_A) = (x_1 - m_{A1})^2 + (x_2 - m_{A2})^2 + (x_3 - m_{A3})^2$$

B. Η CITY BLOCK απόσταση

Μια παραλλαγή της Ευκλείδειας απόστασης είναι η 'City Block' ή 'L1' ή 'Manhattan' απόσταση:

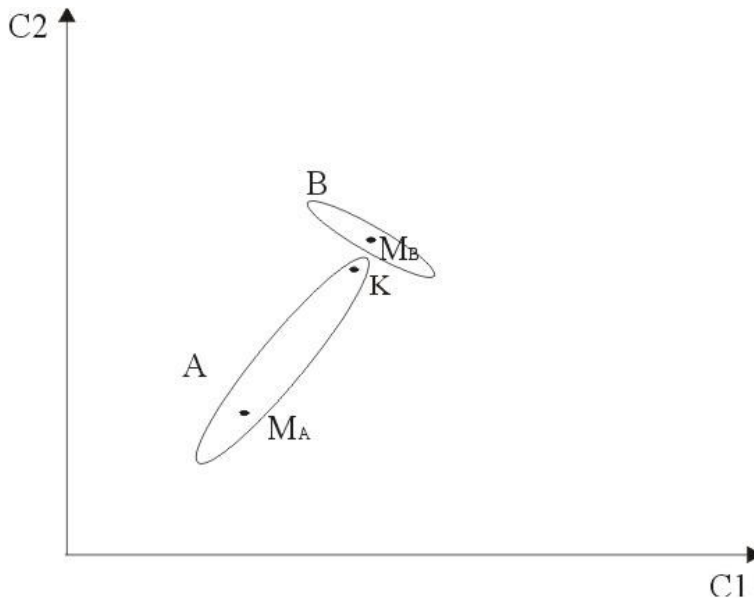
Niblack (1986)

$$d(X, M_A) = |x_1 - m_{A1}| + |x_2 - m_{A2}| + |x_3 - m_{A3}|$$

Γ. Η απόσταση MAHALANOBIS

Οι μέχρι τώρα αποστάσεις δεν λαμβάνουν υπ' όψη την διακύμανση μιας κλάσης. Στο παρακάτω σχήμα (χώρος των 2 καναλιών) το pixel K θα ταξινομηθεί στην κλάση B και όχι στην A παρ' όλο που η μεγάλη διακύμανση και η διεύθυνση του νέφους της κλάσης A θα συνηγορούσε γι' αυτό (Hord 1986).

Έτσι 'διαιρώντας' κατά κάποιον τρόπο την Ευκλείδεια απόσταση ενός pixel από το μέσο της κλάσης με την διακύμανση της κλάσης, ένα pixel σε παρόμοια θέση με το pixel K του παραπάνω σχήματος θα ταξινομηθεί πιο εύκολα στην κλάση A παρά στην B. Φυσικά στις πράξεις μεταξύ πινάκων η 'διαίρεση' αυτή εκφράζεται με τον πολλαπλασιασμό του αντίστροφου πίνακα της διακύμανσης της κλάσης.



Σχήμα 11.3 Δύο κλάσεις pixels A και B με μέσους ραδιομετρικούς όρους M_A και M_B . Ενώ το pixel K λόγω της μικρότερης απόστασής του από το κέντρο M_B θα ταξινομηθεί στην κλάση B, με την χρήση της απόστασης Mahalanobis ταξινομείται (σωστά) στην κλάση A.

Έτσι τροποποιείται η Ευκλείδεια απόσταση με τρόπο ώστε να λαμβάνει υπόψη την διακύμανση κάθε κλάσης:

$$d_A^2 = (x - M_A)^T \cdot S_A^{-1} \cdot (x - M_A)$$

Όπου S_A : Ο πίνακας διακυμάνσεων – συνδιακυμάνσεων της κλάσης A.

Ένα παράδειγμα πίνακα συνδιακύμανσης δίνεται στο βιβλίο του J. Thomas 'Classification of Remotely Sensed Images' (Thomas *et al.* 1987).

11.3.2 Η ταξινόμηση των παραλληλεπιπέδων

Είναι η απλούστερη και οικονομικότερη μέθοδος ταξινόμησης από πλευράς υπολογιστικής ισχύος. Ο χρήστης μελετώντας 'στατιστικά' το ιστογράμμο ορίζει μια κατώτερη και μια ανώτερη ραδιομετρική τιμή για κάθε κλάση (Showengerdt 1983). Αυτές οι τιμές μπορούν να είναι ή το μέγιστο και το ελάχιστο του ιστογράμματος μιας κλάσης, ή οι ακραίες τιμές του διαστήματος $[m - \kappa\sigma, m + \kappa\sigma]$ $\kappa=1,2,3$, όπου m: μέση τιμή και σ : τυπική απόκλιση των ραδιομετρικών τιμών του ιστογράμματος μια κλάσης ή όποιες άλλες οριακές ραδιομετρικές τιμές κρίνει ο χρήστης κατάλληλες.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι pixels που βρίσκονται σε κοινή περιοχή παραλληλεπιπέδων θεωρούνται αταξινομητα.

11.3.3 Η ταξινόμηση της μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood)

Τα παρακάτω γενικεύονται εύκολα στον χώρο των n καναλιών. Το παράδειγμα που ακολουθεί αναφέρεται σ' ένα φασματικό κανάλι.

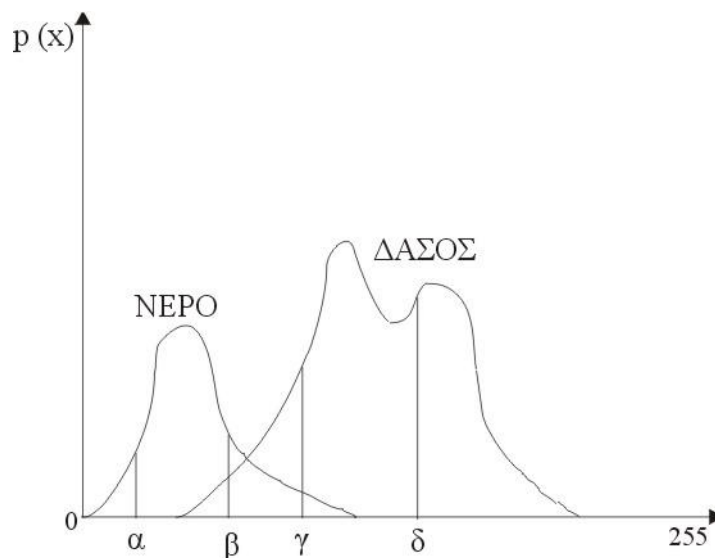
1) Έστω ότι έχουμε κάποια εικόνα με δύο καλύψεις γης, νερό και δάσος. Επιλέγουμε δειγματοληπτικές περιοχές από κάθε μια από τις δύο αυτές καλύψεις και σχεδιάζουμε το ιστόγραμμά τους.

Ως γνωστό ένα ιστόγραμμα συχνοτήτων έχει για κάθετο άξονα τον άξονα συχνότητας εμφάνισης (των pixels) και για οριζόντιο τις τιμές της τυχαίας μεταβλητής (ραδιομετρικές τιμές στην περίπτωση της Τηλεπισκόπησης και μάλιστα με τιμές από 0-255 για 8-bit εικόνες).

2) Για να αποκτήσουμε ένα ιστόγραμμα πιθανοτήτων για όλες τις ραδιομετρικές τιμές, που να προκύπτει επίσης από πραγματικά δεδομένα (δηλ. τις δειγματοληπτικές περιοχές που επιλέχθηκαν προηγουμένως) αρκεί να διαιρέσουμε κάθε συχνότητα του ιστογράμματος των συχνοτήτων, με την ολική συχνότητα (το πλήθος όλων των pixels όλων των δειγματικών περιοχών).

Όμως προφανώς η αναλογία pixels των δειγματοληπτικών περιοχών του νερού προς τα pixels των δειγματοληπτικών περιοχών του δάσους δεν είναι η ίδια μ' αυτήν που ισχύει σ' όλη τη εικόνα μας. Έτσι για να δώσουμε το βάρος που ταιριάζει σε κάθε κατηγορία κάλυψης γης πολλαπλασιάζουμε την πιθανότητα κάθε κάλυψης γης (νερό – δάσος) με το ποσοστό της επιφανείας που εκτιμούμε ότι καταλαμβάνει σ' όλη την εικόνα π.χ. για το δάσος 0,7 και 0,3 για το νερό αν υποθέσουμε ότι η εικόνα καλύπτεται κατά 70/100 από δάσος και 30/100 από νερό.

Το τελικό ιστόγραμμα πιθανοτήτων που προκύπτει από τις δειγματοληπτικές περιοχές των δύο καλύψεων γης με ποσοστά βάρους (που καθορίζει ο χρήστης) για την κάθε κάλυψη γης, μια αποτελεί έναν εκτιμητή των πιθανοτήτων σε ποια από τις δύο κλάσεις κάλυψη γης ανήκει κάθε pixel (κάθε ραδιομετρική τιμή).



Σχήμα 11.4 Ιστόγραμμα πιθανοτήτων για δύο κλάσεις καλύψεων γης, νερό και δάσος.

Έτσι για τις ραδιομετρικές τιμές α , β , γ και δ και σύμφωνα με το παραπάνω ιστόγραμμα:

$$\begin{aligned} p_N(\alpha) &> p_\Delta(\alpha)=0 \\ p_N(\beta) &> p_\Delta(\beta), \\ p_N(\gamma) &< p_\Delta(\gamma) \\ p_N(\delta) &= 0 < p_\Delta(\delta) \end{aligned}$$

όπου $pN(i)$ η πιθανότητα η ραδιομετρική τιμή i να ανήκει στην κάλυψη γης νερό και $p\Delta(i)$ η πιθανότητα η ραδιομετρική τιμή i να ανήκει στην κάλυψη γης δάσος.

Από το παραπάνω ιστόγραμμα βλέπουμε ότι οι ραδιομετρικές τιμές α , β ότι ανήκουν στο νερό ενώ οι γ και δ στο δάσος.

Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι όλες οι πιθανότητες προήλθαν από τον πολ/σμό της πιθανότητας κάθε ραδιομετρικής τιμής και για κάθε κατηγορία επί την πιθανότητα του βάρους κάθε κατηγορίας.

Πιο συγκεκριμένα για να καταλήξουμε στο αποτέλεσμα $pN(\alpha) = \frac{1}{6}$
το οποίο προέρχεται από τον πολλαπλασιασμό $\frac{3}{10} * \frac{5}{9}$

πρέπει $pN = \frac{3}{10}$ να είναι η a priori πιθανότητα μιας ραδιομετρικής τιμής να ανήκει στο νερό και

$pN(\alpha) = \frac{5}{9}$ η πιθανότητα η ραδιομετρική τιμή α να ανήκει στο νερό.

Φυσικά όλες οι πιθανότητες $pN(i)$ και $p\Delta(i)$ (νερού και δάσους) για κάθε ραδιομετρική τιμή i προέρχονται από την μετατροπή του ιστογράμματος συχνοτήτων των δειγματοληπτικών περιοχών νερού και δάσους σε ιστόγραμμα πιθανοτήτων.

Γενικά ο κανόνας απόφασης ταξινόμησης μιας ραδιομετρικής τιμής χ στην κλάση i και όχι στην κλάση j είναι σύμφωνα με τις δειγματοληπτικές πιθανότητες (Tso and Mather, 2001) που εκφράστηκαν παραπάνω και ισχύει αν πληρείται η σχέση:

$$p(x/c_i) p(c_i) > p(x/c_j) p(c_j) \quad (1)$$

όπου $p(x/c)$ η πιθανότητα ένα pixel που ανήκει στην κατηγορία c να έχει ραδιομετρική τιμή χ (ή η πιθανότητα της ραδιομετρικής τιμής χ να ανήκει στην κατηγορία c) και $p(c_i)$ η a priori πιθανότητα της κατηγορίας c_i

11.3.1 Η μέγιστη πιθανοφάνεια βασισμένη στο θεώρημα του TOY BAYES

Σε μια ταξινόμηση δορυφορικής εικόνας, η πιθανότητα που πρέπει να υπολογιστεί και που κρίνει εάν ένα pixel με ραδιομετρική τιμή χ , θα ταξινομηθεί στην (κάλυψη γης) κλάση c_i και όχι στην c_j είναι

$$P(c_i/x) > P(c_j/x)$$

Δηλαδή η πιθανότητα εφ' όσον έχουμε την ραδιομετρική τιμή χ να βρισκόμαστε στην κλάση c_i ή καλύτερα η πιθανότητα ανήκει στην κλάση c_i μια συγκεκριμένη ραδιομετρική τιμή χ .

Όμως σύμφωνα με το θεώρημα του Bayes

$$P(c_i/x) = P(x/c_i) P(c_i)/P(x)$$

Όπου $p(x)$ η πιθανότητα ύπαρξης κάθε pixel στην θέση χ (δηλ $1/N$ όπου N συνολικός αριθμός των pixels της εικόνας).

Σύμφωνα με την επεξεργασία του δειγματοληπτικού ιστογράμματος της προηγούμενης παραγράφου θεωρούμε ότι το γινόμενο

$p(x/c_i) p(c_i)$ από τις δειγματοληπτικές περιοχές και για οποιαδήποτε κλάση c_i ότι είναι ένας ικανοποιητικός εκτιμητής του γινομένου $P(x/c_i)P(c_i)$ για ολόκληρη την εικόνα και για οποιαδήποτε κλάση της c_i .

Έτσι ο γενικός κανόνας της Bayesian ταξινόμησης της μέγιστης πιθανοφάνειας είναι ότι το pixel ραδιομετρικής τιμής χ ταξινομείται στην κλάση c_i εάν

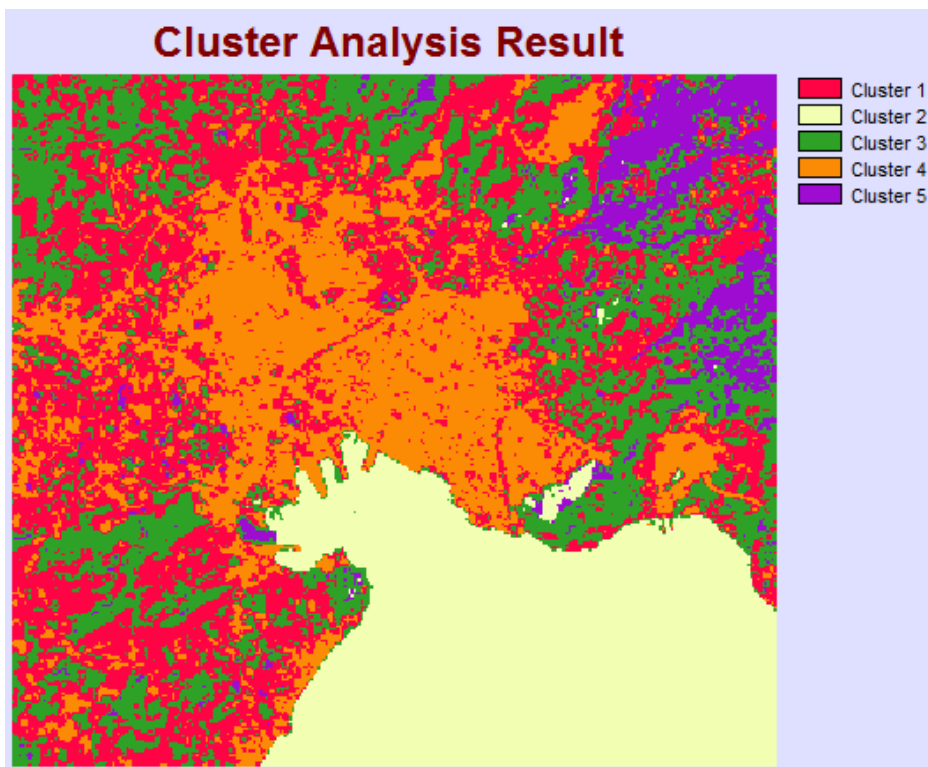
$$P(x/c_i) P(c_i) > P(x/c_j) P(c_j) \quad (1)$$

Όπου c_j οποιαδήποτε άλλη κλάση εκτός της c_i .

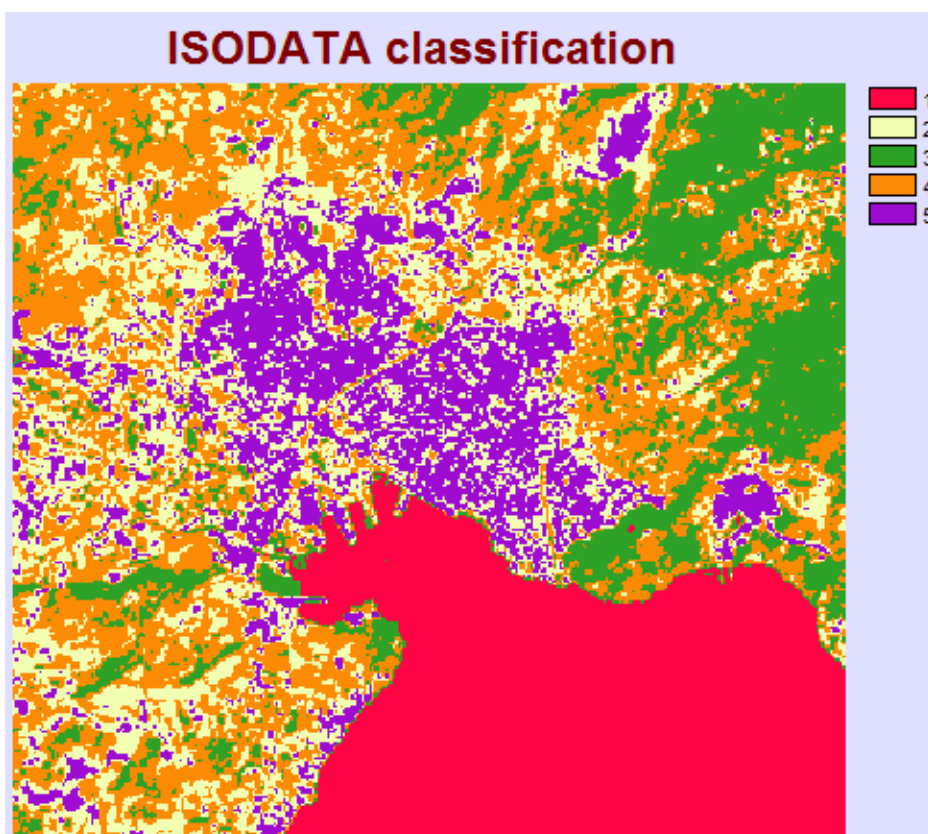
Στη συνέχεια - με την χρήση του λογισμικού IDRISI - μετά από την εικόνα της χρωματικής σύνθεσης σε φυσικά χρώματα του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου, παρουσιάζονται δύο ταξινομημένες εικόνες που προέκυψαν από την εφαρμογή της διαδικασίας των μη επιβλεπόμενων ταξινομήσεων (cluster και isodata) και τρεις από την εφαρμογή των επιβλεπόμενων ταξινομήσεων (parallelepiped, minimum distance και maximum likelihood classification) αφού πρώτα παρουσιαστούν οι εικόνες των δειγματοληπτικών περιοχών και των φασματικών υπογραφών των κυριότερων πέντε καλύψεων γης στην περιοχή.



Εικόνα 11.1 Χρωματική σύνθεση σε φυσικά χρώματα του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου της 25/08/2006.



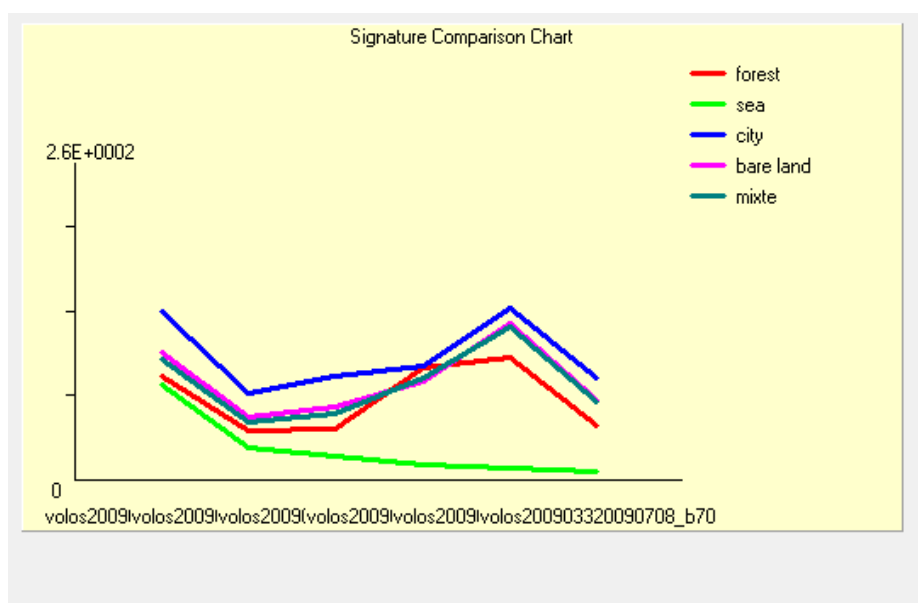
Εικόνα 11.2 Ταξινομημένη εικόνα κατά «συστάδες» του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου της 25/08/2006.



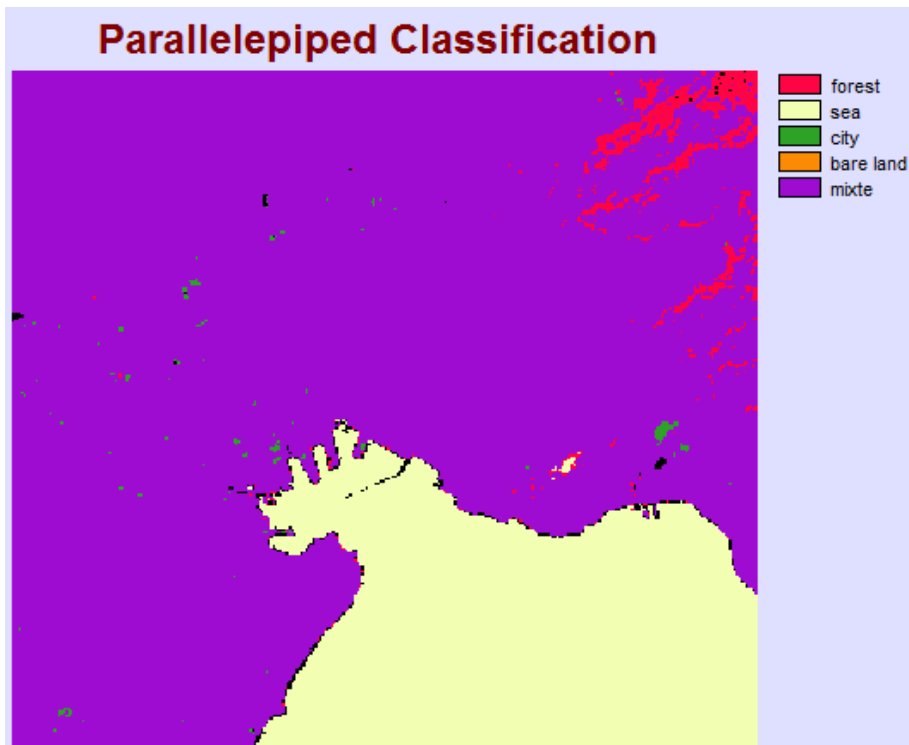
Εικόνα 11.3 Ταξινομημένη εικόνα «ισο-δεδομένων» του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου της 25/08/2006.



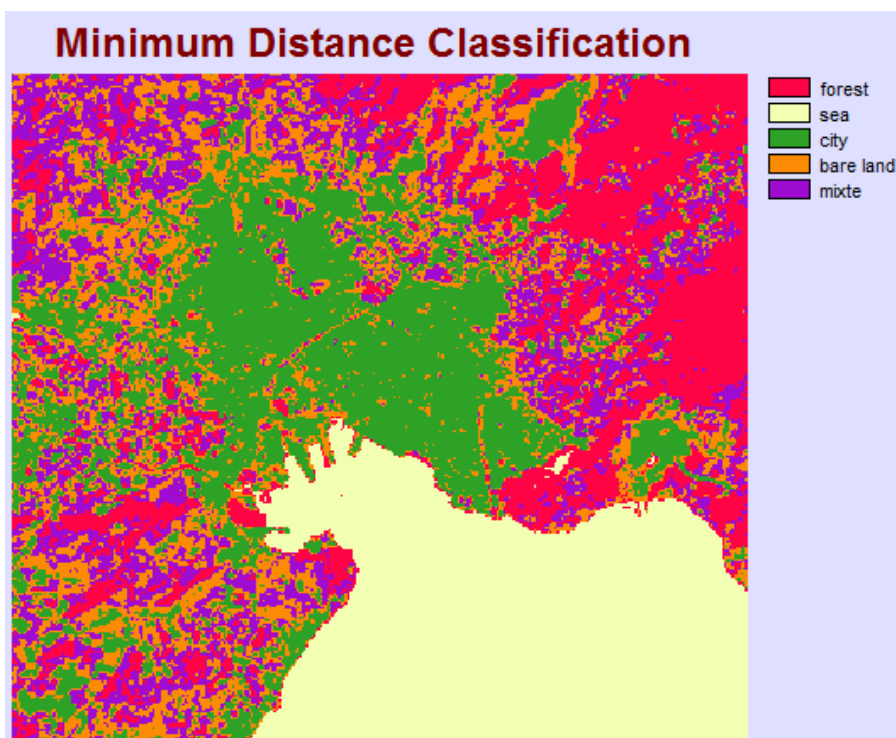
Εικόνα 11.4 Δειγματοληπτικές περιοχές των πέντε κυρίαρχων καλύψεων γης του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου της 25/08/2006.



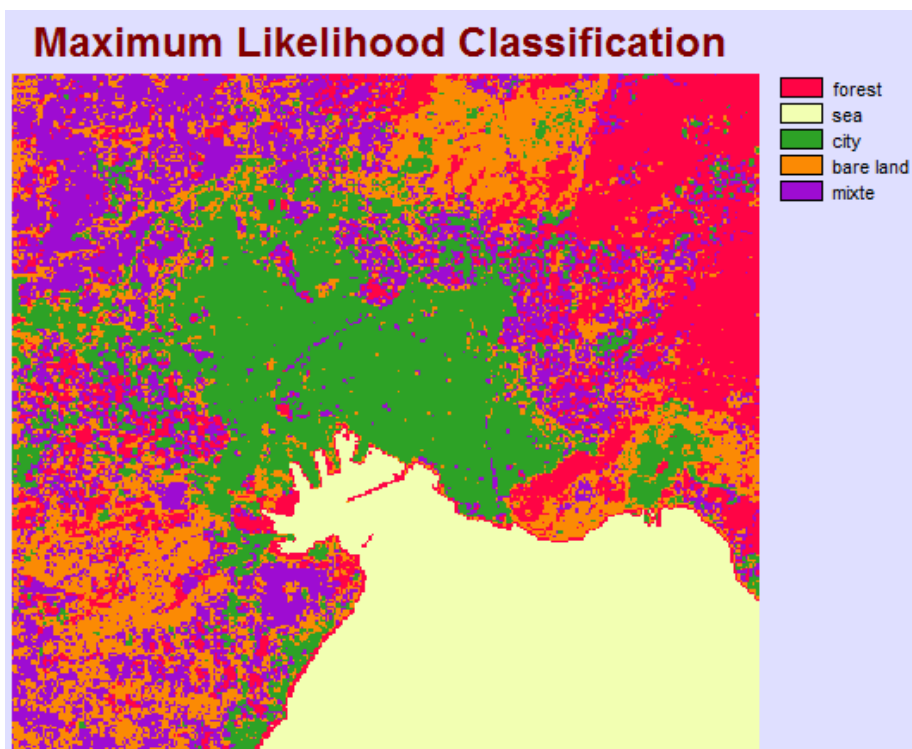
Εικόνα 11.5 Φασματικές υπογραφές των πέντε κυρίαρχων καλύψεων γης του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου της 25/08/2006.



Εικόνα 11.6 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση των «παράλληλεπιπέδων» του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου της 25/08/2006.



Εικόνα 11.7 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση της «ελάχιστης απόστασης από την μέση ραδιομετρική τιμή των κλάσεων» του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου της 25/08/2006.



Εικόνα 11.8 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση της «μέγιστης πιθανοφάνειας» του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου της 25/08/2006.

11.4. Γενική απογραφή των κατηγοριών των ταξινομήσεων (Lu & Weng, 2007)

Σε μια πολύ περιεκτική δημοσίευση το 2007 οι Lu και Weng συνόψισαν βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων την πληθώρα των χρησιμοποιούμενων ταξινομήσεων στην Τηλεπισκόπηση.

Δυνητικά πολλών τύπων παράγοντες μπορούν να ληφθούν υπ' όψη στην διαδικασία της ταξινόμησης, όπως οι φασματικές υπογραφές των υπάρχουσών καλύψεων γης, διάφορες μετασχηματισμένες εικόνες (από μετασχηματισμούς των φασματικών καναλιών της αρχικής εικόνας), διαχρονικές εικόνες, δείκτες βλάστησης, εικόνες διαφορετικών δορυφόρων και εν γένει διαφόρων τύπων βοηθητικά υπόβαθρα όπως θεματικοί ψηφιακοί χάρτες (όπως π.χ. του CORINE LAND COVER), υδρογραφικοί, γεωλογικοί κ.α.

Οι εμφανιζόμενες κατηγοριοποιήσεις ταξινομήσεων στην διεθνή βιβλιογραφία μπορούν να χωριστούν ανάλογα με την οπτική γωνία του μελετητή σε

- Επιβλεπόμενες και μη επιβλεπόμενες
- «Σκληρές» ή «μαλακές» (ασαφείς) ταξινομήσεις
- Παραμετρικές ή μη παραμετρικές ταξινομήσεις
- Βασισμένες σε διαφορετικές χωρικές μονάδες όπως του εικονοστοιχείου (per pixel), του υπο-εικονοστοιχείου(per subpixel) ή άλλης χωρικής μονάδας (per field)
- Ταξινομήσεις υφής (contextual classifications)
- Γνωσιακές ταξινομήσεις (Knowledge based)
- Διάφορες συνδυαστικές των παραπάνω κατηγοριών ταξινομήσεις

Είναι σημαντικό να αναφερθούν μερικές από τις πλέον γνωστές και χρησιμοποιούμενες μεθόδους από κάθε κατηγορία. Τοιουτοτρόπως, έχουμε τις εξής ταξινομήσεις ανά κατηγορία

- Ελάχιστης απόστασης από την μέση ραδιομετρική τιμή των ομάδων, μέγιστης πιθανοφάνειας, ιεραρχική ταξινόμηση, ταξινόμηση με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

- Ελάχιστης απόστασης από την μέση ραδιομετρική τιμή των ομάδων, μέγιστης πιθανοφάνειας, ιεραρχική ταξινόμηση, ταξινόμηση με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, μηχανής υποστήριξης διανυσμάτων(Mountrakis *et al.* 2011) (support vector machine)
- Στις παραμετρικές μεθόδους η ταξινόμηση της μέγιστης πιθανοφάνειας και η ταξινόμηση της γραμμική διακριτική ανάλυση (linear discriminant analysis), ενώ στις μη παραμετρικές η ταξινόμηση βάσει αποδεικτικών στοιχείων (evidential reasoning), οι ταξινομήσεις με έμπειρα συστήματα(expert systems), οι ταξινομήσεις με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, οι ιεραρχικές ταξινομήσεις
- Στις ταξινομήσεις βάσει εικονοστοιχείου ανήκουν οι περισσότερες γνωστές ταξινομήσεις όπως της μέγιστης πιθανοφάνειας, νευρωνικών δικτύων, ιεραρχικές ταξινομήσεις, μηχανής υποστήριξης διανυσμάτων.
- Στις ταξινομήσεις που βασίζονται σε περιοχές μικρότερες από το εικονοστοιχείο ανήκουν οι ασαφείς ταξινομήσεις, οι ταξινομήσεις υποεικονοστοιχείου και οι ταξινομήσεις μίξης φασματικής ανάλυσης (spectral mixture analysis)
- Στις ταξινομήσεις υφής ανήκουν διάφοροι συνδυασμοί παραμετρικών και μη ταξινομήσεων ή ειδικές ταξινομήσεις όπως ή «σημείο-σημείο διόρθωση υφής» ή η ταξινόμηση υφής που βασίζεται σε βαριογράμματα, ή η ταξινόμηση υφής που βασίζεται σε συχνότητες, ή η ταξινόμηση της επιβλεπόμενης χαλάρωσης (supervised relaxation classification)
- Κυρίως είναι οι ταξινομήσεις οι οποίες εκτός από τις δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιούν και συμπληρωματικά και βοηθητικά δεδομένα και υπόβαθρα συνήθως από μία γνωσιακή βάση γεωγραφικών δεδομένων της περιοχής μελέτης.
- Στην κατηγορία αυτή ανήκουν διάφορες ταξινομήσεις όπως η ταξινόμηση που δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο έμπειρο σύστημα και βασίζεται στα νευρωνικά δίκτυα, ταξινομήσεις που προκύπτουν από συνδυασμό φασματικών χαρακτηριστικών και κανόνων των Γεωγραφικών Συστημάτων πληροφοριών κ.ά.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

- Hord, M. 1986., Remote Sensing: Methods and Applications. John Wiley & Sons.
- Lillesand, T. and Kiefer, R. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons.
- Lu, D. and Weng, Q., 2007. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*. 28 (5), 823-870.
- Mountrakis, G, Im, J. and Ogole, C., 2011. Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66 (3), 247-259.
- Niblack Wayne, 1986. An Introduction to Digital Image Processing. Prentice Hall.
- Showengerdt, A.R., 1983. Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing, Academic Press.
- Thomas, I.L., Benning, V.M. and Ching, N.P., 1987. Classification of Remotely Sensed Images. Bristol: Adam Hilger.
- Tso, B., Mather, P., 2001. Classification Methods for Remotely Sensed Data, Taylor and Francis.

Κεφάλαιο 12 Δειγματοληψία και αποτίμηση ακρίβειας

Κωνσταντίνος Γ. Περάκης

Σύνοψη

Λαμβάνοντας υπόψη την αξιοπιστία και την εσωτερική και την εξωτερική ακρίβεια των ταξινομήσεων, παρατίθεται ένας συνοπτικός πίνακας των σφαλμάτων που προέρχονται από την δειγματοληψία ή από την απογραφή της περιοχής μελέτης. Αιτιολογείται γιατί η μέθοδος δειγματοληψίας και η χωρική τοποθέτηση των δειγματοληπτικών περιοχών είναι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των ταξινομήσεων, παρατίθενται ορισμένοι σημαντικοί κανόνες στη δειγματοληψία και τέλος, παρουσιάζεται η χρήση του πίνακα σφαλμάτων διπλής εισόδου και ο υπολογισμός της συνολικής ακρίβειας των ταξινομήσεων με αριθμητικό παράδειγμα.

12.1 Δειγματοληψία και αξιοπιστία

Τρεις βασικές έννοιες συνδέονται με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων στην τηλεπισκόπηση. Η αξιοπιστία (reliability) καταδεικνύει την εγγύτητα των αποτελεσμάτων σε ποιοτική και ποσοτική μορφή (χαρτογραφικά και αριθμητικά δεδομένα) με την πραγματικότητα. Η εσωτερική ακρίβεια (precision) αναφέρεται στο μέγεθος των αποκλίσεων από την εκτιμώμενη μέση τιμή μετά από επαναλαμβανόμενες εφαρμογές. Μετρείται με το τυπικό σφάλμα ή τα διαστήματα εμπιστοσύνης και αυξάνεται με τον αριθμό των παρατηρήσεων. Η εξωτερική ακρίβεια (accuracy) είναι το μέγεθος των αποκλίσεων των αποτελεσμάτων από την πραγματική μέση τιμή.

Δύο περιπτώσεις αποτίμησης της επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων συναντώνται (Köhl *et al.* 2006)

- η ολοκληρωτική επεξεργασία της δορυφορικής εικόνας, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των εικονοστοιχείων κάθε κατηγορίας κάλυψης γης και
- η δειγματοληπτική επεξεργασία της δορυφορικής εικόνας, λαμβάνοντας υπόψη τα εικονοστοιχεία δειγματοληπτικών περιοχών για κάθε κάλυψη γης.

Στη συνέχεια παρατίθεται ένας συνοπτικός πίνακας των σφαλμάτων που προκύπτουν για κάθε μία από τις παραπάνω επεξεργασίες.

Στατιστικά καλύψεων γης	Συνολικός αριθμός pixel της περιοχής απογραφής	Pixel θεωρούμενα συστηματικά σημειακά δείγματα της περιοχής απογραφής
Επιφάνεια των καλύψεων γης	✓	✓
Δειγματοληπτικό σφάλμα των εκτιμητών της επιφάνειας κάθε κάλυψης γης	-	✓
Ποσοστό των κλάσεων των καλύψεων γης	✓	✓
Δειγματοληπτικό σφάλμα του ποσοστού των κλάσεων των καλύψεων γης	-	✓

Πίνακας 12.1 Στατιστικά χαρακτηριστικά καλύψεων γης για απογραφή και δειγματοληψία.

Σύμφωνα με τους Plourde και Congalton (Plourde and Congalton 1992), δύο είναι οι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των ταξινομήσεων.

- η μέθοδος της δειγματοληψίας,
- η ακριβής χωρική τοποθέτηση των δειγμάτων.

Η συνολική ακρίβεια, η τυποποιημένη ακρίβεια και ο δείκτης ακρίβειας KHAT (ή δείκτης συμφωνίας KAPPA) υπολογίστηκαν από τον πίνακα σφαλμάτων για τρεις τύπους δειγματοληψίας με πιθανότητες:

- απλή τυχαία δειγματοληψία,

- στρωματοποιημένη τυχαία δειγματοληψία,
- συστηματική δειγματοληψία.

Αποδείχτηκε ότι η χωρική τοποθέτηση των δειγμάτων στη δορυφορική εικόνα, επηρεάζει περισσότερο τα αποτελέσματα απ' ό,τι η επιλογή της μεθόδου της δειγματοληψίας, παρόλο που διάφοροι συγγραφείς (Wu and Sun 2006) υποστηρίζουν ότι η επιλογή της μεθόδου της δειγματοληψίας είναι πολύ σημαντική στην τηλεπισκόπηση για την προσέγγιση της εξωτερικής ακρίβειας με την πραγματικότητα.

Διάφορες ειδικές μέθοδοι αποτίμησης της ακρίβειας στη χαρτογράφηση της βλάστησης από δορυφορικές εικόνες έχουν εφαρμοστεί. Ειδικότερα οι Arjeira *et al.* 2011 εφάρμοσαν την ομαδοποίηση κατά συστάδες και το καθολικό kriging στη μοντελοποίηση των σφαλμάτων για την αποτίμηση της αβεβαιότητας στις φυτοκοινωνίες.

Μία εκτενής έρευνα σχετικά με τις μεθόδους δειγματοληψίας (Holmes *et al.* 2006), καταλήγει ότι:

- Η επιλογή της μεθόδου της δειγματοληψίας πρέπει να προσαρμόζεται κατά περίπτωση.
- Πρέπει να δίδεται προσοχή στα προϋπάρχοντα δεδομένα που αφορούν τη συγκεκριμένη περιοχή και μειώνουν το κόστος και τον χρόνο της έρευνας.
- Πρέπει να υπάρχει έλεγχος στη μέθοδο της απογραφής και της χαρτογράφησης από δορυφορικές εικόνες και αποτίμηση των πηγών των σφαλμάτων.
- Οι στόχοι της έρευνας πρέπει να καθορίζουν τη μέθοδο της δειγματοληψίας.
- Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η εικόνα της ευρύτερης περιοχής και όχι μόνον της περιοχής μελέτης στη συλλογή πληροφοριών.

Τέλος, οι Brogaard και Ólafsdóttir 1997 προτείνουν ότι πρέπει να καθοριστούν ή να υπολογιστούν εξαρχής τα παρακάτω:

- Η χωρική κατανομή των δειγματοληπτικών περιοχών στην περιοχή μελέτης.
- Ο αριθμός των δειγματοληπτικών περιοχών που απαιτούνται για να καλύψουν την περιοχή μελέτης.
- Το μέγεθος των δειγματοληπτικών περιοχών (προσαρμοσμένο στην επιλεγείσα μέθοδο δειγματοληψίας, π.χ. stratum στην στρωματοποιημένη δειγματοληψία).
- Ο αριθμός των δειγματοληπτικών υπο-περιοχών στο εσωτερικό μιας δειγματοληπτικής περιοχής.
- Το μέγεθος των δειγματοληπτικών περιοχών σε κάθε δειγματοληπτική περιοχή.

Τέλος, οι ίδιοι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι πέραν του χρόνου και του κόστους, το ανθρώπινο δυναμικό παίζει σημαντικό ρόλο στην όλη διαδικασία.

12.2 Ακρίβεια των ταξινομήσεων

12.2.1 Ομογένεια - ακρίβεια δειγματοληπτικών περιοχών

Εάν ληφθεί η απόφαση ότι πρέπει, τα pixels τα οποία χαρακτηρίζονται ως «αταξινόμητα» μετά την εφαρμογή μιας μεθόδου ταξινόμησης, να λάβουν τον χαρακτηρισμό «Α», ένα απλό κριτήριο για την σωστή επιλογή των δειγματοληπτικών περιοχών είναι να εξεταστεί ο αριθμός των pixels “Α” εν σχέση με τον συνολικό αριθμό των ταξινομημένων pixels της εικόνας. Έτσι, εάν ο λόγος αυτός είναι αρκετά μεγάλος (περίπου 1) τότε θεωρείται η επιλογή των training sites για κάθε κάλυψη γης είναι λανθασμένη. Γιατί ;

Αλλά ο πλέον συνηθισμένος τρόπος για να κρίνουμε τα αποτελέσματα μιας ταξινόμησης πιο αναλυτικά είναι οι πίνακες σύμπτωσης ή διασταυρωμένοι πίνακες (crosstabulation tables).

Το πώς δημιουργούνται οι πίνακες αυτοί φαίνεται καθαρά στο παρακάτω παράδειγμα.

Έστω ότι σε μια δειγματοληψία από 100 pixels έχουμε δύο κατηγορίες κάλυψης γης: την κατηγορία Α που αποτελείται από 70 pixels και την Β από 30 pixels. Έστω ότι, μετά την εφαρμογή κάποιας ταξινόμησης, από τα 70 pixels της κατηγορίας Α 50 χαρακτηρίστηκαν ως Α και 20 ως Β ενώ από τα 30 της κατηγορίας Β, 20 ως Β και 10 ως Α. Τα αποτελέσματα αυτά δίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΤΗΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ----- ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΤΗΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ	A	B
A	50	20
B	10	20

Πίνακας 12.2 Πίνακας σφαλμάτων της ταξινόμησης ως προς τη δειγματοληψία.

Η συνολική ακρίβεια της ταξινόμησης θα είναι : $50+20/100 = 70/100$
 Ενώ η ακρίβεια της ταξινόμησης ως προς την ομάδα A θα είναι: $50/70$
 Και η ακρίβεια ως προς ομάδα B θα είναι: $20/70$

12.2.2 Ακρίβεια ταξινόμησης ως προς την πραγματικότητα

Η επεξεργασία είναι η ίδια με προηγουμένως μόνον που τώρα τα pixels που χαρακτηρίζονται ως A ή ως B από την ταξινόμηση ελέγχονται με την βοήθεια ενός Παγκοσμίου Συστήματος Προσδιορισμού Θέσης (Global Positioning System) στην ύπαιθρο, εάν πραγματικά ανήκουν στην κατηγορία A ή στην B.

Με την εφαρμογή της μεθόδου της Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες Α.Κ.Σ. θα μπορούσαμε να συγκεντρώσουμε ένα μεγάλο ποσοστό της οπτικής πληροφορίας (π.χ. αντικείμενα που φαίνονται σε διαφορετικά αρχικά κανάλια) σε ένα μόνο νέο κανάλι.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΤΗΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ----- ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ	A	B
A		
B		

Πίνακας 12.3 Πίνακας σφαλμάτων της ταξινόμησης ως προς την πραγματικότητα.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

- Arieira, J., Karssenber, D., de Jong, S.M., Addink, E. A.E., Couto, G., Nunes da Cunha, C. and Skøien, J.O., 2011. Integrating field sampling, geostatistics and remote sensing to map wetland vegetation in the Pantanal, Brazil. *Biogeosciences*, 8, 667-686.
- Brogaard, S. and Ólafsdóttir, R., 1997. Ground-truths or Ground-lies? Environmental sampling for remote sensing application exemplified by vegetation cover data Lund Electronic Reports in Physical Geography, No. 1, Department of Physical Geography Lund University, Sweden.
- Holmes, K.W., van Niel, K., Kendrick, G. and Baxter, K., 2006. Designs for remote sampling: Review, discussion, examples of sampling methods and layout and scaling issues, Cooperative Research Centre for Coastal Zone, Estuary and Waterway Management (Coastal CRC), Australia.
- Köhl, M., Magnussen, S. and Marchetti, M., 2006. *Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multi-resource Forest Inventory*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Plourde, L. and Congalton, R.G., 1992. Sampling Method and Sample Placement: How Do They Affect the Accuracy of Remotely Sensed Maps? *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69 (3), 289-297.
- Wu, Q. and Sun, L., 2006. Sampling methods using remote sensing and global positioning system for crop acreage estimation at national scale in China, a CAAERP, Chinese Academy of Agricultural Engineering Research and Planning, 100125, No. 41 Maizidian Street Chaoyang District, Beijing, Commission VII, WG VII/7.

Κεφάλαιο 13 Εφαρμογές

Ιωάννης Ν. Φαρασλής

Σύνοψη

Τρεις εφαρμογές τηλεπισκόπησης περιγράφονται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο. Η πρώτη αναφέρεται στην εφαρμογή δύο βασικών μεθόδων ταξινόμησης και στη συγκριτική ανάλυσή τους, στην περιοχή των Φαρσάλων (Περιφερειακή Ενότητα Λάρισας) και αποτελεί μια μελέτη περίπτωσης με τη χρήση πολυφασματικής δορυφορικής εικόνας Landsat TM. Η δεύτερη διερευνά τη μεταβολή των καλύψεων –χρήσεων γης στην Αττική. Χρησιμοποιούνται τρεις πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες των ετών 1991, 2000 και 2008. Οι δύο πρώτες είναι του δορυφόρου Landsat TM και η τελευταία του Aster. Από τις διαχρονικές αναλύσεις επιβεβαιώνεται η ταχύτατη επέκταση της δόμησης προς τα Ανατολικά και Νότιο-Ανατολικά της Αττικής. Η τρίτη εφαρμογή παρουσιάζει την χρήση μη επανδρωμένων πτητικών μέσων στην χαρτογράφηση μικρών περιοχών. Ο αρχαιολογικός χώρος των Ζερελίων στον Αλμυρό (Περιφερειακή Ενότητα Μαγνησίας) αποτελεί την περιοχή μελέτης. Από ύψος 100 μέτρων περίπου πραγματοποιήθηκε η αεροφωτογράφιση της περιοχής, καθώς και η παραγωγή του ορθοφωτοχάρτη υψηλής ευκρίνειας και του ψηφιακού μοντέλου της γήινης επιφάνειας.

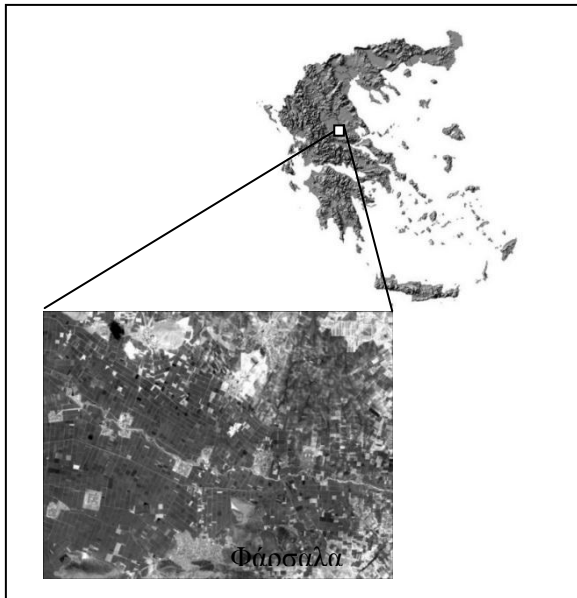
13.1 Εφαρμογή 1η: Σύγκριση δύο μεθόδων ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων: Μελέτη περίπτωσης στην περιοχή των Φαρσάλων

13.1.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των νευρωνικών δικτύων στην ταξινόμηση των δορυφορικών εικόνων έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης αφενός μεν διαφορετικών τύπων δεδομένων, αφετέρου δε τη γνώση του ειδικού, δίνοντας πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με τους κλασσικούς στατιστικούς ταξινομητές. Το γεωργικό έδαφος χαρακτηρίζεται από την ποικιλομορφία, την πολυπλοκότητα και τη μίξη των καλύψεων γης, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ακριβή του ταξινόμηση από δορυφορικές εικόνες με τις κλασσικές μεθόδους. Αντίθετα η χρήση των νευρωνικών δικτύων με τον αλγόριθμο του πολυεπίπεδου νευρώνα αντίληψης Multi-Layer Perceptron (MLP) υπόσχεται βελτίωση της αξιοπιστίας στην ταξινόμηση.

Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στην περιοχή των Φαρσάλων (κεντρική Ελλάδα) η οποία αποτελείται από τρεις ζώνες: Αρδευόμενη, με κύρια καλλιέργεια το βαμβάκι, μη αρδευόμενη, με κύρια καλλιέργεια το σιτάρι και ημιορεινή, με καλλιέργειες δημητριακών. Η περιοχή μελέτης καλύπτει μια έκταση 66000 στρεμμάτων στην οποία κατοικούν 20000 κάτοικοι και έχει ως βασικό αστικό κέντρο την πόλη των Φαρσάλων (εικόνα 13.1).

Γεωμορφολογικά η περιοχή χαρακτηρίζεται από την πεδινή και ημιορεινή ζώνη μέχρι το ύψος των 400 μέτρων. Η μονοκαλλιέργεια του βαμβακιού κυριαρχεί στην πεδινή ζώνη δημιουργώντας αρκετά περιβαλλοντικά προβλήματα. Παρατηρείται υπεράντληση των υπόγειων υδάτων, για τις ανάγκες της άρδευσης καθώς και ρύπανσή τους από τις εισροές των φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων στις καλλιέργειες.

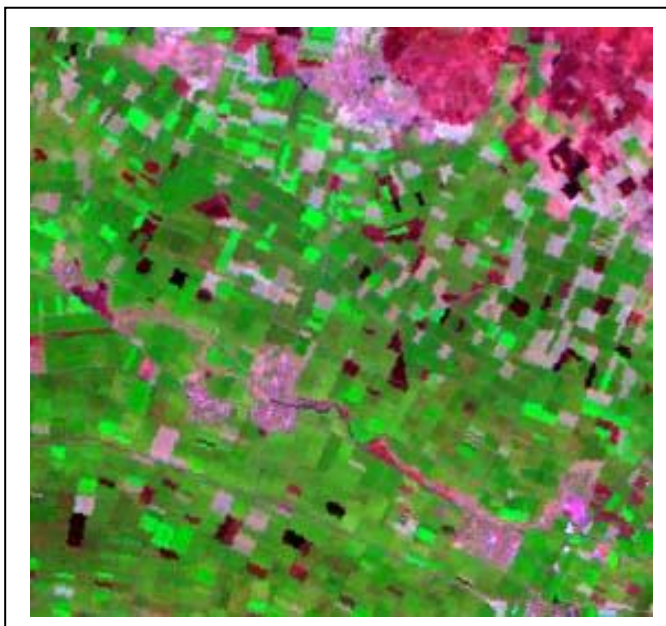


Εικόνα 13. 1 Αποτύπωση της ζώνης εφαρμογής στην περιοχή των Φαρσάλων.

Στην περιοχή μελέτης εφαρμόστηκαν και αξιολογήθηκαν η μέθοδος ταξινόμησης με νευρωνικά δίκτυα και η κλασική ταξινόμηση της μέγιστης πιθανοφάνειας, τα δε αποτελέσματα υπήρξαν ακριβέστερα μετά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου παρά της δεύτερης (Perakis *et al.* 2003).

13.1.2 Εφαρμογή των δύο μεθόδων ταξινόμησης

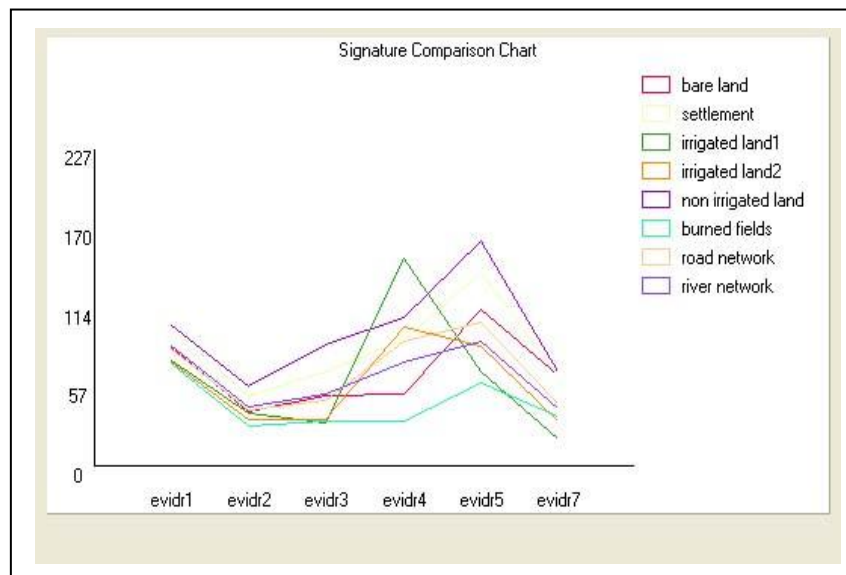
Για την εφαρμογή των προτεινόμενων μεθόδων ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκε η πολυφασματική εικόνα Landsat TM με ημερομηνία λήψης την 22/07/1997. Αρχικά έγινε προεπεξεργασία της εικόνας. Εφαρμόστηκαν γεωμετρικές και ραδιομετρικές διορθώσεις για τη απαλοιφή των σφαλμάτων που προκύπτουν από τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας (εικόνα 13.2).



Εικόνα 13.2 Πολυφασματική εικόνα Landsat TM του 1997.

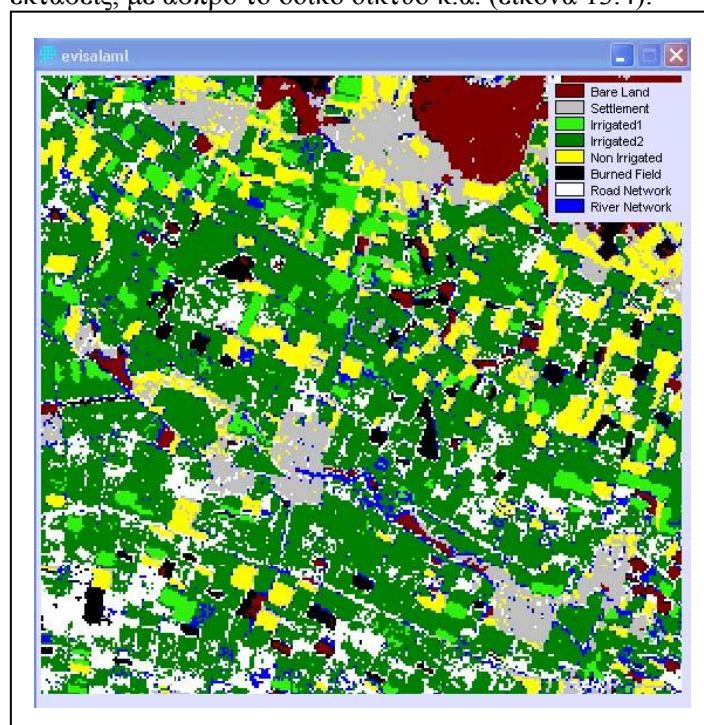
Στη συνέχεια εντοπίστηκαν οι εξής οκτώ βασικές θεματικές κατηγορίες κάλυψης γης στις οποίες ταξινομήθηκε στη συνέχεια η περιοχή μελέτης: Άγονη γη, οικισμοί, εντατικά αρδευόμενες εκτάσεις, αρδευόμενες εκτάσεις μικρότερης έντασης, μη αρδευόμενες εκτάσεις, καμένες εκτάσεις, οδικό δίκτυο και υδρογραφικό δίκτυο. Ακολούθησε επιτόπια έρευνα για τον εντοπισμό και οριοθέτηση στην περιοχή που απεικονίζει η δορυφορική εικόνα, αντιπροσωπευτικών δειγματοληπτικών περιοχών των παραπάνω καλύψεων γης και την εξαγωγή των αντίστοιχων φασματικών υπογραφών.

Στην εικόνα που ακολουθεί, αποτυπώνονται οι 8 φασματικές υπογραφές των καλύψεων γης στα 6 φασματικά κανάλια (δεν περιλαμβάνεται το θερμικό κανάλι) του Landsat TM (εικόνα 13.3).



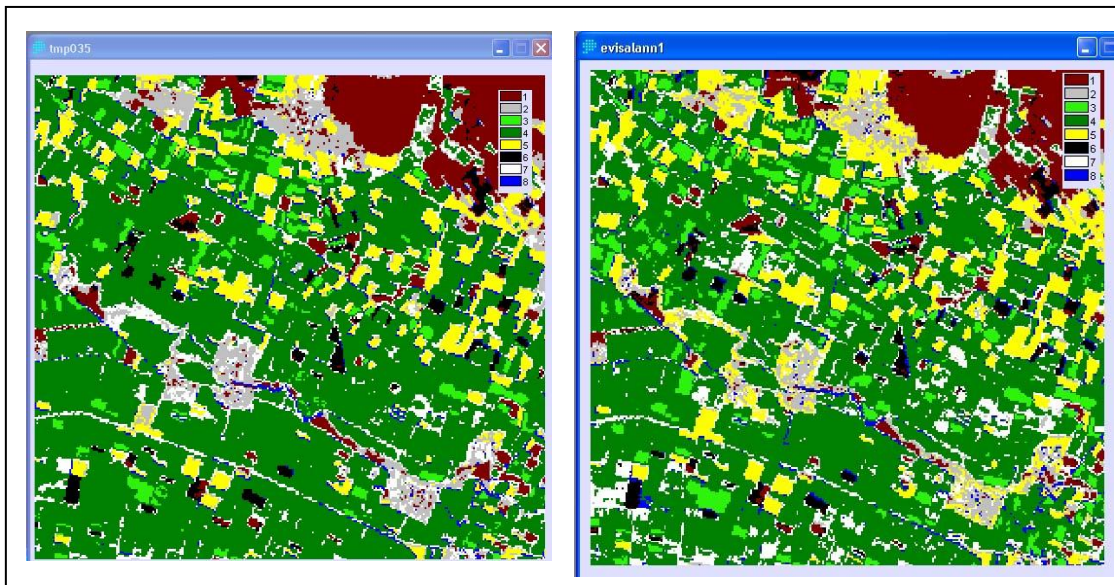
Εικόνα 13.3 Οι Φασματικές υπογραφές των 8 καλύψεων γης.

Ακολούθησε η εφαρμογή της επιβλεπόμενης ταξινόμησης της μέγιστης πιθανοφάνειας η οποία βασίστηκε στις φασματικές υπογραφές των οκτώ θεματικών ομάδων. Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί. Με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι οικισμοί, αντίστοιχα με πράσινο οι αρδευόμενες εκτάσεις, με άσπρο το οδικό δίκτυο κ.ά. (εικόνα 13.4).



Εικόνα 13.4 Ταξινόμηση με αλγόριθμο μέγιστης πιθανοφάνειας.

Τέλος εφαρμόστηκε η ταξινόμηση που βασίζεται στα νευρωνικά δίκτυα (Multi Layer Perceptron) δίνοντας μια σειρά από εικόνες στα διάφορα στάδια της εφαρμογής της. Στις δύο εικόνες που ακολουθούν (εικόνα 13.5), στην αριστερή απεικονίζεται το ενδιάμεσο στάδιο ταξινόμησης και στη δεξιά το τελικό στάδιο ταξινόμησης, με νευρωνικά δίκτυα. Είναι εμφανείς οι διαφορές ιδίως στις μη αρδευόμενες εκτάσεις (κίτρινο χρώμα).



Εικόνα 13.5 Ταξινόμηση νευρωνικών δικτύων.

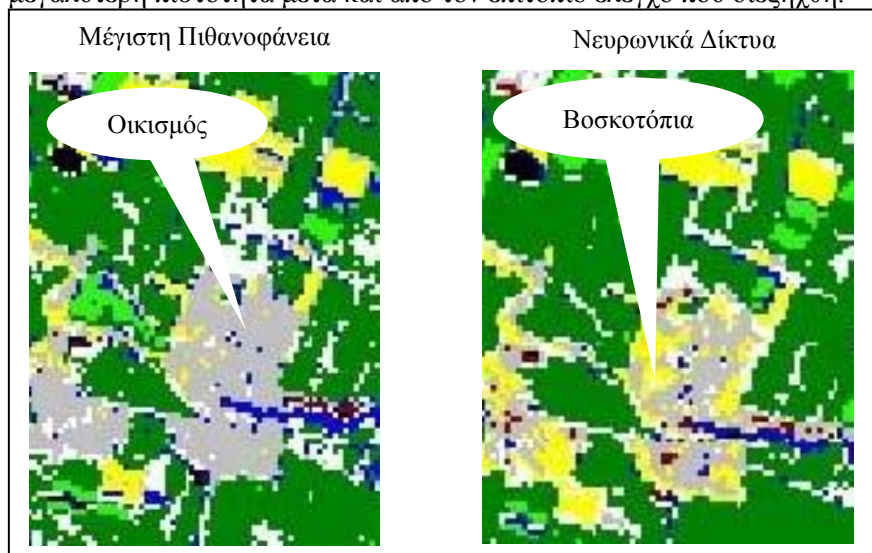
13.1.3 Συμπεράσματα

Από τον συγκριτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων ταξινόμησης μεταξύ των δύο διαφορετικών μεθόδων, στην περιοχή μελέτης, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Οι μη αρδευόμενες εκτάσεις οριοθετήθηκαν ακριβέστερα στην ταξινόμηση με νευρωνικά δίκτυα.

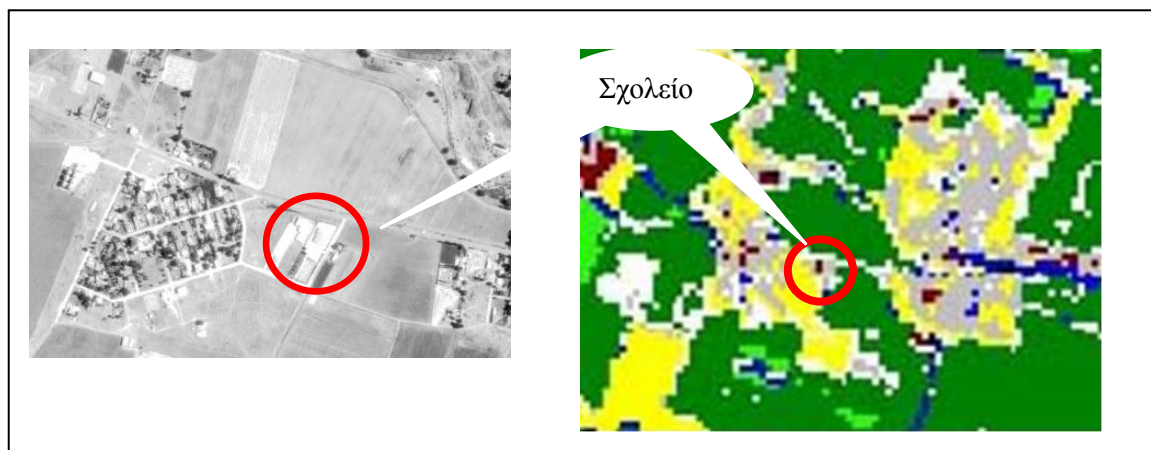
Υπήρξε υπερεκτίμηση της καλυμμένης από το οικιστικό δίκτυο επιφάνειας με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας. Ουσιαστικά οι λειβαδικές εκτάσεις περιμετρικά των κατοικιών ταξινομούνται ως κτίσματα σε αντίθεση με την ταξινομημένη εικόνα των νευρωνικών δικτύων όπου υπάρχει σαφής διαχωρισμός.

Στην εικόνα με κίτρινο χρώμα απεικονίζονται τα βοσκοτόπια που βρίσκονται στα όρια του οικισμού (εικόνα 13.6). Με την ταξινόμηση των νευρωνικών δικτύων οι χορτολιβαδικές επιφάνειες αποδίδονται με μεγαλύτερη πιστότητα μετά και από τον επιτόπιο έλεγχο που διεξήχθη.



Εικόνα 13.6 Ταξινόμηση βοσκοτόπων περιμετρικά των οικισμών.

Όπως φαίνεται καθαρά, η ταξινομημένη εικόνα με την μέθοδο των νευρωνικών δικτύων επιτρέπει τον εντοπισμό μεμονομένων ανθρωπογενών κατασκευών (εικόνα 13.7). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή εντοπίστηκε το κτιριακό συγκρότημα σχολείων παρά τη σχετικά μεσαία διακριτική ικανότητα του κάθε εικονοστοιχείου (pixel 30X30 μέτρα).



Εικόνα 13.7 Εντοπισμός κτισμάτων με τη μέθοδο των νευρωνικών δικτύων.

Παρά το γεγονός ότι η ταξινόμηση με τη μέθοδο των νευρωνικών δικτύων δίνει υψηλότερης ακρίβειας αποτελέσματα σε σχέση με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας, παρατηρούνται κάποια σφάλματα στην ταξινομημένη εικόνα όσον αφορά τις καλύψεις γης. Για παράδειγμα οι αγροτικές οδοί δεν μπορούν να εντοπιστούν ακόμα και με την μέθοδο των νευρωνικών δικτύων. Φυσικά, το γεγονός αυτό οφείλεται στη μέτρια χωρική ανάλυση των εικόνων Landsat TM. Σε αρκετές περιπτώσεις η ενσωμάτωση πρόσθετων βοηθητικών χωρικών δεδομένων (υποβάθρων) σε συνδυασμό με υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες θα μπορούσε να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα ταξινόμησης των καλύψεων/χρήσεων γης.

13.2 Εφαρμογή 2η: Διαχρονικές αλλαγές της αστικής διάχυσης της Αττικής με Τηλεπισκόπηση

13.2.1 Εισαγωγή

Οι όλο και ταχύτερες αλλαγές που πραγματοποιούνται στο ανθρωπογενές και φυσικό περιβάλλον καθιστούν επιτακτική την ανάγκη της παρακολούθησης και του ελέγχου του. Επιπρόσθετα, η όλο και μεγαλύτερη διαθεσιμότητα των αεροφωτογραφιών και ιδιαίτερα των δορυφορικών εικόνων, μεσαίας και υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας επέτρεψε τη ραγδαία ανάπτυξη της επιστήμης της τηλεπισκόπησης με βασικό στόχο την ταχύτατη χαρτογράφηση των χωρικών φαινομένων στην επιφάνεια της γης (Μηλιαρέσης 2003), με μικρό, σχετικά, κόστος. Η ανάγκη εντοπισμού των αλλαγών των χρήσεων/καλύψεων γης οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνικών και μεθόδων επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων διαφορετικών ημερομηνιών λήψης, με βασικό στόχο τον χωρικό εντοπισμό των αλλαγών που συντελέστηκαν στο μεσοδιάστημα. Το μεγάλο εύρος εφαρμογών της τηλεπισκόπησης και της επεξεργασίας δορυφορικών δεδομένων την καθιστά βασικό εργαλείο στη διαχείριση και στη λήψη αποφάσεων.

Στην παρούσα έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα, διαφορετικών χρονικών περιόδων, για την παρακολούθηση της αστικής διάχυσης, στο λεκανοπέδιο της Αττικής και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων (Κατσάρα κ.ά. 2009).

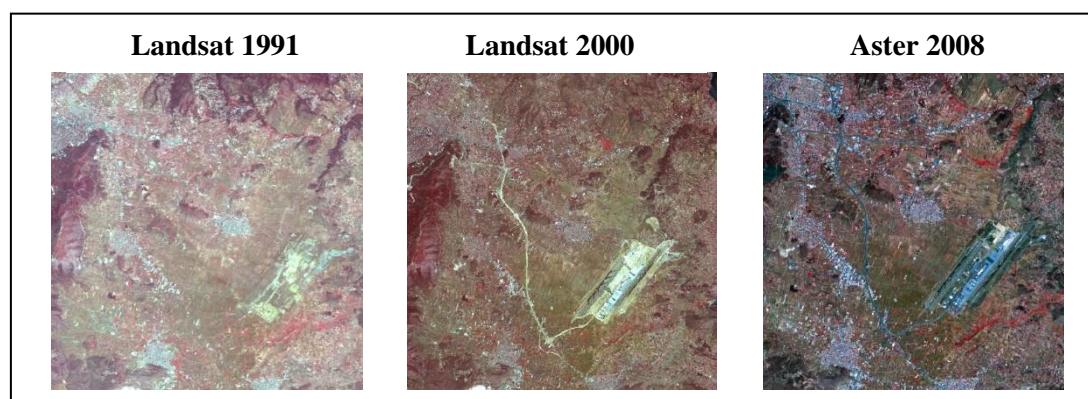
13.2.2 Δεδομένα και μέθοδοι

Για τον εντοπισμό των διαχρονικών μεταβολών της αστικής διάχυσης επιλέχθηκαν τρεις πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (πίνακας 13.1):

Δορυφόρος	Ημερομηνία λήψης	Αριθμός Καναλιών	Διαστάσεις pixel (μέτρα)
Landsat TM	21/06/1991	7	30
Landsat TM	20/05/2000	7	30
Aster	13/07/2008	3	15

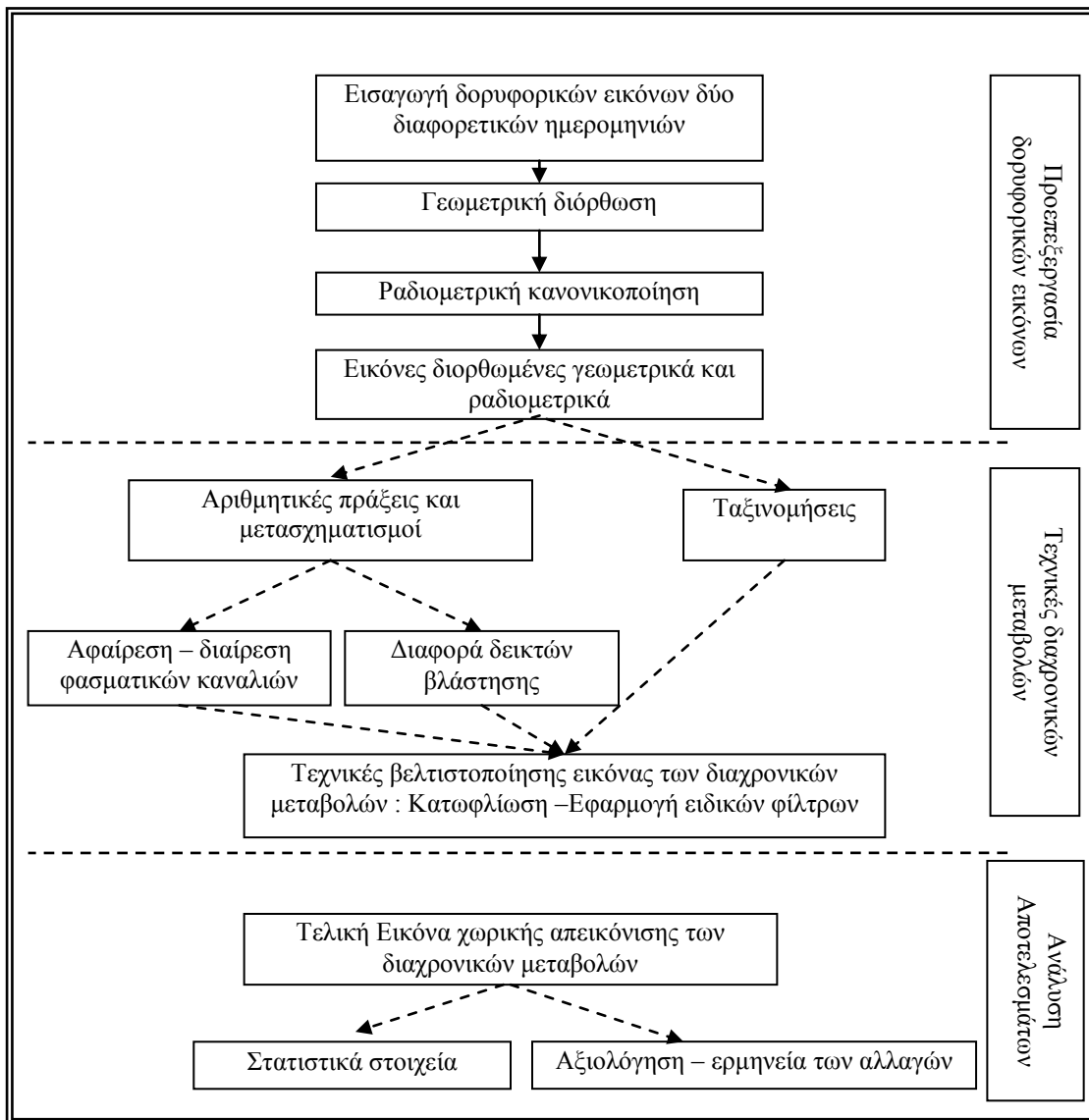
Πίνακας 13.1 Χαρακτηριστικά δορυφορικών εικόνων για διαχρονική ανάλυση

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται (σε πολυφασματικές συνθέσεις) η περιοχή της Ανατολικής Αττικής σε τρεις χρονικές περιόδους (εικόνα 13.8):



Εικόνα 13.8 Οι δορυφορικές εικόνες του 1991-2000-2008.

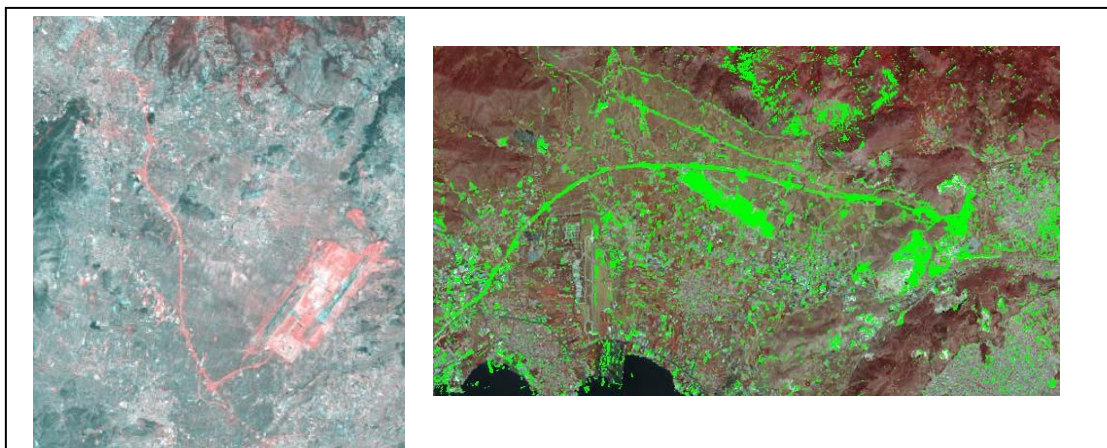
Στα παραπάνω δορυφορικά δεδομένα εφαρμόστηκαν τεχνικές εντοπισμού διαχρονικών αλλαγών ανά ζεύγος εικόνων στις ακόλουθες ημερομηνίες : 1991 – 2000, 2000 – 2008, και 1991 – 2008. Η μεθοδολογική αλυσίδα που εφαρμόστηκε για κάθε ένα από τα ζεύγη εικόνων περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: α. Προεπεξεργασία των εικόνων, β. Εφαρμογή αλγορίθμων ανίχνευσης διαχρονικών μεταβολών και γ. Μελέτη και πιστοποίηση των μεταβολών αυτών, και παρουσίαση των αποτελεσμάτων (Chunxi *et al* 2008). Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της δημιουργίας χαρτών διαχρονικών αλλαγών (εικόνα 13.9).



Εικόνα 13.9 Διάγραμμα ροής των εργασιών εντοπισμού των διαχρονικών αλλαγών.

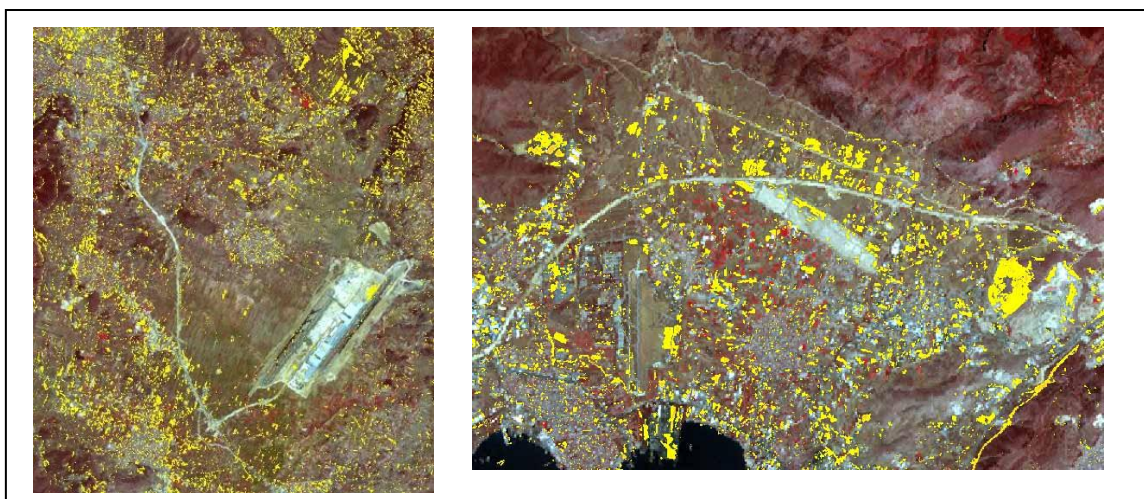
Η επεξεργασία των εικόνων σε ζεύγη (1991-2000 & 2000 - 2008) οδήγησε στην παραγωγή χαρτών που αποτυπώνουν τις αλλαγές, κυρίως με ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, στο λεκανοπέδιο της Αττικής.

Στις ακόλουθες εικόνες απεικονίζονται οι αλλαγές στις καλύψεις γης κατά τα έτη 1991 & 2000 (εικόνα 13.10). Πιο συγκεκριμένα, ανθρωπογενείς κατασκευές όπως η Αττική οδός, το νέο Αεροδρόμιο των Σπάτων καθώς και διάσπαρτη δόμηση αποτυπώνονται με αποχρώσεις του κόκκινου, στην περιοχή της ανατολικής αττικής (αριστερή εικόνα). Επίσης, στη δυτική αττική η νέα εθνική οδός, - και η διάσπαρτη δόμηση αποτυπώνονται με αποχρώσεις του πράσινου (δεξιά εικόνα).



Εικόνα 13.10 Διαχρονική εξέλιξη 1991 -2000.

Αντίστοιχα, στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται οι αλλαγές στις καλύψεις γης κατά τα έτη 2000 & 2008 (εικόνα 13.11). Στην περιοχή της ανατολικής αττικής παρατηρείται αύξηση των ανθρωπογενών κατασκευών ιδιαίτερα σε περιοχές όπως η Παιανία και το Κορωπί (κίτρινη απόχρωση), οι οποίες και γειτνιάζουν με την αττική οδό. (αριστερή εικόνα). Ανάλογα, με αποχρώσεις του κίτρινου, απεικονίζεται η δόμηση κατά μήκος της Αττικής οδού στην περιοχή του Ασπρόπυργου – Ελευσίνα, στη δυτική Αττική (δεξιά εικόνα).



Εικόνα 13.11 Διαχρονική εξέλιξη 2000 – 2008.

Η διαχρονική ανάλυση των διαθέσιμων εικόνων επιβεβαιώνει την ταχύτατη διάχυση της δόμησης προς ανατολικά και Νοτιο-ανατολικά του λεκανοπεδίου της αττικής και ειδικότερα γύρω από τον άξονα της αττικής οδού. Επίσης, στο ΒΔ-Δ τμήμα του Λεκανοπεδίου παρατηρούνται συγκεντρώσεις βιοτεχνιών και μικρών Βιομηχανικών Μονάδων που δημιουργήθηκαν λόγω της ύπαρξης της νέας εθνικής οδού Αθηνών – Πατρών και της Αττικής οδού.

13.2.3 Συμπεράσματα

Οι σημαντικές εξελίξεις που σημειώθηκαν στους τομείς των επικοινωνιών, της πληροφορικής και των μεταφορών συνετέλεσαν στη δημιουργία νέων αστικών τοπίων και μιας διάχυτης αστικότητας που επηρεάζει όλες τις μεγαλουπόλεις και Ευρώπης. Οι χωρικοί μετασχηματισμοί της Αττικής γίνονται κυρίως αντιληπτοί προς την ανατολική Αττική και ιδιαίτερα προς την περιοχή του αεροδρομίου, με την εγκατάσταση κατά μήκος του άξονα της Αττικής οδού νέων αστικών οικονομικών δραστηριοτήτων και κατοικίας, που εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα στους κόμβους των οδικών αξόνων, των σταθμών του μετρό και του προαστιακού. Το φαινόμενο αναμένεται να ενταθεί με την επέκταση των υποδομών των μεταφορών ή και να

μετατοπιστεί προς άλλα σημεία της Αττικής (π.χ. δυτικά και βόρεια). Ο στρατηγικός σχεδιασμός του χώρου, η θεσμοθέτηση χρήσεων γης στον εξωαστικό χώρο και η άσκηση αστικής πολιτικής αποτελούν απαραίτητα εργαλεία που οδηγούν σε αειφόρο ανάπτυξη και την αποφυγή της ανεξέλεγκτης και διάχυτης αστικότητας η οποία μελλοντικά θα οδηγήσει σε επιβαρυντικά αποτελέσματα για το ανθρώπινο και φυσικό περιβάλλον.

13.3 Εφαρμογή 3η: Χρήση Μη Επανδρωμένων Πτητικών Μέσων για χαρτογράφηση πόρων

13.3.1 Εισαγωγή

Ο αγγλικός όρος UAV (Unmanned Aerial Vehicle) αντιστοιχεί στον Ελληνικό όρο «Μη Επανδρωμένο Αεροναυτικό Όχημα» και αναφέρεται σε ένα αεροσκάφος, σχεδιασμένο να λειτουργεί χωρίς την παρουσία του ανθρώπου σε αυτό (ΦΕΚ 2010). Εκτός από τον παραπάνω επίσημο ορισμό, στην ελληνική βιβλιογραφία τα UAVs αναφέρονται και ως «Μη επανδρωμένες πλατφόρμες», «Μη επανδρωμένες ιπτάμενες μηχανές», «Μη επανδρωμένα πτητικά μέσα» κ.α.. Το UAV ανήκει σε μια ευρύτερη κατηγορία που ονομάζεται «Μη Επανδρωμένο Αεροναυτικό Σύστημα» (Unmanned Aerial System - UAS). Το UAS, ως γενικότερη έννοια, περιλαμβάνει μια σειρά από υποσυστήματα όπως: το μη επανδρωμένο αεροναυτικό όχημα, το σταθμό βάσης, τα συστήματα επικοινωνίας, κ.α. (Austin 2010). Η τεχνολογία των UAVs παρέχει τη δυνατότητα συλλογής στοιχείων από αέρος και επισκόπησης των καλύψεων που υπάρχουν και των μεταβολών που συντελούνται στην επιφάνεια του εδάφους. Η ευρεία εξάπλωση τους, ιδιαίτερα στις επιστήμες της γεωπληροφορικής, οφείλεται κυρίως στη δυνατότητα λήψης εικόνων της περιοχής ενδιαφέροντος με πολλά πλεονεκτήματα όπως η ταχύτητα κατά τη διάρκεια της εναέριας διαδικασίας, η ικανότητα χαρτογράφησης δυσπρόσιτων περιοχών και η λήψη εικόνας με πολύ υψηλή ανάλυση εδάφους (Brutto *et al.* 2014). Η αρχική τους χρήση επικεντρωνόταν σε στρατιωτικούς σκοπούς όπως για παράδειγμα η αναγνώριση και η παρατήρηση του περιβάλλοντος, η θαλάσσια επιτήρηση και οι διάφορες δραστηριότητες που λάμβαναν χώρα σε ορυχεία. Όμως τα τελευταία χρόνια, στο τομέα των UAV έχει συντελεσθεί:

- Σημαντική μείωση του κόστους απόκτησης των πτητικών μέσων και της εξελιγμένης τεχνολογίας που χρησιμοποιείται με την ταυτόχρονη δημιουργία μιας διεθνούς κοινότητας ανάπτυξης λογισμικών και εφαρμογών ανοικτού κώδικα (open source) προσαρμοσμένων στα UAV.
- Κατακόρυφη αύξηση των εφαρμογών σε ερευνητικούς και επιχειρησιακούς τομείς.

Στο πλαίσιο αυτό έχουν καταγραφεί, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, αρκετοί τομείς πολιτικών εφαρμογών των UAVs όπως:

- Η Χαρτογράφηση καλλιεργειών & παρακολούθηση των ποιοτικών και των ποσοτικών χαρακτηριστικών τους
- Η Διαχρονική παρακολούθηση αλλαγών χρήσεων - καλύψεων γης
- Η Δημιουργία ορθοφωτοχαρτών με χωρική διακριτική ικανότητα της τάξης των εκατοστών, με εφαρμογή φωτογραμμετρικών εργασιών
- Η Δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας πολύ υψηλής χωρικής ευκρίνειας με εφαρμογή φωτογραμμετρικών εργασιών
- Η Διαχείριση Κρίσεων: Έρευνα & Διάσωση σε σεισμόπληκτες περιοχές
- Ο Εντοπισμός και παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών
- Η Παρακολούθηση καταστροφών, πλημμυρών, καταιγίδων και διαχείριση των επιπτώσεών τους
- Η Παρακολούθηση διατήρησης όρων της περιβαλλοντικής νομοθεσίας καθώς και εντοπισμός πηγών ρύπανσης
- Η Ανίχνευση πυρηνικών και ραδιενεργών ουσιών
- Η Ναυτιλιακή παρακολούθηση
- Η Αστυνόμευση των συνόρων, της ακτογραμμής και ο εντοπισμός των λαθρομεταναστών

Τα μη επανδρωμένα πτητικά μέσα είναι εξοπλισμένα με πληθώρα βοηθητικών ηλεκτρονικών συσκευών προσφέροντας δυνατότητες όπως:

- Άμεση μετάδοση οπτικών πληροφοριών (Video με zoom)
- Ατμοσφαιρικές μετρήσεις (Τηλεμετρία)

- Παρακολούθηση θερμοκρασιακών μεταβολών με θερμική κεκλιμένη /περιστρεφόμενη κάμερα
- Δορυφορικό εντοπισμό, αδρανειακό, τηλεμετρία κ.λπ.
- Κατακόρυφη απογείωση ή προσγείωση
- Μεγάλες δυνατότητες τηλεχειρισμού ή αυτόνομης προ-προγραμματιζόμενης πορείας
- Δυνατότητα αποφυγής σταθερών ή κινουμένων εμποδίων
- Προσαρμογή διαφορετικών αισθητήρων ανάλογα με τις απαιτήσεις..

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται ηλεκτρικό υπερ-ελαφρύ UAV, πλήρως ελεγχόμενο από υπολογιστή, με δυνατότητα αυτόνομης πτήσης (εικόνα 13.12).



Εικόνα 13.12 Υπερ-ελαφρύ Τετρακόπτερο – UAV με προσαρμοσμένη φωτομηχανή.

Για την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων που παρέχουν τα UAVs στη χαρτογράφηση και γενικότερα στο σχεδιασμό, ακολουθεί στη συνέχεια ένα παράδειγμα εφαρμογής.

13.3.2 Εφαρμογή χαρτογράφησης πολιτιστικής & φυσικής κληρονομιάς με χρήση UAV

Η προστασία και καταγραφή των πολιτιστικών & φυσικών τοπίων είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της πολιτιστικής και φυσικής κληρονομιάς η οποία κρύβει μέσα της αιώνες ή και χιλιετίες γνώσης. Αυτή η γνώση επιβάλλεται να διατηρηθεί και να υπάρχει και στις επόμενες γενεές. Αρωγός σε αυτήν την κατεύθυνση είναι η τεχνολογία και τα επιτεύγματα της, μέσω της ψηφιακής απεικόνισης των μνημείων χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία, ένα εκ των οποίων είναι και τα UAV (Unmanned Aerial Vehicles). Ιδιαίτερης σημασίας είναι η ανάπτυξη μικρών εναέριων μη επανδρωμένων πλατφορμών, τα οποία πετούν σε ένα εύρος ύψους 20 – 200 m και χαρακτηρίζονται από την δυνατότητα απόκτησης τόσο ποσοτικών όσο και ποιοτικών δεδομένων με υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας και χαμηλό κόστος (Eisenbeiss *et al.* 2011).

Ένα συγκεκριμένο παράδειγμα καταγραφής και χαρτογράφησης της πολιτιστικής και φυσικής κληρονομιάς (με χρήση UAV) αποτελεί ο αρχαιολογικός χώρος “Μαγούλα Ζερέλια”. Βρίσκεται κοντά στον Αλμυρό Μαγνησίας και αποτελεί γνωστή προϊστορική θέση και σημείο αναφοράς της ευρύτερης περιοχής. Έχει αποδειχθεί πως η θέση έχει κατοικηθεί ήδη από τη Μέση Νεολιθική Εποχή μέχρι και την Ύστερη Εποχή του Χαλκού και ταυτόχρονα έχουν αναγνωριστεί σε αυτό συνολικά οκτώ αρχαιολογικά επίπεδα, με το τελευταίο να έχει εντοπιστεί σε βάθος περίπου 6 – 8 μέτρων (Μουνδρέα 2015).

Στόχος της παρούσας εφαρμογής υπήρξε η δημιουργία του υψηλής ανάλυσης ορθοφωτοχάρτη και ψηφιακού μοντέλου επιφανείας, της περιοχής η οποία καταλαμβάνει έκταση 50 περίπου στρεμμάτων. Για το

σκοπό αυτό μεγάλος αριθμός αλληλεπικαλυπτόμενων αεροφωτογραφιών ελήφθησαν από υπερ-ελαφρύ UAV από ύψος περίπου 100 μέτρων.

Ακολουθώς περιγράφονται, αναλυτικά, η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε, τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση της χαρτογράφησης με UAV (Σπανός κ.ά. 2015).

13.3.2.1 Μεθοδολογία Χαρτογράφησης

Δύο είναι τα βασικά στάδια που απαιτούνται για την υλοποίηση της χαρτογράφησης:

- Αεροφωτογράφιση με UAV.
- Επεξεργασία των Αεροφωτογραφιών.

Κάθε μία από τις παραπάνω φάσεις αποτελείται από εργασίες που πρέπει να υλοποιηθούν για την επιτυχή δημιουργία της ψηφιακής αποτύπωσης της περιοχής μελέτης.

Οι εργασίες αυτές είναι :

A) Αεροφωτογράφιση με UAV

Αρχικά υλοποιήθηκε, στο γραφείο, το Σχέδιο Πτήσης (Flight Plan). Αφορά τον προγραμματισμό της αυτοματοποιημένης διαδρομής που θα εκτελέσει το UAV με προκαθορισμό παραμέτρων όπως το ύψος, η ταχύτητα και ο προσανατολισμός από τη στιγμή της απογείωσής του έως και αυτή της προσγείωσής του κατά τη διαδικασία της αεροφωτογράφισης. Για την καταγραφή του σχεδίου πτήσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα “Mission Planner”. Στο λογισμικό έγινε εισαγωγή παραμέτρων όπως η εστιακή απόσταση της φωτομηχανής (5 χιλιοστ.), το ύψος πτήσης (100 μ.) και η ταχύτητα πτήσης (5 μ/δευτ.) με αποτέλεσμα τον υπολογισμό του απαιτούμενου χρόνου πτήσης καθώς και τον συνολικό αριθμό των αεροφωτογραφιών (Α/Φ) που δύνανται να ληφθούν. Όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί απαιτήθηκαν 34 Α/Φ με συνολικό χρόνο πτήσης 2,5 λεπτά για έκταση 44,7 στρέμματα (εικόνα 13.13).



Εικόνα 13.13 Δημιουργία του σχεδίου πτήσης στο γραφείο.

Στη συνέχεια βαθμονομείται η φωτομηχανή και προσαρμόζεται στο UAV ώστε να υπάρχει αρμονική λειτουργία όλων των υποσυστημάτων. Για την επίτευξη κατακόρυφων λήψεων αλλά και καθαρών εικόνων, η κάμερα στερεώνεται στο κάτω μέρος του UAV σε αντικραδασμική βάση.

Μετά την προεπεξεργασία στο γραφείο, δύο είναι οι βασικές εργασίες που υλοποιούνται κατά την άφιξη στην περιοχή μελέτης, για την αεροφωτογράφιση. Αρχικά, στην έκταση των επιλεγμένων πενήντα στρεμμάτων τοποθετούνται στόχοι, με γνωστές συντεταγμένες, οι οποίοι και θα αποτελέσουν τα φωτοσταθερά για την αναγωγή του τελικού ορθοφωτοχάρτη στο Ελληνικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ87. Επίσης κάποιοι στόχοι χρησιμοποιούνται ως σημεία ελέγχου για τον ποιοτικό έλεγχο των παραγόμενων προϊόντων. Τέλος, εγκαθίσταται η ασύρματη επικοινωνία του σταθμού βάσης (φορητός υπολογιστής) με το UAV για την παρακολούθηση εκτέλεσης της αυτόνομης πτήσης. Στην εικόνα που ακολουθεί, αποτυπώνεται ο

σταθμός βάσης (αριστερά) από τον οποίο ο χειριστής παρακολουθεί τις παραμέτρους κατά την διεξαγωγή της αυτόνομης πτήσης του UAV (εικόνα 13.14).



Εικόνα 13.14 Σταθμός βάσης και UAV για αυτόνομη αεροφωτογράφιση.

B) Επεξεργασία Αεροφωτογραφιών

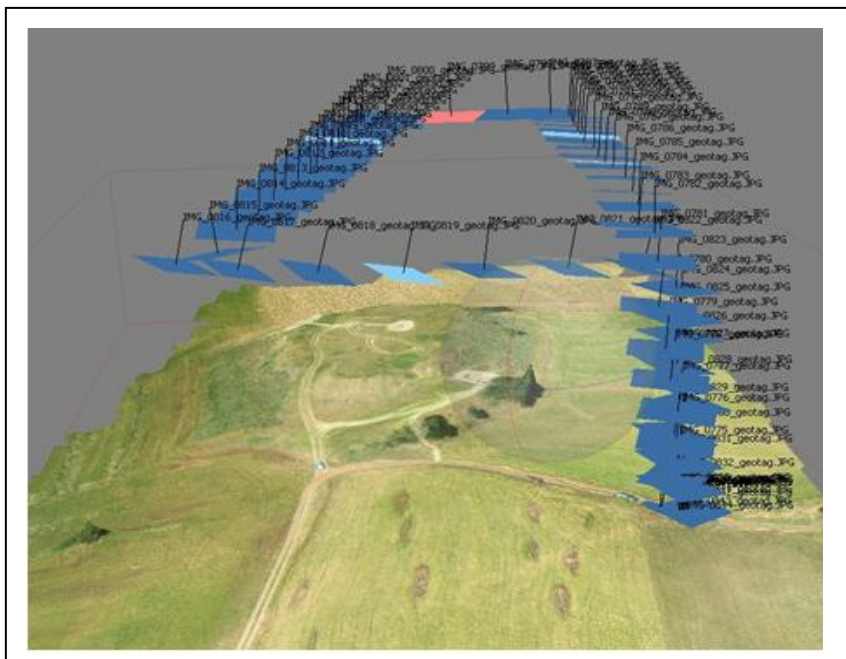
Η επεξεργασία των αεροφωτογραφιών αφορά φωτογραμμετρικές εργασίες για τη δημιουργία του ορθοφωτοχάρτη καθώς και του ανάγλυφου (DSM, Digital Surface Model) της περιοχής των Ζερελίων. Το πρώτο βήμα, στη φάση αυτή, ήταν η αντιστοίχιση των πληροφοριών θέσης λήψης σε κάθε μία αεροφωτογραφία (Geotagging). Έτσι, σε κάθε Α/Φ ενεγράφησαν οι συντεταγμένες φ.λ.η (WGS84) κατά τη χρονική στιγμή λήψης της με το UAV.

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται φωτογραμμετρικό λογισμικό για την επεξεργασία των Α/Φ. Αυτής της κατηγορίας τα λογισμικά εφαρμόζουν την τεχνική της παράλλαξης (η διαφορά της σχετικής θέσης ενός αντικειμένου αν αποτυπωθεί από διαφορετικές θέσεις) για την ανακατασκευή ενός πλήρους 3D μοντέλου του χώρου ή του αντικειμένου (απόσταση/βάθος) από δισδιάστατες εικόνες (Verhoeven 2011).

Συνοπτικά, τα βήματα επεξεργασίας των Α/Φ είναι (Agisoft PhotoScan 2013):

- Ο προσανατολισμός των φωτογραφιών. Υπολογίζεται η θέση της φωτογραφικής μηχανής για την κάθε εικόνα ενώ ταυτόχρονα αναζητούνται τα κοινά σημεία στις φωτογραφίες που έχουν αλληλοεπικάλυψη. Το τελικό προϊόν είναι ένα αραιό νέφος σημείων και το σύνολο των θέσεων λήψης των φωτογραφιών. Επιπλέον στο συγκεκριμένο στάδιο εντοπίζονται τα φωτοσταθερά και τα επίγεια σημεία ελέγχου με γνωστές συντεταγμένες (σε ΕΓΣΑ87) που τοποθετήθηκαν στο χώρο.
- Η δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου. Ακολουθεί η δημιουργία του τρισδιάστατου πλέγματος πολυγώνων (polygon mesh) το οποίο προσομοιώνει την επιφάνεια του αντικειμένου, βάσει των εκτιμώμενων θέσεων των εικόνων.
- Η κατασκευή της υφής των εικόνων. Μετά τη δημιουργία της γεωμετρίας (δηλ. το πλέγμα) που έχει κατασκευαστεί, δημιουργείται η υφή – προβολή των εικόνων πάνω στην επιφάνεια η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ορθοφωτοχαρτών.

Στην εικόνα που ακολουθεί, απεικονίζονται οι θέσεις της κάμερας στον τρισδιάστατο χώρο κατά τη στιγμή λήψης των αεροφωτογραφιών καθώς και το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής των Ζερελίων (εικόνα 13.15).



Εικόνα 13.15 Τα βήματα επεξεργασίας των αεροφωτογραφιών.

Τέλος, αξιολογείται η ποιότητα των παραγόμενων αποτελεσμάτων βάσει των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου.

13.3.2.2 Αποτελέσματα

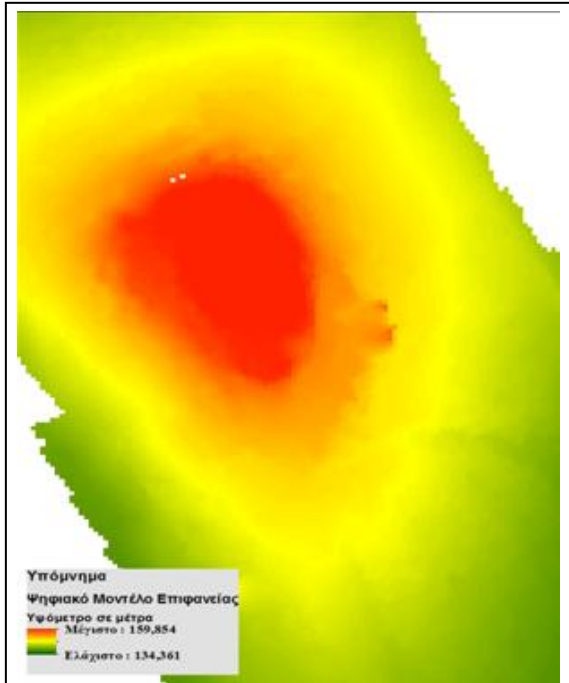
Η δημιουργία ορθοφωτοχάρτη με διαστάσεις ρixel 2 εκατοστά αποτέλεσε το βασικό προϊόν της επεξεργασίας των Α/Φ. Η έκταση των 50 περίπου στρεμμάτων χαρτογραφήθηκε με μεγάλη ακρίβεια αποτυπώνοντας στοιχεία τόσο του φυσικού όσο και του πολιτιστικού περιβάλλοντος. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται ο λόφος των Ζερελιών με τις ανασκαφικές τομές (εικόνα 13.16). Σε κλίμακα 1:200 ο ορθοφωτοχάρτης αποτυπώνει με εξαιρετική λεπτομέρεια όλα τα στοιχεία που στο χώρο (δένδρα, δρόμοι, ανθρωπογενείς παρεμβάσεις κ.ά.).



Εικόνα 13.16 Ορθοφωτοχάρτης του λόφου των Ζερελιών – Αλμυρός.

Για τον έλεγχο της ακρίβειας των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν σημεία ελέγχου με γνωστές συντεταγμένες. Το οριζοντιογραφικό σφάλμα ανήλθε σε 3 cm και το υψομετρικό σε 5 cm.

Παράλληλα δημιουργήθηκε και το ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (Digital Surface Model, DSM) της περιοχής των Ζερελίων με διαστάσεις pixel 1,6 μέτρα. Το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης περιλαμβάνει την υψομετρική καταγραφή όλων των στοιχείων που υπάρχουν στο χώρο. Στην εικόνα που ακολουθεί αποτυπώνεται (με χρωματική διαβάθμιση) η υψομετρική διαφορά, στην περιοχή, από 134 έως 160 μέτρα (εικόνα 13.17). Το μέγιστο ύψος παρατηρείται στο λόφο των Ζερελίων.



Εικόνα 13.17 Δημιουργία του Ψηφιακού Μοντέλου Επιφανείας, DSM.

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω προϊόντων δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων αναπαραστάσεων με χρήση GIS λογισμικών. Οι τρισδιάστατες διαδραστικές αναπαραστάσεις (ή ακριβέστερα 2,5 διαστάσεις) αποτελούν βασικό εργαλείο στην κατανόηση των στοιχείων που εγγράφονται στο χώρο ενώ παράλληλα βοηθούν και στην ενίσχυση του συμμετοχικού σχεδιασμού.

Στην εικόνα που ακολουθεί αποτυπώνεται σε ο λόφος των Ζερελίων υπό διεύθυνση γωνίας θέασης από Νότο προς Βορρά (εικόνα 13.18). Η υπέρθεση επιπλέον χωρικής πληροφορίας για την περιοχή μελέτης σε συνδυασμό με τη διαδραστική κίνηση του μοντέλου αποτελεί βασικό εργαλείο για τους σχεδιαστές και τους ειδικούς στις λήψεις αποφάσεων.



Εικόνα 13.18 Τρισδιάστατη αποτύπωση του λόφου Ζερελίων.

13.3.2.3 Συμπεράσματα

Η ψηφιακή φωτογραμμετρία, τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται όλο και περισσότερο σε θέματα αποτυπώσεων πολιτιστικών μνημείων καθώς και φυσικού περιβάλλοντος. Οι αυτοματοποιημένες φωτογραμμετρικές διαδικασίες που έχουν αναπτυχθεί με τους νέους αλγόριθμους υπολογιστικής όρασης επιτρέπουν την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων για την παραγωγή τρισδιάστατων ψηφιακών προϊόντων που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό ακρίβειας.

Ειδικότερα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν:

- Η ταχύτητα αποτύπωσης. Για τον σχεδιασμό, την υλοποίηση της αεροφωτογράφισης με UAV και την τελική επεξεργασία των Α/Φ απαιτήθηκαν συνολικά τρεις ημέρες. Οι εργασίες πεδίου δεν διήρκεσαν πάνω από μία ώρα. Αντίστοιχα με τις παραδοσιακές μεθόδους αποτύπωσης θα απαιτούνταν κάποιες ημέρες (γεωδαιτικός σταθμός).
- Το κόστος της αποτύπωσης. Το κόστος εξοπλισμού και ανθρωποωρών είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με την επίγεια αποτύπωση. Ο εξοπλισμός UAV/κάμερα/σταθμός βάσης δεν κοστίζει περισσότερο από 3.000 ευρώ. Αντίστοιχα ένας γεωδαιτικός σταθμός μπορεί να έχει κόστος πάνω από 5.000 ευρώ.
- Η ευκολία αποτύπωσης. Η εναέρια αποτύπωση αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα σε σχέση με την επίγεια αποτύπωση. Έτσι, παρακάμπτονται όλες οι δυσκολίες και τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από την δύσκολη και επικίνδυνη προσπελασιμότητα του εδάφους

Φυσικά, η φωτογραμμετρική αποτύπωση έχει και τα μειονεκτήματά της. Οι κατακόρυφες λήψεις δεν επιτρέπουν την καταγραφή στοιχείων που βρίσκονται καλυμμένα κάτω από δένδρα, κεραμοσκεπές κ.ά. Παράλληλα, η επίγεια τοπογραφική αποτύπωση δίνει τοπογραφικά διαγράμματα υψηλότερης ακρίβειας. Βέβαια, ο τρόπος και το είδος της καταγραφής εξαρτώνται από το είδος και τον σκοπό της εφαρμογής και γενικότερα τις προδιαγραφές της έρευνας πάντα σε συνδυασμό με το διαθέσιμο κόστος σε χρόνο και χρήμα που τίθενται για την πραγματοποίησή της.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

Ελληνόγλωσση

- Κατσάρα, Α., Φαρασλής, Ι., Γοσποδίνη, Α. και Περάκης, Κ., 2009. Ανακοίνωση στο 2 πανελλήνιο συνέδριο Πολεοδομίας, Χωροταξίας & Περιφερειακής Ανάπτυξης, με τίτλο εισήγησης 'Οι διαχρονικές αλλαγές της αστικής διάχυσης της Αττικής με τη χρήση της τηλεπισκόπησης', 24-29 Σεπτεμβρίου, Βόλος.
- Μηλιαρέσης, Χ.Γ., 2003. *Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση*. Αθήνα: ΙΩΝ.
- Μουνδρέα – Αγραφιώτη, Α. Αρχαιολογική Ανασκαφή στη Μαγούλα Ζερέλια. Διαθέσιμο στο: <http://www.ha.uth.gr/index.php?page=arch-research-zerelia> [πρόσβαση 24/08/2015].
- Σπανός, Β., Φαρασλής Ι. και Γούσιος, Δ., 2015. Ψηφιακή απεικόνιση μνημείων πολιτιστικής & φυσικής κληρονομιάς μέσω χρήσης UAV. Εφαρμογή μελέτης περίπτωσης. Πανελλήνιο Συνέδριο Ψηφιοποίησης Πολιτιστικής Κληρονομιάς, Βόλος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Παραλιακό Συγκρότημα "Παπαστράτου", 24-26 Σεπτεμβρίου.
- ΦΕΚ, 2010. Φύλλο εφημερίδας της Κυβερνήσεως, Τεύχος 2, Αρ. Φύλλου 9.

Ξενόγλωσση

- Agisoft PhotoScan, 2013. Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 0.9.1.
- Austin, R., 2010. Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment, United Kingdom: Wiley.
- Brutto Lo, Garraffa, M., Meli, A.P., 2014. UAV Platforms for Cultural Heritage Survey: First Results. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2 (5), 227 – 234.
- Chunxi, C., Xiakum Z. and Freng, L. 2008, Integrated platform design and realization of land use change detection based with AO and EML. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.XXXVII. PartB7, Beijing.
- Eisenbeiss, H. and Sauerbier, M., 2011. Investigation of UAV Systems and Flight Modes for Photogrammetric Applications. *The Photogrammetric Record*, 26 (136), 400 – 421.
- Perakis, K., Faraslis, I. and Goussios, D. 2003. Neural Networks classification in Remote Sensing: Case study in rural areas of Farsala region. International Symposium on GIS and Remote Sensing: Environmental Applications. Δημοσίευση στα πρακτικά συνεδρίου σελ. 379-389.
- Verhoeven, G., 2011. Taking computer vision aloft—archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan. *Archaeological Prospection* , 18 (1), 67-73.