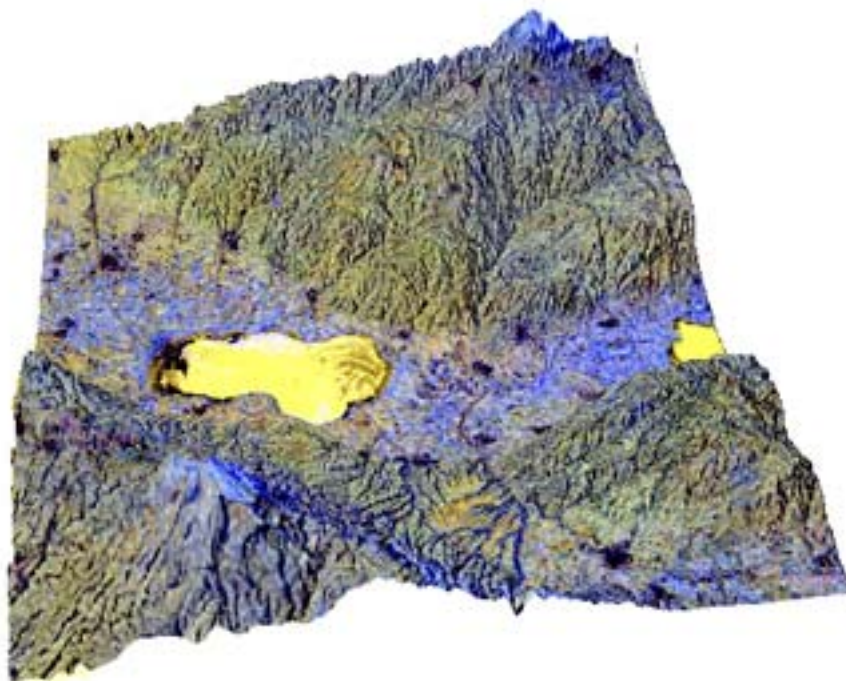


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ  
Εργαστήριο Εφαρμογών Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ:  
«ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

ΜΟΥΡΑΤΙΔΗΣ Φ. ΑΝΤΩΝΙΟΣ  
ΓΕΩΛΟΓΟΣ  
ΥΠΟΤΡΟΦΟΣ Ι.Κ.Υ.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΡΑΝΤΑΡ  
ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΣΤΟΝ  
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΩΣΕΩΝ:  
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ Β. ΕΛΛΑΔΑΣ



ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή  
Καθηγητής Θ. Αστάρας (Επιβλέπων)  
Καθηγητής Ε. Βαβλιάκης  
Δρ. Α. Γκανάς

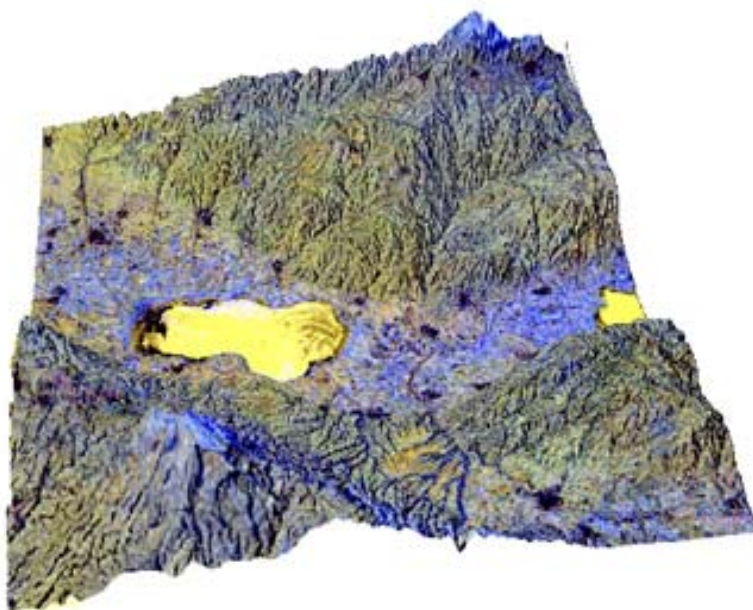
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2005

ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI  
SCHOOL OF SCIENCES  
GEOLOGY DEPARTMENT  
DEPARTMENT OF PHYSICAL AND ENVIRONMENTAL GEOGRAPHY  
Remote Sensing and GIS Applications Laboratory

POSTGRADUATE COURSE:  
«GEOGRAPHY AND ENVIRONMENT»

**MOURATIDIS F. ANTONIOS**  
GEOLOGIST  
*Greek State Scholarships Foundation (I.K.Y.) scholar*

**COMPARATIVE EVALUATION OF THE APPLICATION OF SATELLITE  
RADAR IMAGING AND MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES IN THE  
DETECTION AND MAPPING OF LINEAMENTS:  
A CASE STUDY FROM NORTHERN GREECE**



MASTER THESIS

Examining Committee  
**Prof. Th. Astaras (Supervisor)**  
**Prof. E. Vavliakis**  
**Dr. A. Ganas**

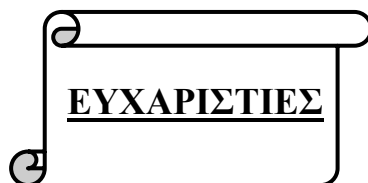
THESSALONIKI 2005

**«...toiauth h gh aqth idein, ei tij anwqen qe%to, wsper ai dwdeka skutoi sfairai, poiki|h, xrwmasin diei|hmmenh...»**

**«...η γη αυτή, αν τη δει κανείς από ψηλά, μοιάζει σαν τις σφαίρες, οι οποίες έχουν φτιαχτεί από δώδεκα χρωματιστά είδη δέρματος...»**

**“...this earth, seen from above, looks like the spheres, which are made up of twelve different kinds of colored leather...”**

**Πλάτωνας, Φαίδων, 110.β, 5-7  
Plato, Phaedo, 110.b, 5-7**



Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα αυτής της εργασίας, καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας και Διευθυντή του Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, καθηγητή κ. Θεόδωρο Αστάρα, για την ανάθεση της συγκεκριμένης διατριβής ειδίκευσης, καθώς και για το χρόνο, την υπομονή που διέθεσε και την πολύτιμη βοήθειά του κατά την εκπόνησή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας κ. Ελευθέριο Βαβλιάκη, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τις επιστημονικές γνώσεις που μου προσέφερε κατά την διάρκεια της φοίτησης μου στο Π.Μ.Σ. «Γεωγραφία και Περιβάλλον» και ιδιαίτερα σε θέματα που άπτονται του αντικειμένου της Γεωγραφίας.

Τον διδάκτορα Γεωλογίας κ. Αθανάσιο Γκανά, ερευνητή του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου Αθηνών, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής.

Τον διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. κ. Οικονομίδη Δ., του οποίου η συμβολή υπήρξε καθοριστική σε κάθε βήμα της εργασίας αυτής.

Τους Καθηγητή κ. Αντώνιο Ψιλοβίκο, Επίκουρο Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Αλμπανάκη, και Λέκτορα κ. Κωνσταντίνο Βουβαλίδη, του Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας του Τμήματος Γεωλογίας, για τις επιστημονικές γνώσεις που μου προσέφεραν κατά τη φοίτηση μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Γεωγραφία και Περιβάλλον».

Την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Α.Π.Θ. κα. Μαρία Τσακίρη-Στρατή, για την πολύτιμη βοήθειά της σε θέματα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, καθώς και για τη ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων με το λογισμικό Erdas Imagine 8.5. στο TATM.

Την κα. Μαρουλιώ Χανιώτη, Φυσικό Τηλεπισκόπησης, για τη διάθεση του λογισμικού ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας ENVI+IDL 4.1 (αδειοδότηση αξιολόγησης).

Τον συνάδελφο Αλέξανδρο Καλαθά, για την τεχνική υποστήριξη όσον αφορά το λογισμικό ArcGIS.

Τους συναδέλφους μεταπτυχιακούς φοιτητές του Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας για την άριστη συνεργασία, καθώς και το σύνολο του προσωπικού του Τομέα για την επιστημονική και υλική υποστήριξη.

Το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.) για την οικονομική υποστήριξη κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών, υπό τη μορφή χορήγησης υποτροφίας, με γνωστικό αντικείμενο «Τηλεπισκόπηση και Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα στις Γεωεπιστήμες».

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η περιοχή της Μυγδονίας λεκάνης έχει μελετηθεί επαρκώς από τεκτονική σκοπιά και υπάρχει πλήθος τεκτονικών και γενικότερα, γεωλογικών στοιχείων. Με βάση τα στοιχεία αυτά, σε τμήμα της παραπάνω λεκάνης, επιχειρείται η συγκριτική αξιολόγηση των πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων και των δορυφορικών εικόνων ραντάρ, με κριτήριο τη δυνατότητα εντοπισμού και χαρτογράφησης γραμμώσεων (lineaments), χωρίς να εξετάζεται το είδος των δομών που αντιπροσωπεύουν (δηλαδή αν είναι ρήγματα, λιθολογικά όρια κ.λ.π.), καθώς και ο πειραματισμός με ορισμένες, από τις πλέον πολυάριθμες, μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία ασχολείται με την καταγραφή (χαρτογράφηση) των γραμμώσεων, οι οποίες διακρίνονται εμφανώς σε πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες (Landsat-5/TM) και σε δορυφορικές εικόνες ραντάρ (ENVISAT/ASAR), μετά από κατάλληλη επεξεργασία και με τη συνδυασμένη χρήση των Γ.Σ.Π. (ArcGIS). Ακολουθεί στατιστική ανάλυση του αριθμού, των διευθύνσεων και των μηκών των γραμμώσεων (τόσο αυτών που εντοπίστηκαν, όσο και αυτών που προκύπτουν από υπάρχοντες σεισμοτεκτονικούς χάρτες), με τη χρήση ροδοδιαγραμμάτων και ιστογραμμάτων. Τέλος, λαμβάνει χώρα η σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραπάνω αναλύσεων, από την οποία και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

Συνολικά εντοπίστηκαν 253 γραμμώσεις στην εικόνα Landsat-5/TM, 204 γραμμώσεις στην εικόνα Envisat/ASAR και 172 γραμμώσεις από τη συγχώνευση των δύο παραπάνω εικόνων. Η πολυφασματική εικόνα πλεονεκτεί έναντι της εικόνας ραντάρ, όσον αφορά το πλήθος και το συνολικό μήκος των γραμμώσεων που χαρτογραφήθηκαν. Η εικόνα ραντάρ εξαρτάται άμεσα από τη διεύθυνση «φωτισμού» της μικροκυματικής ακτινοβολίας: Εξαιτίας του φαινομένου της «σκιάς» (shadow), τα χαρακτηριστικά του αναγλύφου που είναι παράλληλα ή υπό-παράλληλα στη διεύθυνση πτήσης του δορυφόρου, τονίζονται ιδιαίτερα, ενώ αντίθετα υποβαθμίζονται τα στοιχεία εκείνα, τα οποία παρατάσσονται κάθετα ή σχεδόν κάθετα στη διεύθυνση πτήσης του δορυφόρου. Ο εντοπισμός γραμμώσεων, ιδιαίτερα με την εικόνα ραντάρ, είναι πολύ ευκολότερος στις ορεινές περιοχές, ενώ καθίσταται δύσκολος έως αδύνατος στις πεδινές περιοχές. Ιδιαίτερα αξιόλογη υπήρξε η τεχνική «αντιστροφής της εικόνας» (image inversion), η οποία εφαρμόστηκε στην εικόνα ραντάρ, καθώς και οι ψευδοχρωματικές απεικονίσεις που εφαρμόστηκαν στην εν λόγω εικόνα. Μεταξύ των εικόνων συγχώνευσης των εικόνων Landsat-5/TM (πολυφασματική) και Envisat/ASAR (ραντάρ), η καλύτερη εικόνα ήταν εκείνη, στην οποία είχε προηγηθεί αντιστροφή της εικόνας ραντάρ. Από τις διάφορες τεχνικές βελτίωσης της πολυφασματικής εικόνας, περισσότερο ωφέλιμες υπήρξαν: η γραμμική έκταση του ιστογράμματος, η ενίσχυση των ακμών, η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών, οι δείκτες βλάστησης, και η σύνθεση ψευδοέγχρωμων εικόνων.

## ABSTRACT

The Mygdonia basin is a basin of tectonic origin, which has been sufficiently studied in the past and thus there are adequate tectonic and geological data. Based on this data, for a part of the Mygdonia basin, a comparative evaluation of the application of satellite radar imaging and multispectral images is performed, concerning the ability to detect and map lineaments, without examining the kind of structures they represent (faults, lithological boundaries etc), by implementing and experimenting with various digital image processing techniques. In particular, the present study deals with the mapping of lineaments that are manifested in a satellite multispectral image (Landsat-5/TM) and a satellite radar image (ENVISAT/ASAR), after appropriate digital image processing and in conjunction with a G.I.S. (ArcGIS) software. A statistical analysis of the number, direction and length of the lineaments (those detected, as well as those originating from seismotectonic maps) is executed, using rose diagrams and histograms. The comparison between the results of the analysis of the respective statistical data produces the final conclusions.

A total of 253, 204 and 172 lineaments were detected on the Landsat-5/TM image, the Envisat/ASAR radar image, and the fusion images respectively. The multispectral image produces better results, as far as the amount and total length of the lineaments detected is concerned. The radar image is strongly direction dependent: Owing to radar shadows, which are oriented parallel to the azimuth direction, linear features parallel or sub-parallel to the azimuth direction are considerably enhanced, whereas those perpendicular or almost perpendicular to the azimuth direction are relatively suppressed. The detection of lineaments, especially on the radar image, is much easier in hilly and mountainous terrain than it is in flat areas. The techniques of “image inversion” and “pseudocolour display”, that were implemented for the radar image, have proven to be very useful in detecting lineaments. Furthermore, “image fusion” produced better results, when the radar image was previously “inverted”. From the various enhancement techniques for the multispectral image, most useful were the following: “histogram linear stretching”, “edge enhancement”, PCA, “vegetation indices” and “false colour composites”.

**Λέξεις κλειδιά:** Τηλεπισκόπηση, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, ψηφιακή επεξεργασία εικόνων, Landsat-5/TM, Envisat/ASAR, περιοχή Μυγδονίας λεκάνης, γραμμώσεις, συγχώνευση εικόνων, συγκριτική αξιολόγηση.

**Keywords:** Remote Sensing, G.I.S., digital image processing, Mygdonia basin area, lineaments, Landsat-5/TM, Envisat/ASAR, image fusion, comparative evaluation.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>                                                         | <b>8</b>  |
| <b>2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</b>                                              | <b>9</b>  |
| <b>3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ</b>                                  | <b>10</b> |
| 3.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ                                                             | 11        |
| 3.2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ-ΦΥΣΙΚΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ                                        | 11        |
| 3.3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ                                                              | 11        |
| 3.4. ΝΕΟΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ                                                 | 14        |
| 3.5. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΒΛΑΣΤΗΣΗ                                           | 17        |
| <b>4. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ</b>                                            | <b>18</b> |
| <b>5. ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ</b>                          | <b>20</b> |
| 5.1.ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ                                 | 20        |
| 5.1.1.Ατμοσφαιρική διόρθωση                                                | 20        |
| 5.1.2.Γεωμετρική διόρθωση/Ορθοναγωγή                                       | 21        |
| 5.1.3.Βελτιώσεις και μετασχηματισμοί της εικόνας                           | 25        |
| Γραμμική έκταση του ιστογράμματος (linear histogram streching)             | 25        |
| Εξισορρόπηση του ιστογράμματος (histogram equalization)                    | 26        |
| Προσαρμογή του ιστογράμματος σε μαθηματική αναφορά                         | 26        |
| Ενίσχυση των ακμών (edge enhancement)                                      | 27        |
| Ομαλοποίηση (εξομάλυνση) της εικόνας (image smoothing)                     | 28        |
| Αντιστροφή της εικόνας (image inversion)                                   | 28        |
| Ανάλυση κυρίων συνιστωσών (Principal Component Analysis)                   | 28        |
| Δημιουργία ψευδοχρωματικών εικόνων                                         | 31        |
| Λόγοι φασματικών ζωνών (ratioing)                                          | 35        |
| Δείκτες βλάστησης                                                          | 35        |
| 5.2.ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ PANTAP                                         | 40        |
| 5.2.1.Αλλαγή προβολής της εικόνας ENVISAT/ASAR                             | 40        |
| 5.2.2.Μείωση του φαινομένου της κροκιδωτής υφής (speckle reduction)        | 40        |
| 5.2.3.Βελτιώσεις και μετασχηματισμοί της εικόνας                           | 42        |
| Γραμμική έκταση του ιστογράμματος (linear histogram streching)             | 42        |
| Εξισορρόπηση του ιστογράμματος (histogram equalization)                    | 43        |
| Προσαρμογή του ιστογράμματος σε μαθηματική αναφορά                         | 44        |
| Ενίσχυση των ακμών (edge enhacement)                                       | 45        |
| Ομαλοποίηση (εξομάλυνση) της εικόνας (image smoothing)                     | 46        |
| Αντιστροφή της εικόνας (image inversion)                                   | 47        |
| Ψευδοχρωματική απεικόνιση (pseudocolour display)                           | 48        |
| 5.3.ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ (DATA FUSION)                                       | 51        |
| 5.3.1. Εγγραφή (registration) της εικόνας ραντάρ στην πολυφασματική εικόνα | 52        |
| 5.3.2. Συγχώνευση των εικόνων μετά τη σχετική εγγραφή                      | 56        |

---

|                   |                                                            |                   |
|-------------------|------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b><u>6.</u></b>  | <b><u>ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ Γ.Σ.Π. ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ</u></b> | <b><u>59</u></b>  |
| <b><u>7.</u></b>  | <b><u>ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</u></b>             | <b><u>69</u></b>  |
| <b><u>8.</u></b>  | <b><u>ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u></b>                        | <b><u>79</u></b>  |
| <b><u>9.</u></b>  | <b><u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ</u></b>                                  | <b><u>82</u></b>  |
| 9.1.              | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Δορυφόροι Landsat 4 & 5                       | 82                |
| 9.2.              | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Εικόνες ραντάρ–ENVISAT/ASAR                   | 85                |
| 9.3.              | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πίνακες                                       | 114               |
| <b><u>10.</u></b> | <b><u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ</u></b>                      | <b><u>124</u></b> |



## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι **γραμμώσεις (lineaments)** αποτελούν γραμμικά χαρακτηριστικά (ευθείες και καμπύλες γραμμές) της γήινης επιφάνειας, τα οποία είναι αναγνωρίσιμα σε χάρτες, αεροφωτογραφίες, δορυφορικές ή άλλες εικόνες. Ο Hobbs το 1904 προσδιόρισε τις γραμμώσεις ως «σημαντικές γραμμές του αναγλύφου, οι οποίες αποκαλύπτουν την κρυμμένη αρχιτεκτονική του υποβάθρου» (Astaras 1990, Σουλακέλλης 1994, Sabins 1997, Οικονομίδης 2000).

Οι O’Leary et al. (1976) επαναπροσδιόρισαν τη χρήση του όρου και όρισαν τη γράμμωση από περισσότερο γεωμορφολογική σκοπιά, ως «ένα χαρτογραφήσιμο απλό ή σύνθετο γραμμικό χαρακτηριστικό μιας επιφάνειας, τα τμήματα του οποίου έχουν μεταξύ τους μια ευθεία ή ελαφρώς καμπυλωτή διάταξη, που διαφέρει ευκρινώς από τη διάταξη των παρακείμενων χαρακτηριστικών και πιθανώς αντανακλά ένα υποεπιφανειακό φαινόμενο» (Gupta, 2003).

Απαιτείται πάντως εμπειρία και προσοχή, ώστε να διακρίνει κανείς τις γραμμώσεις που σχετίζονται με δομές βάθους, από αυτές που είναι καθαρά επιφανειακής προέλευσης (π.χ. λόφοι, ξεροπόταμοι, κλιτείς που υπόκεινται διάβρωση).

Ο όρος «**φωτογράμμωση**» έχει διατηρηθεί έως σήμερα περισσότερο για ιστορικούς λόγους, καθώς ο εντοπισμός και η χαρτογράφηση των γραμμώσεων γινόταν αρχικά με τη βοήθεια αεροφωτογραφιών, οι οποίες και υπήρξαν τα πρώτα διαθέσιμα δεδομένα τηλεπισκόπησης. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ανάπτυξη νέων συστημάτων απεικόνισης (π.χ. πολυφασματικοί σαρωτές, ραντάρ) η ευρύτερη έννοια της «εικόνας» αντικατέστησε τη λέξη «φωτογραφία».

Ως εκ τούτου ο όρος «**γράμμωση**» καθίσταται γενικότερος του όρου «φωτογράμμωση», καθώς περιλαμβάνει όλα τα γραμμικά στοιχεία που εμφανίζονται τόσο στις εικόνες από διάφορα συστήματα, όσο και στις αεροφωτογραφίες και κατά συνέπεια συνιστάται η χρήση του.

Οι γραμμώσεις είναι κυρίως τα ίχνη ασυνεχειών, όπως λιθολογικά όρια, επιφάνειες στρώσης, ρωγμές, ρήγματα και διακλάσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Το ενδιαφέρον για τις γραμμώσεις δεν είναι απλά επιστημονικό. Είναι γνωστό, ότι η αναγνώρισή τους συμβάλλει στον εντοπισμό ορυκτών κοιτασμάτων, αποθεμάτων πετρελαίου, φυσικού αερίου και υπόγειου νερού (Kutina and Hildebrand 1987, από Lowman 2002). Σύμφωνα με τους Avery and Berlin (1992), η χαρτογράφηση γραμμώσεων από δεδομένα τηλεπισκόπησης συνιστά αποτελεσματική διαδικασία για την αναγνώριση πιθανών ρηγμάτων. Επιπλέον, οι γραμμώσεις μπορεί να αντιπροσωπεύουν τοπικούς γεωλογικούς κινδύνους, όπως καταπτώσεις της οροφής ορυχείων, αστοχίες πρανών κατά τη διάνοξη οδών, καθώς και σεισμική δραστηριότητα. Οι Kusaka et al. (1997) χρησιμοποίησαν δεδομένα από οπτικούς δέκτες και ραντάρ για τη χαρτογράφηση γραμμώσεων στην Ιαπωνία, βρίσκοντας τη συμβολή τους στην εκτίμηση του κινδύνου από κατολισθήσεις πολύτιμη (Lowman, 2002). Επίσης, η κατάλληλη ανάλυση των γραμμώσεων βρίσκει εφαρμογή στην ανάλυση της καταπόνησης (Sanderson and Phillips 1987, από Mostafa and Zakir 1996), της συνεκτικότητας και της διαπερατότητας πετρωμάτων με διακλάσεις (Long and Witherspoon 1985, Olding and Webman 1991, Zhang et al. 1992, από Mostafa and Zakir 1996). Αν και οι γραμμώσεις είναι σχετικά εύκολο να αναγνωριστούν στις διάφορες εικόνες, η φύση τους και η σημασία τους δεν είναι το ίδιο εύκολο να εκτιμηθούν. Τις περισσότερες φορές η υπαίθρια έρευνα για την επαλήθευση των συμπερασμάτων (ground truth) είναι απολύτως απαραίτητη.

Μετά το 1975, η ερευνητική δραστηριότητα στην Ελληνική επικράτεια, σχετικά με τις εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης και ιδιαίτερα των δορυφορικών εικόνων στον εντοπισμό και την οριοθέτηση φωτογραμμώσεων (οι οποίες αντιπροσωπεύουν ρήγματα και άλλες μορφοτεκτονικές δομές), έχει ως εξής:

A) Την περίοδο 1975-1990, η συμβολή των πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων και των εικόνων ραντάρ στη γεωλογία και ιδιαίτερα στον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση φωτογραμμώσεων (lineaments), οι οποίες πιθανώς να αντικατοπτρίζουν την παρουσία ρηγμάτων στον Ελληνικό χώρο, ήταν ικανοποιητική, αλλά όχι τόσο ακριβής (Karfakis 1983, Φωκάς 1990, Τσόμπος 1988, Τσόμπος και Καρμής 1988, Καρφάκης 1988, Karfakis and Mouyaris 1988, Lymberis et al. 1982, Astaras 1990, Astaras & Soulakellis 1990, Astaras 1994). Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η ερμηνεία των εικόνων ήταν οπτική και συνήθως μονοσκοπική, στην υποκειμενικότητα του ερμηνευτή (αναλυτή), καθώς και στο γεγονός, ότι οι εικόνες ήταν τυπωμένες σε χαρτί ή σε φιλμ, οπότε δεν ήταν δυνατό να υποστούν επεξεργασία ή περαιτέρω βελτίωση.

B) Την τελευταία εικοσαετία, με την εξέλιξη των H/Y και των συστημάτων ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων, άρχισε μια προσπάθεια βελτίωσης/ενίσχυσης των δορυφορικών εικόνων και ιδιαίτερα εκείνων που είτε τονίζουν τις φωτογραμμώσεις ή εντοπίζουν νέες φωτογραμμώσεις, οι οποίες δεν είναι ορατές σε μη επεξεργασμένες δορυφορικές εικόνες (Σουλακέλλης 1994, Ganas and White 1995, Ganas et al. 1996, Οικονομίδης 2000).

## 2.ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

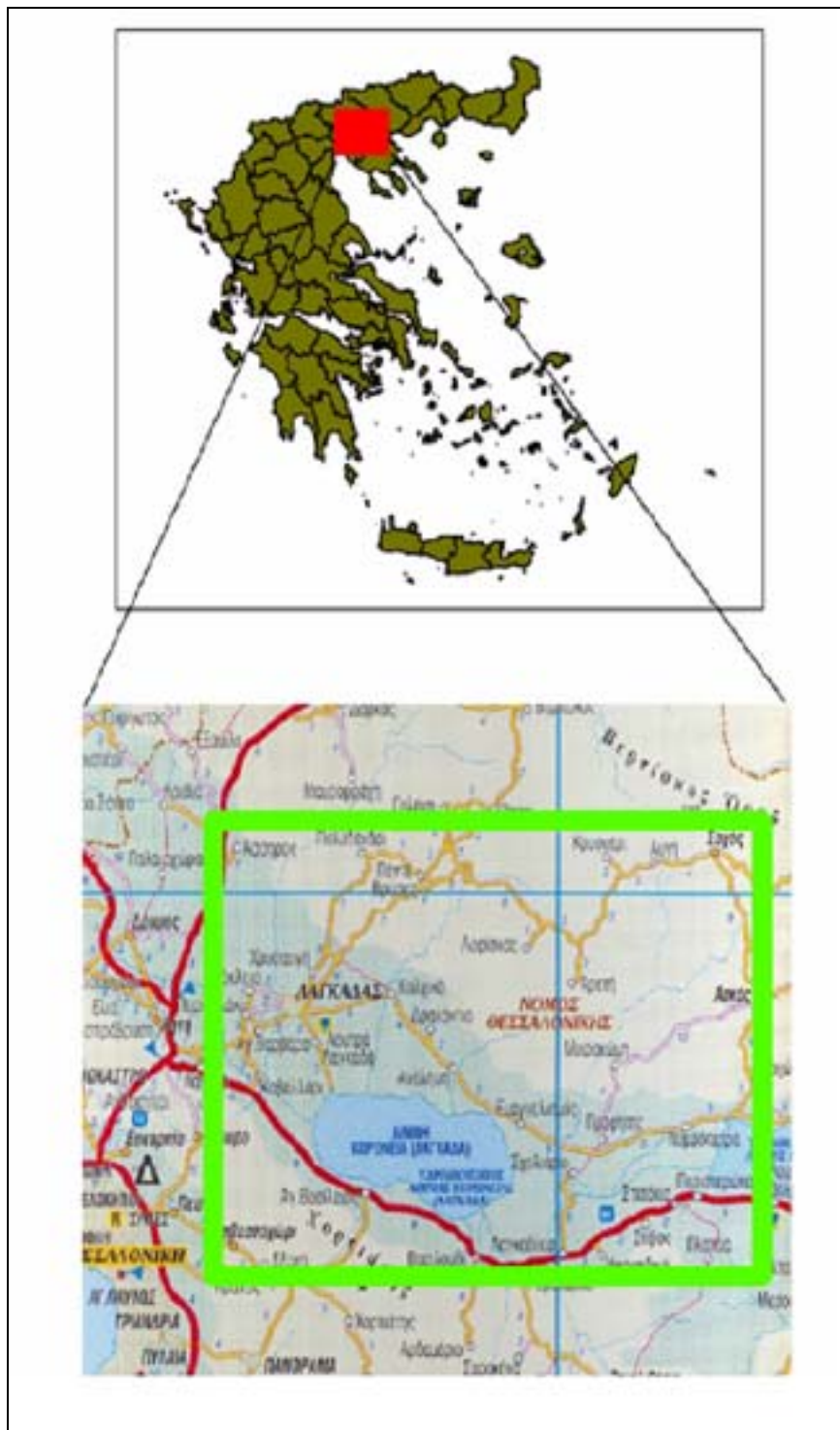
Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η συγκριτική αξιολόγηση των πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων και των δορυφορικών εικόνων ραντάρ, με κριτήριο τη δυνατότητα εντοπισμού και χαρτογράφησης γραμμώσεων (lineaments), χωρίς να εξετάζεται το είδος των δομών που αντιπροσωπεύουν (δηλαδή αν είναι ρήγματα, λιθολογικά όρια κ.λ.π.), καθώς και ο πειραματισμός με ορισμένες, από τις πλέον πολυάριθμες, μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.

Συγκεκριμένα, η εργασία ασχολείται με την καταγραφή (χαρτογράφηση) των γραμμώσεων, οι οποίες διακρίνονται εμφανώς σε πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες (Landsat-5\TM) και σε δορυφορικές εικόνες ραντάρ (ENVISAT\ASAR), μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Ακολουθεί στατιστική ανάλυση του αριθμού, των διευθύνσεων και των μηκών των γραμμώσεων που χαρτογραφήθηκαν, με τη χρήση ροδοδιαγραμμάτων και ιστογραμμάτων. Ανάλογη στατιστική ανάλυση γίνεται και στις γραμμώσεις (ρήγματα) που προκύπτουν από υπάρχοντες σεισμοτεκτονικούς χάρτες.

Τέλος λαμβάνει χώρα η σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραπάνω αναλύσεων, από την οποία και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

### 3.ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε αποτελεί τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης, το οποίο έχει μελετηθεί επαρκώς και υπάρχει πλήθος τεκτονικών και άλλων στοιχείων, τα οποία είναι απαραίτητα προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση.



Εικόνα 1. Περιοχή μελέτης (πράσινο πλαίσιο).

### 3.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ

Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται ΒΑ του οικιστικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης και αποτελεί, όπως προαναφέρθηκε, τμήμα της Μυγδονίας Λεκάνης (Εικ. 1). Γεωγραφικά περικλείεται μεταξύ των παραλλήλων  $40^{\circ} 32'$  και  $40^{\circ} 48'$  βόρειου γεωγραφικού πλάτους και μεταξύ των μεσημβρινών  $22^{\circ} 59'$  και  $23^{\circ} 31'$  ανατολικού γεωγραφικού μήκους, καταλαμβάνοντας έκταση  $983,682 \text{ km}^2$  περίπου. Διοικητικά ανήκει εξ ολοκλήρου στο νομό Θεσσαλονίκης.

### 3.2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ-ΦΥΣΙΚΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ

Η Μυγδονία λεκάνη συνιστά ένα εκτεταμένο επίμηκες βύθισμα, το οποίο διαχωρίζει τη χερσόνησο της Χαλκιδικής από τον κεντρικό κορμό της Μακεδονίας και αποτελείται από δύο τμήματα: (1) την υπολεκάνη Βόλβης στα ανατολικά και (2) την υπολεκάνη Λαγκαδά στα δυτικά.

Το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης μπορεί να διαχωριστεί σε τρία τμήματα:

Α. Το βόρειο τμήμα, το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί ως λοφώδες - ημιορεινό, με υψόμετρα έως 600 m. Στο ανατολικό μέρος αυτού και συγκεκριμένα βόρεια από το δυτικό τμήμα των ορέων της Βόλβης αναπτύσσεται μια ομαλή επιφάνεια, η επιφάνεια επιπέδωσης του Ασκού. Η επιφάνεια αυτή βρίσκεται μεταξύ των ισοϋψών των 400 m. και των 600 m., παρουσιάζοντας μια μικρή κλίση από ΒΑ προς ΝΔ.

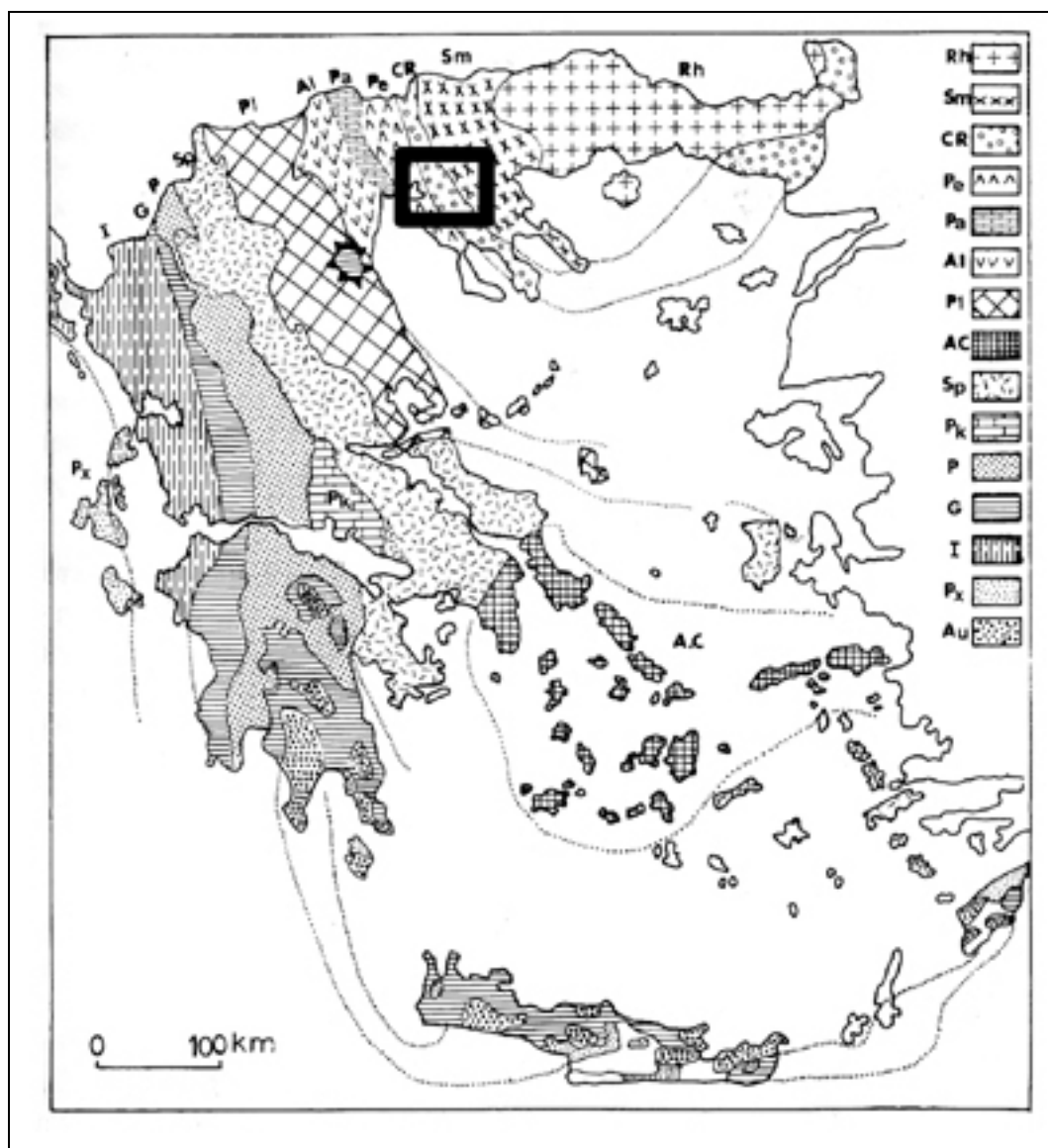
Β. Το κεντρικό τμήμα, το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί ως πεδινό και περιλαμβάνει την υπολεκάνη Λαγκαδά και το δυτικό τμήμα της υπολεκάνης της Βόλβης. Το όριο των δύο αυτών υπολεκανών δεν είναι σαφές, ορίζεται όμως από ένα σύστημα ράχων, λοφίσκων και αναβαθμίδων, μέσα από τους οποίους διέρχεται ο ποταμός Δερβένι (Ψιλοβίκος 1987, από Σουλακέλλη 1994).

Γ. Το νότιο τμήμα, το οποίο χαρακτηρίζεται ως ορεινό και καταλαμβάνεται από τον ορεινό όγκο του Χορτιάτη (Κισσός 1201 m.). Εξάιρεση στην κατανομή αυτή του ανάγλυφου αποτελούν η λεκάνη του Ζαγκλιβερίου στα ανατολικά και το βόρειο τμήμα της λεκάνης του Ανθεμούντα στα νότια, που αναπτύσσονται σε χαμηλότερα υψόμετρα.

Οι κύριοι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης παρουσιάζουν νότια έως νοτιοδυτική διεύθυνση απορροής (Λαμπρινός 1989, από Σουλακέλλη 1994), ενώ αντίθετα στο νότιο τμήμα παρουσιάζουν Β έως ΒΑ διεύθυνση.

### 3.3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Από γεωτεκτονική άποψη η περιοχή μελέτης τοποθετείται μεταξύ της ελληνικής ενδοχώρας και των εσωτερικών ελληνίδων ζωνών (Εικ. 2). Ειδικότερα, συναντώνται οι εξής τρεις από τις γεωτεκτονικές ζώνες του Ελληνικού χώρου: (1) η **Σερβομακεδονική μάζα** στο ανατολικό τμήμα, (2) η **Περιροδοπική ζώνη** στο κεντρικό - δυτικό τμήμα και (3) μικρό τμήμα της **ζώνης Αξίου** στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 2. Θέση της περιοχής μελέτης (μαύρο πλαίσιο) από γεωτεκτονική-γεωλογική σκοπιά (Μουντράκης, 1985).

Η Σερβομακεδονική μάζα, η οποία καθιερώθηκε ως ανεξάρτητη γεωτεκτονική ζώνη από τους Kockel et Walter (1965), έχει BBD - NNA διεύθυνση και εκτείνεται από την περιοχή του Βελιγραδίου έως το Βόρειο Αιγαίο. Η ζώνη αυτή αντιστοιχεί σε μια κρυσταλλική μάζα παλαιοζωικής ή/και προκάμβριας ηλικίας, η οποία συνορεύει ανατολικά με τη μάζα Ρίλα - Ροδόπης και δυτικά με την Περιοδοπική ζώνη. Τα δύο αυτά όρια της Σερβομακεδονικής αποτελούν ίσως τις κύριες γραμμές ευαισθησίας του φλοιού στην περιοχή και καθιστούν τη Σερβομακεδονική την πλέον ενεργή σεισμοτεκτονική ζώνη (Mountrakis *et al.* 1983, από Σουλακέλλη 1994).

Το όριο της Σερβομακεδονικής μάζας με τη μάζα της Ρίλα - Ροδόπης, κατά μήκος του ποταμού Στρυμόνα, γνωστό και ως "γραμμή Στρυμόνα", μπορεί να παρατηρηθεί μόνο σε λίγες θέσεις, λόγω των νεογενών και τεταρτογενών αποθέσεων που καλύπτουν την περιοχή του ορίου και αποτέλεσε περιοχή μελέτης από πολλούς ερευνητές (π.χ. Dimitrijevic 1967, Kockel *et al.* 1971, Καρυστιναίος 1985, Karistineos and Sotiriadis 1987, από Σουλακέλλη 1994).

Η επαφή της Σερβομακεδονικής μάζας με την Περιοδοπική ζώνη είναι τεκτονική, οφειλόμενη στην Τριτογενή συμπίεση των Εσωτερικών ζωνών αλλά δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως, εάν η πρωτογενής επαφή μεταξύ των δύο ζωνών είναι τεκτονική (Mercier 1968, Kockel et al. 1971, 1977, από Σουλακέλλη 1994) ή είναι στρωματογραφική (Chatzidimitriadis et al. 1990, από Σουλακέλλη 1994).

Σύμφωνα με τους Kockel et Walter (1968), Kockel et al. (1971) και Kockel et al. (1977) (από Σουλακέλλη 1994), η Σερβομακεδονική μάζα διαιρείται σε δύο μεγάλες σειρές πετρωμάτων:

α) Η κατώτερη και αρχαιότερη σειρά Κερδυλλίων, η οποία εκτείνεται από τις εκβολές του Στρυμόνα μέχρι τον οικισμό «Στρατώνι» Χαλκιδικής και δομείται κυρίως από εναλλαγές μαρμάρων και βιοτιτικών - κεροστιλβικών γνευσίων με παρεμβολές μαρμαρυγιακών σχιστολίθων και αμφιβολιτών, φαινομένων μερικής τήξης και μιγματιτικών πετρωμάτων.

β) Η ανώτερη σειρά του Βερτίσκου, η οποία βρίσκεται δυτικά της προηγούμενης σειράς και συνίσταται από μία ακολουθία γνευσίων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων και λεπτών στρωμάτων μαρμάρων, ενώ στους ανώτερους ορίζοντες της επικρατούν οι μεταγάββροι - μεταδιαβάσες και οι αμφιβολίτες, που προήλθαν από μεταμόρφωση βασικών πυριγενών πετρωμάτων.

Μεγάλοι όγκοι όξινων πλουτωνικών πετρωμάτων μεσοζωικής ηλικίας, κυρίως γρανιτικής σύστασης, καθώς και πηγματιτικές φλέβες, διακόπτουν τη συνέχεια των μεταμορφωμένων πετρωμάτων του κρυσταλλοσχιστώδους της Σερβομακεδονικής μάζας.

Τέλος, στην περιοχή του Λαγκαδά, έχει εντοπιστεί (Kockel et al. 1971, Σουλακέλλης 1994) μία μικρή εμφάνιση ιζημάτων μολασσικού τύπου, ηλικίας Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου και συγκεκριμένα πρόκειται για κροκαλοπαγή, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ψαμμίτες και αργίλλους θαλάσσιας, λιμναίας και χερσαίας φάσης.

Στο κεντρικό τμήμα της Σερβομακεδονικής μάζας και με διεύθυνση Α-Δ, τοποθετείται η προ-Μυγδονιακή λεκάνη, τα νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα της οποίας έδειξαν, ότι μπορεί να χωριστούν σε δύο συστήματα: α) το προ-Μυγδονιακό σύστημα που λειτουργήσε κατά το Νεογενές και αποτελείται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμους, ιλύ και ερυθροστρώματα και β) το Μυγδονιακό σύστημα, το οποίο σχηματίστηκε στις νεότερες τάφρους κατά την διάρκεια του Τεταρτογενούς και αποτελείται από ποταμολιμναία, δελταϊκά, λιμναία ιζήματα και αποθέσεις λαγούνας (Ψιλοβίκος 1977 και Psilovikos and Sotiriadis 1983, Σουλακέλλης 1994).

Η Περιοδοπική ζώνη καθιερώθηκε από τους Kauffmann et al (1976) (από Σουλακέλλη, 1994) και αποτελεί την ανατολικότερη ζώνη των εσωτερικών Ελληνίδων. Εκτείνεται ως ζώνη πλάτους 10-20 Km, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ στην δυτική πλευρά της Σερβομακεδονικής μάζας. Αποτελείται από ημιμεταμορφωμένα έως μεταμορφωμένα Περμοτριάδικα και Ιουρασικά ιζήματα, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία και κατατάσσονται από Α προς Δ σε τρεις βασικές ενότητες:

Ενότητα Ντεβέ Κοράν-Δουμπιά: Περιλαμβάνει τα μετακλαστικά ιζήματα του Περμίου (ψαμμίτες - χαλαζίτες, χαλαζιακοί σχιστόλιθοι, μετα-κροκαλοπαγή) με το τοπικό όνομα "σχηματισμός Εξαμιλίου", την ηφαιστειοϊζηματογενή σειρά Περμίου - Κάτω Τριαδικού, και τα ανθρακικά - νηριτικά ιζήματα Μέσου Τριαδικού - Μέσου Ιουρασικού (Mercier 1966, Kockel et al. 1971, από Σουλακέλλη 1994).

Ενότητα Μελισσοχωρίου - Χολομώντα: Αποτελείται από δύο σχηματισμούς: Τον Κατώτερο σχηματισμό που περιλαμβάνει Μέσο - Άνω Τριαδικά μάρμαρα και ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους και φυλλίτες και τον Ανώτερο σχηματισμό που αποτελεί και τον σπουδαιότερο σχηματισμό της Περιοδοπικής ζώνης και είναι ο Κάτω - Μέσο Ιουρασικός φλύσχος, γνωστός ως "φλύσχος της Σβούλας".

Ενότητα Άσπρης Βρύσης - Χορτιάτη: Τα κατώτερα της τμήματα περιλαμβάνουν Πέρμιο - Τριαδικά μετακλαστικά και νηριτικά ιζήματα, ανάλογα με αυτά της ενότητας Ντεβέ Κοράν - Δουμπιά. Τα ανώτερα της τμήματα αποτελούνται από ιζήματα βαθιάς θάλασσας (κερατόλιθοι,

αργιλικόι σχιστόλιθοι, φυλλίτες και μάργες), μέσα στα οποία παρεμβάλλονται όξινα μεταμορφωμένα πυριγενή πετρώματα (πράσινοι επιγνεύσιοι Θεσσαλονίκης) και μεγάλα οφειολιθικά σώματα (Σαπουντζής 1969, από Σουλακέλλη 1994).

Στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης συναντώνται ορισμένοι σχηματισμοί, οι οποίοι ανήκουν στη ζώνη Αξιού και συγκεκριμένα στη ζώνη Παιονίας. Οι σχηματισμοί αυτοί περιορίζονται σε ανθρακικά πετρώματα (ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι, ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή και ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι, Μεσοζωϊκής ηλικίας), μετα-ιζήματα και μετα-ηφαιστειοκλαστικά πετρώματα (μεταπηλίτες, κερατόλιθοι, σερικιτικοί και χλωριτικοί σχιστόλιθοι, Ιουρασικής ηλικίας).

### 3.4. ΝΕΟΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Σύμφωνα με τους Ψιλοβίκο (1977) και Psilovikos and Sotiriadis (1983), η τεκτονική δραστηριότητα που ακολούθησε την Αλπική ορογένεση στη περιοχή Λαγκαδά διακρίνεται σε δυο φάσεις:

1η Τεκτονική φάση κατά το Νεογενές που οδήγησε στον σχηματισμό μεγάλων λεκανών στο βορειοελλαδικό χώρο και της προ-Μυγδονιακής λεκάνης στο χώρο της Σερβομακεδονικής και

2η Τεκτονική φάση κατά το Τεταρτογενές που οδήγησε στον σχηματισμό μικρότερων τάφρων όπως αυτής της Μυγδονίας λεκάνης.

Πιο συγκεκριμένα, η εφελκυστική νεοτεκτονική δράση, η οποία επηρέασε την περιοχή από το Ανώτερο Μειόκαινο, προκάλεσε σειρά ρηγμάτων ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης που είχαν ως αποτέλεσμα το αρχικό βύθισμα της λεκάνης Λαγκαδά σε διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (Mercier et al. 1976, Ψιλοβίκος 1977, από Σουλακέλλη 1994).

Η ενεργός τεκτονική κατάσταση της περιοχής, που έχει διαμορφωθεί κατά τη διάρκεια όλου του Τεταρτογενούς, με εφελκυστικές τάσεις σε διεύθυνση Β-Ν (Papazachos et al. 1979, Paquin et al. 1981, Mercier et al. 1983, από Σουλακέλλη 1994) προκάλεσε ρήγματα γενικής διεύθυνσης Α-Δ, καθώς και επαναδραστηριοποίηση των παλαιότερων ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης ρηγμάτων ή και ρηγμάτων άλλων διευθύνσεων. Αποτέλεσμα της δράσης των Α-Δ αυτών ρηγμάτων από το Τεταρτογενές μέχρι σήμερα ήταν η δημιουργία αλληπάλληλων, παράλληλων τεκτονικών βυθισμάτων κατά μήκος της Σερβομακεδονικής στην διεύθυνση Α-Δ, από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα μέχρι το Αιγαίο (Mountrakis et al. 1983, Psilovikos & Sotiriadis 1983, Psilovikos 1984, Σουλακέλλης 1994).

Ωστόσο, εκτός από τις δύο παραπάνω διευθύνσεις ρηγμάτων, παρατηρούνται στην περιοχή και ρήγματα άλλων διευθύνσεων, όπως π. χ. Β-Ν ή ΒΑ-ΝΔ, τα οποία λόγω της έντονα ενεργού τεκτονικής κατάστασης της περιοχής εμφανίζονται να βρίσκονται σε ενεργό κατάσταση μέχρι σήμερα, προκαλώντας σεισμούς και δίνοντας έτσι στην Σερβομακεδονική ζώνη το χαρακτήρα της πιο σεισμικά ενεργής περιοχής του Βορειοελλαδικού χώρου (Papazachos et al. 1979, Σουλακέλλης 1994). Αποτέλεσμα είναι η γεωμετρία των ρηγμάτων της Σερβομακεδονικής μάζας να φαίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκη (Pavlides & Kiliadis 1987, Pavlides & Soulakellis 1990 και Pavlides 1993, Σουλακέλλης 1994).

Μετά τον ισχυρό σεισμό του 1978 ( $M=6.5$ ), η επικεντρική περιοχή του οποίου βρίσκεται στο χώρο μελέτης, συνδυάζοντας σεισμολογικά δεδομένα και δεδομένα υπαίθρου, οι εργασίες των Papazachos et al. 1979, 1980, Carver and Bollinger 1981, Soufleris et al. 1982, Mountrakis et al. 1983, Mercier et al. 1983, Pavlides 1993 και άλλων προσέφεραν σημαντικές πληροφορίες, σχετικά με την γεωμετρία των ρηγμάτων και την κινηματική τους (από Σουλακέλλη 1994).

Τα κυριότερα ρήγματα της περιοχής αυτής της Μυγδονίας όπως χαρτογραφήθηκαν και περιγράφονται στο νεοτεκτονικό χάρτη κλίμακας 1:100.000, Φύλλα: "Θεσσαλονίκη" και "Λαγκαδά" (Mountrakis et al. 1992, Σουλακέλλης 1994) είναι τα εξής:

α) Σεισμικό ρήγμα Γερακαρούς - Νικομιδηνού - Στίβου - Περιστερώνα. Το ρήγμα αυτό με διεύθυνση Α-Δ είναι το σημαντικότερο ρήγμα της περιοχής και συνδέεται άμεσα κυρίως με τον μεγάλο σεισμό της Θεσσαλονίκης (20 Ιουνίου 1978,  $M_s=6,5$ ). Επιφανειακά εμφανίζεται με μεγάλη κλίση προς τον Βορρά και εντοπίζεται σαν το μορφολογικό όριο μεταξύ του υποβάθρου και των ιζημάτων της Μυγδονίας λεκάνης (νεογενή και τεταρτογενή), με μορφή αναβαθμίδων που αναπτύσσονται κατά θέσεις στα νέα ιζήματα. Παρουσιάζεται με δύο παράλληλους ή υπο-παράλληλους κλάδους, οι οποίοι δημιουργούν εντυπωσιακά τεκτονικά πρηνή, τόσο στο υπόβαθρο όσο και στα ιζήματα Πλειοκαίνου - Πλειστοκαίνου. Τα ίχνη αυτά στα πρηνή είναι ιδιαίτερα ορατά σε αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες.

β) Ενεργό ρήγμα Αγίου Βασιλείου. Το ρήγμα αυτό με διεύθυνση Α-Δ, αν και αποτελεί τη συνέχεια της προηγούμενης ρηξιγενούς γραμμής του βυθίσματος της Μυγδονίας λεκάνης προς τα δυτικά, εντούτοις δεν υπάρχουν στοιχεία για συγκεκριμένη σεισμική δράση. Εντοπίζεται σαν το μορφολογικό όριο μεταξύ του υποβάθρου και των ιζημάτων της Μυγδονίας λεκάνης (Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα) και διαπιστώνεται σε ορισμένες θέσεις από την παρουσία τεκτονικών αναβαθμίδων. Είναι και αυτό εξίσου ορατό σε αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες.

γ) Σεισμικό ρήγμα μεταξύ των λιμνών Βόλβης-Λαγκαδά. Αυτό αποτελεί κλάδο του συστήματος των σεισμικών ρηγμάτων που έδωσαν επιφανειακά ίχνη διαρρήξεων, διεύθυνσης  $115^\circ$  και κλίσης στην επιφάνεια  $73^\circ$  προς ΒΒΑ, κατά το σεισμό της 20<sup>ης</sup> Ιουνίου 1978 ( $M_s=6,5$ ). Δεν έχει έντονη επιφανειακή εκδήλωση, αφού αναπτύσσεται μέσα στα Τεταρτογενή ιζήματα.

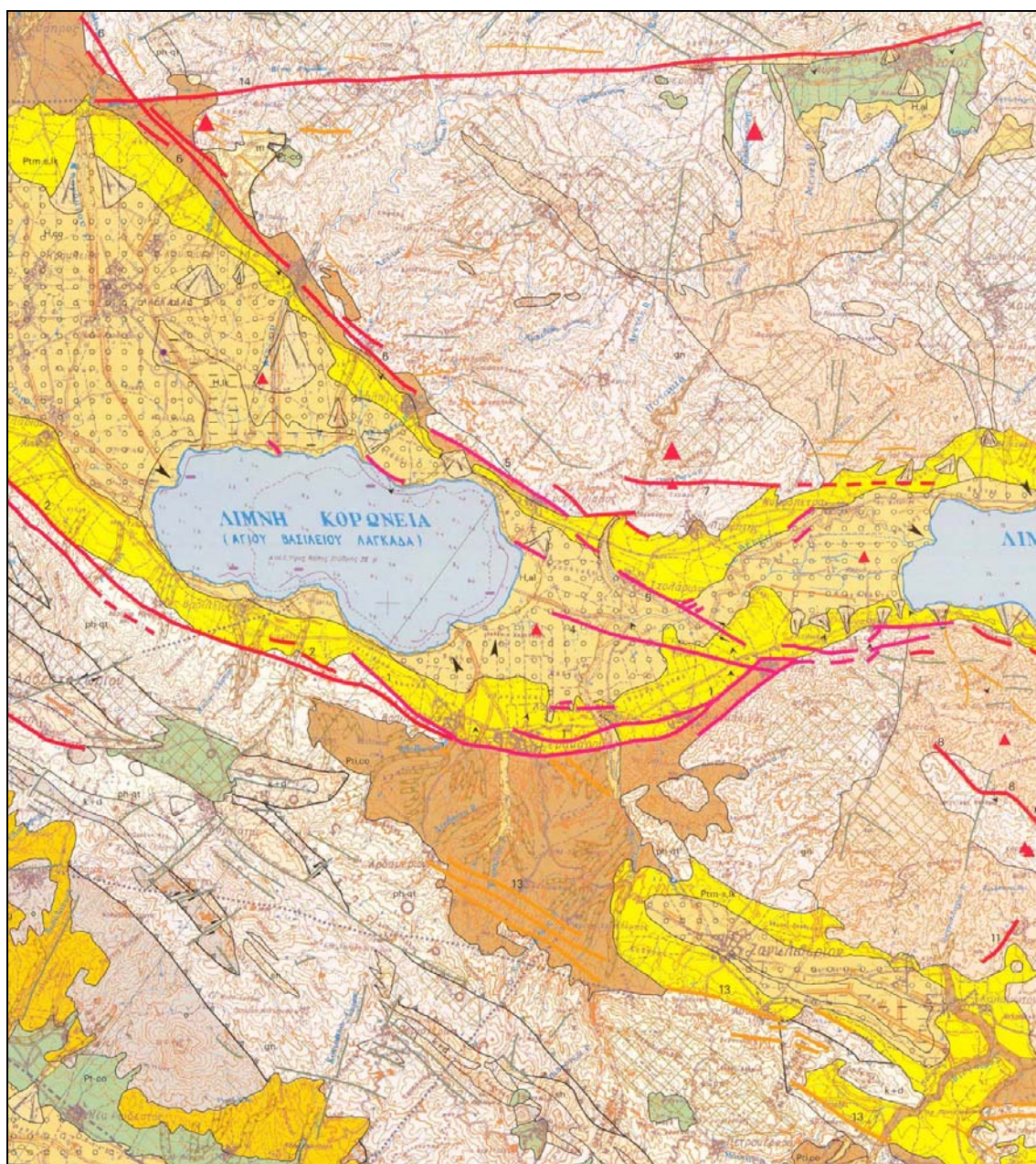
δ) Σεισμικό ρήγμα Σχολαρίου. Αυτό παρουσιάζεται στο ύπαιθρο ως γεωμορφολογική αναβαθμίδα κατά μήκος της λεκάνης Λαγκαδά και πρόκειται για ρήγμα πλάγιο-κανονικό, γενικής διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ, με μετάπτωση προς τα ΝΔ και σημαντική αριστερόστροφη συνιστώσα.

ε) Ενεργό ρήγμα βόρειας πλευράς βυθίσματος Λαγκαδά (Ασσήρου-Ανάληψης). Το ρήγμα αυτό οριοθετεί το βύθισμα του Λαγκαδά στο ΒΑ του τμήμα (ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση) και αποτελεί ουσιαστικά την προς τα ΒΔ συνέχεια του σεισμικού ρήγματος Σχολαρίου. Στο ύπαιθρο η ρηξιγενής του επιφάνεια μπορεί να παρατηρηθεί μόνο σε ορισμένες θέσεις, καθώς εξαιτίας της διάβρωσης αναπτύσσεται ομαλό μορφοανάγλυφο (πρηνή με μικρή σχετικά κλίση). Για το λόγο αυτό δεν είναι ιδιαίτερα ορατό στις αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες.

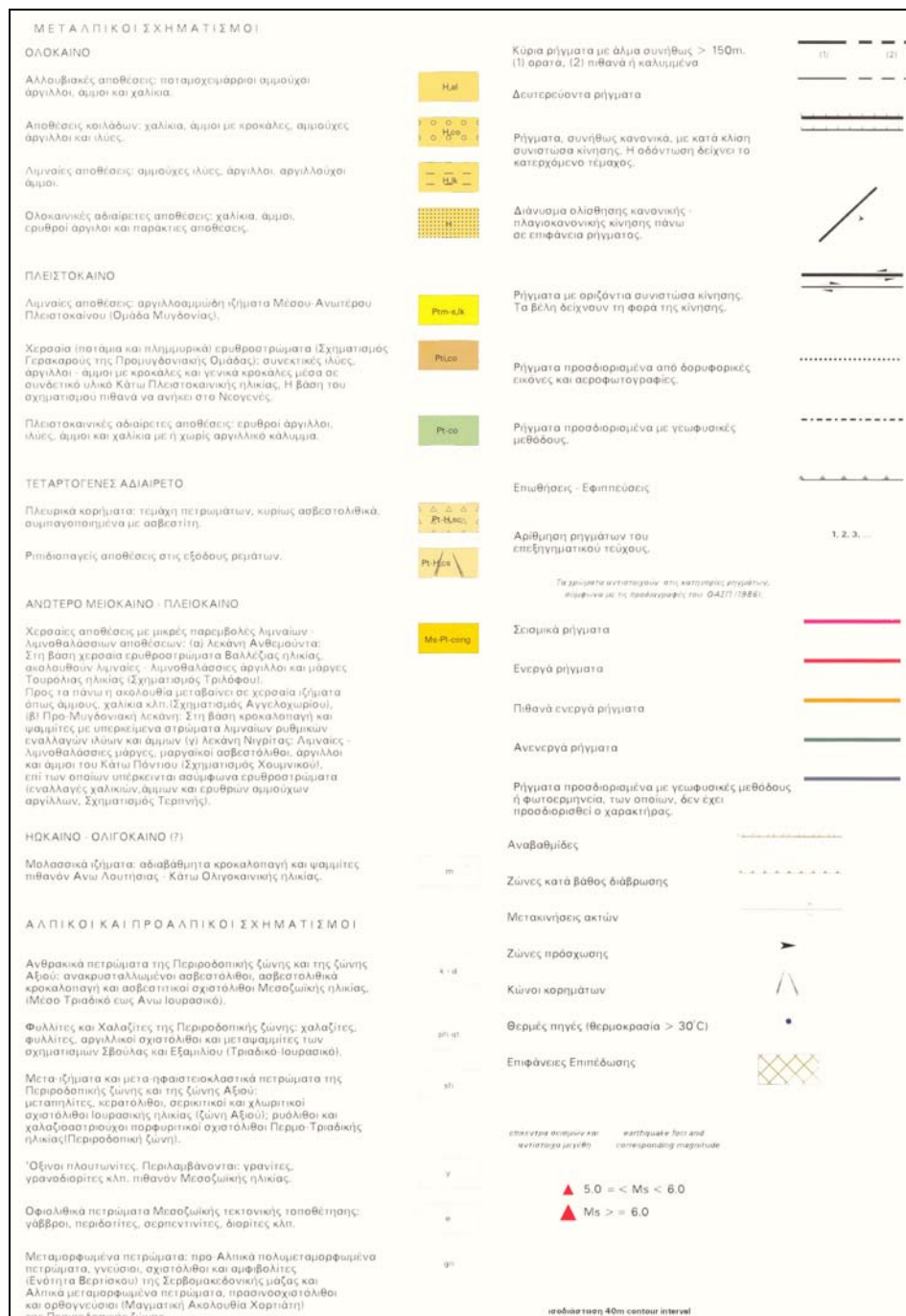
στ) Ενεργό ρήγμα Ασβεστοχωρίου. Το ρήγμα αυτό είναι εμφανές κυρίως από τη μορφολογία του, καθώς τοποθετείται κατά μήκος της κοιλάδας του Ασβεστοχωρίου με διεύθυνση ΒΑ-ΝΑ ( $120^\circ$ ).

Όλα τα παραπάνω ρήγματα καθώς επίσης και τα υπόλοιπα μικρότερα ρήγματα διαφόρων διευθύνσεων, τα οποία παρουσιάζονται στον νεοτεκτονικό χάρτη (Εικ. 3), αποτέλεσαν τα τεκτονικά δεδομένα πάνω στα οποία στηρίχθηκε μέρος της παρούσας εργασίας.





Εικόνα 3. Νεοτεκτονικός χάρτης κλίμακας 1:100.000 (φύλλο: Λαγκαδάς) της ευρύτερης περιοχής μελέτης (ΟΑΣΠ, 1996). (βλ. & επόμενες σελίδες).



Εικόνα 4. Υπόμνημα του νεοτεκτονικού χάρτη (βλ. προηγ. σελίδα).

### 3.5. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΒΛΑΣΤΗΣΗ

Το κλίμα της Μακεδονίας, στην οποία ανήκει η περιοχή μελέτης, κατατάσσεται στον Csa κλιματικό τύπο κατά Koerppen, δηλαδή μεσογειακό κλίμα με ήπιους χειμώνες και ξηρό θερμό καλοκαίρι, εκτός από μερικές απομακρυσμένες από τις ακτές ορεινές περιοχές, οι οποίες κατατάσσονται στο Cfa κλιματικό τύπο (μεταβατικός τύπος μεταξύ μεσογειακού και ηπειρωτικού κλίματος) (Μπαλαφούτης 1977, από Σουλακέλλη 1994).

Η δασοκάλυψη - φυτοκάλυψη στην περιοχή μελέτης, περιλαμβάνει χαλέπιο πεύκη, δρυ και αείφυλλα πλατύφυλλα, με εξαίρεση το κεντρικό τμήμα της το οποίο καλύπτεται από καλλιεργήσιμες εκτάσεις (Χάρτης δασών Ελλάδος, κλίμακα 1:500.000, από Σουλακέλλη 1994).

#### 4.ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εξής:

- Νεοτεκτονικός χάρτης της Μυγδονίας λεκάνης του Ο.Α.Σ.Π., κλίμακας 1:100.000, φύλλο: Λαγκαδάς
- Γεωλογικοί χάρτες 1:50.000 του Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλα: Λαχανάς, Σοχός, Θέρμη, Ζαγκλιβέρι
- Τοπογραφικοί χάρτες 1:50.000 της Γ.Υ.Σ., φύλλα: Λαχανάς, Σοχός, Θέρμη, Ζαγκλιβέρι
- Εικόνα TM του Landsat-5, ημερομηνίας λήψης 10/08/1992, με τα εξής χαρακτηριστικά:

path: 183  
row: 132  
pixels: 6920  
lines: 5760

- Εικόνα ραντάρ (ASAR) του δορυφόρου ENVISAT, χωρικής διακριτικής ικανότητας 30 m. και ημερομηνίας λήψης 29/04/2003, με τα ακόλουθα στοιχεία λήψης:

Start Orbit: 6073  
Stop Orbit: 6073  
Sensing Start: 29/04/2003 08:41:59  
Sensing Stop: 29/04/2003 08:42:15  
Polarization: V/V  
Swath: IS2 [γωνία πρόσπτωσης (incidence angle): 19.2° – 26.7°]  
Scene Centre: 40 39 00 (lat)  
Scene Centre: 23 27 00 (long)  
Number of samples: 9910  
Number of lines: 9937

Για την εικόνα ραντάρ επιλέχθηκε σχετικά μικρή γωνία πρόσπτωσης (19.2° – 26.7°), καθώς σύμφωνα με τον Prost (2001), οι περιοχές με έντονο ανάγλυφο θέτουν το επιπλέον πρόβλημα των εκτεταμένων “σκιαζόμενων” (shadowed) εκτάσεων, με αποτέλεσμα την απόκρυψη σημαντικών λεπτομερειών. Κατάλληλες είναι σε αυτήν την περίπτωση είτε εικόνες που έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια του μεσημεριού ή εικόνες ραντάρ με απότομη (μεγάλη) γωνία κλίσης ή κατάπτωσης (depression angle) και συνεπώς μικρή γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) (βλ. παράρτημα Β).

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω λογισμικά:

- Λογισμικά ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας: **Easy Pace (PCI)**, **ENVI 4.1+IDL 6.1** (αδειοδότηση αξιολόγησης / Evaluation licence) και **Erdas Imagine 8.5**

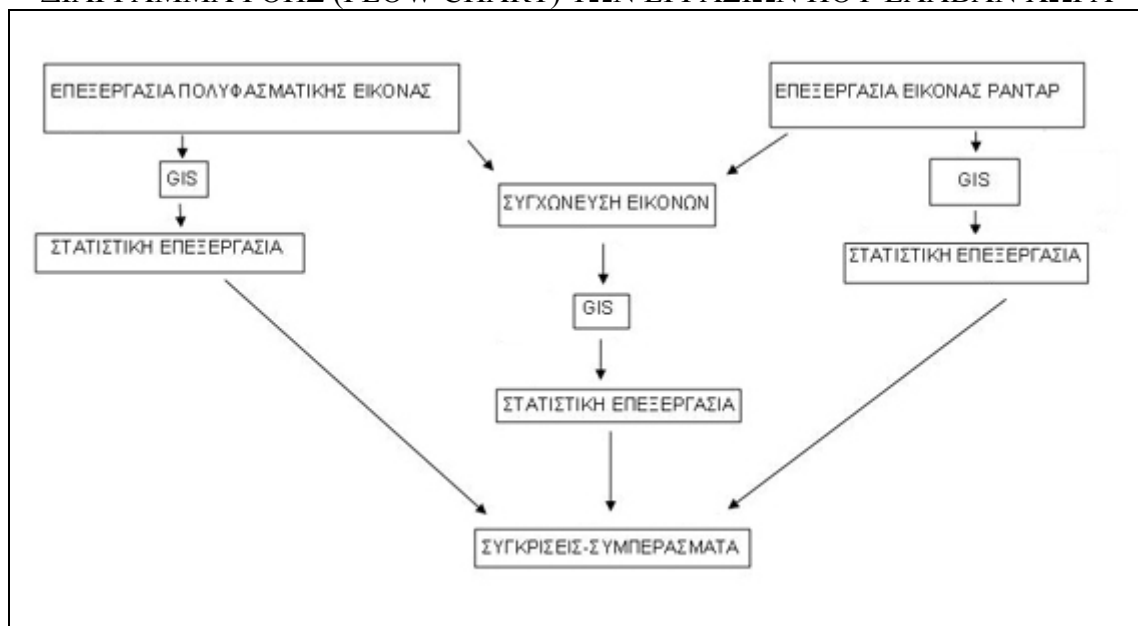


- Λογισμικά (freeware) της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency/ESA), για την επεξεργασία των δεδομένων από τον δορυφόρο ENVISAT:
  1. **EnviView v.2.3.1**: Στόχος του προγράμματος αυτού είναι να αποτελέσει το ενδιάμεσο βήμα μεταξύ των αρχικών δεδομένων του ENVISAT και των άλλων «εργαλείων» που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.
  2. **BEST [Basic ENVISAT (and ERS) SAR Toolbox] ver. 4.0.2** / Windows interface: Βασική «εργαλειοθήκη» για τα δεδομένα SAR των δορυφόρων ENVISAT και ERS
- Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (G.I.S.): **ArcGIS 9, MapInfo 6.5**

Σε αυτό το σημείο σημειώνεται, ότι το γεωδαιτικό Datum που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ήταν το **νέο Ελληνικό Datum**, το οποίο βασίζεται στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ'87) και χρησιμοποιεί το ελλειψοειδές αναφοράς GRS 80, καθώς και την Εγκάρσια Μερκατορική προβολή (Transverse Mercator projection).

Αρχικά έγινε η επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων, στα πλαίσια της οποίας έλαβαν χώρα πειραματισμοί με διάφορες τεχνικές. Ακολουθώντας, συνδυάζοντας τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών με τα επεξεργασμένα τηλεπισκοπικά δεδομένα, εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν οι γραμμώσεις που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης. Κατά το τελικό στάδιο, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από τις παραπάνω διαδικασίες από την οποία προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά τις διευθύνσεις των γραμμώσεων που εντοπίστηκαν, τη πυκνότητα και συχνότητά τους ανά διεύθυνση και πηγή προέλευσης (νεοτεκτονικός χάρτης, πολυφασματική εικόνα, εικόνα ραντάρ) και έγιναν οι επιμέρους συγκρίσεις. Τα παραπάνω παρουσιάζονται συνοπτικά στο διάγραμμα ροής (flow chart) που ακολουθεί:

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ (FLOW CHART) ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΟΥ ΕΛΑΒΑΝ ΧΩΡΑ



## 5. ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σύμφωνα με τους Mostafa and Zakir (1996), η ποιότητα της χαρτογράφησης γραμμώσεων εξαρτάται κυρίως από την εφαρμοζόμενη τεχνική ανάλυσης των εικόνων. Ορισμένες τεχνικές ενίσχυσης (enhancement) των εικόνων καθιστούν τις γραμμώσεις ευκολότερα αναγνωρίσιμες και επιτρέπουν τον διαχωρισμό των πραγματικών γραμμώσεων από τις ψευδείς, οι οποίες αντανakλούν κυρίως τοπογραφικά χαρακτηριστικά.

### 5.1. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ

Από τις 7 φασματικές ζώνες της εικόνας Landsat-5/TM, εξαιρέθηκε η ζώνη TM\_6 (θερμικό υπέρυθρο), εξαιτίας της μειωμένης διακριτικής ικανότητας που παρέχει [120 m έναντι των 30 m των υπολοίπων 6 φασματικών ζωνών (TM\_1, TM\_2, TM\_3, TM\_4, TM\_5 & TM\_7)].

Με τη χρήση του λογισμικού ENVI οριοθετήθηκε η περιοχή ενδιαφέροντος (**Region Of Interest/ROI**) στην εικόνα Landsat-5/TM.

#### 5.1.1. Ατμοσφαιρική διόρθωση

Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (HMA) περιλαμβάνει επιλεκτική σκέδαση, απορρόφηση και εκπομπή της τελευταίας, φαινόμενα που οδηγούν σε επιπλέον ακτινοβολία (εκτός αυτής του στόχου), η οποία καταγράφεται στον αισθητήρα, και ονομάζεται «**ακτινοβολία της ατμοσφαιρικής διαδρομής**» (**path radiance**). Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο στα μικρότερα μήκη κύματος (υπεριώδης-μπλε περιοχή του φάσματος), ενώ εξασθενεί και ενδεχομένως θεωρείται αμελητέο, στην κοντινή υπέρυθρη φασματική περιοχή. (Μερτίκας 1999, Gupta 2003).

Η ακτινοβολία της ατμοσφαιρικής διαδρομής επηρεάζει τα τηλεπισκοπικά δεδομένα με δύο τρόπους: (α) μειώνει την αντίθεση (contrast) και (β) προκαλεί το φαινόμενο της «επίδρασης γειτνίασης» (adjacency effect), κατά το οποίο, στην καταγραφόμενη για έναν στόχο ακτινοβολία, προστίθεται ενέργεια που προέρχεται από γειτονικούς στόχους. Η επίδραση γειτνίασης οδηγεί σε μειωμένη χωρική διακριτική ικανότητα και αντίθεση.

Οι μέθοδοι για την ατμοσφαιρική διόρθωση, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες (Gupta, 2003):

1. **Τεχνικές που χρησιμοποιούν ατμοσφαιρικά μοντέλα (atmospheric models).** Αυτές οι μέθοδοι δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα, όμως προϋποθέτουν μετρήσεις ατμοσφαιρικών παραμέτρων κατά τη λήψη της εικόνας, το κόστος των οποίων είναι αρκετά υψηλό.
2. **Μέθοδος «αφαίρεσης σκοτεινών αντικειμένων» (Dark object subtraction).** Συνιστά μια απλή και γρήγορη εμπειρική διαδικασία. Βασίζεται στην υπόθεση, ότι σε κάθε εικόνα υπάρχουν τουλάχιστον λίγα «σκοτεινά» εικονοστοιχεία (0% αντανάκλαση), τα οποία μπορεί να αντιστοιχούν σε βαθιές, καθαρές υδάτινες επιφάνειες, σκιές κ.λ.π. Στην ιδανική περίπτωση, οι τιμές έντασης αυτών των εικονοστοιχείων πρέπει να είναι μηδέν, εξαιτίας όμως της επίδρασης της ατμόσφαιρας καταγράφουν μη μηδενικές τιμές. Οι μικρότερες τιμές έντασης σε κάθε δίαυλο (αλλιώς «κανάλι» ή φασματική «ζώνη»/band) θεωρούνται ότι αποτελούν την ακτινοβολία της ατμοσφαιρικής διαδρομής και αφαιρούνται από όλες τις τιμές έντασης των εικονοστοιχείων του αντίστοιχου διαύλου.

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό ENVI, εφαρμόστηκε η δεύτερη μέθοδος (μέθοδος αφαίρεσης σκοτεινών αντικειμένων) στην εικόνα Landsat-5/TM, καθώς δεν υπήρχε διαθέσιμο ατμοσφαιρικό μοντέλο για την εφαρμογή της πρώτης τεχνικής.

### 5.1.2. Γεωμετρική διόρθωση/Ορθοαναγωγή

Η γεωμετρική διόρθωση (geometric correction) μιας εικόνας περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

2. Επιλογή των παραμέτρων του γεωμετρικού μοντέλου και της προβολής που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν.
3. Αναγνώριση των επίγειων σημείων ελέγχου (**Ground Control Points/GCPs**) στην εικόνα, οι συντεταγμένες των οποίων είναι γνωστές.
4. **Επαναδειγματοληψία (resampling)** της εικόνας, μετά τον γεωμετρικό μετασχηματισμό, ώστε να υπολογισθούν οι τιμές έντασης των ψηφίδων (pixels) στις νέες θέσεις, χρησιμοποιώντας κάποια μέθοδο **παρεμβολής (interpolation)**.

Οι παραπάνω διαδικασίες για την εικόνα TM πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Erdas Imagine, στο οποίο είναι διαθέσιμο το μοντέλο της τροχιάς του Landsat, ως ενιαία εφαρμογή. Συγκεκριμένα έγινε **ορθοαναγωγή (orthorectification)** της εικόνας.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, ως γεωδαιτικό Datum, επιλέχθηκε το **νέο Ελληνικό Datum**, το οποίο βασίζεται στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ'87) και χρησιμοποιεί το ελλειψοειδές αναφοράς GRS 80, καθώς και την Εγκάρσια Μερκατορική προβολή (Transverse Mercator projection).

Το ΕΓΣΑ θεωρεί ως αφετηρία το κεντρικό βάθρο του Διονύσου Αττικής (εγκαταστάσεις ΕΜΠ). Η προβολή είναι μίας ζώνης, με κεντρικό μεσημβρινό (central meridian) εκείνο του Διονύσου ( $\lambda_0 = 24^\circ$ ) και συντελεστή κλίμακας (scale factor) 0,9996. Ο κεντρικός μεσημβρινός απεικονίζεται στο επίπεδο ως άξονας των Y, ενώ ως άξονας των X λαμβάνεται ο ισημερινός. Για να μην υπάρχουν αρνητικές συντεταγμένες στον άξονα των X, θεωρείται, ότι ο κεντρικός μεσημβρινός έχει τιμή  $X_0 = 500.000$  m (false Easting = 500.000 m). Ανάλογη παραδοχή δεν απαιτείται για τον άξονα των Y (false Northing = 0 m), καθώς το σύνολο του Ελληνικού χώρου βρίσκεται βόρεια του ισημερινού, δηλαδή όλες οι τιμές των τετμημένων Y είναι θετικές (Αστάρας & Οικονομίδης, 2004).

Για την ορθοαναγωγή της εικόνας απαραίτητη είναι η ύπαρξη ενός ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (**Digital Elevation Model/DEM**). Η υψομετρική πληροφορία καθίσταται αναγκαία για την απομάκρυνση των παραμορφώσεων εξαιτίας της μετατόπισης του αναγλύφου (relief displacement), όπως αναφέρεται ενδεικτικά στη «βοήθεια» του λογισμικού Erdas (IMAGINE8.5\help\html\rectification\landsat\_model\_properties.htm). Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε υδρολογικά διορθωμένο DEM με διάσταση ψηφίδας 20 m, το οποίο δημιουργήθηκε με την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών και του υδρογραφικού δικτύου από τους τοπογραφικούς χάρτες 1:50.000 της Γ.Υ.Σ. (ισοδιάσταση 20 μέτρα) και συγκεκριμένα με την εφαρμογή του αλγορίθμου "topogridtool" του λογισμικού ArcGIS (βλ. & κεφ. 6).

Σχετικά με τα επίγεια σημεία ελέγχου, για ολόκληρη την εικόνα Landsat συνιστάται να χρησιμοποιούνται 100-120 σημεία. Ωστόσο, από μελέτες που διεξήχθησαν, σχετικά με την ακρίβεια εγγραφής της εικόνας στο χάρτη, προκύπτει, πως ένας λογικός αριθμός είναι της τάξης των 20-30 GCPs (Μερτίκας 1999, Τσακίρη-Στρατή 2004). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, επιλέχθηκαν 22 σημεία ελέγχου για το «παράθυρο» της εικόνας Landsat, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

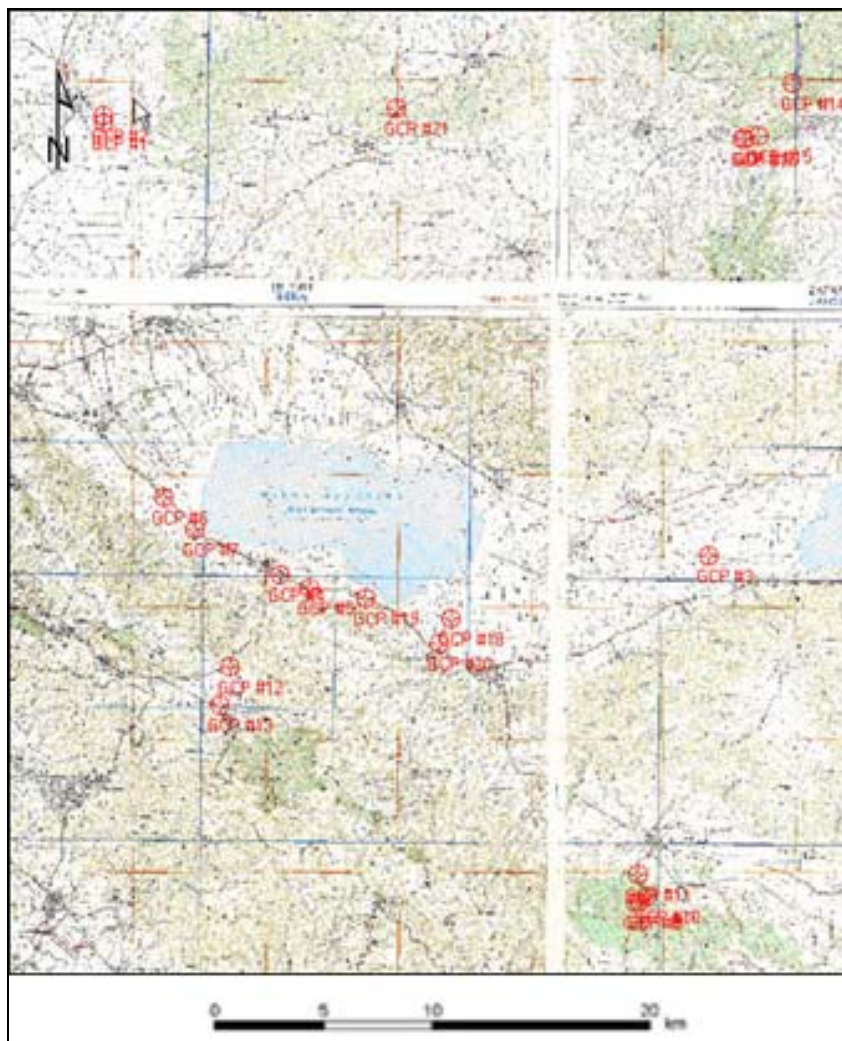
Τα επίγεια σημεία ελέγχου πρέπει να είναι καλώς κατανομημένα σε όλο το εύρος της εικόνας, να είναι σταθερά, μοναδικά και κυρίαρχα στην εικόνα. Ως τέτοια χρησιμοποιούνται παραδείγματος χάριν διασταυρώσεις οδών, σημεία απότομης αλλαγής της διεύθυνσης ποταμών, ρεμάτων ή καναλιών (Gupta, 2003). Με τα ως άνω κριτήρια επιλέχθηκαν τα σημεία ελέγχου, με

όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διασπορά. Παρακάτω παρουσιάζονται οι θέσεις των 22 σημείων ελέγχου, τόσο στην πολυφασματική εικόνα όσο και στους χάρτες 1:50.000 της Γ.Υ.Σ. (Εικ. 5 & 6).



Εικόνα 5. Τα 22 σημεία ελέγχου, τα οποία επιλέχθηκαν στην δορυφορική εικόνα Landsat-5/TM.





Εικόνα 6. Τα αντίστοιχα 22 σημεία ελέγχου στους χάρτες της Γ.Υ.Σ. κλίμακας 1:50.000.

Από τη διαδικασία της ορθοαναγωγής προέκυψε ολικό (total) μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square error/ **RMS**)  $RMS_{error} = 1,1599 \text{ pixel}$ , με  $X_{RMS_{error}} = 0,8904 \text{ pixel}$  και  $Y_{RMS_{error}} = 0,7433 \text{ pixel}$ . Οι συντεταγμένες, καθώς και τα σφάλματα αναγωγής κάθε σημείου, παρατίθενται αναλυτικά στο παράρτημα Γ.

Για την επαναδειγματοληψία της εικόνας, χρησιμοποιούνται συνήθως τρεις μέθοδοι παρεμβολής (Richards & Jia 1999, Gupta, 2003, Τσακίρη-Στρατή 2004):

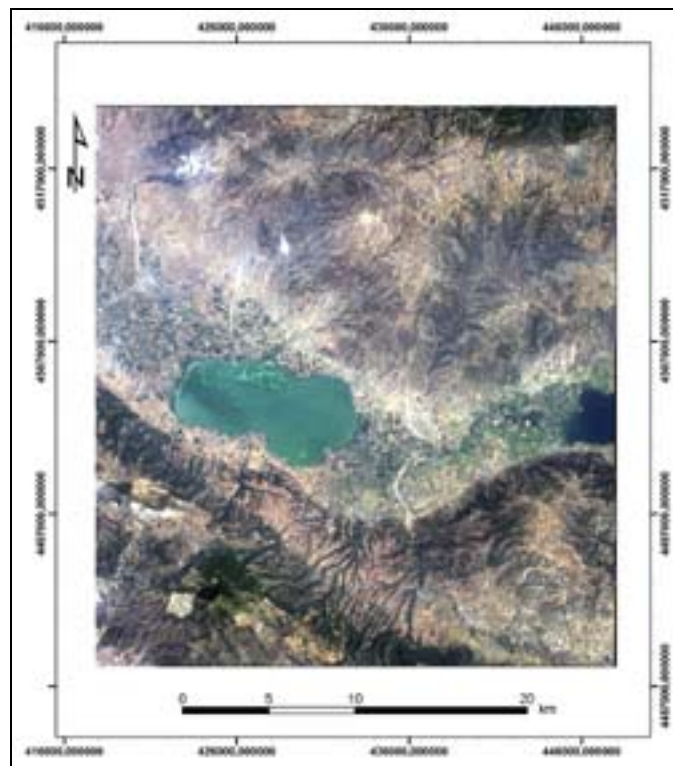
1. **Η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου (nearest neighbor).** Σε αυτήν, το κάθε σημείο στο νέο πλέγμα (grid) συντεταγμένων του χάρτη λαμβάνει την τιμή έντασης [ψηφιακό αριθμό/**Digital Number (DN)**] από το σημείο εκείνο του αρχικού πλέγματος, το οποίο βρίσκεται πιο κοντά. Η τεχνική αυτή είναι γρήγορη και χρησιμοποιείται συχνά. Ωστόσο, εξαιτίας της απότομης μετάθεσης των εικονοστοιχείων (pixels), μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση «σπασιμάτων» (breaks) ή τεχνητές γραμμώσεις στην εικόνα, καθώς η τοπική γεωμετρία υφίσταται μετάθεση έως και μισό pixel. Συνεπώς η μέθοδος αυτή παρουσιάζει δυσκολία στην εμφάνιση γραμμικών στοιχείων.



2. **Διγραμμική παρεμβολή (bilinear interpolation).** Συνιστά επέκταση στις δύο διαστάσεις της γραμμικής παρεμβολής και χρησιμοποιεί τα τέσσερα πλησιέστερα pixel, για να υπολογίσει τις νέες τιμές έντασης. Απαιτεί περισσότερο χρόνο επεξεργασίας, αλλά η εικόνα που προκύπτει έχει καλύτερη γεωμετρική ακρίβεια και επομένως η δυσκολία στην εμφάνιση των γραμμικών στοιχείων είναι μικρότερη, σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο παρεμβολής. Μπορεί επίσης να επιφέρει μικρή απώλεια διακριτικής ικανότητας λόγω ομαλοποίησης (smoothing).
3. **Δικυβική παρεμβολή (bicubic interpolation/cubic convolution interpolation).** Χρησιμοποιεί μια πολυωνυμική επιφάνεια (συνάρτηση), για να μοντελοποιήσει την εικόνα τοπικά και να προσδιορίσει τις νέες τιμές έντασης των εικονοστοιχείων. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται υπόψη οι τιμές έντασης των δεκαέξι πλησιέστερων pixel. Η εφαρμογή της δικυβικής παρεμβολής παρέχει εικόνα με αρκετά καλές λεπτομέρειες, διότι η υποβάθμιση της διακριτικής ικανότητας που προκαλείται είναι μικρότερη, σε σύγκριση με τις άλλες δύο μεθόδους (Richards & Jia 1999, Τσακίρη-Στρατή 2004). Ωστόσο, η εικόνα ομαλοποιείται αρκετά, με αποτέλεσμα τοπικά φαινόμενα, όπως διαφορές υψηλής χωρικής συχνότητας, ενδεχομένως να υποβαθμίζονται (Gupta, 2003).

Η εφαρμογή συνάρτησης παρεμβολής μεγαλύτερης τάξης, παρότι βελτιώνει την οπτική εμφάνιση της εικόνας, αφαιρεί πληροφορίες που είναι χρήσιμες σε τεχνικές ταξινόμησης (classification) (Τσακίρη-Στρατή 2004).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, επιλέχθηκε η μέθοδος της δικυβικής παρεμβολής, για την επαναδειγματοληψία της εικόνας TM, κατά τη διαδικασία της γεωμετρικής διόρθωσης. Η εικόνα, η οποία που προέκυψε μετά την ορθοαναγωγή, παρουσιάζεται παρακάτω (Εικ. 7).

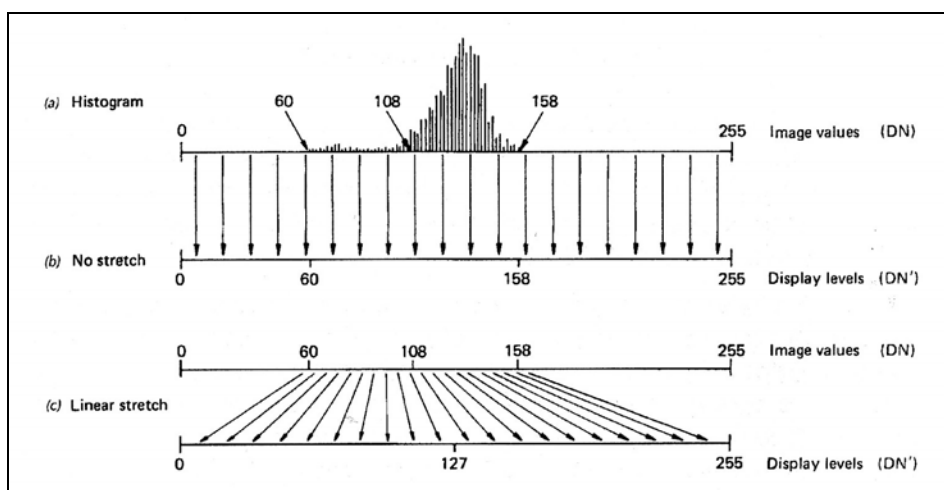


Εικόνα 7. Εικόνα Landsat-5/TM, μετά από ορθοαναγωγή.

### 5.1.3.Βελτιώσεις και μετασχηματισμοί της εικόνας

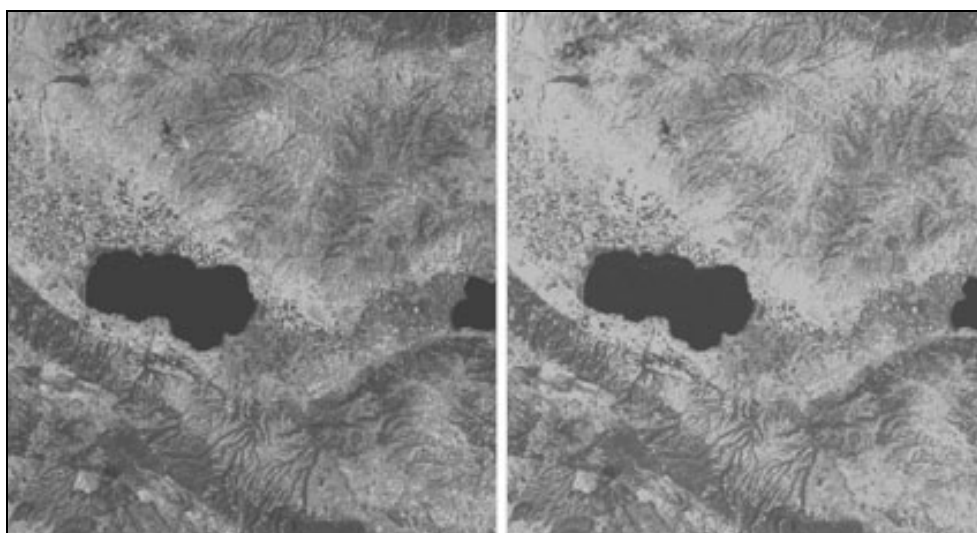
#### Γραμμική έκταση του ιστογράμματος (linear histogram stretching)

Η γραμμική έκταση είναι μια απλή μέθοδος οπτικής βελτίωσης της αντίθεσης μιας εικόνας. Τα τηλεπισκοπικά συστήματα είναι σχεδιασμένα με τέτοιον τρόπο, ώστε να παρέχουν εικόνες, των οποίων οι τιμές έντασης καλύπτουν μεγάλο εύρος (π.χ. 0-255 στις εικόνες Landsat-5/TM). Πολλές φορές ωστόσο, η έκταση του ιστογράμματος, δηλαδή της γραφική παράστασης του πλήθους των εικονοστοιχείων συναρτήσει των τιμών έντασής τους, είναι μικρή, με αποτέλεσμα η αντίστοιχη εικόνα να είναι χαμηλών τονικών διαφορών. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται στο ιστόγραμμα ένας γραμμικός μετασχηματισμός έκτασης, ο οποίος αυξάνει το εύρος των τιμών έντασης και συνεπώς βελτιώνει την αντίθεση της εικόνας (Εικ. 8).



Εικόνα 8. Αρχή της γραμμικής έκτασης του ιστογράμματος ψηφιακής εικόνας (Lillesand and Kiefer, 1994).

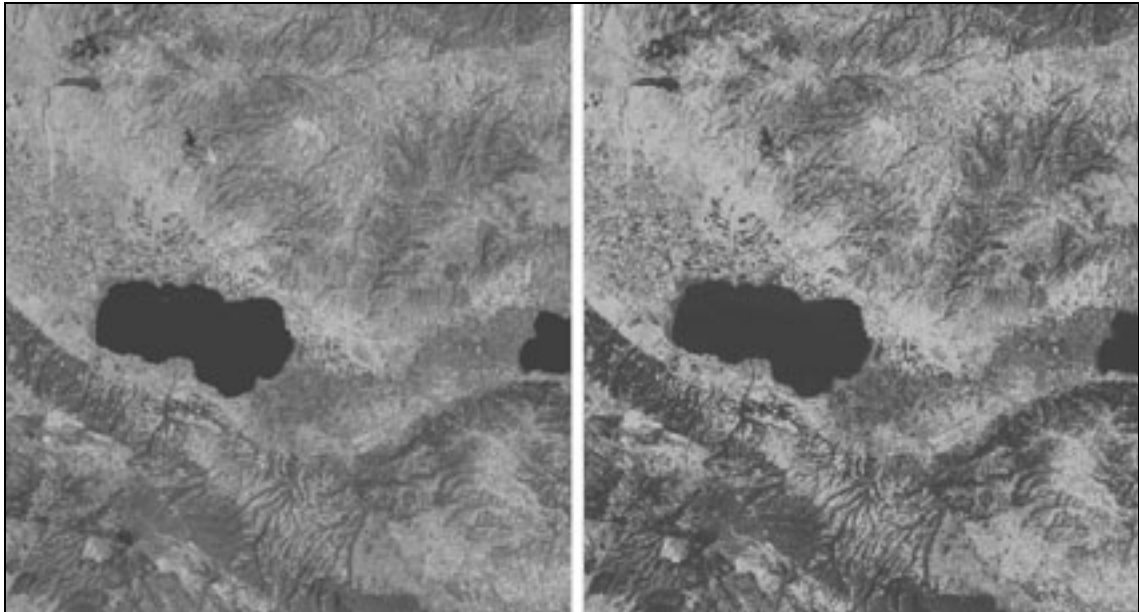
Η εφαρμογή της γραμμικής έκτασης, με το λογισμικό Erdas, στην εικόνα Landsat, χρησιμοποιήθηκε επιλεκτικά σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες τεχνικές, δίνοντας στις περισσότερες περιπτώσεις βελτιωμένες εικόνες. Ένα παράδειγμα παρατίθεται στην εικόνα 9.



Εικόνα 9. Παράδειγμα εφαρμογής της γραμμικής έκτασης του ιστογράμματος (linear histogram stretching). Παρουσιάζεται η φασματική ζώνη TM-7 πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την έκταση. Η διαφορά στην αντίθεση που δημιουργείται στη δεύτερη εικόνα διευκολύνει την ερμηνεία της.

**Εξισορρόπηση του ιστογράμματος (histogram equalization)**

Η εξισορρόπηση του ιστογράμματος συνιστά μια διαδικασία μη γραμμικού μετασχηματισμού, η οποία ανακατανέμει τις τιμές των εικονοστοιχείων, έτσι ώστε προσεγγιστικά σε κάθε τιμή να αντιστοιχεί το ίδιο πλήθος ψηφίδων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε με το λογισμικό Erdas, στην εικόνα Landsat, κατά περίπτωση και σε συνάρτηση με άλλες τεχνικές. Ένα παράδειγμα της επίδρασης που έχει στην εικόνα η εξισορρόπηση του ιστογράμματος φαίνεται στην εικόνα 10.



**Εικόνα 10.** Παράδειγμα εφαρμογής της εξισορρόπηση του ιστογράμματος (histogram equalization). Παρουσιάζεται η φασματική ζώνη TM-5 πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή της εν λόγω τεχνικής.

**Προσαρμογή του ιστογράμματος σε μαθηματική αναφορά**

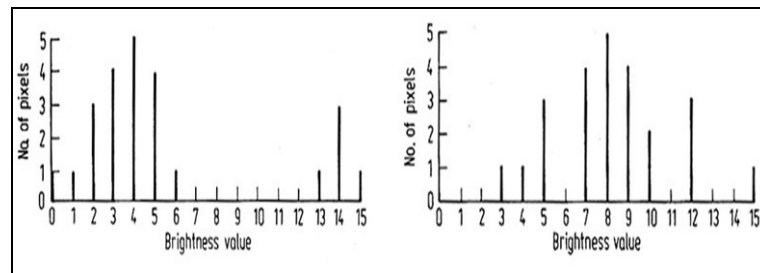
Σε ορισμένες εφαρμογές απαιτείται να προεπιλεχθεί ένα επιθυμητό σχήμα του ιστογράμματος της εικόνας, ώστε οι τιμές έντασης της εικόνας που θα προκύψει να ακολουθούν συγκεκριμένη κατανομή. Ως αναφορά επιλέγεται μία μαθηματική συνάρτηση, η οποία περιγράφει το επιθυμητό σχήμα.

Ιδιαίτερο παράδειγμα αποτελεί το ιστόγραμμα του Gauss (Gaussian) ή κανονικό (normal) ιστόγραμμα (Εικ. 11), το οποίο είναι και το πιο διαδεδομένο στη φύση. Ο μετασχηματισμός του αρχικού ιστογράμματος σε κανονικό γίνεται με τη βοήθεια της συνάρτησης πυκνότητας της κανονικής κατανομής, η οποία είναι η εξής (Τσακίρη-Στρατή, 2004):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

όπου:

- σ: η τυπική απόκλιση του αρχικού ιστογράμματος
- x: οι τιμές έντασης του ιστογράμματος
- μ: η μέση τιμή των τιμών έντασης



Εικόνα 11. Παράδειγμα προσαρμογής ιστογράμματος σε ιστόγραμμα Gauss. Αριστερά παρουσιάζεται το αρχικό ιστόγραμμα και δεξιά το ιστόγραμμα μετά την προσαρμογή.

Η προσαρμογή αυτή του ιστογράμματος, η οποία αναφέρεται και ως «έκταση Gauss» (Gaussian stretch) (Gupta, 2003), επιφέρει μείωση των μαύρων (σκοτεινών) και των λευκών (φωτεινών) περιοχών της εικόνας, με αποτέλεσμα η περισσότερη πληροφορία να περιέχεται στους ενδιάμεσους (γκρίζους) τόνους (Richards & Jia 1999, Gupta, 2003, Τσακίρη-Στρατή 2004).

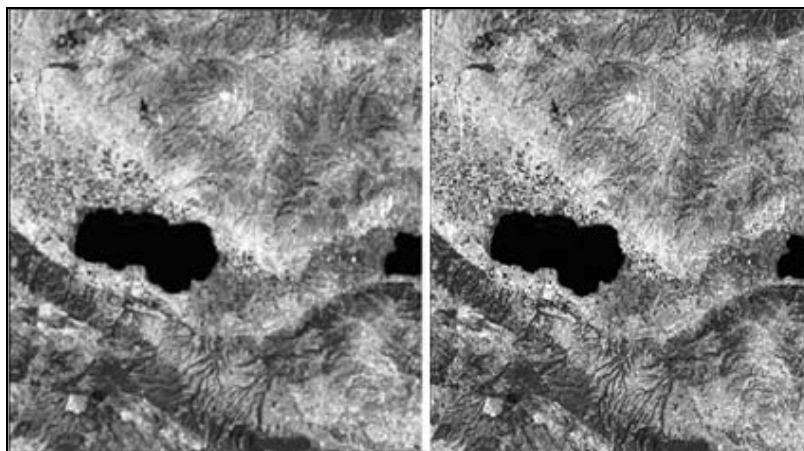
Από την εφαρμογή της έκτασης Gauss στην εικόνα Landsat με το λογισμικό Erdas δεν προέκυψαν βελτιωμένες εικόνες για τον εντοπισμό γραμμώσεων.

### **Ενίσχυση των ακμών (edge enhancement)**

Σε μια δορυφορική εικόνα, η σημαντική πληροφορία για τη διάκριση γειτονικών αντικειμένων περιέχεται στις ακμές (edges), οι οποίες αντιστοιχούν σε διακυμάνσεις υψηλής συχνότητας. Συνιστούν ουσιαστικά το όριο μεταξύ δύο διαφορετικών ομογενών περιοχών ή το σημείο της απότομης αλλαγής της τιμής έντασης από ένα εικονοστοιχείο (pixel) σε ένα άλλο. Για την ανάδειξη αυτών των στοιχείων χρησιμοποιούνται τεχνικές ενίσχυσης των ακμών (edge enhancement techniques), οι οποίες ονομάζονται και «φίλτρα υψηλής διέλευσης» (high-pass filters), δηλαδή φίλτρα που επιτρέπουν τη διέλευση συχνοτήτων μεγαλύτερων από ορισμένη τιμή, ή διαφορετικά τεχνικές ενίσχυσης της υφής (textural enhancement techniques).

Μία από τις κύριες χρήσεις των τεχνικών ενίσχυσης των ακμών της ψηφιακής εικόνας είναι η αναγνώριση και ανάλυση γεωλογικών (π.χ. ρήγματα, γραμμώσεις, διακλάσεις κ.α.) και άλλων γραμμικών στοιχείων, όπως για παράδειγμα δρόμοι, κανάλια, ποταμοί, όρια κτημάτων κ.α. (Gupta 2003, Τσακίρη-Στρατή 2004).

Η τεχνική της ενίσχυσης των ακμών εφαρμόστηκε στην εικόνα Landsat με το λογισμικό Erdas, δίνοντας σαφώς βελτιωμένες εικόνες, κατάλληλες για την ανίχνευση γραμμώσεων, ιδιαίτερα στις φασματικές ζώνες TM-5 και TM-7 (Εικ. 12).



Εικόνα 12. Η φασματική ζώνη TM-7, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή ενίσχυσης των ακμών.

### **Ομαλοποίηση (εξομάλυνση) της εικόνας (image smoothing)**

Ο κύριος στόχος κατά την ομαλοποίηση (Τσακίρη-Στρατή, 2004) (ή αλλιώς «εξομάλυνση», Μερτίκας, 1999) μιας εικόνας είναι η ενίσχυση της χωρικής πληροφορίας χαμηλών συχνοτήτων (low-frequency spatial information) και η μείωση του θορύβου. Από τον ορισμό αυτό προκύπτει, ότι το αποτέλεσμα της ομαλοποίησης μιας εικόνας είναι ακριβώς το αντίστροφο από αυτό της ενίσχυσης των ακμών, που εξετάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Καθώς η τεχνική αυτή «ομαλοποιεί» (εξομαλύνει) τοπικές διαφορές, καθίσταται κατάλληλη στη μελέτη δομών που εκτείνονται σε μεγάλες γεωλογικές ενότητες (Gupta, 2003). Ορισμένα τυπικά φίλτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση της εικόνας είναι τα φίλτρα μετακινούμενων μέσων τιμών και φίλτρα διαμέσου τιμής (Μερτίκας, 1999, Τσακίρη-Στρατή, 2004).

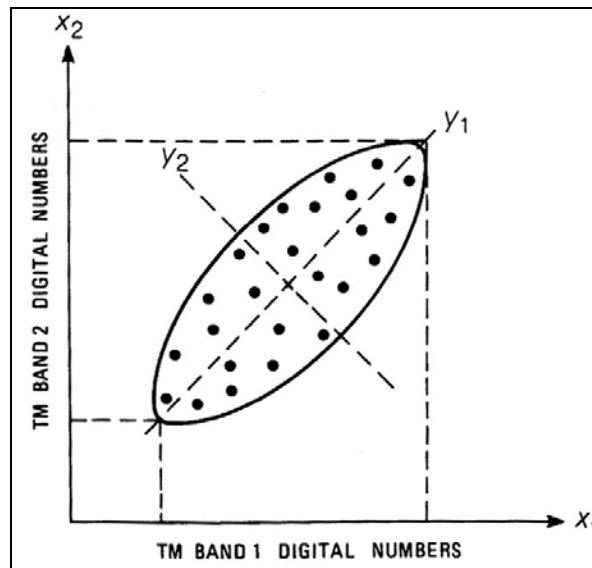
Εφαρμόζοντας με το λογισμικό ENVI την τεχνική της ομαλοποίησης προέκυψε, θολή εικόνα. Η θόλωση αυτή της εικόνας (αποτέλεσμα της ομαλοποίησης) ήταν αποτρεπτική για την βέλτιστη ανίχνευση γραμμώσεων. Συνεπώς, η τεχνική αυτή δεν ενδείκνυται στην παρούσα έρευνα, πράγμα που συνάδει με το γεγονός, ότι ομαλοποίηση και ενίσχυση των ακμών παράγουν αντίστροφα αποτελέσματα (άρα εφόσον η ενίσχυση των ακμών δίνει βελτιωμένες εικόνες, είναι αναμενόμενο η ομαλοποίηση να δίνει υποβαθμισμένες εικόνες, για τη συγκεκριμένη πάντα εφαρμογή).

### **Αντιστροφή της εικόνας (image inversion)**

Οι συναρτήσεις αντιστροφής της εικόνας δίδουν εικόνες, οι οποίες έχουν την αντίστροφη αντίθεση με τις αρχικές. Αυτό σημαίνει, πως οι σκοτεινές περιοχές γίνονται φωτεινές και αντίστροφα, οπότε το αποτέλεσμα μοιάζει με «φωτογραφικό αρνητικό» της αρχικής εικόνας (IMAGINE 8.5\help\html\viewer\_raster\_tools\contrast\_adjustment.htm). Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής, τόσο σε επίπεδο μιας φασματικής ζώνης όσο και σε συνδυασμούς φασματικών ζωνών, δεν έδωσε αποτελέσματα άξια αναφοράς.

### **Ανάλυση κυρίων συνιστωσών (Principal Component Analysis)**

Συχνά, συγκρίνοντας τις διάφορες φασματικές ζώνες μιας πολυφασματικής εικόνας, όπως στην προκειμένη περίπτωση της εικόνας Landsat-5/TM, παρατηρούμε πως παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα. Έτσι, περιοχές οι οποίες είναι φωτεινές ή σκοτεινές σε μια φασματική ζώνη, τείνουν να είναι φωτεινές ή σκοτεινές και σε άλλες φασματικές ζώνες του ίδιου σαρωτή. Η σχέση αυτή φαίνεται στο διάγραμμα διασποράς των ψηφίδων στο χώρο των φασματικών ζωνών (Εικ. 13), για παράδειγμα τοποθετώντας τους ψηφιακούς αριθμούς (τιμές έντασης) της φασματικής ζώνης 1 του θεματικού χαρτογράφου (TM-1) στο ίδιο σύστημα αξόνων με τους ψηφιακούς αριθμούς της φασματικής ζώνης 2 (TM-2) του ίδιου σαρωτή (Εικ. 13), παρατηρούμε, ότι καθώς οι ψηφιακοί αριθμοί αυξάνουν για τη μια φασματική ζώνη, αυξάνουν και για την άλλη. Έτσι, αν γνωρίζουμε τον ψηφιακό αριθμό ενός εικονοστοιχείου στη φασματική ζώνη 1, τότε μπορούμε να προβλέψουμε προσεγγιστικά την τιμή του φασματικού αριθμού που θα έχει το ίδιο εικονοστοιχείο στη φασματική ζώνη 2.



Εικόνα 13. Γραφική αναπαράσταση της διασποράς των ψηφιδών στο χώρο των φασματικών ζωνών 1 και 2, μιας πολυφασματικής εικόνας Landsat-5/TM (Swain and Davis 1978, από Sabins 1997).

Σε αυτήν την περίπτωση λέμε, ότι τα παραπάνω δεδομένα παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση (correlation) μεταξύ τους, κάτι το οποίο σημαίνει πως υπάρχουν πολλές περιττές πληροφορίες στην ομάδα των πολυφασματικών δεδομένων (multispectral data sets). Αν αυτές οι περιττές πληροφορίες μειωθούν, τότε το πλήθος των δεδομένων που απαιτείται για να περιγραφεί μια πολυφασματική εικόνα μπορεί να συμπιεστεί (compressed) (Sabins, 1987).

Η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (Principal Component Analysis/PCA), ή αλλιώς μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών (Principal Component Transformation/PCT), αρχικά γνωστός και ως μετασχηματισμός Karhunen – Loeve (Loeve 1955, από Sabins 1997), χρησιμοποιείται για να συμπίσει σειρές πολυφασματικών δεδομένων υπολογίζοντας ένα νέο σύστημα συντεταγμένων. Για δεδομένα που ανήκουν σε δυο φασματικές ζώνες (π.χ. Εικ. 13) ο μετασχηματισμός καθορίζει έναν νέο άξονα ( $y_1$ ) προσανατολισμένο προς την μεγαλύτερη διάσταση της κατανομής και έναν δεύτερο άξονα ( $y_2$ ), κάθετο προς τον  $y_1$ . Χρησιμοποιώντας έναν γραμμικό συνδυασμό, μεταξύ των τιμών έντασης των εικονοστοιχείων στο αρχικό σύστημα συντεταγμένων, προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές στο νέο σύστημα συντεταγμένων, ως εξής (Sabins, 1987):

$$y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2$$

$$y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2$$

όπου

( $x_1, x_2$ ): οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων στο αρχικό σύστημα

( $y_1, y_2$ ): οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων στο νέο σύστημα

$a_{11}, a_{12}, a_{22}$ : σταθερές

Ο ίδιος μετασχηματισμός κυρίων συνιστωσών μπορεί να διεξαχθεί για ομάδες πολυφασματικών δεδομένων, οι οποίες αποτελούνται από οποιοδήποτε αριθμό φασματικών ζωνών. Επιπρόσθετες διευθύνσεις συντεταγμένων (coordinate directions) καθορίζονται διαδοχικά.



Κάθε καινούργια συντεταγμένη προσανατολίζεται κάθετα σε όλες τις προηγούμενα καθορισμένες διευθύνσεις και κατά τη διεύθυνση των σημείων των δεδομένων των εικονοστοιχείων (pixel data points) που έχουν παραμείνει και έχουν τη μέγιστη πυκνότητα. Για κάθε εικονοστοιχείο, νέοι ψηφιακοί αριθμοί καθορίζονται, για κάθε έναν από τους νέους άξονες συντεταγμένων. Έτσι, ένα σύνολο τιμών ψηφιακών αριθμών υπολογίζεται για κάθε εικονοστοιχείο, σε σχέση με την πρώτη κύρια συνιστώσα. Αυτοί οι ψηφιακοί αριθμοί χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη δημιουργία της εικόνας της πρώτης κύριας συνιστώσας (PC-1). Η ίδια διαδικασία ακολουθείται, έτσι ώστε να παραχθούν εικόνες για τις υπόλοιπες κύριες συνιστώσες (Sabins, 1987).

Σύμφωνα με τον Sabins (1987), η ανάλυση κυρίων συνιστωσών παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Το μεγαλύτερο μέρος της μεταβλητότητας (variance), άρα και της πληροφορίας, σε μια σειρά πολυφασματικών δεδομένων «συμπιέζεται» στις πρώτες δύο εικόνες κυρίων συνιστωσών
- Ο θόρυβος γενικά μεταφέρεται στις λιγότερο συσχετισμένες εικόνες κυρίων συνιστωσών
- Οι φασματικές διαφορές μεταξύ των υλικών, είναι πιθανώς πιο προφανείς στις εικόνες κυρίων συνιστωσών, παρά στις μεμονωμένες φασματικές ζώνες

Η εφαρμογή της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών (με έξι κύριες συνιστώσες) στην εικόνα Landsat, έδωσε βελτιωμένες εικόνες, που χρησιμοποιήθηκαν στην ανίχνευση όσο το δυνατόν περισσότερων γραμμώσεων. Ιδιαίτερα, χρησιμοποιήθηκαν οι εικόνες PC-1 (Εικ. 14), PC-2 και PC-3, δηλαδή οι τρεις πρώτες κύριες συνιστώσες, οι οποίες και περιέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό της πληροφορίας. Συγκεκριμένα, οι πρώτες τρεις εικόνες κυρίων συνιστωσών (PC-1, PC-2 και PC-3) περιέχουν, στις περισσότερες περιπτώσεις, περισσότερο από το 99% της μεταβλητότητας (πληροφορίας) των αρχικών έξι φασματικών ζωνών του TM, ενώ οι υπόλοιπες τρεις εικόνες (PC-4, PC-5 και PC-6) αντιστοιχούν σε λιγότερο από το 1% της αρχικής μεταβλητότητας (Lillesand and Kiefer 1994, Sabins 1997). Η επεξεργασία έγινε με το λογισμικό Erdas.



Εικόνα 14.Εικόνα που προέκυψε από την Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών και συγκεκριμένα από την πρώτη συνιστώσα (PC-1).

Επίσης, οι εικόνες κυρίων συνιστωσών χρησιμοποιήθηκαν και σε ψευδοχρωματικούς συνδυασμούς, τόσο μεταξύ τους, όσο και μαζί με τις αρχικές φασματικές ζώνες της εικόνας Landsat, με ικανοποιητικά αποτελέσματα (βλ. επόμε. παρ.).

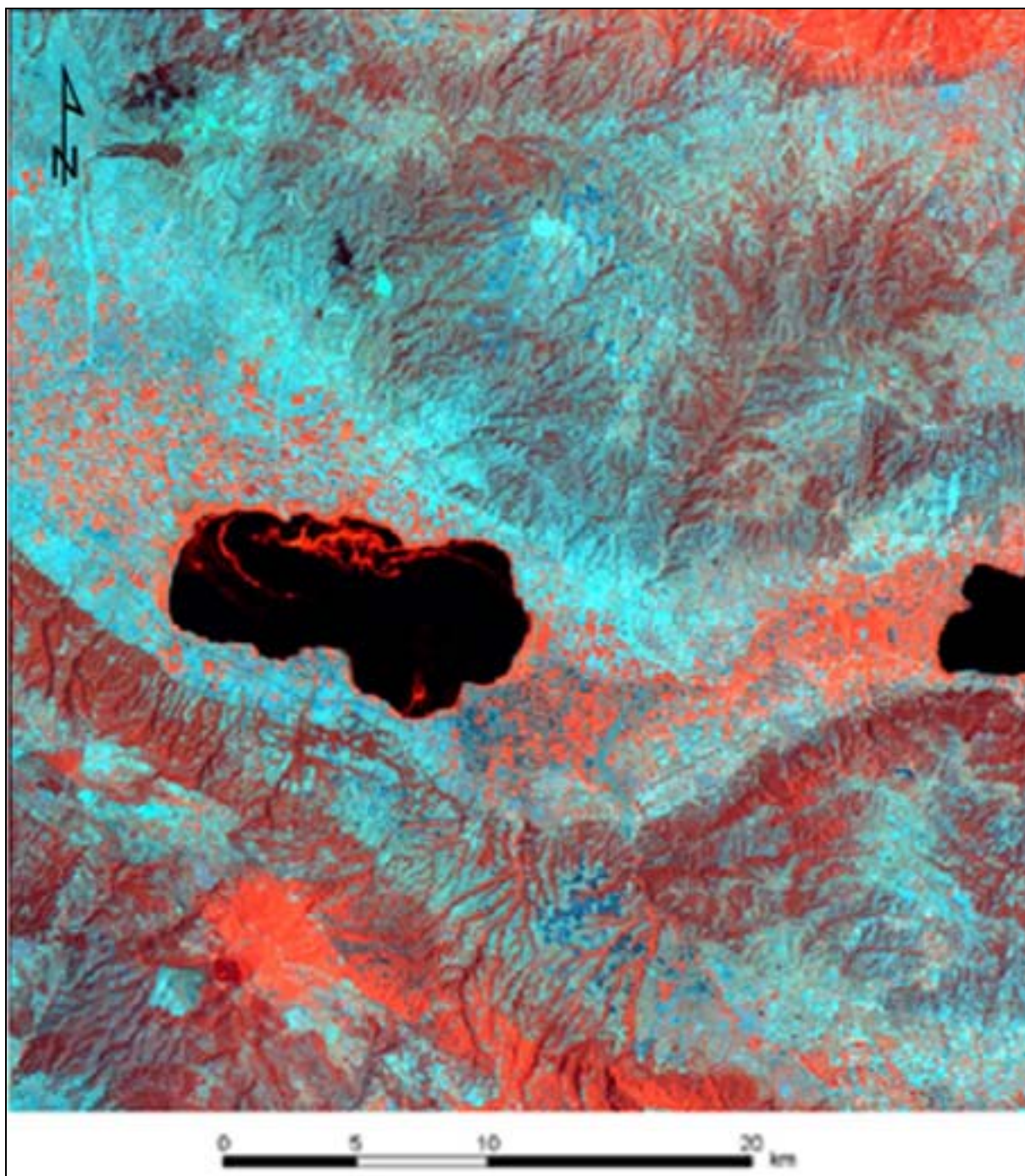
#### **Δημιουργία ψευδοχρωματικών εικόνων**

Όπως είναι γνωστό, ψευδοχρωματικές εικόνες (false color images) είναι οι εικόνες εκείνες, στις οποίες τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής δεν απεικονίζονται με τα πραγματικά τους χρώματα. Στις εικόνες αυτές οι διάφορες φασματικές ζώνες απεικονίζονται ανά τρεις (σύνθεση τριών μονοχρωματικών φασματικών ζωνών), στην κόκκινη, πράσινη και μπλε χρωματική έξοδο. (Οικονομίδης, 2000).

Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκαν ψευδοχρωματικές εικόνες, χρησιμοποιώντας τις αρχικές φασματικές ζώνες της εικόνας Landsat, αλλά και τις εικόνες που προέκυψαν από την Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών.

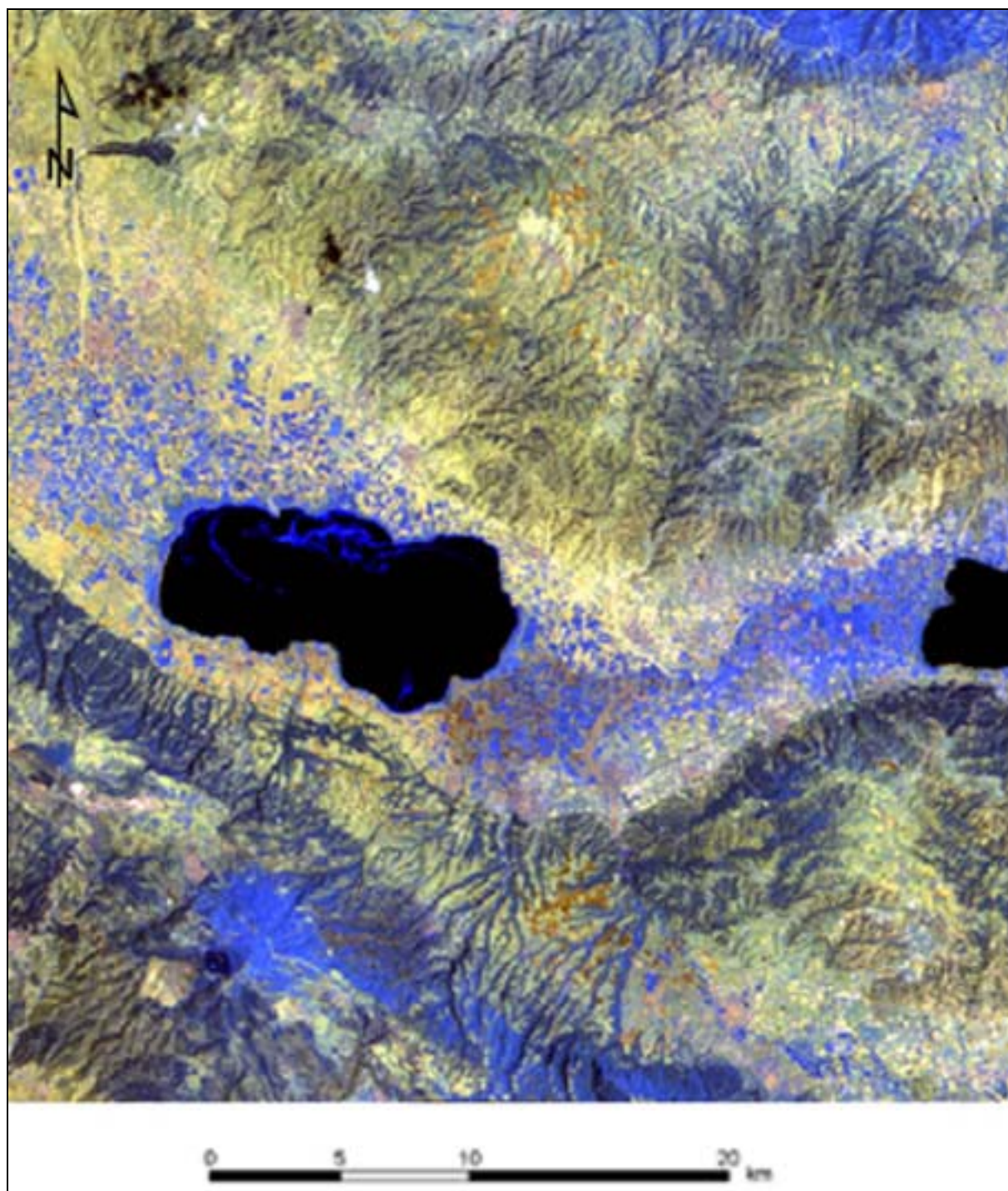
Μετά από δοκιμές, επιλέχθηκαν οι εξής ψευδοχρωματικές εικόνες, ως οι βέλτιστες για τη χαρτογράφηση των γραμμώσεων (Εικ. 15, 16, 17):

1. (R,G,B) = (PC-2, PC-1, TM-7), όπως προτείνεται από τον Σουλακέλλη (1994) και τους Novak & Soulakellis (2000)
2. (R,G,B) = (TM-7, TM-5, TM-4)
3. (R,G,B) = (TM-4, TM-7, TM-5)



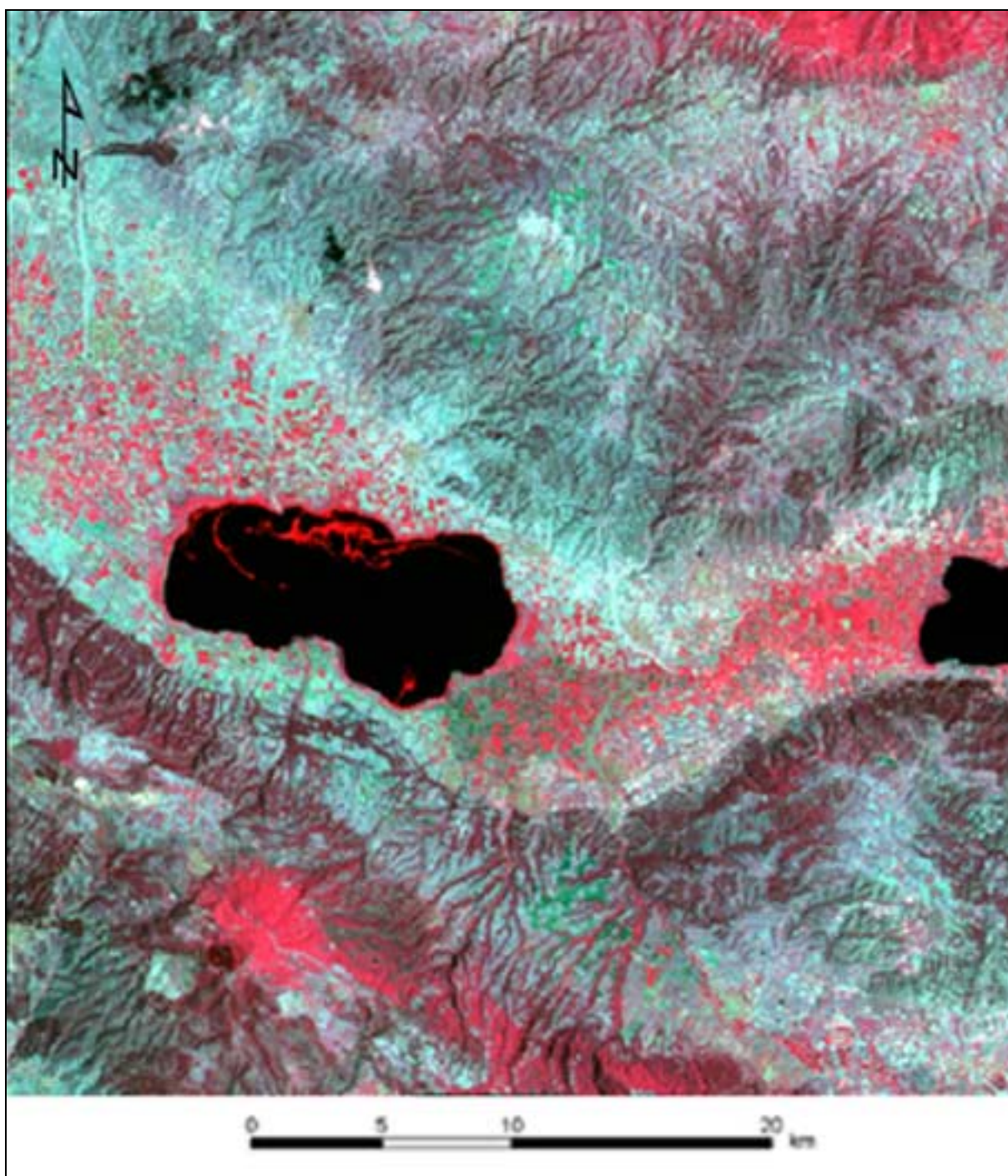
Εικόνα 15.Ψευδοχρωματική εικόνα (R,G,B) = (PC-2, PC-1, TM-7).





Εικόνα 16. Ψευδοχρωματική εικόνα (R,G,B) = (TM-7, TM-5, TM-4).





Εικόνα 17. Ψευδοχρωματική εικόνα (R,G,B) = (TM-4, TM-7, TM-5).

Όπως φαίνεται από τους παραπάνω ψευδοχρωματικούς συνδυασμούς, από τις φασματικές ζώνες του θεματικού χαρτογράφου, χρησιμοποιήθηκε ιδιαίτερα η υπέρυθρη φασματική ζώνη TM-7, η οποία χαρακτηρίζεται ως η πλέον κατάλληλη για γεωλογικές και γεωμορφολογικές έρευνες (Αστάρης 1998, Novak & Soulakellis 2000), ενώ από τις εικόνες κυρίων συνιστωσών χρησιμοποιήθηκαν οι εικόνες PC-1 και PC-2, οι οποίες περιέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό της πληροφορίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

**Λόγοι φασματικών ζωνών (ratioing)**

Οι «εικόνες λόγων ή αναλογίας» (ratio images) δημιουργούνται από τη διαίρεση της τιμής έντασης των εικονοστοιχείων μιας φασματικής ζώνης με την τιμή έντασης [ή αλλιώς του ψηφιακού αριθμού (Digital Number / DN)] των αντίστοιχων εικονοστοιχείων μιας άλλης φασματικής ζώνης. Οι τιμές που προκύπτουν σχηματίζουν την εικόνα αναλογίας (Sabins 1987, Druy 1993, Gupta 2003). Σε μια τέτοια εικόνα, οι περιοχές που απεικονίζονται με λευκό ή μαύρο χρώμα αντιστοιχούν σε εικονοστοιχεία, τα οποία έχουν τη μεγαλύτερη διαφορά στη ανακλαστικότητα ανάμεσα στις δυο φασματικές ζώνες. Οι πιο σκοτεινές φασματικές ταυτότητες είναι περιοχές όπου ο παρονομαστής της αναλογίας είναι μεγαλύτερος από τον αριθμητή. Αντίστοιχα, ο αριθμητής είναι μεγαλύτερος από τον παρονομαστή για τις πιο φωτεινές φασματικές ταυτότητες. Όπου ο παρονομαστής και ο αριθμητής είναι ίδιοι, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των δυο φασματικών ζωνών. Εικόνες αναλογίας μπορούν να συνδυαστούν και να δώσουν σύνθετες ψευδοχρωματικές εικόνες. (Sabins, 1987).

**Η διαίρεση μεταξύ των εικόνων αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο αριθμητικό μετασχηματισμό** (μπορεί να γίνει επίσης πρόσθεση, αφαίρεση ή πολλαπλασιασμός μεταξύ εικόνων), **ο οποίος εφαρμόζεται κυρίως σε γεωλογικές και γεωργικές μελέτες, εξαιτίας της μείωσης των τοπογραφικών επιδράσεων που επιφέρει στη μετασχηματισμένη εικόνα** (Τσακίρη-Στρατή, 2004).

Σύμφωνα με τον Gupta (2003), η δημιουργία λόγων συνιστά εξαιρετικά χρήσιμη διαδικασία, για την ενίσχυση χαρακτηριστικών σε πολυφασματικές εικόνες. Εφαρμόζεται συχνά, ώστε να μειωθεί η επίδραση της σκίασης και της τοπογραφίας και να ενισχυθεί η φασματική πληροφορία στις εικόνες (Crane 1971, Holben and Justice 1980, Justice et al. 1981, από Gupta 2003, Φουρνιάδης κ.α. 2002).

Στη συγκεκριμένη εργασία, η τεχνική της διαίρεσης των εικόνων χρησιμοποιήθηκε εμμέσως, στα πλαίσια της εφαρμογής των δεικτών βλάστησης, που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

**Δείκτες βλάστησης**

Η τεχνική της διαίρεσης (λόγου) φασματικών ζωνών που εξετάστηκε προηγουμένως, βρίσκει εφαρμογή στον υπολογισμό των λεγόμενων δεικτών βλάστησης (vegetation indices).

Βιβλιογραφικά υπάρχουν αρκετοί δείκτες βλάστησης και πολλές εργασίες σχετικά με τη χρήση τους, όμως το βασικό σκεπτικό είναι, πως ο λόγος του κοντινού υπερύθρου προς το ερυθρό είναι συνήθως υψηλός στην περίπτωση της υγιούς βλάστησης. Αυτό σημαίνει, ότι σε περίπτωση ασθένειας ή έλλειψης βλάστησης, παρατηρείται μείωση της ανάκλασης στο κοντινό υπέρυθρο και αύξηση της ανάκλασης στο ερυθρό (Συλλαίος, 2000).

Στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης χρησιμοποιήθηκε αρχικά ο «Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς» (Normalized Difference Vegetation Index / NDVI), ο οποίος ορίζεται ως εξής (Συλλαίος 2000, Φουρνιάδης κ.α. 2002):

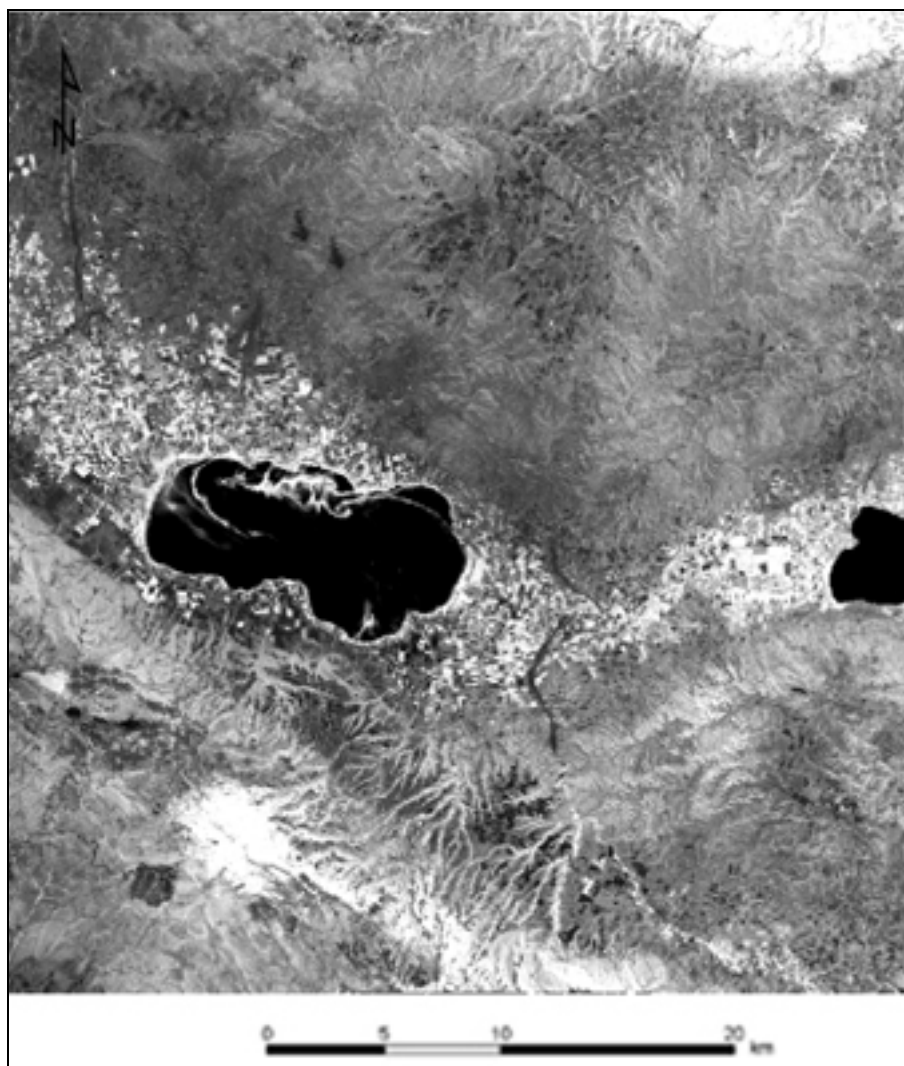
$$NDVI = (N.IR - R) / (N.IR + R)$$

όπου N.I.R (Near Infrared) είναι η φασματική ζώνη του κοντινού υπερύθρου και R (Red) η φασματική ζώνη του ερυθρού. Για τις εικόνες του Θεματικού Χαρτογράφου (TM) του δορυφόρου LANDSAT 5, ο παραπάνω δείκτης βλάστησης παίρνει τη μορφή (Συλλαίος 2000, Φουρνιάδης κ.α. 2002):

$$NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$$

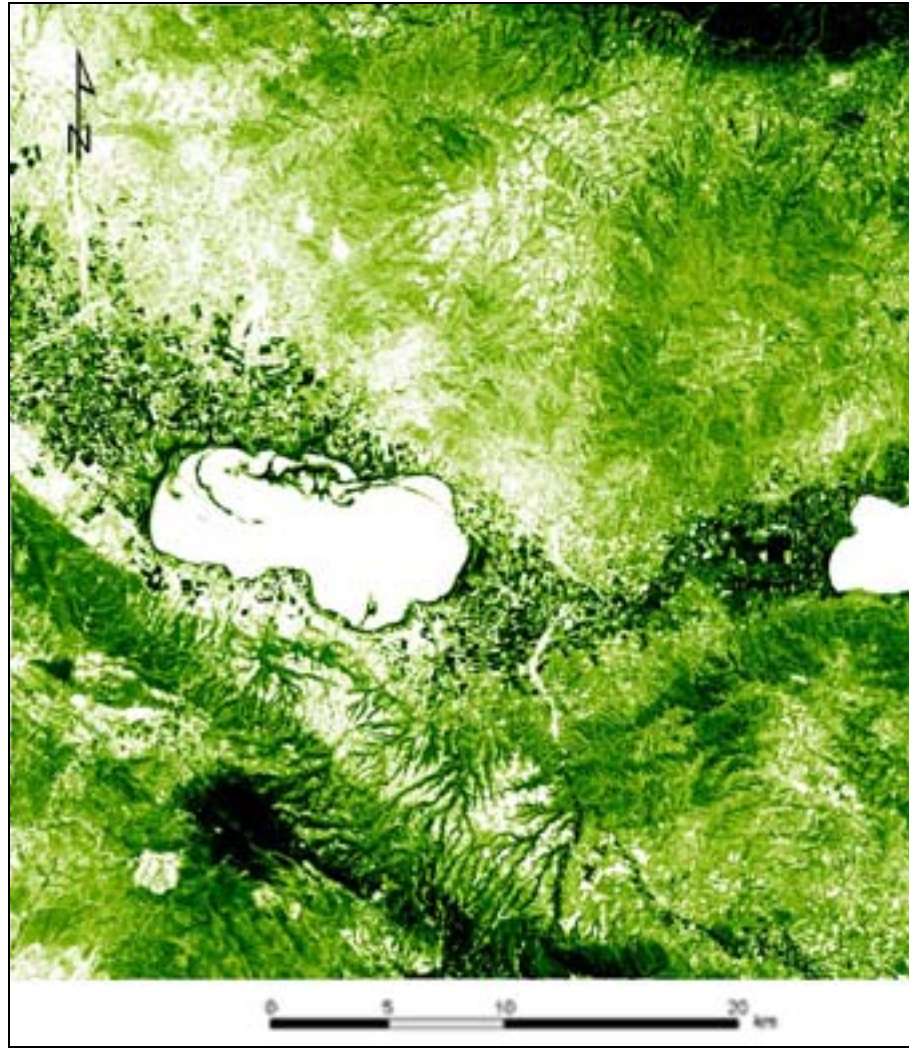


Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του ως άνω δείκτη βλάστησης, με το λογισμικό Erdas, παρουσιάζεται στην συνέχεια (Εικ. 18).



**Εικόνα 18.** Εικόνα που προέκυψε από την εφαρμογή του Δείκτη Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς» (Normalized Difference Vegetation Index / NDVI), με το λογισμικό Erdas.

Αν στην παραπάνω εικόνα οι διάφορες διαβαθμίσεις του τεφρού χρώματος αντικατασταθούν με διαφορετικά χρώματα, προκύπτει καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα. Η μέθοδος αυτή καλείται «ψευδοχρωματική απεικόνιση» (pseudocolour display) και εξετάζεται εκτενέστερα κατά την επεξεργασία της εικόνας ραντάρ. Με το λογισμικό ENVI, εφαρμόστηκε η παραπάνω τεχνική στην αρχική εικόνα NDVI, και προέκυψε η εικόνα 19.



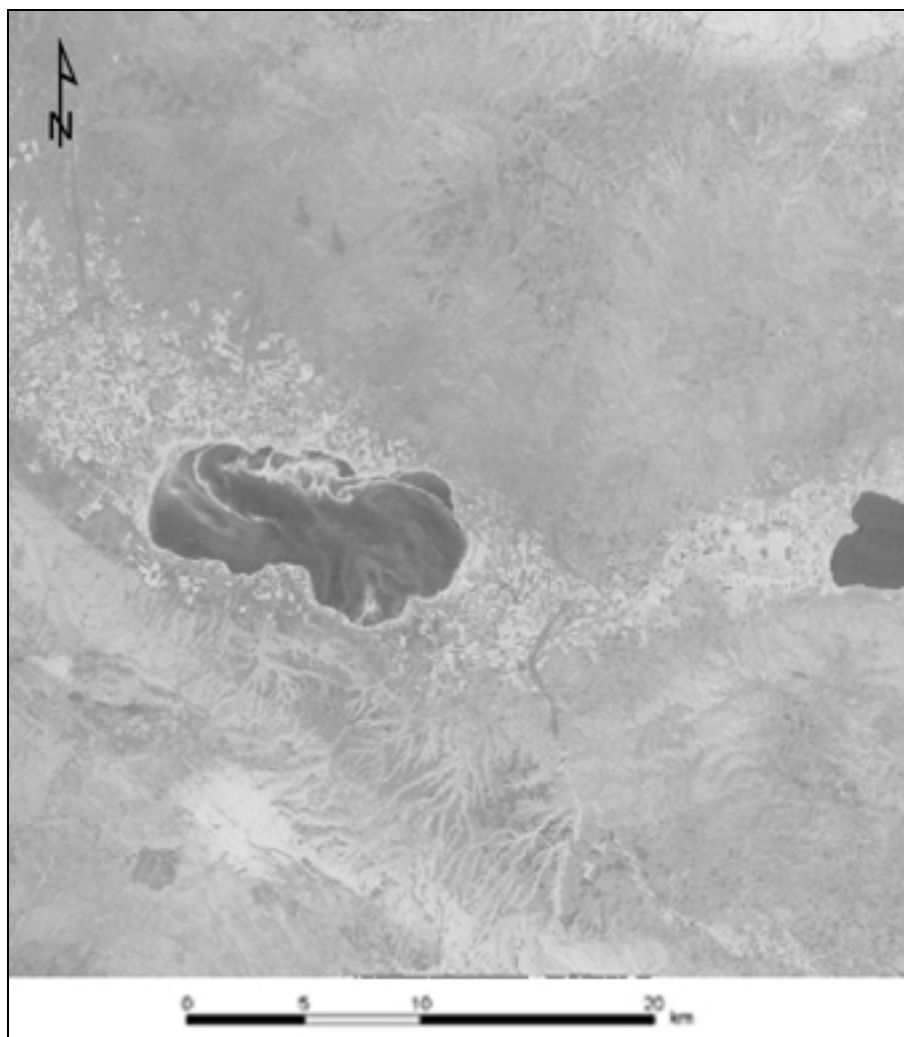
Εικόνα 19. Ψευδοχρωματική απεικόνιση (pseudocolour display) της αρχικής εικόνας NDVI, με το λογισμικό ENVI. Η διαβάθμιση της τιμής του NDVI αντικατοπτρίζει την έκταση της βλάστησης. Χαμηλή τιμή NDVI (λευκό χρώμα) συνεπάγεται απουσία βλάστησης, ενώ υψηλή τιμή NDVI (σκούρο πράσινο χρώμα) αντιπροσωπεύει έντονη παρουσία βλάστησης.

Εκτός από τον NDVI, εφαρμόστηκε επίσης ο «Μετασχηματισμένος Δείκτης Βλάστησης» (Transformed Vegetation Index / TVI ή TNDVI), ο οποίος υπολογίζεται ως εξής (Συλλαίος, 2000):

$$TVI = [(DN4-DN3/DN4+DN3) + 0,5]^{1/2} \times 100$$

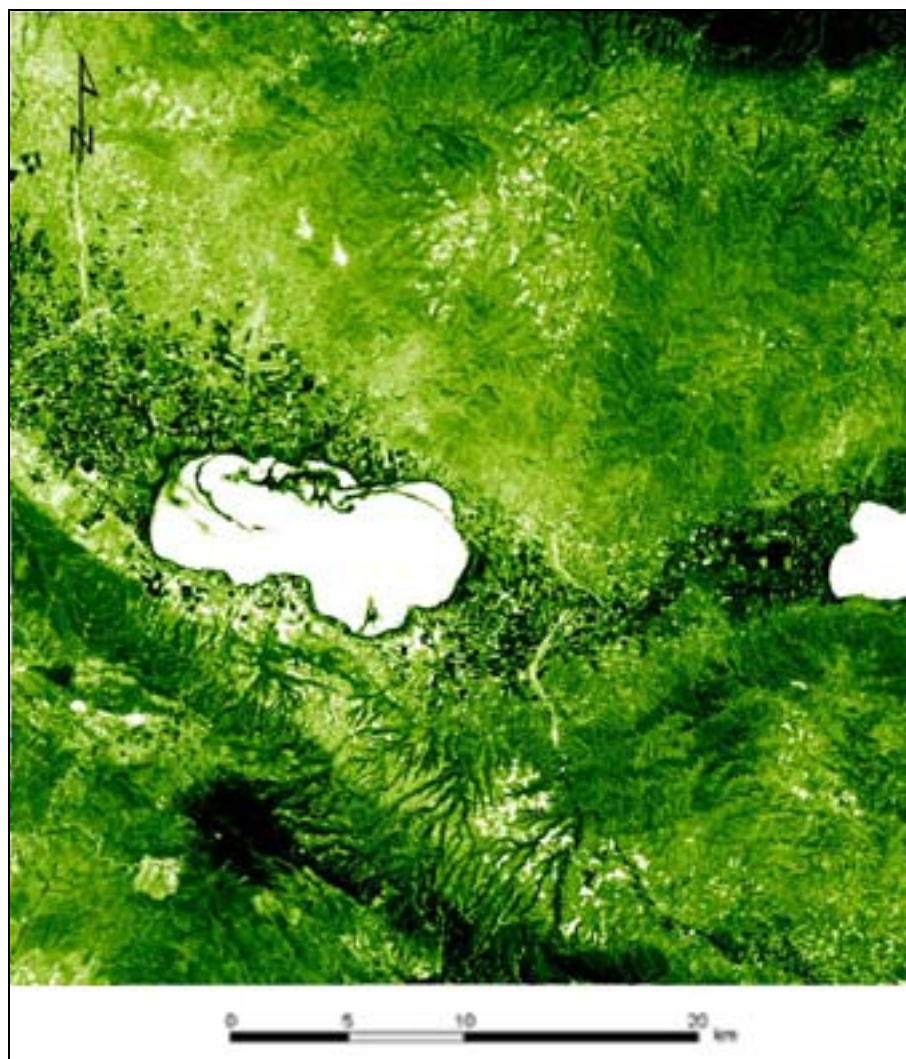
όπου DN3 και DN4 είναι η φασματική ζώνη 3 (ανώτερο οπτικό) και η φασματική ζώνη 4 (εγγύς υπέρυθρο) του Landsat-5/TM.

Από την εφαρμογή του TVI και την ψευδοχρωματική απεικόνιση της εικόνας (όπως και για τον NDVI) προέκυψαν οι παρακάτω εικόνες (Εικ. 20 & 21).



**Εικόνα 20.** Εικόνα που προέκυψε από την εφαρμογή του Μετασχηματισμένου Δείκτη Βλάστησης (Transformed Vegetation Index / TVI), με το λογισμικό Erdas.





Εικόνα 21. Ψευδοχρωματική απεικόνιση (pseudocolour display) της αρχικής εικόνας TVI, με το λογισμικό ENVI. Η διαβάθμιση της τιμής του TVI αντικατοπτρίζει την έκταση της βλάστησης. Χαμηλή τιμή TVI (λευκό χρώμα) συνεπάγεται απουσία βλάστησης, ενώ υψηλή τιμή TVI (σκούρο πράσινο χρώμα) αντιπροσωπεύει έντονη παρουσία βλάστησης.

Οι δύο εικόνες των δεικτών βλάστησης (NDVI και TVI) συνέβαλαν στον εντοπισμό γραμμώσεων, καθώς συχνά οι αλλαγές στη φυσική βλάστηση υποδηλώνουν ή συνοδεύονται από αλλαγές στη λιθολογία, ύπαρξη ρηγμάτων (διαφορά υγρασίας εξαιτίας μυλωνιτίωσης) κ.λ.π.

## 5.2.ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ PANTAP

Με τη χρήση του λογισμικού ENVI οριοθετήθηκε η περιοχή ενδιαφέροντος (**Region Of Interest/ROI**) στην εικόνα ENVISAT/ASAR. Ακολούθως εφαρμόστηκαν διάφορες τεχνικές επεξεργασίας της εικόνας, ορισμένες από τις οποίες είναι όμοιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία της πολυφασματικής εικόνας Landsat-5/TM και συνεπώς παρακάτω παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματά τους, δίχως περαιτέρω ανάλυση. Για τις τεχνικές που εφαρμόστηκαν αποκλειστικά στην εικόνα ραντάρ γίνεται εκτενέστερη αναφορά.

### 5.2.1.Αλλαγή προβολής της εικόνας ENVISAT/ASAR

Αναφορικά με την εικόνα ραντάρ, κατόπιν παραγγελίας, ήταν γεωμετρικά διορθωμένη (rectified) και συγκεκριμένα η προβολή της ήταν η Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική (**Universal Transverse Mercator/UTM**) με datum το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα **WGS 84** (**World Geodetic System 1984**). Στη προκειμένη περίπτωση αυτό που έγινε ήταν η αλλαγή της προβολής σε Εγκάρσια Μερκατορική (Transverse Mercator), στο νέο Ελληνικό datum (ΕΓΣΑ '87, GRS 80), το οποίο και χρησιμοποιήθηκε, όπως προαναφέρθηκε και για την ορθοαναγωγή της εικόνας Landsat, ώστε όλα τα δεδομένα να έχουν κοινό σύστημα αναφοράς.

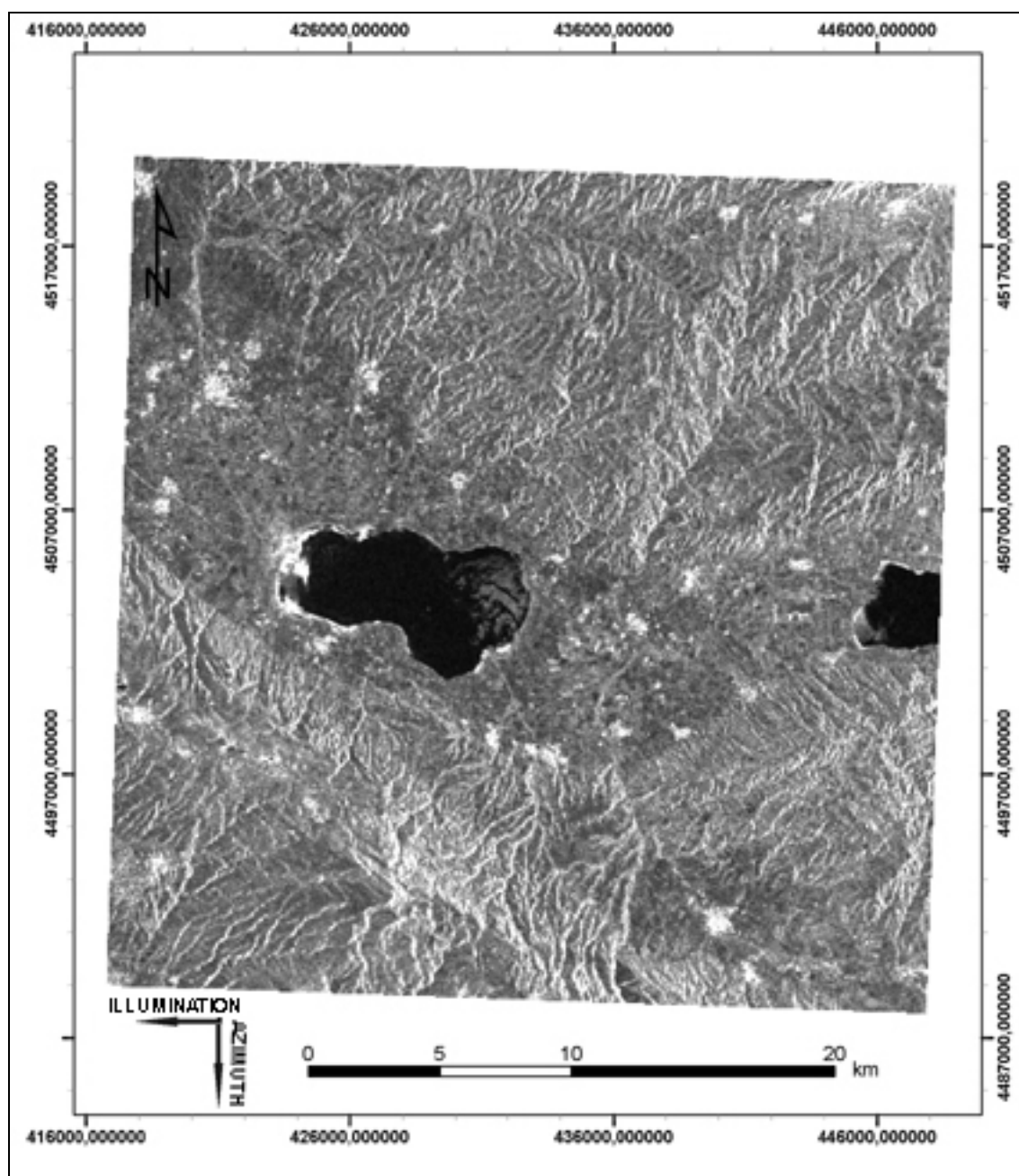
### 5.2.2.Μείωση του φαινομένου της κροκιδωτής υφής (speckle reduction)

Κάθε εικόνα ραντάρ, κατά τη λήψη της, περιέχει ένα είδος θορύβου, ο οποίος προσδίδει στην εικόνα μία κροκιδωτή εμφάνιση και οφείλεται σε φαινόμενα συμβολής της μικροκυματικής ακτινοβολίας (Μερτίκας, 1999). Ο θόρυβος αυτός επηρεάζει αρνητικά τη δυνατότητα ερμηνείας της εικόνας. (Συλλαίος 2000, Gupta 2003).

Η μερική απομάκρυνση του φαινομένου της κροκιδωτής υφής είναι δυνατή, με την εφαρμογή διάφορων φίλτρων και κυρίως με τη χρήση του φίλτρου Lee Sigma (Συλλαίος, 2000).

Το παραπάνω φίλτρο υπάρχει ως επιλογή στο λογισμικό Erdas και με την εφαρμογή αυτού στην εικόνα ραντάρ προέκυψε σαφώς βελτιωμένη εικόνα (Εικ. 22).





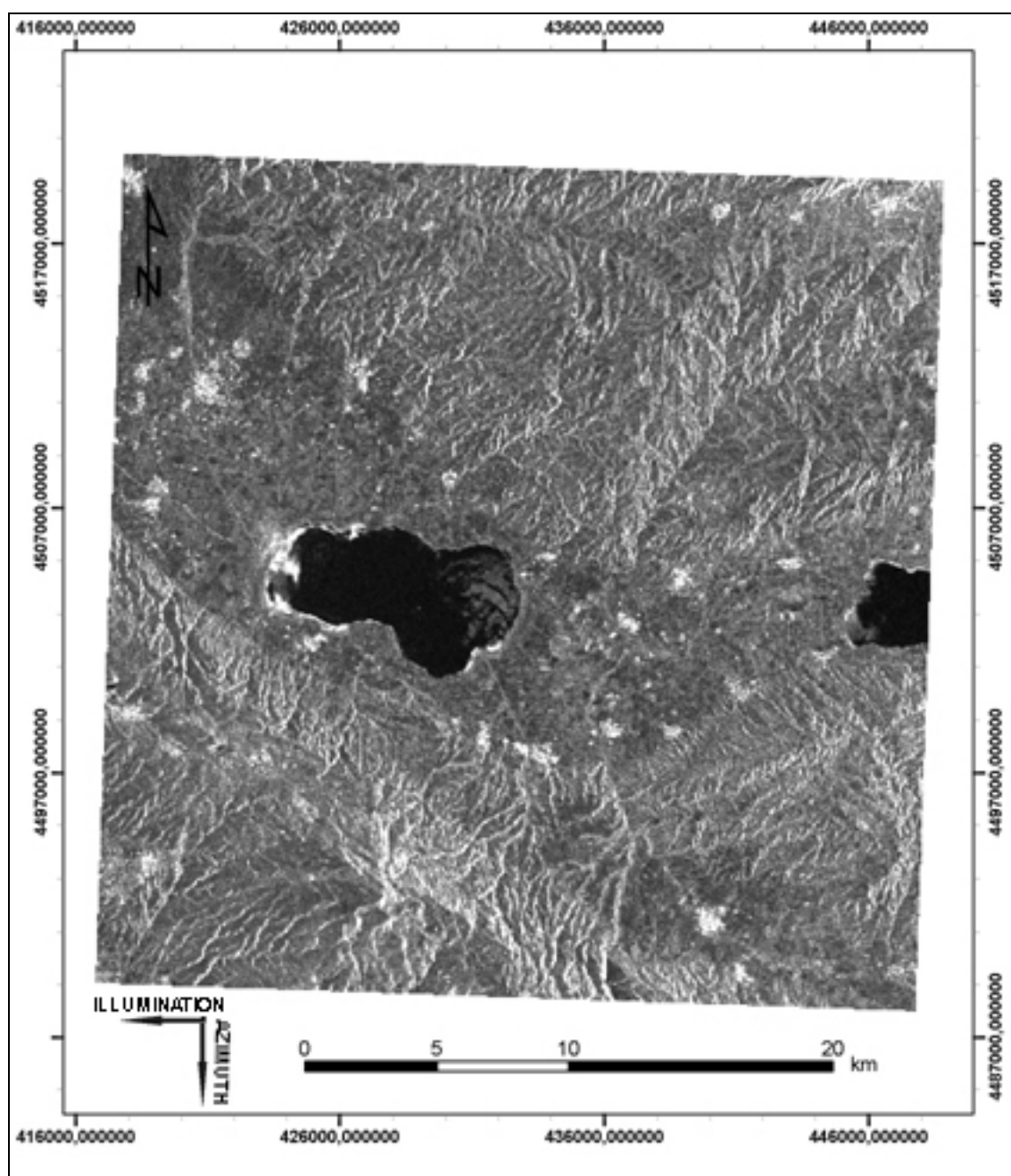
Εικόνα 22. Η εικόνα ραντάρ, μετά την εφαρμογή του φίλτρου Lee Sigma, για την απομάκρυνση της κροκιδωτής υφής (speckle).

Στην εικόνα ραντάρ, η οποία προέκυψε μετά την απομάκρυνση του θορύβου, εφαρμόστηκαν στη συνέχεια τεχνικές βελτίωσης και μετασχηματισμού, αντίστοιχες με αυτές που προηγήθηκαν για την εικόνα Landsat.

### 5.2.3.Βελτιώσεις και μετασχηματισμοί της εικόνας

#### Γραμμική έκταση του ιστογράμματος (linear histogram streching)

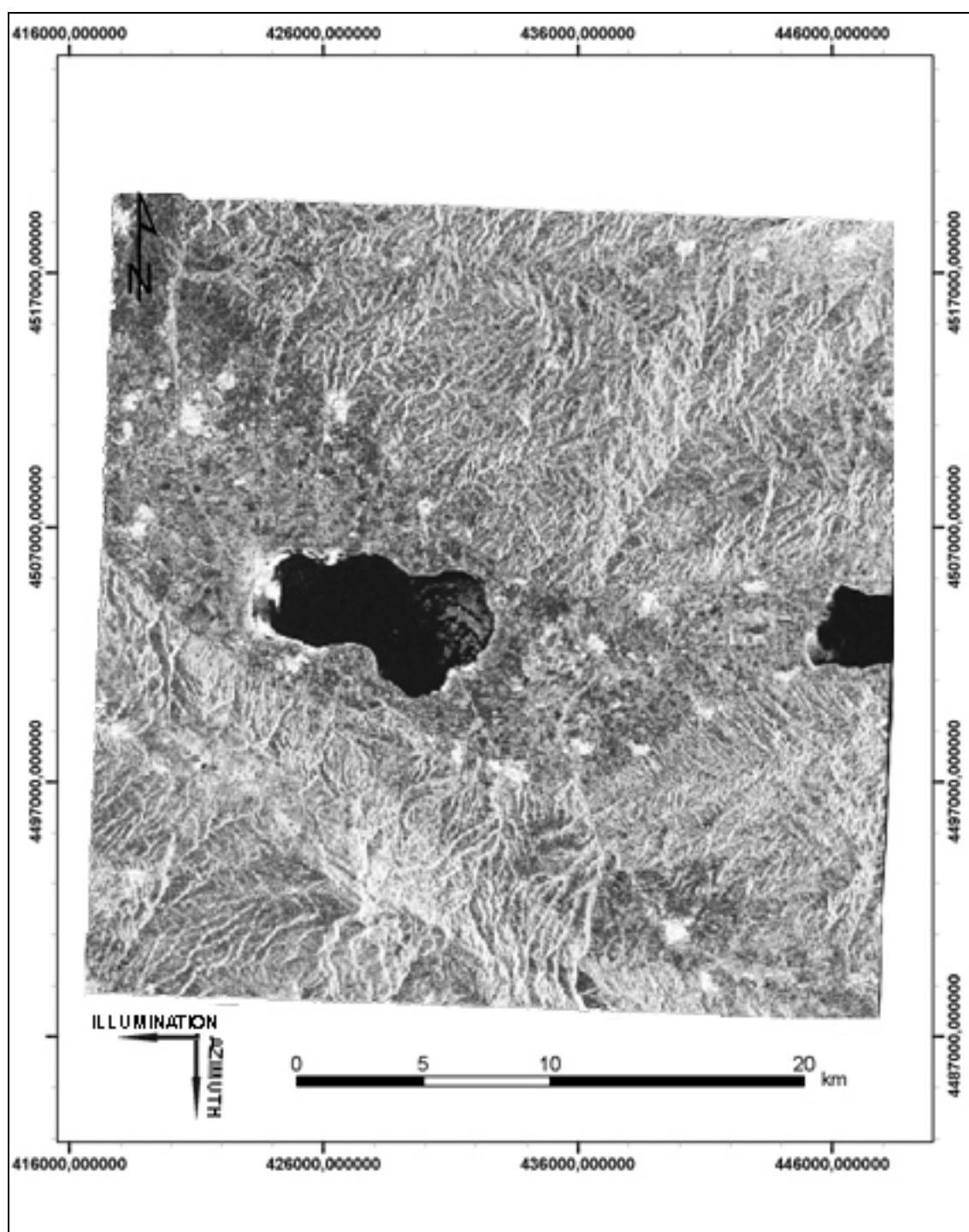
Η εικόνα ραντάρ, μετά τη γραμμική έκταση έχει ως εξής (Εικ. 23):



Εικόνα 23. Η εικόνα ραντάρ, μετά από γραμμική έκταση του ιστογράμματος.

**Εξισορρόπηση του ιστογράμματος (histogram equalization)**

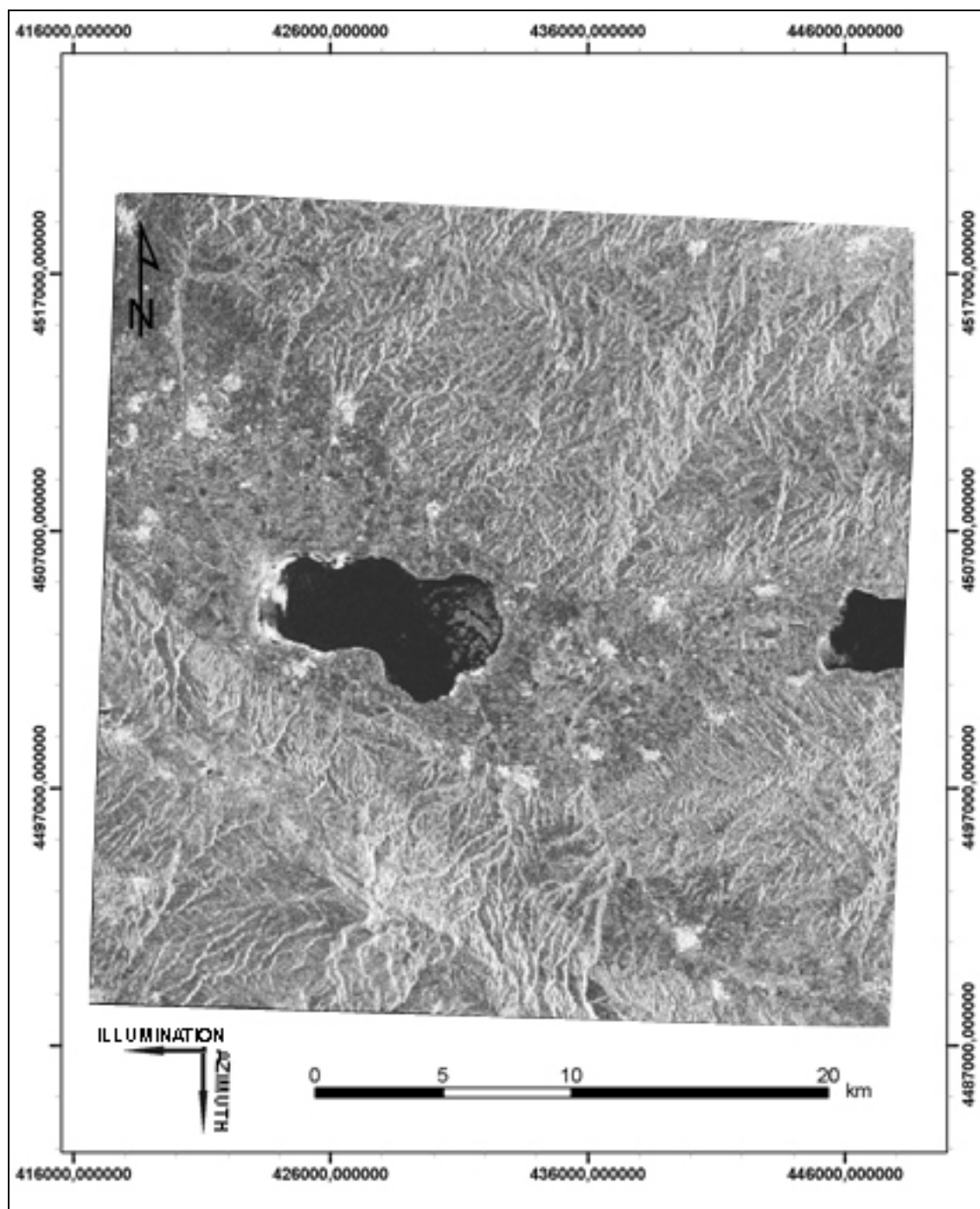
Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε με το λογισμικό Erdas (Εικ. 24)



Εικόνα 24. Η εικόνα ραντάρ, μετά από εξισορρόπηση του ιστογράμματος.

**Προσαρμογή του ιστογράμματος σε μαθηματική αναφορά**

Κατ' αντιστοιχία με την επεξεργασία της πολυφασματικής εικόνας, η προσαρμογή του ιστογράμματος της εικόνας ραντάρ σε ιστόγραμμα Gauss έδωσε το παρακάτω αποτέλεσμα (Εικ. 25).

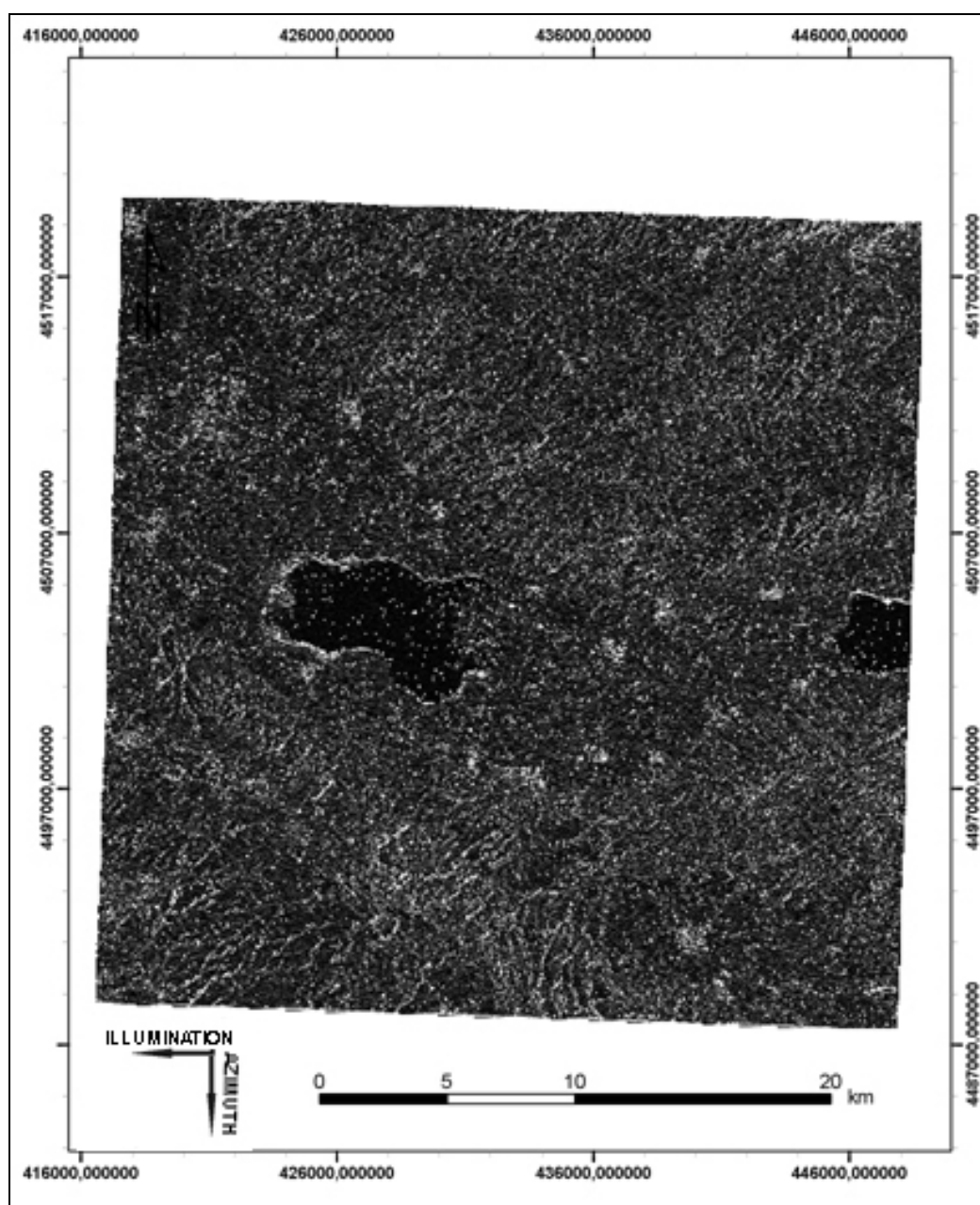


Εικόνα 25. Η εικόνα ραντάρ, μετά από προσαρμογή του ιστογράμματός της σε ιστόγραμμα Gauss.

**Ενίσχυση των ακμών (edge enhancement)**

Η πληροφορία στις εικόνες ραντάρ μπορεί να χωριστεί σε δύο συνιστώσες, χρησιμοποιώντας κατάλληλο ψηφιακό φίλτρο: (1) στη «χαμηλής συχνότητας συνιστώσα» (low frequency component), η οποία πιθανώς σχετίζεται με την αντίθεση (contrast) που οφείλεται στη λιθολογία και (2) στην «υψηλής συχνότητας» συνιστώσα (high frequency component), η οποία σχετίζεται με τη βλάστηση και τις κλιτύς (Daily 1983, από Gupta 2003).

Η τεχνική ενίσχυσης των ακμών, όπως αναφέρθηκε και στο στάδιο επεξεργασίας της πολυφασματικής εικόνας, χρησιμοποιεί «φίλτρα υψηλής διέλευσης» (high-pass filters), δίνει δηλαδή την υψηλής συχνότητας συνιστώσα της εικόνας. Το αποτέλεσμα από την εφαρμογή της παραπάνω τεχνικής στην εικόνα ραντάρ παρουσιάζεται στην εικόνα 26.



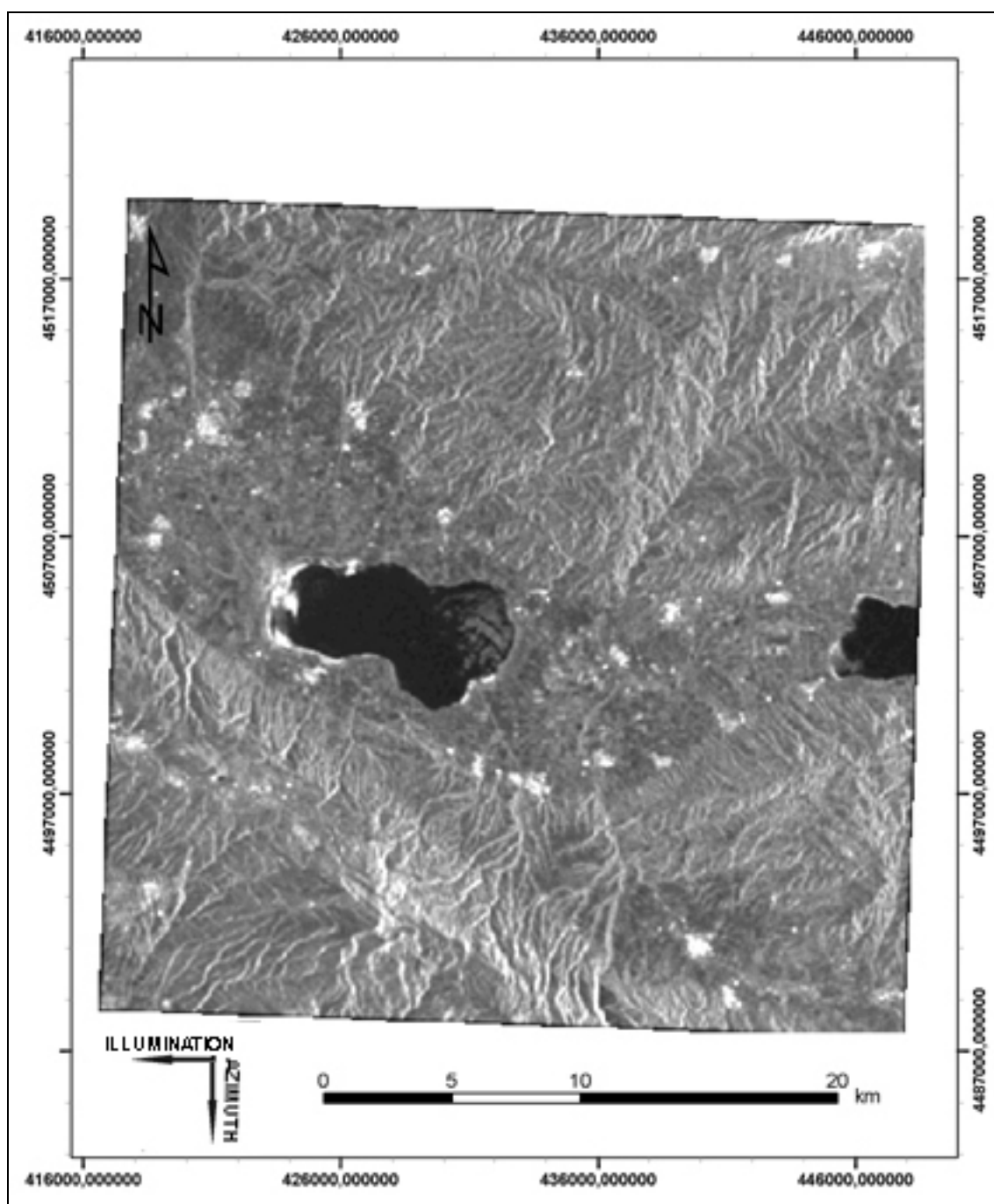
Εικόνα 26. Η εικόνα ραντάρ, μετά από την εφαρμογή ενίσχυσης των ακμών (φίλτρο υψηλής διέλευσης).



**Ομαλοποίηση (εξομάλυνση) της εικόνας (image smoothing)**

Σε αντίθεση με την ενίσχυση των ακμών, η τεχνική ομαλοποίησης της εικόνας, εφαρμόζει φίλτρα χαμηλής διέλευσης, δίνοντας τη χαμηλής συχνότητας συνιστώσα της εικόνας (Εικ. 27).

Οι δύο εικόνες (υψηλή και χαμηλή συνιστώσα) μπορούν να κωδικοποιηθούν σε διαφορετικά χρώματα ή σε ένα χρωματικό μοντέλο **IHS** [(Intensity (ένταση ή φωτεινότητα), Hue (απόχρωση), Saturation (κορεσμός)], διευκολύνοντας πιθανώς την ερμηνεία της εικόνας (Daily 1983, από Gupta 2003).

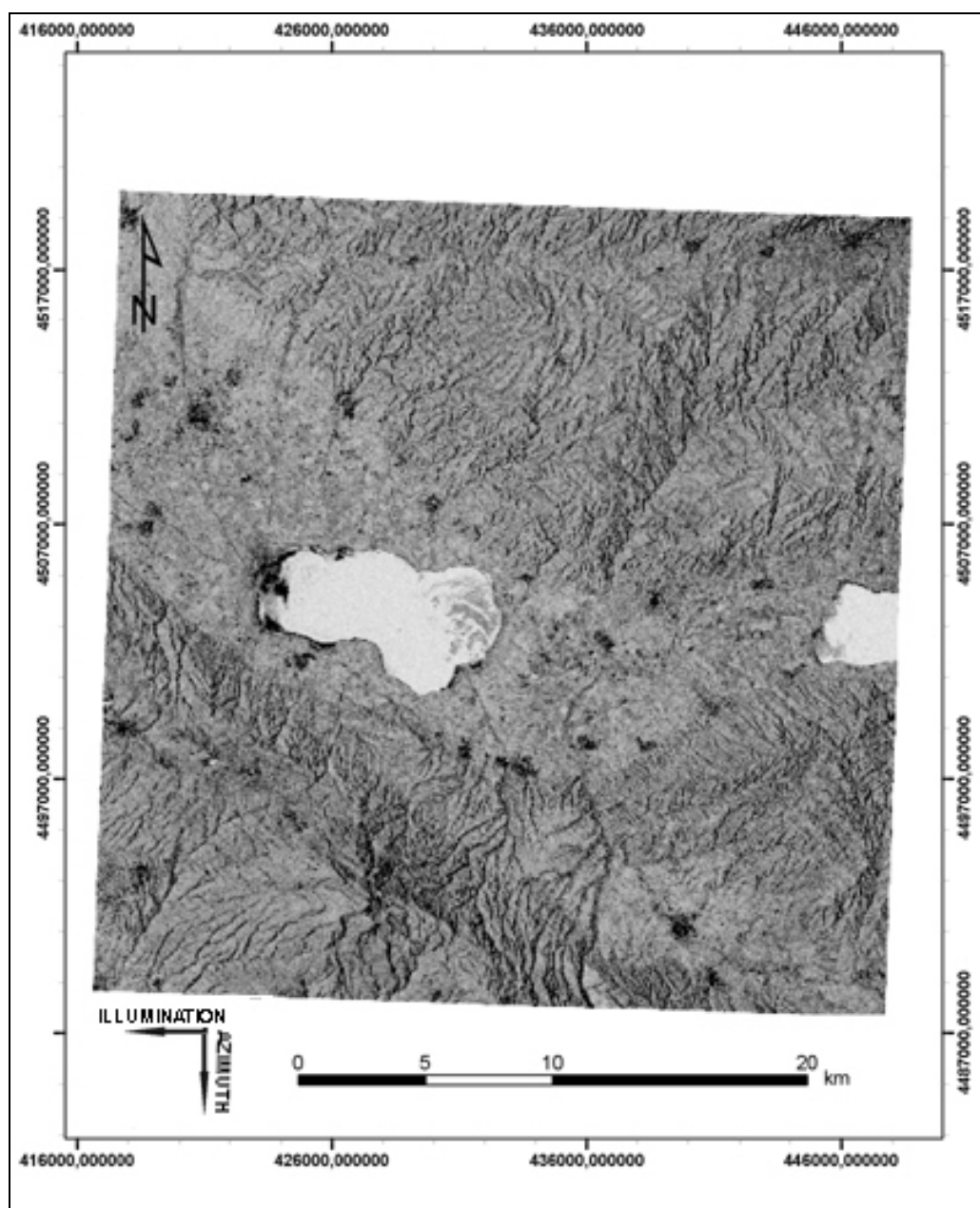


Εικόνα 27. Η εικόνα ραντάρ, μετά από ομαλοποίηση (φίλτρο χαμηλής διέλευσης).

**Αντιστροφή της εικόνας (image inversion)**

Όπως αναφέρθηκε στο στάδιο της επεξεργασίας της πολυφασματικής εικόνας, οι συναρτήσεις αντιστροφής της εικόνας δίδουν εικόνες, οι οποίες έχουν την αντίστροφη αντίθεση με τις αρχικές. Αυτό σημαίνει, πως οι σκοτεινές περιοχές γίνονται φωτεινές και αντιστρόφως, οπότε το αποτέλεσμα μοιάζει με «φωτογραφικό αρνητικό» της αρχικής εικόνας.

Το αποτέλεσμα από την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας, με το λογισμικό Erdas, στην εικόνα ραντάρ ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικό, αφού η εικόνα, τουλάχιστον όσον αφορά τις γραμμώσεις, βελτιώθηκε οπτικά κατά πολύ (Εικ. 28).

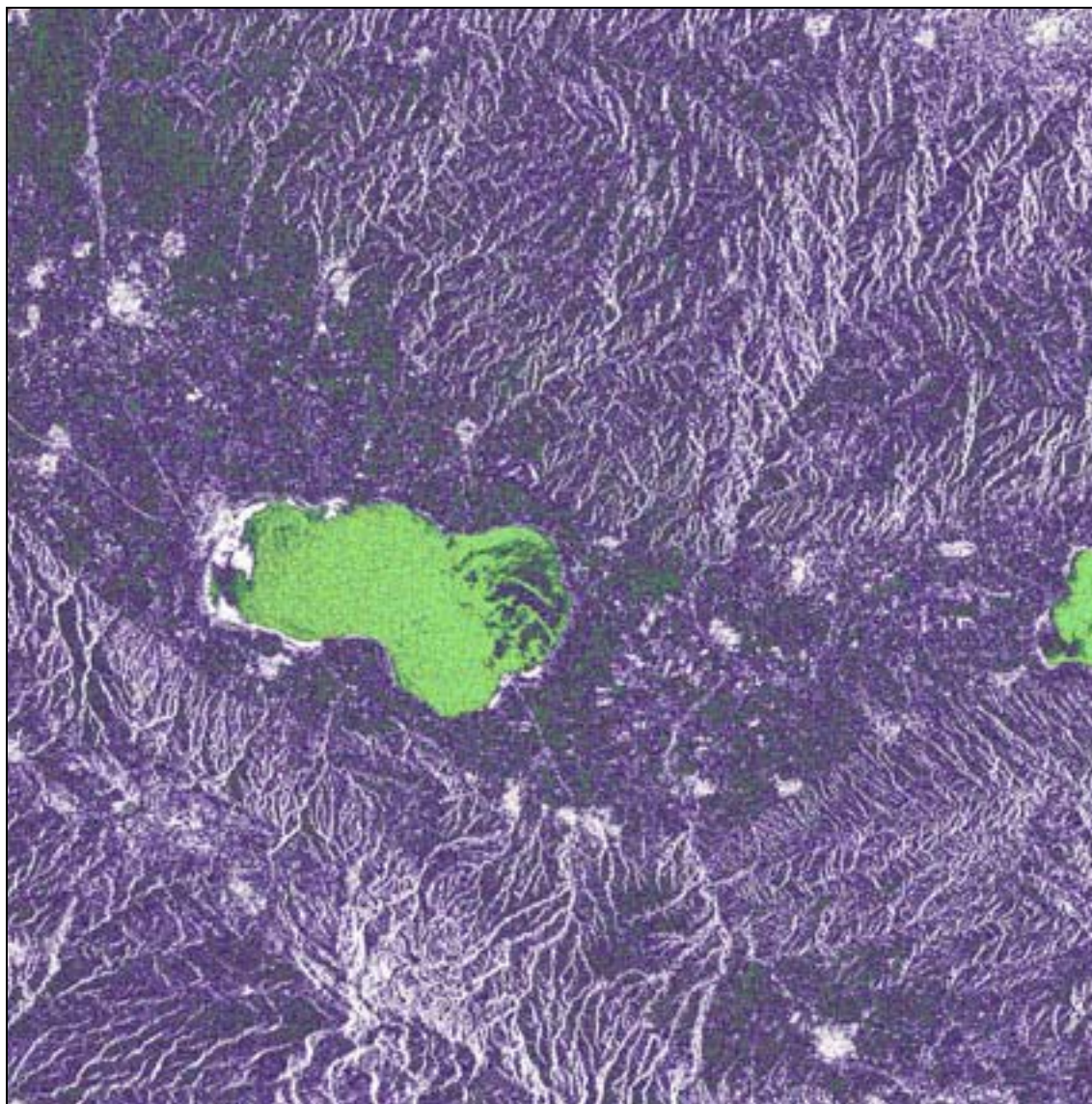


Εικόνα 28. Η εικόνα ραντάρ μετά από την εφαρμογή της αντιστροφής της αντίθεσης της φωτεινότητας (image contrast inversion). Η ανίχνευση των γραμμώσεων διευκολύνθηκε κατά πολύ, με την εφαρμογή αυτής της τεχνικής.

**Ψευδοχρωματική απεικόνιση (pseudocolour display)**

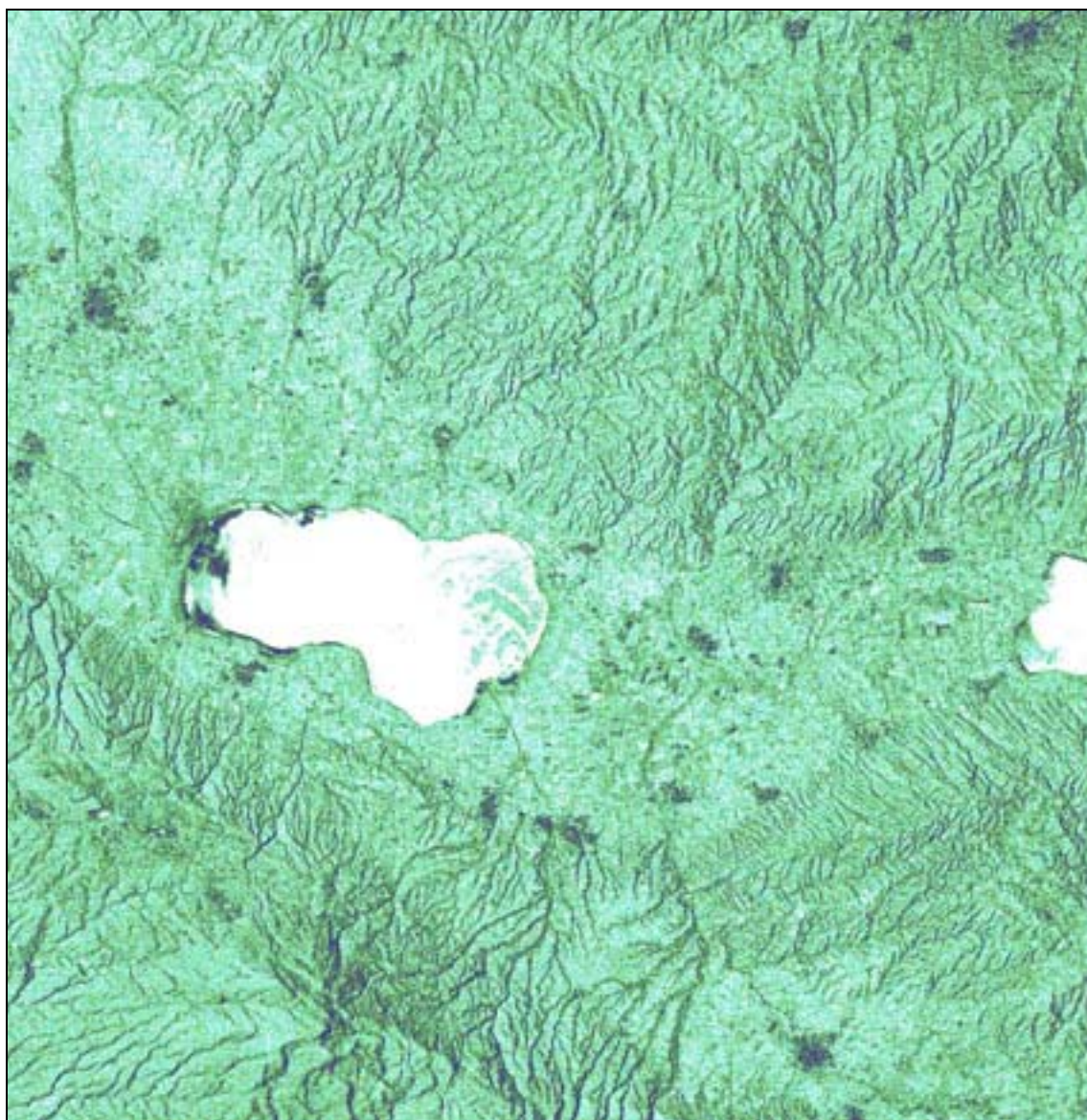
Η τεχνική της ψευδοχρωματικής απεικόνισης εφαρμόζεται σε μία πανχρωματική εικόνα. Κατά την εφαρμογή της, οι διαβαθμίσεις (τόνοι) του τεντού χρώματος (gray tones) κωδικοποιούνται σε χρώματα, ανάλογα με κάποιο χρωματικό πίνακα (color table). Το οπτικό αποτέλεσμα είναι καλύτερο, καθώς το ανθρώπινο μάτι μπορεί να διακρίνει περισσότερα διαφορετικά χρώματα (εκατοντάδες) από ότι διαφορετικές διαβαθμίσεις του τεντού χρώματος (15 έως 25) (Αστάρης 1998, Τσακίρη-Στρατή 2004).

Το λογισμικό ENVI παρέχει ανάλογες δυνατότητες και μάλιστα στη διάθεση του χρήστη υπάρχει μεγάλος αριθμός χρωματικών πινάκων. Μετά από πολλούς πειραματισμούς, επιλέχθηκαν οι εξής τρεις εικόνες, οι οποίες έδωσαν τα καλύτερα οπτικά αποτελέσματα (Εικ. 29-31):



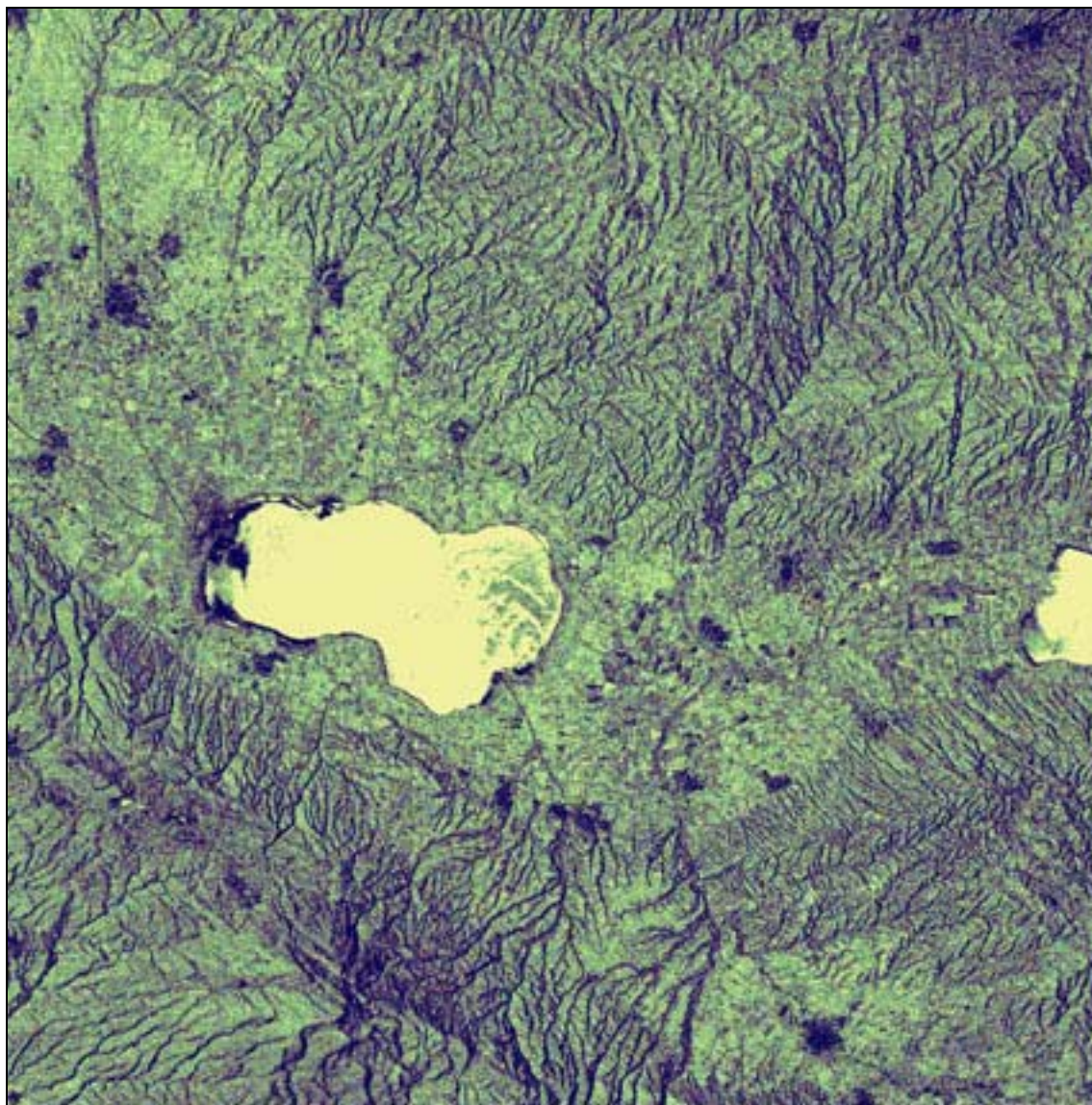
**Εικόνα 29. Ψευδοχρωματική απεικόνιση (pseudocolour display) της εικόνας ραντάρ, με τον χρωματικό πίνακα (color table) "nature" του ENVI.**





**Εικόνα 30.** Ψευδοχρωματική απεικόνιση (pseudocolour display) της εικόνας ραντάρ, με τον χρωματικό πίνακα (color table) "ocean" του ENVI.





**Εικόνα 31.** Ψευδοχρωματική απεικόνιση (pseudocolour display) της εικόνας ραντάρ, με τον χρωματικό πίνακα (color table) "peppermint" του ENVI.



### 5.3.ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ (DATA FUSION)

Οι τηλεπισκοπικές εικόνες προέρχονται από διάφορους εναέριους και διαστημικούς δέκτες, με διαφορετική χωρική (spatial), χρονική/διαχρονική (temporal/diachronic) και φασματική (spectral) διακριτική ικανότητα. Η **συγχώνευση των εικόνων (data fusion)** συνιστά την τεχνική, η οποία «συνενώνει» τις εικόνες αυτές (και άλλα δεδομένα κατά περίπτωση), με σκοπό την εξαγωγή περισσότερης και καλύτερης πληροφορίας για τα υπό εξέταση αντικείμενα, πράγμα που δεν θα ήταν εφικτό από τα δεδομένα ενός μόνο δέκτη. Η τεχνική αυτή θα μπορούσε να οριστεί ως «η διαδικασία συγχώνευσης (merging) δεδομένων από διάφορες πηγές, ώστε να εξαχθεί “βελτιωμένη” πληροφορία».

Τα «συγχωνευμένα» δεδομένα (fused data) προσδίδουν αυξημένη σιγουριά στην ερμηνεία των εικόνων για τις διάφορες εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι τα δεδομένα ραντάρ μπορούν να συνδυαστούν με άλλα δεδομένα, για παράδειγμα από το κοντινό ή το θερμικό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, ώστε να ενισχυθεί η πληροφορία που άπτεται του αντικειμένου των γεωεπιστημών (π.χ. Leckie 1990, Croft et al 1993, από Gupta 2003). Αυτός ακριβώς είναι και ο σκοπός σε αυτό το σημείο της εργασίας, δηλαδή η συγχώνευση της εικόνας ραντάρ (ENVISAT/ASAR) με την πολυφασματική εικόνα (Landsat-5/TM).

Σύμφωνα με τον Gupta (2003), οι τεχνικές συγχώνευσης μπορούν να εφαρμοστούν σε ψηφιακές εικόνες έτσι ώστε:

- να ενισχύσουν τις εικόνες
- να βελτιώσουν τις γεωμετρικές διορθώσεις
- να εμφανίσουν ορισμένα χαρακτηριστικά, τα οποία δεν είναι ορατά σε καμία από τις εικόνες χωριστά
- να συμπληρώσουν σειρές δεδομένων για καλύτερη ταξινόμηση
- να ανιχνεύσουν αλλαγές χρησιμοποιώντας διαχρονικά δεδομένα
- να αντικαταστήσουν πληροφορία που απουσιάζει σε μία εικόνα (λ.χ. εξαιτίας νεφοκάλυψης ή σκιάς), με δεδομένα από άλλο δέκτη
- να αντικαταστήσουν «ελαττωματικά» δεδομένα

Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές για τη συγχώνευση εικόνων κατηγοριοποιούνται σε τρεις τύπους, ανάλογα με το στάδιο κατά το οποίο λαμβάνει χώρα η συγχώνευση. Έτσι έχουμε (Gupta, 2003):

1. Συγχώνευση σε επίπεδο εικονοστοιχείων (pixel-based fusion)
2. Συγχώνευση σε επίπεδο χαρακτηριστικών (feature-based fusion)
3. Συγχώνευση σε επίπεδο αποφάσεων (decision-based fusion)

Το πρώτο βήμα σε όλες της μεθόδους συγχώνευσης είναι η προεπεξεργασία των δεδομένων, για τον περιορισμό ραδιομετρικών σφαλμάτων και η σχετική εγγραφή μεταξύ

**των εικόνων.** Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας συγχώνευσης, η εικόνα που προκύπτει μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω, όπως γίνεται με κάθε τηλεπισκοπική εικόνα στο στάδιο της επεξεργασίας.

Η συγχώνευση σε επίπεδο εικονοστοιχείων απαιτεί σχετική εγγραφή μεταξύ των εικόνων με ακρίβεια μικρότερη του μεγέθους του εικονοστοιχείου (sub-pixel accuracy). Το πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι, ότι οι αρχικές εικόνες περιέχουν την πρωτογενή πληροφορία, με αποτέλεσμα οι μετρούμενες φυσικές παράμετροι να διατηρούνται και να συγχωνεύονται.

Κατά τη συγχώνευση σε επίπεδο χαρακτηριστικών, τα δεδομένα είναι ήδη επεξεργασμένα, ώστε να εξαχθούν τα στοιχεία εκείνα, τα οποία επιθυμούμε τελικά να συγχωνευτούν. Τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά αναγνωρίζονται από το σχήμα, την έκταση και τη γειτονία τους.

Τέλος, στην περίπτωση της συγχώνευσης σε επίπεδο αποφάσεων, τα χαρακτηριστικά ταξινομούνται και συγχωνεύονται ανάλογα με κάποιους κανόνες, ώστε να διαλεκανθούν τυχόν ασάφειες και να προκύψουν περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα.

**Για γεωλογικές εφαρμογές, η πιο συνηθισμένη τεχνική συγχώνευσης, που εφαρμόζεται σε δεδομένα τηλεπισκόπησης, είναι αυτή σε επίπεδο pixel (Gupta, 2003) και είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.**

Κατά τον Gupta (2003), οι τεχνικές συγχώνευσης σε επίπεδο εικονοστοιχείων διαιρούνται σε τρεις κατηγορίες:

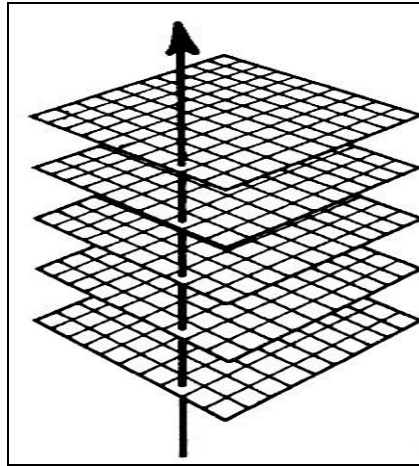
- 1. Στατιστικές και αριθμητικές μέθοδοι (statistical and numerical methods)**
- 2. Χρωματικοί μετασχηματισμοί (colour transformations)**
- 3. Μέθοδος μετασχηματισμού κύμανσης (wavelet transform method)**

Για την στατιστική και αριθμητική επεξεργασία μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες μέθοδοι, για παράδειγμα:

- Ανάλυση στις κύριες συνιστώσες (Principal Component Analysis/PCA)
- Έκταση αποσυσχέτισης (decorrelation stretch)
- Πρόσθεση/αφαίρεση (addition/subtraction)
- Διαίρεση (λόγος)/πολλαπλασιασμός (ratioing/multiplication)

### **5.3.1. Εγγραφή (registration) της εικόνας ραντάρ στην πολυφασματική εικόνα**

Ως εγγραφή (registration) ορίζεται «η διαδικασία της υπέρθεσης (superimposing) εικόνων, χαρτών ή σειρών δεδομένων, με γεωμετρική ακρίβεια», δηλαδή οι πληροφορίες που προέρχονται από ένα συγκεκριμένο στοιχείο της γήινης επιφάνειας και καταγράφονται σε διαφορετικούς δέκτες (π.χ. πολυφασματικούς σαρωτές, ραντάρ), τοποθετούνται ακριβώς η μία πάνω στην άλλη (Εικ. 32) (Gupta, 2003).



Εικόνα 32. Αρχή της εγγραφής εικόνων. Τα δεδομένα σε κάθε κυψελίδα βρίσκονται σε πλήρη γεωμετρική ταύτιση (congruence) (Gupta 2003, με μετατροπή).

Η εγγραφή μιας εικόνας στηρίζεται σε μία βάση (αναφορά). Όταν η βάση αυτή είναι μία άλλη εικόνα, όπως στην προκειμένη περίπτωση η εικόνας ASAR (εικόνα προς εγγραφή / input image) εγγράφεται στην εικόνα TM (εικόνα αναφοράς / base image), τότε η εγγραφή ονομάζεται **σχετική εγγραφή (relative registration)** της πρώτης στη δεύτερη. Αντίθετα, όταν η αναφορά είναι κάποια χαρτογραφική προβολή, τότε η εγγραφή ονομάζεται **απόλυτη εγγραφή (absolute registration)** (Gupta, 2003).

Η διαδικασία της ψηφιακής σχετικής εγγραφής μιας εικόνας σε μια άλλη χρησιμοποιεί την τεχνική του μετασχηματισμού συντεταγμένων (coordinate transformation). Μια σειρά επίγειων σημείων ελέγχου (GCPs) επιλέγονται στις δύο εικόνες και οι συντεταγμένες τους καθορίζουν τις παραμέτρους του μετασχηματισμού, ο οποίος χρησιμοποιείται. Συνήθως εφαρμόζονται πολυωνμικές εξισώσεις ν-οστού βαθμού (polynomials), ή ο αφινικός (affine) μετασχηματισμός (ή αλλιώς μετασχηματισμός ομοιότητας), για να συνδεθούν τα συστήματα συντεταγμένων των δύο εικόνων. Ένα παράδειγμα απλού αφινικού μετασχηματισμού, ο οποίος συνιστά γραμμικό μετασχηματισμό, είναι:

$$X' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

$$Y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy$$

όπου  $X'$ ,  $Y'$  είναι οι συντεταγμένες στο νέο σύστημα και  $x$ ,  $y$  αυτές στο αρχικό σύστημα.

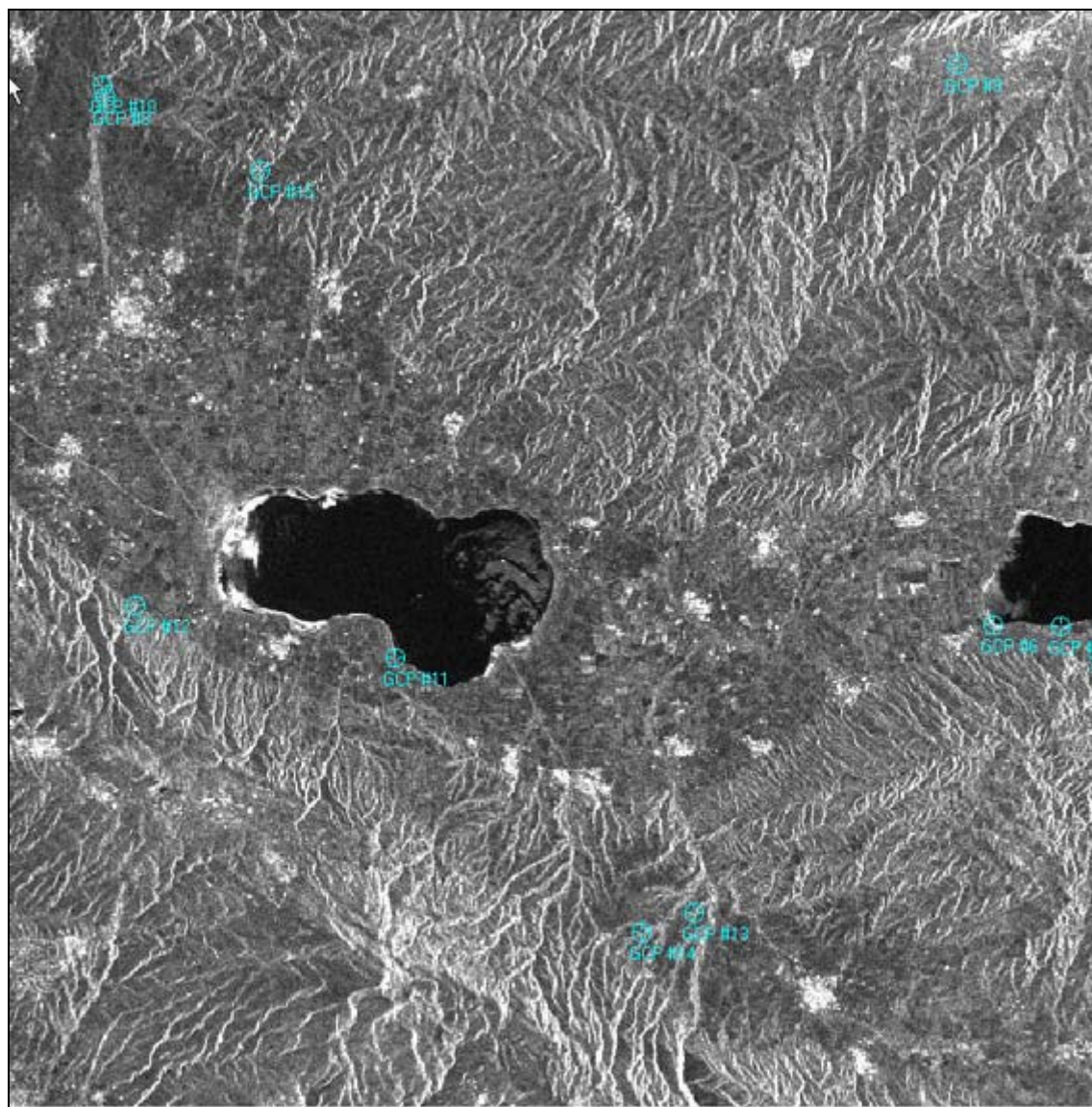
Συνεπώς προκύπτουν οκτώ άγνωστες σταθερές ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ), οι οποίες υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τουλάχιστον τέσσερα σημεία ελέγχου (καθώς κάθε σημείο ελέγχου δίνει δύο εξισώσεις, μία για  $X'$  και μία για  $Y'$ ). Ωστόσο τέσσερα σημεία ελέγχου ενδεχομένως να μην είναι αρκετά για μεγάλες εικόνες και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται περισσότερα σημεία.

Μεγαλύτερου βαθμού πολώνυμα δίνουν καλύτερα αποτελέσματα, αλλά απαιτούν περισσότερο πολύπλοκους μετασχηματισμούς και συνεπώς μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας στον ηλεκτρονικό υπολογιστή (Gupta, 2003).

Η εγγραφή της εικόνας ENVISAT/ASAR στην πολυφασματική εικόνα έγινε χρησιμοποιώντας πολώνυμο τρίτου βαθμού. Για τους λόγους που εξηγήθηκαν αναλυτικά κατά

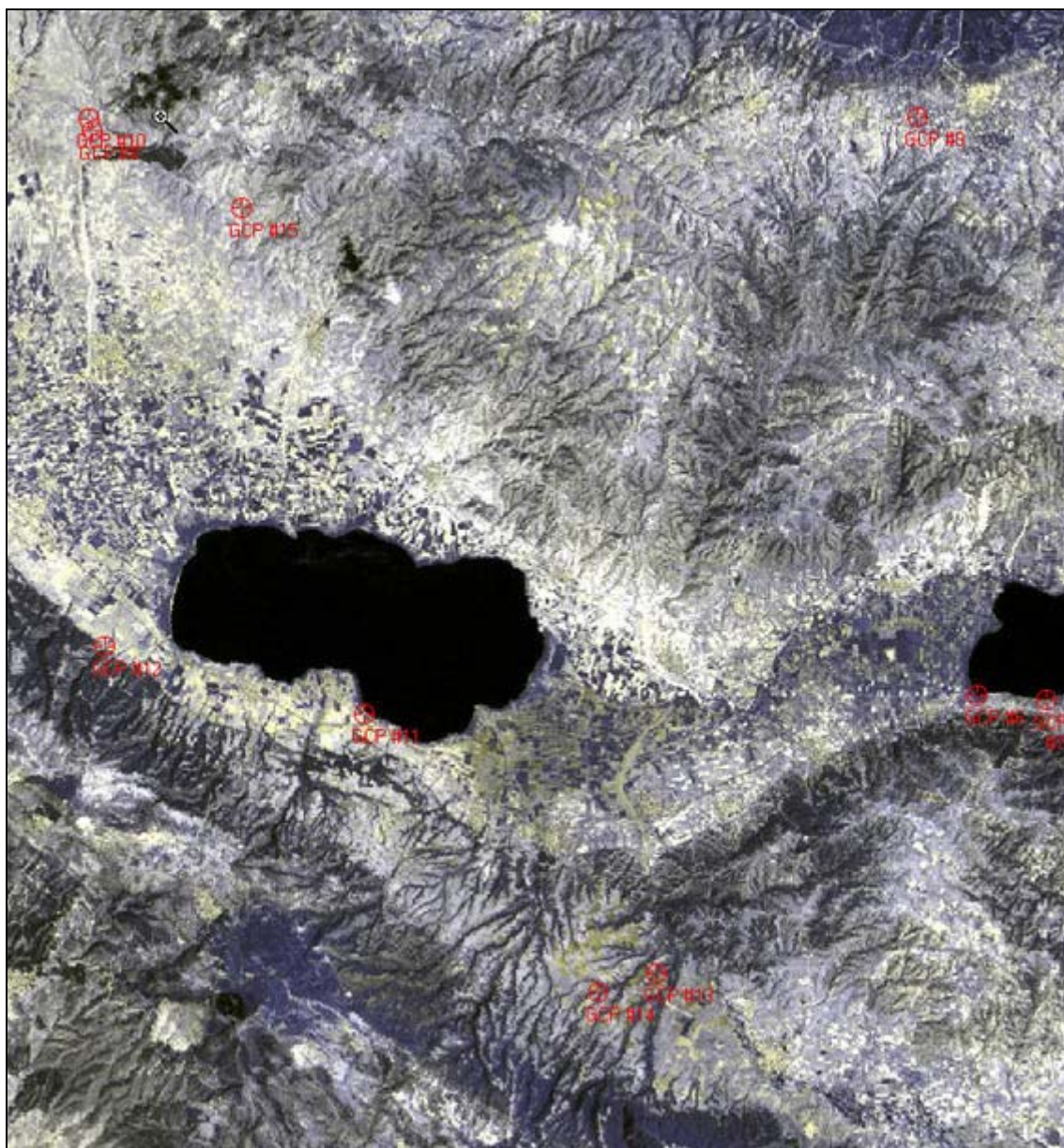
την ορθοαναγωγή της εικόνας TM, ως μέθοδος επαναδειγματοληψίας επιλέχθηκε και πάλι η μέθοδος της δικυβικής παρεμβολής.

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν δέκα σημεία ελέγχου, η θέση των οποίων παρουσιάζεται παρακάτω (Εικ. 33 & 34), τόσο στην εικόνα ραντάρ όσο και στην πολυφασματική εικόνα.



**Εικόνα 33. Τα 10 σημεία ελέγχου που επιλέχθηκαν στην εικόνα ραντάρ.**

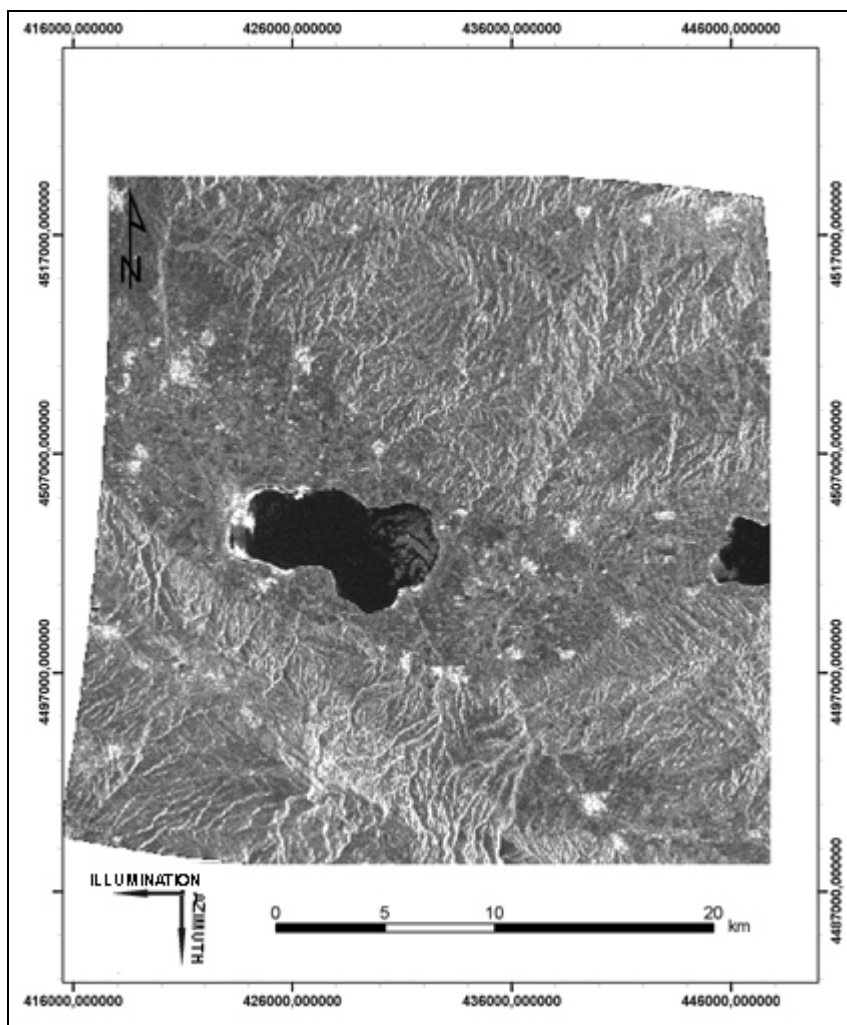




Εικόνα 34. Τα αντίστοιχα 10 σημεία ελέγχου στην πολυφασματική εικόνα.

Από τη διαδικασία της σχετικής εγγραφής των δύο εικόνων προέκυψε ολικό (total) μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square error/ **RMS**)  $\text{RMS}_{\text{error}} = 8,1152 \text{ m}$ , με  $X_{\text{RMSerror}} = 7,3267 \text{ m}$  και  $Y_{\text{RMSerror}} = 3,4894 \text{ m}$ . Η  $x$  συνιστώσα του σφάλματος παρουσιάζεται μεγαλύτερη, εξαιτίας της παραμόρφωσης των εικόνων ραντάρ, κατά τη διεύθυνση κάθετα στη γραμμή πτήσης (Συλλαίος, 2000). Οι συντεταγμένες, καθώς και τα σφάλματα κάθε σημείου, παρατίθενται αναλυτικά στο παράρτημα Γ.

Το σφάλμα που προκύπτει, ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της εγγραφής σε επίπεδο pixel, που, όπως προαναφέρθηκε, προϋποθέτει ακρίβεια σχετικής εγγραφής μεταξύ των εικόνων μικρότερη του μεγέθους του εικονοστοιχείου (sub-pixel accuracy). Δεδομένου ότι το εικονοστοιχείο τόσο στην εικόνα ASAR όσο και στην εικόνα TM αντιστοιχεί σε περιοχή  $30 \times 30 \text{ m}$ , το ολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα που προέκυψε ( $\text{RMS}_{\text{error}} = 8,1152 \text{ m}$ ) κρίνεται απολύτως ικανοποιητικό. Η εικόνα ραντάρ, η οποία προέκυψε μετά την εγγραφή της στην πολυφασματική εικόνα παρουσιάζεται στην εικόνα 35.



Εικόνα 35. Η εικόνα ραντάρ, όπως διαμορφώθηκε μετά τη σχετική εγγραφή της.

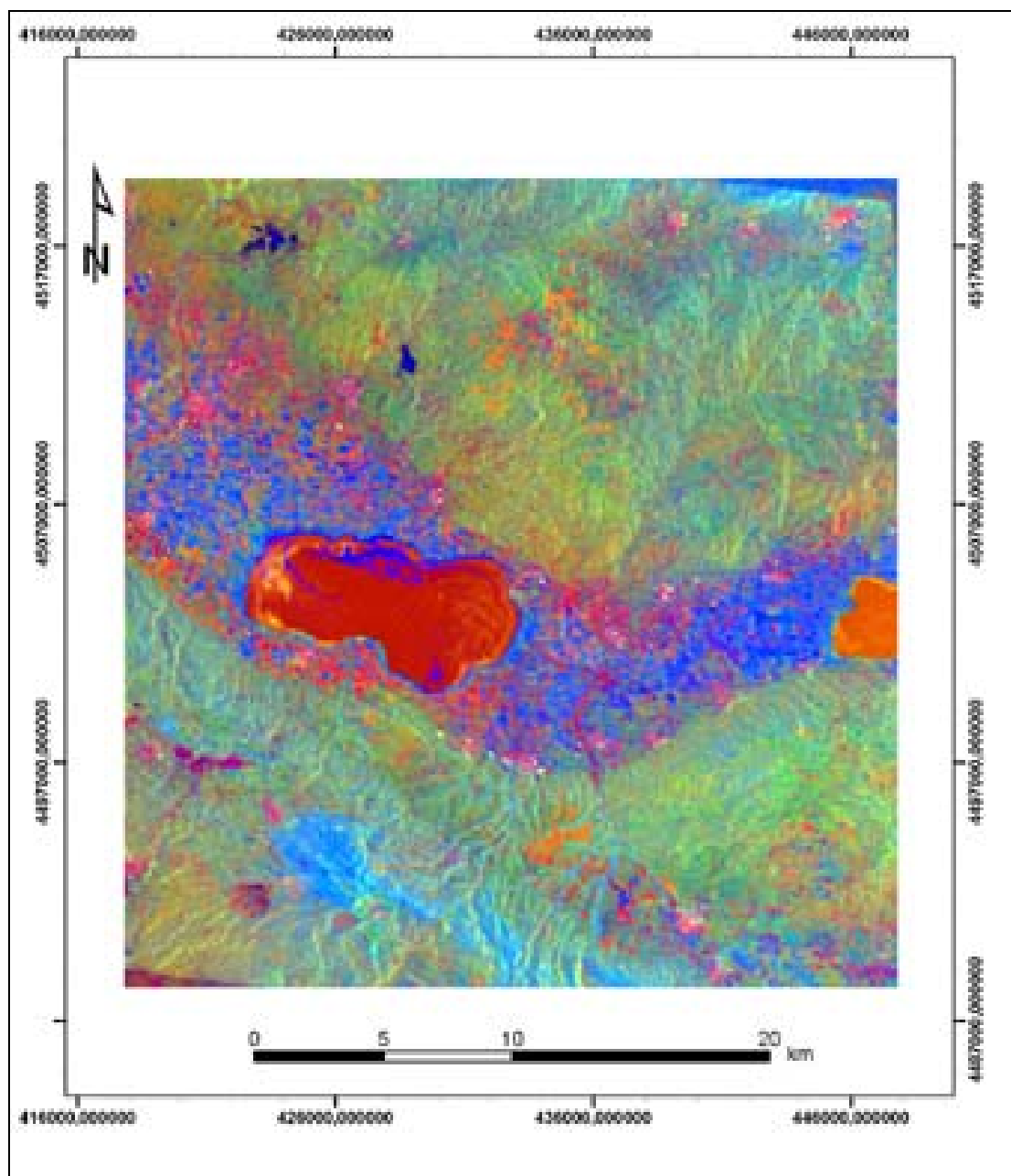
### 5.3.2. Συγχώνευση των εικόνων μετά τη σχετική εγγραφή

Για τη συγχώνευση των δύο εικόνων χρησιμοποιήθηκαν στατιστικές και αριθμητικές μέθοδοι και συγκεκριμένα ο μετασχηματισμός Κυρίων Συνιστωσών (PCT). Η επεξεργασία έγινε με το λογισμικό Erdas.

Κατά την παραπάνω διαδικασία υπολογίζονται αρχικά οι κύριες συνιστώσες της πολυφασματικής εικόνας, έπειτα αντικαθίσταται η πρώτη συνιστώσα (PC-1) με την πανχρωματική εικόνα (στην περίπτωση αυτή η εικόνα ραντάρ) και τέλος εκτελείται ένας αντίστροφος μετασχηματισμός Κυρίων Συνιστωσών.

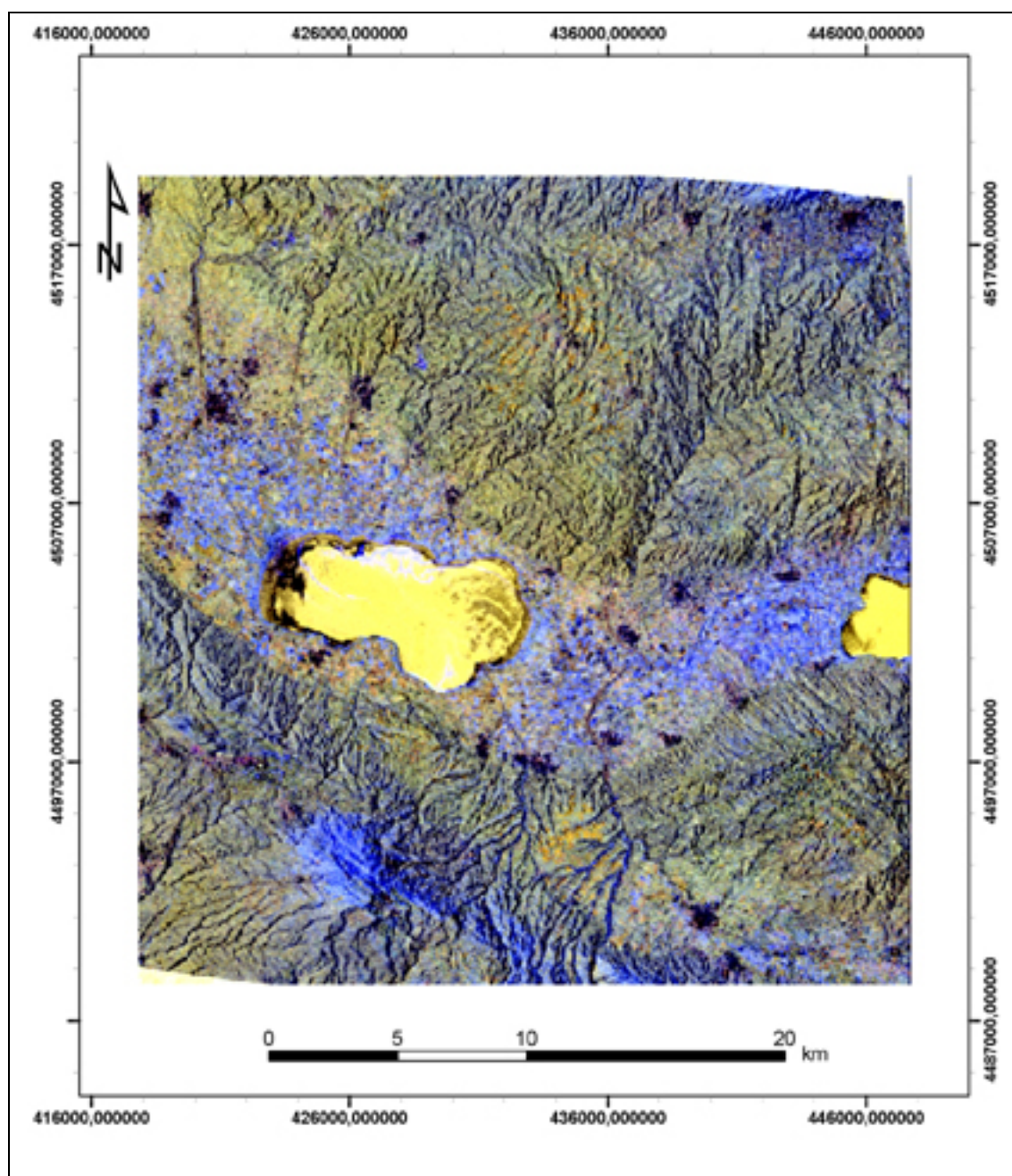
Η συγχώνευση έγινε σε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, όσον αφορά την εικόνα ραντάρ: Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η αρχική εικόνα ραντάρ (μετά τη σχετική εγγραφή της) δίχως περαιτέρω παρεμβάσεις, ενώ κατά τη δεύτερη προσέγγιση έγινε επιπλέον αντιστροφή της εικόνας ραντάρ πριν τη συγχώνευση, με στόχο να αξιοποιηθεί η τεχνική της αντιστροφής, η οποία έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα, στα προηγούμενα στάδια επεξεργασίας της εικόνας ραντάρ. Συνεπώς, προέκυψαν δύο διαφορετικές «συγχωνεύσεις» εικόνων (Εικ. 36 & 37), με τις οποίες αξιολογήθηκε η αποδοτικότητα της συνδυασμένης χρήσης της πολυφασματικής εικόνας και της

εικόνας ραντάρ, σε σύγκριση με την κάθε εικόνα μεμονωμένα, όσον αφορά τον εντοπισμό γραμμώσεων.



**Εικόνα 36.** Το αποτέλεσμα της συγχώνευσης των εικόνων TM και ASAR, σε ψευδοχρωματική απεικόνιση (R, G, B) = (7, 5, 4). Η εικόνα ραντάρ χρησιμοποιήθηκε αυτούσια δίχως περαιτέρω επεξεργασία, πέραν της σχετικής εγγραφής της στην πολυφασματική εικόνα.





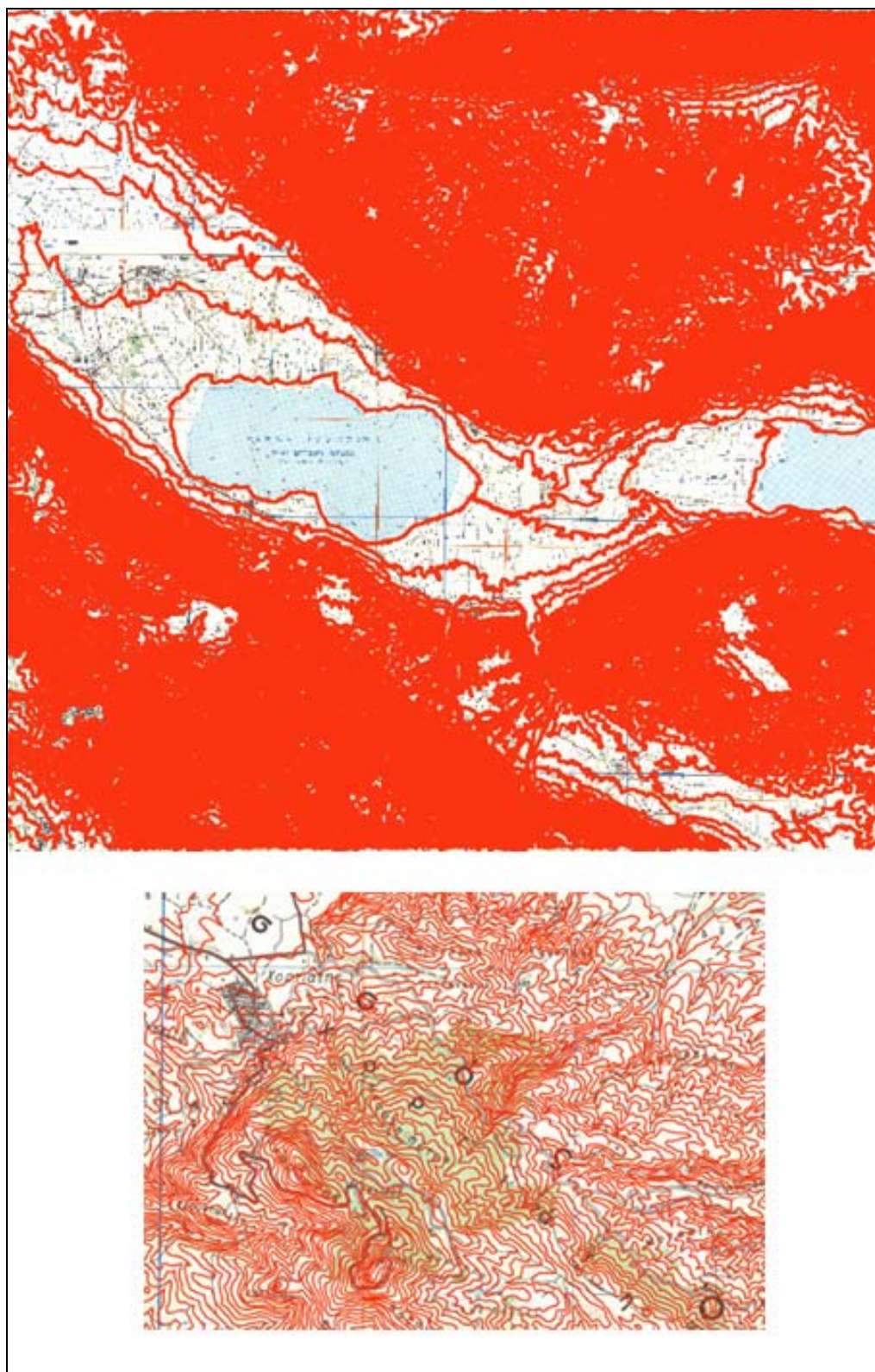
Εικόνα 37. Το αποτέλεσμα της συγχώνευσης των εικόνων TM και ASAR, σε ψευδοχρωματική απεικόνιση (R, G, B) = (7, 5, 4). Η εικόνα διαφέρει από την προηγούμενη, καθώς στην προκειμένη περίπτωση έγινε επιπλέον αντιστροφή της εικόνας ραντάρ, πριν τη συγχώνευση.



## 6.ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ Γ.Σ.Π. ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

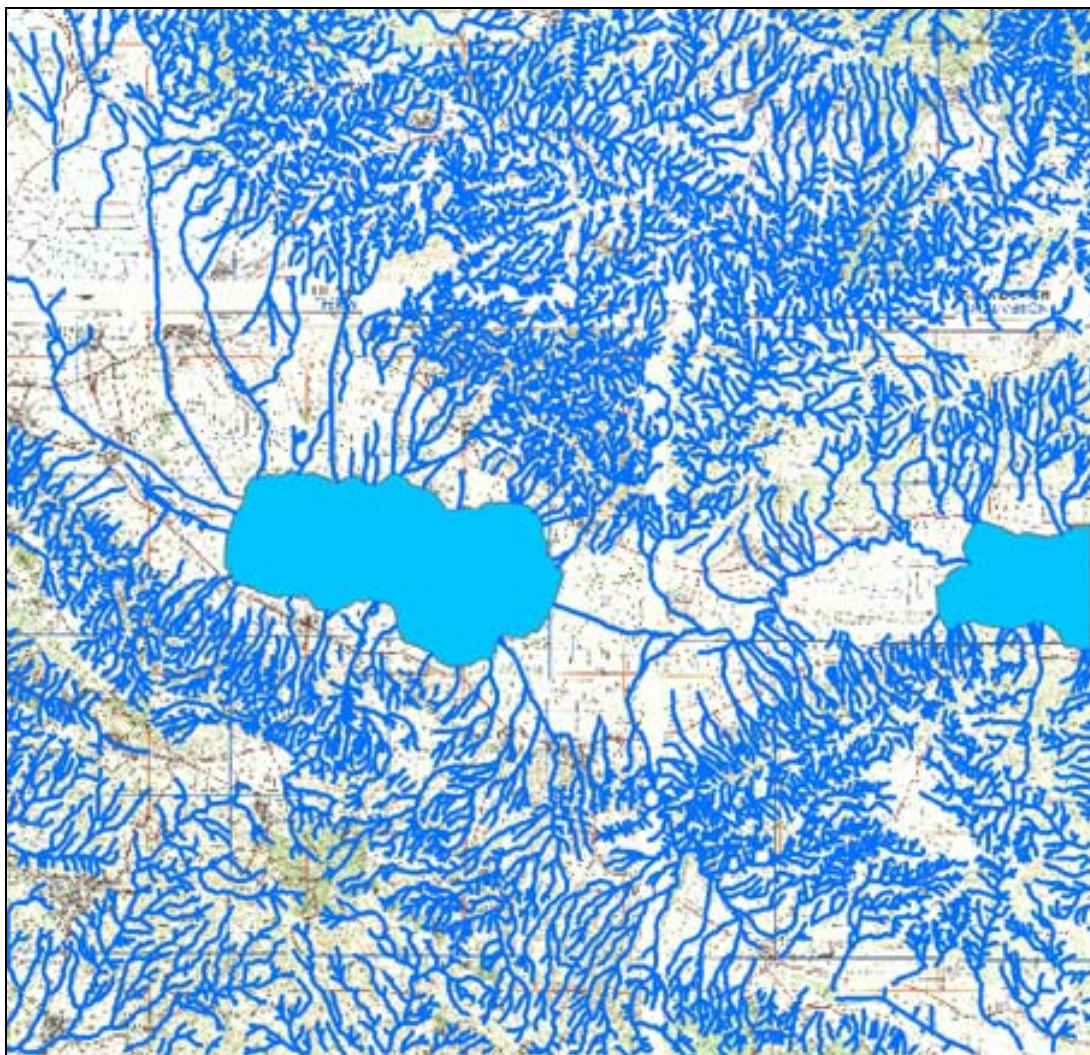
Εκτός από την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών και του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, όπως ήδη αναφέρθηκε στο στάδιο της επεξεργασίας των εικόνων, για την εξαγωγή του DEM, έγινε γεωαναφορά (georeferencing) των τοπογραφικών χαρτών 1:50.000 της Γ.Υ.Σ. (φύλλα: Θέρμη, Σοχός, Ζαγκλιβέριον, Λαχανάς) στο νέο Ελληνικό Datum, καθώς και του νεοτεκτονικού χάρτη του Ο.Α.Σ.Π. (φύλλο: Λαγκαδάς) κλίμακας 1:100.000. Από τους χάρτες αυτούς ψηφιοποιήθηκαν τα δεδομένα που ενδιέφεραν την παρούσα εργασία. Συνολικά, με τη χρήση του λογισμικού G.I.S. ArcGIS 9 δημιουργήθηκαν τα εξής επίπεδα πληροφοριών για την περιοχή μελέτης:

- Ισοϋψείς καμπύλες (ισοδιάσταση 20 m), από τους τοπογραφικούς χάρτες της Γ.Υ.Σ. κλίμακας 1:50.000 και υδρογραφικό δίκτυο από τους προαναφερθέντες τοπογραφικούς χάρτες της Γ.Υ.Σ. κλίμακας 1:50.000
- Ρήγματα, σύμφωνα με τον νεοτεκτονικό χάρτη 1:100.000
- Γραμμές, οι οποίες εντοπίστηκαν στην πολυφασματική εικόνα (TM)
- Γραμμές, οι οποίες εντοπίστηκαν στην εικόνα ραντάρ (ASAR)
- Γραμμές, οι οποίες εντοπίστηκαν στις εικόνες που προέκυψαν από τη συγχώνευση των δύο παραπάνω εικόνων



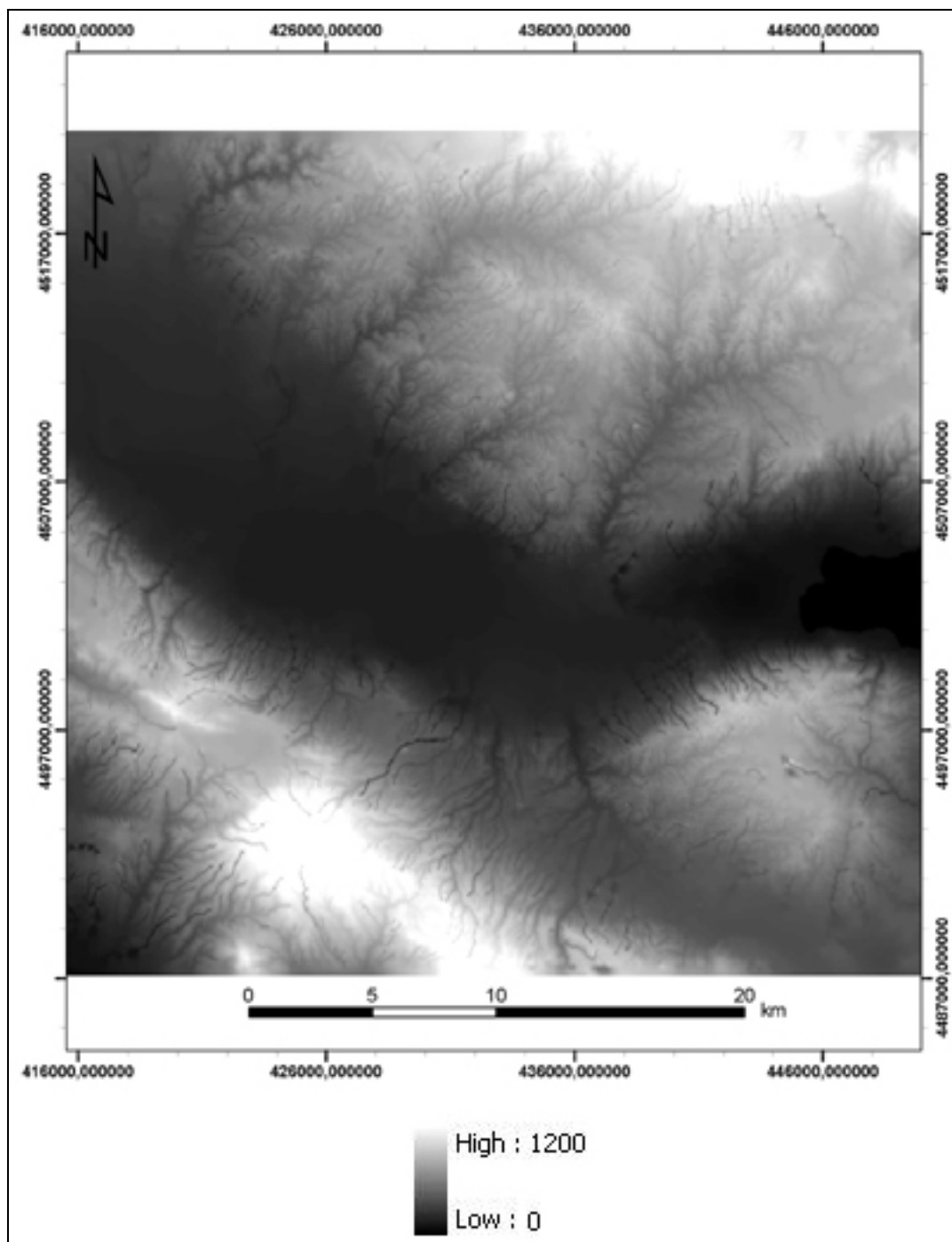
Εικόνα 38. Ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών (ανά 20m), από τους τοπογραφικούς χάρτες 1:50.000 της Γ.Υ.Σ.





**Εικόνα 39. Ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου και των λιμνών της περιοχής μελέτης, από τους τοπογραφικούς χάρτες 1:50.000 της Γ.Υ.Σ.**

Με την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών (Εικ. 38), του υδρογραφικού δικτύου και των λιμνών (Εικ. 39) από τους τοπογραφικούς χάρτες 1:50.000 της Γ.Υ.Σ. (ισοδιάσταση 20 μέτρα) δημιουργήθηκε υδρολογικά διορθωμένο DEM, με διάσταση ψηφίδας 20 m, χρησιμοποιώντας των αλγόριθμου “topogridtool” του λογισμικού ArcGIS ( Εικ. 40).



Εικόνα 40. Υδρολογικά διορθωμένο DEM με διάσταση ψηφίδας 20m, που προέκυψε με την εφαρμογή "topogridtool" του ArcGIS, μετά την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών και του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης.

Το παραπάνω DEM, αξιοποιήθηκε κατά την ορθοαναγωγή της εικόνας Landsat. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ως επίπεδο υψομετρικής πληροφορίας, κατά την οπτικοποίηση (visualization) των δεδομένων και των αποτελεσμάτων με τα G.I.S.

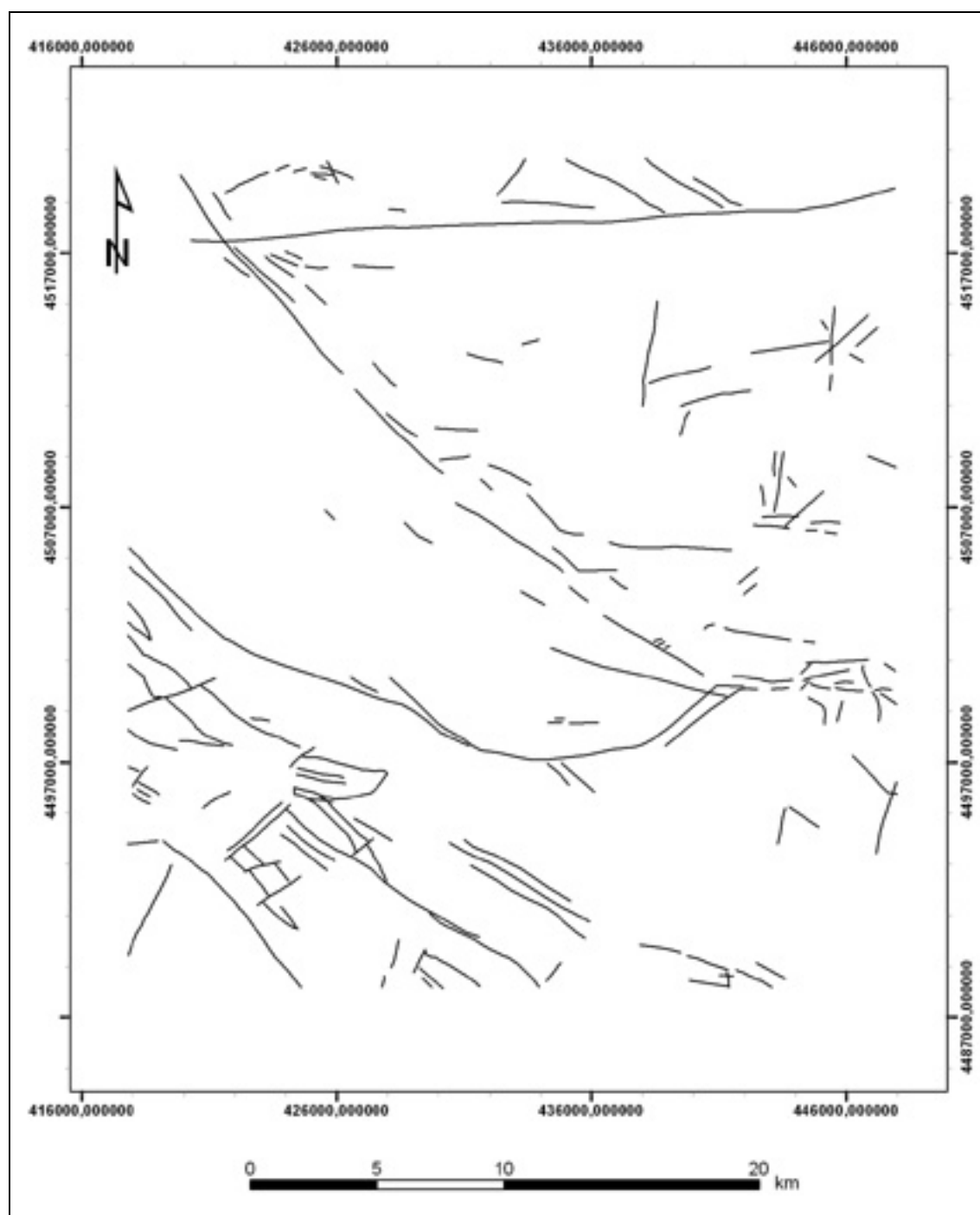
Με το λογισμικό ArcGIS, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο τις καλύτερες από τις εικόνες που προέκυψαν από την επεξεργασία της πολυφασματικής εικόνας και της εικόνας ραντάρ, καθώς και



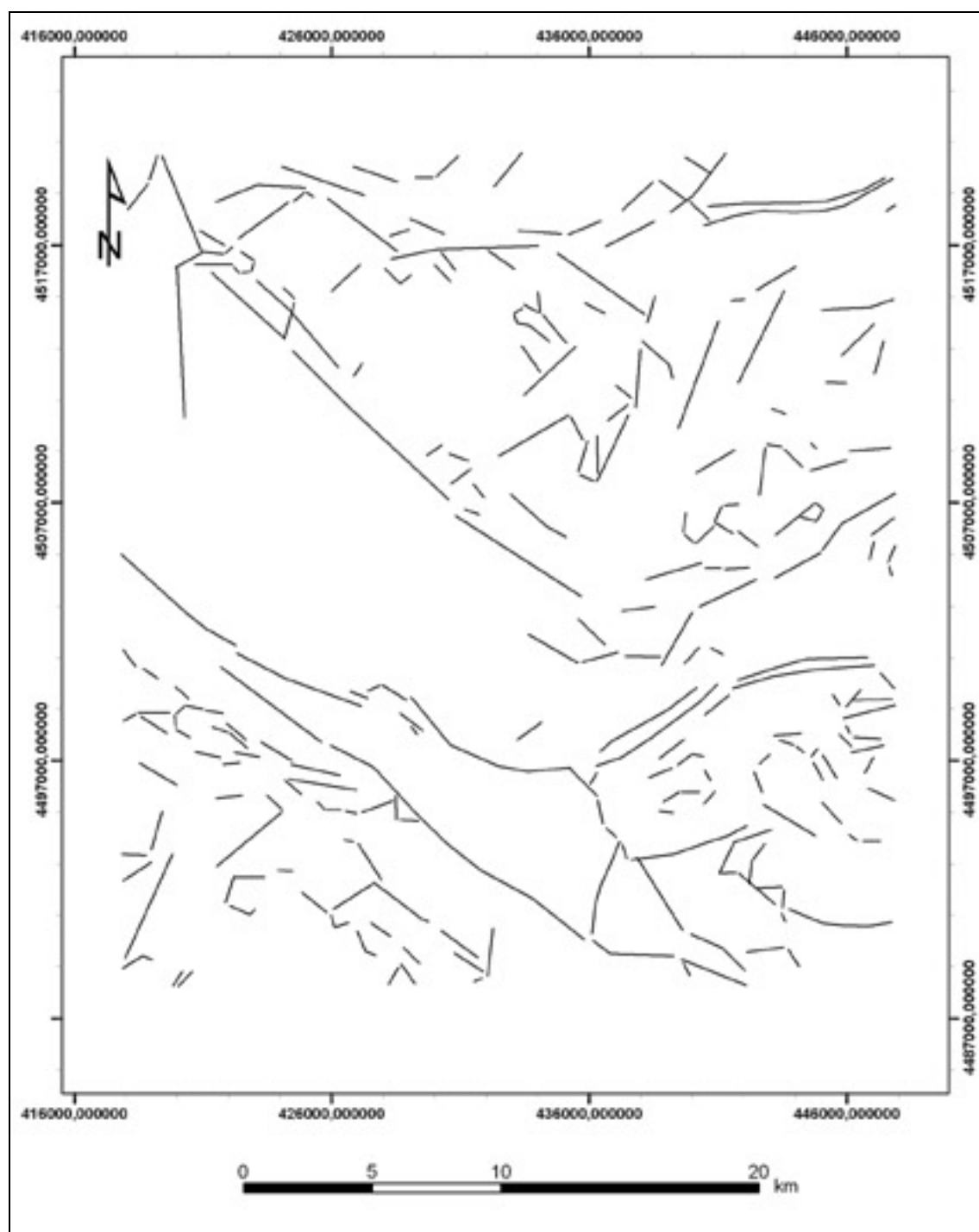
τις εικόνες συγχώνευσης, δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα επίπεδα πληροφοριών, με τις γραμμώσεις που εμφανίζονται σε κάθε περίπτωση (Εικ. 41-45).

Ως γραμμώσεις θεωρήθηκαν δύο κυρίως είδη επιφανειακών χαρακτηριστικών: (1) τα γεωμορφολογικά, τα οποία είναι αποτέλεσμα του αναγλύφου και (2) τα χαρακτηριστικά που οφείλονται σε τονικές διαφορές (Sabins 1987, Ananaba and Ajakaiye 1987, από Astaras 1991). Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν ευθύγραμμες γεωμορφολογικές ενότητες (land forms), ευθυτενής κοιλάδες ποταμών και τμήματα ρεμάτων. Οι τονικές διαφοροποιήσεις αναφέρονται στην αντίθεση που προκαλείται, πρωτίστως από διαφορές στη βλάστηση, την υγρασία, το έδαφος ή τη λιθολογία (Astaras 1990, 1991).

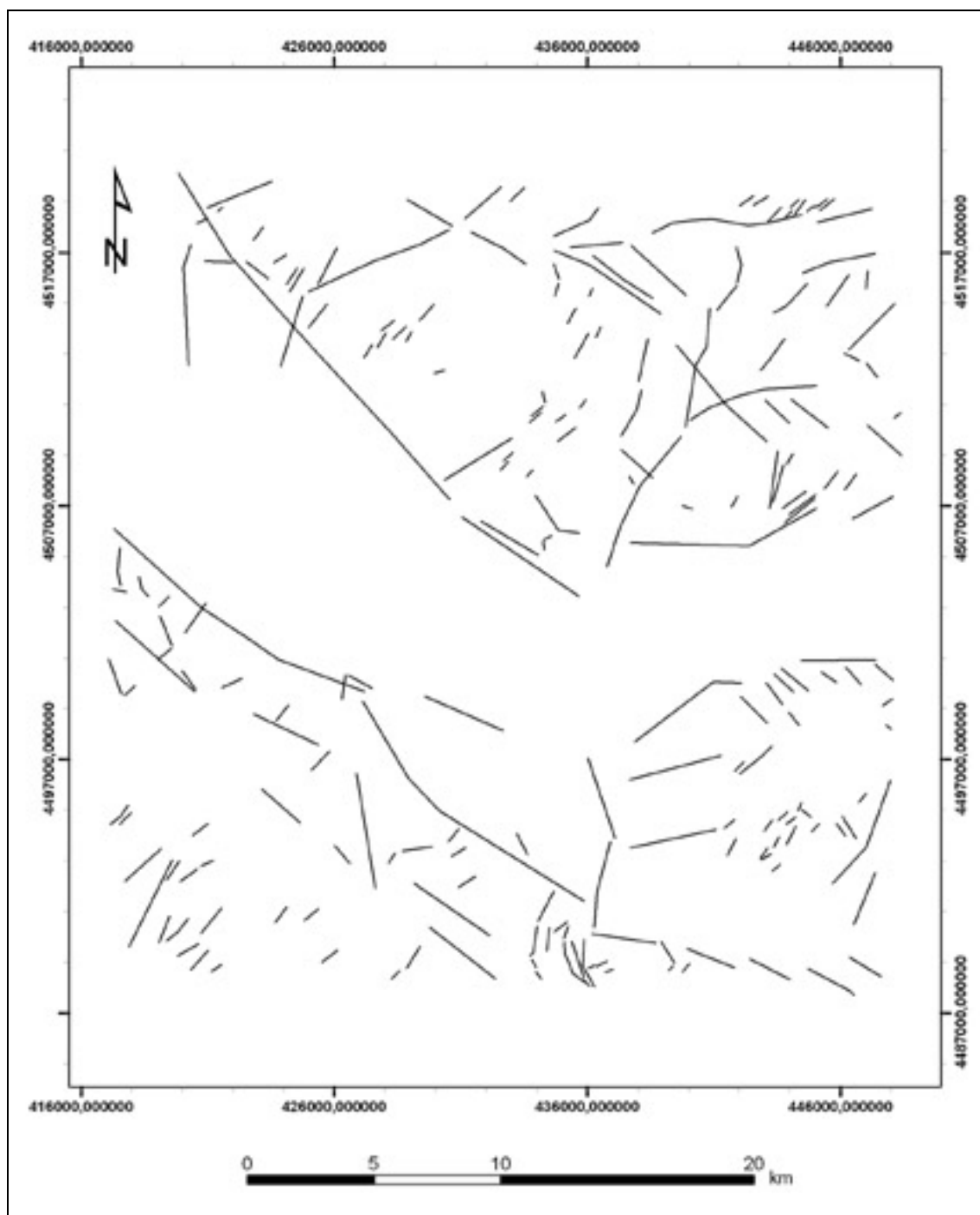
Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκαν βοηθητικά οι διαθέσιμοι γεωλογικοί και τοπογραφικοί χάρτες της περιοχής μελέτης, οι πρώτοι για την επιβεβαίωση ορισμένων γραμμώσεων και οι δεύτεροι για την αποφυγή θεώρησης ως γραμμώσεων, σχετικά ευθύγραμμων τμημάτων του οδικού δικτύου.



Εικόνα 41. Γραμμώσεις (ρήγματα) του Νεοτεκτονικού χάρτη.

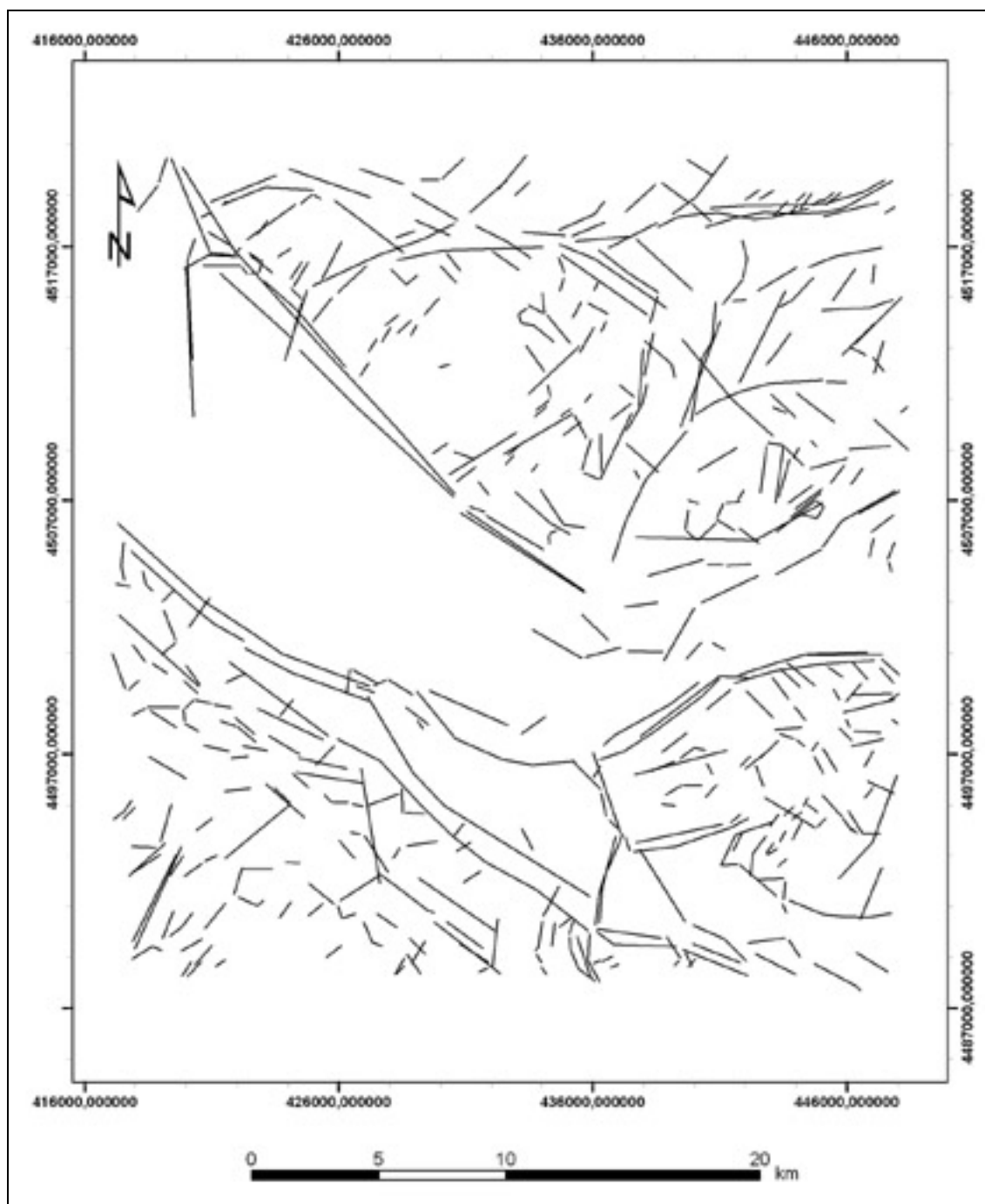


Εικόνα 42. Γραμμές που προέκυψαν από την εικόνα TM του δορυφόρου Landsat-5.

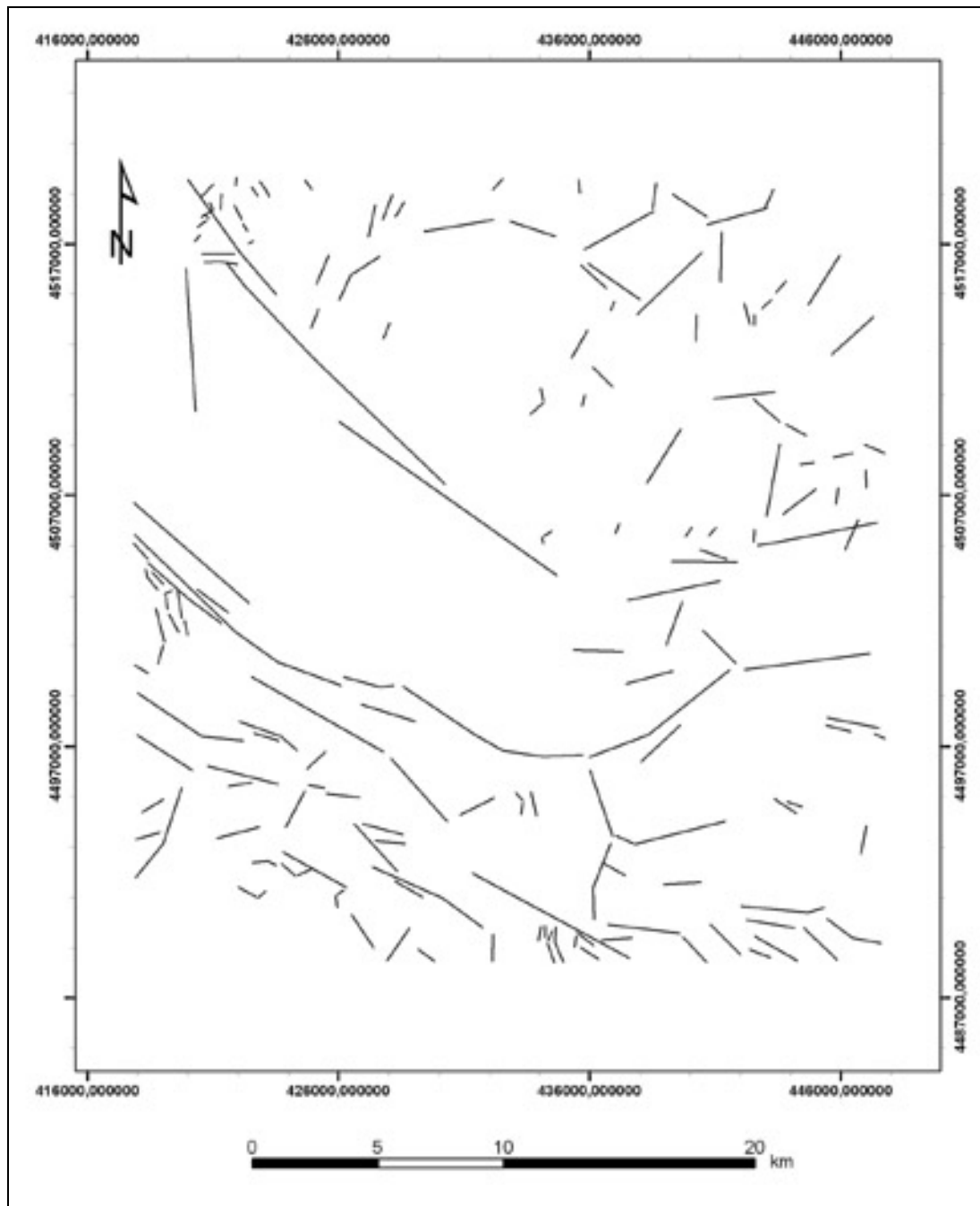


Εικόνα 43. Γραμμές που προέκυψαν από την εικόνα ραντάρ (Envisat/ASAR).





Εικόνα 44. Συνολικές γραμμώσεις που προέκυψαν από την εικόνα TM του δορυφόρου Landsat-5 και την εικόνα ραντάρ (Envisat/ASAR) (Υπέρθεση Εικ. 42 & 43).



**Εικόνα 45.** Γραμμές που προέκυψαν από τη συγχώνευση της πολυφασματικής εικόνας (Landsat-5/TM) και της εικόνας ραντάρ (Envisat/ASAR).

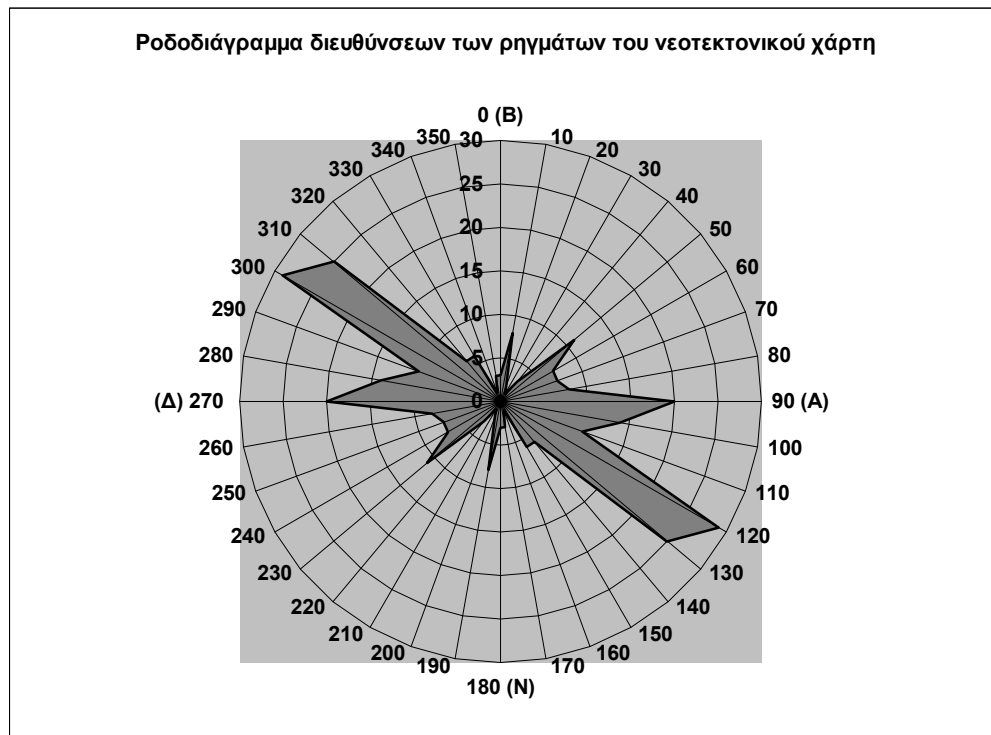
Η καταγραφή, σε πίνακες (βλ. παράρτημα Γ), του αριθμού, των διευθύνσεων (αζιμουθίων) και των μηκών των γραμμώσεων που χαρτογραφήθηκαν, έγινε με το λογισμικό MapInfo και συγκεκριμένα με το «εργαλείο» (tool) “GeoMapVector”. Διευκρινίζεται, ότι το μήκος κάθε γράμμωσης είναι το μήκος που μετράται, ακολουθώντας την πορεία της γραμμής (polyline). Όταν αλλάζει παράταξη, η γράμμωση διατηρείται ως μία δομή και η διεύθυνσή της είναι η γενική διεύθυνση της ευθείας που συνδέει το πρώτο και τελευταίο σημείο της γράμμωσης.

Ακολούθησε στατιστική ανάλυση των παραπάνω δεδομένων.

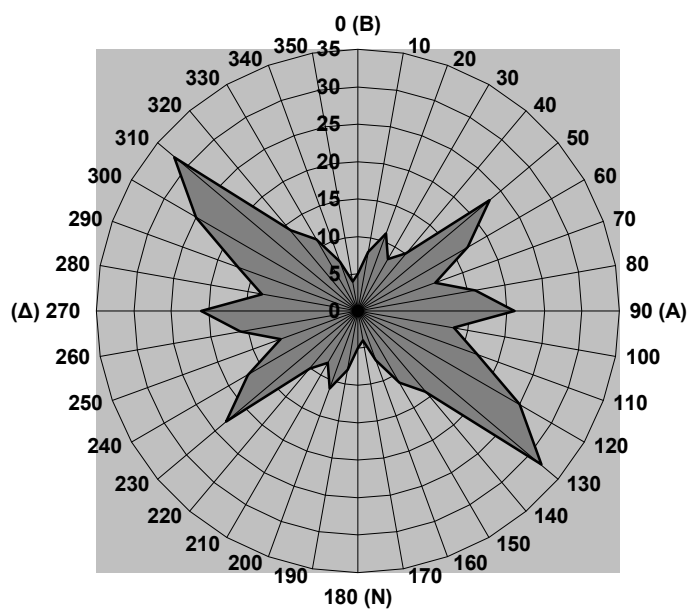
## 7.ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα ιστογράμματα και τα ροδοδιαγράμματα αποτελούν ορισμένες από τις απλούστερες μεθόδους απεικόνισης της κατανομής της συχνότητας των διευθύνσεων των γραμμώσεων. Η εμφάνιση γραμμώσεων σε έναν χάρτη ή εικόνα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, χρησιμοποιώντας είτε τη συχνότητα (αριθμός γραμμώσεων ανά μονάδα επιφάνειας) ή την πυκνότητα (συνολικό μήκος γραμμώσεων ανά μονάδα επιφάνειας) (Mostafa and Zakir, 1996). Η ανάλυση των δεδομένων σύμφωνα με τα παραπάνω, έδωσε τα αποτελέσματα που ακολουθούν.

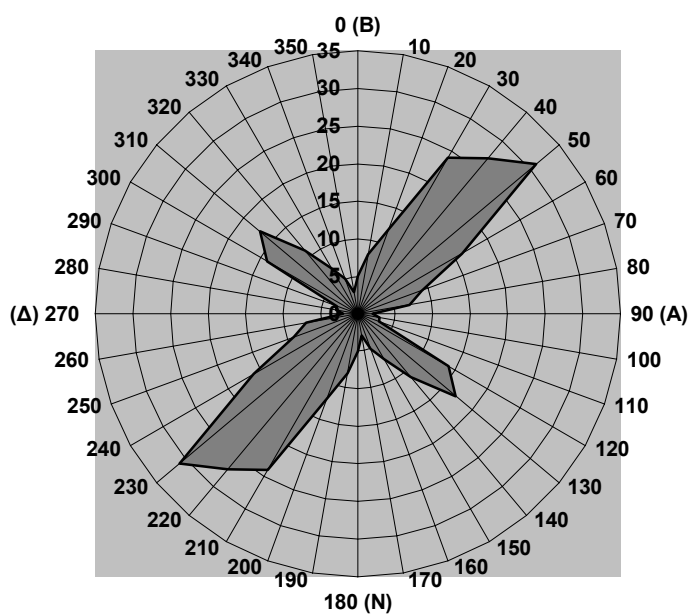
Αρχικά, δημιουργήθηκαν τα ροδοδιαγράμματα παρατάξεων (διευθύνσεων ή αζιμουθίων), για τις διαφορετικές πηγές δεδομένων (νεοτεκτονικός χάρτης, Landsat-5/TM, Envisat/ASAR, συγχώνευση εικόνων), τα οποία έχουν ως εξής:



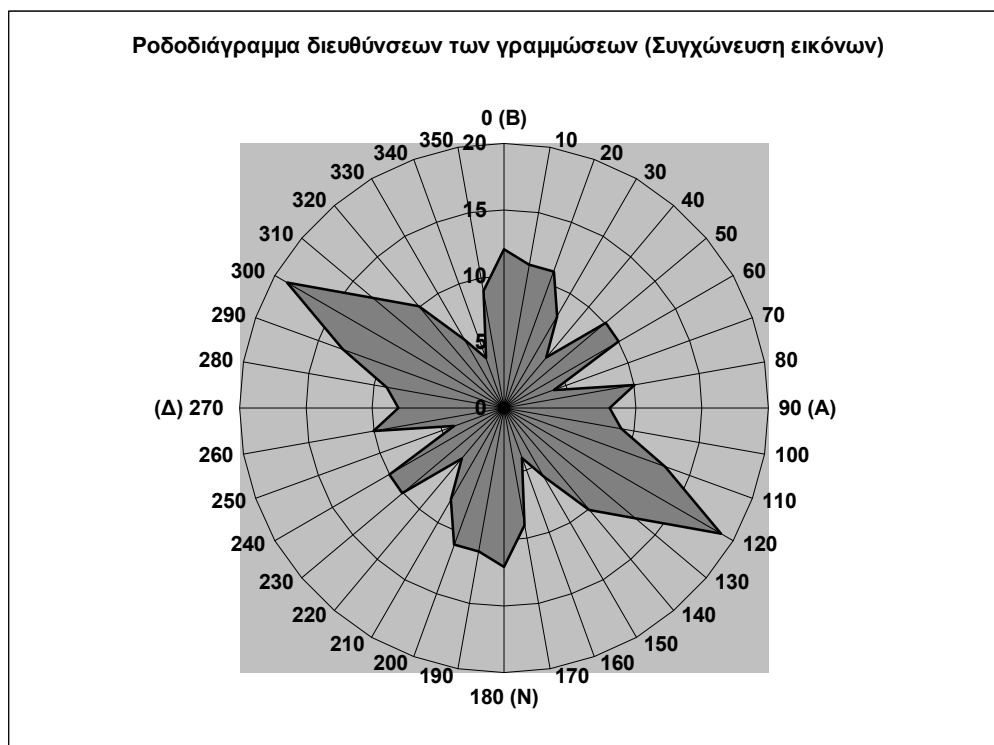
Ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων των γραμμώσεων (Landsat-5/TM)



Ροδοδιάγραμμα διευθύνσεων των γραμμώσεων (Envisat/ASAR)







Όσον αφορά τη συχνότητα και την πυκνότητα των γραμμώσεων, τα συγκεντρωτικά δεδομένα ήταν τα εξής (Πιν. 1):

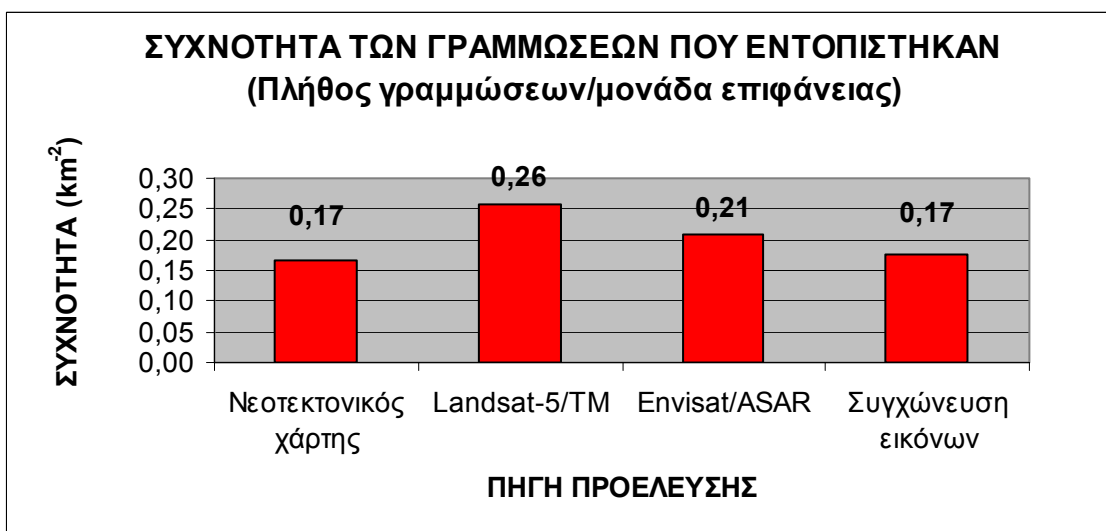
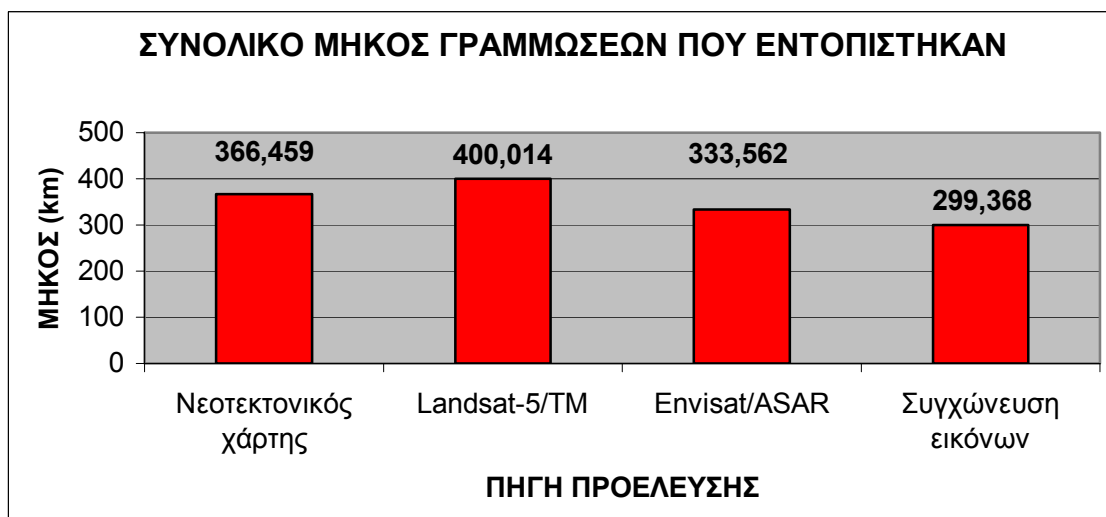
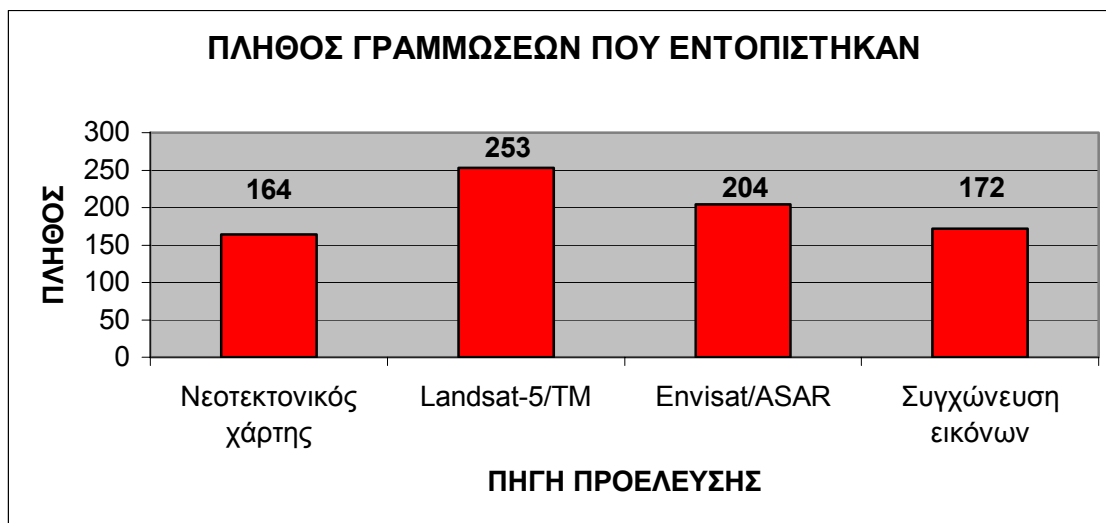
| Πηγή προέλευσης      | Γραμμώσεις      |                     |                               |                               |
|----------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                      | Συνολικό πλήθος | Συνολικό μήκος (km) | Συχνότητα (km <sup>-2</sup> ) | Πυκνότητα (km <sup>-1</sup> ) |
| Νεοτεκτονικός χάρτης | 164             | 366,459             | 0,17                          | 0,37                          |
| Εικόνα Landsat-5/TM  | 253             | 400,014             | 0,26                          | 0,41                          |
| Εικόνα Envisat/ASAR  | 204             | 333,562             | 0,21                          | 0,34                          |
| Συγχώνευση εικόνων   | 172             | 299,368             | 0,17                          | 0,30                          |

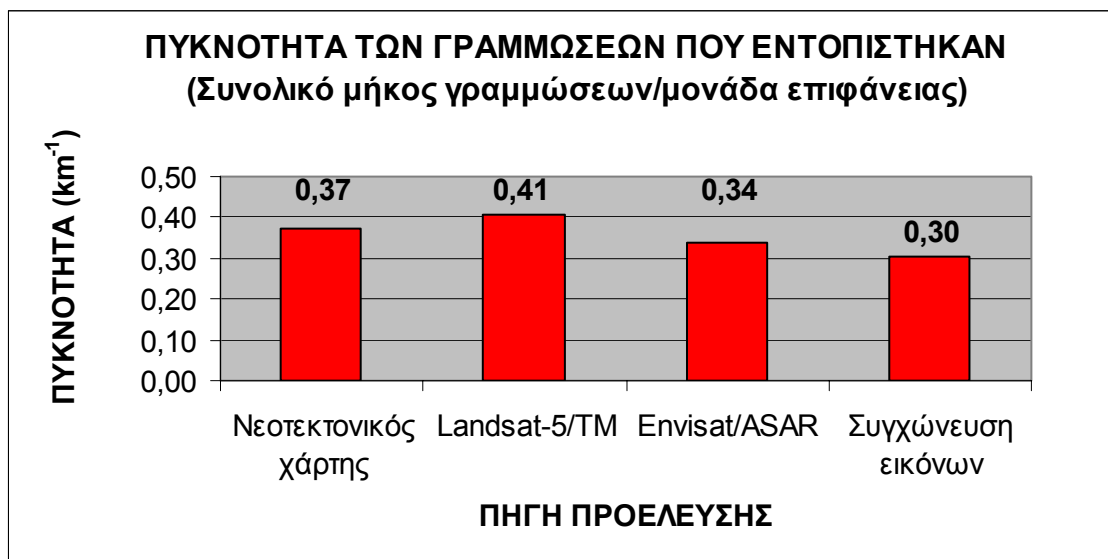
Πίνακας 1. Συγκεντρωτικά δεδομένα, σχετικά με τη συχνότητα και πυκνότητα των γραμμώσεων.

Όπως προκύπτει από τους πίνακες του παραρτήματος Γ, το ελάχιστο μήκος γραμμώσης που καταγράφηκε σε κάθε μία από τις πηγές δεδομένων έχει ως εξής:

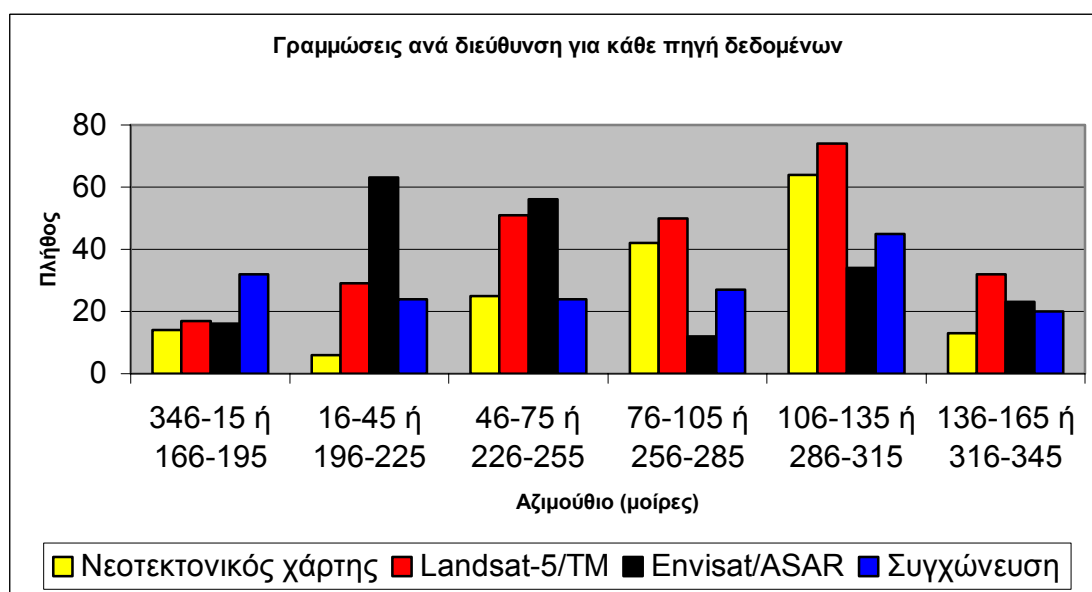
| Πηγή προέλευσης      | Ελάχιστο μήκος γραμμώσης (km) |
|----------------------|-------------------------------|
| Νεοτεκτονικός χάρτης | 0,222                         |
| Εικόνα Landsat-5/TM  | 0,246                         |
| Εικόνα Envisat/ASAR  | 0,251                         |
| Συγχώνευση εικόνων   | 0,219                         |

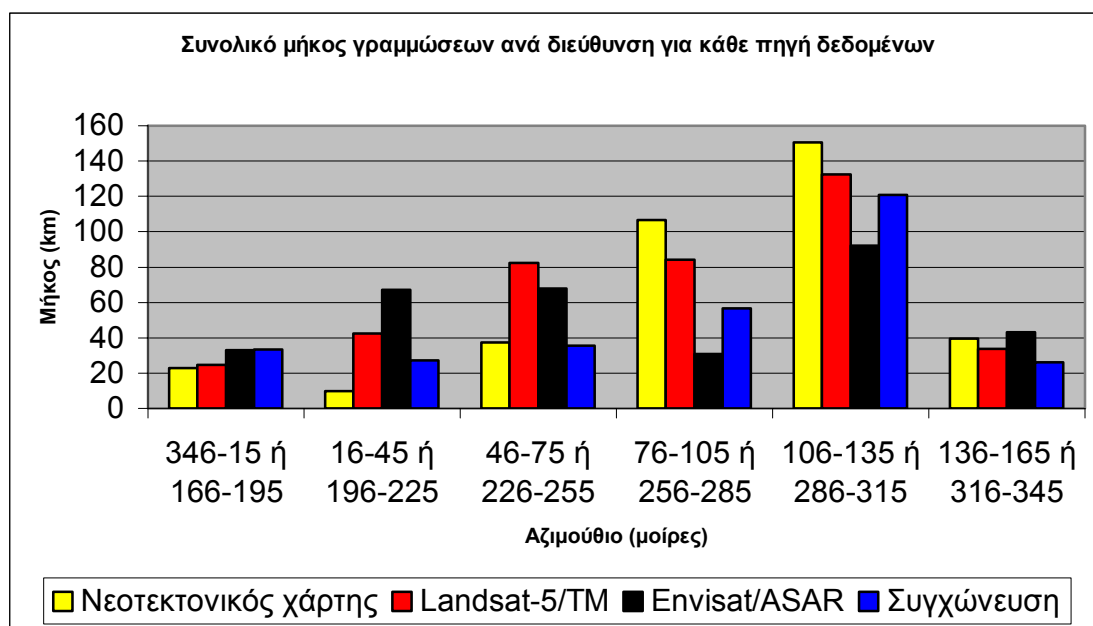
Από το παραπάνω δεδομένα προέκυψαν τα ακόλουθα ιστογράμματα:



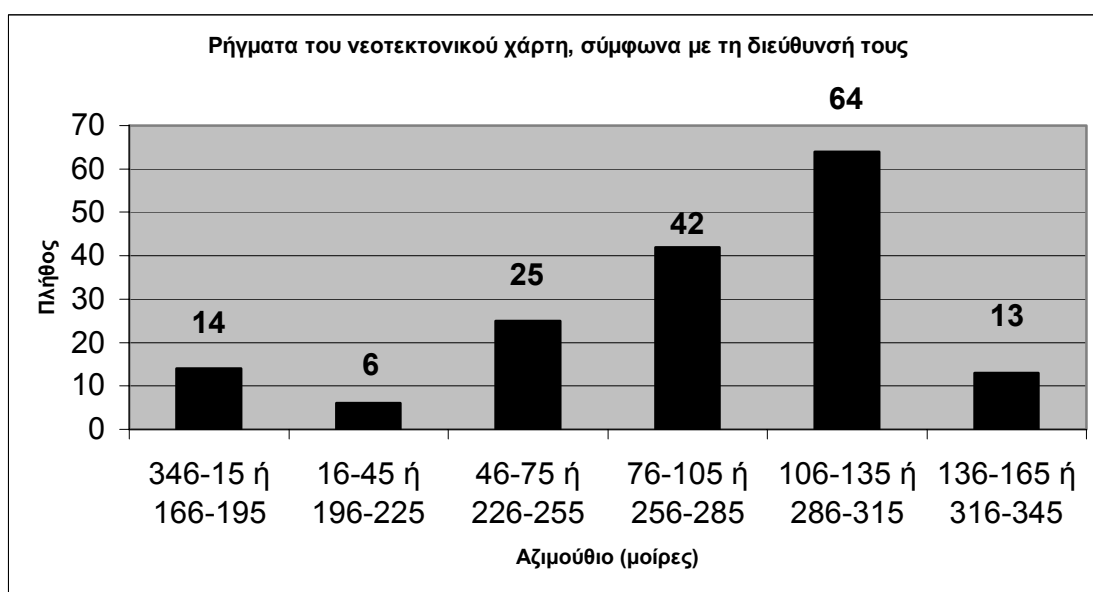


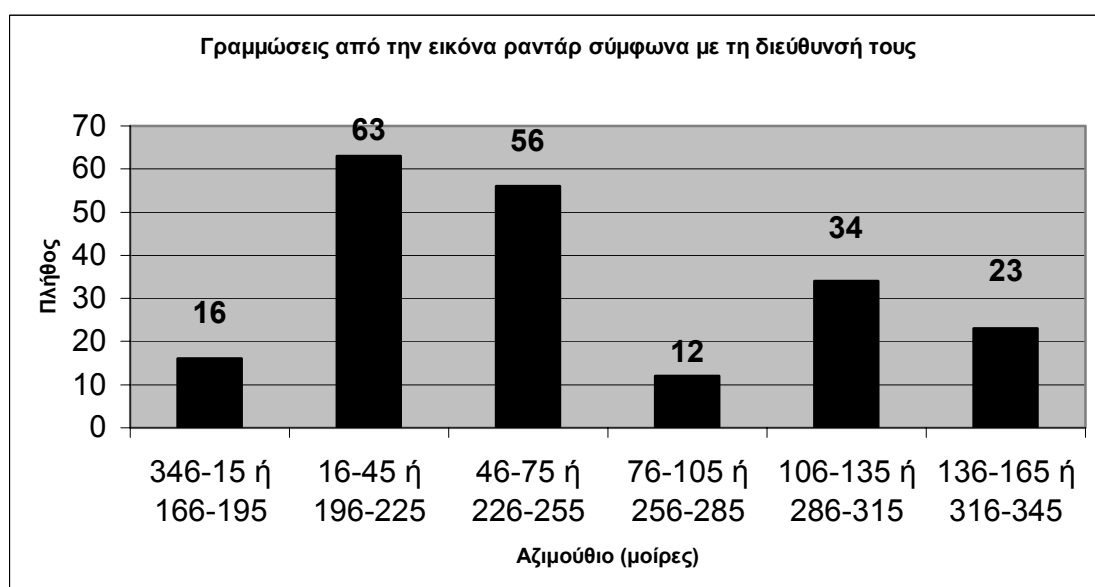
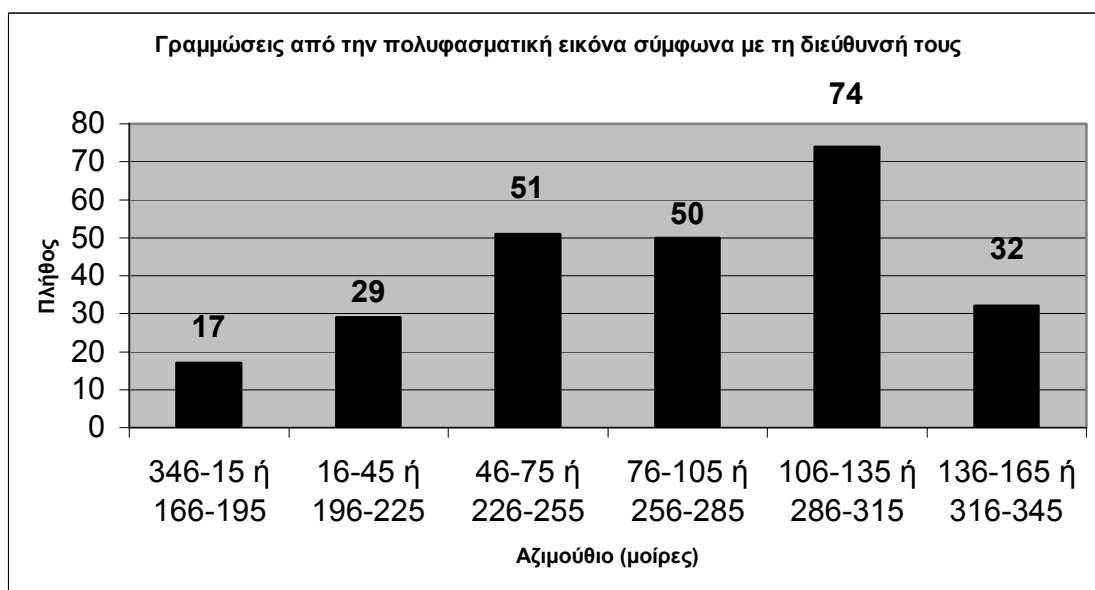
Λαμβάνοντας υπόψη τη διεύθυνση (αζιμούθιο) των γραμμώσεων και ομαδοποιώντας τις ανά  $30^\circ$ , προκύπτουν τα ακόλουθα δύο συγκριτικά ιστογράμματα:



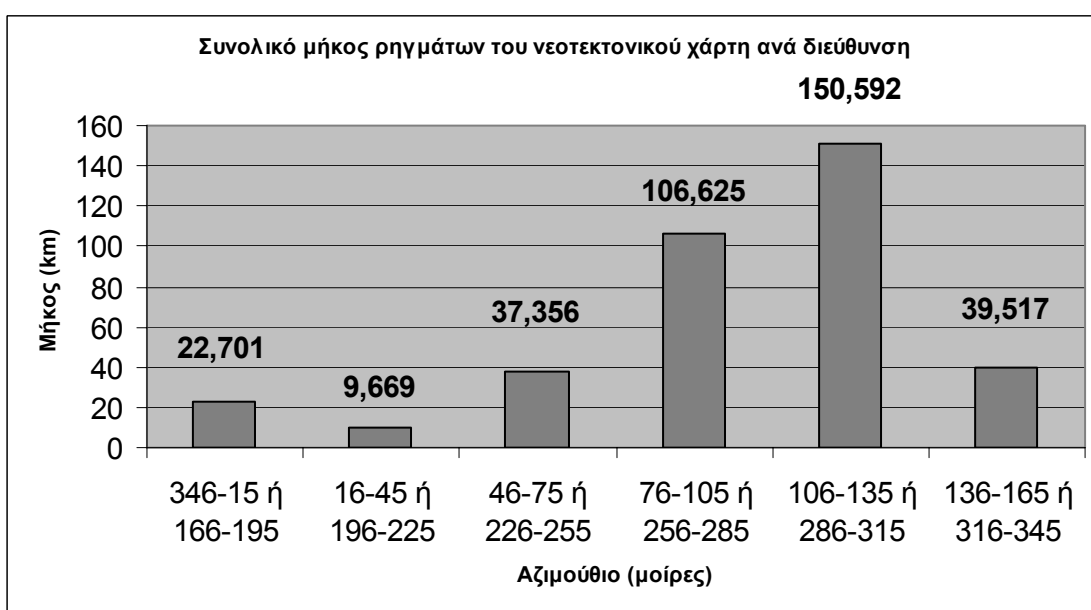
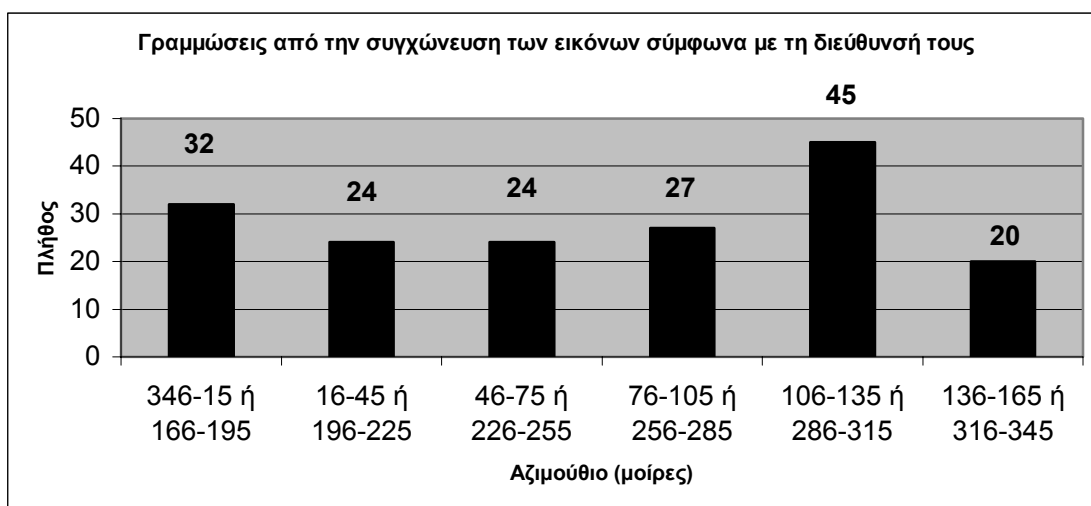


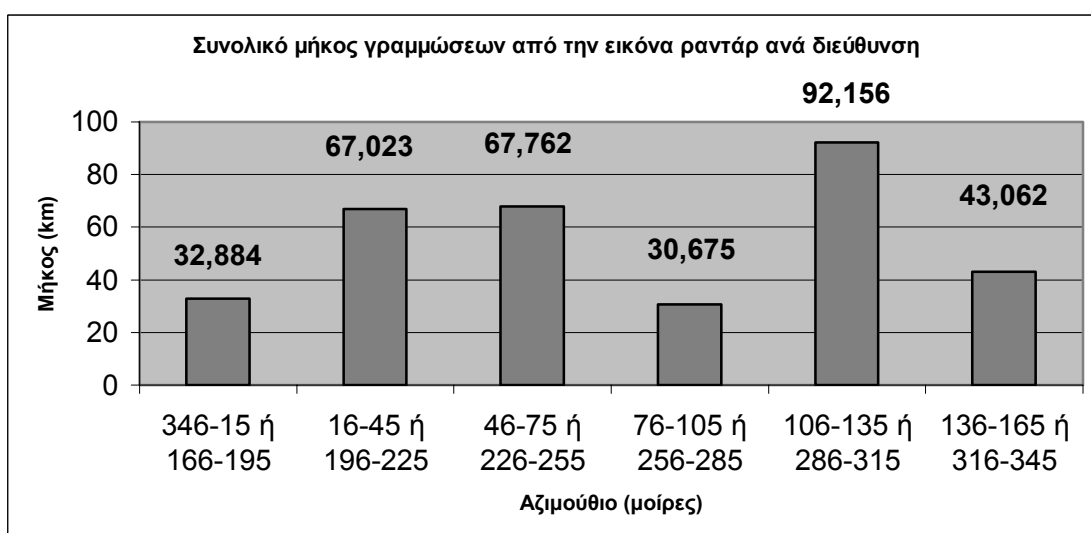
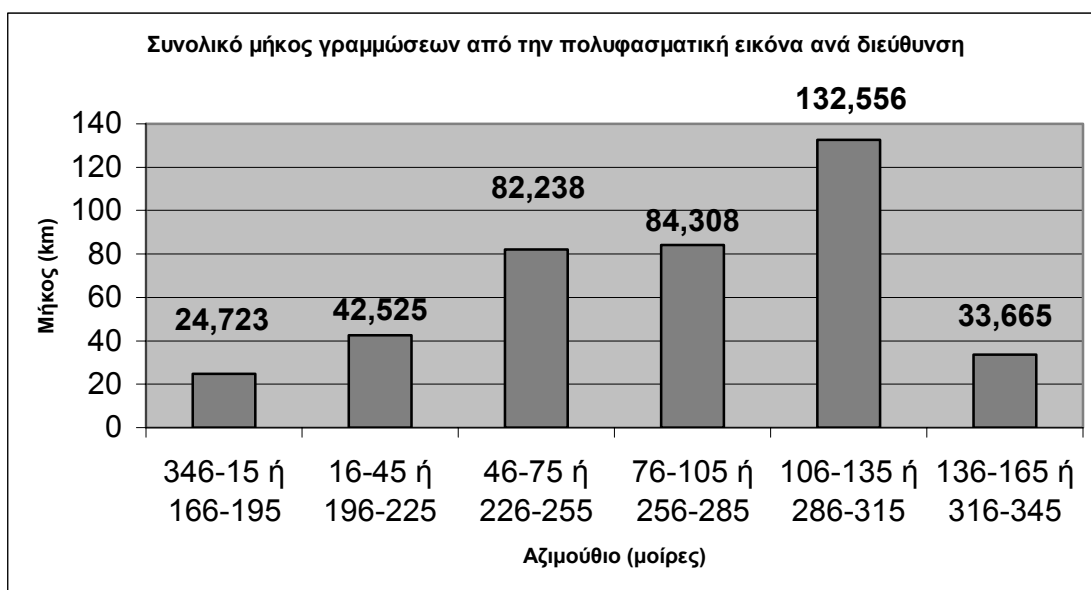
Αναλυτικότερα, τα επιμέρους ιστογράμματα έχουν ως εξής:

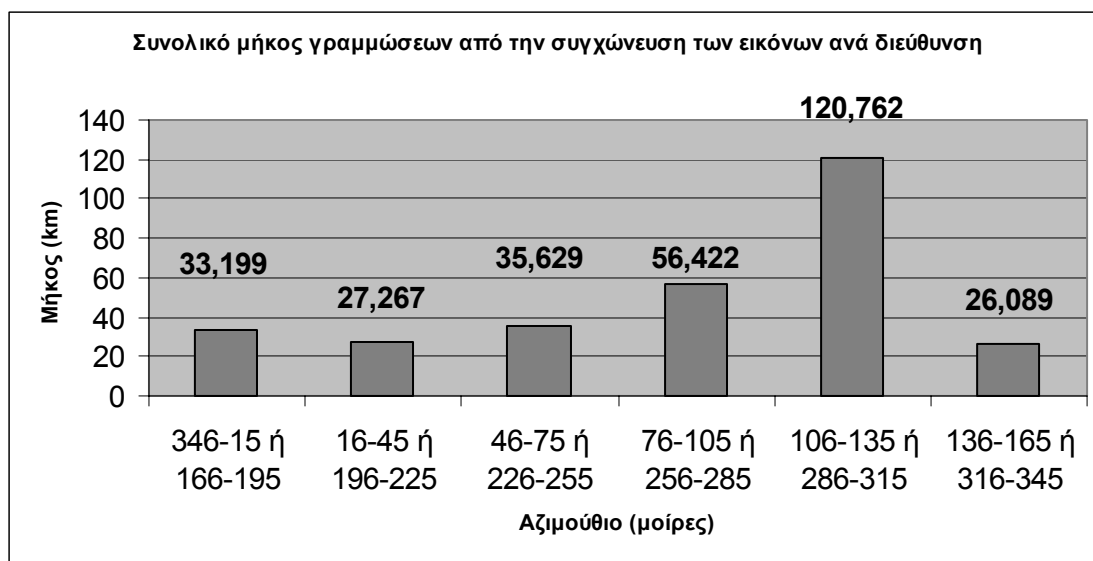












## 8.ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μία πολυφασματική δορυφορική εικόνα (Landsat-5\TM) και μία δορυφορική εικόνα ραντάρ (Envisat\ASAR), που απεικονίζουν το δυτικό τμήμα της ευρύτερης περιοχής της Μυγδονίας λεκάνης. Σκοπός της εργασίας ήταν η αξιολόγηση της δυνατότητας εντοπισμού και χαρτογράφησης γραμμώσεων (lineaments) από τις παραπάνω δορυφορικές εικόνες, χωρίς να εξετάζεται το είδος των δομών που αντιπροσωπεύουν (δηλαδή αν είναι ρήγματα, λιθολογικά όρια κ.λ.π.), καθώς και ο πειραματισμός με ορισμένες, από τις πλέον πολυάριθμες, μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, με στόχο τη βέλτιστη απεικόνιση των γραμμώσεων, στις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν.

Αρχικά έλαβε χώρα η καταγραφή των γραμμώσεων από κάθε εικόνα μεμονωμένα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε συνδυασμός (συγχώνευση) της πολυφασματικής δορυφορικής εικόνας και της δορυφορικής εικόνας ραντάρ, για πιθανή βελτίωση της δυνατότητας εντοπισμού γραμμώσεων.

Ακολούθησε στατιστική ανάλυση του αριθμού, των διευθύνσεων και των μηκών των γραμμώσεων που χαρτογραφήθηκαν, με τη χρήση ροδοδιαγραμμάτων και ιστογραμμάτων, καθώς και ανάλογη στατιστική ανάλυση των γραμμώσεων (ρηγμάτων) που προκύπτουν από υπάρχοντες σεισμοτεκτονικούς χάρτες. Από τη σύγκριση των επιμέρους αποτελεσμάτων, εξήχθησαν τα τελικά συμπεράσματα, τα οποία συνοψίζονται στα εξής:

- Η πολυφασματική εικόνα πλεονεκτεί έναντι της εικόνας ραντάρ, όσον αφορά το πλήθος και το συνολικό μήκος των γραμμώσεων που χαρτογραφήθηκαν.
- Καθίσταται σαφές, ότι η εικόνα ραντάρ εξαρτάται άμεσα από τη διεύθυνση «φωτισμού» της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Εξαιτίας του φαινομένου της «σκιάς» (shadow), το οποίο προσανατολίζεται παράλληλα στη γραμμή πτήσης του δορυφόρου (Envisat), τα χαρακτηριστικά του αναγλύφου που είναι παράλληλα ή υπό-παράλληλα στη διεύθυνση πτήσης του δορυφόρου (διεύθυνση άξιμουθίου) (B-N), τονίζονται ιδιαίτερα και απεικονίζονται γενικά αρκετά καλύτερα στην εικόνα ραντάρ απ' ό,τι στην πολυφασματική εικόνα. Αντίθετα υποβαθμίζονται τα στοιχεία εκείνα, τα οποία παρατάσσονται κάθετα ή σχεδόν κάθετα στη διεύθυνση πτήσης του δορυφόρου (A-Δ). Απόδειξη αυτού αποτελεί το γεγονός, ότι ενώ σύμφωνα με τον νεοτεκτονικό χάρτη υπήρχε πλήθος γραμμώσεων (ρηγμάτων) προς χαρτογράφηση, με διεύθυνση περίπου A-Δ, εντούτοις μόνο ένα μικρό ποσοστό από αυτές εντοπίστηκε στην εικόνα ραντάρ.
- Ο εντοπισμός γραμμώσεων, ιδιαίτερα με την εικόνα ραντάρ, είναι πολύ ευκολότερος στις ορεινές περιοχές, ενώ καθίσταται δύσκολος έως αδύνατος στις πεδινές περιοχές.
- Από τη συγχώνευση της εικόνας ραντάρ με την πολυφασματική εικόνα, δεν προέκυψαν καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την ποσότητα των γραμμώσεων που χαρτογραφήθηκαν. Παρατηρήθηκε ωστόσο, σημαντική βελτίωση στο εύρος των διευθύνσεων των γραμμώσεων που εντοπίστηκαν.
- Από τις διάφορες τεχνικές βελτίωσης της πολυφασματικής εικόνας, περισσότερο ωφέλιμες υπήρξαν: η γραμμική έκταση του ιστογράμματος, η ενίσχυση των ακμών, η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών, οι δείκτες βλάστησης, και η σύνθεση ψευδοέγχρωμων εικόνων.

- Ιδιαίτερα αξιόλογη υπήρξε η τεχνική «αντιστροφής της εικόνας» (image inversion), η οποία εφαρμόστηκε στην εικόνα ραντάρ, καθώς και οι ψευδοχρωματικές απεικονίσεις που εφαρμόστηκαν στην εν λόγω εικόνα.
- Μεταξύ των εικόνων συγχώνευσης των εικόνων Landsat-5/TM (πολυφασματική) και Envisat/ASAR (ραντάρ), η καλύτερη εικόνα ήταν εκείνη, στην οποία είχε προηγηθεί αντιστροφή της εικόνας ραντάρ.

Κατόπιν των παραπάνω, προτείνεται η χρησιμοποίηση τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων (βελτιώσεις-μετασχηματισμοί), με σκοπό τον εντοπισμό γραμμώσεων, για κάθε πηγή δεδομένων, σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα:

|    | <b>Πολυφασματική εικόνα<br/>(Landsat-5/TM)</b> |                                 | <b>Εικόνα ραντάρ<br/>(Envisat/ASAR)</b> | <b>Συγχώνευση<br/>εικόνων</b>                                  |
|----|------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1. | Γραμμική έκταση του ιστογράμματος              | Ενίσχυση των ακμών              | Αντιστροφή της αντίθεσης της εικόνας    | Αντιστροφή της αντίθεσης της εικόνας ραντάρ πριν τη συγχώνευση |
| 2. | Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών                      | Σύνθεση ψευδοχρωματικών εικόνων | Ψευδοχρωματικές απεικονίσεις            |                                                                |
| 3. | Δείκτες βλάστησης                              |                                 |                                         |                                                                |

Επιπλέον, επισημαίνονται τα εξής:

- Στην παρούσα έρευνα, η χρήση του υποπρογράμματος «ArcMap» του λογισμικού (Γ.Σ.Π.) «ArcGIS» κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς το λογισμικό αυτό παρέχει, μεταξύ μιας πληθώρας εφαρμογών, δυνατότητες μεταβολής και του συνδυασμού των φασματικών ζωνών μιας εικόνας, χωρίς να απαιτείται κάθε φορά η χρήση κάποιου λογισμικού επεξεργασίας εικόνας (π.χ. Easy Pace, Envi, Erdas Imagine, κ.α.), γεγονός που συνεπάγεται σημαντική μείωση του χρόνου εργασίας.
- Τέλος, η συμβολή της χρήσης μεθόδων ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, σε συνδυασμό με τα Γ.Σ.Π. για τον εντοπισμό γραμμώσεων κρίνεται σημαντική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι από τον παραπάνω συνδυασμό προκύπτουν πληροφορίες για την τεκτονική και γεωμορφολογική κατάσταση μιας περιοχής, οι οποίες τροποποιούν ή προσθέτουν στοιχεία σε υπάρχοντες χάρτες, σε πολύ μικρότερο χρόνο από τις συμβατικές μεθόδους.

Όλα τα παραπάνω καταδεικνύουν τον συμπληρωματικό χαρακτήρα των δορυφορικών πολυφασματικών εικόνων και των δορυφορικών εικόνων ραντάρ. Κατά συνέπεια, συνίσταται η συνδυασμένη χρήση τους κατά τη γεωλογική-γεωμορφολογική έρευνα (Henden and Balci 1983, Astaras 1991). Εξάλλου, όπως αναφέρουν οι Αστάρας (1993) και Lillesand and Kiefer (1994), οι οπισθοσκεδάσεις της μικροκυματικής ακτινοβολίας (εικόνες ραντάρ) από τα γήινα υλικά σχετίζονται ελάχιστα (τουλάχιστον άμεσα) με τις ανακλάσεις στο ορατό ή κοντινό υπέρυθρο (πολυφασματικές εικόνες) των ίδιων υλικών, καθώς οι οπισθοσκεδάσεις των μικροκυμάτων έχουν σχέση με τις φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών, ενώ οι ανακλάσεις στο ορατό και υπέρυθρο των ίδιων υλικών σχετίζονται περισσότερο με τις χημικές και θερμικές τους ιδιότητες. Συνεπώς, οι δύο αυτές πηγές δεδομένων παρέχουν πρόσθετες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των διάφορων αντικειμένων και την κατάσταση του αναγλύφου.



Κρίνεται σημαντικό να αναφερθεί, ότι στην πολυφασματική εικόνα Landsat, εμφανίζονταν ορισμένες τεχνητές γραμμές (φαινόμενο «λωριδοποίησης», Τσακίρη-Στρατή 2004), προφανώς εγγενείς από τη λήψη της εικόνας, οι οποίες δεν κατέστη εφικτό να απομακρυνθούν, δίχως σημαντική μείωση της ποιότητας του συνόλου της εικόνας. Η παρουσία τους ήταν ιδιαίτερα αισθητή κατά τη συγχώνευση των εικόνων, ωστόσο ήταν προφανές πως επρόκειτο για «τεχνητά» χαρακτηριστικά και δεν επηρέασαν σημαντικά την ανίχνευση των γραμμώσεων.

Επισημαίνεται επίσης, ότι στην εικόνα Envisat/ASAR, πολλές από τις γραμμώσεις που χαρτογραφήθηκαν ανακλούν τοπογραφικά χαρακτηριστικά και είναι σαφώς επηρεασμένες από τις γεωμετρικές παραμορφώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στις εικόνες ραντάρ [«βράχυνση» (foreshortening) και «αναστροφή» (layover), βλ. παράρτημα Β], δίχως αυτό να παρεμποδίζει την αξιολόγηση της ικανότητας του συστήματος ραντάρ να εντοπίζει γραμμικά χαρακτηριστικά.

Βελτιώσεις που επιδέχεται η παρούσα έρευνα, είναι μεταξύ άλλων η ορθοαναγωγή και της εικόνας ραντάρ, για την ελαχιστοποίηση των γεωμετρικών παραμορφώσεων, καθώς, σε ανώμαλο ανάγλυφο, η γεωμετρική αναγωγή της εικόνας ραντάρ με τη χρήση ενός ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (ορθοαναγωγή), αποτελεί καλύτερη μέθοδο διόρθωσης των γεωμετρικών παραμορφώσεων (Naraghi et al. 1983, από Gupta 2003). Επίσης, μελλοντικά διαθέσιμες εικόνες ραντάρ μεγαλύτερης διακριτικής ικανότητας (< 30 m) (π.χ. Radarsat), θα προσέφεραν, κατά τη συγχώνευση των εικόνων, βελτίωση και της χωρικής διακριτικής ικανότητας, δίνοντας καλύτερα αποτελέσματα. Τα παραπάνω θα αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Οι χάρτες των (φωτο)γραμμώσεων αποτελούν ένα από τα κυριότερα αποτελέσματα της ερμηνείας των δορυφορικών εικόνων, όμως δεν έχουν αξιοποιηθεί επαρκώς, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των φωτογραμμώσεων και λόγω της υποκειμενικότητας του ερμηνευτή (αναλυτή). Έτσι χρειάζεται ο έλεγχος της ταυτότητας των φωτογραμμώσεων μιας περιοχής (αν είναι ρήγμα, λιθολογικό όριο ή κάποιο άλλο γραμμικό χαρακτηριστικό όπως ρέμα, δένδροστοιχία, οδικό δίκτυο κ.α.), με την ταυτόχρονη αξιοποίηση πολλαπλών πληροφοριών που συνδέονται και συσχετίζονται με τις φωτογράμμιες, όπως η λιθολογία, η μορφολογία, το υδρογραφικό δίκτυο, η βλάστηση, το έδαφος και άλλες παράμετροι της εκάστοτε περιοχής.

Όσον αφορά το καθαρά γεωλογικό-γεωμορφολογικό περιεχόμενο, η παρούσα έρευνα περιορίστηκε στον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση των γραμμώσεων που διακρίνονται σε δορυφορικές εικόνες της περιοχής μελέτης και τη στατιστική ανάλυση αυτών. Μελλοντικά σχεδιάζεται η κατασκευή χαρτών πυκνότητας των γραμμώσεων (density map), η συνδυασμένη χρήση αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων, ο συσχετισμός με τη λιθολογία, τη μορφολογία, το υδρογραφικό δίκτυο, τη βλάστηση, το έδαφος και άλλα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, καθώς και η επί τόπου έρευνα. Τα παραπάνω θα επιτρέψουν αφ' ενός μεν τον χαρακτηρισμό (ταυτοποίηση) των γραμμώσεων που καταγράφηκαν (π.χ. ρήγματα, λιθολογικά όρια, υδρογραφικό δίκτυο), αφ' ετέρου δε, αναμένεται να προκύψει μια γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδος μελέτης μεγάλων εκτάσεων, με κύριο σκοπό τον εντοπισμό ρηγμάτων (νέων ή προεκτάσεις υπαρχόντων), για την ανανέωση των υπαρχόντων γεωλογικών-τεκτονικών χαρτών.

## 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

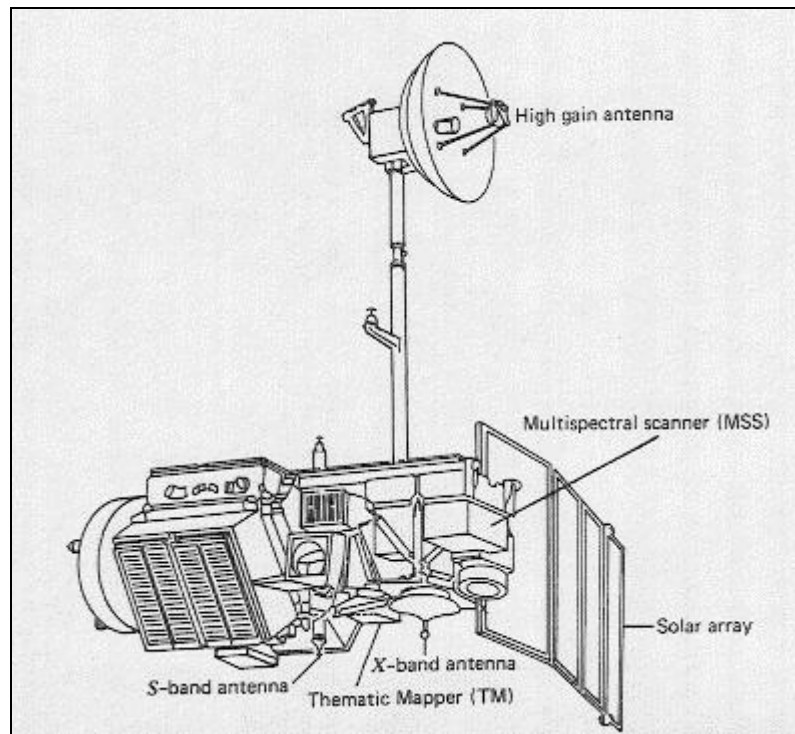
### 9.1. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Δορυφόροι Landsat 4 & 5

Οι δορυφόροι Landsat 4 και 5 αποτελούν δεύτερης γενιάς (μετά τους Landsat 1,2 και 3) μη επανδρωμένους ερευνητικούς δορυφόρους της γης, οι οποίοι εκτοξεύθηκαν στις 16/7/82 και 1/3/84 αντίστοιχα. Περιφέρονται σε κυκλική, σχεδόν πολική τροχιά ύψους 705 km, που τέμνει τον Ισημερινό με γωνία  $98^\circ$ . Ο χρόνος περιστροφής τους γύρω από τη γη είναι περίπου 99 λεπτά, εκτελούν δηλαδή 14 περιστροφές ανά ημέρα, καλύπτοντας ολόκληρη την επιφάνεια της γης σε 16 ημέρες (αντί 18 των Landsat 1 - 3). Ο χρόνος διέλευσης των δορυφόρων από τον Ισημερινό είναι 9.39' π.μ. Σε κάθε τροχιά του δορυφόρου σαρώνεται μια ζώνη πλάτους 185 km. Δύο διαδοχικές ζώνες σάρωσης στον Ισημερινό απέχουν 171,5 km, δηλαδή παρουσιάζουν επικάλυψη 7,3 %, η οποία αυξάνει προς τους πόλους. Έτσι η επικάλυψη στον  $20^\circ$  παράλληλο γίνεται 12,9 % , στον  $40^\circ$  παράλληλο 29 % και στον  $80^\circ$  παράλληλο 83,9 %.

Οι δορυφόροι Landsat 4 και 5 έχουν διαφορά πτήσεως  $180^\circ$ , πράγμα που σημαίνει ότι κάθε σημείο της γης σαρώνεται κάθε 8 ημέρες με έναν από τους δύο δορυφόρους.

Οι εν λόγω δορυφόροι φέρουν τα ακόλουθα συστήματα καταγραφής (Εικ. Α1): έναν πολυφασματικό σαρωτή (MSS: Multi Spectral Scanner), όπως και οι Landsat 1 – 3 και επιπλέον ένα σαρωτή προχωρημένης τεχνολογίας τον «Θεματικό Χαρτογράφο» (Thematic Mapper/TM), ο οποίος προσφέρει καλύτερη διακριτική ικανότητα και μεγαλύτερο εύρος φάσματος. Συγκεκριμένα, οι 64 στάθμες πυκνότητας (λαμπρότητας) στις εικόνες Landsat 1 – 3 έχουν μετατραπεί, στους Landsat 4 και 5, σε 256 και τα 80 m διακριτικής ικανότητας σε 30 m.

Με τον TM καταγράφονται ραδιομετρικά δεδομένα από τη γη σε επτά φασματικές ζώνες, με διακριτική ικανότητα 30m x 30m στις έξι ζώνες του ορατού φάσματος και 120m x 120m στη θερμική υπέρυθρη φασματική ζώνη (ζώνη 6). Το παραπάνω σημαίνει, ότι για το ορατό τμήμα του φάσματος, κάθε pixel αντιπροσωπεύει μια έκταση 30m x 30m στην επιφάνεια της γης, ενώ στο θερμικό υπέρυθρο η επιφάνεια αυτή ανέρχεται στα 120m x 120m. Για κάθε pixel συλλέγονται δεδομένα για καθεμιά από τις 7 φασματικές ζώνες (TM1-TM7). Οι τιμές για κάθε pixel κάθε φασματικής ζώνης αποθηκεύονται χρησιμοποιώντας 8 bit, επιτρέποντας έτσι τις τιμές των δεδομένων να κυμαίνονται μεταξύ 0 και 255. Συνεπώς κάθε φασματική ζώνη είναι μια ασπρόμαυρη εικόνα, η οποία αποτελείται από 256 διαβαθμίσεις του τεφρού χρώματος: η τιμή 0 αντιστοιχεί σε μηδενική ανάκλαση ενώ η τιμή 255 αντικατοπτρίζει τη μέγιστη ανάκλαση.



Εικόνα Α. 1 Οι δορυφόροι Landsat 2<sup>ης</sup> γενιάς με τα χαρακτηριστικά τους  
(<http://geomatics.eng.ohio-state.edu>)

Οι επτά φασματικές ζώνες του Thematic Mapper καθώς και οι εφαρμογές της κάθε ζώνης σε επίγεια αντικείμενα ή φαινόμενα είναι οι ακόλουθες :

Φασματική ζώνη 1: ( Band 1, 0.45 – 0.52  $\mu\text{m}$ , μπλε – πράσινη ). Κατάλληλη να διεισδύει μέσα στις υδάτινες μάζες και να δίδει πληροφορίες για τη θολότητα τους και άλλες παραμέτρους. Επίσης είναι κατάλληλη για τη χαρτογράφηση παράκτιων περιοχών, τη διάκριση της βλάστησης από το έδαφος και το διαχωρισμό μεταξύ κωνοφόρων και φυλλοβόλων δένδρων.

Φασματική ζώνη 2: (Band 2, 0.52 – 0.60  $\mu\text{m}$ , πράσινη). Κατάλληλη για τη μέτρηση της ορατής πράσινης ακτινοβολίας που καθορίζει την υγιή βλάστηση.

Φασματική ζώνη 3: (Band 3, 0.63 – 0.69  $\mu\text{m}$ , ερυθρή). Κατάλληλη για τη διάκριση μεταξύ διαφόρων ειδών βλάστησης λόγω διαφορετικής απορρόφησής της από τη χλωροφύλλη των φυτών.

Φασματική ζώνη 4: (Band 4, 0.76 – 0.90  $\mu\text{m}$ , ηλιακή υπέρυθρη). Κατάλληλη για τον υπολογισμό της βιομάζας και την οριοθέτηση των υδάτινων μαζών.

Φασματική ζώνη 5: (Band 5, 1.55 – 1.75  $\mu\text{m}$ , ηλιακή υπέρυθρη). Κατάλληλη για τον υπολογισμό της υγρασίας στα φυτά και το έδαφος, καθώς και το διαχωρισμό της νεφοκάλυψης από τα χιόνια.

Φασματική ζώνη 6: (Band 6, 10.40 – 12.50  $\mu\text{m}$ , θερμική υπέρυθρη). Κατάλληλη για τη συλλογή θερμικών στοιχείων (θερμική χαρτογράφηση) στους γεωλογικούς σχηματισμούς, τη χαρτογράφηση περιοχών με διαφορετική υγρασία εδάφους και τη συλλογή πληροφοριών για τις

υποβαθμισμένες φυτοκοινωνίες. Η ζώνη αυτή, αν και παρουσιάζει διακριτική ικανότητα 120m, συμπληρώνει τις πληροφορίες που λαμβάνονται από τις άλλες φασματικές ζώνες.

Φασματική ζώνη 7: (Band 7, 2.08 – 2.35  $\mu\text{m}$ , ηλιακή υπέρυθρη). Κατάλληλη για τη διάκριση των διαφόρων τύπων πετρωμάτων και για υδροθερμική χαρτογράφηση.

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω περιγραφές ο σαρωτής TM προσφέρει αρκετές πληροφορίες στις γεωεπιστήμες. Οι εικόνες TM του Landsat 5 (ο Landsat 4 μετά από μικρό χρονικό διάστημα έπαψε να μεταδίδει δεδομένα TM λόγω βλάβης), ασπρόμαυρες και ψευδοχρωματικές, προσφέρονται και σε κλίμακα 1:125.000, με δυνατότητα κατόπιν παραγγελίας να γίνουν 1:100.000, ώστε να ταυτιστούν με τους ίδιες κλίμακας χάρτες της Γ.Υ.Σ (Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού) (Αστάρας, 1998).

## 9.2. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Εικόνες ραντάρ-ENVISAT/ASAR

### ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΡΑΝΤΑΡ

Η λέξη **radar** αποτελεί συντομογραφία των λέξεων **radio detection and ranging**. Οι αισθητήρες ραντάρ διαιρούνται συνήθως σε δύο ομάδες, σύμφωνα με τους τρόπους λειτουργίας τους. Οι ενεργοί αισθητήρες είναι εκείνοι που εκπέμπουν τη δική τους ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, τις ανακλάσεις της οποίας και καταγράφουν και επομένως περιέχουν μια συσκευή αποστολής σημάτων (πομπό) και έναν δέκτη, ενώ τα παθητικά συστήματα ραντάρ είναι απλοί δέκτες, οι οποίοι μετρούν την ακτινοβολία που προέρχεται από τα επισκοπούμενα αντικείμενα.

Ενεργά συστήματα ραντάρ:  
ραντάρ που δίδουν εικόνα (imaging radars)  
μετρητές σκέδασης (scatterometers)  
υψομετρητές (altimeters)

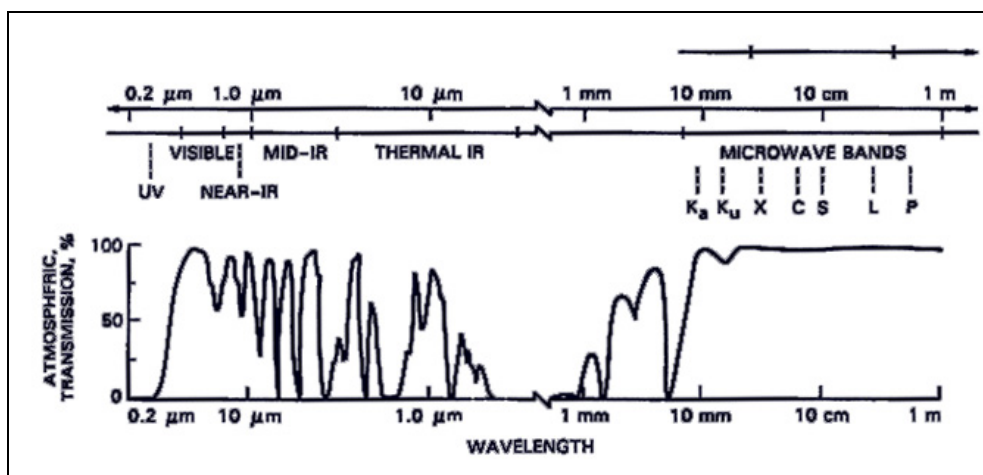
Παθητικά συστήματα ραντάρ:  
ραδιόμετρα μικροκυμάτων (microwave radiometers)

### ΡΑΝΤΑΡ ΠΟΥ ΔΙΝΟΥΝ ΕΙΚΟΝΑ (Imaging Radars)

#### Γενικά για τη λειτουργία των ραντάρ απεικόνισης

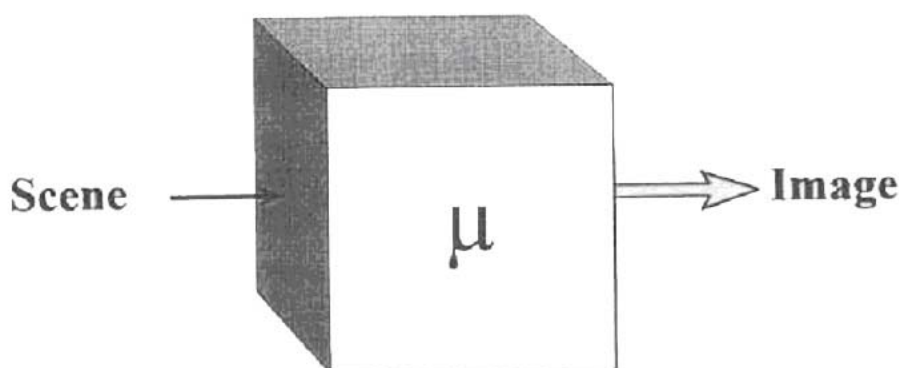
Τα ραντάρ που δίνουν εικόνες λειτουργούν στο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (βλ. Παράρτημα Α), πέρα από το ορατό και το υπέρυθρο, που χαρακτηρίζεται ως μικροκυματικό τμήμα του φάσματος και συγκεκριμένα σε μήκη κύματος από 1mm έως 1m. Η αρχική χρήση των ραντάρ για στρατιωτικούς σκοπούς είχε ως αποτέλεσμα την κωδικοποίηση των φασματικών ζωνών με τα γράμματα K, X, C, S, L και P. Από αυτές γίνεται χρήση ως σήμερα των K, X, C, και L. Τα SLAR που τοποθετούνται σε αεροσκάφη χρησιμοποιούν τη φασματική ζώνη K (μικρού μήκους κύματος). Στα ραντάρ που τοποθετήθηκαν στα διαστημόπλοια και τα διαστημικά λεωφορεία δε χρησιμοποιείται η φασματική ζώνη K, διότι δε διαπερνά την ατμόσφαιρα (απαιτείται μεγαλύτερο μήκος κύματος, π.χ. ζώνη X, C ή L).





Εικόνα Β. 1. Τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπου φαίνονται τα ατμοσφαιρικά παράθυρα (περιοχές του φάσματος όπου η ατμόσφαιρα επιτρέπει τη διέλευση του μεγαλύτερου μέρους της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) στο ορατό, υπέρυθρο και μικροκυματικό τμήμα. Είναι χαρακτηριστικό, ότι σε όλη την περιοχή των μικροκυμάτων η ατμόσφαιρα είναι σχεδόν 100 % διαπερατή (NASA 1989, από Henderson & Lewis 1998).

Οι βασικές λειτουργίες ενός συστήματος ραντάρ απεικόνισης συνοψίζονται σχηματικά με ένα μαύρο κουτί, έναν μετατροπέα μικροκυμάτων ( $\mu$ ) δηλαδή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



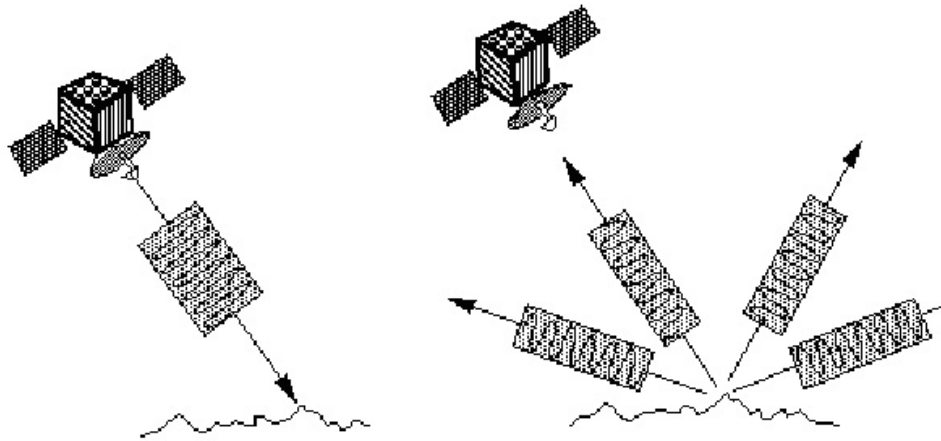
Εικόνα Β. 2. Σχηματική αναπαράσταση της γενικής λειτουργίας ενός ραντάρ απεικόνισης (Henderson & Lewis 1998).

Αυτός ο μετατροπέας περιλαμβάνει δύο διαδοχικές λειτουργίες : (1) τη συλλογή των δεδομένων από το ραντάρ και (2) τη διαμόρφωση της εικόνας από τον επεξεργαστή. Ο χώρος παρατήρησης (scene) ανιχνεύεται από το σήμα των μικροκυμάτων και παράγει ανακλάσεις που συλλέγονται από το ραντάρ. Στην έξοδο της συσκευής αποδίδεται η εικόνα (image) ως αποτέλεσμα της κατάλληλης κατανομής της ανακλώμενης ενέργειας.

Αναλυτικότερα, ένα ραντάρ απεικόνισης λειτουργεί λίγο ή πολύ όπως μια φωτογραφική μηχανή με φλας, δεδομένου ότι παρέχει το δικό του “φως”, για να “φωτίσει” μια περιοχή στο έδαφος και να πάρει μια εικόνα, με τη διαφορά ότι αυτό συμβαίνει σε μήκη κύματος που αντιστοιχούν στη μικροκυματική ακτινοβολία. Μια φωτογραφική μηχανή με φλας στέλνει έναν

παλμό φωτός (το φλας) και καταγράφει σε φιλμ το φως που επιστρέφει μετά από ανάκλαση, μέσω του φωτογραφικού φακού. Αντί ενός φακού και ενός φιλμ, το ραντάρ χρησιμοποιεί μια κεραία (αντένα) και ψηφιακά μαθητικά μέσα υπολογιστών για να καταγράψει τις εικόνες του.

Ένα τυπικό ραντάρ μετρά την ένταση και το χρόνο που απαιτείται για την επιστροφή των σημάτων μικροκυμάτων που εκπέμπονται από την κεραία ραντάρ και ανακλώνται από μια επιφάνεια ή ένα αντικείμενο.



**Εικόνα Β. 3.** Το ραντάρ εκπέμπει έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό και μετρά την ένταση και το χρόνο διαδρομής του σήματος που ανακλάται και επιστρέφει στο σύστημα (<http://southport.jpl.nasa.gov>).

Η κεραία ραντάρ διαβιβάζει και λαμβάνει διαδοχικά παλμούς σε συγκεκριμένα μήκη κύματος της μικροκυματικής περιοχής (μεταξύ 1cm και 1m, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα φάσμα συχνότητας περίπου 300 MHz - 30 GHz) και πολώσεις (τα κύματα πολώνονται σε ένα ενιαίο κατακόρυφο ή οριζόντιο επίπεδο). Για ένα σύστημα ραντάρ απεικόνισης, περίπου 1500 υψηλοί ενεργειακοί παλμοί ανά δευτερόλεπτο διαβιβάζονται προς τον εκάστοτε στόχο ή περιοχή, με κάθε παλμό να έχει συνήθως διάρκεια (πλάτος παλμού/pulse width) 10-50 μικροδευτερολέπτων ( $1\text{msec} = 10^{-6}\text{sec}$ ). Ο παλμός καλύπτει κανονικά μια μικρή ζώνη συχνοτήτων (bandwidth), που κεντροθετείται στη συχνότητα που επιλέγεται για το ραντάρ. Τυπικά εύρη συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται κυμαίνονται από 10 έως 200 MHz. Στις διάφορες επιφάνειες, η ενέργεια των παλμών του ραντάρ διασπείρεται προς όλες τις κατευθύνσεις, ορισμένες από τις οποίες ανακλώνται προς την κεραία.

Αυτή η οπισθοδιασπορά (backscatter) επιστρέφει στο ραντάρ ως πιο ασθενές σήμα (ηχώ) ραντάρ και λαμβάνεται από την κεραία σε μια συγκεκριμένη πόλωση (οριζόντια ή κατακόρυφη, όχι απαραίτητα ίδια με αυτή του διαβιβασθέντος παλμού). Αυτή η ηχώ μετατρέπεται σε ψηφιακά δεδομένα και περνά σε ένα όργανο καταγραφής δεδομένων για τη μετέπειτα επεξεργασία και επίδειξη ως εικόνα. Δεδομένου ότι ο παλμός ραντάρ ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός, είναι ικανοποιητικά ευθύς, ώστε να χρησιμοποιηθεί ο χρόνος διαδρομής ενός συγκεκριμένου παλμού για να υπολογιστεί η απόσταση του αντικειμένου που απεικονίζεται. Το επιλεγμένο εύρος ζώνης συχνότητας του παλμού καθορίζει τη διακριτική ικανότητα κάθετα στη γραμμή πτήσης (cross-track resolution), η οποία αυξάνεται αυξανόμενου του παραπάνω εύρους.

Το μήκος της κεραίας ραντάρ καθορίζει τη διακριτική ικανότητα κατά μήκος της γραμμής πτήσης (along-track resolution): όσο μακρύτερη είναι η κεραία, τόσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα σε αυτήν την κατεύθυνση. Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (*Synthetic Aperture Radar/SAR*) αναφέρονται σε μια τεχνική που χρησιμοποιείται για να συνθέσει μια πολύ

μακριά κεραία, με το συνδυασμό των σημάτων (ηχώ) που παραλαμβάνονται από το ραντάρ, καθώς η πλατφόρμα που το μεταφέρει (αεροπλάνο, δορυφόρος, διαστημικό λεωφορείο) κινείται κατά μήκος της γραμμής πτήσης της. Με τη λέξη “άνοιγμα” (aperture) νοείται σε αυτήν την περίπτωση το άνοιγμα που χρησιμοποιείται για να συλλέξει την ανακλώμενη ενέργεια που χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει μια εικόνα. Στην περίπτωση μιας φωτογραφικής μηχανής, αυτό θα ήταν το διάφραγμα, ενώ για το ραντάρ είναι η κεραία.

### **Ιστορία των ραντάρ που δίδουν εικόνα**

Σχετικά με τις αεροφωτογραφίες, τα ραντάρ που δίνουν εικόνα μπορούν να θεωρηθούν ως νέα συστήματα τηλεπισκόπησης. Οι εφαρμογές τους στις γεωεπιστήμες ερευνήθηκαν από τη δεκαετία του 1960. Παρόλα αυτά η έναρξη της ιστορίας των ραντάρ και της διαπίστωσης της ανάκλασης των ραδιοκυμάτων από διάφορα αντικείμενα προηγήθηκε κατά πολύ.

Το πρώτο πείραμα στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν ραδιοκύματα κοντά στη συχνότητα των μικροκυμάτων έλαβε χώρα στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα από τον Heinrich Hertz. Ο Hertz έδειξε ότι οι ανακλάσεις μπορούν να ληφθούν από μεταλλικά και μη μεταλλικά αντικείμενα. Η ουσιαστική έρευνα και εξέλιξη των ραντάρ ξεκίνησε όμως, σχεδόν ταυτόχρονα σε Γερμανία, ΗΠΑ και Μ. Βρετανία, από τη δεκαετία του 1920 (Page, 1962). Η ανίχνευση των πολεμικών πλοίων και αεροσκαφών, καθώς και η χρήση των ραντάρ ως μέσα πλοήγησης αποτέλεσαν σημαντικές εφαρμογές για στρατιωτικούς σκοπούς. Σημαντική πρόοδος επιτεύχθηκε επίσης κατά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο.

Μετά τον πόλεμο έγιναν διεξοδικές έρευνες για την εφαρμογή των ραντάρ στις γεωεπιστήμες. Κατά τον MacDonald (1969) το καταλυτικό γεγονός για την εισαγωγή των ραντάρ και της τηλεπισκόπησης στις γεωεπιστήμες υπήρξε το «Πρώτο Συμπόσιο Τηλεπισκόπησης του Περιβάλλοντος», που έλαβε χώρα στο πανεπιστήμιο του Michigan το 1962. Το 1969 έγινε διαθέσιμη για εμπορικούς σκοπούς η τεχνολογία των RAR [real aperture imaging radars = ραντάρ πραγματικής (διαμέτρου) αντένας]. Το απαγορευτικό όμως κόστος χρήσης των ραντάρ την περιόριζε σε κρατικές υπηρεσίες, προγράμματα επιδοτούμενα από κυβερνήσεις ή μεγάλες εταιρείες.

Επειδή ωστόσο η διακριτικότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της εμβέλειας του ραντάρ και για την επίτευξη μεγάλης διακριτικής ικανότητας απαιτούνταν υπερβολικά μεγάλες κεραίες, που ήταν δύσκολο να μεταφερθούν από τα αεροσκάφη, αναπτύχθηκε η περισσότερο πολύπλοκη τεχνολογία των SAR. Σήμερα ραντάρ βρίσκονται εγκατεστημένα τόσο σε αεροσκάφη όσο και σε δορυφόρους ή διαστημικά λεωφορεία (Henderson and Lewis, 1998).

### **Πλεονεκτήματα των εικόνων ραντάρ**

Σε αντίθεση με τα παθητικά συστήματα, τα ραντάρ που δίνουν εικόνα συνιστούν ενεργά συστήματα απεικόνισης (πομποδέκτες), δηλαδή καταγράφουν τη δική τους εκπεμπόμενη μικροκυματική ακτινοβολία, η οποία ανακλάται στην επιφάνεια της γης. Εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα ότι δεν επηρεάζονται από τη νεφοκάλυψη, όπως οι παθητικοί οπτικοί δέκτες και λειτουργούν γενικά ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών, μέρα και νύχτα. Επίσης οι εικόνες ραντάρ καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις (εκατοντάδων km μήκους και δεκάδων km πλάτους), επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την κατασκευή φωτομωσαϊκών και φωτογεωλογικών χαρτών με ελάχιστες παραμορφώσεις. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν τα ραντάρ πολύτιμο εργαλείο για τις γεωεπιστήμες (Αστάρας, 1998).

## ΡΑΝΤΑΡ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ (SLAR)



Εικόνα Β. 4. Τρόπος απεικόνισης με αερομεταφερόμενο ραντάρ πλευρικής κάλυψης (SLAR) (<http://earth.esa.int>).

Τα περισσότερα ραντάρ απεικόνισης που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση είναι αερομεταφερόμενα (ή διαστημικά) ραντάρ πλευρικής κάλυψης (side-looking airborne radars/SLARs). Η κεραία (αντένα) “βλέπει” προς κατεύθυνση κάθετη στη γραμμή πτήσης, με μια ακτίνα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας/ακτινοβολίας (HMA), η οποία είναι ευρεία κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και στενή κατά την οριζόντια. Η εικόνα παράγεται από την κίνηση του φορέα του ραντάρ (αεροσκάφος, δορυφόρος ή διαστημικό λεωφορείο) πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος.

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός ραντάρ είναι η μετάδοση και η υποδοχή (λήψη) παλμών/κυμάτων ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Ένας σύντομος παλμός (κύμα HMA) εκπέμπεται από το αερομεταφερόμενο ραντάρ, ο οποίος όταν χτυπά έναν στόχο, ανακλάται (σκεδάζεται) και μέρος του ανακλώμενου σήματος επιστρέφει στο ραντάρ.

Οι σύντομοι (μικροδευτερόλεπτο) υψηλοί ενεργειακοί παλμοί που εκπέμπονται και των οποίων η ηχώ επιστροφής καταγράφεται, παρέχουν πληροφορίες για:

- το μέγεθος (magnitude)
- τη φάση (phase)
- το χρονικό διάστημα (time interval) μεταξύ της εκπομπής και επιστροφής των παλμών από το εκάστοτε αντικείμενο (δίνει την απόσταση μεταξύ του στόχου και του ραντάρ)
- την πόλωση (polarization)
- τη συχνότητα Doppler (Doppler frequency)

Όταν το αεροσκάφος προωθήθει κατά ένα εύρος δέσμης/ακτίνας (beamwidth), τα επιστρεφόμενα σήματα προέρχονται από μια διαφορετική λουρίδα στο έδαφος. Καθώς το αεροσκάφος προωθείται, μια σειρά αυτών των γραμμών απεικονίζονται και το αποτέλεσμα είναι μια διδιάστατη εικόνα της επιστροφής του ραντάρ από την επιφάνεια.

Επειδή η κάθετη στη γραμμή πτήσης διάσταση (cross-track dimension) στην εικόνα καθορίζεται από μια χρονική μέτρηση και η χρονική μέτρηση συνδέεται με την κεκλιμένη απόσταση (slant range) από το ραντάρ στο εκάστοτε σημείο της επιφάνειας, η εικόνα είναι κάπως παραμορφωμένη από τη διαφορά μεταξύ της απευθείας απόστασης (slant range) και της οριζόντιας απόστασης (horizontal distance) ή απόστασης πάνω στο έδαφος (ground range).

Σε μερικά συστήματα ραντάρ, η παραπάνω παραμόρφωση αφαιρείται, καταστρώνοντας το σάρωμα στο σωλήνα καθοδικών ακτίνων μη γραμμικό, έτσι ώστε τα σημεία να χαρτογραφούνται στη σωστή τους απόσταση (απόσταση πάνω στο έδαφος/ground range). Αυτό εντούτοις ισχύει ακριβώς, μόνο όταν όλα τα σημεία βρίσκονται σε επίπεδη επιφάνεια. Σε διαφορετική περίπτωση αυτή η τροποποίηση μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικές παραμορφώσεις, ιδίως σε ορεινές περιοχές.

### **Κατηγορίες SLAR**

Τα αερομεταφερόμενα ραντάρ πλευρικής κάλυψης (SLARs) διαιρούνται κανονικά σε δύο ομάδες: (1) τα ραντάρ πραγματικής αντένας (RAR) και (2) τα ραντάρ συνθετικής (διαμέτρου) κεραίας (SAR). Η συνήθης χρησιμοποιούμενη ονοματολογία είναι "SLAR" για τα ραντάρ πραγματικής αντένας και "SAR" για τα ραντάρ συνθετικής κεραίας, αν και τα τελευταία είναι επίσης αερομεταφερόμενα (ή διαστημικά) ραντάρ πλευρικής κάλυψης.

Τόσο τα ραντάρ πραγματικής αντένας (RAR), όσο και τα ραντάρ συνθετικής κεραίας (SAR) είναι αερομεταφερόμενα ραντάρ πλευρικής κάλυψης (side-looking airborne radars/SLAR), με κατεύθυνση φωτισμού/σάρωσης (illumination direction) κάθετη συνήθως στη γραμμή πτήσης (flight track) του μέσου που τα μεταφέρει (αεροσκάφος, δορυφόρος, διαστημικό λεωφορείο). Συνήθως χρησιμοποιείται η ίδια κεραία (αντένα) για τη μετάδοση και τη λήψη του σήματος.

Η διαφορά έγκειται στη διακριτική ικανότητα κατά μήκος της γραμμής πτήσης (κατεύθυνση αζιμουθίου). Τα ραντάρ πραγματικής αντένας (RAR) έχουν αζιμουθιακή διακριτική ικανότητα που καθορίζεται από το μήκος (άνοιγμα) της κεραίας (antenna length/aperture), και είναι ανάλογη προς την απόσταση μεταξύ του ραντάρ και του στόχου. Το ραντάρ συνθετικής κεραίας (SAR) χρησιμοποιεί την επεξεργασία του σήματος για να συνθέσει ένα άνοιγμα αντένας, που είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερο από την πραγματική κεραία, βασιζόμενο σε μια ακολουθία σημάτων (τα οποία συνδυάζει), που καταγράφονται στη μνήμη του συστήματος, καθώς η πλατφόρμα (αεροπλάνο, δορυφόρος, διαστημικό λεωφορείο) που μεταφέρει το σύστημα ραντάρ, κινείται κατά μήκος της γραμμής πτήσης. Σε αυτά τα συστήματα η αζιμουθιακή διακριτική ικανότητα είναι ανεξάρτητη από την απόσταση μεταξύ της κεραίας και του στόχου.

Κανονικά η διακριτική ικανότητα αζιμουθίου για ένα SAR είναι το μισό από το πραγματικό μέγεθος της αντένας. Παρόλ' αυτά είναι δυνατό να επιλεγεί μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα, έτσι ώστε άλλες πτυχές της ποιότητας εικόνας να μπορούν να βελτιωθούν.

Γενικά, ανάλογα με την επεξεργασία, η διακριτική ικανότητα που επιτυγχάνεται είναι της τάξης 1-2 μέτρων για τα αερομεταφερόμενα ραντάρ και των 5-50 μέτρων για τα διαστημικά ραντάρ.

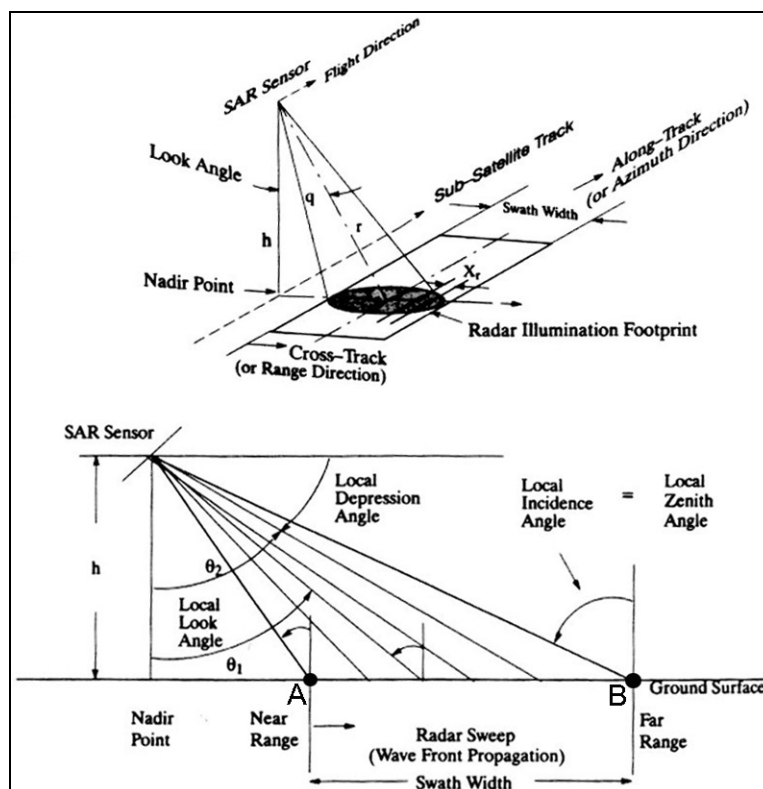
### **PANTAR ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ (RAR)**

Όπως σε όλα τα SLAR έτσι και στην περίπτωση των RAR (Real Aperture Radars), μια στενή ακτίνα ενέργειας κατευθύνεται κάθετα στην πορεία πτήσης της πλατφόρμας μεταφοράς (αεροσκάφος ή διαστημικό σκάφος/δορυφόρος). Ένας H/M παλμός (κύμα) ενέργειας διαβιβάζεται από την κεραία ραντάρ και η σχετική ένταση των ανακλάσεων χρησιμοποιείται για να παραγάγει την εικόνα μιας στενής λωρίδας (έκτασης) της επισκοπούμενης περιοχής.



Οι ανακλάσεις από μεγαλύτερες αποστάσεις επιστρέφουν στο ραντάρ μετά από τον αναλογικά μεγαλύτερο χρόνο, σχηματίζοντας την εικόνα κατά τη κατεύθυνση την κάθετη στη γραμμή πτήσης (range direction) στην. Όταν ο επόμενος H/M παλμός διαβιβάζεται, το ραντάρ θα έχει προωθηθεί κατά μια μικρή απόσταση και μια ελαφρώς διαφορετική λωρίδα της έκτασης θα απεικονιστεί. Αυτές οι διαδοχικές λωρίδες έκτασης θα καταγραφούν έπειτα δίπλα-δίπλα για να σχηματίσουν την εικόνα κατά την κατεύθυνση αζιμουθίου (azimuth direction). Η τελική εικόνα θα αποτελείται από τη δισδιάστατη σειρά των παραπάνω δεδομένων.

Στο παρακάτω σχήμα, η λωρίδα της έκτασης προς απεικόνιση είναι από το σημείο Α στο σημείο Β. Το σημείο Α, που είναι το κοντινότερο στο σημείο ναδίρ σημείο που απεικονίζεται, λέγεται πως βρίσκεται στην περιοχή του κοντινού βεληνεκού (near range), ενώ το σημείο Β, που είναι το πιο απομακρυσμένο σημείο που πρόκειται να απεικονιστεί, τοποθετείται στο μακρινό βεληνεκές (far range).



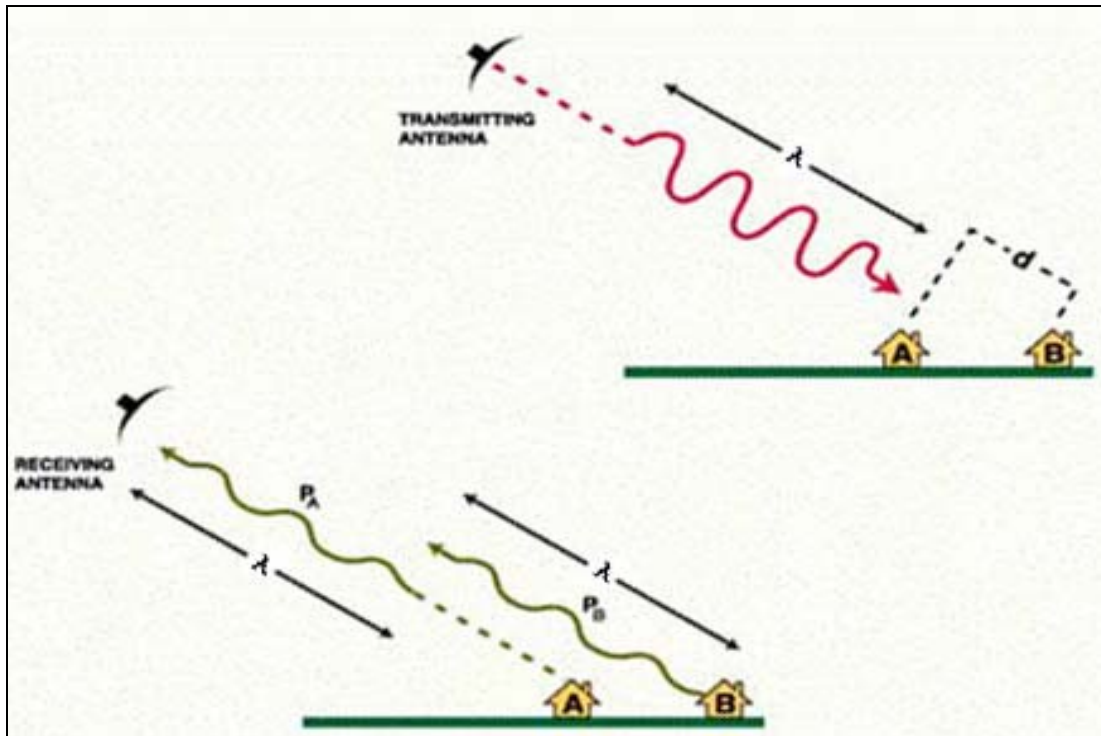
Εικόνα Β. 5. Γεωμετρία της απεικόνισης με SLAR (Kramer 2002, με μετατροπή).

Η απόσταση μεταξύ του Α και του Β καθορίζει το εύρος της ζώνης σάρωσης (swath width). Η απόσταση μεταξύ οποιουδήποτε σημείου μέσα στη ζώνης σάρωσης και του ραντάρ καλείται κεκλιμένη απόσταση (slant range). Η απόσταση πάνω στο έδαφος (ground range) για οποιοδήποτε σημείο μέσα στη ζώνης σάρωσης είναι η απόστασή του από το σημείο ναδίρ (σημείο στο έδαφος ακριβώς κάτω από το ραντάρ/nadir point).

### **Διακριτική ικανότητα κάθετα στη γραμμή πτήσης (range resolution)**

Για να είναι σε θέση το ραντάρ να διακρίνει δύο πολύ κοντινά στοιχεία, οι ανακλάσεις τους πρέπει απαραίτητως να παραληφθούν σε διαφορετικούς χρόνους. Στο ανώτερο μέρος του

σχήματος, ο Η/Μ παλμός μήκους  $\lambda$  (μήκος κύματος) πλησιάζει τα κτίρια Α και Β. Η κεκλιμένη απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων είναι  $d$ .



Εικόνα Β. 6. Διακριτική ικανότητα ενός RAR, κάθετα στη γραμμή πτήσης  
(από <http://earth.esa.int>, με μετατροπή).

Δεδομένου ότι το κύμα που εκπέμπεται από το ραντάρ πρέπει να φτάσει στο στόχο και να επιστρέψει (δύο διαδρομές) τα δύο κτίρια οδηγούν σε δύο διακεκριμένες ανακλάσεις εάν :

$$d > \lambda/2.$$

Το μέρος του κύματος ενέργειας που επανασκεδάζεται από το οικοδόμημα Α είναι  $P_A$ , και αντίστοιχα το μέρος του παλμού που επιστρέφει μετά από ανάκλαση στο οικοδόμημα Β είναι  $P_B$ .

Στο κάτω μέρος του σχήματος φαίνεται, ότι για να φθάσει στο στόχο και να επιστρέψει, το  $P_B$  έχει καλύψει μια πρόσθετη απόσταση  $2d$ . Όταν  $d \leq \lambda/2$ , τότε μέρος του τέλους του  $P_A$  και της αρχής του  $P_B$  επικαλύπτονται φθάνοντας στην κεραία. Κατά συνέπεια, απεικονίζονται ως ένας ενιαίος μεγάλος στόχος που εκτείνεται από το Α στο Β.

Εάν η κεκλιμένη απόσταση (slant range) μεταξύ του Α και του Β ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη από  $\lambda/2$ , οι δύο παλμοί δεν θα επικαλύπτονταν και τα δύο σήματα θα καταγράφονταν χωριστά.

Η διακριτική ικανότητα κάθετα στη γραμμή πτήσης  $r_r$  (across track resolution/range resolution) είναι λοιπόν περίπου ίση με  $\lambda/2$ , δηλαδή το μισό μήκος του Η/Μ παλμού:

$$r_r = \lambda/2 \quad (1)$$

Όμως

$$c = \lambda f \Rightarrow$$

$$\lambda = c \frac{1}{f} \quad (2)$$

όπου

$c$  : η ταχύτητα του φωτός ( $3 \cdot 10^8$  m/sec) και

$f$  : η συχνότητα

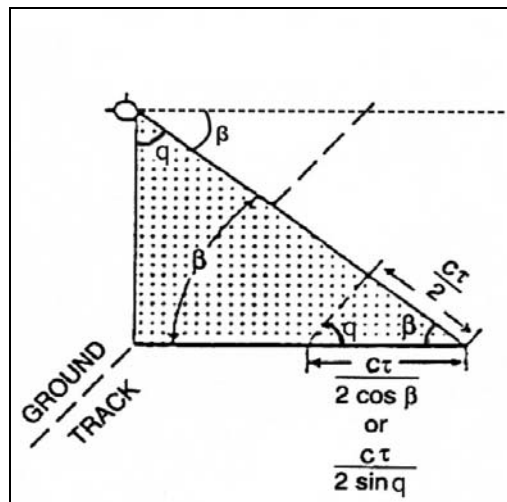
και  $\tau = \frac{1}{f} \quad (3)$

όπου

$\tau$  : η διάρκεια του παλμού

οπότε  $(2) \xrightarrow{(3)} \lambda = c\tau \quad (4)$  και άρα  $(1) \xrightarrow{(4)} r_r = \frac{c\tau}{2} \quad (5)$

Η διακριτική ικανότητα πάνω στο οριζόντιο έδαφος  $r_{gr}$  (ground range resolution) θα είναι :



Εικόνα Β. 7. Υπολογισμός της διακριτικής ικανότητας πάνω στο έδαφος (ground range resolution) (MacDonald 1969, από Henderson and Lewis 1998, με μετατροπή).

$$r_{gr} = \frac{c\tau}{2 \sin q} \quad (6) \quad \text{ή} \quad r_{gr} = \frac{c\tau}{2 \cos \beta} \quad (7)$$

όπου:

$q$  : η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) και

$\beta$  : η γωνία κλίσης (depression angle) μεταξύ της εκπεμπόμενης ακτίνας και του ορίζοντα

Η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία μεταξύ της κατακορύφου και της νοητής ευθείας που συνδέει την κεραία με το αντικείμενο.

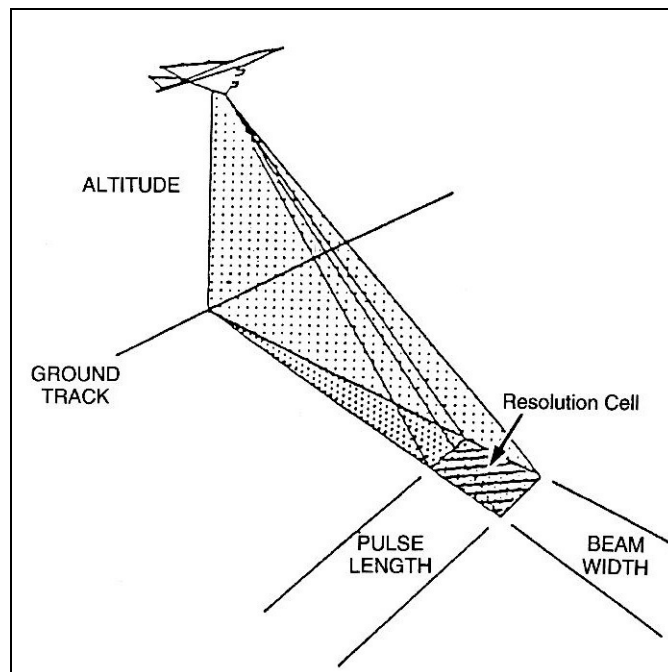
Για να βελτιωθεί η διακριτική ικανότητα, οι H/M παλμοί που εκπέμπει το ραντάρ θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο σύντομοι. Εντούτοις, είναι επίσης απαραίτητο για τους παλμούς να διαβιβάσουν αρκετή ενέργεια, ώστε να επιτραπεί η ανίχνευση του σκεδασμένου σήματος. Συνεπώς εάν οι H/M παλμοί κονταίνουν, το εύρος τους (amplitude) πρέπει να αυξηθεί για να διατηρηθεί η ίδια συνολική ενέργεια.

Ένας περιορισμός είναι το γεγονός, ότι ο εξοπλισμός που απαιτείται για να διαβιβάσει έναν πολύ σύντομο, υψηλής ενέργειας παλμό είναι δύσκολο να κατασκευαστεί. Γι' αυτόν τον λόγο τα περισσότερα συστήματα ραντάρ μακρού βεληνεκούς χρησιμοποιούν έναν "γραμμικό διαμορφωτή συχνότητας" (chirp), προσέγγιση η οποία αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο συμπίεσης του H/M παλμού με την κατάλληλη διαμόρφωση της συχνότητας.

Στην περίπτωση της τεχνικής "chirp", η ενέργεια του κάθε H/M παλμού κατανέμεται σε ένα μακράς διάρκειας σήμα, το οποίο, μετά από την υποδοχή του, μπορεί να συμπιεστεί και πάλι με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων. Για το χρήστη το αποτέλεσμα είναι το ίδιο, σαν ένας πολύ κοντός (σύντομος) H/M παλμός να χρησιμοποιήθηκε εξ' αρχής σε όλο το σύστημα.

### **Διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση αζιμουθίου (azimuth resolution)**

Η διακριτική ικανότητα αζιμουθίου (azimuth resolution) ή αλλιώς διακριτική ικανότητα κατά μήκος της γραμμής πτήσης (along-track resolution) περιγράφει τη δυνατότητα ενός ραντάρ να διαχωρίσει δύο κοντινούς ανακλαστές (scatterers) στην κατεύθυνση την παράλληλη στο διάνυσμα κίνησης του αισθητήρα (γραμμή πτήσης).



**Εικόνα Β. 8.** Το εύρος δέσμης (beamwidth) και το μήκος του παλμού, σε σχέση με το ίχνος της γραμμής πτήσης πάνω στο έδαφος (MacDonald 1969, από Henderson and Lewis 1998).

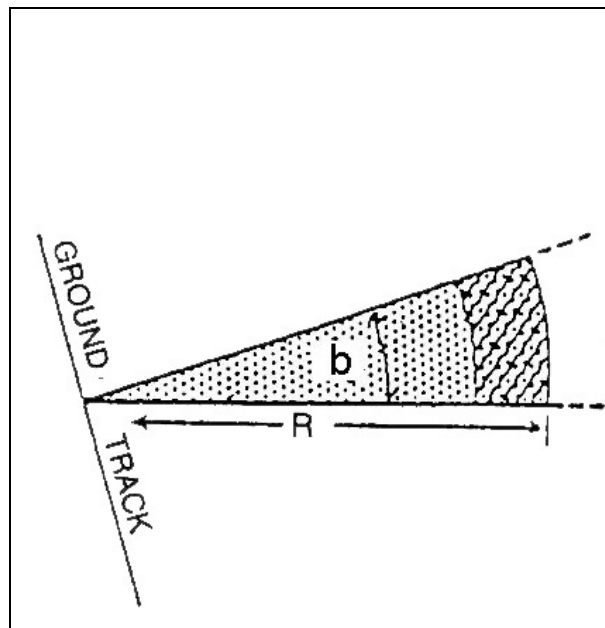
Όταν δύο αντικείμενα βρίσκονται στο εύρος της δέσμης/ακτίνας (beamwidth) του ραντάρ ταυτόχρονα, για σχεδόν όλους τους H/M παλμούς, και οι δύο προκαλούν ανακλάσεις και συνεπώς οι ηχώ τους θα παραληφθούν συγχρόνως.

Εντούτοις, το ανακλώμενο σήμα από ένα τρίτο αντικείμενο, το οποίο βρίσκεται εκτός του εύρους της δέσμης (beamwidth), δεν θα παραληφθεί έως ότου προωθεί το ραντάρ. Όταν το τρίτο αντικείμενο “φωτίζεται” από το ραντάρ, τα πρώτα δύο αντικείμενα δεν είναι πλέον “φωτισμένα” και κατά συνέπεια η ηχώ από αυτό το αντικείμενο θα καταγραφεί χωριστά.

Για ένα ραντάρ πραγματικής αντένας (RAR), δύο στόχοι στη διεύθυνση αζιμουθίου μπορούν να διαχωριστούν μόνο εάν η απόσταση μεταξύ τους είναι μεγαλύτερη από το εύρος της δέσμης (beamwidth) του ραντάρ. **Ως εκ τούτου, η διακριτική ικανότητα αζιμουθίου σε ένα RAR ισούται με το εύρος της δέσμης (beamwidth) του ραντάρ, αλλά εξαρτάται επίσης και από την κεκλιμένη απόσταση (slant range) του στόχου από το ραντάρ.**

Για κάθε τύπο ραντάρ, το εύρος δέσμης (beamwidth) έχει μια σταθερή γωνιακή τιμή. Για ένα σύστημα με περιορισμένη διάθλαση και δεδομένο μήκος κύματος  $\lambda$ , το εύρος δέσμης  $b$  εξαρτάται από το φυσικό μήκος  $dH$  της κεραίας στην οριζόντια διεύθυνση :

$$b = \frac{\lambda}{dH} \quad (8)$$



Εικόνα Β. 9. Υπολογισμός της διακριτικής ικανότητας αζιμουθίου (MacDonald 1969, από Henderson and Lewis 1998, με μετατροπή).

Παραδείγματος χάριν, για να επιτευχθεί ένα εύρος δέσμης 10 milliradians ( $10 \cdot 10^{-3}$  rad), χρησιμοποιώντας 50mm μήκος κύματος, θα ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μια κεραία μήκους 5 μέτρων. Η **πραγματική διακριτική ικανότητα αζιμουθίου ( $r_{az}$ )** δίνεται από τον τύπο :

$$r_{az} = R \cdot b \quad (9), \text{ όπου } R \text{ η κεκλιμένη απόσταση (slant range)}$$



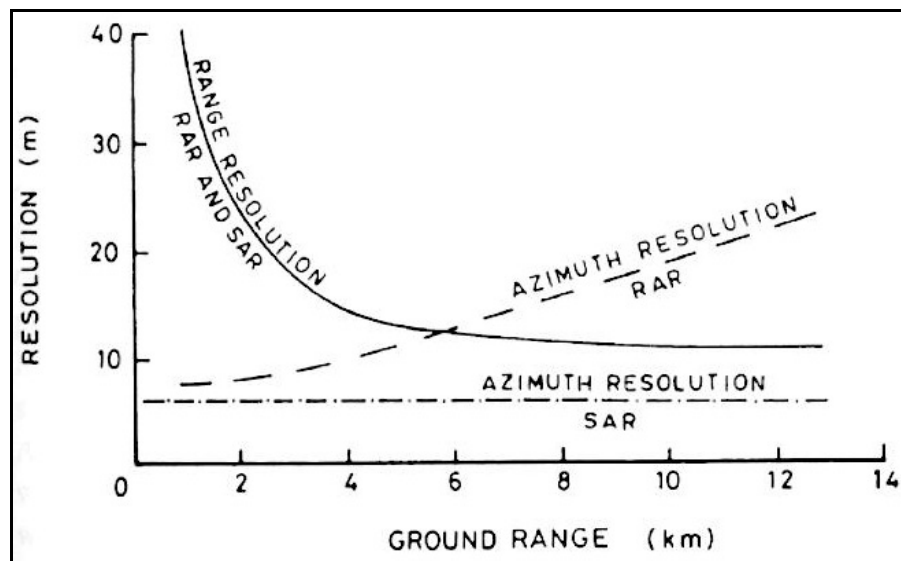
Για παράδειγμα, ένα RAR εύρους δέσμης 10 milliradians, σε μια κεκλιμένη απόσταση ίση με 700 km, η διακριτική ικανότητα αζιμουθίου θα είναι:  $r_{az} = 700 * 0,01 = 7km$

Τα ραντάρ πραγματικής κεραίας δεν παρέχουν μεγάλη διακριτική ικανότητα από τροχιακά ύψη, αν και έχουν κατασκευαστεί ανάλογα συστήματα και έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς (π.χ COSMOS 1500, ένα διαστημικό σκάφος της πρώην Σοβιετικής Ένωσης).

Για τέτοια ραντάρ, η διακριτική ικανότητα αζιμουθίου μπορεί να βελτιωθεί μόνο με τη χρήση μεγαλύτερου μήκους κεραίας ή πιο μικρού μήκους κύματος. Η χρήση όμως πιο μικρού μήκους κύματος οδηγεί γενικά σε εξασθένηση του σήματος, εξαιτίας της νεφοκάλυψης και της επίδρασης της ατμόσφαιρας, που περιορίζουν τις παντός καιρού δυνατότητες των ραντάρ που δίνουν εικόνα.

### PANTAP ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΑΝΤΕΝΝΑΣ (SAR)

Τα ραντάρ συνθετικής κεραίας (αντένας) ή αλλιώς ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radars/SARs), αναπτύχθηκαν ως μέσο υπερνίκησης των περιορισμών των ραντάρ πραγματικής αντένας (RARs). Αυτά τα συστήματα επιτυγχάνουν καλή διακριτική ικανότητα αζιμουθίου, που είναι ανεξάρτητη από τη κεκλιμένη απόσταση (slant range) του στόχου, χρησιμοποιώντας μικρές κεραίες και σχετικά μεγάλα μήκη κύματος (στα οποία η ατμόσφαιρα της γης είναι σχεδόν 100 % διαπερατή). **Σήμερα, τα υψηλής διακριτικής ικανότητας ραντάρ απεικόνισης αποτελούν ουσιαστικά έννοια ταυτόσημη με τα SAR (Henderson & Lewis, 1998).**



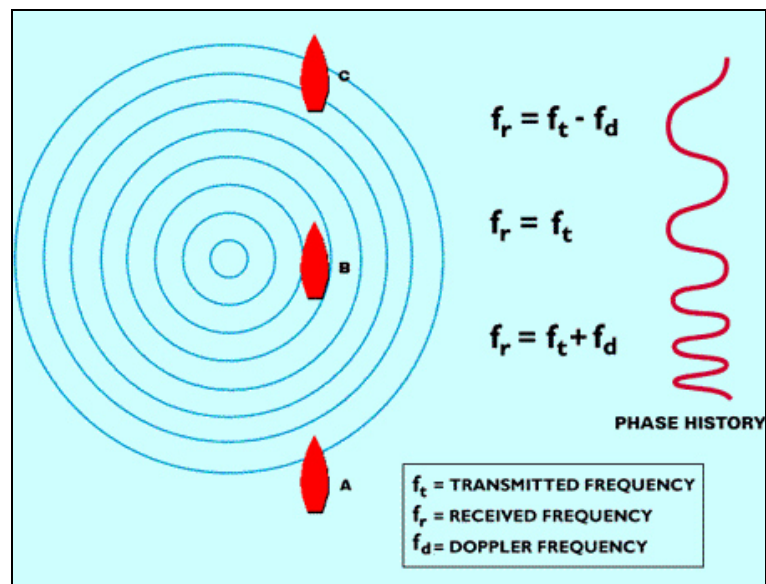
**Εικόνα Β. 10.** Παράδειγμα συγκριτικής αναπαράστασης της μεταβολής της διακριτικής ικανότητας (resolution) των RAR και SAR με την απόσταση πάνω στο έδαφος (ground range). Η διακριτική ικανότητα αζιμουθίου (azimuth resolution) σε ένα SAR παραμένει σταθερή, ενώ στα RAR μειώνεται (μεγαλύτερη τιμή) με την απόσταση. Αντίθετα, η διακριτική ικανότητα κάθετα στη γραμμή πτήσης (range resolution) αυξάνεται (μικρότερη τιμή) κατά όμοιο τρόπο στα SAR και τα RAR, καθώς αυξάνεται η απόσταση από το ίχνος της γραμμής πτήσης της πλατφόρμας που φέρει το ραντάρ (Henderson & Lewis, 1998).

### Βασική αρχή λειτουργίας ενός SAR

Ένα συνθετικό άνοιγμα κεραίας παράγεται με τη χρησιμοποίηση της προς τα εμπρός κίνησης του ραντάρ. Καθώς περνά δεδομένο στόχο, πολλοί H/M παλμοί ανακλώνται στη σειρά. Με την καταγραφή και έπειτα το συνδυασμό αυτών των μεμονωμένων σημάτων, ένα "συνθετικό άνοιγμα" δημιουργείται στον υπολογιστή, το οποίο παρέχει πολύ πιο βελτιωμένη διακριτική ικανότητα αζιμουθίου.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι μερικές λεπτομέρειες της δομής των ανακλάσεων που παράγονται από έναν δεδομένο στόχο, αλλάζουν κατά τη διάρκεια του χρόνου που μεσολαβεί κατά το "πέρασμα" του ραντάρ. Αυτή η αλλαγή ερμηνεύεται από την επίδραση του **φαινομένου Doppler**, που μεταξύ άλλων χρησιμοποιείται για να εστιάσει τα σήματα στον επεξεργαστή αζιμουθίου. Μια επεξήγηση μπορεί να δοθεί θεωρώντας την εξής αναλογία :

Ας θεωρήσουμε στο παρακάτω σχήμα την περίπτωση ενός δύτε, που καταδύεται και ανέρχεται στην επιφάνεια του ύδατος, παράγοντας κύκλους της ακτινοβολίας κυμάτων, κάθε ένα με μια σταθερή συχνότητα fZ.



Εικόνα Β. 11. Η έννοια της ιστορίας Doppler (Doppler history) ή ιστορία φάσης (phase history) (<http://earth.esa.int>).

Αυτά τα κύματα ταξιδεύουν με γνωστή ταχύτητα. Ο δύτες είναι μια πηγή κυμάτων ανάλογων με εκείνα που εκπέμπονται από ένα ραντάρ. Ενδιαφερόμαστε για την εμφάνιση αυτού του πεδίου κυμάτων σε μια ορισμένη απόσταση.

Έστω ότι μια βάρκα κινείται κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής (ABC). Στη θέση B, ένας επιβάτης στη βάρκα θα μετρούσε τον ίδιο αριθμό κυμάτων που πραγματικά εκπέμπονται, δεδομένου ότι δεν κινείται ούτε προς ούτε μακριά από τα κύματα (πηγή).

Εντούτοις, στη θέση A, η βάρκα κινείται προς τα κύματα και ο επιβάτης θα μετρήσει έναν υψηλότερο αριθμό κυμάτων, καθώς η ταχύτητα (αυτή που αντιλαμβάνεται ο επιβάτης) των κυμάτων αυξάνεται ελαφρώς λόγω της κίνησης του σκάφους προς την πηγή.

Αντίθετα, στη θέση C, η βάρκα απομακρύνεται από την πηγή των κυμάτων και η συχνότητα τους (στα μάτια του επιβάτη) είναι χαμηλότερη, καθώς τα κύματα κινούνται στην ίδια κατεύθυνση με τη βάρκα.

Η συχνότητα Doppler είναι η διαφορά μεταξύ των εκπεμπόμενων και λαμβανόμενων συχνοτήτων, όπου η διαφορά προκαλείται από τη σχετική κίνηση μεταξύ της πηγής και του παρατηρητή.

Ισοδύναμα, το σχετικό διάστημα μεταξύ των εξαρμάτων της ταλάντωσης των κυμάτων θα μπορούσε να καταγραφεί κατά μήκος της γραμμής AC, η οποία μετρήθηκε θεωρώντας το πεδίο των κυμάτων ακίνητο. Αυτό οδηγεί σε ένα πρότυπο φάσης των σημάτων που είναι ισοδύναμο με το μοντέλο του Doppler. Κατά τη διάρκεια της μετακίνησης της βάρκας από τη θέση A στη θέση C, η καταγραφή από τον παρατηρητή του αριθμού κυμάτων θα έμοιαζε με την καμπύλη στα δεξιά του σχήματος.

Αντί ενός δύτη, ας θεωρήσουμε τώρα ένα αεροσκάφος που εκπέμπει ένα σήμα ραντάρ. Η βάρκα αντιστοιχεί σε έναν στόχο που εμφανίζεται να κινείται μέσω της ακτίνας κεραιών, καθώς το ραντάρ κινείται προς τα μπρος. Η καταγραφή των σημάτων που σκεδάζονται από το στόχο και λαμβάνονται από την κεραία του ραντάρ θα ήταν παρόμοια με όσα κατέγραψε ο επιβάτης στη βάρκα, κατά την κίνησή του από το A στο C. Μια τέτοια καταγραφή (αρχείο) καλείται **ιστορία Doppler (Doppler history) ή ιστορία φάσης (phase history) των επιστρεφόμενων σημάτων**.

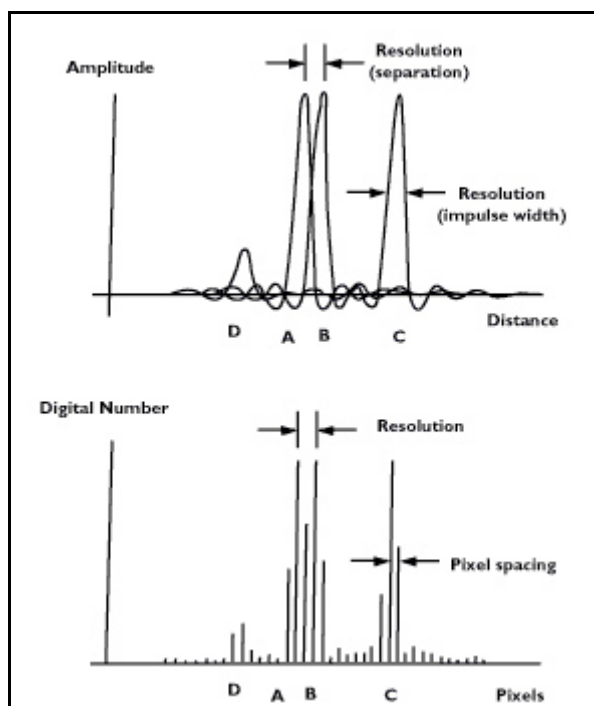
Όταν ο στόχος εισέρχεται στην ακτίνα του ραντάρ, η μετατόπιση εξαιτίας του φαινομένου Doppler είναι θετική, επειδή η απόσταση της πηγής από το στόχο μειώνεται. Όσο ο στόχος βρίσκεται εντός του εύρους της ακτίνας (θέση B), η λαμβανόμενη συχνότητα είναι η πραγματική, με τη συχνότητα Doppler να είναι μηδέν. Έπειτα μειώνεται, καθώς το αεροσκάφος απομακρύνεται.

Η ιστορία φάσης αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί αργότερα, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του σήματος SAR.

## ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ SAR

Ο στόχος της επεξεργασίας του σήματος SAR είναι να αναδημιουργηθεί το απεικονιζόμενο σκηνικό, από τους πολλούς παλμούς που ανακλώνται από κάθε ενιαίο στόχο, οι οποίοι παραλαμβάνονται από την κεραία και καταχωρούνται στη μνήμη.

Η διακριτική ικανότητα περιγράφει το ελάχιστο διάστημα, στο οποίο μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ δύο παρόμοιων αποκρίσεων σημείων (A και B, βλ. σχήμα), αλλά συχνά αναφέρεται και στο πλάτος μιας απόκρισης (C). Μια πίο ασθενής απόκριση (D) απαιτεί έναν μεγαλύτερο διαχωρισμό για την ανιχνευθεί.



Εικόνα Β. 12 Διακριτική ικανότητα (resolution) και απόσταση μεταξύ των εικονοστοιχείων (pixel spacing) (<http://earth.esa.int>)

Τα εικονοστοιχεία (pixels) αναφέρονται στις διακριτές θέσεις που χρησιμοποιούνται στις ψηφιακές εικόνες. Πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο εικονοστοιχεία μέσα στο εύρος της διακριτικής ικανότητας.

Η επεξεργασία SAR είναι μια απλή διαδικασία, αλλά απαιτεί πολλούς υπολογισμούς. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια λειτουργία εστίασης (focussing) σε δύο διαστάσεις. Το πρώτο βήμα είναι η σχετικά απλή διαδικασία της εστίασης κάθετα στη γραμμή πτήσης (range focussing), η οποία απαιτεί την απο-διαμόρφωση (de-chirping) των λαμβανόμενων ηχών. Η εστίαση αζιμουθίου (azimuth focussing), που αποτελεί το δεύτερο τμήμα της επεξεργασίας, εξαρτάται από τις ιστορίες Doppler που παράγονται από κάθε σημείο που αποτελεί «στόχο» του ραντάρ και συνιστά διαδικασία παρόμοια με την προηγούμενη. Εντούτοις η κατάσταση περιπλέκεται, από το γεγονός ότι αυτές οι ιστορίες Doppler είναι εξαρτώμενες από την απόσταση (range dependent), έτσι η συμπίεση του σήματος κατά τη διεύθυνση αζιμουθίου πρέπει να έχει την ίδια εξάρτηση από την απόσταση.

Επίσης είναι απαραίτητο να γίνουν διάφορες διορθώσεις στα δεδομένα, παραδείγματος χάριν εξαιτίας της κίνησης των αισθητήρων και της περιστροφής της γης, καθώς επίσης και για τις αλλαγές στην απόσταση των στόχων, κατά την μετακίνηση του αισθητήρα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι το εικονοστοιχείο (pixel) της τελικής εικόνας SAR δεν έχει τις ίδιες διαστάσεις με αυτό της διακριτικής ικανότητας κατά τη διάρκεια της λήψης των δεδομένων, λόγω της διαφοροποίησης της διακριτικής ικανότητας κάθετα στη γραμμή πτήσης (range resolution) με τη γωνία πρόσπτωσης (incidence angle). Κατά συνέπεια είναι απαραίτητο να εκτελεσθεί μια αναδιαμόρφωση (resampling) των εικονοστοιχείων με ένα ομοιόμορφο πλέγμα (grid).

Κατά σύμβαση, το διάστημα μεταξύ των εικονοστοιχείων (pixel spacing) στις εικόνες SAR επιλέγεται έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις τυποποιημένες κλίμακες χαρτών, ως εκ τούτου πρέπει

να είναι ένα διακριτό πολλαπλάσιο (ή διαιρέτης) των 100 μέτρων. Παραδείγματος χάριν, τα δεδομένα από τον δορυφόρο ERS-1, που έχουν κανονικά διακριτική ικανότητα 28 μέτρων και στις δύο διαστάσεις, παραδίδονται με διάστημα μεταξύ των εικονοστοιχείων 12,5 μέτρα.

## ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΟΙ ΟΠΟΙΕΣ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΟΠΙΣΘΟΣΚΕΔΑΣΗ (BACKSCATTERING) ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Τα διάφορα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της επιφάνειας συμπεριφέρονται διαφορετικά ως προς την προσπίπτουσα μικροκυματική ακτινοβολία των ραντάρ, παρουσιάζουν δηλαδή διαφορετική οπισθοσκέδαση (backscattering). Έτσι έχουμε :

- αστικές περιοχές : πολύ ισχυρή οπισθοσκέδαση
- δάσος : ενδιάμεση οπισθοσκέδαση
- ήρεμες υδάτινες επιφάνειες : ομαλή επιφάνεια, χαμηλή οπισθοσκέδαση
- τραχιά θάλασσα : αυξημένη οπισθοσκέδαση λόγω του αέρα και της επίδρασης των κυμάτων

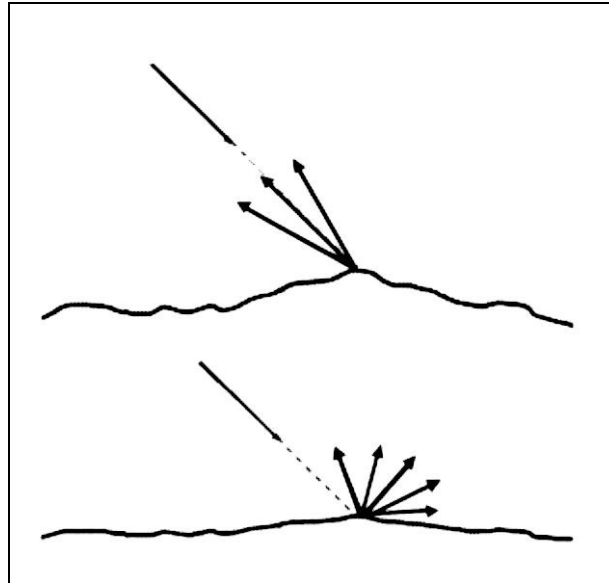
Ένα μέτρο της οπισθοσκέδασης αποτελεί ο **συντελεστής οπισθοσκέδασης ή οπισθοδιασποράς (backscattering coefficient)  $\sigma_0$** , ο οποίος μετριέται σε ντεσιμπέλ (dB) και δίνεται από τον τύπο :

$$\sigma_0(\text{dB}) = 10 \log_{10}(\text{αναλογία ενέργειας})$$

$$\text{όπου : αναλογία ενέργειας} = \frac{\text{ενέργεια που λαμβάνεται από τον δέκτη}}{\text{"ενέργεια που ανακλάται κατά τρόπο ισότροπο"}}$$

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης μπορεί να είναι θετικός αριθμός, αν η ανακλώμενη ενέργεια εστιάζεται προς το ραντάρ ή αρνητικός αριθμός, αν η ανακλώμενη ενέργεια σκεδάζεται προς διαφορετικές διευθύνσεις μακριά από το ραντάρ (π.χ. στην περίπτωση ομαλών επιφανειών).





**Εικόνα Β. 13.** Ανακλώμενη ενέργεια που εστιάζεται προς το ραντάρ ( $c_0 > 0$ ) (πάνω) ή απομακρύνεται από αυτό ( $c_0 < 0$ ) (κάτω) (Hanjsek, 2003).

Ανάλογα με το βαθμό οπισθοδιασποράς ο συντελεστής  $c_0$  λαμβάνει ορισμένες τιμές, οι οποίες είναι τυπικές ορισμένων χαρακτηριστικών του αναγλύφου :

| Επίπεδο οπισθοδιασποράς ( $c_0$ ) | Τυπικό σενάριο                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Πολύ υψηλό (πάνω από -5 dB)       | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ανθρώπινες κατασκευές</li> <li>▪ Κλιτείες που «βλέπουν» προς το ραντάρ</li> <li>▪ Εξαιρετικά τραχείς επιφάνειες</li> <li>▪ Πολύ απότομη γωνία λήψης (look angle)</li> </ul> |
| Υψηλό (-10 έως 0 dB)              | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Τραχείς επιφάνειες</li> <li>▪ Πυκνή βλάστηση (δάσος)</li> </ul>                                                                                                             |
| Μέσο (-20 έως -10 dB)             | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Μέσο επίπεδο βλάστησης</li> <li>▪ Αγροτικές καλλιέργειες</li> <li>▪ Μετριας τραχύτητας επιφάνειες</li> </ul>                                                                |
| Χαμηλό (κάτω από -20 dB)          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ομαλές επιφάνειες</li> <li>▪ Ήρεμα νερά, δρόμος</li> <li>▪ Πολύ ξηρό έδαφος (άμμος)</li> </ul>                                                                              |

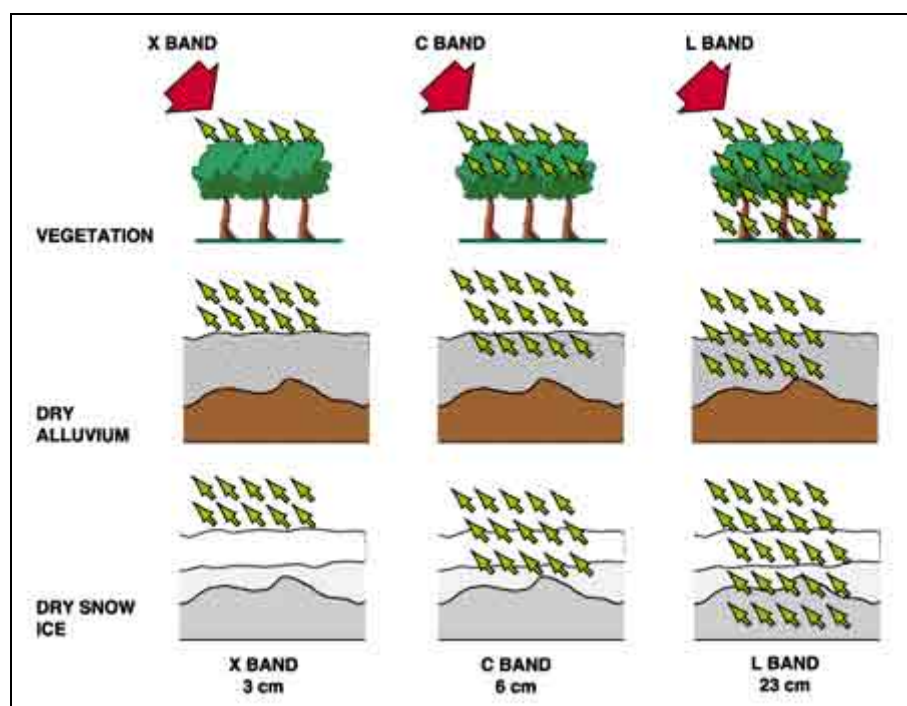
**Πίνακας Β. 1.** Ενδεικτικά παραδείγματα της σχέσης του συντελεστή  $c_0$  και των χαρακτηριστικών της περιοχής που απεικονίζεται (Hanjsek, 2003).

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης ή οπισθοδιασποράς για ένα ραντάρ παρέχει πληροφορίες για την επιφάνεια που απεικονίζεται κάθε φορά και εξαρτάται τόσο από τις παραμέτρους παρατήρησης του ραντάρ (συχνότητα, πόλωση και γωνία πρόσπτωσης των εκπεμπόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων), όσο και από τα στοιχεία της παρατηρούμενης επιφάνειας (τραχύτητα, γεωμετρική μορφή και διηλεκτρικές ιδιότητες).

## Συχνότητα

Η συχνότητα της προσπίπτουσας μικροκυματικής ακτινοβολίας καθορίζει το βάθος διείσδυσης (penetration depth) των κυμάτων για το στόχο που απεικονίζεται και τη σχετική τραχύτητα της εξεταζόμενης επιφάνειας.

Το βάθος διείσδυσης γίνεται μεγαλύτερο, καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται. Εάν εξετάσουμε το παράδειγμα ενός δάσους, η ακτινοβολία θα διαπεράσει μόνο τα πρώτα φύλλα πάνω από τα δέντρα εάν χρησιμοποιηθεί το κανάλι (ζώνη) X (X-band,  $\lambda=3\text{cm}$ ). Το περιεχόμενο πληροφοριών της εικόνας θα συσχετίζεται τότε με το κορυφαίο στρώμα των δέντρων. Αντίθετα, στην περίπτωση της ζώνης L (L-band,  $\lambda=23\text{cm}$ ), η ακτινοβολία διαπερνά τα φύλλα και τα μικρά κλαδιά και συνεπώς το περιεχόμενο πληροφοριών της εικόνας σχετίζεται με τα κλαδιά και τους κορμούς των δέντρων. Το ίδιο φαινόμενο ισχύει για τους διάφορους τύπους επιφανειών ή στόχων (βλ. σχήμα).



Εικόνα Β. 14. Εξάρτηση της ικανότητας διείσδυσης των μικροκυμάτων στη βλάστηση και το έδαφος από το μήκος κύματος (και επομένως και από τη συχνότητα) (<http://earth.esa.int>).

Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί, ότι το βάθος διείσδυσης σχετίζεται επίσης με την υγρασία του στόχου και ότι τα μικροκύματα δεν διαπερνούν το νερό περισσότερο από μερικά χιλιοστάμετρα.

## Πόλωση

Η πόλωση (polarization) περιγράφει τον προσανατολισμό της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τα ραντάρ απεικόνισης μπορούν να έχουν διαφορετικές διαμορφώσεις πόλωσης.

Εντούτοις, οι γραμμικές διαμορφώσεις πόλωσης (linear polarization configurations) HH, VV, HV, VH [H=horizontal (οριζόντια), V=vertical (κατακόρυφη)] χρησιμοποιού-νται συχνότερα. Ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στην πόλωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, ενώ ο δεύτερος όρος

στη λαμβανόμενη ακτινοβολία. Για παράδειγμα το  $X_{HV}$  αναφέρεται στο κανάλι X, με μικροκυματική ακτινοβολία που εκπέμπεται σε οριζόντιο επίπεδο (H), και λαμβάνεται σε κατακόρυφο επίπεδο (V).

Σε ορισμένες συγκεκριμένες περιπτώσεις, η πόλωση μπορεί να παρέχει τις πληροφορίες για τα διαφορετικά στρώματα του στόχου, όπως στην περίπτωση της πλημμυρισμένης βλάστησης. Το βάθος διείσδυσης του κύματος ραντάρ ποικίλλει, ανάλογα με την πόλωση που επιλέγεται.

Επίσης η πόλωση μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τη μορφή και τον προσανατολισμό των επιμέρους στοιχείων σκέδασης, που συνθέτουν την επιφάνεια ή το στόχο.

Περισσότερες από μια αναπήδησεις (bounces) της οπισθοσκέδασης τείνουν να αποπολωθούν (depolarize) το σήμα, έτσι ώστε η διασταυρούμενη πολωμένη επιστροφή σε αυτήν την περίπτωση να είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι σε μια ανάκλαση μονής αναπήδησης (single bounce reflection).

### **Γωνία πρόσπτωσης**

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) καθορίζεται από τη γωνία μεταξύ της καθέτου στη απεικονιζόμενη επιφάνεια και της διεύθυνσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για τους περισσότερους φυσικούς στόχους, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης  $\sigma^0$  διαφοροποιείται ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης.

Πειραματική εργασία που εκτελέστηκε από τους Ulaby et al. (1978) χρησιμοποιώντας πέντε δείγματα εδάφους με διαφορετική τραχύτητα αλλά παρόμοια περιεκτικότητα σε υγρασία έδειξε, ότι κατά χρησιμοποίηση του καναλιού L ( $f=1,1$  GHz), η οπισθοσκέδαση των ομαλών εδαφών ήταν πολύ ευαίσθητη στις κοντινές στο σημείο ναδίρ (μικρές) γωνίες πρόσπτωσης απ' ετέρου, στην περίπτωση δε των τραχιών επιφανειών, η οπισθοσκέδαση ήταν σχεδόν ανεξάρτητη από τη γωνία πρόσπτωσης που επιλέχτηκε.

### **Τραχύτητα**

Η τραχύτητα είναι μια έννοια σχετική, η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος  $\lambda$  και τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ . Μια επιφάνεια θεωρείται "τραχιά" εάν περιέχει δομές, των οποίων οι διαστάσεις είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Σύμφωνα με το κριτήριο Rayleigh, μια επιφάνεια θεωρείται ομαλή εάν:

$$h < \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \theta}$$

και τραχιά εάν:

$$h > \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \theta}$$

όπου :

$h$  : το μέσο ύψος των διαφοροποιήσεων της επιφάνειας

$\lambda$  : το μήκος κύματος και

$\theta$  : η γωνία πρόσπτωσης

Ένα παράδειγμα της επίδρασης της τραχύτητας της επιφάνειας μπορεί να παρατηρηθεί στις ζώνες της επαφής μεταξύ του εδάφους και του ύδατος. Οι επιφάνειες κλειστών υδάτων τείνουν να είναι σχετικά ομαλές, με το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας να ανακλάται μακριά από το ραντάρ και μόνο ένα μικρό ποσοστό της οπισθοδιασποράς να κατευθύνεται προς αυτό.

Αντίθετα, οι χερσαίες επιφάνειες τείνουν να έχουν μια υψηλότερη τραχύτητα. Οι υδάτινες επιφάνειες εμφανίζονται γενικά με σκοτεινούς τόνους στις εικόνες ραντάρ, εκτός από την περίπτωση της επίδρασης του αέρα ή των ρευμάτων, παραγόντων δηλαδή που αυξάνουν την τραχύτητα και συνεπώς προκαλούν υψηλότερη οπισθοσκέδαση. Στην περιοχή των μικροκυμάτων, αυτή η διαφορά μεταξύ των αντίστοιχων ιδιοτήτων του εδάφους και του ύδατος μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμη για εφαρμογές όπως η μέτρηση της έκτασης πλημμυρών ή η διάβρωση των παράκτιων ζωνών.

### **Υγρασία**

Η σύνθετη διηλεκτρική σταθερά (complex dielectric constant) είναι ένα μέτρο των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών της επιφάνειας. Αποτελείται από δύο μέρη [διαπερατότητα (permittivity) και αγωγιμότητα (conductivity)], που είναι και τα δύο ιδιαίτερα εξαρτώμενα από την περιεκτικότητα σε υγρασία του εξεταζόμενου υλικού.

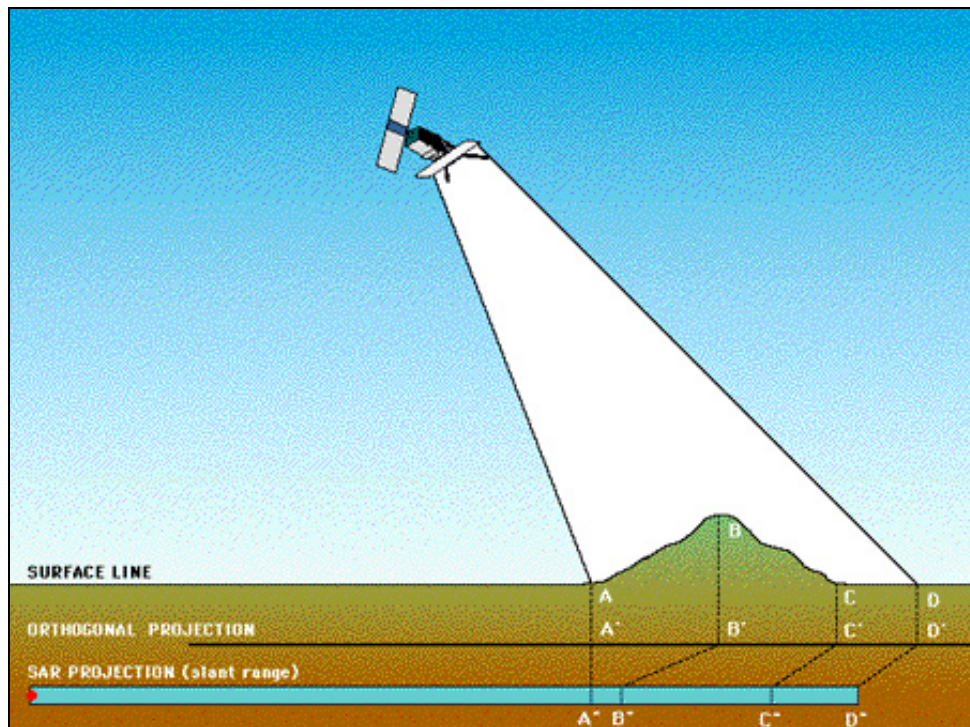
Στην περιοχή μικροκυμάτων, τα περισσότερα φυσικά υλικά έχουν μια διηλεκτρική σταθερά μεταξύ 3 και 8, σε ξηρές συνθήκες. Το νερό έχει μια υψηλή διηλεκτρική σταθερά (80), τουλάχιστον 10 φορές υψηλότερη απ' ό,τι το ξηρό χώμα. Κατά συνέπεια, μια αλλαγή στην περιεκτικότητα σε υγρασία προκαλεί γενικά μια σημαντική αλλαγή στις διηλεκτρικές ιδιότητες των φυσικών υλικών. Αυξανόμενη της υγρασίας αυξάνεται και η ανακλαστικότητα του σήματος ραντάρ. Η διείσδυση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα αντικείμενο είναι αντιστρόφως ανάλογη της περιεκτικότητας σε ύδωρ. Στην περίπτωση της βλάστησης, το βάθος διείσδυσης εξαρτάται από την υγρασία, την πυκνότητα και τη γεωμετρική δομή των φυτών (φύλλα, κλαδιά).

## **ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ SAR**

### **Βράχυνση (Forshortening)**

Πιθανώς το πιο εντυπωσιακό χαρακτηριστικό γνώρισμα στις εικόνες SAR είναι η "παράξενη" γεωμετρία στην κατεύθυνση την κάθετη στη γραμμή πτήσης (range direction).

Αυτό το φαινόμενο αποδίδεται στη βασική αρχή απεικόνισης με SAR: γίνεται μέτρηση του χρόνου διαδρομής και όχι των γωνιών υπό τις οποίες "ταξιθεύουν" τα σήματα, όπως συμβαίνει με τα οπτικά συστήματα. Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ των ανακλάσεων του σήματος του ραντάρ που παραλαμβάνονται από δύο διαφορετικά σημεία καθορίζει τη σχετική απόστασή τους στην εικόνα.



Εικόνα Β. 15. Το φαινόμενο της βράχυνσης (Foreshortening) (<http://earth.esa.int>).

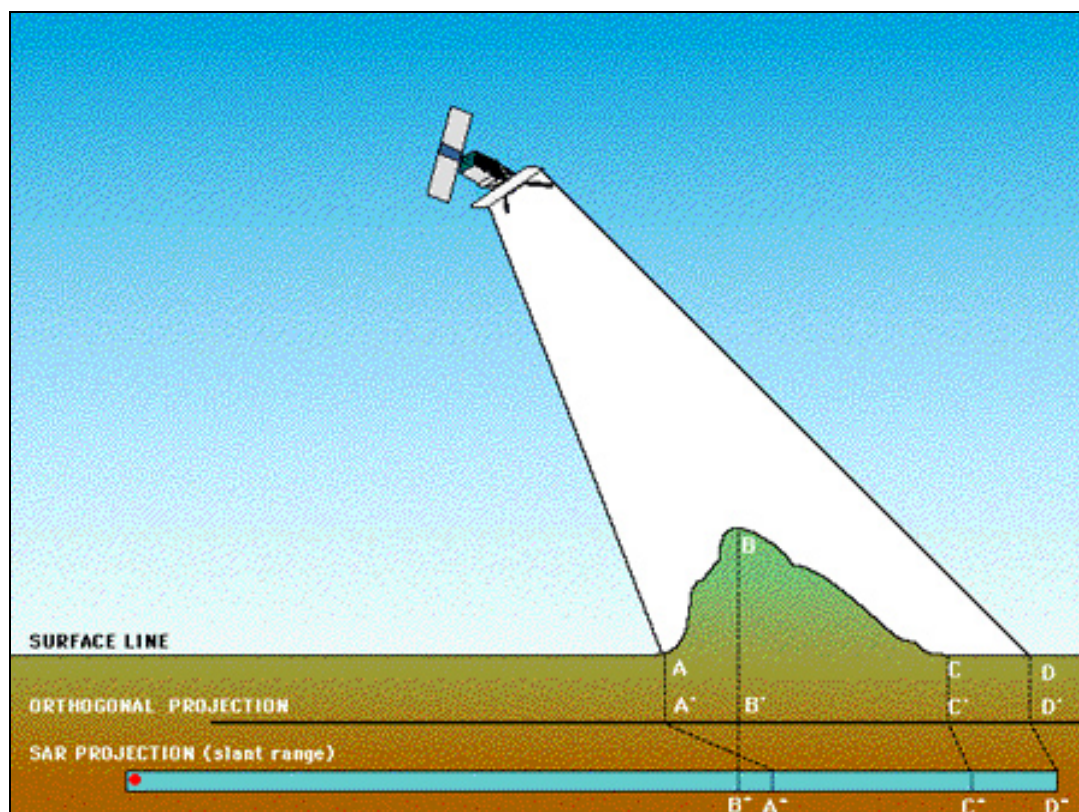
Στο σχήμα, τα A, B, C ισαπέχουν μεταξύ τους όταν προβάλλονται κατακόρυφα πάνω στο έδαφος (όπως γίνεται στη συμβατική χαρτογραφία). Εντούτοις στην περίπτωση ενός SAR, η απόσταση μεταξύ του A και του B μικραίνει αρκετά έναντι της απόστασης BC, επειδή η κορυφή του βουνού είναι σχετικά κοντύτερα στο ραντάρ.

Το φαινόμενο αυτό της βράχυνσης (Foreshortening) (Γκανάς, 1998) έχει μια κυρίαρχη επίδραση στις εικόνες SAR των ορεινών περιοχών, όπου τα βουνά φαίνονται "να κλίνουν" προς τον αισθητήρα.

Ειδικά στην περίπτωση διαστημικών συστημάτων ραντάρ με μεγάλη (απότομη) γωνία σάρωσης (look angle), οι κάθετα στην τροχιά διαφορές μεταξύ δύο σημείων που βρίσκονται στις κλιτείες των βουνών που βλέπουν προς το ραντάρ (foreslopes) είναι μικρότερες από θα ήταν σε επίπεδες περιοχές.

Αυτή η επίδραση οδηγεί σε μια συμπίεση της ραδιομετρικής πληροφορίας στη διεύθυνση κάθετα στη γραμμή πτήσης, η οποία μπορεί να αντισταθμιστεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της «γεωκωδικοποίησης» (geocoding), με τη βοήθεια ενός μοντέλου του αναγλύφου.



**Αναστροφή (Layover)**

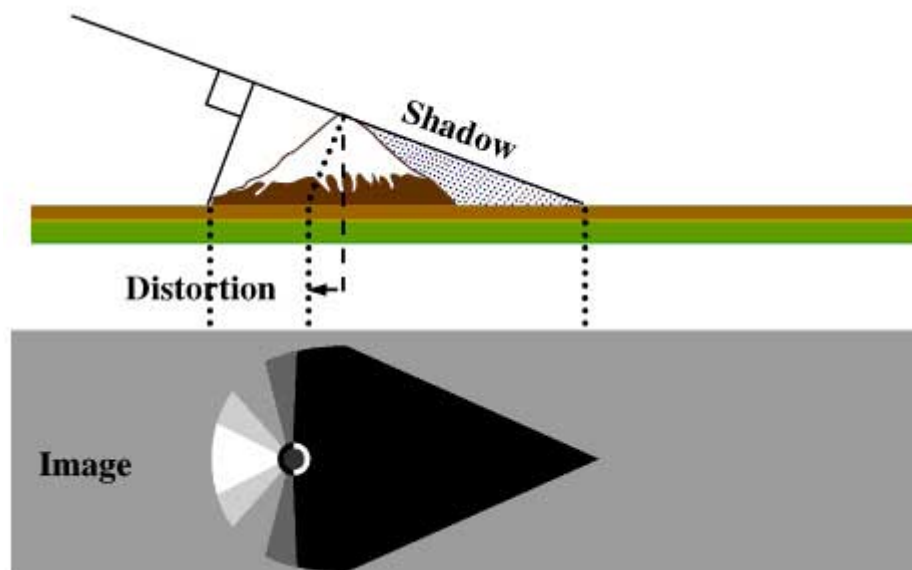
Εικόνα Β. 16. Το φαινόμενο της αναστροφής (layover) (<http://earth.esa.int>).

Εάν, στην περίπτωση μιας πολύ απότομης κλιτύς, οι στόχοι στην κοιλάδα έχουν μια μεγαλύτερη κεκλιμένη απόσταση (slant range) από ότι οι κορυφές των βουνών, η πλαγιά προς το μέρος του ραντάρ (foreslope) “αντιστρέφεται” στην εικόνα. Το φαινόμενο αυτό, κατά το οποίο η διάταξη των στοιχείων της επιφάνειας στην εικόνα ραντάρ είναι η αντιστροφή της πραγματικής διάταξης στο έδαφος καλείται αναστροφή (layover). Γενικά, αυτές οι ζώνες αναστροφής, που “βλέπουν” προς το ραντάρ, εμφανίζονται ως φωτεινά χαρακτηριστικά γνωρίσματα στην εικόνα λόγω της μικρής γωνίας πρόσπτωσης (που σημαίνει, ότι μεγαλύτερο ποσοστό της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας επιστρέφει στο ραντάρ).

Ασάφεια εμφανίζεται μεταξύ των στόχων που βρίσκονται στην κοιλάδα και την πλαγιά του βουνού που “βλέπει” προς το ραντάρ, σε περίπτωση που έχουν την ίδια κεκλιμένη απόσταση (slant range). Για τις απότομες γωνίες πρόσπτωσης το παραπάνω μπορεί επίσης να περιλάβει τους στόχους και στην πίσω πλαγιά του βουνού (backslope). Η επεξεργασία για την απαλοιφή των παραμορφώσεων (geocoding) δεν μπορεί να αποσαφηνίσει τις ασάφειες που οφείλονται στην αντιπροσώπευση διάφορων σημείων στο έδαφος από ένα ενιαίο σημείο στην εικόνα. Αυτές οι ζώνες εμφανίζονται επίσης φωτεινές στη γεωμετρικά διορθωμένη (geocoded) εικόνα.



## **Σκιά (Shadow)**



Εικόνα Β. 17. Το φαινόμενο της σκιάς (shadow) (<http://earth.esa.int>).

Μια κλίση μακριά από το “φωτισμό” του ραντάρ με μια γωνία που είναι πιο απότομη από τη γωνία κλίσης του αισθητήρα προκαλεί τις σκιές στις εικόνες ραντάρ. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι σκιές σε μια εικόνα ραντάρ δύο αντικειμένων του ίδιου ύψους είναι μακρύτερες σε μακρινή απόσταση (far range) απ’ ό,τι σε κοντινή απόσταση (near range). Οι περιοχές σκιών εμφανίζονται σκοτεινές (μηδέν σήμα) με οποιεσδήποτε αλλαγές που οφείλονται απλώς στο θόρυβο του συστήματος, τους πλευρικούς λοβούς, και άλλες επιδράσεις μικρής σπουδαιότητας.

## **ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΡΑΝΤΑΡ**

Οι εικόνες ραντάρ έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά που είναι εντελώς διαφορετικά από τις εικόνες που λαμβάνονται με τη χρησιμοποίηση των οπτικών αισθητήρων, όπως είναι π.χ οι εικόνες Landsat και Spot ή οι αεροφωτογραφίες. Αυτά τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά είναι η συνέπεια της τεχνικής απεικόνισης που χρησιμοποιείται από το ραντάρ.

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης μιας εικόνας ραντάρ, ο ερμηνευτής πρέπει να λάβει υπόψη το γεγονός, ότι ακόμα κι αν η εικόνα παρουσιάζεται ως αναλογικό προϊόν σε φωτογραφικό χαρτί, το ραντάρ “βλέπει” το εκάστοτε “σκηνικό” (scene) με έναν πολύ διαφορετικό τρόπο από το ανθρώπινο μάτι ή από έναν οπτικό αισθητήρα. Οι διαβαθμίσεις του γκριζου στην προκειμένη περίπτωση σχετίζονται με τη σχετική ένταση της μικροκυματικής ενέργειας, η οποία οπισθοσκεδάζεται (backscattered) από τα στοιχεία του παρατηρούμενου τοπίου.

Οι σκιές στην εικόνα ραντάρ σχετίζονται με την πλάγια γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το σύστημα ραντάρ και όχι με τη γεωμετρία του ηλιακού φωτισμού (solar illumination). Η οπτική ομοιότητα μεταξύ των δύο τύπων εικόνων οδηγεί πολλές φορές σε σύγχυση, ιδιαίτερα τους λιγότερο έμπειρους στην ερμηνεία των εικόνων ραντάρ.

Οι διαβαθμίσεις του τεφρού (γκρίζου) σε μια εικόνα ραντάρ σχετίζονται με τις ιδιότητες του ανακλώμενου από την επιφάνεια σήματος. Η ένταση του τελευταίου (δηλαδή του σήματος)

ποικίλλει ανάλογα με την τραχύτητα, τις διηλεκτρικές ιδιότητες και την τοπική κλίση. Κατά συνέπεια το σήμα ραντάρ αναφέρεται κυρίως στις γεωμετρικές ιδιότητες του στόχου.

Αντίθετα, οι μετρήσεις στις περιοχές του ορατού και του υπέρυθρου χρησιμοποιούν τους οπτικούς αισθητήρες, όπου η απόκριση των στόχων σχετίζεται με τα χρώματα, τη χημική σύνθεση και τη θερμοκρασία τους.

Οι ακόλουθες παράμετροι χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της ερμηνείας εικόνων ραντάρ:

- Τόνος (tone) : μπορεί να οριστεί ως η μέση ένταση του σήματος που επιστρέφει στο ραντάρ. Οι επιστροφές υψηλής έντασης εμφανίζονται ως ανοικτοί τόνοι σε μία εικόνα, ενώ οι ασθενείς επιστροφές σημάτων εμφανίζονται ως σκοτεινοί τόνοι.
- Μορφή/σχήμα (shape) : μπορεί να οριστεί ως η χωρική μορφή (περίγραμμα) του αντικειμένου. Μερικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα (οδοί, γέφυρες, αερολιμένες κ.λ.π.) μπορούν να αναγνωριστούν από τη μορφή τους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μορφή είναι όπως φαίνεται από τον πλάγιο “φωτισμό” (illumination) του ραντάρ.
- Δομή (structure) : η χωρική ρύθμιση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων σε μια περιοχή με επαναλαμβανόμενη διαμόρφωση. **Η παράμετρος αυτή είναι εξαιρετικά σημαντική για την ερμηνεία εικόνων ραντάρ, ειδικά στη γεωλογία και την ωκεανογραφία. Αξιολογείται χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες τεχνικές ανίχνευσης (όπως π.χ. edge).**
- Μέγεθος (size) : το μέγεθος ενός αντικειμένου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ποιοτικό στοιχείο αναγνώρισης στις εικόνες ραντάρ. Το μέγεθος γνωστών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων στις εικόνες παρέχει μια σχετική αξιολόγηση της κλίμακας, καθώς και των διαστάσεων άλλων γνωρισμάτων του αναγλύφου.
- Υφή (texture) : Σε γενικές γραμμές, η υφή μιας εικόνας ραντάρ μπορεί να περιγραφεί θεωρώντας τις έννοιες της μακρο-, της μέσο- και της μικρο-υφής.

Η **μικρο-υφή (micro-texture) ή στίγμα (speckle) ή θόρυβος (noise)**, εμφανίζεται ως κόκκοι ίδιου μεγέθους με το εικονοστοιχείο της διακριτικής ικανότητας (resolution cell) ή και μεγαλύτεροι, που έχουν τυχαία φωτεινότητα. Αυτή η υφή είναι εγγενής του συστήματος ραντάρ και δεν αντιστοιχεί σε κάποια πραγματική διαφοροποίηση από το ένα εικονοστοιχείο στο άλλο. Κατά συνέπεια το στίγμα είναι χαρακτηριστικό της εικόνας, που προκύπτει από το σύστημα και όχι από το παρατηρούμενο σκηνικό. Το στίγμα υποβιβάζει την αναγνωσιμότητα της εικόνας. Εντούτοις, παρά αυτό το σημαντικό μειονέκτημα, το στίγμα μπορεί να περιγραφεί στατιστικά και να «φιλτραριστεί» με κατάλληλες μεθόδους.

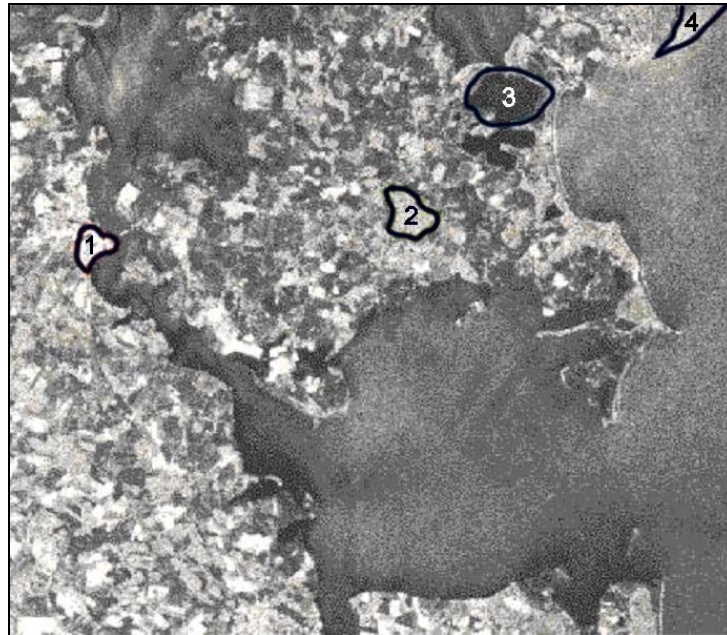
Η **μεσο-υφή (meso-texture)** είναι η φυσική διαφοροποίηση της μέσης οπισθοδιασποράς του ραντάρ, που περιλαμβάνει αρκετά έως πολλά εικονοστοιχεία. Παίρνοντας τα δάση ως παράδειγμα, η υψηλή οπισθοδιασπορά από το μέρος του δέντρου που αντικρίζει το ραντάρ εμφανίζεται κοντά στη σκιά του αντιταγμένου μέρους του δέντρου μακριά από το ραντάρ. Το αποτέλεσμα είναι μια κοκκώδης σύσταση της οποίας η στοιχειώδης μονάδα καλύπτει αρκετά έως πολλά εικονοστοιχεία (ανάλογα με τη χωρική διακριτική ικανότητα του συστήματος). Αυτή η συνιστώσα της υφής είναι η πιο χρήσιμη στην ερμηνεία μιας εικόνας ραντάρ.

Η **μακρο-υφή (macro-texture)** αντιστοιχεί σε παραλλαγές της φωτεινότητας, οι οποίες επεκτείνονται σε πολλά εικονοστοιχεία. Μπορεί να είναι, παραδείγματος χάριν, όρια γεωργικών

εκτάσεων, σκιές ενός δάσους, δρόμοι ή **χαρακτηριστικά γεωλογικού ενδιαφέροντος (π.χ. γραμμώσεις).**

Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα επιφάνειας παρουσιάζουν διαφορετική οπισθοδιασπορά (backscattering), που δίνει τον αντίστοιχο τόνο στην εικόνα. Ενδεικτικά αναφέρονται τα παρακάτω παραδείγματα (βλ. σχήμα) :

- *Αστικές περιοχές*: πολύ ισχυρή οπισθοδιασπορά (1)
- *Δάσος*: μέση τιμή οπισθοδιασποράς (2)
- *Ήρεμο ύδωρ*: ομαλή επιφάνεια, χαμηλή οπισθοσκέδαση (3)
- *Τραχιά θάλασσα*: αυξημένη οπισθοδιασπορά λόγω του αέρα και των ρευμάτων (4)



Εικόνα Β. 18. Διαβάθμιση του τόνου ανάλογα με την οπισθοδιασπορά: (1) *Αστικές περιοχές*: πολύ ισχυρή οπισθοδιασπορά. (2) *Δάσος*: μέση τιμή οπισθοδιασποράς. (3) *Ήρεμο ύδωρ*: ομαλή επιφάνεια, χαμηλή οπισθοσκέδαση. (4) *Τραχιά θάλασσα*: αυξημένη οπισθοδιασπορά λόγω του αέρα και των ρευμάτων (<http://earth.esa.int>).

Διάφορες αρχές της φωτοερμηνείας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ερμηνεία των εικόνων ραντάρ. Μπορούμε έτσι να διακρίνουμε τρία βήματα:

1. Ανάγνωση εικόνων: αντιστοιχεί στην αναγνώριση ορίων βάσει των προηγούμενων απαριθμημένων παραμέτρων.
2. Ανάλυση: αντιστοιχεί στην αναγνώριση του τι υπάρχει μέσα στα όρια που προσδιορίζονται προηγούμενως.
3. Συμπερασματική (deductive) ερμηνεία της εικόνας: σε αυτή τη φάση, ο ερμηνευτής χρησιμοποιεί όλη τη θεματική του γνώση και την εμπειρία του, για να ερμηνεύσει τα στοιχεία.

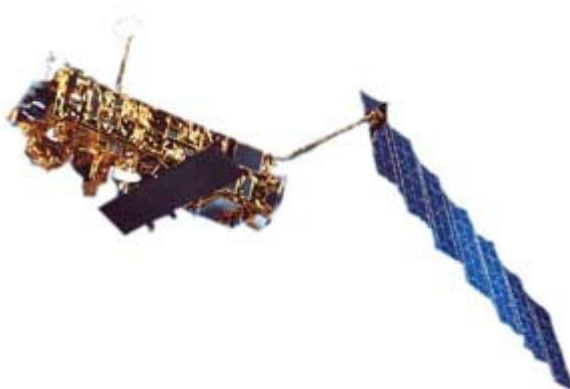
## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ SAR ΣΤΙΣ ΓΕΩΕΠΙΣΤΗΜΕΣ

Η χρήση των SAR στην παρατήρηση της γης (ή και άλλων πλανητών) χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος πρακτικών εφαρμογών, τόσο σε χερσαίο όσο και σε υδάτινο περιβάλλον. Περιληπτικά το πεδίο εφαρμογών περιλαμβάνει :

**Στην ξηρά:** Την παρακολούθηση και μελέτη γεωδυναμικών φαινομένων (σεισμοί, ηφαίστεια, κατολισθήσεις, καθιζήσεις) , διάφορες φυσικές καταστροφές (πλημμύρες, πυρκαγιές, τυφώνες, μετακινήσεις μαζών, ερημοποίηση, έντονη διάβρωση), την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (**Digital Elevation Models / DEMs**, Interferometry), στη γεωλογία και γεωμορφολογία : την ανίχνευση ενοτήτων, τεκτονικών και ρηξιγενών ζώνων (ρήγματα, επωθήσεις), τον εντοπισμό κοιτασμάτων φυσικών διαθεσίμων (π.χ. άνθρακες), την περιοδική παρακολούθηση και μελέτη της κίνησης παγετώνων ή περιοχών που καλύπτονται από χιόνι, στην υδρολογία: τον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση υδρογραφικών δικτύων, τη διαχρονική παρακολούθηση και χαρτογράφηση παράκτιων περιοχών που πλήττονται από έντονη διάβρωση, ιζηματογένεση ή ρύπανση από βιομηχανικά και αστικά απόβλητα, στη χαρτογραφία : την παραγωγή και ανανέωση χαρτών, την ταξινόμηση της βλάστησης και προσδιορισμό των χρήσεων γης, γενικότερα τη διαχρονική παρακολούθηση του περιβάλλοντος .

**Στους ωκεανούς:** Τον εντοπισμό και την παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων, τον εντοπισμό διαρροής πετρελαίου από φυσικά κοιτάσματα (χρησιμότητα στη βιομηχανία πετρελαίου), τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών των κυμάτων και των ωκεάνιων ρευμάτων (ταχύτητα, διεύθυνση) και συνεπώς την πρόβλεψη των κυματισμών και τη θαλάσσια κλιματολογία, τη μέτρηση της τοπογραφίας του πυθμένα (βυθομέτρηση) σε ρηχά νερά. Τέλος σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, τα δεδομένα SAR καθίστανται ιδιαίτερα χρήσιμα για την ασφαλή πλοήγηση των σκαφών, αφού παρέχουν πληροφορίες για την κίνηση μεγάλων τεμαχών πάγου που επιπλέουν στους ωκεανούς.

Γενικά, το φάσμα των εφαρμογών των εικόνων SAR στην παρατήρηση της γης (ή και άλλων πλανητών) χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος, τόσο σε χερσαίο όσο και σε υδάτινο περιβάλλον. Επιπλέον, η συνεχής έρευνα και η ανάπτυξη νέων τεχνικών διευρύνει διαρκώς το πεδίο αυτό. Η εν δυνάμει συνεισφορά των SAR στις γεωεπιστήμες επιβεβαιώνεται από το πλήθος των δημοσιευμένων εργασιών του εξωτερικού. Οι προοπτικές που ανοίγονται διαφαίνονται στη βαρύτητα που δίνεται στην έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο, από παγκοσμίως αναγνωρισμένα ερευνητικά κέντρα, ινστιτούτα, οργανισμούς και πανεπιστήμια (λ.χ. **NASA**, Κέντρο Αεροδιαστημικών Ερευνών της Γερμανίας/**DLR**, Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία/**ESA**, Κέντρο Τηλεπισκόπησης του Καναδά/**CCRS**) και στον αυξανόμενο αριθμό των επιστημόνων διαφόρων κλάδων που ασχολούνται με τις δυνητικές εφαρμογές των τεχνικών SAR, καθώς ο απαιτούμενος ηλεκτρονικός εξοπλισμός αρχίζει να γίνεται προσιτός για μικρής κλίμακας μελέτες.

**ENVISAT/ASAR**Εικόνα Β. 19. Ο δορυφόρος ENVISAT ([www.esa.int](http://www.esa.int))

Ο δορυφόρος **ENVISAT** (**ENV**Ironmental **SAT**ellite) εκτοξεύτηκε το Μάρτιο του 2002, από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (**European Space Agency/ESA**), με σκοπό τη συνέχιση των επιτυχημένων αποστολών ERS-1 και ERS-2. Συνολικά φέρει δέκα όργανα για την παρατήρηση της γήινης επιφάνειας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ENVISAT έχουν ως εξής:

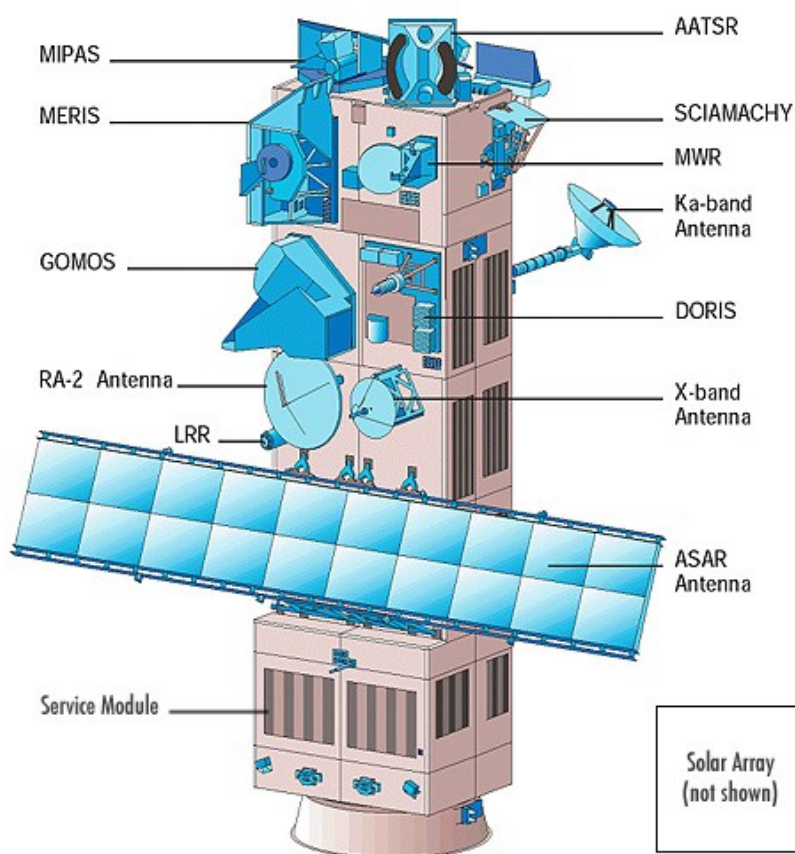
|                                        |                                                                                                                                |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Εκτόξευση</b>                       | 1 Μαρτίου 2002                                                                                                                 |
| <b>Βάρος</b>                           | 8200 kg                                                                                                                        |
| <b>Αριθμός οργάνων</b>                 | 10                                                                                                                             |
| <b>Συνολικό βάρος οργάνων</b>          | 2050 kg                                                                                                                        |
| <b>Διάρκεια αποστολής</b>              | 5 έτη                                                                                                                          |
| <b>Τροχιά</b>                          | Πολική, συν-σύγχρονη                                                                                                           |
| <b>Ύψος τροχιάς</b>                    | 800 km (780-820 km)                                                                                                            |
| <b>Κλίση</b>                           | 98,55°                                                                                                                         |
| <b>Χρόνος ολοκλήρωσης μίας τροχιάς</b> | 101 λεπτά                                                                                                                      |
| <b>Ταχύτητα τροχιάς</b>                | 7,45 km/sec                                                                                                                    |
| <b>Κύκλος επανάληψης</b>               | 35 ημέρες. Λόγω όμως του μεγάλου εύρους κάλυψης των περισσότερων οργάνων, επιτυγχάνεται παγκόσμια κάλυψη σε διάστημα 3 ημερών. |
| <b>Τροχιές ανά κύκλο</b>               | 501                                                                                                                            |

Πίνακας Β. 2. Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου ENVISAT.

Συνοπτικά, τα δέκα όργανα που φέρει ο ENVISAT είναι:

|                  |                                                                      |
|------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>ASAR</b>      | Advanced Synthetic Aperture Radar                                    |
| <b>MIPAS</b>     | Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding            |
| <b>GOMOS</b>     | Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars                      |
| <b>MERIS</b>     | Medium Resolution Imaging Spectrometer                               |
| <b>SCIAMACHY</b> | Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography |
| <b>AATSR</b>     | Advanced Along-Track Scanning Radiometer                             |
| <b>RA-2</b>      | Radar Altimeter 2                                                    |
| <b>MWR</b>       | Microwave Radiometer                                                 |
| <b>DORIS</b>     | Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite    |
| <b>LRR</b>       | Laser Retro-Reflector, passive                                       |

Πίνακας Β. 3. Τα δέκα όργανα, τα οποία φέρει ο δορυφόρος ENVISAT.



Εικόνα Β. 20. Σχηματική απεικόνιση του δορυφόρου ENVISAT και των οργάνων που φέρει. (<http://wdc.dlr.de>)

Το «εξελιγμένο ραντάρ συνθετικής κεραίας» (Advanced Synthetic Aperture Radar/**ASAR**), το οποίο φέρει ο δορυφόρος ENVISAT, λειτουργεί στη ζώνη C (C-band, 3,8-7,5 cm) και αποτελεί τη συνέχεια των συστημάτων ραντάρ (SAR) των Ευρωπαϊκών δορυφόρων ERS-1 και ERS-2.

Το ASAR προσφέρει, εκμεταλλευόμενο τους διαφορετικούς συνδυασμούς πόλωσης και γωνίας πρόσπτωσης, 37 διακριτές καταστάσεις λειτουργίας (modes), με υψηλή, μέση και



μειωμένη διακριτική ικανότητα, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη. Η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) μπορεί να κυμανθεί μεταξύ  $15^{\circ}$  και  $45.2^{\circ}$ , με διαφορετικούς συνδυασμούς πόλωσης (HH, VV, HH/VV, HH/HV, VV/VH) και ονομαστική διακριτική ικανότητα 30 m. Το εύρος της ζώνης σάρωσης (swath width) διαφέρει ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης από 56 km έως 105 km, ενώ η ειδική κατάσταση λειτουργίας «Wide Swath Mode» δίνει εικόνες, οι οποίες καλύπτουν έκταση 400 x 400 km, με ονομαστική χωρική διακριτική ικανότητα 150 m.

Το πεδίο εφαρμογής των εικόνων ASAR περιλαμβάνει τη μελέτη των ωκεάνιων κυμάτων, την παρακολούθηση της έκτασης και μετακίνησης του θαλάσσιου πάγου, καθώς και πολυάριθμες εφαρμογές σε χερσαίο περιβάλλον, στον ευρύτερο κλάδο των γεωεπιστημών.

## 9.3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πίνακες

| RMS Control point error: (x): 0,8904 pixel (y):0,7433 pixel (total): 1,1559 pixel |       |            |           |       |              |                |             |            |            |           |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|------------|-----------|-------|--------------|----------------|-------------|------------|------------|-----------|--------------|
| GCP#                                                                              | color | x input    | y input   | color | x reference  | y reference    | z reference | x residual | y residual | RMS error | contribution |
| 1                                                                                 |       | 282,8055   | 155,4773  |       | 418.811,1100 | 4.517.960,2400 | 202,5887    | 0,3562     | 0,2352     | 0,4268    | 0,3680       |
| 2                                                                                 |       | 283,0671   | 166,2022  |       | 418.815,2919 | 4.518.252,3106 | 201,3409    | 0,2328     | -0,7293    | 0,7656    | 0,6600       |
| 3                                                                                 |       | 1.047,0354 | -390,6963 |       | 441.660,8008 | 4.501.574,6411 | 45,7631     | -0,4370    | -1,4409    | 1,5057    | 1,2982       |
| 4                                                                                 |       | 504,9408   | -414,9670 |       | 425.465,3110 | 4.500.850,1838 | 100,0000    | 0,5582     | -0,9115    | 1,0688    | 0,9215       |
| 5                                                                                 |       | 545,3435   | -434,2193 |       | 426.624,2380 | 4.500.305,5456 | 98,7754     | -1,2057    | 0,1033     | 1,2101    | 1,0433       |
| 6                                                                                 |       | 358,5153   | -319,7904 |       | 421.081,5439 | 4.503.774,4720 | 94,6730     | 0,9756     | 1,7853     | 2,0345    | 1,7540       |
| 7                                                                                 |       | 397,2909   | -358,2949 |       | 422.265,6649 | 4.502.551,1308 | 85,8159     | 1,6731     | -0,6008    | 1,7777    | 1,5327       |
| 8                                                                                 |       | 952,0945   | -832,2609 |       | 438.885,1656 | 4.488.433,1444 | 423,9475    | 0,8270     | 0,1973     | 0,8503    | 0,7331       |
| 9                                                                                 |       | 958,7496   | -833,4933 |       | 439.049,9349 | 4.488.406,8408 | 362,1456    | -0,1119    | 0,6981     | 0,7070    | 0,6096       |
| 10                                                                                |       | 967,1302   | -824,1268 |       | 439.333,3383 | 4.488.636,9968 | 369,1832    | 0,9632     | -1,0082    | 1,3944    | 1,2022       |
| 11                                                                                |       | 957,0242   | -798,2458 |       | 439.016,9811 | 4.489.458,9826 | 267,6702    | 0,7768     | 0,8402     | 1,1443    | 0,9865       |
| 12                                                                                |       | 442,2334   | -533,1552 |       | 423.608,4145 | 4.497.329,2374 | 499,6138    | -0,0748    | -1,2397    | 1,2420    | 1,0708       |
| 13                                                                                |       | 429,1032   | -583,1752 |       | 423.202,3452 | 4.495.875,8351 | 488,4570    | -0,3770    | 0,2747     | 0,4665    | 0,4022       |
| 14                                                                                |       | 1.148,2370 | 203,3479  |       | 444.804,3139 | 4.519.447,7365 | 762,8533    | 1,0859     | 0,0749     | 1,0885    | 0,9384       |
| 15                                                                                |       | 1.108,6144 | 137,7425  |       | 443.575,5139 | 4.517.470,2783 | 560,0000    | 0,1394     | 0,0820     | 0,1617    | 0,1394       |
| 16                                                                                |       | 1.091,0980 | 134,0697  |       | 443.033,7848 | 4.517.364,8138 | 540,0000    | -0,4444    | 0,2890     | 0,5301    | 0,4570       |
| 17                                                                                |       | 1.087,7078 | 134,0697  |       | 442.928,0816 | 4.517.345,0393 | 520,0000    | -0,5366    | -0,3226    | 0,6262    | 0,5398       |
| 18                                                                                |       | 723,3885   | -472,5634 |       | 431.934,3554 | 4.499.153,0451 | 81,4242     | -2,0281    | -0,2212    | 2,0402    | 1,7589       |
| 19                                                                                |       | 615,3565   | -447,0958 |       | 428.709,5081 | 4.499.929,9896 | 82,6982     | -1,6264    | 0,3901     | 1,6725    | 1,4420       |
| 20                                                                                |       | 706,9578   | -505,0141 |       | 431.477,5487 | 4.498.207,8104 | 80,0000     | -0,8100    | 0,6718     | 1,0523    | 0,9073       |
| 21                                                                                |       | 650,9768   | 171,9251  |       | 429.882,2858 | 4.518.492,5689 | 496,1559    | -0,1661    | 0,5600     | 0,5841    | 0,5036       |
| 22                                                                                |       | 1.235,5274 | -293,7471 |       | 447.307,7662 | 4.504.532,4870 | 47,8435     | 0,2289     | 0,2726     | 0,3560    | 0,3069       |

Πίνακας Γ. 1. Τα 22 σημεία ελέγχου που επιλέχθηκαν στην εικόνα Landsat-5/TM και στους χάρτες της Γ.Υ.Σ. κλίμακας 1:50.000, για την ορθοαναγωγή της πρώτης.

| RMS Control point error: (x): 7,3267 m (y):3,4894 m (total): 8,1152 m |       |              |                |       |              |                |            |            |           |              |
|-----------------------------------------------------------------------|-------|--------------|----------------|-------|--------------|----------------|------------|------------|-----------|--------------|
| GCP#                                                                  | color | x input      | y input        | color | x reference  | y reference    | x residual | y residual | RMS error | contribution |
| 1                                                                     |       | 698.957,3491 | 4.504.298,8039 |       | 445.333,1416 | 4.501.107,1302 | -6,2585    | -1,3288    | 6,3980    | 0,7884       |
| 2                                                                     |       | 700.887,7680 | 4.504.257,1777 |       | 447.278,4154 | 4.500.976,9632 | 3,7203     | 0,9621     | 3,8427    | 0,4735       |
| 3                                                                     |       | 697.912,9681 | 4.520.364,7829 |       | 443.610,4751 | 4.517.490,5456 | 0,6616     | 0,2695     | 0,7144    | 0,0880       |
| 4                                                                     |       | 673.547,3987 | 4.519.414,0577 |       | 420.267,4882 | 4.517.076,0532 | 10,7572    | -5,2979    | 11,9910   | 1,4776       |
| 5                                                                     |       | 673.479,6509 | 4.519.752,7965 |       | 420.178,3895 | 4.517.436,9028 | -9,9515    | 7,5128     | 12,4689   | 1,5365       |
| 6                                                                     |       | 674.411,0135 | 4.504.882,1003 |       | 420.653,1717 | 4.502.508,4742 | -0,2479    | -1,7013    | 1,7193    | 0,2119       |
| 7                                                                     |       | 681.832,2677 | 4.503.352,3820 |       | 427.991,8885 | 4.500.578,2648 | 1,5827     | 4,1013     | 4,3961    | 0,5417       |
| 8                                                                     |       | 690.384,1230 | 4.496.049,0377 |       | 436.230,3302 | 4.493.250,3666 | 11,9675    | 0,5577     | 11,9805   | 1,4763       |
| 9                                                                     |       | 688.891,2631 | 4.495.500,8782 |       | 434.605,0113 | 4.492.723,6429 | -11,0158   | -1,6498    | 11,1387   | 1,3726       |
| 10                                                                    |       | 677.968,3751 | 4.517.342,2244 |       | 424.521,7392 | 4.514.904,3089 | -1,2156    | -3,4256    | 3,6349    | 0,4479       |

Πίνακας Γ. 2. Τα 10 σημεία ελέγχου που επιλέχθηκαν για την εγγραφή της εικόνας ραντάρ στην πολυφασματική εικόνα.

| A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) |
|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|
| 1   | 6                     | 0,634         | 21  | 58                    | 1,269         | 41  | 89                    | 1,402         | 61  | 99                    | 0,760         | 81  | 118                   | 1,198         |
| 2   | 7                     | 4,193         | 22  | 63                    | 0,291         | 42  | 90                    | 1,144         | 62  | 100                   | 0,443         | 82  | 119                   | 1,693         |
| 3   | 12                    | 0,479         | 23  | 64                    | 1,892         | 43  | 91                    | 0,551         | 63  | 100                   | 1,627         | 83  | 119                   | 1,060         |
| 4   | 14                    | 1,134         | 24  | 64                    | 0,222         | 44  | 91                    | 1,575         | 64  | 100                   | 2,609         | 84  | 119                   | 6,312         |
| 5   | 15                    | 0,814         | 25  | 65                    | 0,428         | 45  | 92                    | 0,897         | 65  | 101                   | 1,850         | 85  | 119                   | 1,283         |
| 6   | 22                    | 1,015         | 26  | 69                    | 0,536         | 46  | 92                    | 0,894         | 66  | 103                   | 0,823         | 86  | 120                   | 4,559         |
| 7   | 26                    | 0,998         | 27  | 74                    | 0,519         | 47  | 92                    | 0,432         | 67  | 103                   | 0,481         | 87  | 120                   | 0,594         |
| 8   | 38                    | 1,802         | 28  | 74                    | 0,688         | 48  | 92                    | 1,681         | 68  | 104                   | 1,441         | 88  | 120                   | 2,160         |
| 9   | 39                    | 0,935         | 29  | 75                    | 1,485         | 49  | 92                    | 0,542         | 69  | 109                   | 2,885         | 89  | 120                   | 4,826         |
| 10  | 46                    | 2,122         | 30  | 75                    | 0,330         | 50  | 93                    | 2,391         | 70  | 109                   | 1,686         | 90  | 121                   | 0,804         |
| 11  | 48                    | 2,842         | 31  | 77                    | 1,880         | 51  | 93                    | 3,606         | 71  | 109                   | 0,469         | 91  | 122                   | 5,012         |
| 12  | 48                    | 0,529         | 32  | 77                    | 2,833         | 52  | 93                    | 4,816         | 72  | 110                   | 1,375         | 92  | 122                   | 3,602         |
| 13  | 48                    | 2,778         | 33  | 82                    | 1,170         | 53  | 95                    | 1,084         | 73  | 111                   | 1,319         | 93  | 122                   | 2,634         |
| 14  | 49                    | 3,379         | 34  | 83                    | 1,232         | 54  | 95                    | 0,628         | 74  | 112                   | 2,102         | 94  | 123                   | 0,813         |
| 15  | 49                    | 0,463         | 35  | 85                    | 0,716         | 55  | 95                    | 1,405         | 75  | 113                   | 1,146         | 95  | 123                   | 1,399         |
| 16  | 49                    | 1,109         | 36  | 85                    | 0,684         | 56  | 96                    | 1,777         | 76  | 114                   | 1,819         | 96  | 123                   | 0,750         |
| 17  | 50                    | 1,045         | 37  | 86                    | 2,475         | 57  | 96                    | 0,905         | 77  | 115                   | 2,726         | 97  | 123                   | 5,260         |
| 18  | 51                    | 0,980         | 38  | 88                    | 0,653         | 58  | 96                    | 0,452         | 78  | 116                   | 0,701         | 98  | 124                   | 0,504         |
| 19  | 51                    | 0,656         | 39  | 88                    | 0,376         | 59  | 98                    | 1,560         | 79  | 116                   | 1,557         | 99  | 125                   | 2,302         |
| 20  | 56                    | 2,016         | 40  | 88                    | 1,134         | 60  | 99                    | 1,958         | 80  | 118                   | 0,599         | 100 | 125                   | 1,356         |

Πίνακας Γ. 3. Αριθμός, διευθύνσεις (αζιμούθια) και μήκη των ρηγμάτων της περιοχής μελέτης, όπως προκύπτουν από τον νεοτεκτονικό χάρτη 1:100.000.

| A/A        | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A        | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A        | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A        | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) |
|------------|-----------------------|---------------|------------|-----------------------|---------------|------------|-----------------------|---------------|------------|-----------------------|---------------|
| <b>101</b> | 125                   | 2,846         | <b>121</b> | 134                   | 1,185         | <b>141</b> | 181                   | 0,942         | <b>161</b> | 302                   | 5,338         |
| <b>102</b> | 126                   | 1,188         | <b>122</b> | 134                   | 0,536         | <b>142</b> | 181                   | 2,872         | <b>162</b> | 303                   | 9,120         |
| <b>103</b> | 126                   | 1,493         | <b>123</b> | 135                   | 1,288         | <b>143</b> | 183                   | 2,258         | <b>163</b> | 314                   | 1,946         |
| <b>104</b> | 126                   | 1,362         | <b>124</b> | 135                   | 0,494         | <b>144</b> | 188                   | 2,387         | <b>164</b> | 316                   | 7,955         |
| <b>105</b> | 127                   | 2,294         | <b>125</b> | 135                   | 3,490         | <b>145</b> | 192                   | 1,422         |            |                       |               |
| <b>106</b> | 127                   | 0,896         | <b>126</b> | 140                   | 10,089        | <b>146</b> | 195                   | 2,927         |            |                       |               |
| <b>107</b> | 127                   | 1,735         | <b>127</b> | 141                   | 1,246         | <b>147</b> | 205                   | 3,940         |            |                       |               |
| <b>108</b> | 129                   | 1,241         | <b>128</b> | 141                   | 0,871         | <b>148</b> | 216                   | 0,980         |            |                       |               |
| <b>109</b> | 130                   | 1,841         | <b>129</b> | 142                   | 0,467         | <b>149</b> | 231                   | 1,232         |            |                       |               |
| <b>110</b> | 130                   | 2,378         | <b>130</b> | 143                   | 1,076         | <b>150</b> | 238                   | 4,373         |            |                       |               |
| <b>111</b> | 130                   | 3,294         | <b>131</b> | 146                   | 1,268         | <b>151</b> | 249                   | 3,667         |            |                       |               |
| <b>112</b> | 131                   | 1,075         | <b>132</b> | 147                   | 0,390         | <b>152</b> | 255                   | 2,506         |            |                       |               |
| <b>113</b> | 131                   | 0,606         | <b>133</b> | 149                   | 1,390         | <b>153</b> | 261                   | 3,041         |            |                       |               |
| <b>114</b> | 131                   | 1,727         | <b>134</b> | 150                   | 11,218        | <b>154</b> | 265                   | 27,763        |            |                       |               |
| <b>115</b> | 131                   | 1,060         | <b>135</b> | 152                   | 1,656         | <b>155</b> | 271                   | 15,790        |            |                       |               |
| <b>116</b> | 132                   | 3,158         | <b>136</b> | 153                   | 0,957         | <b>156</b> | 285                   | 7,144         |            |                       |               |
| <b>117</b> | 132                   | 0,858         | <b>137</b> | 161                   | 0,931         | <b>157</b> | 292                   | 1,199         |            |                       |               |
| <b>118</b> | 133                   | 4,789         | <b>138</b> | 168                   | 1,221         | <b>158</b> | 298                   | 4,405         |            |                       |               |
| <b>119</b> | 133                   | 2,602         | <b>139</b> | 171                   | 0,809         | <b>159</b> | 300                   | 0,985         |            |                       |               |
| <b>120</b> | 133                   | 1,904         | <b>140</b> | 172                   | 0,609         | <b>160</b> | 300                   | 15,755        |            |                       |               |

Πίνακας Γ. 4.Αριθμός, διευθύνσεις (αζιμούθια) και μήκη των ρηγμάτων της περιοχής μελέτης, όπως προκύπτουν από τον νεοτεκτονικό χάρτη 1:100.000 (συνέχεια).

| A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) |
|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|
| 1   | 4                     | 2,273         | 26  | 74                    | 1,444         | 51  | 93                    | 1,037         | 76  | 114                   | 0,399         | 101 | 126                   | 3,380         |
| 2   | 6                     | 1,867         | 27  | 74                    | 1,489         | 52  | 94                    | 1,692         | 77  | 118                   | 2,245         | 102 | 126                   | 1,257         |
| 3   | 8                     | 0,737         | 28  | 75                    | 2,067         | 53  | 95                    | 0,539         | 78  | 118                   | 0,635         | 103 | 127                   | 12,518        |
| 4   | 24                    | 4,433         | 29  | 77                    | 1,266         | 54  | 96                    | 0,764         | 79  | 118                   | 0,850         | 104 | 127                   | 0,947         |
| 5   | 38                    | 1,280         | 30  | 80                    | 5,585         | 55  | 98                    | 2,647         | 80  | 119                   | 0,631         | 105 | 127                   | 0,371         |
| 6   | 38                    | 0,401         | 31  | 81                    | 3,602         | 56  | 98                    | 0,581         | 81  | 119                   | 1,482         | 106 | 128                   | 5,705         |
| 7   | 42                    | 0,246         | 32  | 82                    | 1,284         | 57  | 99                    | 0,987         | 82  | 119                   | 0,535         | 107 | 129                   | 1,254         |
| 8   | 50                    | 3,263         | 33  | 82                    | 1,431         | 58  | 100                   | 0,652         | 83  | 120                   | 1,166         | 108 | 129                   | 0,917         |
| 9   | 50                    | 2,837         | 34  | 83                    | 0,283         | 59  | 102                   | 1,936         | 84  | 120                   | 1,666         | 109 | 130                   | 0,688         |
| 10  | 51                    | 0,530         | 35  | 83                    | 0,661         | 60  | 102                   | 0,998         | 85  | 120                   | 1,111         | 110 | 132                   | 3,753         |
| 11  | 52                    | 3,644         | 36  | 84                    | 0,559         | 61  | 103                   | 0,441         | 86  | 121                   | 2,344         | 111 | 132                   | 0,307         |
| 12  | 52                    | 1,227         | 37  | 84                    | 1,008         | 62  | 107                   | 0,592         | 87  | 121                   | 0,312         | 112 | 133                   | 8,425         |
| 13  | 53                    | 2,372         | 38  | 85                    | 1,061         | 63  | 108                   | 1,794         | 88  | 122                   | 5,777         | 113 | 133                   | 0,819         |
| 14  | 53                    | 1,166         | 39  | 86                    | 0,916         | 64  | 109                   | 3,387         | 89  | 122                   | 0,847         | 114 | 133                   | 0,809         |
| 15  | 55                    | 5,732         | 40  | 87                    | 0,970         | 65  | 109                   | 0,632         | 90  | 122                   | 1,105         | 115 | 134                   | 1,453         |
| 16  | 56                    | 1,325         | 41  | 88                    | 1,586         | 66  | 109                   | 0,717         | 91  | 123                   | 2,591         | 116 | 134                   | 0,877         |
| 17  | 57                    | 0,922         | 42  | 88                    | 0,677         | 67  | 110                   | 0,794         | 92  | 123                   | 0,687         | 117 | 135                   | 0,953         |
| 18  | 59                    | 1,730         | 43  | 89                    | 1,211         | 68  | 111                   | 2,732         | 93  | 123                   | 0,633         | 118 | 136                   | 4,625         |
| 19  | 59                    | 0,726         | 44  | 89                    | 0,699         | 69  | 111                   | 0,614         | 94  | 124                   | 0,936         | 119 | 136                   | 0,410         |
| 20  | 61                    | 2,006         | 45  | 89                    | 1,238         | 70  | 111                   | 0,559         | 95  | 124                   | 1,261         | 120 | 137                   | 1,109         |
| 21  | 61                    | 0,530         | 46  | 89                    | 1,453         | 71  | 112                   | 5,258         | 96  | 125                   | 2,620         | 121 | 137                   | 0,903         |
| 22  | 64                    | 2,464         | 47  | 90                    | 1,363         | 72  | 112                   | 0,603         | 97  | 125                   | 4,117         | 122 | 138                   | 0,798         |
| 23  | 66                    | 1,367         | 48  | 91                    | 0,710         | 73  | 113                   | 1,470         | 98  | 125                   | 0,385         | 123 | 138                   | 0,329         |
| 24  | 70                    | 0,536         | 49  | 92                    | 0,948         | 74  | 113                   | 0,851         | 99  | 126                   | 1,736         | 124 | 140                   | 1,441         |
| 25  | 73                    | 4,716         | 50  | 93                    | 0,728         | 75  | 114                   | 7,332         | 100 | 126                   | 4,868         | 125 | 141                   | 1,267         |

Πίνακας Γ. 5.Αριθμός, διευθύνσεις (αζιμούθια) και μήκη των γραμμώσεων της περιοχής μελέτης, που χαρτογραφήθηκαν από την εικόνα Landsat-5/TM.



| A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) |
|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|
| 126 | 141                   | 0,645         | 151 | 192                   | 0,712         | 176 | 220                   | 0,848         | 201 | 239                   | 3,131         | 226 | 279                   | 0,672         |
| 127 | 141                   | 0,845         | 152 | 195                   | 1,334         | 177 | 220                   | 0,639         | 202 | 239                   | 1,755         | 227 | 280                   | 3,316         |
| 128 | 143                   | 0,809         | 153 | 195                   | 1,539         | 178 | 221                   | 0,418         | 203 | 241                   | 1,270         | 228 | 286                   | 0,630         |
| 129 | 144                   | 0,919         | 154 | 195                   | 1,254         | 179 | 223                   | 3,168         | 204 | 243                   | 2,147         | 229 | 294                   | 1,126         |
| 130 | 144                   | 1,232         | 155 | 195                   | 1,462         | 180 | 223                   | 0,785         | 205 | 243                   | 0,503         | 230 | 300                   | 1,392         |
| 131 | 146                   | 0,778         | 156 | 196                   | 1,084         | 181 | 226                   | 0,546         | 206 | 247                   | 0,948         | 231 | 302                   | 1,215         |
| 132 | 147                   | 3,357         | 157 | 196                   | 3,766         | 182 | 226                   | 1,729         | 207 | 249                   | 1,283         | 232 | 303                   | 1,326         |
| 133 | 148                   | 1,033         | 158 | 196                   | 1,075         | 183 | 226                   | 0,956         | 208 | 250                   | 0,350         | 233 | 306                   | 0,385         |
| 134 | 152                   | 0,578         | 159 | 197                   | 0,985         | 184 | 227                   | 1,518         | 209 | 250                   | 0,772         | 234 | 307                   | 2,701         |
| 135 | 152                   | 1,001         | 160 | 199                   | 0,351         | 185 | 227                   | 2,740         | 210 | 253                   | 2,235         | 235 | 307                   | 1,112         |
| 136 | 153                   | 0,444         | 161 | 200                   | 4,444         | 186 | 227                   | 1,145         | 211 | 256                   | 7,717         | 236 | 310                   | 0,548         |
| 137 | 154                   | 0,326         | 162 | 201                   | 1,743         | 187 | 227                   | 1,589         | 212 | 260                   | 5,169         | 237 | 310                   | 0,994         |
| 138 | 157                   | 3,987         | 163 | 202                   | 0,702         | 188 | 228                   | 0,352         | 213 | 261                   | 2,862         | 238 | 310                   | 0,832         |
| 139 | 158                   | 0,335         | 164 | 205                   | 2,870         | 189 | 230                   | 1,199         | 214 | 261                   | 7,046         | 239 | 310                   | 1,859         |
| 140 | 160                   | 0,846         | 165 | 205                   | 0,596         | 190 | 230                   | 0,553         | 215 | 264                   | 5,771         | 240 | 310                   | 1,385         |
| 141 | 161                   | 0,559         | 166 | 206                   | 4,010         | 191 | 231                   | 1,922         | 216 | 264                   | 0,531         | 241 | 310                   | 0,726         |
| 142 | 163                   | 0,461         | 167 | 208                   | 0,702         | 192 | 231                   | 0,659         | 217 | 266                   | 1,617         | 242 | 312                   | 1,031         |
| 143 | 164                   | 0,393         | 168 | 209                   | 0,762         | 193 | 232                   | 0,988         | 218 | 267                   | 0,642         | 243 | 312                   | 0,491         |
| 144 | 167                   | 0,928         | 169 | 210                   | 2,387         | 194 | 233                   | 1,078         | 219 | 268                   | 0,578         | 244 | 313                   | 1,423         |
| 145 | 173                   | 0,823         | 170 | 210                   | 0,482         | 195 | 233                   | 0,946         | 220 | 270                   | 0,588         | 245 | 314                   | 0,674         |
| 146 | 173                   | 0,467         | 171 | 211                   | 0,506         | 196 | 236                   | 4,515         | 221 | 272                   | 0,777         | 246 | 317                   | 0,589         |
| 147 | 177                   | 5,812         | 172 | 212                   | 0,588         | 197 | 236                   | 0,715         | 222 | 273                   | 0,572         | 247 | 327                   | 1,691         |
| 148 | 178                   | 0,951         | 173 | 213                   | 0,650         | 198 | 237                   | 1,804         | 223 | 277                   | 4,137         | 248 | 328                   | 0,366         |
| 149 | 185                   | 0,688         | 174 | 219                   | 1,702         | 199 | 237                   | 0,431         | 224 | 278                   | 0,363         | 249 | 329                   | 0,460         |
| 150 | 187                   | 1,863         | 175 | 219                   | 0,905         | 200 | 238                   | 0,365         | 225 | 279                   | 0,436         | 250 | 331                   | 0,756         |
|     |                       |               |     |                       |               |     |                       |               |     |                       |               | 251 | 337                   | 0,371         |
|     |                       |               |     |                       |               |     |                       |               |     |                       |               | 252 | 346                   | 0,556         |
|     |                       |               |     |                       |               |     |                       |               |     |                       |               | 253 | 359                   | 1,458         |

Πίνακας Γ. 6.Αριθμός, διευθύνσεις (αζιμούθια) και μήκη των γραμμώσεων της περιοχής μελέτης, που χαρτογραφήθηκαν από την εικόνα Landsat-5/TM (συνέχεια).

| A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) |
|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|
| 1   | 11                    | 1,717         | 26  | 119                   | 2,473         | 51  | 134                   | 1,492         | 76  | 167                   | 1,997         | 101 | 207                   | 1,607         |
| 2   | 17                    | 2,913         | 27  | 120                   | 4,897         | 52  | 136                   | 5,232         | 77  | 170                   | 4,583         | 102 | 207                   | 1,320         |
| 3   | 23                    | 2,030         | 28  | 120                   | 2,076         | 53  | 136                   | 0,295         | 78  | 176                   | 0,326         | 103 | 209                   | 5,991         |
| 4   | 35                    | 1,506         | 29  | 120                   | 2,099         | 54  | 138                   | 0,885         | 79  | 178                   | 1,497         | 104 | 209                   | 4,749         |
| 5   | 47                    | 1,908         | 30  | 122                   | 11,928        | 55  | 139                   | 0,917         | 80  | 181                   | 4,826         | 105 | 209                   | 0,670         |
| 6   | 50                    | 0,502         | 31  | 124                   | 3,620         | 56  | 140                   | 16,788        | 81  | 184                   | 0,725         | 106 | 209                   | 1,117         |
| 7   | 52                    | 0,643         | 32  | 124                   | 5,574         | 57  | 142                   | 0,695         | 82  | 186                   | 0,936         | 107 | 209                   | 0,495         |
| 8   | 56                    | 0,776         | 33  | 124                   | 0,712         | 58  | 142                   | 0,646         | 83  | 187                   | 0,955         | 108 | 209                   | 0,656         |
| 9   | 57                    | 0,634         | 34  | 125                   | 2,875         | 59  | 143                   | 1,040         | 84  | 188                   | 2,273         | 109 | 210                   | 1,021         |
| 10  | 58                    | 3,121         | 35  | 126                   | 0,261         | 60  | 144                   | 0,911         | 85  | 190                   | 3,461         | 110 | 210                   | 1,074         |
| 11  | 61                    | 4,984         | 36  | 127                   | 1,827         | 61  | 145                   | 0,350         | 86  | 191                   | 4,860         | 111 | 210                   | 0,453         |
| 12  | 66                    | 6,100         | 37  | 127                   | 0,483         | 62  | 145                   | 0,620         | 87  | 192                   | 1,225         | 112 | 212                   | 0,478         |
| 13  | 66                    | 0,265         | 38  | 128                   | 1,086         | 63  | 147                   | 1,047         | 88  | 195                   | 1,541         | 113 | 213                   | 0,758         |
| 14  | 75                    | 2,971         | 39  | 128                   | 3,301         | 64  | 147                   | 0,988         | 89  | 196                   | 0,543         | 114 | 213                   | 0,601         |
| 15  | 75                    | 3,706         | 40  | 129                   | 1,385         | 65  | 150                   | 0,357         | 90  | 199                   | 0,516         | 115 | 213                   | 0,892         |
| 16  | 79                    | 7,719         | 41  | 130                   | 2,464         | 66  | 152                   | 0,942         | 91  | 201                   | 1,132         | 116 | 215                   | 0,373         |
| 17  | 81                    | 1,182         | 42  | 130                   | 1,998         | 67  | 153                   | 0,340         | 92  | 202                   | 2,205         | 117 | 215                   | 0,478         |
| 18  | 89                    | 2,956         | 43  | 131                   | 1,761         | 68  | 154                   | 1,847         | 93  | 204                   | 0,357         | 118 | 215                   | 1,428         |
| 19  | 92                    | 1,111         | 44  | 131                   | 12,025        | 69  | 154                   | 0,888         | 94  | 205                   | 0,359         | 119 | 215                   | 0,762         |
| 20  | 98                    | 2,535         | 45  | 131                   | 4,195         | 70  | 157                   | 1,269         | 95  | 205                   | 0,456         | 120 | 215                   | 0,752         |
| 21  | 100                   | 0,573         | 46  | 131                   | 0,934         | 71  | 160                   | 3,331         | 96  | 205                   | 0,757         | 121 | 215                   | 0,641         |
| 22  | 105                   | 0,414         | 47  | 132                   | 1,655         | 72  | 160                   | 1,484         | 97  | 205                   | 0,793         | 122 | 216                   | 0,875         |
| 23  | 113                   | 3,372         | 48  | 132                   | 2,921         | 73  | 160                   | 0,645         | 98  | 205                   | 0,462         | 123 | 216                   | 0,743         |
| 24  | 117                   | 0,648         | 49  | 132                   | 1,048         | 74  | 161                   | 1,547         | 99  | 206                   | 3,824         | 124 | 216                   | 0,546         |
| 25  | 117                   | 1,769         | 50  | 133                   | 1,304         | 75  | 166                   | 0,469         | 100 | 206                   | 0,473         | 125 | 217                   | 0,768         |

Πίνακας Γ. 7.Αριθμός, διευθύνσεις (αζιμούθια) και μήκη των γραμμώσεων της περιοχής μελέτης, που χαρτογραφήθηκαν από την εικόνα Envisat/ASAR.

| A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) |
|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|
| 126 | 217                   | 1,577         | 151 | 227                   | 0,714         | 176 | 235                   | 0,446         | 201 | 298                   | 1,051         |
| 127 | 218                   | 0,480         | 152 | 227                   | 0,781         | 177 | 236                   | 0,677         | 202 | 300                   | 2,619         |
| 128 | 218                   | 1,197         | 153 | 228                   | 0,522         | 178 | 237                   | 2,144         | 203 | 301                   | 1,453         |
| 129 | 218                   | 0,652         | 154 | 228                   | 1,684         | 179 | 238                   | 0,567         | 204 | 358                   | 1,493         |
| 130 | 218                   | 1,285         | 155 | 228                   | 0,448         | 180 | 238                   | 0,481         |     |                       |               |
| 131 | 219                   | 1,249         | 156 | 228                   | 1,751         | 181 | 238                   | 0,649         |     |                       |               |
| 132 | 219                   | 0,361         | 157 | 229                   | 1,886         | 182 | 238                   | 0,966         |     |                       |               |
| 133 | 219                   | 0,459         | 158 | 229                   | 0,426         | 183 | 240                   | 0,949         |     |                       |               |
| 134 | 220                   | 0,869         | 159 | 229                   | 0,611         | 184 | 240                   | 0,441         |     |                       |               |
| 135 | 221                   | 0,754         | 160 | 230                   | 0,616         | 185 | 242                   | 1,860         |     |                       |               |
| 136 | 221                   | 1,011         | 161 | 230                   | 0,254         | 186 | 242                   | 0,469         |     |                       |               |
| 137 | 222                   | 0,571         | 162 | 230                   | 0,727         | 187 | 243                   | 0,339         |     |                       |               |
| 138 | 222                   | 0,633         | 163 | 230                   | 0,717         | 188 | 245                   | 0,872         |     |                       |               |
| 139 | 222                   | 0,414         | 164 | 230                   | 0,339         | 189 | 246                   | 0,529         |     |                       |               |
| 140 | 222                   | 0,251         | 165 | 230                   | 0,634         | 190 | 246                   | 0,420         |     |                       |               |
| 141 | 223                   | 1,019         | 166 | 231                   | 1,523         | 191 | 247                   | 2,758         |     |                       |               |
| 142 | 223                   | 1,028         | 167 | 231                   | 0,771         | 192 | 248                   | 0,331         |     |                       |               |
| 143 | 223                   | 0,512         | 168 | 232                   | 0,463         | 193 | 254                   | 5,256         |     |                       |               |
| 144 | 224                   | 0,457         | 169 | 232                   | 0,729         | 194 | 256                   | 2,209         |     |                       |               |
| 145 | 224                   | 1,264         | 170 | 232                   | 0,759         | 195 | 256                   | 0,401         |     |                       |               |
| 146 | 225                   | 2,589         | 171 | 232                   | 0,868         | 196 | 258                   | 3,445         |     |                       |               |
| 147 | 225                   | 0,381         | 172 | 233                   | 1,317         | 197 | 263                   | 6,057         |     |                       |               |
| 148 | 225                   | 0,435         | 173 | 233                   | 0,818         | 198 | 264                   | 2,073         |     |                       |               |
| 149 | 226                   | 0,500         | 174 | 234                   | 1,138         | 199 | 291                   | 1,987         |     |                       |               |
| 150 | 227                   | 0,524         | 175 | 234                   | 0,475         | 200 | 295                   | 2,863         |     |                       |               |

Πίνακας Γ. 8.Αριθμός, διευθύνσεις (αζιμούθια) και μήκη των γραμμώσεων της περιοχής μελέτης, που χαρτογραφήθηκαν από την εικόνα Envisat/ASAR (συνέχεια).

| A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) |
|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|
| 1   | 27                    | 4,077         | 26  | 99                    | 0,637         | 51  | 122                   | 0,862         | 76  | 142                   | 5,749         | 101 | 179                   | 0,704         |
| 2   | 34                    | 1,561         | 27  | 103                   | 1,028         | 52  | 122                   | 1,617         | 77  | 144                   | 0,397         | 102 | 180                   | 1,977         |
| 3   | 46                    | 3,548         | 28  | 104                   | 2,892         | 53  | 123                   | 1,040         | 78  | 145                   | 0,442         | 103 | 180                   | 0,478         |
| 4   | 56                    | 0,219         | 29  | 104                   | 1,670         | 54  | 124                   | 2,470         | 79  | 146                   | 1,592         | 104 | 180                   | 1,047         |
| 5   | 61                    | 3,156         | 30  | 106                   | 1,043         | 55  | 124                   | 0,794         | 80  | 147                   | 0,731         | 105 | 180                   | 1,087         |
| 6   | 63                    | 1,492         | 31  | 107                   | 2,254         | 56  | 125                   | 10,576        | 81  | 148                   | 0,316         | 106 | 181                   | 0,489         |
| 7   | 74                    | 1,020         | 32  | 109                   | 0,628         | 57  | 125                   | 10,322        | 82  | 151                   | 0,796         | 107 | 181                   | 0,652         |
| 8   | 76                    | 3,698         | 33  | 109                   | 1,148         | 58  | 126                   | 0,845         | 83  | 152                   | 0,651         | 108 | 183                   | 0,337         |
| 9   | 78                    | 3,723         | 34  | 110                   | 7,920         | 59  | 126                   | 1,551         | 84  | 154                   | 0,295         | 109 | 183                   | 0,637         |
| 10  | 78                    | 0,785         | 35  | 110                   | 0,872         | 60  | 128                   | 3,799         | 85  | 156                   | 0,803         | 110 | 187                   | 0,482         |
| 11  | 81                    | 0,941         | 36  | 113                   | 0,879         | 61  | 130                   | 6,066         | 86  | 160                   | 0,803         | 111 | 187                   | 0,655         |
| 12  | 82                    | 5,022         | 37  | 113                   | 2,431         | 62  | 131                   | 0,246         | 87  | 161                   | 2,803         | 112 | 188                   | 0,439         |
| 13  | 82                    | 0,557         | 38  | 113                   | 0,766         | 63  | 131                   | 1,398         | 88  | 165                   | 0,898         | 113 | 188                   | 1,046         |
| 14  | 84                    | 2,459         | 39  | 114                   | 4,745         | 64  | 131                   | 0,748         | 89  | 166                   | 1,376         | 114 | 189                   | 0,595         |
| 15  | 86                    | 1,464         | 40  | 115                   | 0,462         | 65  | 132                   | 1,364         | 90  | 166                   | 0,516         | 115 | 189                   | 1,146         |
| 16  | 86                    | 1,198         | 41  | 115                   | 0,326         | 66  | 134                   | 1,688         | 91  | 166                   | 0,339         | 116 | 190                   | 2,928         |
| 17  | 89                    | 1,308         | 42  | 116                   | 2,645         | 67  | 135                   | 1,845         | 92  | 166                   | 0,266         | 117 | 191                   | 1,295         |
| 18  | 91                    | 3,342         | 43  | 118                   | 0,926         | 68  | 135                   | 1,090         | 93  | 167                   | 0,967         | 118 | 192                   | 3,134         |
| 19  | 91                    | 1,959         | 44  | 118                   | 0,839         | 69  | 136                   | 1,355         | 94  | 167                   | 0,592         | 119 | 193                   | 0,458         |
| 20  | 93                    | 1,351         | 45  | 119                   | 2,918         | 70  | 137                   | 2,532         | 95  | 170                   | 0,467         | 120 | 195                   | 0,771         |
| 21  | 94                    | 1,184         | 46  | 119                   | 1,936         | 71  | 137                   | 0,673         | 96  | 171                   | 0,540         | 121 | 200                   | 0,817         |
| 22  | 96                    | 2,862         | 47  | 119                   | 0,946         | 72  | 138                   | 3,346         | 97  | 171                   | 1,081         | 122 | 200                   | 1,835         |
| 23  | 96                    | 1,343         | 48  | 120                   | 1,268         | 73  | 138                   | 0,422         | 98  | 176                   | 5,720         | 123 | 201                   | 1,038         |
| 24  | 99                    | 2,073         | 49  | 120                   | 0,637         | 74  | 139                   | 0,857         | 99  | 176                   | 0,544         | 124 | 201                   | 0,400         |
| 25  | 99                    | 1,963         | 50  | 122                   | 2,627         | 75  | 141                   | 0,626         | 100 | 178                   | 0,435         | 125 | 202                   | 1,223         |

Πίνακας Γ. 9.Αριθμός, διευθύνσεις (αζιμούθια) και μήκη των γραμμώσεων της περιοχής μελέτης, που χαρτογραφήθηκαν από τη συγχώνευση των εικόνων Landsat-5/TM και Envisat/ASAR .

| A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) | A/A | Αζιμούθιο<br>(μοίρες) | Μήκος<br>(km) |
|-----|-----------------------|---------------|-----|-----------------------|---------------|
| 126 | 202                   | 0,675         | 151 | 235                   | 0,341         |
| 127 | 203                   | 0,407         | 152 | 236                   | 1,229         |
| 128 | 204                   | 1,155         | 153 | 237                   | 0,399         |
| 129 | 204                   | 0,787         | 154 | 238                   | 6,642         |
| 130 | 204                   | 1,305         | 155 | 238                   | 0,523         |
| 131 | 205                   | 0,445         | 156 | 239                   | 0,996         |
| 132 | 207                   | 1,625         | 157 | 241                   | 0,334         |
| 133 | 210                   | 1,259         | 158 | 243                   | 0,624         |
| 134 | 210                   | 0,662         | 159 | 254                   | 2,455         |
| 135 | 212                   | 2,541         | 160 | 254                   | 1,911         |
| 136 | 212                   | 2,333         | 161 | 255                   | 1,741         |
| 137 | 215                   | 0,440         | 162 | 259                   | 4,845         |
| 138 | 220                   | 0,615         | 163 | 261                   | 2,799         |
| 139 | 221                   | 0,680         | 164 | 264                   | 0,642         |
| 140 | 221                   | 0,460         | 165 | 270                   | 2,604         |
| 141 | 222                   | 0,338         | 166 | 281                   | 2,070         |
| 142 | 224                   | 0,590         | 167 | 287                   | 1,869         |
| 143 | 226                   | 0,997         | 168 | 298                   | 7,086         |
| 144 | 226                   | 2,102         | 169 | 298                   | 5,063         |
| 145 | 228                   | 2,209         | 170 | 299                   | 6,018         |
| 146 | 228                   | 0,702         | 171 | 313                   | 1,845         |
| 147 | 230                   | 0,508         | 172 | 315                   | 12,346        |
| 148 | 231                   | 0,386         |     |                       |               |
| 149 | 232                   | 1,628         |     |                       |               |
| 150 | 234                   | 0,466         |     |                       |               |

Πίνακας Γ. 10.Αριθμός, διευθύνσεις (αζιμούθια) και μήκη των γραμμώσεων της περιοχής μελέτης, που χαρτογραφήθηκαν από τη συγχώνευση των εικόνων Landsat-5/TM και Envisat/ASAR (συνέχεια).

## 10.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### Ελληνικές

1. Αστάρας, Θ., 1993. Η συμβολή της σύγχρονης Τηλεπισκόπησης στην περιοδική ανίχνευση-προστασία του περιβάλλοντος. Παραδείγματα από τον Διεθνή και Ελληνικό Χώρο, Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συμποσίου «Ηλιακή και Διαστημική Έρευνα στην Ελλάδα σήμερα», Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη 26-29 Απριλίου 1993, τόμος Ι, σελ. 332-364.
2. Αστάρας, Θ., 1998. Φωτοερμηνεία (Τηλεπισκόπηση) στις Γεωεπιστήμες, Πανεπ. Σημειώσεις, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 200 σελ.
3. Αστάρας, Θ. & Οικονομίδης, Δ., 2004. Ψηφιακή Χαρτογραφία και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (G.I.S.), διδακτικές σημειώσεις, Α.Π.Θ., Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, Εργαστήριο Εφαρμογών Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, Θεσσαλονίκη.
4. Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.), 1969. Τοπογραφικός χάρτης 1:50.000, φύλλο: Σοχός, Αθήνα.
5. Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.), 1970. Τοπογραφικοί χάρτες 1:50.000, φύλλα: Θέρμη, Ζαγκλιβέριον, Αθήνα.
6. Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.), 1972. Τοπογραφικός χάρτης 1:50.000, φύλλο: Λαχανάς, Αθήνα.
7. Γκανάς, Α., 1998. Γεωμετρικές ιδιότητες των εικόνων από διαστημικά ραντάρ και γεωλογικές τους εφαρμογές, Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, τόμος 9, τεύχος 1, σελ. 4-16.
8. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), 1978. Γεωλογικός χάρτης 1:50.000, φύλλα: Θέρμη, Ζαγκλιβέριον (Υπεύθυνος: Δρ. Γ. Μαχαίρας), Αθήνα.
9. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), 1979. Γεωλογικός χάρτης 1:50.000, φύλλο: Λαχανάς, Σοχός (Υπεύθυνος: Δρ. Ν. Αποστολίδης), Αθήνα.
10. Καρφάκης, Ι., 1988. Τεκτονική μελέτη τμήματος της ανατολικής Ροδόπης με τη χρήση εικόνων Landsat, αεροφωτογραφιών, γεωφυσικών και υπαίθριων μετρήσεων, Πρακτικά Συνεδρίου “Σύγχρονες Εφαρμογές Τηλεπισκόπησης / Advances in Remote Sensing”, Θεσσαλονίκη 10-12 Οκτωβρίου, 1988, σελ. 517-518.
11. Μερτίκας, Σ., Π., 1999. Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 449 σελ.
12. Μουντράκης, Δ. Μ., 1985. Γεωλογία της Ελλάδας, University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 207 σελ.
13. Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), 1996. Νεοτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος 1:100.000, φύλλο: Λαγκαδάς (Υπεύθυνος: Ε. Λόγος), Αθήνα.
14. Οικονομίδης, Δ., 2000. Συμβολή της Τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) στην γεωλογική, κοιτασματολογική και περιβαλλοντική έρευνα της ΒΑ Χαλκιδικής, διδακτορική διατριβή, ΑΠΘ, Τμήμα Γεωλογίας, Θεσσαλονίκη, 136 σελ.
15. Σουλακέλλης, Ν., 1994. Συμβολή της ανάλυσης δορυφορικών εικόνων Landsat-5/TM και των Γεωγραφικών Συστημάτων πληροφοριών στην Τεκτονική-Γεωμορφολογία περιοχών του Βορειοελλαδικού Χώρου, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.



16. Συλλαίος, Ν., 2000. Εισαγωγή στην Τηλεπισκόπηση και στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Τόμος Α, Εισαγωγή στην Τηλεπισκόπηση, Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, 205 σελ.
17. Τσακίρη-Στρατή, Μ., 2004. Τηλεπισκόπηση, Πανεπ. Σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 180 σελ.
18. Τσόμπος, Π., και Καρμής, Π., 1988. Ρηξιγενείς δομές μεγάλου βάθους στη περιοχή μεταξύ των ποταμών Αξιού και Στρυμόνα (Β. Ελλάδα) όπως αναγνωρίζονται σε εικόνες Landsat (TM), Πρακτικά Συνεδρίου "Σύγχρονες Εφαρμογές Τηλεπισκόπησης / Advances in Remote Sensing", Θεσσαλονίκη 10-12 Οκτωβρίου, 1988, σελ. 468-488.
19. Τσόμπος, Π., 1988. Συγκριτικές έρευνες στη ρηξιγενή τεκτονική της Δ. Ελλάδας σε δορυφορικές εικόνες 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> γενεάς, αεροφωτογραφίες και υπαίθρο, Πρακτικά Συνεδρίου "Σύγχρονες Εφαρμογές Τηλεπισκόπησης/Advances in Remote Sensing", Θεσσαλονίκη 10-12 Οκτωβρίου, 1988, σελ. 489-515.
20. Φουρνιάδης, Ι., Οικονομίδης, Δ. & Αστάρας, Θ., 2002. Εντοπισμός περιοχών επιδεκτικών σε διάβρωση, με τη βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και της Τηλεπισκόπησης. Ένα παράδειγμα από την υδρογραφική λεκάνη του Ανθεμούντα, Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Γεωγραφικού Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρίας, Θεσ/νίκη 3-6 Οκτωβρίου 2002, τόμος ΙΙ, σελ. 273-280.
21. Φωκάς, Ι., 1990. Συσχέτιση των γραμμικών στοιχείων που παρατηρούνται στις δορυφορικές εικόνες Landsat της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας με Γεωλογικά δεδομένα, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
22. Ψιλοβίκος, Α., 1977. Παλαιογεωγραφική εξέλιξη της λεκάνης και της λίμνης της Μυγδονίας, Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσ/νίκης, 156 σελ.

### Ξενόγλωσσες

1. Astaras, Th. and Soulakellis, N., 1990. Landsat-TM enhancement techniques for mapping geological and geomorphological features in Central Macedonia, N. Greece. IESCA-1990, Oct.6-9, Izmir, Turkey.
2. Astaras, Th., 1990. The contribution of Landsat Thematic Mapper imagery to geological and geomorphological reconnaissance mapping in the mountain area of Kerkini – SW part of Rhodope Massif and the surrounding plains (Hellenic-Boulgarian borders), "Geographica Rhodopica"-2<sup>nd</sup> Hellenic-Bulgarian Symposium, Thessaloniki 1989, Aristotle University Press, vol. 2, pp. 104-114.
3. Astaras, Th., 1991. Geological Lineaments Interpretation of SIR-A and Landsat Imageries of Cephalonia Island, Ionian Sea, Greece, Proceedings of Workshop on Radar in Geology, 2<sup>nd</sup> July 1991, Graz, Austria.
4. Astaras, Th., 1994. The present state of Remote Sensing applications to geological science in Greece, International Journal of Remote Sensing, vol. 15, 6, pp. 1251-1258.
5. Avery, T. E., Berlin, G. L., 1992. Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation, Macmillan Publishing Company, New York, pp. 295-299.
6. Burrough, P. A., McDonnell R. A., 2000. Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press Inc., New York, 333 p.
7. Drury, S. A., 1993. Image Interpretation in Geology, Second edition, Chapman & Hall, London, 283 p.

5. Ganas, A., Wadge, G., and White, K., 1996. Fault segmentation and Tectonic Geomorphology in Eastern Central Greece from Satellite Data. In: Proceedings of the Eleventh ERIM Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Las Vegas, Nevada, 27-29 February 1996, vol. I, pp.119-128.
8. Ganas, A., 1997. Fault segmentation and seismic hazard assessment in the gulf of Evia rift, Central Greece, PhD Thesis, Department of Geography, University of Reading, England.
9. Ganas, A., and White, K., 1995. Neotectonic fault Segments and Footwall Geomorphology from Landsat TM Data. Geological Society of Greece Special Publication 6 "Seismicity of the Carpatho-Balkan Region", pp.169-175.
10. Gupta, R. P., 2003. Remote Sensing Geology, second edition, Springer, Berlin, 655 p.
11. Hajnsek, I., 2003. Scientific Coordinator of the Seminar 2.06 entitled: "SAR Principles and Application", CCG (Carl-Cranz-Gesellschaft ) / DLR, Oberpfaffenhofen, Munich, 10-14 November 2003.
12. Henderson, F.M. and Lewis, A.J. (Eds), 1998. Principles and applications of Imaging Radar, John Wiley & Sons, Inc., New York 866 p.
13. Karfakis, I., K. 1983. Radar Imagery Interpretation of Northern Greece, ITC Journal, 1983-3.
14. Karfakis, Y., Mouyaris, N. (1988). "Remote Sensing and Seismotectonic Inspection of the West Corinthian Gulf-Disasters during the ancient times and seismic hazards". Proceedings of an International Symposium "The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites" Marinos & Koukis (Eds.). Vol. 3. pp.1291-1299.
15. Kramer, H. J., 2002. Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors, Springer, Berlin. 1510 p.
16. Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W., 1994. Remote Sensing and image interpretation, third edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 750 p.
17. Lowman, P. D. Jr., 2002. Exploring Space, Exploring Earth: New Understanding of the Earth from Space Research, Cambridge University Press, London, 362 p.
18. Lyberis, N., Chorowicz, J. and Papamarinopoulos, S., 1982. La paleofaille transformate du Kastaniotikos (Greece) teledetection donnees de terrain et geophysique, Bull. De la Soc. Geol. De France, 1982, pp.72-85.
19. Mostafa, M. E., Zakir, F. A., 1996. New enhancement techniques for azimuthal analysis of lineaments for detecting tectonic trends in and around the Afro-Arabian Shield, Int. J. of Remote Sensing, Vol. 17, 15, pp. 2923-2943.
20. Mountrakis, D., Psilovikos, A. and Papazachos, B., 1983. The neotectonic regime of the 1978 Thessaloniki earthquakes, Tech. Chamb. of Greece, 11-27.
21. Novak, I. D., Soulakellis, N., 2000. Identifying geomorphic features using LANDSAT-5/TM data processing techniques on Lesbos, Greece, Geomorphology, 34, pp. 101-109.
22. Prost, G.L, 2001. Remote Sensing for Geologists – A Guide to image interpretation, Second Edition, Gordon and Breach Science Publishers, Canada.
23. Psilovikos, A. and Sotiriadis, L., 1983. The neotectonic graben complex of the Serbomacedonian massif at the area of Promygdonia basin in northern Greece, Sonderdruck clauthaler Geologische Abhandlungen 44, 21-53.
24. Richards, J. A., Jia, X., 1999. Remote Sensing Digital Image Analysis, Third Edition, Springer, Berlin, 363 p.

25. Sabins, F.F., 1997. Remote Sensing: (Principles and Interpretation), W.H. Freeman and company, N. York.

**Πηγές από το διαδίκτυο**

<http://dlr.de>

<http://wdr.dlr.de>

<http://epsilon.nought.de>

<http://southport.jpl.nasa.gov>

<http://www.sandia.gov>

<http://earth.esa.int>