



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στα πλαίσια του  
Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον»

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ASTER  
ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΔΥΤΙΚΗ  
ΚΡΗΤΗ**

Παπαδάκη Σ. Ειρήνη

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Μερτίκας Στέλιος (Επιβλέπων), Καθηγητής  
Δρ. Σαρρής Απόστολος, Ερευνητής Β', ΙΜΣ  
Ζερβάκης Μιχάλης, Καθηγητής

Χανιά  
Ιανουάριος, 2006

## Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή διεκπεραιώθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εργασία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς τη βοήθεια των παρακάτω ατόμων τα οποία θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα.

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου κ. Στυλιανό Μερτίκα, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης, ευχαριστώ τον Δρ. Απόστολο Σαρρή, Ερευνητή Β' του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών (ΙΜΣ) που ανήκει στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) και Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος στο Ρέθυμνο, για τη συνεργασία και τη διάθεση των δορυφορικών εικόνων ASTER και άλλων ψηφιακών δεδομένων.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Μιχάλη Ζερβάκη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης του Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, για τις συμβουλές του σε θέματα ανάλυσης ψηφιακών εικόνων.

Ακόμη, ευχαριστώ τον Δρ. Χαράλαμπο Φασουλά, Εντ. Επίκουρο Καθηγητή Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Κρήτης, για τη συνεισφορά του όσον αφορά στην έρευνα πεδίου και στη φωτοερμηνεία των εικόνων.

Η εκπόνηση της διατριβής ενισχύθηκε οικονομικά υπό τη μορφή υποτροφίας για το χρονικό διάστημα 3/5/2004-31/8/2005, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος EMERIC I-Crinno (Development of an Expert System for the Monitoring, Management & Protection of the Natural Landscape & Environmental Resources of the Island of Crete – Crete Innovative region). Συντονιστής του έργου ήταν το Εργαστήριο Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης & Αρχαιοπεριβάλλοντος του ΙΜΣ-ΙΤΕ. Σκοπός του έργου

ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός Έμπειρου Συστήματος παρακολούθησης, διαχείρισης και προστασίας του φυσικού τοπίου και του περιβάλλοντος της Κρήτης.

Επίσης, ευχαριστώ το Βαρδινογιάννειο Ίδρυμα για την οικονομική υποστήριξη υπό τη μορφή υποτροφίας κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2003-2004.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με την ηθική και υλική της υποστήριξη με βοήθησε στη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Παπαδάκη Σ. Ειρήνη

Ιανουάριος, 2006

## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή περιγράφει και αξιολογεί μια μεθοδολογία ανάλυσης δορυφορικών εικόνων ASTER (Advanced Spaceborne Thermal and Emission Radiometer) για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη. Απώτερος στόχος της διατριβής είναι η ενημέρωση του αντίστοιχου χάρτη των γεωλογικών γραμμώσεων της Κρήτης.

Το μέγεθος/όγκος των ψηφιακών αρχείων που προκύπτουν από την επεξεργασία και αποθήκευση των δορυφορικών εικόνων ASTER (14 φασματικά κανάλια καταγραφής της ακτινοβολίας) είναι τεράστιος. Στην παρούσα εργασία η επιλογή των καναλιών που χρησιμοποιήθηκαν για επεξεργασία, καθορίστηκε από τις φασματικές ταυτότητες των υδάτινων μαζών και της βλάστησης. Αυτό οφείλεται στο ότι ορισμένοι βασικοί τύποι υδρογραφικών δικτύων και η επιμήκης ανάπτυξη της βλάστησης έχουν συχνά φυσική εξάρτηση από τα ρήγματα.

Τα ρήματα απαντούν στις δορυφορικές εικόνες ως γραμμώσεις. Για την ανάδειξη των γραμμώσεων–ενδεχόμενων ρηξιγενών δομών, βελτιώθηκαν οι αντιθέσεις στις πρωτογενείς εικόνες, εφαρμόστηκε η τεχνική της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών καθώς και του χωρικού φιλτραρίσματος στο πεδίο της εικόνας. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές πράξεις μεταξύ επιλεγμένων φασματικών καναλιών.

Η εργασία ολοκληρώθηκε με φωτοερμηνεία ασπρόμαυρων και σύνθετων ψευδοχρωματικών απεικονίσεων της περιοχής μελέτης, υπό την καθοδήγηση έμπειρου σε θέματα γεωλογικών χαρτογραφήσεων στην Κρήτη. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασίστηκε στους υπάρχοντες χάρτες των ρηγμάτων, κλίμακας 1:50.000 (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, ΙΓΜΕ) καθώς και στους τοπογραφικούς χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ), κλίμακας 1:50.000. Τέλος, πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου στις περιοχές Ροδωπού, Ρόκκα και Φαλάσαρνα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>Εισαγωγή.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Στόχοι της διατριβής.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.2 Δομή της διατριβής.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>2.1 Βασικές αρχές Τηλεπισκόπησης.....</b>                                  | <b>4</b>  |
| <b>2.2 Δορυφορικά εικονοληπτικά συστήματα.....</b>                            | <b>6</b>  |
| 2.2.1 Το σύστημα καταγραφής του ASTER.....                                    | 6         |
| <b>2.3 Γεωλογία και Τηλεπισκόπηση.....</b>                                    | <b>9</b>  |
| <b>2.4 Γραμμώσεις στις εικόνες με γεωλογική προέλευση.....</b>                | <b>11</b> |
| 2.4.1 Ρηξιγενείς δομές σε δορυφορικά δεδομένα.....                            | 12        |
| 2.4.2 Ανάλυση εικόνων για τον εντοπισμό ρηγμάτων.....                         | 13        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....</b>  | <b>16</b> |
| <b>3.1 Μέθοδοι επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων.....</b>                         | <b>16</b> |
| <b>3.2 Τεχνικές αποκατάστασης της εικόνας.....</b>                            | <b>17</b> |
| <b>3.3 Βελτίωση των αντιθέσεων στην εικόνα.....</b>                           | <b>19</b> |
| 3.3.1. Γραμμική ενίσχυση.....   | 20        |
| 3.3.2 Εξισορρόπηση ιστογράμματος.....   | 21        |
| <b>3.4 Χωρικά φίλτρα.....</b>   | <b>21</b> |
| <b>3.5 Ενίσχυση με τη χρήση πολλαπλών καναλιών πολυφασματικών εικόνων....</b> | <b>28</b> |
| 3.5.1 Αριθμητικές πράξεις.....  | 28        |
| 3.5.2 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών.....  | 29        |
| 3.5.3 Δημιουργία σύνθετων ψευδοχρωματικών εικόνων.....                        | 30        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>  | <b>32</b> |
| <b>4.1 Δεδομένα.....</b>  | <b>32</b> |
| <b>4.2 Μεθοδολογία.....</b>   | <b>34</b> |
| 4.2.1 Μετατροπή δεδομένων σε ERDAS format (.img).....                         | 36        |
| 4.2.2 Δημιουργία χωρικών масκών.....  | 37        |
| 4.2.3 Ανάλυση κύριων συνιστωσών.....  | 38        |
| 4.2.4 Αριθμητικές πράξεις μεταξύ καναλιών.....                                | 41        |
| 4.2.5 Εφαρμογή χωρικών φίλτρων.....   | 44        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.2.6 Επεξεργασία φιλτραρισμένων εικόνων .....                 | 48         |
| 4.2.7 Χαρτογραφική προβολή εικόνων σε ΕΓΣΑ '87 .....           | 49         |
| 4.2.8 Φωτοερμηνεία – Σύγκριση αποτελεσμάτων.....               | 52         |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>   | <b>53</b>  |
| <b>Αποτελέσματα .....</b>                                      | <b>53</b>  |
| <b>5.1. Ανάλυση κύριων συνιστωσών .....</b>                    | <b>53</b>  |
| 5.1.1 Για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR .....               | 54         |
| 5.1.2 Για τα κανάλια του μέσου υπερύθρου.....                  | 62         |
| 5.1.3 Για τα κανάλια 1, 3N και 8.....                          | 64         |
| <b>5.2 Αριθμητικές πράξεις μεταξύ φασματικών καναλιών.....</b> | <b>67</b>  |
| 5.2.1 Αφαίρεση.....  | 67         |
| 5.2.2 Λόγος φασματικών καναλιών 3N/2 .....                     | 70         |
| <b>5.3 Χωρικά φίλτρα.....</b>                                  | <b>74</b>  |
| 5.3.1 Φίλτρα διευθύνσεων .....                                 | 74         |
| 5.3.2 Εφαρμογή φίλτρου Sobel .....                             | 78         |
| 5.3.3 Εφαρμογή φίλτρου Laplace.....                            | 80         |
| <b>5. 4 Φωτοερμηνεία – έρευνα στο πεδίο.....</b>               | <b>83</b>  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>   | <b>108</b> |
| <b>Συμπεράσματα .....</b>                                      | <b>108</b> |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>                         | <b>112</b> |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>  | <b>118</b> |

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Στόχοι της διατριβής

Η παρούσα εργασία περιγράφει και αξιολογεί μια μεθοδολογία ανάλυσης δορυφορικών εικόνων ASTER (Advanced Spaceborne Thermal and Emission Radiometer) για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη. Στην ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Κρήτης χρησιμοποιούνται πρώτη φορά για γεωλογικές εφαρμογές δορυφορικά δεδομένα ASTER (14 φασματικά κανάλια με χωρική ανάλυση που φτάνει τα  $15\text{ m} \times 15\text{ m}$  στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο).

«Ένα ρήγμα προκύπτει από τη διάρρηξη των ασθενών ζωνών των πετρωμάτων του στερεού φλοιού της Γης, λόγω ανομοιομόρφων πιέσεων» (Σωτηριάδης και Ψιλοβίκος, 1984). Η σημασία του εντοπισμού των ρηγμάτων έγκειται στα εξής:

A) Τα ρήγματα αποτελούν φυσικές διόδους ροής των υπόγειων υδάτων. Σύμφωνα με τον Drury (2001) η οικονομική σημασία της συγκέντρωσης και εκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων για υδρευτικούς και αρδευτικούς σκοπούς καθώς και ο εντοπισμός ορυκτών (π.χ., χρυσός, χαλκός και άλλα βαρέα κυρίως μέταλλα) που έχουν μεταφερθεί και παγιδευτεί δια μέσω των ρηγμάτων είναι μεγάλη.

B) Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάρρηξη του γήινου φλοιού είναι η αιτία γένεσης των σεισμών. Οι συνέπειες ενός σεισμού μπορεί να είναι η πρόκληση οικονομικών καταστροφών σε κτήρια, δρόμους, οικισμούς, κ.ά. αλλά και η απώλεια ανθρώπινων ζωών (Colwell, 1983).

Οι παραδοσιακές μέθοδοι χαρτογράφησης των ρηγμάτων απαιτούν έρευνα στο πεδίο. Ο χρόνος, όμως, και το κόστος των επιτόπιων παρατηρήσεων αυξάνουν ανάλογα με την έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος. Επιπροσθέτως, δεν είναι εύκολο για έναν επιστήμονα να αποκαλύψει και να κατανοήσει τον τρόπο με τον οποίο σχετίζονται μεταξύ τους οι, μεγάλων διαστάσεων, τεκτονικές δομές. Προβλήματα, όπως είναι αυτό της πυκνής βλάστησης, καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη τη διάκριση ρηγμάτων, από μικρού βεληνεκούς

αποστάσεις από τον παρατηρητή.

Από την άλλη πλευρά, οι δορυφορικές εικόνες παρέχουν μια συνοπτική άποψη της υπό μελέτη περιοχής περιορίζοντας τα προβλήματα που προκύπτουν με τις συμβατικές μεθόδους. Η μείωση του χρόνου και του κόστους της χαρτογράφησης καθώς και η υπέρβαση προβλημάτων όπως είναι το δυσπρόσιτο/απρόσιτο περιοχών λόγω απότομου αναγλύφου και/ή πυκνής βλάστησης, παρέχουν στον φωτοερμηνευτή τη δυνατότητα να αποκαλύψει και να κατανοήσει την τεκτονική κατάσταση, σε εκτεταμένες περιοχές.

Τα ρήγματα απαντούν στις δορυφορικές εικόνες ως γραμμώσεις (lineaments). Καθότι ο όγκος των ψηφιακών αρχείων που προκύπτουν από την ανάλυση των δορυφορικών εικόνων είναι μεγάλος, κρίθηκε σκόπιμο η επεξεργασία να περιοριστεί σε συγκεκριμένα φασματικά κανάλια του ASTER. Η επιλογή των καναλιών καθορίστηκε από τις φασματικές ιδιότητες που παρουσιάζουν οι υδάτινες μάζες και η βλάστηση κατά την αλληλεπίδρασή τους με την ακτινοβολία. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ρήγματα, ως ασθενέστερα σημεία του φλοιού, υφίστανται ευκολότερα διάβρωση υπό του ρέοντος ύδατος, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου ελεγχόμενου από αυτά. Επίσης, η υγρασία που συγκρατείται κατά μήκος των ρηγμάτων επηρεάζει τη σύσταση του εδάφους συνεπώς και την ανάπτυξη της βλάστησης.

Για τον εντοπισμό των γραμμώσεων εφαρμόστηκαν τεχνικές ενίσχυσης στις πρωτογενείς εικόνες. Ειδικότερα, βελτιώθηκαν οι αντιθέσεις στις αρχικές εικόνες, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές πράξεις μεταξύ των επιλεγμένων καναλιών, εφαρμόστηκε η τεχνική της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών για όλα και για επιλεγμένα κανάλια. Επίσης, εφαρμόστηκαν χωρικά φίλτρα για την ενίσχυση των γραμμώσεων σε όλες (φίλτρα Laplace) και επιλεγμένες διευθύνσεις (directional filters). Στα πλαίσια της φωτοερμηνείας, δημιουργήθηκε μια σύνθετη ψευδοχρωματική απεικόνιση του πεδίου κατόπτευσης, με στόχο την απόδοση της φασματικής πληροφορίας με χρώματα. Η αξιολόγηση των γραμμώσεων ως ενδεχόμενες ρηξιγενείς δομές βασίστηκε στους υπάρχοντες χάρτες των γεωλογικών ρηγμάτων (ΙΓΜΕ) καθώς και στους αντίστοιχους τοπογραφικούς χάρτες (ΓΥΣ), κλίμακας 1:50.000. Στα τελευταία στάδια της εργασίας πραγματοποιήθηκε έρευνα στο πεδίο στις περιοχές Ροδωπού, Ρόκκα και Φαλάσαρνα.

## **1.2 Δομή της διατριβής**

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές αρχές της Τηλεπισκόπησης, στον ορισμό και τον τρόπο εμφάνισης των γεωλογικών γραμμώσεων επί των δορυφορικών εικόνων καθώς και στις διάφορες τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί κατά καιρούς για τον εντοπισμό ρηγμάτων με τη βοήθεια δορυφορικών δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφονται οι τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων που εφαρμόστηκαν συνδυαστικά στα πλαίσια της εργασίας. Πρόκειται για μετασχηματισμούς που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο της εικόνας και αφορούν σε βελτιώσεις των αντιθέσεων στις αρχικές εικόνες καθώς και στη δημιουργία νέων, σύνθετων εικόνων καταλληλότερων για φωτοερμηνεία.

Στο Κεφάλαιο 4 εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους η επεξεργασία περιορίστηκε σε συγκεκριμένα φασματικά κανάλια του ASTER και αναλύονται τα επιμέρους στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας εντοπισμού των ρηξιγενών δομών στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των εικόνων και τη φωτοερμηνεία του πεδίου κατόπτευσης, παρουσιάζονται και αξιολογούνται στο Κεφάλαιο 5. Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται σαφές ότι τα ρήγματα δεν εμφανίζονται σε όλες τις εικόνες με τον ίδιο τρόπο. Επομένως, η ποιότητα των αποτελεσμάτων για εφαρμογές, όπως είναι η ανάδειξη των ρηγμάτων, εκτός από μια καλή ανάλυση των πρωτογενών εικόνων μέσω της συνδυαστικής εφαρμογής των διαφόρων τεχνικών ενίσχυσης, απαιτεί και φωτοερμηνεία από έμπειρο σε θέματα γεωλογικών χαρτογραφήσεων.

Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Ο εντοπισμός των ρηγμάτων με τη βοήθεια δορυφορικών δεδομένων, εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους που έχουν να κάνουν με τις διαστάσεις των ρηγμάτων σε σχέση με εκείνες του εικονοστοιχείου, την ημερομηνία λήψης της εικόνας, το ύψος και αζιμούθιο του Ηλίου, κ.ά. Στο ίδιο Κεφάλαιο παρατίθενται προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στις Ενότητες που ακολουθούν, γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές αρχές της Τηλεπισκόπησης και στα χαρακτηριστικά του εικονοληπτικού συστήματος ASTER. Επίσης, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο τα ρήγματα γίνονται αντιληπτά επί των δορυφορικών εικόνων, μέσω παρατηρήσεων του υδρογραφικού δικτύου και της βλάστησης. Τέλος, γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στις τεχνικές επεξεργασίας εικόνων που έχουν εφαρμοσθεί για τον εντοπισμό ρηγμάτων.

### 2.1 Βασικές αρχές Τηλεπισκόπησης

Η Τηλεπισκόπηση αφορά στην αντίληψη αντικειμένων ή φαινομένων από απόσταση. Ορίζεται ως «η επιστήμη της συλλογής, ανάλυσης και ερμηνείας της πληροφορίας γύρω από ένα στόχο, εξετάζοντας τις αλληλεπιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την επιφάνεια της Γης και την ατμόσφαιρα που παρεμβάλλεται μεταξύ του στόχου και του δέκτη» (Μερτίκας, 1999).

Το εύρος ή αλλιώς το φάσμα της ακτινοβολίας ταξινομείται σε φασματικές ζώνες ανάλογα με το μήκος κύματος,  $\lambda$  (Πίνακας 2.1).

**Πίνακας 2.1:** Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

| ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ                              | ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ( $\lambda$ )             |
|---|---|
| Ακτίνες γάμμα                               | < 0,03 nm                               |
| Ακτίνες X                                   | 0,03 nm - 300 nm                        |
| Υπεριώδης ακτινοβολία                       | 0,30 $\mu\text{m}$ - 0,38 $\mu\text{m}$ |
| Ορατό (Visible ή V)                         | 0,38 $\mu\text{m}$ - 0,72 $\mu\text{m}$ |
| Εγγύς υπέρυθρο (Near Infra-Red ή NIR)       | 0,72 $\mu\text{m}$ - 1,30 $\mu\text{m}$ |
| Μέσο υπέρυθρο (Short-Wave Infra-Red ή SWIR) | 1,30 $\mu\text{m}$ - 3 $\mu\text{m}$    |
| Άπω υπέρυθρο                                | 7,00 $\mu\text{m}$ - 15 $\mu\text{m}$   |
| Μικροκύματα                                 | 0,3 cm – 30 cm                          |
| Ραδιοφωνικά κύματα                          | $\geq 30$ cm                            |

Παραδείγματα απεικονίσεων της Τηλεπισκόπησης αποτελούν οι αεροφωτογραφίες, οι δορυφορικές εικόνες και οι εικόνες Radar.

Η ψηφιακή εικόνα αναφέρεται σε μια τρισδιάστατη, διακριτή συνάρτηση  $f(x,y)$ , η οποία έχει τη μορφή πίνακα. Ο πίνακας αποτελείται από διακριτά στοιχεία (εικονοστοιχεία ή ψηφίδες). Οι γραμμές ( $x$ ) και οι στήλες ( $y$ ) προσδιορίζουν τις συντεταγμένες ( $x,y$ ) της εικόνας. Σε κάθε εικονοστοιχείο ( $x,y$ ) του πίνακα αντιστοιχεί μια τιμή φωτεινότητας  $f$ , η οποία προκύπτει μετά από ψηφιοποίηση ή κβαντοποίηση της ακτινοβολίας σε επίπεδα του τόνου του γκρι. Στη διεθνή βιβλιογραφία τα αρχεία με αυτή την ψηφιακή διάταξη είναι γνωστά ως αρχεία raster.

Η ποιότητα και το περιεχόμενο μιας ψηφιακής εικόνας καθορίζονται από:

1. Τη φασματική ανάλυση του συστήματος ανίχνευσης (spectral resolution). Εξαρτάται από το πλήθος και το εύρος των φασματικών ζωνών καταγραφής του εικονοληπτικού συστήματος.
2. Τη ραδιομετρική ανάλυση (radiometric resolution). Αναφέρεται στον αριθμό των διαβαθμίσεων του τόνου του γκρι που χρησιμοποιούνται για την ψηφιοποίηση της έντασης της ακτινοβολίας σε μια εικόνα (π.χ., για δεδομένα 8-bit το εύρος των τιμών ψηφιοποίησης είναι 0-255).
3. Τη χωρική ανάλυση (spatial resolution). Πρόκειται για την ικανότητα του συστήματος ανίχνευσης να διακρίνει αντικείμενα στη γεωμετρική τους διάσταση. Η ελάχιστη ανιχνεύσιμη περιοχή του εδάφους (σε m) καθορίζεται από τις διαστάσεις του εικονοστοιχείου (pixel).
4. Τη διαχρονική ανάλυση (temporal resolution). Αναφέρεται στη συχνότητα δειγματοληψίας εικόνων από μια περιοχή. Για παράδειγμα, η λήψη εικόνων ASTER μιας συγκεκριμένης περιοχής επαναλαμβάνεται κάθε 16 ημέρες.

## **2.2 Δορυφορικά εικονοληπτικά συστήματα**

Την επιτυχία των πρώτων αμερικανικών δορυφόρων Landsat το 1972, διαδέχθηκε μια σειρά από παρόμοια δορυφορικά προγράμματα Τηλεπισκόπησης. Το σύστημα SPOT (Satellite pour l'Observation de la Terre) αναπτύχθηκε από τους Γάλλους με πρώτη εκτόξευση το 1986. Ο δορυφόρος φέρει ειδικό σαρωτή που ονομάζεται VEGETATION και έχει σχεδιαστεί για τη συνεχή και ακριβή καταγραφή και έλεγχο της βλάστησης σε παγκόσμια κλίμακα (Μηλιαρέσης, 2003). Η κυβέρνηση της Ινδίας ξεκίνησε το πρόγραμμα IRS (Indian Remote Sensing Satellite) το 1988. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (European Space Agency ή ESA) έθεσε σε τροχιά τους ERS-1 και ERS-2 (European Remote Sensing Satellite) ξεκινώντας από το 1990. Το ίδιο έτος εκτοξεύθηκε και ο JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite) από την Ιαπωνία ενώ οι καναδοί μπήκαν στο προσκήνιο με τον δορυφόρο Radarsat το 1991 (Μερτίκας, 1999).

Υπάρχει μια συνεχής βελτίωση των καταγραφικών συστημάτων που φέρουν οι σύγχρονοι δορυφόροι. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σύστημα του ASTER, το οποίο καταγράφει την ανακλώμενη και εκπεμπόμενη ακτινοβολία σε 14 συνολικά φασματικά κανάλια.

### **2.2.1 Το σύστημα καταγραφής του ASTER**

Το πρόγραμμα ASTER είναι προϊόν της συνεργασίας μεταξύ της Αμερικανικής NASA (National Aeronautics and Space Administration) και του Υπουργείου Έρευνας και Βιομηχανίας της Ιαπωνίας, με τη συμμετοχή πολλών ερευνητικών ιδρυμάτων από όλο τον κόσμο. Στους στόχους του προγράμματος περιλαμβάνονται διεργασίες, όπως είναι ο υπολογισμός δεικτών βλάστησης, ο προσδιορισμός της ορυκτολογίας και των ιδιοτήτων του εδάφους, η μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας και των ιδιοτήτων των σύννεφων, κ.ά. (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>, 10/2004).

Ο ASTER, μαζί με άλλους τέσσερις αισθητήρες, είναι εγκατεστημένος στον δορυφόρο Terra (Πίνακας 2.2).

**Πίνακας 2.2:** Αισθητήρες καταγραφής στον δορυφόρο Terra.

| Αισθητήρας  | Αριθμός διαύλων καταγραφής |
|---|----------------------------|
| <b>ASTER:</b> Advanced Spaceborne Thermal and Emission Reflection | 14                         |
| <b>MODIS:</b> Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer       | 36                         |
| <b>MISR:</b> Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer               | 4                          |
| <b>CERES:</b> Clouds and Earth's Radiant Energy System            | 2                          |
| <b>MOPITT:</b> Measurements Of Pollution In The Troposphere       | 3                          |

Ο δορυφόρος Terra τέθηκε σε λειτουργία την 16<sup>η</sup> Δεκεμβρίου του 1999 με σκοπό την παρακολούθηση και προστασία του περιβάλλοντος. Εκτελεί μια ηλιο-σύγχρονη, σχεδόν πολική, τροχιά σε ύψος 705 km. Ο χρόνος διέλευσης του δορυφόρου από τον ισημερινό είναι στις 10:30 π.μ (τοπικός ηλιακός χρόνος). Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στον διαδικτυακό τόπο <http://terra.nasa.gov/About/> (12/2005).

Ο ASTER αποτελείται από τρία υποσυστήματα καταγραφής της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, με 14 συνολικά φασματικά κανάλια:

- 1) Τρία κανάλια για την καταγραφή της ακτινοβολίας στην ορατή και εγγύς υπέρυθρη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Visible-Near Infrared ή VNIR). Συμπεριλαμβάνεται καταγραφικό σύστημα με δυνατότητα δημιουργίας στερεοζεύγους. Ειδικότερα, η λήψη εικόνων στο ναδίρ ονομάζεται 3N (Nadir). Καθώς ο δορυφόρος απομακρύνεται από το πεδίο κατόπτρευσης πραγματοποιείται λήψη εικόνων, υπό γωνία, στο κανάλι 3B (Backward looking).
- 2) Έξι κανάλια στη μέσο-υπέρυθρη ζώνη του φάσματος (Short-Wave Infrared ή SWIR).
- 3) Πέντε κανάλια στη θερμική, υπέρυθρη ζώνη του φάσματος (Thermal Infrared ή TIR).

Ο Πίνακας 2.3 συνοψίζει, για κάθε ένα από τα 14 φασματικά κανάλια, το ακριβές εύρος της φασματικής ζώνης καταγραφής, τη χωρική ανάλυση του κάθε υποσυστήματος καθώς και τα επίπεδα κβαντοποίησης.

**Πίνακας 2.3:** Χαρακτηριστικά υποσυστημάτων καταγραφής ASTER.

| Υποσύστημα καταγραφής | Διάυλος No | Φασματική ανάλυση (μm) | Χωρική ανάλυση (m) | Επίπεδα κβαντοποίησης |
|-----------------------|------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| VNIR                  | 1          | 0,52-0,60              | 15                 | 8bits                 |
|                       | 2          | 0,63-0,69              |                    |                       |
|                       | 3N         | 0,78-0,86              |                    |                       |
|                       | 3B         | 0,78-0,86              |                    |                       |
| SWIR                  | 4          | 1,60-1,70              | 30                 | 8bits                 |
|                       | 5          | 2,145-2,185            |                    |                       |
|                       | 6          | 2,185-2,225            |                    |                       |
|                       | 7          | 2,235-2,285            |                    |                       |
|                       | 8          | 2,295-2,365            |                    |                       |
|                       | 9          | 2,360-2,430            |                    |                       |
| TIR                   | 10         | 8,125-8,475            | 90                 | 12bits                |
|                       | 11         | 8,475-8,825            |                    |                       |
|                       | 12         | 8,925-9,275            |                    |                       |
|                       | 13         | 10,25-10,95            |                    |                       |
|                       | 14         | 10,95-11,65            |                    |                       |

Το σύστημα ASTER παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας των εικόνων σε δύο επίπεδα (<http://edcdaac.usgs.gov/dataproducts.asp>, 10/2004):

- Επίπεδο επεξεργασίας L1A (Level-1A): πρόκειται για πρωτογενή, ανεπεξέργαστα δορυφορικά δεδομένα τα οποία διατίθενται δωρεάν από το διαδίκτυο.
- Επίπεδο επεξεργασίας L1B (Level-1B): οι εικόνες τύπου L1B προέρχονται μετά από ραδιομετρική και γεωμετρική διόρθωση των εικόνων L1A. Οι συντελεστές της ραδιομετρικής και γεωμετρικής διόρθωσης διατίθενται σε αρχεία (metadata files) που συνοδεύουν τις εικόνες L1A. Ο προκαθορισμένος από την Γεωλογική Εταιρία της Αμερικής (US Geological Survey) τύπος χαρτογραφικής προβολής των εικόνων, είναι η Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή (Universal

Transverse Mercator ή UTM). Ο επαναπροσδιορισμός των τιμών φωτεινότητας στις νέες θέσεις των ψηφίδων (resampling) βασίζεται στη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής (Ενότητα 3.2).

Καθημερινά παράγονται 650 εικόνες επιπέδου L1A, 150 από τις οποίες υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία (εικόνες L1B). Κάθε εικόνα καλύπτει έκταση  $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$  στην επιφάνεια της Γης. Η λήψη εικόνων μιας συγκεκριμένης περιοχής επαναλαμβάνεται κάθε 16 ημέρες (Abrams, 2000).

Επιπλέον, μετά από κατάλληλες ραδιομετρικές διορθώσεις και μετασχηματισμούς των εικόνων είναι δυνατή η μετατροπή των τιμών φωτεινότητας που καταγράφει ο σαρωτής σε παραμέτρους που αντιστοιχούν σε φυσικές ιδιότητες του εδάφους (π.χ., τιμές θερμοκρασίας, υψομετρικές τιμές, κ.ά.). Η επεξεργασία και προμήθεια αυτών των εικόνων (προϊόντα L2) μπορεί να γίνει μετά από ειδική παραγγελία στο διαδίκτυο <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/> (12/2005).

Τα δορυφορικά δεδομένα του ASTER χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και χαρτογράφηση φαινομένων, όπως είναι οι παγετώνες (π.χ., έκταση και ρυθμός τήξης των πάγων), οι πλημμύρες, οι δασικές πυρκαγιές (π.χ., έκταση και επιπτώσεις πυρκαγιάς σε χλωρίδα και πανίδα), οι εκρήξεις των ηφαιστείων (π.χ., πρόβλεψη εκρήξεων, μετακινήσεις της λάβας), κ.ά.

Στον τομέα της Γεωλογίας, κύριοι στόχοι της εφαρμογής των εν λόγω δεδομένων είναι η χαρτογράφηση της κατανομής και του προσδιορισμού των γεωλογικών σχηματισμών, ο εντοπισμός κοιτασμάτων πετρελαίου και υπόγειων υδάτων καθώς και η ταξινόμηση των ρηγμάτων σε ενεργά και ανενεργά (Abrams, 2000).

## **2.3 Γεωλογία και Τηλεπισκόπηση**

Η Τηλεπισκόπηση έχει ένα πλήθος εφαρμογών σε πολλούς τομείς επιστημών, όπως είναι η ωκεανογραφία (π.χ., για τη χαρτογράφηση του θαλάσσιου πυθμένα), η περιβαλλοντική διαχείριση (π.χ., για τη μέτρηση επιφανειακών και θαλάσσιων ρύπων), η

εφαρμοσμένη γεωλογία (π.χ., για τη μελέτη κατολισθητικών φαινομένων), η τεκτονική γεωλογία (π.χ., για την αναγνώριση ρηξιγενών και πτυχωσιγενών δομών), η αρχαιολογία, κ.ά. (Colwell, 1983, Kuntz, 2000).

Στη Γεωλογία, η συνεισφορά των τηλεπισκοπικών δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ο Cracknell (1991) επισήμανε το γεγονός ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι μιας γεωλογικής χαρτογράφησης απαιτούν έρευνα στο πεδίο, η οποία ανάλογα με την έκταση και τη δυνατότητα πρόσβασης σε μια περιοχή, μπορεί να ολοκληρωθεί μετά από αρκετά έτη.

Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τον ίδιο συγγραφέα, οι τεκτονικές παραμορφώσεις του γήινου αναγλύφου, το υδρογραφικό δίκτυο μιας περιοχής, κ.ά., καλύπτουν έκταση δεκάδων ή και εκατοντάδων χιλιομέτρων. Συνεπώς, δεν είναι πάντα εύκολο για έναν επιστήμονα να αποκαλύψει και να κατανοήσει την τεκτονική κατάσταση σε μεγάλης έκτασης περιοχές. Επισημαίνεται ότι προβλήματα, όπως είναι αυτό της πυκνής βλάστησης, καθιστούν δύσκολη τη διάκριση δομών (π.χ., ρήγματα) από μικρού βεληνεκούς αποστάσεις από τον παρατηρητή.

Η Τηλεπισκόπηση έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων χαρτογράφησης. Οι δορυφορικές εικόνες παρέχουν μια συνοπτική άποψη της υπό μελέτη περιοχής και μπορούν να αποκαλύψουν την αλληλοσυσχέτιση χαρακτηριστικών της γεωμορφολογίας σε εκτεταμένες περιοχές (Drury, 2001).

Το κόστος και ο χρόνος της γεωλογικής χαρτογράφησης μειώνονται σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, οι οποίες απαιτούν έρευνα στο πεδίο. Το γεγονός βέβαια ότι το κόστος των δορυφορικών δεδομένων αυξάνει ανάλογα με την ποιότητα της εικόνας (όσο αυξάνει η χωρική ανάλυση αυξάνει και το κόστος μιας εικόνας) είναι ένα θέμα που πρέπει να συνυπολογίζεται για τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής (Yang *et al.*, 1999).

Επιπλέον, ο δορυφόρος επαναλαμβάνει την κάλυψη της ίδιας περιοχής, σε τακτά χρονικά διαστήματα, την ίδια ώρα της ημέρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα 1) της συνεχούς ενημέρωσης των γεωμορφολογικών και μορφοτεκτονικών στοιχείων μιας περιοχής και 2) της παρακολούθησης φαινομένων, όπως είναι οι δασικές πυρκαγιές, οι κατολισθήσεις, οι μετακινήσεις εδαφών και πετρελαιοκηλίδων, κ.ά.

Η ανάλυση των δορυφορικών εικόνων εφαρμόζεται τόσο για τη χαρτογράφηση όσο και για την παρακολούθηση του φυσικού περιβάλλοντος. Πολυφασματικές απεικονίσεις

του δορυφόρου Landsat έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς για τη χαρτογράφηση και ταξινόμηση της βλάστησης (Basham *et al.*, 1997, Green *et al.*, 1998), την αναγνώριση ζωνών υδροθερμικής εξαλλοίωσης (Παρχαρίδης κ.ά., 1999), τη χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών (Novak και Soulakellis, 1999), κ.ά. Οι Gupta και Chen (2001) συγκρίνοντας εικόνες SPOT με διαφορετικές ημερομηνίες λήψης εντόπισαν τις αποκλίσεις και τη δράση του ποταμού στη λεκάνη Mekong (Νότια Κίνα). Η ανάλυση των εικόνων βελτιώνεται στην περίπτωση συγχώνευσης δεδομένων (data fusion) από διαφορετικά συστήματα καταγραφής (Basham *et al.*, 1997, Green *et al.*, 1998).

## 2.4 Γραμμώσεις στις εικόνες με γεωλογική προέλευση

Ο όρος «γράμμωση» αφορά σε γραμμικά χαρακτηριστικά (π.χ., αυτοκινητόδρομοι, αεροδιάδρομοι, όρια μεταξύ ιδιοκτησιών ή καλλιιεργειών, ακτογραμμή) που εμφανίζονται στις εικόνες της Τηλεπισκόπησης. Τα γραμμικά αυτά στοιχεία ή αλλιώς «ακμές» (edges) της ψηφιακής εικόνας, γίνονται αντιληπτά από ασυνέχειες ή απότομες μεταβολές του τόνου του γκρι σε κάποια ψηφίδα ή σε ομάδες ψηφίδων.

Από γεωμορφολογικής απόψεως, οι O' Leary *et al.* (1976) όρισαν ως γράμμωση «κάθε χαρτογραφήσιμο απλό ή σύνθετο γραμμικό χαρακτηριστικό μιας επιφάνειας, τα τμήματα του οποίου είναι διατεταγμένα σε ευθεία ή σε ελαφρώς καμπύλη σχέση μεταξύ τους. Οι γραμμώσεις διαφέρουν σαφώς από τα γειτονικά χαρακτηριστικά της εικόνας και συχνά υποδηλώνουν ένα υποεπιφανειακό φαινόμενο (π.χ., ρήγματα)».

Στη Γεωλογία ο όρος «γράμμωση» χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει γεωλογικά χαρακτηριστικά, όπως είναι (α) οι ζώνες διάτμησης/ρήγματα, (β) οι ρηματογενείς κοιλάδες (rift valleys), (γ) οι ευθυγραμμίσεις ρεμάτων και κοιλάδων, (δ) τα ίχνη αξόνων των διακλάσεων και των διαρρήξεων, (ε) τα ίχνη αξόνων των πτυχών, (στ) τα όρια των γεωλογικών σχηματισμών, κ.ά. (Gupta, 1991).

#### **2.4.1 Ρηξιγενείς δομές σε δορυφορικά δεδομένα**

Ο εντοπισμός των ρηγμάτων με τη βοήθεια δορυφορικών εικόνων εξαρτάται από τη χωρική ανάλυση των εικόνων σε σχέση με τις διαστάσεις των ρηγμάτων. Στην περίπτωση, επί παραδείγματι, του δορυφόρου Landsat όπου ένα (1) pixel στην εικόνα καλύπτει έκταση  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  στην επιφάνεια της Γης, δεν είναι εφικτός ο εντοπισμός ρηγμάτων με διαστάσεις μήκους/πλάτους μικρότερες από εκείνες του ενός εικονοστοιχείου δηλαδή, 30 m. Γενικά, τεκτονικές δομές μικρών διαστάσεων γίνονται ευκολότερα αντιληπτές σε αεροφωτογραφίες από ότι σε δορυφορικές εικόνες, λόγω καλύτερης ανάλυσης (Gupta, 1991).

Τα ρήγματα γίνονται συνήθως αντιληπτά στην εικόνα από τις σκιάσεις που δημιουργούνται λόγω τοπογραφικού αναγλύφου. Η εμφάνιση και το μέγεθος των σκιάσεων εξαρτώνται από τη γωνία ύψους του Ηλίου τη στιγμή της λήψης της εικόνας, την ύπαρξη νέφωσης (αδυναμία ορατότητας της περιοχής κάτω από τα σύννεφα) αλλά και τη σχετική θέση/προσανατολισμό των γραμμώσεων σε σχέση με τη θέση του Ηλίου (Μηλιαρέσης, 2003). Ιδανικές συνθήκες για την ανάδειξη των ρηγμάτων θεωρούνται εκείνες κατά τις οποίες ο Ήλιος δεν είναι ιδιαίτερα ψηλά στον ορίζοντα και το ρήγμα φωτίζεται πλάγια από το επίπεδο μετατόπισης, ώστε να δημιουργηθούν σκιές λόγω τοπογραφίας. Αν το ρήγμα είναι προσανατολισμένο παράλληλα στη διεύθυνση φωτισμού του Ηλίου δεν δημιουργεί σκιά και είναι δύσκολο ή αδύνατον να εντοπισθεί στην εικόνα.

Επίσης, τα ρήγματα αποτελούν φυσικές διόδους ροής των υδάτων. Κατά συνέπεια η υγρασία που αναπτύσσεται κατά μήκος των ζωνών διάρρηξης του φλοιού επηρεάζει τη σύσταση του εδάφους και την ανάπτυξη των διαφόρων ειδών φυτών. Απότομες μεταβάσεις από ένα είδος βλάστησης σε ένα άλλο καθώς και η κατά προτίμηση επιμήκης ανάπτυξη αυτής, υποδεικνύουν θέσεις γεωλογικών ρηγμάτων (Miller, 1961). Ευκρινείς σχέσεις μεταξύ των ρηγμάτων και της μορφολογίας διακρίνονται σε περιοχές με λιγοστή βλάστηση. Αυτό ισχύει διότι σε υγρές και τροπικές περιοχές, η ανάπτυξη άφθονης βλάστησης η οποία συχνά συνοδεύεται από παχύ στρώμα εδάφους, επισκιάζουν τη μορφολογική έκφραση υποκείμενων τεκτονικών δομών (Αστάρας, 1997).

Μεγάλα συστήματα κατακλάσεων και ρηγμάτων αναγνωρίζονται κυρίως από τους παράλληλους και ορθογώνιους τύπους υδρογραφικών δικτύων. Αυτό οφείλεται στο ότι η

διάβρωση κατά μήκος των ζωνών των ρηγμάτων αναπτύσσει υδρογραφικό δίκτυο ελεγχόμενο από τα ρήγματα. (Αστάρας, 1997). Τεκτονικές κοιλάδες, εκτροπές της ροής των ρεμάτων/ποταμών, γραμμικά τμήματα αποστράγγισης, κ.ά. που προκύπτουν από την ανάλυση των δορυφορικών εικόνων απαντούν συχνά σε περιοχές ρήξης του φλοιού.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται και στη γεωλογία της περιοχής μελέτης καθώς η γραμμική συγκέντρωση υγρασίας δεν συνδέεται πάντα με τεκτονική δραστηριότητα. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις επιφανειακής συγκέντρωσης υγρασίας κατά μήκος της επαφής αδιαπέρατων (π.χ., αργιλλικοί σχιστόλιθοι) και διαπερατών πετρωμάτων (π.χ., ασβεστόλιθοι), που δίδουν εσφαλμένη εντύπωση ρηγμάτων (Κίλιας, 1998).

Τέλος, τα ρήγματα μικρής γωνίας κλίσης ( $< 45^\circ$ ) συνήθως δεν εμφανίζουν επιφανειακά ίχνη ούτε συνεχείς γραμμώσεις. Τα μικρής κυρίως κλίσης ανάστροφα ρήγματα και επωθήσεις δύσκολα εντοπίζονται ακόμη και σε περιοχές χωρίς βλάστηση (Αστάρας, 1997).

#### 2.4.2 Ανάλυση εικόνων για τον εντοπισμό ρηγμάτων

Ο εντοπισμός των ρηγμάτων μπορεί να γίνει είτε με φωτοερμηνεία των τεκτονικών γραμμώσεων (Leech *et al.*, 2003) είτε με επεξεργασία ψηφιακών εικόνων καθώς και Μοντέλων Ψηφιακού Εδάφους για την ημι-αυτόματη και την αυτόματη εξαγωγή των γραμμώσεων (Arlegui και Soriano, 1998).

Μια αντικειμενική μεθοδολογία για τον προσδιορισμό γραμμώσεων βασιζόμενη στο χωρικό φιλτράρισμα των πρωτογενών δεδομένων προτάθηκε από τον Moore (1983).

Ο Nama (2004) κατάφερε να εντοπίσει τις τεκτονικές παραμορφώσεις που προκάλεσε το 1999 η έκρηξη του ηφαιστείου στο Καμερούν εφαρμόζοντας την τεχνική της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών σε δεδομένα του Landsat ETM<sup>+</sup> (Enhanced Thematic Mapper). Η εφαρμογή της ίδιας τεχνικής σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους επεξεργασίας των ψηφιακών εικόνων (π.χ., ενίσχυση των χρωματικών αντιθέσεων με το μετασχηματισμό Ένταση-Απόχρωση-Κορεσμός ή Intensity-Hue-Saturation) συνέβαλε στη γεωλογική χαρτογράφηση και τον εντοπισμό τεκτονικών δομών στην περιοχή του Σουδάν (Kenea, 1997).

Η εφαρμογή χωρικών φίλτρων (φίλτρα διευθύνσεων και φίλτρα Laplace) στο φασματικό κανάλι 4 (0,75-0,90  $\mu\text{m}$ ) του Landsat 7-ETM και η μετέπειτα δημιουργία σύνθετων ψευδοχρωματικών εικόνων οδήγησε στη χαρτογράφηση και ερμηνεία γεωλογικών δομών στο Νοτιοδυτικό Ιράν (Ali *et al.*, 2004).

Η συγχώνευση δεδομένων Landsat 5 TM (ημερομηνία λήψης 1992) και SPOT (ημερομηνία λήψης 1997) οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα ρήγματα απαντούν με τη μορφή μικρών τμημάτων γραμμώσεων και όχι ως συνεχείς γραμμώσεις (Kaya *et al.*, 2004). Όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 5, κάτι αντίστοιχο προέκυψε και από την παρούσα ανάλυση εικόνων ASTER.

Καθότι τα αποτελέσματα της φωτοερμηνείας ποικίλλουν από ερευνητή σε ερευνητή, το 1996 (Poscolieri *et al.*, 1996) έγινε μια προσπάθεια επεξεργασίας δεδομένων Landsat για τον εντοπισμό ρηξιγενών δομών στη Λέσβο από δύο αναλυτές (μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων).

Μια διαφορετική προσέγγιση του θέματος αποτέλεσε η ανάλυση δεδομένων Landsat TM για τον εντοπισμό γραμμώσεων στην Αυστραλία (Mah *et al.*, 1995). Η επεξεργασία των δεδομένων βασίσθηκε σε χωρικό φιλτράρισμα των πρωτογενών δεδομένων σε διαφορετικές διευθύνσεις. Οι συνιστώσες των φίλτρων προστέθηκαν στις αρχικές εικόνες και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία σύνθετων ψευδοχρωματικών εικόνων.

Στις σύγχρονες εφαρμογές χαρτογράφησης των ρηγμάτων λαμβάνει χώρα με επιτυχία ο συνδυασμός των διαφόρων τεχνικών ανάλυσης δορυφορικών δεδομένων (Suzen και Toprak, 1998, Heddi *et al.*, 1999).

Οι δυνατότητες της Τηλεπισκόπησης ενισχύονται σημαντικά από εκείνες που παρέχονται μέσω ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems ή GIS). Τα σύγχρονα λογισμικά προγράμματα των GIS δίδουν στον χρήστη τη δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων απεικονίσεων του γήινου αναγλύφου. Σε συνδυασμό με τη φασματική πληροφορία των δορυφορικών δεδομένων και τη μετέπειτα δημιουργία σύνθετων ψευδοχρωματικών εικόνων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η χαρτογράφηση και ερμηνεία γεωλογικών δομών σε μεγάλης έκτασης περιοχές (Μιγγίρος κ.ά., 1995, Ali *et al.*, 2004).

Μέχρι σήμερα δεν έχει αναπτυχθεί κάποιος μεθοδικός κανόνας για τον εντοπισμό των ρηγμάτων. Αυτό ισχύει καθότι η εμφάνισή των ρηγμάτων στις εικόνες εξαρτάται από τη χωρική ανάλυση των εικόνων (σχέση pixel και διαστάσεων ρηγμάτων), τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τη θέση του Ηλίου, την ημερομηνία λήψης των εικόνων (π.χ., τους θερινούς μήνες ο Ήλιος είναι πολύ ψηλά και οι σκιάσεις λόγω απότομου αναγλύφου δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές), κ.ά. Υπάρχει πάντα ο κίνδυνος απώλειας πληροφορίας τόσο στην περίπτωση της φωτοερμηνείας (ικανότητα και εμπειρία φωτοερμηνευτή) όσο και στην περίπτωση μιας ημι-αυτόματης ή αυτόματης εξαγωγής των τεκτονικών γραμμώσεων (στα επιμέρους στάδια μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας εντοπισμού ρηγμάτων οι διάφορες παράμετροι καθορίζονται από τον εκάστοτε χρήστη).

Καθοριστικός παράγοντας της ποιότητας των αποτελεσμάτων είναι οι τεχνικές επεξεργασίας των εικόνων που χρησιμοποιούνται από τα πρώτα κιόλας στάδια μιας εφαρμογής. Στο Κεφάλαιο που ακολουθεί παρατίθενται οι κυριότερες από αυτές τις τεχνικές, που εφαρμόστηκαν συνδυαστικά για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η αναγνώριση των γραμμώσεων μπορεί να γίνει είτε με φωτοερμηνεία είτε μετά από επεξεργασία των ψηφιακών εικόνων. Τα αποτελέσματα της φωτοερμηνείας μπορεί να ποικίλλουν από ερευνητή σε ερευνητή. Επομένως, η τεχνική δεν συνιστάται ως μια αντικειμενική μέθοδο ανίχνευσης των γραμμώσεων.

Το Κεφάλαιο αυτό εξετάζει τους μετασχηματισμούς που εφαρμόζονται σε όλα τα κανάλια ή στις ξέχωρες συνιστώσες μιας πολυφασματικής εικόνας, με απώτερο σκοπό τη δημιουργία νέων, σύνθετων εικόνων καταλληλότερων για ερμηνεία. Οι μετασχηματισμοί που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο της εικόνας (π.χ., αριθμητικές πράξεις μεταξύ καναλιών, εφαρμογή χωρικών φίλτρων, κ.ά.) ενισχύουν τις μικρές ραδιομετρικές ή φασματικές διαφορές που χαρακτηρίζουν τα αντικείμενα πάνω στην επιφάνεια της Γης. Οι διαφορές αυτές δεν γίνονται άμεσα αντιληπτές στα πρωτογενή, ανεπεξέργαστα δεδομένα.

### 3.1 Μέθοδοι επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων

Στο σύνολό τους οι μέθοδοι ανάλυσης των εικόνων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή συνιστούν ένα αξιόλογο εργαλείο για την ανίχνευση των γραμμώσεων καθώς και άλλων χαρακτηριστικών της μορφολογίας του εδάφους. Οι περισσότερες τεχνικές λαμβάνουν χώρα μετά τις αναγκαίες εφαρμογές ραδιομετρικής αποκατάστασης και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε ως σημειακοί είτε ως τοπικοί τελεστές (Αργιαλάς, 1999). Οι σημειακοί τελεστές επιδρούν στην τιμή φωτεινότητας ενός εικονοστοιχείου ανεξάρτητα από τη γειτονιά του. Οι τοπικοί τελεστές ή αλλιώς τελεστές «συνάφειας» μεταβάλλουν τις τιμές του τόνου του γκρι λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των γειτονικών εικονοστοιχείων (Μερτίκας, 1999).

Οποιαδήποτε μορφή ενίσχυσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα φασματικό κανάλι μιας εικόνας ή στις ξέχωρες συνιστώσες μιας πολυφασματικής εικόνας. Υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης των αποτελεσμάτων σε ασπρόμαυρες ή έγχρωμες (ψευδοχρωματικές) εικόνες (συνδυασμός εικόνων στην τριπλέτα Red-Green-Blue, RGB).

Η επιλογή των τεχνικών επεξεργασίας των εικόνων εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και είναι συχνά θέμα προσωπικής προτίμησης αλλά και εμπειρίας. Διακρίνονται σε:

- 1) Τεχνικές ραδιομετρικών και γεωμετρικών αναγωγών,
- 2) τεχνικές βελτίωσης των αντιθέσεων,
- 3) τεχνικές χωρικού φιλτραρίσματος,
- 4) τεχνικές ενίσχυσης με τη χρήση πολλαπλών καναλιών πολυφασματικών εικόνων.

### **3.2 Τεχνικές αποκατάστασης της εικόνας**

Οι τεχνικές αποκατάστασης των εικόνων αφορούν κυρίως σε:

**1) Ραδιομετρικές διορθώσεις.** Οι διορθώσεις αυτού του είδους αποκαλύπτουν την πραγματική φασματική απόκριση των αντικειμένων του γήινου αναγλύφου, η οποία αλλοιώνεται λόγω της επίδρασης της τοπογραφίας, της επίδρασης της ατμόσφαιρας, των ραδιομετρικών σφαλμάτων που προκαλούνται από την κακή λειτουργία ή την απορύθμιση του καταγραφικού συστήματος, κ.ά.

**2) Γεωμετρικές διορθώσεις.** Τα πρωτογενή δορυφορικά δεδομένα που συλλέγονται από τα διάφορα καταγραφικά συστήματα εμπεριέχουν συστηματικές και μη συστηματικές γεωμετρικές παραμορφώσεις. Τα μη συστηματικά σφάλματα οφείλονται στη μεταβολή στοιχείων της τροχιάς, όπως είναι η ταχύτητα του δορυφόρου, το ύψος του καθώς και η θέση της κάμερας. Οι συστηματικές παραμορφώσεις οφείλονται στην καμπυλότητα και περιστροφή της Γης, στην παραμόρφωση των γεωμετρικών διαστάσεων των στόχων κατά την απεικόνισή τους, κ.ά.

Στην προσπάθεια απαλοιφής των γεωμετρικών σφαλμάτων χρησιμοποιούνται διαδοχικά παραμετρικά και μη παραμετρικά μοντέλα. Τα πρώτα αφορούν σε διορθώσεις για την περιστροφή της γης, την πανοραμική παραμόρφωση κ.ά. Για αυτού του είδους τις διορθώσεις χρειάζονται στοιχεία της τροχιάς, όπως είναι το ύψος και η ταχύτητα του δορυφόρου (Μηλιαρέσης, 2003).

### **Χαρτογραφική προβολή εικόνων**

Το σύστημα συντεταγμένων με τις γραμμές και τις στήλες στην εικόνα (Ενότητα 2.1) θεωρείται αυθαίρετο καθότι δεν προσδιορίζει ταυτόχρονα τη θέση των αντικειμένων πάνω στην επιφάνεια της Γης. Η διαδικασία κατά την οποία μια ψηφιακή εικόνα αποκτά τις γεωμετρικές ιδιότητες ενός χάρτη είναι γνωστή ως γεωμετρική αναγωγή της εικόνας (image rectification ή registration).

Κατά την εγγραφή των δεδομένων σε ένα γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιείται μια εικόνα ή χάρτης ως αναφορά. Ο μετασχηματισμός από τις συντεταγμένες της εικόνας στις συντεταγμένες του χάρτη μπορεί να είναι γραμμικός, πολυωνυμικός, κ.ά. Υλοποιείται με τον προσδιορισμό σταθερών σημείων ελέγχου (Ground Control Points, GCPs) κοινών στην εικόνα και τον χάρτη.

Στην πράξη, για τον μετασχηματισμό των εικόνων χρησιμοποιούνται πολώνυμα μέχρι 3<sup>ου</sup> βαθμού (Richards, 1997). Για τις αεροφωτογραφίες, επί παραδείγματι, όπου η επίδραση της καμπυλότητας της Γης και η παραμόρφωση των γεωμετρικών διαστάσεων των στόχων είναι ανεπαίσθητη έως μηδαμινή, χρησιμοποιούνται πάντα πολώνυμα 1<sup>ου</sup> βαθμού.

Στην περίπτωση των δορυφορικών εικόνων, όσο αυξάνει ο βαθμός του πολωνύμου, αυξάνει η επιτυχία του μετασχηματισμού (ακρίβεια προσαρμογής της εικόνας στις γεωμετρικές ιδιότητες του χάρτη). Όσο όμως αυξάνει ο βαθμός του πολωνύμου αυξάνει και ο αριθμός των απαιτούμενων, για τον μετασχηματισμό, GCPs. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η χρήση ενός πολωνύμου υψηλού βαθμού (π.χ., 3<sup>ου</sup>) δεν επιφέρει πάντα επιθυμητά αποτελέσματα. Η προσαρμογή της εικόνας στις γεωμετρικές ιδιότητες του χάρτη θα είναι ακριβής στην περιοχή ανάμεσα στα GCPs δεν ισχύει όμως το ίδιο στις περιοχές της εικόνας με ελλιπή προσδιορισμό GCPs. Στις περιοχές αυτές η παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από ότι θα ήταν με τη χρήση ενός πολωνύμου 2<sup>ου</sup> βαθμού (Τριπολιτσιώτης, 1998).

Το μέτρο της προσαρμογής της εικόνας στον χάρτη προσδιορίζεται από τις τιμές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square, *RMS*). Πρακτικά το *RMS* αποτελεί μέτρο της απόκλισης (απόσταση) ενός τυχαίου σημείου ( $x_r, y_r$ ) στην μετασχηματισμένη εικόνα από την πραγματική του θέση ( $x_i, y_i$ ) στον χάρτη:

$$RMS = \sqrt{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2} \quad (3.1)$$

όπου:

$x_r, y_r$ : συντεταγμένες σημείου στην μετασχηματισμένη εικόνα

$x_i, y_i$ : συντεταγμένες σημείου στον χάρτη

Καθότι μετά τον μετασχηματισμό οι θέσεις των εικονοστοιχείων έχουν αλλάξει, είναι αναγκαίο να επαναπροσδιοριστούν οι τιμές φωτεινότητας στις νέες θέσεις των ψηφίδων. Στην προκύπτουσα εικόνα λαμβάνει χώρα επανάληψη της δειγματοληψίας (resampling) βάσει διαφόρων μεθόδων παρεμβολής (π.χ., μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου, κυβική επαναδειγματοληψία).

Η τεχνική του πλησιέστερου γειτονικού σημείου (nearest neighbor) έχει το πλεονέκτημα ότι είναι εύκολη και γρήγορη στους υπολογισμούς. Καθότι διατηρεί τις αρχικές τιμές φωτεινότητας ενδείκνυται στην περίπτωση που η εικόνα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για ταξινόμηση των περιοχών που απεικονίζει.

Η τεχνική της κυβικής παρεμβολής (cubic interpolation) λαμβάνει υπόψη τις ψηφιακές τιμές από τα 16 εικονοστοιχεία που βρίσκονται γύρω από την υπό παρεμβολή ψηφίδα. Θεωρείται αρκετά χρονοβόρα και λόγω της εξομάλυνσης που προκαλείται στη μετασχηματισμένη εικόνα δεν ενδείκνυται για εξαγωγή συμπερασμάτων. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία (Μερτίκας, 1999).

### 3.3 Βελτίωση των αντιθέσεων στην εικόνα

Συνήθως ο αριθμός των επιπέδων του γκρι που καταγράφονται για μια εικόνα καλύπτει μια μικρή περιοχή ψηφιακών τιμών (Digital Numbers ή *DN*) σε σχέση με την κλίμακα 0-255 που μπορεί να δείξει μια οθόνη 8-bits. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εικόνα να παρουσιάζεται με χαμηλές αντιθέσεις (contrast). Οι λεπτομέρειες εντός των σκοτεινών και φωτεινών περιοχών δεν διακρίνονται. Αν όμως το εύρος των ψηφιακών τιμών στην αρχική εικόνα προσαρμοστεί κατάλληλα σε όλη την κλίμακα των 256 διαβαθμίσεων του τόνου του γκρι, τότε οι αντιθέσεις στην εικόνα ενισχύονται, αποκαλύπτοντας έτσι λεπτομέρειες που αρχικά ήταν αδύνατο να εντοπισθούν.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές ενίσχυσης των αντιθέσεων είναι η ενίσχυση με γραμμικό μετασχηματισμό των δεδομένων (Linear contrast stretch) και η ενίσχυση με εξισορρόπηση του ιστογράμματος (Histogram equalization).

### 3.3.1. Γραμμική ενίσχυση

Η γραμμική ενίσχυση των αντιθέσεων στην εικόνα (linear contrast stretching) αποσκοπεί στην προσαρμογή των τιμών των εικονοστοιχείων από τις αρχικά παρατηρούμενες  $DN_{min}$  (ελάχιστη) και  $DN_{max}$  (μέγιστη) σε όλο το εύρος των 256 διαβαθμίσεων του επιπέδου του γκρι (κλίμακα 0-255). Ο μετασχηματισμός υλοποιείται με τη βοήθεια μιας γραμμικής εξίσωσης της μορφής:

$$DN_B = \frac{(DN_A - a)255}{b - a} \quad (3.2)$$

όπου:

$DN_A$  : ψηφιακές τιμές εικόνας εισόδου,

$a$  :  $DN_{min}$  στην αρχική εικόνα  $A$ ,

$b$  :  $DN_{max}$  στην αρχική εικόνα  $A$ ,

$DN_B$  : ψηφιακές τιμές εικόνας εξόδου  $B$  (μετά την εφαρμογή του γραμμικού μετασχηματισμού στα δεδομένα).

Ένα μειονέκτημα της γραμμικής ενίσχυσης του ιστογράμματος είναι το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη μόνο την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή των ψηφίδων. Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτές οι τιμές μπορεί να είναι κάποια σφάλματα πολύ απομακρυσμένα από τις υπόλοιπες  $DN$  της εικόνας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποδίδονται τόσα επίπεδα απεικόνισης για τις σπάνιες τιμές του γκριζού όσα και για αυτές μεγαλύτερης συχνότητας εμφάνισης, στο κέντρο του ιστογράμματος (Αργιαλάς, 1999).

Για να διορθωθεί αυτό μπορούν να καθοριστούν από τον χρήστη τα όρια αποκοπής,  $a$  και  $b$ , βάσει των, μικρής συχνότητας εμφανίσεων αυτών από το ιστόγραμμα. Εναλλακτικά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τα εκατοστημόρια

(percentiles) του ιστογράμματος (π.χ., ενίσχυση μεταξύ των 5<sup>ου</sup> και 95<sup>ου</sup> ποσοστιαίων σημείων, 10<sup>ου</sup> - 90<sup>ου</sup> κοκ.).

### 3.3.2 Εξισορρόπηση ιστογράμματος

Στην προσπάθεια να αντιμετωπισθεί το κύριο μειονέκτημα του γραμμικού μετασχηματισμού (απόδοση των ίδιων διαβαθμίσεων του γκριζου τόσο για τις ψηφιακές τιμές που έχουν μικρή συχνότητα εμφάνισης όσο και για αυτές στο κέντρο του ιστογράμματος) εφαρμόζεται η μέθοδος της εξισορρόπησης του ιστογράμματος (histogram equalization). Η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου έχει ως αποτέλεσμα την απόδοση νέων τιμών φωτεινότητας στα εικονοστοιχεία λαμβάνοντας υπόψη τη συχνότητα εμφάνισής τους στην αρχική εικόνα. Η τεχνική ενδείκνυται για την ενίσχυση της πληροφορίας στο κεντρικό τμήμα και την συμπίεση των τιμών στα άκρα του ιστογράμματος.

Αντιλαμβάνεται κανείς ότι κατά την εξισορρόπηση του ιστογράμματος λαμβάνει χώρα μια σειρά από ομαδοποιήσεις των τιμών φωτεινότητας που μπορεί να αφορούν σε περισσότερες από μία θεματικές τάξεις (κυρίως στα άκρα του ιστογράμματος). Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και την αποφυγή ομαδοποίησης των τιμών φωτεινότητας που αφορούν σε ρήγματα με άλλα, μικρής σχετικά συχνότητας εμφάνισης, γραμμικά στοιχεία (π.χ., δρόμοι) κρίθηκε σκόπιμο να μην πραγματοποιηθεί αυτού του είδους ο μετασχηματισμός.

### 3.4 Χωρικά φίλτρα

Μια εικόνα μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα συνιστωσών υψηλών και χαμηλών χωρικών συχνοτήτων. Η χωρική συχνότητα στο πεδίο της εικόνας ή αλλιώς ο «κυματαριθμός»,  $\kappa$ , ορίζεται ως εξής:

$$\kappa = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{cycles/meter}) \quad (3.3)$$

όπου:

$\kappa$ : κυματαριθμός (cycles/meter)

$\lambda$ : χωρική περίοδος (σε μονάδες μήκους)

Έστω, επί παραδείγματι, χαρακτηριστικό της εικόνας που καλύπτει έκταση δύο εικονοστοιχείων. Αν το κάθε εικονοστοιχείο έχει διαστάσεις 30 m, τότε η χωρική περίοδος είναι  $\lambda = 2 \times 30 = 30$  m, ενώ ο κυματαριθμός  $\kappa = 1/\lambda = 1/(30 \text{ m}) = 3,3 \times 10^{-2}$  cpm (cycles per meter).

Πρακτικά η χωρική συχνότητα (ή κυματαριθμός) γίνεται αντιληπτή από το κατά πόσο απότομες ή ομαλές μπορούν να χαρακτηριστούν οι μεταβολές του τόνου του γκρι από εικονοστοιχείο σε εικονοστοιχείο (Lillesand and Kiefer, 1987).

Τα χαρακτηριστικά χαμηλών χωρικών συχνοτήτων αφορούν κατά κύριο λόγο στο φόντο και τις γενικές πληροφορίες της εικόνας. Οι τιμές του τόνου του γκρι εναλλάσσονται σταδιακά για μεγάλες περιοχές (π.χ., μεγάλες εκτάσεις καλλιεργειών, κ.ά.). Από την άλλη πλευρά, οι υψηλές χωρικές συχνότητες σχετίζονται με την τοπική χωρική λεπτομέρεια και χαρακτηρίζονται από σχετικά απότομες εναλλαγές των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων σε σχετικά μικρή απόσταση (π.χ., ρέματα, ρήγματα, κ.ά.).

Τα ψηφιακά φίλτρα είναι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την επιλεκτική ενίσχυση των χαμηλών (low-pass filters) ή υψηλών (high-pass filters) χωρικών συχνοτήτων μιας εικόνας (Μερτίκας, 1999).

Η τεχνική του χωρικού φιλτραρίσματος βασίζεται σε ένα μετακινούμενο παράθυρο **W** (μάσκα ή παράθυρο Kernel), με συντελεστές βάρους  $w_i$  και διαστάσεις  $m \times n$ . Οι διαστάσεις του παραθύρου είναι συνήθως περιττού αριθμού (π.χ.,  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ ) έτσι ώστε να υπάρχει πάντα ένα κεντρικό εικονοστοιχείο. Η επιλογή των διαστάσεων εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Μεγάλες διαστάσεις (π.χ.,  $7 \times 7$ ,  $11 \times 11$ ) προτιμώνται για την ενίσχυση χαρακτηριστικών που καλύπτουν μεγάλη έκταση στην εικόνα. Η διαδικασία έχει ως εξής:

Το παράθυρο μετακινείται διαδοχικά πάνω από όλα τα εικονοστοιχεία της ψηφιακής εικόνας και μετά από κατάλληλο ‘ζύγισμα’ των παλιών τιμών φωτεινότητας με τους αντίστοιχους συντελεστές βάρους του παραθύρου, αποδίδει νέες τιμές του τόνου του γκρι.

Έστω το παράθυρο **W** με διαστάσεις  $3 \times 3$  και συντελεστές βάρους  $w_1, w_2, \dots, w_9$ :

$$\mathbf{W} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline w_1 & w_2 & w_3 \\ \hline w_4 & w_5 & w_6 \\ \hline w_7 & w_8 & w_9 \\ \hline \end{array}$$

Το τμήμα της εικόνας  $\mathbf{F}$  που βρίσκεται κάτω από το  $\mathbf{W}$  μια δεδομένη χρονική στιγμή, έχει ψηφιακές τιμές  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_9$ .

$$\mathbf{F} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline f_1 & f_2 & f_3 \\ \hline f_4 & f_5 & f_6 \\ \hline f_7 & f_8 & f_9 \\ \hline \end{array}$$

Το φιλτράρισμα της εικόνας αφορά καταρχήν στον υπολογισμό των γινομένων των συντελεστών βάρους,  $w_i$ , με τις αντίστοιχες τιμές φωτεινότητας,  $f_i$ , των εικονοστοιχείων που βρίσκονται κάτω από το  $\mathbf{W}$ . Στη συνέχεια, η παλιά τιμή  $f_5$  της ψηφίδας που βρίσκεται κάτω από το κεντρικό εικονοστοιχείο,  $w_5$ , του παραθύρου, αντικαθίσταται από την τιμή  $R$ :

$$R = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 + w_4 f_4 + w_5 f_5 + w_6 f_6 + w_7 f_7 + w_8 f_8 + w_9 f_9 = \sum_{i=1}^{mn} w_i f_i \quad (3.4)$$

Η προσαρμογή του αποτελέσματος στην ίδια κλίμακα με εκείνη των αρχικών δεδομένων (π.χ., 0-255), υλοποιείται με διαίρεση του  $R$  με το άθροισμα των συντελεστών βάρους του  $\mathbf{W}$  (normalization of kernel).

Το παράθυρο μετακινείται στην επόμενη ψηφίδα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

### Ανίχνευση και ενίσχυση ακμών

Τα φίλτρα διέλευσης των υψηλών χωρικών συχνοτήτων (ακμές) συνιστούν ένα σχετικά απλό και αποτελεσματικό μέσο ανάδειξης της γεωμετρικής λεπτομέρειας στην εικόνα. Η εφαρμογή τους βασίζεται κυρίως στην ιδέα της παραγώγου (Μερτίκας, 1999).

Η πρώτη παράγωγος ή κλίση μιας συνεχούς συνάρτησης, ορίζεται ως η ταχύτητα μεταβολής της συνάρτησης σε ένα σημείο. Καθότι η εικόνα είναι μια διακριτή συνάρτηση (τα κέντρα των ψηφίδων είναι διακριτά σημεία στο χώρο), οι παράγωγοι υπολογίζονται σε διακριτή μορφή, από διαφορές μεταξύ γειτονικών τιμών φωτεινότητας των ψηφίδων, σε μία ή και στις δύο διευθύνσεις  $x$  και  $y$  (Ενότητα 2.1).

Στην απλούστερη περίπτωση, η πρώτη παράγωγος,  $\frac{\partial f(x,y)}{\partial x}$ , στο σημείο  $(x,y)$  ως προς τη διεύθυνση  $x$  και για βήμα δειγματοληψίας  $\Delta x = 1$  pixel, υπολογίζεται μέσω της διαφοράς μεταξύ δύο διαδοχικών εικονοστοιχείων:

$$\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \cong f(x+1,y) - f(x,y) \quad (3.5)$$

Είναι επίσης δυνατόν να υπολογιστεί το διαφορικό ως προς συγκεκριμένες διευθύνσεις (υπό γωνίες). Στην περίπτωση αυτή ενισχύονται κυρίως οι ακμές οι οποίες είναι κάθετες προς τη διεύθυνση του διαφορικού ενώ αποδυναμώνεται η εμφάνιση εκείνων που είναι παράλληλες προς τη διεύθυνση της παραγωγίσης. Το πλεονέκτημα αυτού του είδους των φίλτρων (directional filters) έγκειται στην επιλεκτική ενίσχυση των ακμών σε συγκεκριμένες διευθύνσεις.

Με τη βοήθεια ενός επιπλέον διαφορικού μπορεί να υπολογισθεί και η δεύτερη παράγωγος,  $\frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2}$ , στο σημείο  $(x,y)$ :

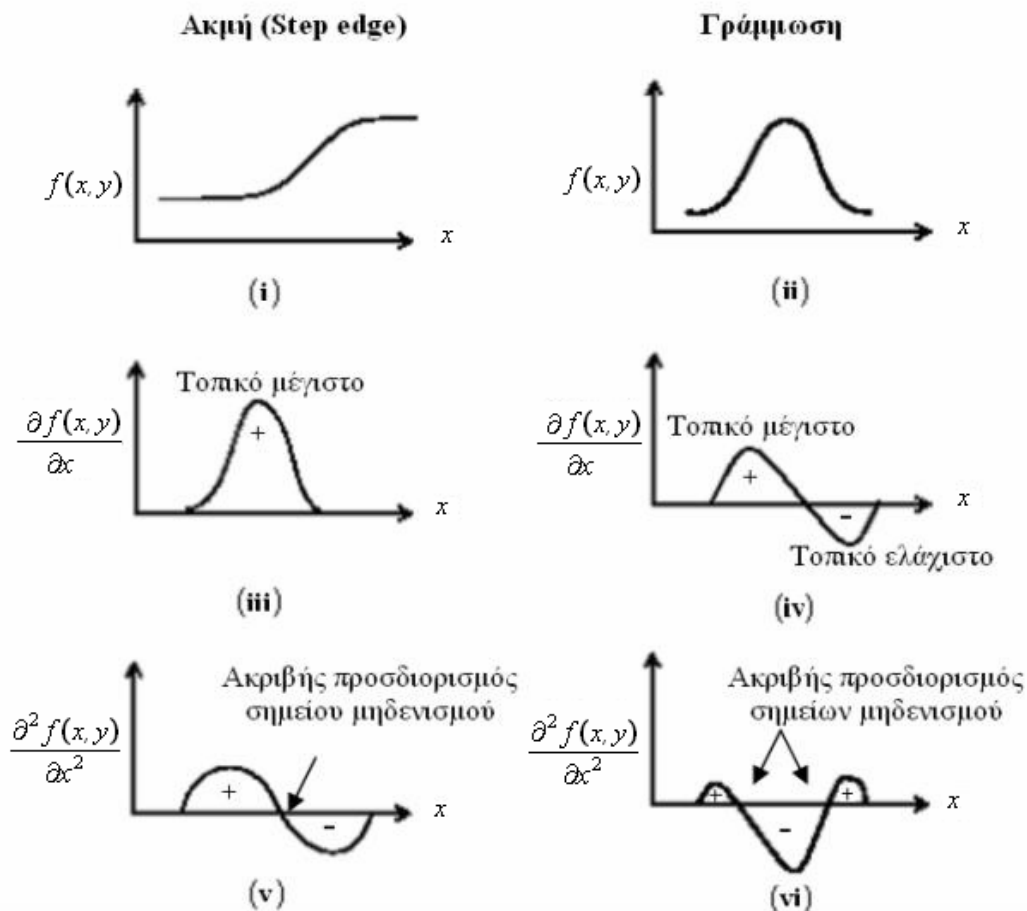
$$\frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} \cong f(x+1,y) + f(x-1,y) - 2f(x,y) \quad (3.6)$$

Τόσο η πρώτη όσο και η δεύτερη παράγωγος μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική. Οι ομοιόμορφες περιοχές αποδίδονται επί της οθόνης με μια ενδιάμεση

απόχρωση του γκριζου ενώ οι ακμές εμφανίζονται είτε σκοτεινές (αρνητικό αποτέλεσμα παραγωγίσης) είτε φωτεινές (θετικές τιμές παραγώγου).

Επιπλέον, δεδομένου ότι οι διαφορές μεταξύ των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων είναι συνήθως πολύ μικρές, τα δεδομένα μετά την εφαρμογή των χωρικών φίλτρων καταλαμβάνουν ένα πολύ μικρό εύρος τιμών γύρω από τη διάμεσο τιμή. Συνεπώς, επιβάλλεται περαιτέρω ενίσχυση των αντιθέσεων στην εικόνα (Αργιαλάς, 1999).

Πρακτικά, η εφαρμογή χωρικών φίλτρων πρώτης παραγώγου δύναται να εντοπίσει τις απότομες μεταβολές των τιμών φωτεινότητας (ακμές εικόνας), σε μια γειτονιά εικονοστοιχείων (π.χ.,  $3 \times 3$ ), με τον προσδιορισμό τοπικών μεγίστων/ελαχίστων στην προκύπτουσα εικόνα (Σχήμα 3.1iii-iv). Η εφαρμογή αυτού του είδους των φίλτρων έχει ως αποτέλεσμα (Σχήμα 3.1iv) τα γραμμικά χαρακτηριστικά να εμφανίζονται πιο φωτεινά από τη μια πλευρά (θετικές τιμές παραγώγου) και πιο σκοτεινά από την άλλη (αρνητικές τιμές παραγώγου).



**Σχήμα 3.1:** Παραδείγματα απλού και διπλού διαφορικού της συνάρτησης φωτεινότητας  $f(x, y)$  της εικόνας ως προς τη διεύθυνση των γραμμών  $x$ .

Το πλεονέκτημα των χωρικών φίλτρων δεύτερης παραγώγου έναντι των φίλτρων πρώτης παραγώγου έγκειται στη δυνατότητα εντοπισμού του σημείου μηδενισμού της συνάρτησης των διπλών διαφορών κι επομένως της ακριβούς θέσης της ακμής (Μερτίκας, 1999). Το αποτέλεσμα της εφαρμογής φίλτρων διπλού διαφορικού αποτελεί ουσιαστικά ένα μέτρο της καμπυλότητας της συνάρτησης των διπλών διαφορών (προσδιορισμός κοίλων και κυρτών καμπυλών). Η εναλλαγή των θετικών / αρνητικών προσήμων εκατέρωθεν μιας γράμμωσης (Σχήμα 3.1vi) έχει ως αποτέλεσμα τα γραμμικά χαρακτηριστικά να εμφανίζονται σκοτεινά στο μέσο (αρνητικές τιμές παραγώγου) και φωτεινά στις άκρες (θετικές τιμές παραγώγου) ή το ανάποδο.

Η κλίση (gradient operator) σε ένα σημείο  $(x,y)$  της εικόνας, ως προς τις δύο διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , προσδιορίζεται από το άθροισμα των μερικών παραγώγων κατά μήκος του άξονα,  $x$ , των γραμμών και κατά μήκος του άξονα,  $y$ , των στηλών. Το αποτέλεσμα αποτυπώνεται σε μια νέα εικόνα εξόδου όπου οι ακμές αφορούν στις υψηλές τιμές φωτεινότητας σε ένα σχετικά σκοτεινό υπόβαθρο.

Το μέτρο (magnitude) της κλίσης (ή της πρώτης παραγώγου) της συνάρτησης  $f(x, y)$  στη θέση  $(x,y)$  είναι:

$$\left\| \vec{\nabla} f \right\|_1 \cong \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \quad (3.7)$$

ή

$$\left\| \vec{\nabla} f \right\|_2 \cong \sqrt{\left( \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right)^2} \quad (3.8)$$

Στην πράξη συνήθως χρησιμοποιείται η πρώτη σχέση (3.7), επειδή η απόλυτη τιμή υπολογίζεται ευκολότερα.

Σε μια γειτονιά  $3 \times 3$ , οι μάσκες για τα ονομαζόμενα φίλτρα Prewitt (φίλτρα πρώτης παραγώγου) είναι:

$$\mathbf{W}_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{W}_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης  $f(x,y)$  ή αλλιώς τελεστής Laplace στο σημείο  $(x,y)$  ορίζεται από τη σχέση:

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2} \quad (3.10)$$

Για διακριτές συναρτήσεις η (3.10) προσεγγίζεται ως εξής:

$$\frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} \cong f(x+1,y) + f(x-1,y) - 2f(x,y) \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2} \cong f(x,y+1) + f(x,y-1) - 2f(x,y) \quad (3.12)$$

με αποτέλεσμα,

$$\nabla^2 f(x,y) \cong f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1) - 4f(x,y) \quad (3.13)$$

Το αποτέλεσμα της μπορεί να είναι είτε ένας θετικός είτε ένας αρνητικός αριθμός. Υπάρχουν διάφορες επιλογές για τη σύνθεση της μάσκας στο φίλτρο Laplace:

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Σημειώνεται ότι τα φίλτρα Laplace αν και ανταποκρίνονται σε απότομες μεταβολές είναι ευαίσθητα στον θόρυβο της εικόνας και συχνά δημιουργούν ένα φαινόμενο διπλών ακμών κατά την εφαρμογή τους (Μερτίκας, 1999).

### 3.5 Ενίσχυση με τη χρήση πολλαπλών καναλιών πολυφασματικών εικόνων

Η καταγραφή σε περισσότερα από ένα φασματικά κανάλια δίδει στον χρήστη τη δυνατότητα να προχωρήσει σε μετασχηματισμούς των αρχικών πολυδιάστατων δεδομένων και τη δημιουργία νέων συνιστωσών (εικόνων) με σαφώς ενισχυμένα και ευδιάκριτα χαρακτηριστικά.

#### 3.5.1 Αριθμητικές πράξεις

Η επιλογή της αριθμητικής πράξης μεταξύ των τιμών των εικονοστοιχείων δύο ή και περισσότερων καναλιών δεν είναι αυθαίρετη. Εξαρτάται πάντα από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Έτσι:

- Η πρόσθεση μεταξύ των τιμών δύο ή περισσότερων καναλιών συντελεί συνήθως στη μείωση του θορύβου. Είναι επίσης δυνατό να καθοριστεί και ένα ποσοστό (%) με το οποίο η κάθε συνιστώσα θα συμβάλει στη διαμόρφωση της νέας εικόνας (π.χ., 20% - 80%, 50% - 50% κοκ.).

- Όταν σκοπός της ανάλυσης είναι ο καθορισμός του βαθμού των αλλαγών που έχει επέλθει π.χ., μεταξύ δύο εικόνων διαφορετικής ημερομηνίας λήψης, η πράξη που ενδείκνυται είναι η αφαίρεση. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης μπορεί να είναι είτε ένας θετικός είτε ένας αρνητικός αριθμός. Η ορθή απόδοση της φυσικής σημασίας του αρνητικού/θετικού αποτελέσματος είναι καθοριστική για τη φωτοερμηνεία και τη μετέπειτα ανάλυση του προϊόντος της αφαίρεσης.
- Ο πολλαπλασιασμός για παράδειγμα μιας εικόνας με τον εαυτό της δηλαδή,  $DN_G = (DN_F)^2$ , αποσκοπεί στην απόδοση περισσότερης ραδιομετρικής λεπτομέρειας εντός των φωτεινών περιοχών της.
- Η διαίρεση των ψηφιακών τιμών ενός φασματικού καναλιού με τις αντίστοιχες τιμές σε ένα άλλο κανάλι δύναται να αναδείξει την πραγματική φασματική απόκριση των χαρακτηριστικών του εδάφους, εξομαλύνοντας τις επιδράσεις της τοπογραφίας (έντονες σκιάσεις).

Γίνεται σαφές ότι στα πλαίσια της επεξεργασίας μιας ψηφιακής πολυφασματικής εικόνας μπορούν να υλοποιηθούν και πιο πολύπλοκες αριθμητικές πράξεις, ανάμεσα σε περισσότερα από δύο φασματικά κανάλια.

### 3.5.2 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών

Η Ανάλυση των Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis, PCA) αφορά σε ένα γραμμικό μετασχηματισμό των αρχικών δεδομένων με βάση τον πίνακα μεταβλητότητας–συμμεταβλητότητας των πρωτογενών εικόνων. Μια βασική εφαρμογή της μεθόδου είναι η μείωση του αριθμού,  $p$ , των αρχικών καναλιών μιας πολυφασματικής εικόνας  $\mathbf{X}$ , σε  $q$  νέες συνιστώσες που θα χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάλυση.

Με το μετασχηματισμό προσδιορίζεται ένα νέο σύστημα ορθογώνιων μεταξύ τους αξόνων, στο οποίο τα δεδομένα που προκύπτουν είναι στατιστικώς ασυσχέτιστα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να αποκαλυφθούν σχέσεις που δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές στα πρωτογενή δεδομένα.

Οι κύριες συνιστώσες είναι συνάρτηση των ιδιοτιμών,  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots, q$ ) και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων  $\vec{e}_i$  που προκύπτουν από τον πίνακα διασποράς  $\Sigma_{\mathbf{X}}$  (ή

πίνακα μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας) των αρχικών εικόνων,  $p$ . Η συνολική διασπορά που υπάρχει στα δεδομένα προσεγγίζεται από το άθροισμα των ιδιοτιμών,  $\lambda_i$ , των κύριων συνιστωσών ή αλλιώς «ίχνος» (trace) του πίνακα διασποράς  $\Sigma_x$ :

$$\text{trace}(\Sigma_x) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_q \quad (3.15)$$

Η πρώτη κύρια συνιστώσα (PC1) εκφράζει το μεγαλύτερο ποσοστό της διασποράς (συνεπώς και το μεγαλύτερο ποσοστό της πληροφορίας). Ακολουθούν η δεύτερη, η τρίτη κοκ., έτσι ώστε:

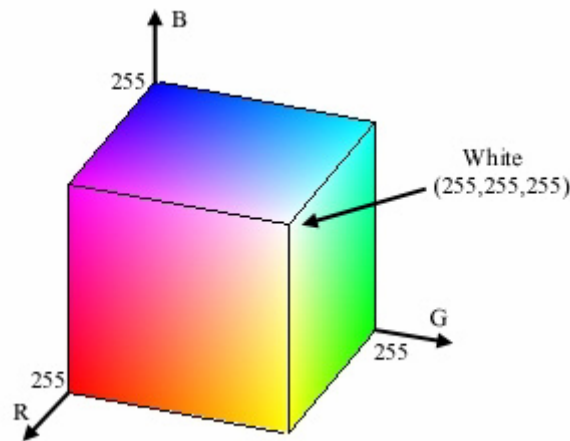
$$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_q \quad (3.16)$$

Σημειώνεται ότι οι πολύπλοκοι μαθηματικοί υπολογισμοί που λαμβάνουν χώρα στα πλαίσια της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών βασίζονται στην Άλγεβρα Πινάκων και την Πολυδιάστατη Στατιστική (Μερτίκας, 1999). Μια ποσοτική περιγραφή της μεθόδου είναι πέρα από τους στόχους της παρούσας εργασίας. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία (Johnson & Wichern, 1982).

### 3.5.3 Δημιουργία σύνθετων ψευδοχρωματικών εικόνων

Οι ψηφιακές εικόνες συχνά απεικονίζονται μέσω προσθετικών έγχρωμων εικόνων, χρησιμοποιώντας τα τρία πρωτεύοντα χρώματα δηλαδή, το ερυθρό, το πράσινο και το ιώδες.

Το κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύεται από ένα τρισδιάστατο διάνυσμα το οποίο βρίσκεται μέσα στον χρωματικό κύβο RGB (Σχήμα 3.2). Το διάνυσμα από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων του κύβου μέχρι την απέναντι γωνία είναι γνωστό ως η γκρίζα γραμμή. Πάνω σε αυτό το διάνυσμα οι ψηφιακές τιμές έχουν ίσες συνιστώσες του ερυθρού, του πράσινου και του ιώδους κι επομένως εμφανίζεται γκρίζο.



Σχήμα 3.2: Το χρωματικό μοντέλο RGB (από Erdas, 2001).

Οι ψευδοχρωματικές απεικονίσεις της Τηλεπισκόπησης αν και δεν ανταποκρίνονται στα πραγματικά χρώματα των αντικειμένων στην επιφάνεια της Γης διευκολύνουν τη φωτοερμηνεία της υπό μελέτη περιοχής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού είναι σαφώς μεγαλύτερη όταν η φασματική πληροφορία αποδίδεται με χρώματα από ότι όταν απεικονίζεται με τις διάφορες διαβαθμίσεις του τόνου του γκρι.

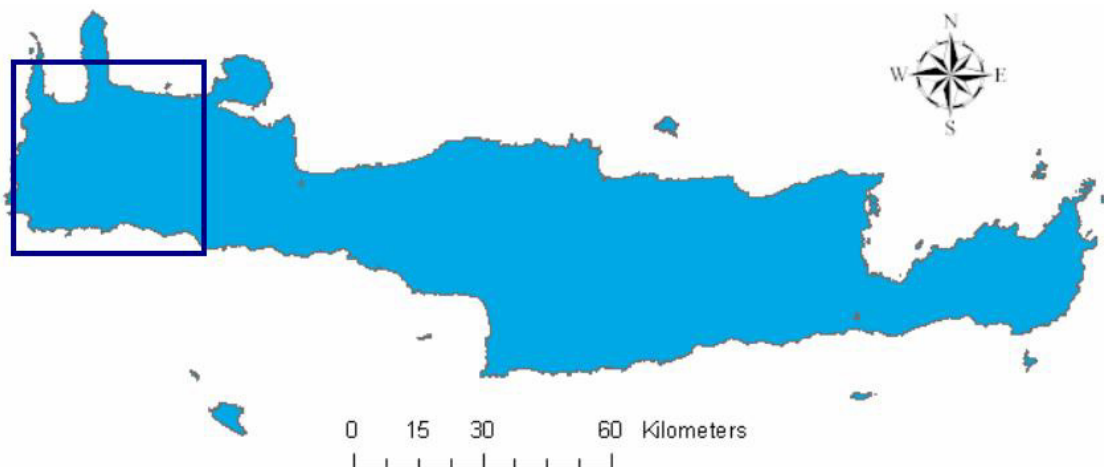
Στις προηγούμενες παραγράφους, υποδείχθηκε ένα υποσύνολο των τεχνικών επεξεργασίας μιας ψηφιακής εικόνας. Οι τεχνικές αυτές αφορούν σε μετασχηματισμούς που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο της εικόνας και εφαρμόστηκαν συνδυαστικά για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής (Κεφάλαιο 4). Υπάρχει και μια δεύτερη κατηγορία ενισχύσεων που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο των συχνοτήτων της εικόνας. Πρόκειται για τους μετασχηματισμούς κατά Fourier. Λόγω του αριθμού και της πολυπλοκότητας των υπολογισμών που απαιτούνται στο πεδίο των συχνοτήτων, η ανάλυση των δορυφορικών εικόνων στην παρούσα εργασία περιορίστηκε στο πεδίο της εικόνας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Στο Κεφάλαιο αυτό, αναλύονται τα επί μέρους στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την ανάδειξη των ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη, με τη βοήθεια δορυφορικών εικόνων ASTER. Εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους η επεξεργασία περιορίστηκε σε επιλεγμένα φασματικά κανάλια, βάσει των φασματικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν οι υδάτινες μάζες και η βλάστηση κατά την αλληλεπίδρασή τους με την ακτινοβολία.

### 4.1 Δεδομένα

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής χρησιμοποιήθηκαν τα πολυφασματικά δεδομένα του συστήματος ASTER (Πίνακας 4.1). Όπως φαίνεται με γαλάζιο χρώμα στο Σχήμα 4.1, η εν λόγω πολυφασματική εικόνα απεικονίζει το μεγαλύτερο τμήμα της Δυτικής Κρήτης.



**Σχήμα 4.1:** Περιοχή μελέτης. Εμπεριέχεται στο ορθογώνιο του αριστερού τμήματος του Σχήματος.

**Πίνακας 4.1.** Δεδομένα

|  |   |
|--|---|
| <b>Δορυφόρος</b>                               | TERRA   |
| <b>Σύστημα καταγραφής</b>                      | ASTER   |
| <b>Granule ID</b>                              | SC:AST_L1B.003:2007878534   |
| <b>Local Granule ID</b>                        | ast_l1b_003_06042002091845_08192002090412                                       |
| <b>Συντεταγμένες κέντρου λήψης</b>             | 35.29N / 23.55E   |
| <b>Ημερομηνία λήψης</b>                        | 4 ΙΟΥΝΙΟΥ 2002  |
| <b>Ωρα λήψης</b>                               | 09:18:45  |
| <b>Επίπεδο επεξεργασίας<br/>(Type of data)</b> | L1B   |
| <b>Αζιμούθιο Ηλίου</b>                         | 127°, 634   |
| <b>Γωνία ύψους Ηλίου</b>                       | 71°, 018799999  |
| <b>Ποσοστό νεφοκάλυψης</b>                     | 0%  |
| <b>Χαρτογραφική απεικόνιση</b>                 | Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή<br>(Universal Transverse Mercator ή UTM) |
| <b>Μέθοδος Συνόρθωσης</b>                      | Κυβική παρεμβολή  |

Οι αρχικές εικόνες, για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR, μαζί με τα αντίστοιχα ιστογράμματα, τα μεγέθη θέσης (μέση τιμή, διάμεσος τιμή, μέγιστη/ελάχιστη τιμή, κορυφή) και τα μεγέθη διασποράς των κατανομών (διασπορά, τυπική απόκλιση) παρατίθενται στο Παράρτημα.

## 4.2 Μεθοδολογία

Τα επιμέρους στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τον εντοπισμό των ρηγμάτων, συνοψίζονται ως εξής:

**☑ Επιλογή φασματικών καναλιών, βάσει των φασματικών ταυτοτήτων των υδάτινων μαζών και της βλάστησης.**

Το μέγεθος/όγκος των ψηφιακών αρχείων που προκύπτουν από την επεξεργασία και αποθήκευση των δορυφορικών εικόνων είναι τεράστιος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το μέγεθος της πολυφασματικής εικόνας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή είναι 127 MB.

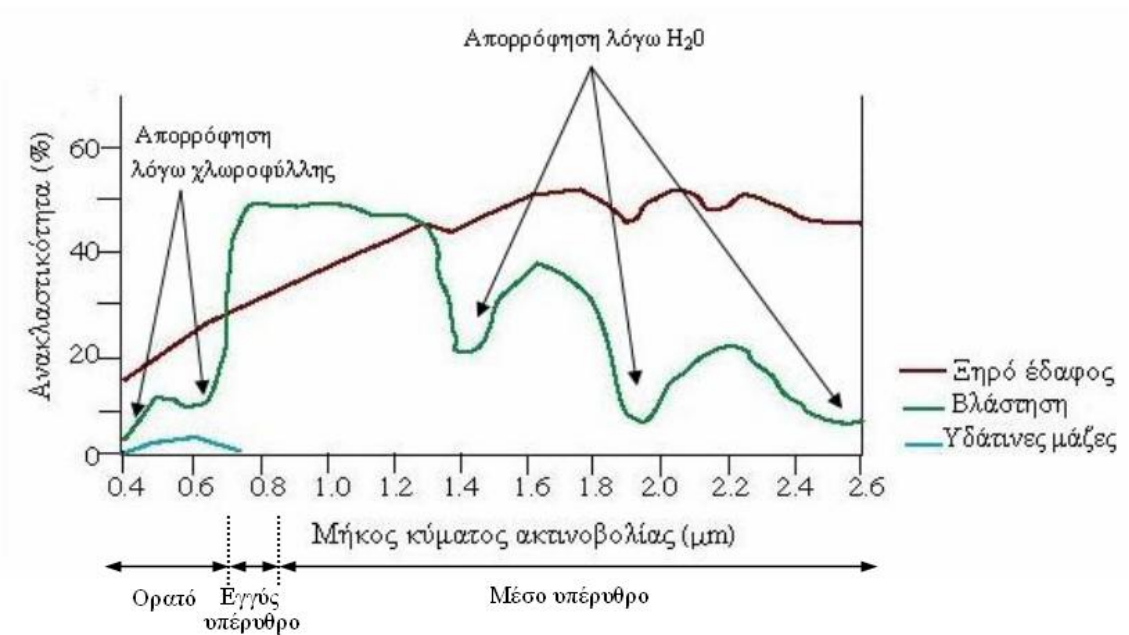
Η επιλογή των, κατάλληλων για περαιτέρω επεξεργασία, φασματικών καναλιών καθορίστηκε από τη σχέση της ρηξιγενούς τεκτονικής με το υδρογραφικό δίκτυο και τη βλάστηση (Ενότητα 2.4.1).

Κάθε καμπύλη του διαγράμματος στο Σχήμα 4.2, απεικονίζει το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας (κατακόρυφος άξονας) συναρτήσει του μήκους κύματος,  $\lambda$  (οριζόντιος άξονας), από τις υδάτινες μάζες, τη βλάστηση και το ξηρό (γυμνό) έδαφος. Προκύπτουν τα παρακάτω:

- 1) Υψηλή ανακλαστικότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τη βλάστηση, λόγω της χλωροφύλλης των φυτών, στο εγγύς υπέρυθρο (φασματικό κανάλι 3N, εύρος φασματικής καταγραφής 0,78-0,86  $\mu\text{m}$ ). Η βλάστηση εμφανίζει στις εικόνες υψηλές τιμές φωτεινότητας.
- 2) Απορρόφηση της ακτινοβολίας από τη βλάστηση (χαμηλές τιμές φωτεινότητας) στο ερυθρό τμήμα του ορατού φάσματος (φασματικό κανάλι 2, εύρος φασματικής καταγραφής 0,63-0,69  $\mu\text{m}$ ).
- 3) Απορρόφηση της ακτινοβολίας από το  $\text{H}_2\text{O}$  σε μήκος κύματος 1,9  $\mu\text{m}$ .
- 4) Απορρόφηση του υδροξυλίου ( $\text{OH}^\cdot$ ) σε μήκη κύματος 2,2 – 2,3  $\mu\text{m}$  (φασματικά κανάλια 6, 7, 8, 9 του ASTER).
- 5) Δυνατότητα διάκρισης της περιεχόμενης υγρασίας τόσο στη βλάστηση όσο και στο έδαφος, στην περιοχή του μέσου υπέρυθρου. Όσο περισσότερη είναι η περιεχόμενη

υγρασία τόσο πιο σκοτεινό εμφανίζεται το έδαφος στην εικόνα (αντίθεση μεταξύ υγρών/ξηρών εδαφών).

- 6) Η ακτινοβολία παρουσιάζει υψηλή (σχετικά) ανακλαστικότητα από το νερό σε μήκη κύματος 0,52-0,60  $\mu\text{m}$  (φασματικό κανάλι 1 του ASTER) και απορροφάται από τις υδάτινες μάζες στο εγγύς υπέρυθρο (κανάλι 3N). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στο κανάλι 1 το υγρό έδαφος να απεικονίζεται με υψηλότερους τόνους του γκρι από ότι στο κανάλι 3N, όπου εμφανίζεται αρκετά σκοτεινό.



**Σχήμα 4.2:** Φασματικές ταυτότητες υδατινών μαζών, βλάστησης και ξηρού εδάφους.

Συμπερασματικά, ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις ανάγκες της παρούσας εφαρμογής παρουσιάζουν τα κανάλια 3N (εγγύς υπέρυθρο), 2 (ερυθρό), 1 (πράσινο) καθώς και τα κανάλια του μέσου υπέρυθρου.

Η παράβλεψη των φασματικών καναλιών στο TIR οφείλεται στην ιδιαίτερα μικρή χωρική ανάλυση (90 m  $\times$  90 m) του συστήματος καταγραφής στη θερμική, υπέρυθρη περιοχή του φάσματος.

- ☒ Δημιουργία **χωρικών μασκών**, προκειμένου να απομονωθούν από το ιστόγραμμα της κάθε εικόνας οι ψηφιακές τιμές που αφορούν στη θάλασσα και να καταστεί έτσι εφικτή η επεξεργασία του τμήματος της εικόνας που αντιστοιχεί στην ξηρά.
- ☒ **Ανάλυση κύριων συνιστωσών** για τη δημιουργία νέων, σύνθετων εικόνων, καταλληλότερων για ερμηνεία, που να συνδυάζουν τη χωρική ανάλυση των καναλιών στο VNIR με τη φασματική ανάλυση στο SWIR.
- ☒ **Αριθμητικές πράξεις** μεταξύ των καναλιών.
- ☒ Εφαρμογή **χωρικών φίλτρων** για την ανάδειξη γραμμώσεων σε όλες αλλά και επιλεγμένες διευθύνσεις.
- ☒ **Επεξεργασία** και δυαδική κατάτμηση **φιλτραρισμένων εικόνων**.
- ☒ **Χαρτογραφική απεικόνιση εικόνων** στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87).
- ☒ Δημιουργία σύνθετης **ψευδοχρωματικής απεικόνισης** του πεδίου κατόπτρευσης για **φωτοερμηνεία**.
- ☒ **Αξιολόγηση γραμμώσεων ως ενδεχόμενα ρήγματα**, με τη βοήθεια των γεωλογικών χαρτών του ΙΓΜΕ.

Ακολουθεί εκτενής περιγραφή των επί μέρους σταδίων. Η επεξεργασία των ψηφιακών εικόνων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των λογισμικών προγραμμάτων ERDAS Imagine V8.7, Matlab R13 και ArcView 8x.

#### **4.2.1 Μετατροπή δεδομένων σε ERDAS format (.img)**

Στο πρώτο στάδιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε η μετατροπή των δεδομένων από EOS format (.hdf) σε ERDAS format (.img), έτσι ώστε η επεξεργασία τους να μπορεί να πραγματοποιηθεί με το διαθέσιμο λογισμικό ERDAS.

#### 4.2.2 Δημιουργία χωρικών масκών

Το στάδιο αυτό περιελάμβανε τη δημιουργία **χωρικών масκών** (μία για τα κανάλια του VNIR και μία για τα κανάλια του SWIR) προκειμένου να απομονωθούν από το ιστόγραμμα της εικόνας οι ψηφιακές τιμές που αφορούσαν στη θάλασσα και να καταστεί έτσι εφικτή η επεξεργασία του τμήματος που αντιστοιχεί στην ξηρά.

Η ιδέα βασίστηκε στο γεγονός ότι ένα μεγάλο μέρος της αρχικής εικόνας καλύπτεται από θάλασσα και επομένως ο μεγάλος αριθμός των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν στη θάλασσα θα επηρεάσει το ιστόγραμμα της εικόνας. Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές του νερού στην ξηρά είναι επιθυμητές δεδομένου ότι η γραμμική συγκέντρωση υγρασίας υποδεικνύει πιθανή θέση ρήγματος.

Οι χωρικές μάσκες δημιουργήθηκαν με ψηφιοποίηση (on screen digitizing) της ακτογραμμής και τη δυαδική κατάτμηση των εικόνων έτσι ώστε:

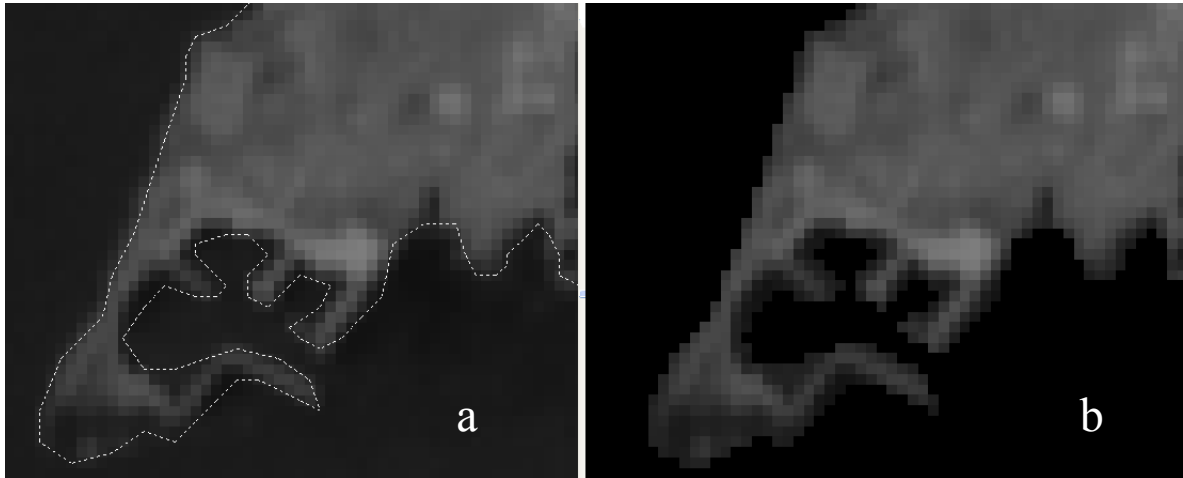
$$N(x, y) = f(x, y) \times h(x, y) \quad (4.1)$$

όπου:

$N(x, y)$ : εικόνα εξόδου (μετά την εφαρμογή της χωρικής μάσκας  $h(x, y)$ )

$f(x, y)$ : εικόνα εισόδου

$$h(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{για την περιοχή της εικόνας που αφορά στη θάλασσα} \\ 1, & \text{για την περιοχή της εικόνας που καλύπτεται από ξηρά} \end{cases}$$



**Σχήμα 4.3:** α) Ψηφιοποίηση της ακτογραμμής (διακεκομμένη γραμμή) επί της οθόνης. β) Εικόνα μετά την εφαρμογή της χωρικής μάσκας.

#### 4.2.3 Ανάλυση κύριων συνιστωσών

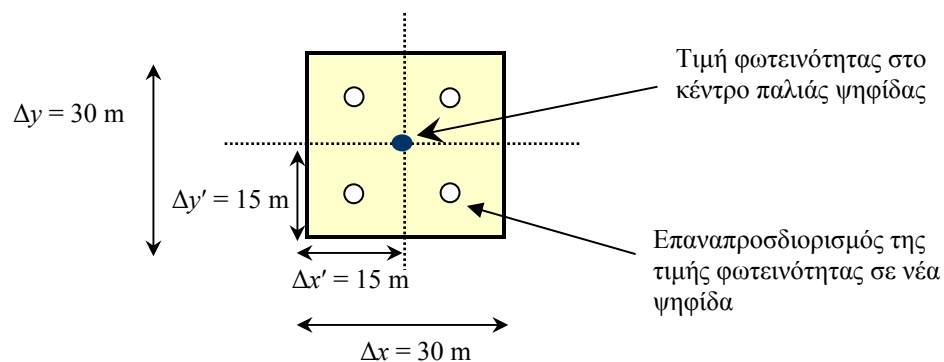
Σκοπός της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών ήταν να εξηγήσει τη δομή του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας,  $\Sigma x$ , των πρωτογενών δεδομένων μέσω γραμμικών συνδυασμών των αρχικών μεταβλητών. Ειδικότερα η PCA έλαβε χώρα για:

- i) Όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR, προκειμένου να δημιουργηθούν νέες, στατιστικώς ασυσχέτιστες εικόνες που να συνδυάζουν την υψηλή χωρική ανάλυση ( $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ ) στα κανάλια του VNIR με την υψηλή φασματική δειγματοληψία στα κανάλια του μέσου υπερύθρου (SWIR).
- ii) Όλα τα φασματικά κανάλια του SWIR, με σκοπό τον υπολογισμό μίας συνιστώσας (PC1) που θα εκφράζει το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής μεταβλητότητας στα κανάλια του μέσου υπερύθρου. Υπενθυμίζεται ότι τα δεδομένα από το μέσο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος εμφανίζουν έντονες αντιθέσεις μεταξύ των υγρών/ξηρών εδαφών.
- iii) Επιλεγμένα κανάλια του VNIR και SWIR, για τα οποία η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τις υδάτινες μάζες και τη βλάστηση παρουσιάζει ενδιαφέρον (Ενότητα 4.2). Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκαν τα:

- 1) Κανάλι 1, λόγω της (σχετικά) υψηλής ανακλαστικότητας της ακτινοβολίας από τις υδάτινες μάζες.
- 2) Κανάλι 3N, λόγω της απορρόφησης της ακτινοβολίας από τις υδάτινες μάζες και της υψηλής ανακλαστικότητας από τη βλάστηση.
- 3) Κανάλι 8. Η επιλογή του τελευταίου οφείλεται στην απορρόφηση του υδροξυλίου ( $\text{OH}^-$ ) στην περιοχή 2,2 – 2,3  $\mu\text{m}$  του φάσματος (φασματικό εύρος καταγραφής κατά προσέγγιση από το εν λόγω κανάλι, Πίνακας 2.3). Λόγω της υψηλής συσχέτισης των καναλιών του SWIR (Κεφάλαιο 5, Πίνακας 5.1), η επιλογή του 6<sup>ου</sup> ή του 7<sup>ου</sup> καναλιού έναντι του 8<sup>ου</sup> που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν, δεν θα δημιουργούσε ουσιαστική διαφοροποίηση στα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Για την υλοποίηση των εν λόγω μετασχηματισμών επισημαίνονται τα εξής:

- 1) Λόγω της διαφορετικής χωρικής ανάλυσης στα κανάλια του VNIR (15 m  $\times$  15 m) και SWIR (30 m  $\times$  30 m), κρίθηκε σκόπιμο να επαναληφθεί η διαδικασία της δειγματοληψίας (resampling) για τα κανάλια 4, 5, 6, 7, 8 και 9. Κάθε εικονοστοιχείο διαστάσεων  $\Delta x = \Delta y = 30$  m διαιρέθηκε σε τέσσερα (4) νέα εικονοστοιχεία, ορίζοντας με αυτό τον τρόπο το νέο διάστημα δειγματοληψίας  $\Delta x' = \Delta y' = 15$  m (Σχήμα 4.4).



**Σχήμα 4.4:** Επανάληψη δειγματοληψίας για τα κανάλια του SWIR.

Ο προσδιορισμός των τιμών φωτεινότητας στις ψηφίδες της προκύπτουσας εικόνας πραγματοποιήθηκε με πολυωνυμική παρεμβολή 3<sup>ου</sup> βαθμού (cubic spline interpolation). Για περισσότερες λεπτομέρειες όσον αφορά στη συγκεκριμένη μέθοδο, ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία (Matlab, 2002).

Επιπροσθέτως, οι αντιθέσεις μεταξύ των τιμών των εικονοστοιχείων στις αρχικές εικόνες ήταν πολύ μικρές και οι υφιστάμενες διαφορές δυσδιάκριτες (Παράρτημα). Προκειμένου η PCA να λάβει χώρα μεταξύ καναλιών που εμφανίζουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διασπορά (άρα και πληροφορία) πραγματοποιήθηκε ενίσχυση των αντιθέσεων στις εικόνες του VNIR και SWIR (μετά από επαναδειγματοληψία) με γραμμική επέκταση του ιστογράμματος (linear contrast stretching). Με αυτό τον τρόπο οι αρχικά παρατηρούμενες  $DN_{min}$  και  $DN_{max}$  (Πίνακας 4.2) προσαρμόστηκαν σε όλο το εύρος των 256 διαβαθμίσεων του τόνου του γκρι (Ενότητα 3.3.1). Για το φασματικό κανάλι VNIR 1, επί παραδείγματι, το αρχικό εύρος διακύμανσης των τιμών  $[DN_{min}, DN_{max}] = [53, 174]$  (Πίνακας 4.2) μετασχηματίστηκε, με διάταση (τέντωμα) του ιστογράμματος, στην κλίμακα  $[0, 255]$ .

Η επιλογή των ορίων αποκοπής,  $DN_{min}$  και  $DN_{max}$ , που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2, βασίστηκε στην ιδιαίτερα μικρή συχνότητα εμφάνισης αυτών στα ιστογράμματα των αντίστοιχων εικόνων (Παράρτημα).

**Πίνακας 4.2:** Όρια αποκοπής για τη γραμμική ενίσχυση των αντιθέσεων στις εικόνες.

| Υποσύστημα<br>καταγραφής | Διάυλος | Φασματική<br>διαχωριστική<br>ικανότητα (μm) | Ελάχιστη τιμή<br>( $DN_{min}$ ) | Μέγιστη τιμή<br>( $DN_{max}$ ) |
|--------------------------|---------|---|---------------------------------|--------------------------------|
| VNIR                     | 1       | 0,52-0,60                                   | 53                              | 174                            |
|                          | 2       | 0,63-0,69                                   | 28                              | 158                            |
|                          | 3N      | 0,78-0,86                                   | 48                              | 143                            |
| SWIR                     | 4       | 1,60-1,70                                   | 25                              | 111                            |
|                          | 5       | 2,145-2,185                                 | 25                              | 90                             |
|                          | 6       | 2,185-2,225                                 | 20                              | 101                            |
|                          | 7       | 2,235-2,285                                 | 21                              | 91                             |
|                          | 8       | 2,295-2,365                                 | 18                              | 90                             |
|                          | 9       | 2,360-2,430                                 | 21                              | 88                             |

#### 4.2.4 Αριθμητικές πράξεις μεταξύ καναλιών

Βάσει των παρατηρήσεων που αφορούν στην αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τη βλάστηση και τις υδάτινες μάζες πραγματοποιήθηκαν οι εξής μαθηματικοί υπολογισμοί:

i. Αφαίρεση των τιμών των εικονοστοιχείων στα δύο κανάλια της (σχετικής) μέγιστης/ελάχιστης απορρόφησης της ακτινοβολίας από τις υδάτινες μάζες και τη βλάστηση (φασματικά κανάλια 1 και 3N). Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε αφαίρεση των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων του καναλιού 3N από τις τιμές φωτεινότητας των αντίστοιχων εικονοστοιχείων του καναλιού 1. Στην προκύπτουσα εικόνα, η επιφανειακή υγρασία σχετίζεται με  $DN > 0$  ενώ η βλάστηση αφορά σε  $DN < 0$ .

Υπενθυμίζουμε ότι η οθόνη δύναται να απεικονίσει τις τιμές εξόδου στην κλίμακα 0-255 (είτε πρόκειται για θετικούς είτε για αρνητικούς αριθμούς). Κατά συνέπεια, τα χαρακτηριστικά της εικόνας με  $DN < 0$  (μεταξύ άλλων και η βλάστηση) εμφανίζονται σκοτεινά ενώ η υγρασία του εδάφους εμφανίζεται σαφώς πιο φωτεινή (υψηλές τιμές του τόνου του γκρι).

- ii. Λόγος μεταξύ των τιμών των εικονοστοιχείων για τα δεδομένα από το εγγύς υπέρυθρο (υψηλή ανακλαστικότητα της ακτινοβολίας από τη βλάστηση) και ερυθρό φάσμα (απορρόφηση ακτινοβολίας από τη βλάστηση) δηλαδή:

$$DN_G = \frac{DN_{\text{Κανάλι3N}}}{DN_{\text{Κανάλι2}}} \quad (4.2)$$

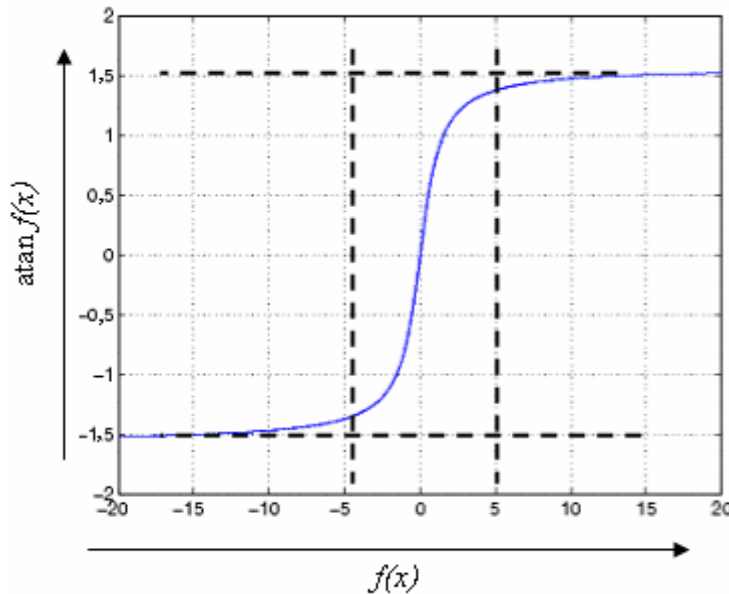
Ο λόγος των τιμών των εικονοστοιχείων μεταξύ δύο φασματικών καναλιών δίδει εσφαλμένα αποτελέσματα αν δεν προηγηθούν οι απαραίτητες ατμοσφαιρικές διορθώσεις. Η ατμοσφαιρική διόρθωση στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο φάσμα της ακτινοβολίας αποτελεί συχνά σοβαρό και πολύπλοκο θέμα (Μερτίκας, 1999). Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε μια καθολική ατμοσφαιρική διόρθωση στα κανάλια 3N και 2, η οποία είναι γνωστή ως η μέθοδος των σκοτεινών στόχων (dark pixel subtraction).

Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι οι υδάτινες μάζες απορροφώνται πλήρως από το υπέρυθρο τμήμα της ακτινοβολίας. Θα περίμενε, λοιπόν, κανείς τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν στη θάλασσα να έχουν τιμές φωτεινότητας κοντά στο μηδέν ( $DN \cong 0$ ). Εξαιτίας όμως της επίδρασης της ατμόσφαιρας, τα εν λόγω εικονοστοιχεία έχουν συνήθως  $DN \gg 0$ .

Για τη διόρθωση των εικόνων 3N και 2 (εξίσωση 4.2), λόγω των ατμοσφαιρικών επιδράσεων, προσδιορίστηκε από το ιστόγραμμα της πρωτογενούς εικόνας 3N η τιμή διαχωρισμού της θάλασσας από την ξηρά δηλαδή,  $DN = 33$ . Η εν λόγω τιμή αφαιρέθηκε από τις τιμές φωτεινότητας για κάθε ψηφίδα της εικόνας 3N έτσι ώστε στην εικόνα εξόδου τα εικονοστοιχεία που αφορούν στις υδάτινες μάζες να έχουν  $DN \cong 0$ . Η ίδια τιμή αφαιρέθηκε και από τις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων στο κανάλι 2 (ερυθρό).

Το εύρος των τιμών φωτεινότητας που προκύπτει από το λόγο των τιμών του τόνου του γκρι είναι πολύ μικρό και περιορίζεται στην περιοχή πλησίον του μηδενός. Σύμφωνα με τον Faust (1992) καλύτερα οπτικά αποτελέσματα επιτυγχάνονται με τον υπολογισμό της αντίστροφης της εφαπτομένης (arctangent ή atan) του λόγου μεταξύ των τιμών των εικονοστοιχείων (Erdas, 2001).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5, η συνάρτηση atan έχει την ιδιότητα να ενισχύει τις ψηφιακές τιμές στο κέντρο του ιστογράμματος σε ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών από εκείνο που θα προέκυπτε με τον υπολογισμό των απλών λόγων.



**Σχήμα 4.5:** Η συνάρτηση της αντίστροφης της εφαπτομένης (από Matlab, 2002 – τροποποιημένο).

- ☑ Συμπίεση τιμών στα άκρα (τιμές [-20, -5] και [5, 20] στον οριζόντιο άξονα) σε μικρότερο εύρος τιμών ([-2, -1,5] και [1,5, 2] αντίστοιχα στον κατακόρυφο άξονα).
- ☑ Ενίσχυση τιμών στο κέντρο (τιμές [-5, 5] στον οριζόντιο άξονα) σε μεγαλύτερο εύρος τιμών [-1,5, 1,5] στον κατακόρυφο άξονα.

Στα πλαίσια της εργασίας, με βάση όσα αναπτύχθηκαν παραπάνω, δημιουργήθηκε η εικόνα  $H$  (μετά τις απαιτούμενες ατμοσφαιρικές διορθώσεις για τα κανάλια 3N και 2):

$$DN_H = \text{atan} \left( \frac{DN_{\text{Κανάλι3N}}}{DN_{\text{Κανάλι2}}} \right) \quad (4.3)$$

Οι υψηλές τιμές φωτεινότητας αφορούν στη βλάστηση (για τον επίμαχο στόχο ισχύει  $DN_{\text{Κανάλι3N}} > DN_{\text{Κανάλι2}}$ ), ενώ οι χαμηλές τιμές φωτεινότητας αφορούν στις υδάτινες μάζες ( $DN_{\text{Κανάλι3N}} < DN_{\text{Κανάλι2}}$ ).

#### 4.2.5 Εφαρμογή χωρικών φίλτρων

Καθότι η διακριτική ικανότητα του συστήματος καταγραφής του ASTER φτάνει τα 15 m στο VNIR και μόλις τα 30 m στο SWIR, είναι εκ των προτέρων αδύνατο να εντοπισθούν στην εικόνα ρήγματα μήκους ή πλάτους < 15 m (Ενότητα 2.4.1). Συνεπώς, η επιλογή των κατάλληλων χωρικών φίλτρων πρέπει να γίνει μεταξύ πινάκων μικρών διαστάσεων (3×3). Μεγαλύτερων διαστάσεων πίνακες (π.χ., 5×5, 7×7) προτιμώνται για χαρακτηριστικά όπως είναι τα φαράγγια, οι μεγάλοι υδροκρίτες και γενικά δομές των οποίων οι διαστάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες του ενός εικονοστοιχείου.

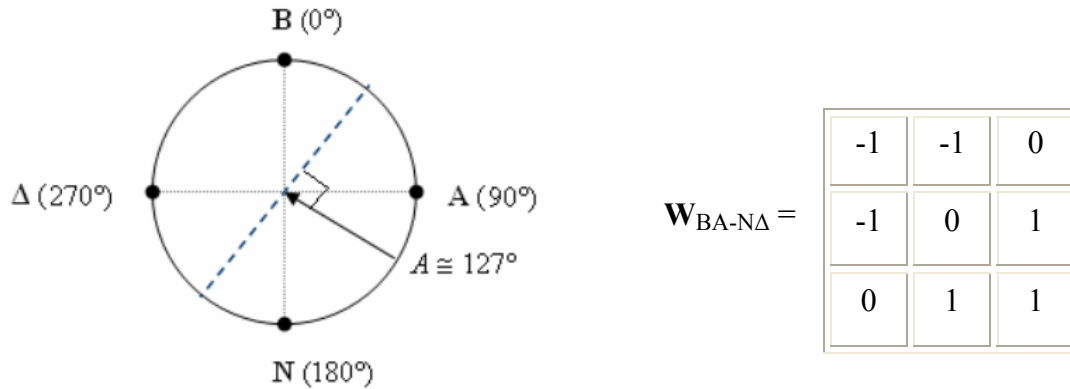
##### Φίλτρα διευθύνσεων

Όπως έχει προκύψει από παλαιότερες μελέτες τόσο με παραδοσιακές μεθόδους χαρτογράφησης (Φυτρολάκης, 1980) όσο και με τη βοήθεια δορυφορικών δεδομένων Landsat (Stefouli & Angelopoulos, 1990), η ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Κρήτης χαρακτηρίζεται κυρίως από δύο συστήματα ρηγμάτων με διευθύνσεις: 1) Ανατολή-Δύση και 2) Βορρά-Νότο. Για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο να εφαρμοστούν φίλτρα ενίσχυσης των ακμών ως προς τις συγκεκριμένες διευθύνσεις (Σχήμα 4.6).

$$\mathbf{W}_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{W}_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

**Σχήμα 4.6:** Μάσκες 3×3 για την ενίσχυση των γραμμώσεων διευθύνσεως Βορρά-Νότου (αριστερά) και Ανατολής-Δύσης (δεξιά).

Δεδομένου ότι το αζιμούθιο του Ηλίου τη στιγμή της λήψης της εικόνας ήταν  $A = 127^\circ$ , εφαρμόστηκε φίλτρο ενίσχυσης των, κάθετων στη διεύθυνση φωτισμού, γραμμώσεων δηλαδή, Βορειοανατολικής - Νοτιοδυτικής διεύθυνσεως (Σχήμα 4.7).



**Σχήμα 4.7:** Αριστερά: Με τη μπλε διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύεται η διεύθυνση των γραμμώσεων που, κυρίως, θα ενισχυθούν βάσει της θέσης του Ηλίου ( $A = 127^\circ$ ) Δεξιά: Μάσκα για την ενίσχυση των γραμμώσεων Βορειοανατολικής - Νοτιοδυτικής διεύθυνσεως (BA-NΔ).

### Φίλτρα δεύτερης παραγωγού

Στα πλαίσια της εργασίας εφαρμόστηκε φίλτρο Laplace για την ανάδειξη των γραμμώσεων ως προς όλες τις διευθύνσεις (Σχήμα 4.8).

$$L_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

**Σχήμα 4.8:** Μάσκα για την εφαρμογή φίλτρου Laplace.

### **Φίλτρα πρώτης παραγώγου ως προς τις δύο διευθύνσεις x και y**

Καθότι η πρώτη παράγωγος (gradient operator) στις δύο διευθύνσεις x και y αποτελεί ουσιαστικά το μέτρο του διανύσματος της κλίσης σε κάθε εικονοστοιχείο (μικρές ή μεγάλες μεταβολές των τιμών φωτεινότητας) πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω:

1. Υπολογισμός του μέτρου της κλίσης ( $\|\nabla f\|$ ) με τη βοήθεια των φίλτρων Sobel:

$$\|\nabla f\| \cong \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (4.4)$$

Στην περίπτωση διακριτών συναρτήσεων, οι μάσκες για τα ονομαζόμενα φίλτρα Sobel είναι:

$$S_x = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array} \quad S_y = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -2 & 0 & 2 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} \quad (4.5)$$

Οι υψηλές τιμές φωτεινότητας στην εικόνα εξόδου αφορούν σε περιοχές όπου το μέτρο της κλίσης της παραγώγου είναι μεγάλο (απότομη μεταβολή των τιμών φωτεινότητας μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων). Οι ομοιόμορφες περιοχές (μηδενικό μέτρο κλίσης) αποδίδονται επί της οθόνης με  $DN = 0$ .

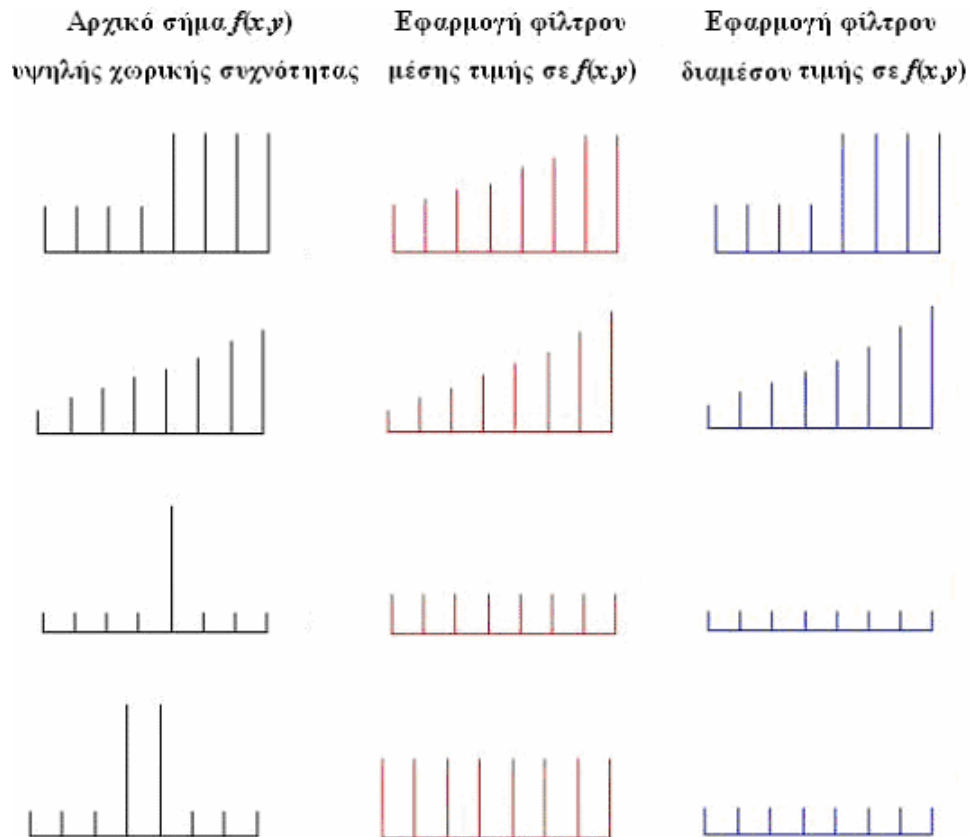
2. Αντιστροφή της φωτεινότητας στην φιλτραρισμένη εικόνα ( $DN_{\text{new}} = 255 - DN_{\text{old}}$ ). Σε ένα φωτεινό πλέον υπόβαθρο (ομοιόμορφες περιοχές) ο ανθρώπινος

οφθαλμός αντιλαμβάνεται καλύτερα τις διάφορες διαβαθμίσεις του τόνου του γκρίζου.

3. Πολλαπλασιασμός της προκύπτουσας εικόνας με τον εαυτό της για περαιτέρω ενίσχυση των ακμών δηλαδή,  $DN_G = (DN_F)^2$ .
4. Καθορισμός μιας τιμής κάτω από την οποία (λόγω αντιστροφής φωτεινότητας) θα αναδειχτούν οι ακμές της εικόνας που πιθανώς σχετίζονται με την τεκτονική της περιοχής.

### **Θόρυβος στις φιλτραρισμένες εικόνες**

Βάσει της θεωρίας, τα φίλτρα διαμέσου τιμής (median filters) αφαιρούν το σημειακό θόρυβο (Salt and Pepper noise) και διατηρούν τις ακμές της εικόνας (edge-preserving filters). Όμως, μαζί με το θόρυβο θαμπώνουν και τα γραμμικά χαρακτηριστικά μικρών διαστάσεων που μπορεί να σχετίζονται με ρήγματα της υπό μελέτη περιοχής (π.χ., διαστάσεων 1-2 pixels). Τα φίλτρα μέσης τιμής (mean filters) προκαλούν ακόμα μεγαλύτερη εξομάλυνση. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, ο κίνδυνος εξομάλυνσης των ακμών (στην προκειμένη περίπτωση των ρηγμάτων πολύ μικρού πλάτους) είναι μεγάλος και στις δύο περιπτώσεις. Για τους λόγους αυτούς φίλτρα εξομάλυνσης του θορύβου δεν εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



**Σχήμα 4.9:** Παραδείγματα εφαρμογής φίλτρων μέσης και διαμέσου τιμής σε χαρακτηριστικά υψηλών χωρικών συχνοτήτων (από Erdas, 2001).

#### 4.2.6 Επεξεργασία φιλτραρισμένων εικόνων

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε η σύνθεση του ιστογράμματος για κάθε φιλτραρισμένη εικόνα. Στη συνέχεια, μετά από πειραματισμούς, επιλέχθηκε μια τιμή αποκοπής που να προσδιορίζει ότι τα εικονοστοιχεία με τιμή φωτεινότητας μεγαλύτερη ή μικρότερη από εκείνη του ορίου αποκοπής αφορούν σε γραμμώσεις – ενδεχόμενες ρηξιγενείς δομές. Με αυτό τον τρόπο προέκυψαν εικόνες δυαδικής μορφής (0,1) όπου η τιμή ένα (1) δήλωνε τα χαρακτηριστικά υψηλών χωρικών συχνοτήτων.

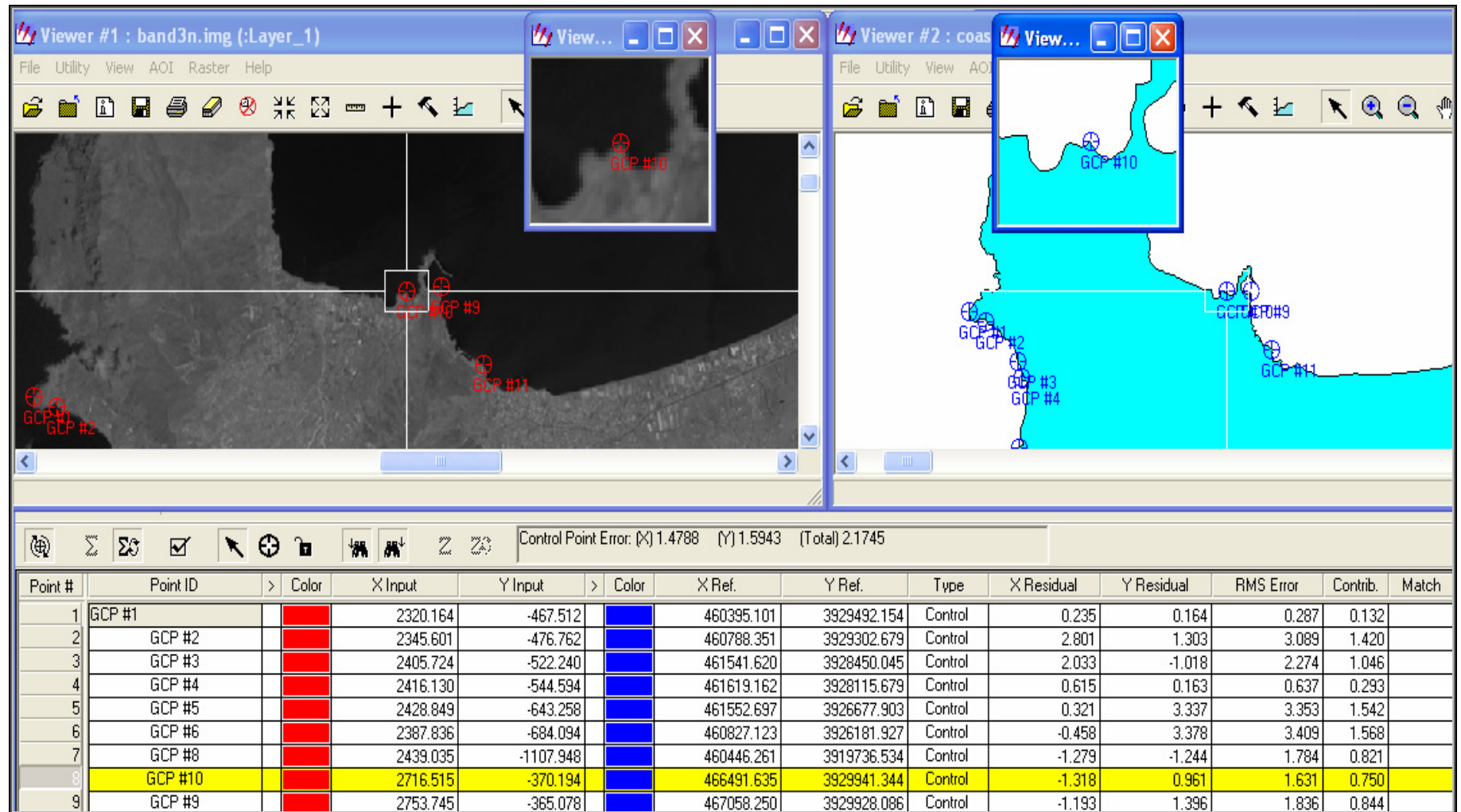
#### 4.2.7 Χαρτογραφική προβολή εικόνων σε ΕΓΣΑ '87

Η χαρτογραφική προβολή των εικόνων στο ΕΓΣΑ '87 κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί στα τελευταία στάδια της μελέτης, προκειμένου να αποφευχθεί ο μετασχηματισμός της θέσης και των τιμών φωτεινότητας των ψηφίδων, έως ότου ολοκληρωθεί η επεξεργασία των ψηφιακών εικόνων. Για τον προσδιορισμό των GCPs χρησιμοποιήθηκαν τα πρωτογενή δεδομένα από την περιοχή του εγγύς υπερύθρου (κανάλι 3N). Η επιλογή του συγκεκριμένου καναλιού οφείλεται στο ότι στο εγγύς υπέρυθρο, λόγω της απορρόφησης της ακτινοβολίας από τα νερά, ο διαχωρισμός της ξηράς από τη θάλασσα είναι ευδιάκριτος.

Για τη γεωμετρική αναγωγή χρησιμοποιήθηκε χάρτης της ακτογραμμής της νήσου της Κρήτης (κλίμακα 1:50.000, συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ'87). Ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων της εικόνας (αυθαίρετο σύστημα γραμμών και στηλών) στις συντεταγμένες του χάρτη (ΕΓΣΑ'87) πραγματοποιήθηκε με τον καθορισμό 52 σταθερών σημείων GCPs, ομοιόμορφα κατανεμημένων στα περιθώρια της εικόνας (Σχήμα 4.10). Η προσαρμογή της εικόνας στις γεωμετρικές ιδιότητες του χάρτη έγινε με πολυωνυμική προσέγγιση δευτέρου βαθμού. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα υπολογίστηκε αρχικά σε αριθμό εικονοστοιχείων και κατόπιν σε m ( $RMS \cong 2 \text{ pixel}$  ή  $RMS \cong 2 \times 15 \text{ m} = 30 \text{ m}$ ).

Ο επαναπροσδιορισμός των τιμών φωτεινότητας στις νέες θέσεις των ψηφίδων βασίστηκε στη μέθοδο του πλησιέστερου γειτονικού σημείου (nearest neighbor). Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου οφείλεται στο γεγονός ότι υπολογίζεται εύκολα και γρήγορα διατηρώντας παράλληλα τις αρχικές τιμές φωτεινότητας της εικόνας (Erdas Field Guide, 2001).

Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.



Σχήμα 4.10: Γεωμετρική αναγωγή εικόνας στο ΕΓΣΑ'87 με τη βοήθεια του λογισμικού Erdas.

Στο σημείο αυτό θεωρείται σκόπιμο να γίνουν δύο επισημάνσεις:

1) Όταν είναι γνωστή η απόσταση δύο σημείων στον χάρτη και η αντίστοιχη απόσταση στην επιφάνεια της Γης είναι δυνατόν να υπολογισθεί η κλίμακα του χάρτη βάσει της σχέσης:

$$\frac{1}{K} = \frac{A_X}{A_T} \quad (4.6)$$

όπου:

$K$ : Κλίμακα χάρτη

$A_X$ : απόσταση δύο σημείων στον χάρτη

$A_T$ : αντίστοιχη απόσταση σημείων στην επιφάνεια της Γης

Έστω ότι το γραφικό σφάλμα στον χάρτη είναι της τάξης των 0,5 mm. Κατά τη γεωμετρική αναγωγή των εικόνων είναι θεμιτό η τιμή του οριζοντιογραφικού σφάλματος,  $RMS$ , να μην ξεπερνά τις διαστάσεις του 1/2 του εικονοστοιχείου. Στην προκειμένη περίπτωση, η χωρική ανάλυση των εικόνων στο VNIR φτάνει τα 15 m. Συνεπώς, οι διαστάσεις του 1/2 του εικονοστοιχείου αντιστοιχούν σε 7,5 m  $\times$  7,5 m στο έδαφος. Αν, λοιπόν, για ένα οριζοντιογραφικό σφάλμα  $RMS = 7,5 \text{ m} = 7500 \text{ mm}$  στην εικόνα γίνει η αντιστοίχιση με το γραφικό σφάλμα στον χάρτη δηλαδή, 0,5 mm, είναι δυνατόν να υπολογισθεί η κλίμακα του χάρτη που είναι κατάλληλη για τη χαρτογραφική προβολή της εικόνας:

$$\frac{1}{K} = \frac{0,5\text{mm}}{7500\text{mm}} = \frac{1}{15000} \quad (4.7)$$

Άρα η κλίμακα του χάρτη που έπρεπε να χρησιμοποιηθεί για τη γεωμετρική αναγωγή είναι 1: 15000 και όχι 1: 50000.

2) Δεν υπήρχε η δυνατότητα προσδιορισμού σταθερών σημείων ελέγχου σε όλη την έκταση της εικόνας παρά μόνο επί της ακτογραμμής. Αυτό προκαλεί αναπόφευκτα την

παραμόρφωση στο εσωτερικό της εικόνας, όπου παρατηρείται ελλειπής προσδιορισμός GCPs.

#### **4.2.8 Φωτοερμηνεία – Σύγκριση αποτελεσμάτων**

Στο τελευταίο στάδιο της μεταπτυχιακής διατριβής πραγματοποιήθηκε σύγκριση των γραμμώσεων που προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία με τα ήδη χαρτογραφημένα ρήγματα της περιοχής μελέτης (χάρτες ΙΓΜΕ). Για τη φωτοερμηνεία του πεδίου κατόπτρευσης χρησιμοποιήθηκε σύνθετη ψευδοχρωματική απεικόνιση της περιοχής μελέτης, βάσει του συνδυασμού των καναλιών 8 (Red), 3N (Green) και 1 (Blue). Η επιλογή των εν λόγω καναλιών έχει αιτιολογηθεί στην Ενότητα 4.2.3.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε έρευνα στο πεδίο (περιοχές Ροδωπού, Ρόκκα και Φαλάσαρνα) προκειμένου να διαπιστωθούν οι λόγοι για τους οποίους κάποια ρήγματα μεγάλων, σε μήκος, διαστάσεων δεν γίνονται εύκολα αντιληπτά στις εικόνες.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των εικόνων ASTER για την ανάδειξη των ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη παρατίθενται και αξιολογούνται στο Κεφάλαιο που ακολουθεί.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα επιμέρους στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Επισημαίνεται ότι παρατίθεται ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα των αποτελεσμάτων προκειμένου ο αναγνώστης να αποκτήσει μια γενική ιδέα όσον αφορά στις διάφορες τεχνικές ανάλυσης των δορυφορικών εικόνων συμπεριλαμβανομένων των προβλημάτων – αδυναμιών που δύναται κανείς να αντιμετωπίσει σε εφαρμογές, όπως είναι αυτή της ανάδειξης των ρηγμάτων

### Αποτελέσματα

#### 5.1. Ανάλυση κύριων συνιστωσών

Στα πλαίσια της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών υπολογίστηκαν:

- ⊕ Ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας,  $\Sigma_x$ , των αρχικών εικόνων.
- ⊕ Ο πίνακας συσχέτισης  $P_x$ , των εικόνων.
- ⊕ Οι ιδιοτιμές  $\lambda_i$  και τα ιδιοδιανύσματα  $\vec{e}_i$  του  $\Sigma_x$ .

Τα αποτελέσματα για όλα, καθώς και για επιλεγμένα κανάλια του VNIR και SWIR, παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 5.1 – 5.10.

### 5.1.1 Για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR

Ο πίνακας συµµεταβλητότητας  $\Sigma_x$  (Πίνακας 5.1) είναι συµµετρικός. Τα στοιχεία της κύριας διαγωνίου εκφράζουν τη διασπορά των τιμών φωτεινότητας σε κάθε φασματικό κανάλι. Το άθροισµά των στοιχείων αυτών ή αλλιώς «ίχνος» του πίνακα  $\Sigma_x$ , εκφράζει την ολική µεταβλητότητα που υπάρχει στα αρχικά δεδοµένα (Ενότητα 3.5.2).

Από τον πίνακα συσχέτισης,  $P_x$ , των αρχικών δεδοµένων (Πίνακας 5.2) προκύπτει ότι µεμονωµένοι δίαυλοι, όπως είναι αυτοί για την περιοχή του μέσου υπερύθρου (κανάλια 4, 5, 6, 7, 8 και 9), παρουσιάζουν µεγάλη ποιοτική και ποσοτική συσχέτιση µεταξύ τους (τιμές πολύ κοντά στη µονάδα). Τα κανάλια του μέσου υπερύθρου είναι σχεδόν όµοια κάτι που γίνεται εύκολα αντιληπτό στην προσπάθεια σύνθεσης ψευδοχρωµατικών απεικονίσεων RGB χρησιµοποιώντας µόνο δεδοµένα από την περιοχή του SWIR.

Μεγάλη συσχέτιση ( $\rho_{1,2} = 0,975$ ) παρουσιάζουν και τα κανάλια 1 (ορατό-πράσινο) και 2 (ορατό-ερυθρό). Η πληροφορία από τη ζώνη του εγγύς υπερύθρου (κανάλι 3N) διαφοροποιείται σηµαντικά από τα δεδοµένα τόσο από την περιοχή του ορατού (κανάλια 1 και 2) όσο και από την περιοχή του μέσου υπερύθρου (τιμές συσχέτισης κοντά στο µηδέν).

Τα ιδιοδιανύσµατα  $\vec{e}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, q$ ) (Πίνακας 5.3) προσδιορίζουν το νέο ορθογώνιο σύστηµα συντεταγµένων του µετασχηµατισµού καθορίζοντας τη γραµµική σχέση των κύριων συνιστωσών συναρτήσσει των αρχικών καναλιών ως εξής (π.χ., για την πρώτη κύρια συνιστώσα, PC1):

$$DN_{PC1} = 0,302 \times DN_{\text{Κανάλι1}} + 0,326 \times DN_{\text{Κανάλι2}} + 0,028 \times DN_{\text{Κανάλι3N}} + 0,330 \times DN_{\text{Κανάλι4}} + 0,377 \times DN_{\text{Κανάλι5}} + 0,365 \times DN_{\text{Κανάλι6}} + 0,387 \times DN_{\text{Κανάλι7}} + 0,389 \times DN_{\text{Κανάλι8}} + 0,341 \times DN_{\text{Κανάλι9}}$$

(5.1)

Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.

**Πίνακας 5.1:** Ο πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας  $\Sigma_x$  των αρχικών εικόνων.

|                  | Κανάλι 1 | Κανάλι 2 | Κανάλι 3N | Κανάλι 4 | Κανάλι 5 | Κανάλι 6 | Κανάλι 7 | Κανάλι 8 | Κανάλι 9 |
|------------------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Κανάλι 1</b>  | 1387,845 | 1417,282 | 110,054   | 1024,243 | 1203,124 | 1170,329 | 1236,517 | 1251,452 | 1064,984 |
| <b>Κανάλι 2</b>  | 1417,282 | 1521,668 | 66,883    | 1126,681 | 1309,382 | 1274,745 | 1346,810 | 1362,173 | 1152,437 |
| <b>Κανάλι 3N</b> | 110,054  | 66,883   | 1062,637  | 276,851  | 119,234  | 114,453  | 77,444   | 62,886   | 7,482    |
| <b>Κανάλι 4</b>  | 1024,243 | 1126,681 | 276,851   | 1373,277 | 1447,209 | 1406,927 | 1471,160 | 1451,622 | 1219,340 |
| <b>Κανάλι 5</b>  | 1203,124 | 1309,382 | 119,234   | 1447,209 | 1672,012 | 1589,285 | 1677,675 | 1679,267 | 1464,328 |
| <b>Κανάλι 6</b>  | 1170,329 | 1274,745 | 114,453   | 1406,927 | 1589,285 | 1588,865 | 1621,185 | 1619,822 | 1397,520 |
| <b>Κανάλι 7</b>  | 1236,517 | 1346,810 | 77,444    | 1471,160 | 1677,675 | 1621,185 | 1747,576 | 1741,059 | 1525,613 |
| <b>Κανάλι 8</b>  | 1251,452 | 1362,173 | 62,886    | 1451,622 | 1679,267 | 1619,822 | 1741,059 | 1770,681 | 1557,235 |
| <b>Κανάλι 9</b>  | 1064,984 | 1152,437 | 7,482     | 1219,340 | 1464,328 | 1397,520 | 1525,613 | 1557,235 | 1500,736 |

**Πίνακας 5.2:** Ο πίνακας των συντελεστών συσχέτισης  $P_x$  των αρχικών εικόνων.

|                  | Κανάλι 1 | Κανάλι 2 | Κανάλι 3N    | Κανάλι 4 | Κανάλι 5 | Κανάλι 6 | Κανάλι 7 | Κανάλι 8 | Κανάλι 9 |
|------------------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Κανάλι 1</b>  | 1        | 0,975    | <b>0,091</b> | 0,742    | 0,790    | 0,788    | 0,794    | 0,798    | 0,738    |
| <b>Κανάλι 2</b>  | 0,975    | 1        | <b>0,053</b> | 0,779    | 0,821    | 0,820    | 0,826    | 0,830    | 0,763    |
| <b>Κανάλι 3N</b> | 0,091    | 0,053    | <b>1</b>     | 0,229    | 0,089    | 0,088    | 0,057    | 0,046    | 0,006    |
| <b>Κανάλι 4</b>  | 0,742    | 0,779    | <b>0,229</b> | 1        | 0,955    | 0,952    | 0,950    | 0,931    | 0,849    |
| <b>Κανάλι 5</b>  | 0,790    | 0,821    | <b>0,089</b> | 0,955    | 1        | 0,975    | 0,981    | 0,976    | 0,924    |
| <b>Κανάλι 6</b>  | 0,788    | 0,820    | <b>0,088</b> | 0,952    | 0,975    | 1        | 0,973    | 0,966    | 0,905    |
| <b>Κανάλι 7</b>  | 0,794    | 0,826    | <b>0,057</b> | 0,950    | 0,981    | 0,973    | 1        | 0,990    | 0,942    |
| <b>Κανάλι 8</b>  | 0,798    | 0,830    | <b>0,046</b> | 0,931    | 0,976    | 0,966    | 0,990    | 1        | 0,955    |
| <b>Κανάλι 9</b>  | 0,738    | 0,763    | <b>0,006</b> | 0,849    | 0,924    | 0,905    | 0,942    | 0,955    | 1        |

**Πίνακας 5.3:** Ο πίνακας των ιδιοδιανυσμάτων  $\vec{e}_i$  (για τα κανάλια του VNIR και SWIR).

|           | $\vec{e}_1$ | $\vec{e}_2$ | $\vec{e}_3$ | $\vec{e}_4$ | $\vec{e}_5$ | $\vec{e}_6$ | $\vec{e}_7$ | $\vec{e}_8$ | $\vec{e}_9$ |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Κανάλι 1  | 0,302       | -0,001      | -0,650      | 0,081       | -0,150      | -0,266      | -0,056      | 0,611       | -0,095      |
| Κανάλι 2  | 0,326       | 0,042       | -0,612      | -0,050      | 0,195       | 0,326       | 0,001       | -0,600      | 0,101       |
| Κανάλι 3N | 0,028       | -0,972      | -0,020      | 0,195       | -0,057      | -0,035      | 0,059       | -0,080      | 0,038       |
| Κανάλι 4  | 0,330       | -0,183      | 0,192       | -0,488      | 0,495       | 0,364       | -0,227      | 0,334       | -0,205      |
| Κανάλι 5  | 0,377       | -0,006      | 0,175       | -0,150      | -0,096      | -0,589      | -0,592      | -0,314      | 0,002       |
| Κανάλι 6  | 0,365       | -0,009      | 0,157       | -0,290      | -0,786      | 0,350       | 0,134       | -0,003      | 0,006       |
| Κανάλι 7  | 0,387       | 0,040       | 0,179       | -0,026      | 0,213       | -0,191      | 0,398       | 0,124       | 0,748       |
| Κανάλι 8  | 0,389       | 0,062       | 0,164       | 0,152       | 0,138       | -0,247      | 0,560       | -0,155      | -0,614      |
| Κανάλι 9  | 0,341       | 0,118       | 0,224       | 0,764       | 0,022       | 0,350       | -0,318      | 0,102       | 0,026       |

Το μέγεθος της διασποράς σε κάθε καινούρια συνιστώσα  $i = 1, 2, \dots, q$  ( $q = 9$ ) προσδιορίζεται από τις ιδιοτιμές  $\lambda_i$  (Πίνακας 5.4). Η πρώτη κύρια συνιστώσα (PC1), αποδίδει το 83 % της ολικής μεταβλητότητας ( $\frac{\lambda_1}{\text{trace}(\Sigma_x)} = 83,376 \%$ ). Από τον Πίνακα 5.4, γίνεται επίσης φανερό ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της φασματικής πληροφορίας εμπεριέχεται κυρίως στις δύο πρώτες συνιστώσες PC1 και PC2 δηλαδή,  $\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\text{trace}(\Sigma_x)} \cong 91,5\%$ .

**Πίνακας 5.4:** Ο πίνακας των ιδιοτιμών  $\lambda_i$  (για τα κανάλια του VNIR και SWIR).

|                                     | $\lambda_i$<br>( $i = 1, 2, \dots, 9$ ) | % διασποράς<br>( $\lambda_i / \text{trace}(\Sigma_x)$ ) |
|-------------------------------------|---|---|
| <b>PC1</b>                          | 11360,207                               | <b>83,376</b>   |
| <b>PC2</b>                          | 1105,654                                | <b>8,115</b>  |
| <b>PC3</b>                          | 792,376                                 | 5,815   |
| <b>PC4</b>                          | 203,313                                 | 1,492   |
| <b>PC5</b>                          | 50,595                                  | 0,371   |
| <b>PC6</b>                          | 35,811                                  | 0,263   |
| <b>PC7</b>                          | 34,547                                  | 0,254   |
| <b>PC8</b>                          | 29,089                                  | 0,213   |
| <b>PC9</b>                          | 13,703                                  | 0,101   |
| <b>trace(<math>\Sigma_x</math>)</b> | 13625,296                               | 100   |

Αν και οι εικόνες που προκύπτουν από την ανάλυση των κύριων συνιστωσών είναι γραμμικά συσχετισμένες με τα αρχικά δεδομένα, είναι στατιστικώς ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Το ποσοστό της ολικής μεταβλητότητας (% διασποράς από Πίνακα 5.4) ελαττώνεται σταδιακά για τις συνιστώσες μεγάλου βαθμού κάτι που γίνεται αντιληπτό και στα Σχήματα 5.1 και 5.2.

Οι «συντελεστές συνεισφοράς» ή αλλιώς «συντελεστές βάρους» (Factor Loadings,  $FL$ ) με τους οποίους τα επιμέρους φασματικά κανάλια  $p$  ( $p = 1, 2, 3N, \dots, 9$ ) συμβάλλουν στη διαμόρφωση της κάθε καινούριας συνιστώσας ( $i = 1, 2, \dots, q$ ) υπολογίζεται με τη βοήθεια της ακόλουθης μαθηματικής σχέσης (Oppenheimer *et al.*, 2000):

$$FL(p, i) = e(p, i) \times \sqrt{\lambda_i} / \sqrt{\text{Var}(p)} \quad (5.2)$$

όπου:

$FL(p, i)$ : συντελεστής συνεισφοράς μεταξύ του  $p$  φασματικού καναλιού και της  $i$  κύριας συνιστώσας

$e(p, i)$ : τιμή ιδιοδιανύσματος για την  $i$  συνιστώσα

$\lambda_i$ : διασπορά στην  $i$  συνιστώσα

$\text{Var}(p)$ : διασπορά στο  $p$  φασματικό κανάλι

$p = 1, 2, 3N, \dots, 9$

$i = 1, 2, \dots, q$  ( $q = 9$ )

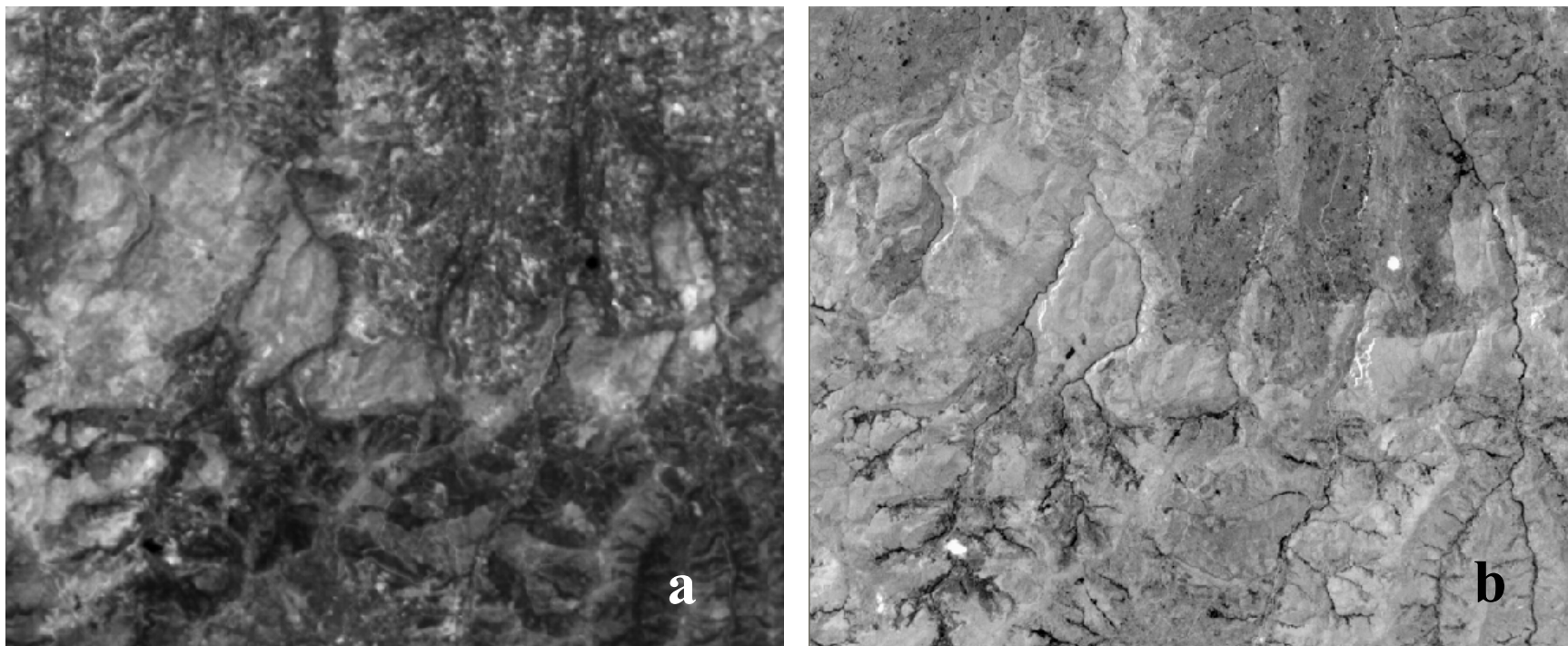
Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε Πίνακα (Πίνακας 5.5), όπου οι γραμμές αφορούν στα φασματικά κανάλια που λαμβάνουν χώρα στο μετασχηματισμό, ενώ οι στήλες αφορούν στις προκύπτουσες κύριες συνιστώσες. Οι τιμές κυμαίνονται εντός του διαστήματος  $[-1, 1]$ . Όσο αυξάνει η απόκλιση από το μηδέν, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνεισφορά ενός καναλιού στη διαμόρφωση της αντίστοιχης συνιστώσας (π.χ.,  $FL(\text{Κανάλι } 3N, \text{PC2}) = -0,992$ ).

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*

**Πίνακας 5.5:** Ο πίνακας των συντελεστών βάρους **FL** (για τα κανάλια του VNIR και SWIR).

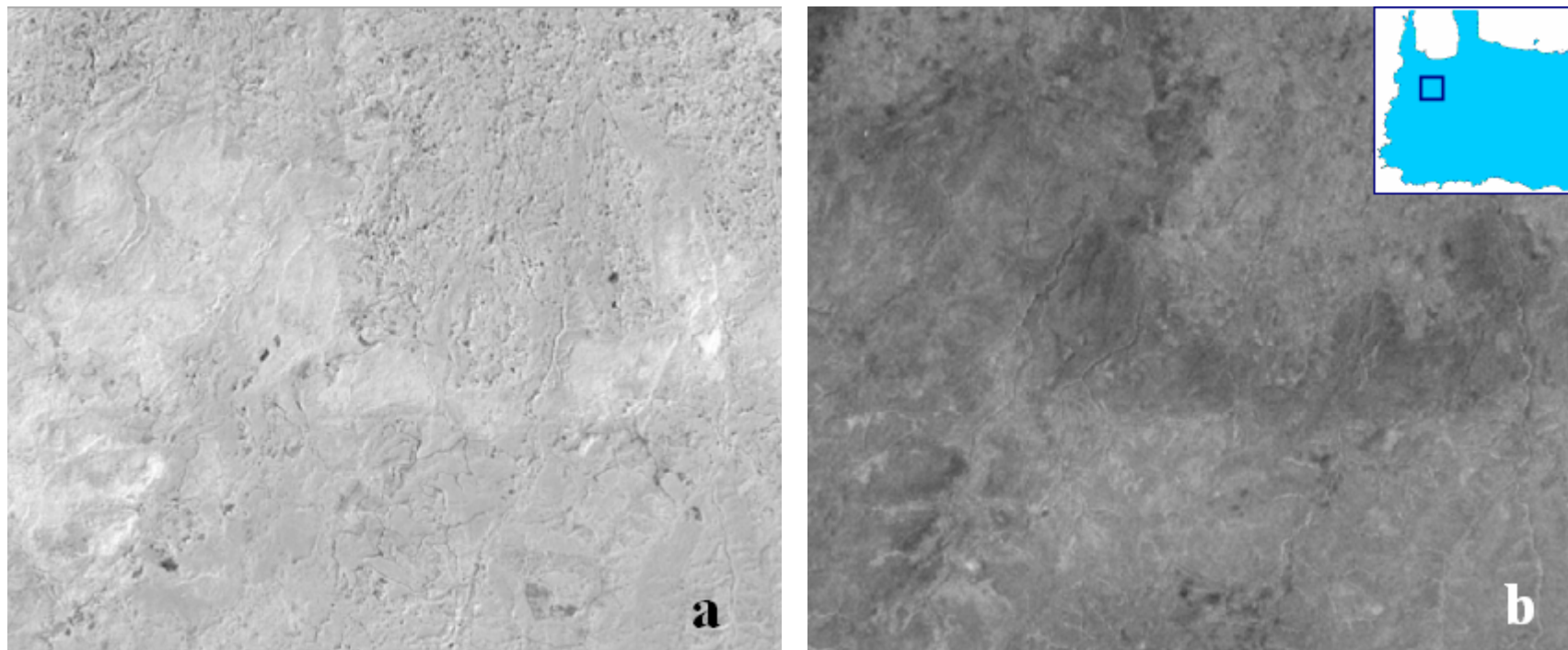
|                  | <b>PC1</b> | <b>PC2</b>    | <b>PC3</b> | <b>PC4</b> | <b>PC5</b> | <b>PC6</b> | <b>PC7</b> | <b>PC8</b> | <b>PC9</b> |
|------------------|------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Κανάλι 1</b>  | 0,864      | -0,001        | -0,491     | 0,031      | -0,029     | -0,043     | -0,009     | 0,089      | -0,009     |
| <b>Κανάλι 2</b>  | 0,890      | 0,036         | -0,442     | -0,018     | 0,036      | 0,050      | 2,0E-04    | -0,083     | 0,010      |
| <b>Κανάλι 3N</b> | 0,092      | <b>-0,992</b> | -0,017     | 0,085      | -0,012     | -0,006     | 0,011      | -0,013     | 0,004      |
| <b>Κανάλι 4</b>  | 0,949      | -0,164        | 0,146      | -0,188     | 0,095      | 0,059      | -0,036     | 0,049      | -0,021     |
| <b>Κανάλι 5</b>  | 0,983      | -0,005        | 0,121      | -0,052     | -0,017     | -0,086     | -0,085     | -0,041     | 2,0E-04    |
| <b>Κανάλι 6</b>  | 0,977      | -0,007        | 0,111      | -0,104     | -0,140     | 0,053      | 0,020      | -3,5E-04   | 0,001      |
| <b>Κανάλι 7</b>  | 0,987      | 0,032         | 0,121      | -0,009     | 0,036      | -0,027     | 0,056      | 0,016      | 0,066      |
| <b>Κανάλι 8</b>  | 0,986      | 0,049         | 0,110      | 0,052      | 0,023      | -0,035     | 0,078      | -0,020     | -0,054     |
| <b>Κανάλι 9</b>  | 0,937      | 0,101         | 0,163      | 0,281      | 0,004      | 0,054      | -0,048     | 0,014      | 0,002      |

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



**Σχήμα 5.1:** Η πρώτη (a) και δεύτερη (b) κύριες συνιστώσες του μετασχηματισμού για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR.

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



**Σχήμα 5.2:** Η τρίτη (a) και τέταρτη (b) κύριες συνιστώσες του μετασχηματισμού για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR.

### 5.1.2 Για τα κανάλια του μέσου υπερύθρου

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται τα ιδιοδιανύσματα του μετασχηματισμού για τα κανάλια 4 έως 9.

**Πίνακας 5.6:** Ο πίνακας των ιδιοδιανυσμάτων  $\vec{e}_i$  (για τα κανάλια του SWIR).

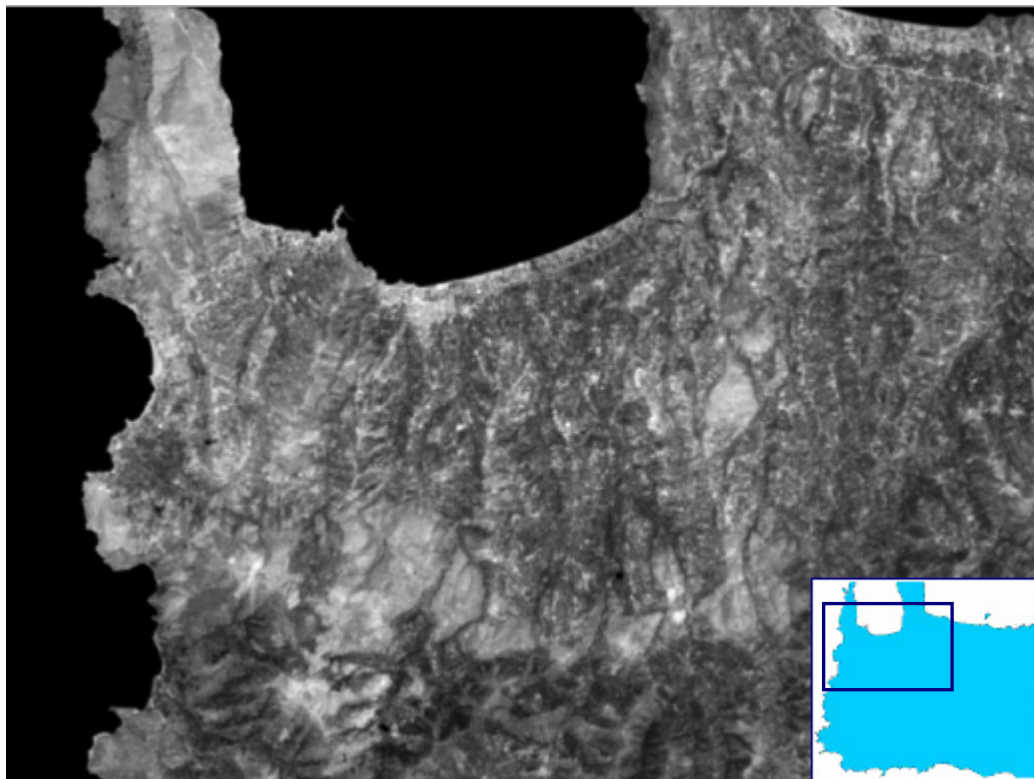
|                 | $\vec{e}_1$ | $\vec{e}_2$ | $\vec{e}_3$ | $\vec{e}_4$ | $\vec{e}_5$ | $\vec{e}_6$ |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Κανάλι 4</b> | 0,369       | -0,587      | -0,659      | -0,217      | 0,154       | -0,121      |
| <b>Κανάλι 5</b> | 0,421       | -0,130      | 0,124       | 0,073       | -0,886      | -0,018      |
| <b>Κανάλι 6</b> | 0,407       | -0,242      | 0,673       | -0,493      | 0,283       | -0,008      |
| <b>Κανάλι 7</b> | 0,432       | 0,017       | -0,007      | 0,456       | 0,224       | 0,745       |
| <b>Κανάλι 8</b> | 0,434       | 0,184       | 0,081       | 0,532       | 0,247       | -0,654      |
| <b>Κανάλι 9</b> | 0,382       | 0,739       | -0,301      | -0,463      | -0,008      | 0,045       |

Από τον πίνακα των ιδιοτιμών (Πίνακας 5.7) προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής μεταβλητότητας στα αρχικά δεδομένα (~ 96%) αποδίδεται στην πρώτη κύρια συνιστώσα, PC1. Η συνιστώσα αυτή (Σχήμα 5.3) μπορεί να αντικαταστήσει τις αρχικές μεταβλητές (κανάλια του SWIR) χωρίς να απολεσθεί πληροφορία. Οι αντιθέσεις μεταξύ των υγρών (χαμηλοί τόνοι φωτεινότητας) και ξηρών εδαφών (υψηλοί τόνοι φωτεινότητας) είναι ευδιάκριτες. Συνεπώς, η εικόνα ενδείκνυται για φωτοερμηνεία.

Σημειώνεται ότι η ολική μεταβλητότητα στον Πίνακα 5.7 ( $\text{trace}(\Sigma_x)$ ) αφορά στο άθροισμα των στοιχείων της κύριας διαγωνίου του  $\Sigma_x$  (Πίνακας 5.1) μόνο για τα κανάλια 4-9 (SWIR).

**Πίνακας 5.7:** Ο πίνακας των ιδιοτιμών  $\lambda_i$  (για τα κανάλια του SWIR).

|                          | $\lambda_i$<br>( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) | % διασποράς<br>( $\lambda_i / \text{trace}(\Sigma_x)$ ) |
|--------------------------|---|---|
| PC1                      | 9264,699                                | 95,976  |
| PC2                      | 240,391                                 | 2,490   |
| PC3                      | 57,691                                  | 0,598   |
| PC4                      | 41,377                                  | 0,429   |
| PC5                      | 34,354                                  | 0,356   |
| PC6                      | 14,634                                  | 0,152   |
| $\text{trace}(\Sigma_x)$ | 9653,146                                | 100   |



**Σχήμα 5.3:** PC1 για τα κανάλια του SWIR.

### 5.1.3 Για τα κανάλια 1, 3N και 8

Στην Ενότητα αυτή παρατίθενται οι Πίνακες των ιδιοδιανυσμάτων (Πίνακας 5.8), των ιδιοτιμών (Πίνακας 5.9) καθώς και των συντελεστών  $FL$  (Πίνακας 5.10) που προέκυψαν από την ανάλυση των κύριων συνιστωσών για τα κανάλια 1, 3N και 8.

**Πίνακας 5.8:** Ο πίνακας των ιδιοδιανυσμάτων  $\vec{e}_i$  για τα κανάλια 1, 3N και 8.

|                  | $\vec{e}_1$ | $\vec{e}_2$ | $\vec{e}_3$ |
|------------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Κανάλι 1</b>  | 6,509E-01   | -1,240E-04  | -7,592E-01  |
| <b>Κανάλι 3N</b> | 6,656E-02   | 9,962E-01   | 5,690E-02   |
| <b>Κανάλι 8</b>  | 7,563E-01   | -8,757E-02  | 6,484E-01   |

**Πίνακας 5.9:** Ο πίνακας των ιδιοτιμών  $\lambda_i$  για τα κανάλια 1, 3N και 8.

|                                     | $\lambda_i$<br>( $i = 1, 2, 3$ ) | % διασποράς<br>( $\lambda_i / \text{trace}(\Sigma_x)$ ) |
|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| <b>PC1</b>                          | 2853,236                         | 67,594  |
| <b>PC2</b>                          | 1057,095                         | 25,043  |
| <b>PC3</b>                          | 310,832                          | 7,364   |
| <b>trace(<math>\Sigma_x</math>)</b> | 4221,163                         | 100   |

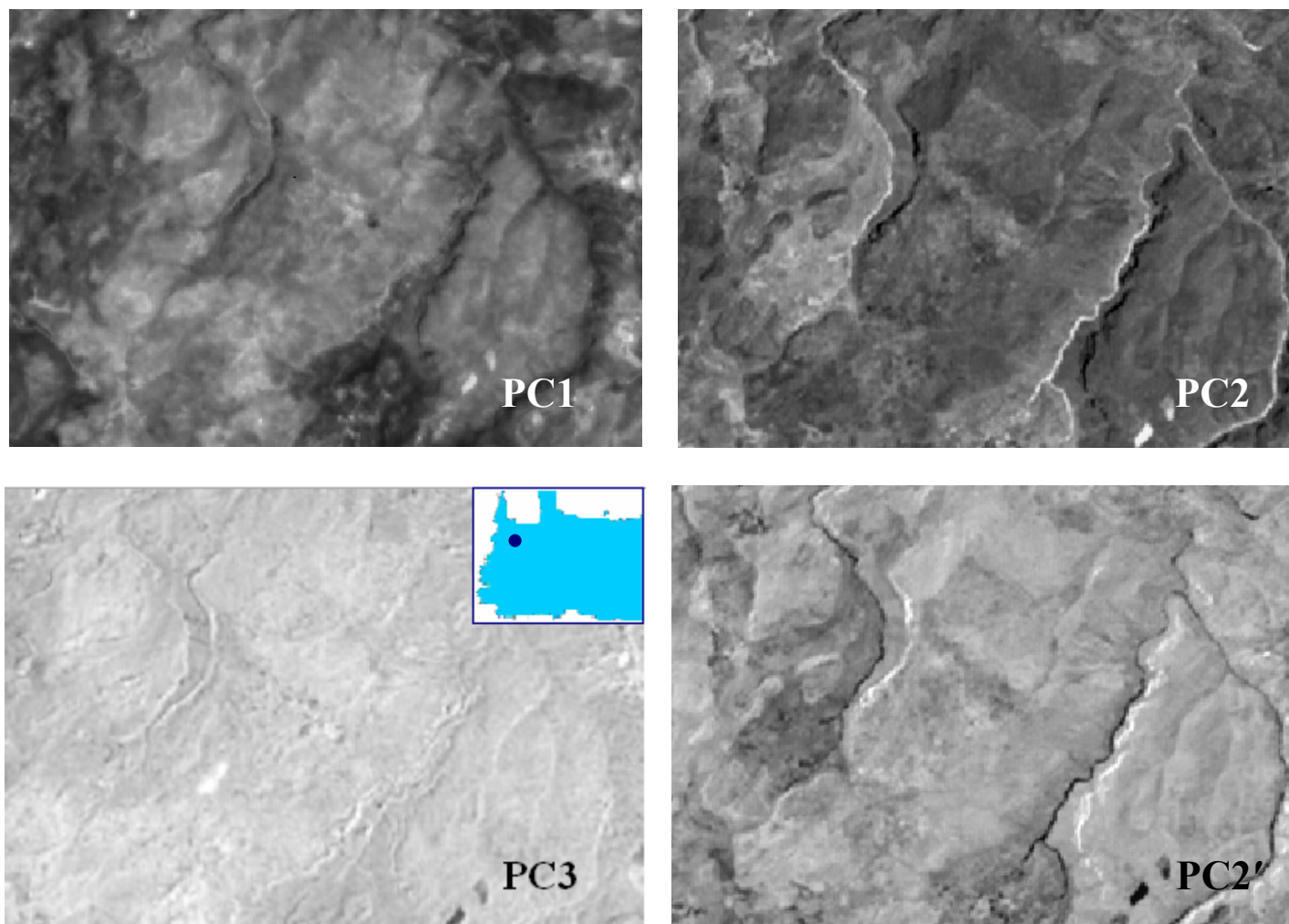
Ομοίως με την περίπτωση στην Ενότητα 5.1.2, η ολική μεταβλητότητα στον Πίνακα 5.9 ( $\text{trace}(\Sigma_x)$ ) αφορά στο άθροισμα των στοιχείων της κύριας διαγωνίου του  $\Sigma_x$  (Πίνακας 5.1) για τα κανάλια 1, 3N και 8.

**Πίνακας 5.10:** Ο πίνακας των συντελεστών βάρους *FL* για τα κανάλια 1, 3N και 8.

|                  | <b>PC1</b> | <b>PC2</b>   | <b>PC3</b> |
|------------------|------------|--------------|------------|
| <b>Κανάλι 1</b>  | 0,933      | -1,1E-04     | -0,359     |
| <b>Κανάλι 3N</b> | 0,109      | <b>0,994</b> | 0,031      |
| <b>Κανάλι 8</b>  | 0,960      | -0,068       | 0,272      |

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.10, η συνεισφορά του καναλιού 3N στη διαμόρφωση της PC2 είναι μεγάλη (τιμή πολύ κοντά στη μονάδα). Η PC2 μετά από αντιστροφή φωτεινότητας (Σχήμα 5.4) παρουσιάζει μεγάλη ποιοτική συσχέτιση (οπτικά δεν παρουσιάζει διαφορές) με τη δεύτερη κύρια συνιστώσα που προέκυψε από την ανάλυση για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR (Σχήμα 5.1-b).

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



**Σχήμα 5.4:** Οι τρεις κύριες συνιστώσες (PC1, PC2, PC3) του μετασχηματισμού για τα κανάλια 1, 3N και 8. Όπου PC2' η δεύτερη συνιστώσα (PC2) μετά από αντιστροφή φωτεινότητας.

## **5.2 Αριθμητικές πράξεις μεταξύ φασματικών καναλιών**

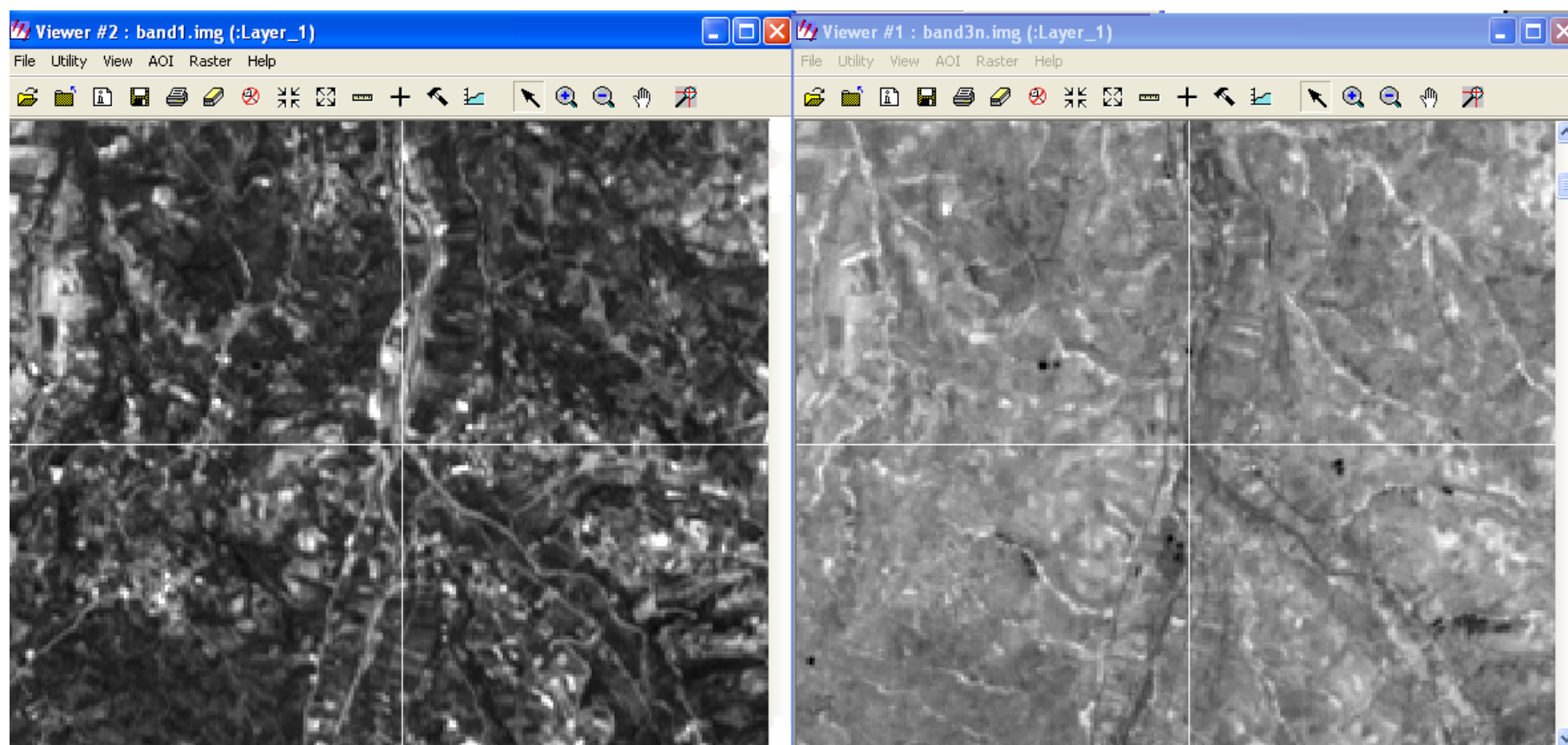
### **5.2.1 Αφαίρεση**

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η φασματική απόκριση των υδάτων στη ζώνη του ορατού–πράσινου (κανάλι 1) και εγγύς υπερύθρου (κανάλι 3N). Η ακτινοβολία παρουσιάζει υψηλή (σχετικά) ανακλαστικότητα από τις υδάτινες μάζες στο ορατό–πράσινο και απορροφάται στο εγγύς υπέρυθρο. Με τη βοήθεια του Inquire Cursor του Erdas μπορεί να δει κανείς ότι το ίδιο εικονοστοιχείο (Ταυρωνίτης ποταμός) στο κανάλι 1 εμφανίζει υψηλούς τόνους του γκρι (φωτεινό) ενώ στο κανάλι 3N εμφανίζεται σκοτεινό.

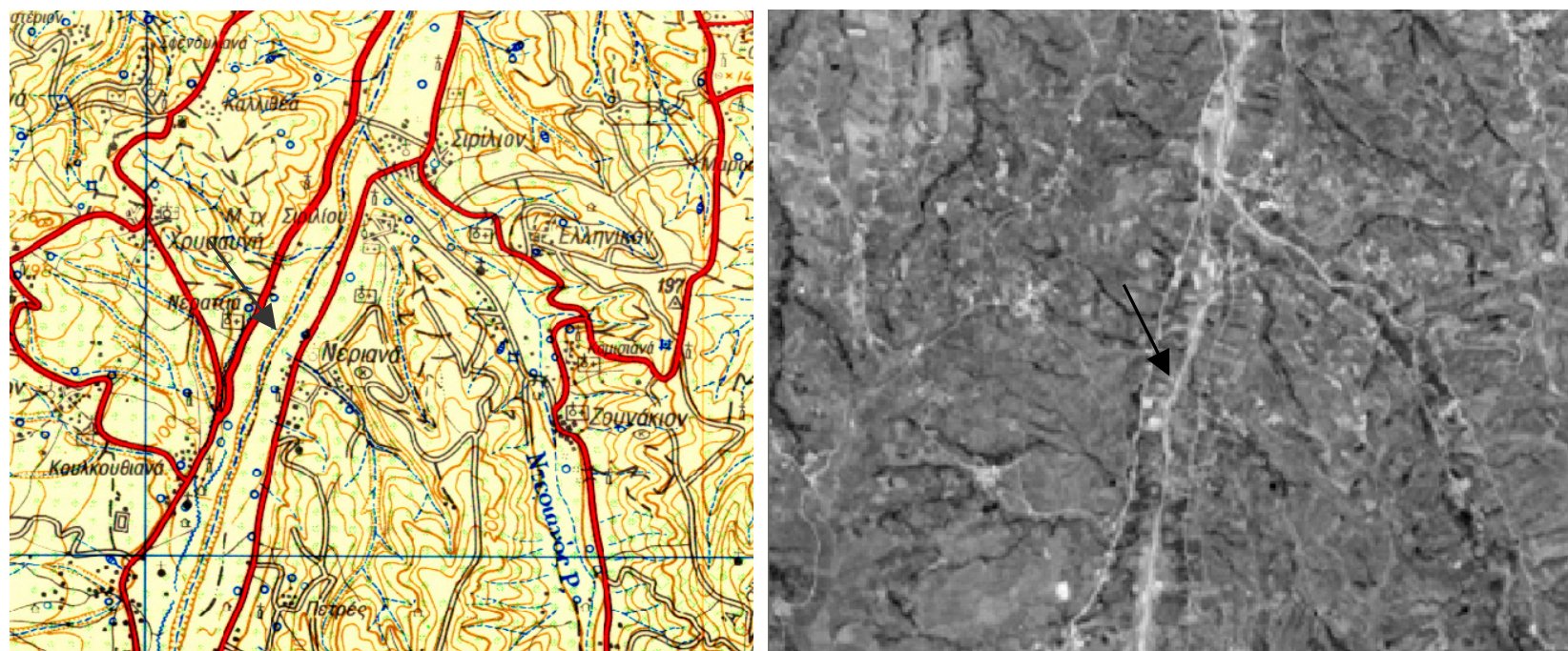
Αφαιρώντας τις τιμές των εικονοστοιχείων του καναλιού 3N από τις αντίστοιχες τιμές στο κανάλι 1, το υδρογραφικό δίκτυο αναδεικνύεται με υψηλές τιμές φωτεινότητας (Σχήμα 5.6).

Επισημαίνεται ότι πρέπει να υπάρχει στη διάθεση του χρήστη ο αντίστοιχος της περιοχής μελέτης τοπογραφικός χάρτης της ΓΥΣ, όπου μεταξύ άλλων έχει χαρτογραφηθεί και η οδοποιία. Αυτό ισχύει διότι εκτός από τα νερά, υψηλή ανακλαστικότητα στη ζώνη του ορατού παρουσιάζει και η ασφαλτός. Κατά συνέπεια είναι πολύ εύκολο κατά τη φωτοερμηνεία να γίνει σύγχυση μεταξύ των δρόμων και των ρεμάτων (Σχήμα 5.6).

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



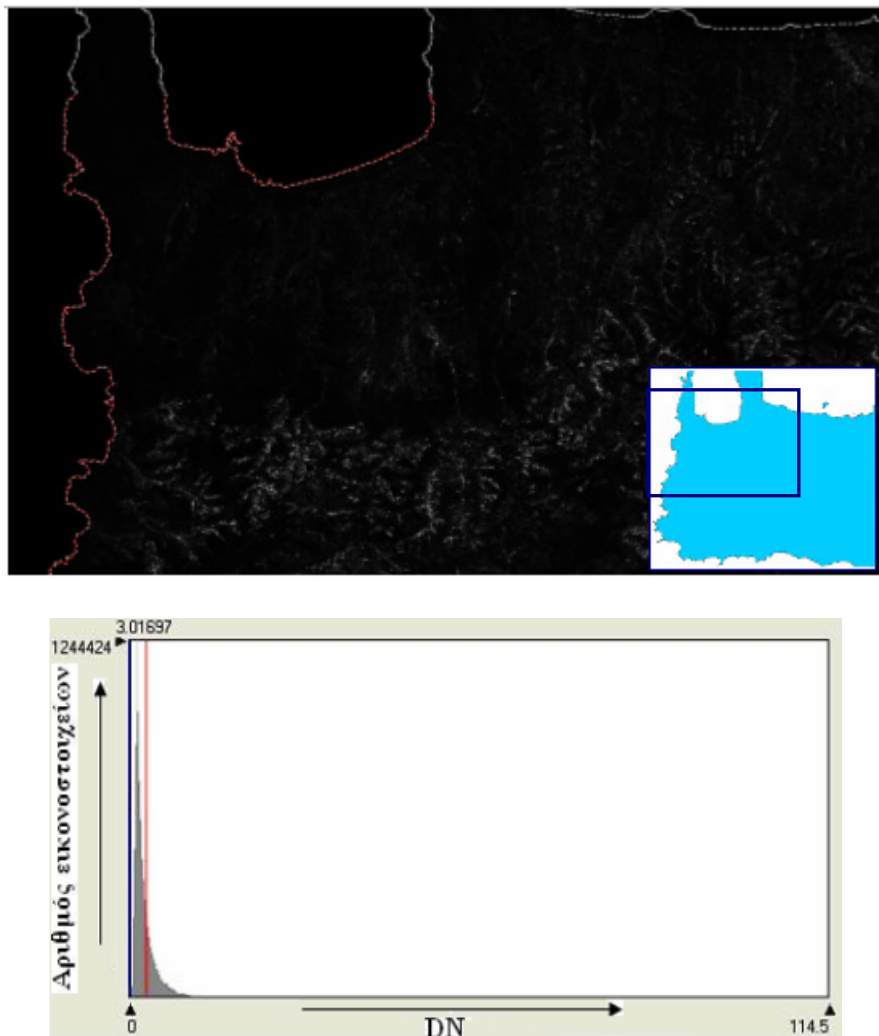
**Σχήμα 5.5:** Φασματική απόκριση υδάτων (Ταυρωνίτης ποταμός) στο κανάλι 1 του ορατού (αριστερά) και 3N του εγγύς υπερύθρου (δεξιά).



**Σχήμα 5.6:** Αριστερά: Τοπογραφικός χάρτης της ΓΥΣ, κλίμακα 1:50000 (Φύλλο Περιβόλια). Με το κόκκινο χρώμα διακρίνεται η οδοποιία ενώ με τις γαλάζιες διακεκομμένες γραμμές αποτυπώνεται το υδρογραφικό δίκτυο. Δεξιά: Προϊόν αφαίρεσης των τιμών  $DN_{\text{Κανάλι1}} - DN_{\text{Κανάλι3N}}$ . Η φασματική απόκριση των υδάτων παρουσιάζει ομοιότητες με εκείνη της ασφάλτου (δρόμοι).

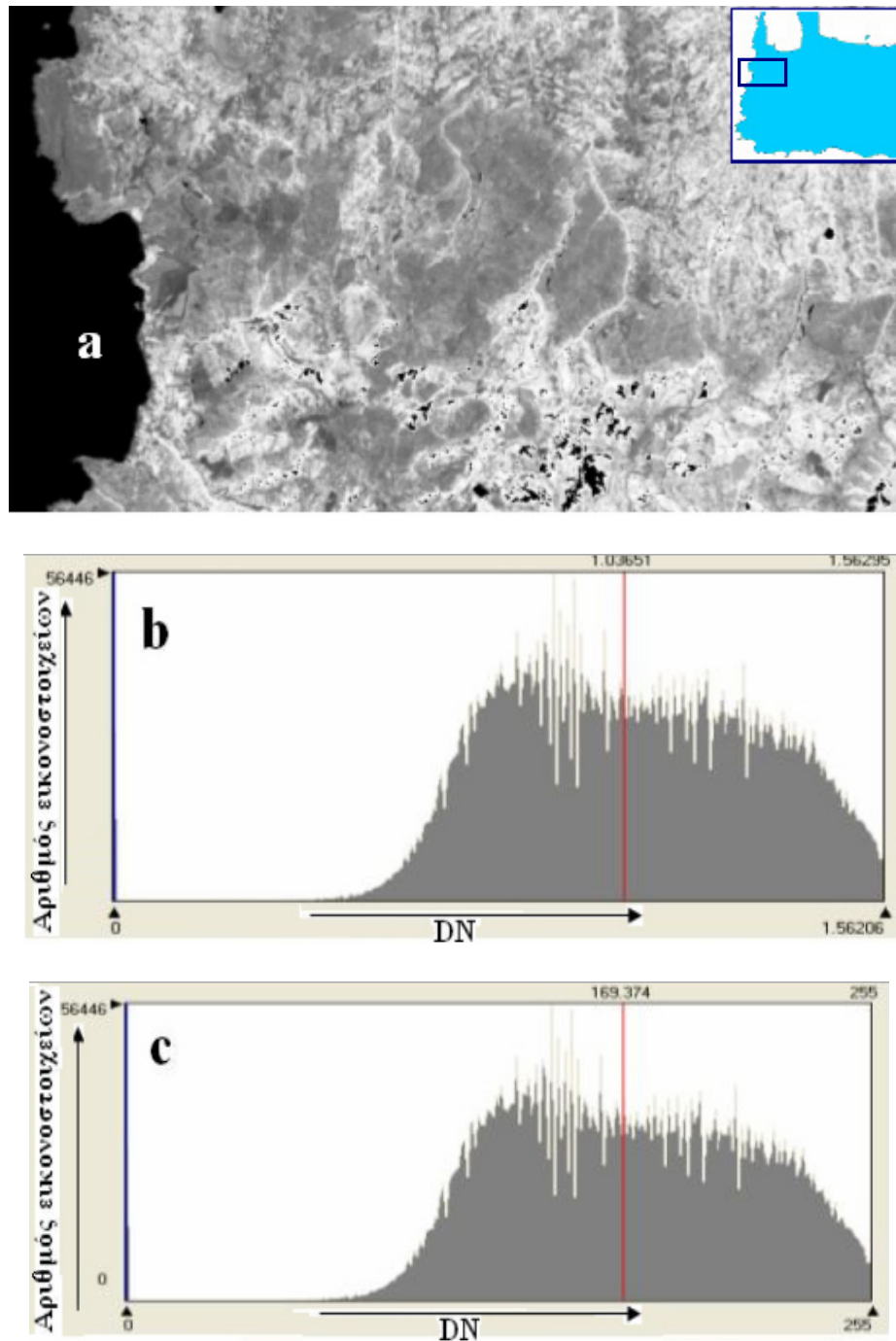
### 5.2.2 Λόγος φασματικών καναλιών 3N/2

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο (Ενότητα 4.2.7), το εύρος των τιμών φωτεινότητας, που προκύπτει από τους λόγους μεταξύ φασματικών καναλιών, είναι πολύ μικρό. Στο ιστόγραμμα της εικόνας που ακολουθεί (Σχήμα 5.7), γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα του λόγου, για τα κανάλια του εγγύς υπερύθρου και ερυθρού φάσματος, κυμαίνονται εντός ενός πολύ μικρού εύρους τιμών, πλησίον του μηδενός. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7 η εικόνα παρουσιάζει πολύ χαμηλές αντιθέσεις.



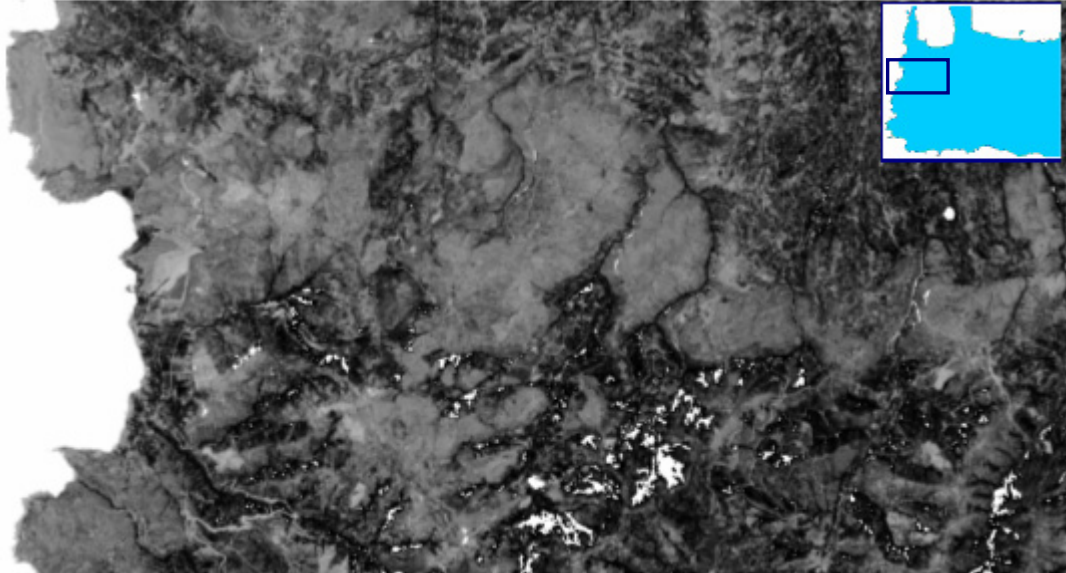
Σχήμα 5.7: Εικόνα και ιστόγραμμα λόγου φασματικών καναλιών 3N/2.

Υπολογίζοντας τη συνάρτηση της αντίστροφης της εφαπτομένης (Ενότητα 4.2.4) για τον συγκεκριμένο λόγο δηλαδή,  $\text{atan}(3N/2)$  προκύπτει η εικόνα του Σχήματος 5.8. Η ενίσχυση των αντιθέσεων, σε σχέση με την εικόνα του Σχήματος 5.7, είναι εμφανής.



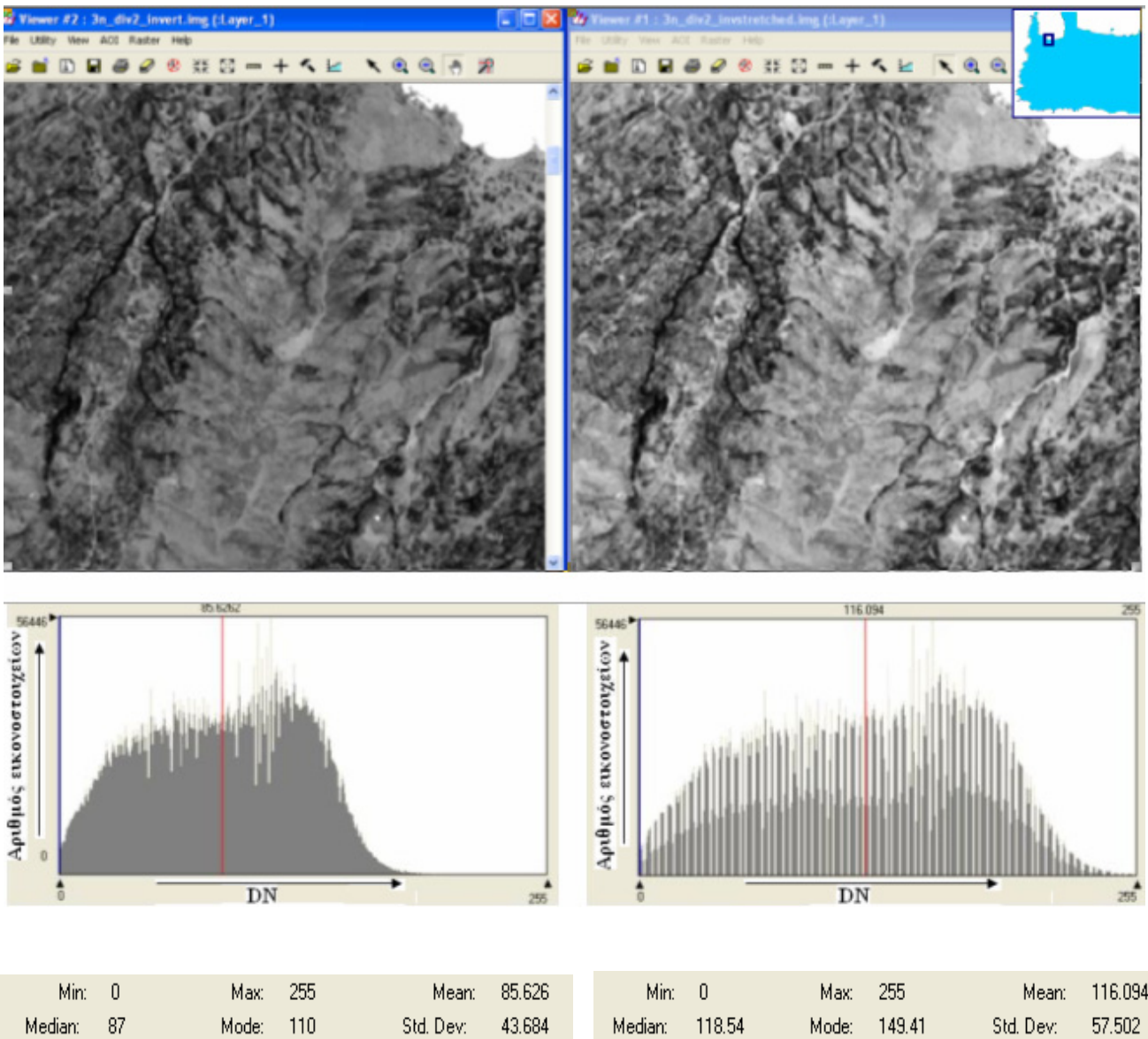
**Σχήμα 5.8:** α) Εικόνα  $G = \text{atan}(3N/2)$ . β) Ιστόγραμμα εικόνας και γ) ιστόγραμμα μετά από προσαρμογή των τιμών φωτεινότητας στην κλίμακα 0-255.

Με αντιστροφή της φωτεινότητας ( $255 - \text{atan}(3N/2)$ ) στην εικόνα του Σχήματος 5.8, οι περιοχές με βλάστηση εμφανίζουν χαμηλές τιμές του τόνου του γκρι, σε ένα πιο φωτεινό υπόβαθρο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9, οι περιοχές αυτές γίνονται εύκολα αντιληπτές.



**Σχήμα 5.9:** Εικόνα  $\text{atan}(3N/2)$  μετά από αντιστροφή φωτεινότητας.

Πραγματοποιήθηκε περαιτέρω ενίσχυση των αντιθέσεων στην εικόνα του Σχήματος 5.9 μέσω γραμμικής επέκτασης του ιστογράμματος (Σχήμα 5.10).



**Σχήμα 5.10:** Εικόνα (255-atan(3N/2)) πριν (πάνω αριστερά) και μετά (πάνω δεξιά) από ενίσχυση των αντιθέσεων, με τα αντίστοιχα ιστογράμματα και τις στατιστικές παραμέτρους των κατανομών.

### 5.3 Χωρικά φίλτρα

Για την ενίσχυση των γραμμώσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο από τις εικόνες που προέκυψαν με την παραπάνω μεθοδολογία. Για λόγους ευκολίας στις επόμενες παραγράφους η αναφορά σε αυτές θα γίνεται ως εξής:

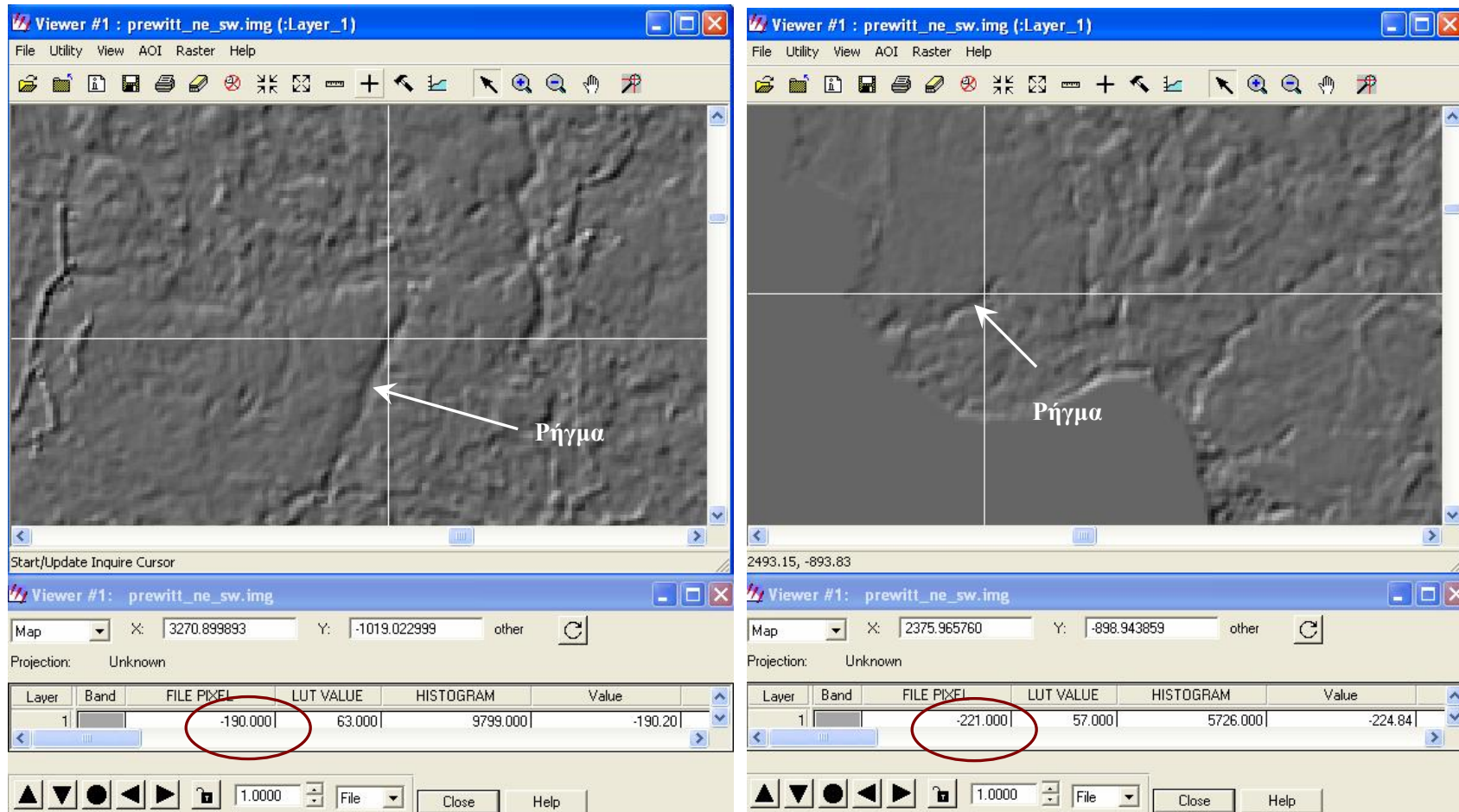
- ☒ **Εικόνα Α:** η εικόνα atan(3N/2) που προέκυψε μετά από αντιστροφή φωτεινότητας και γραμμική επέκταση ιστογράμματος (Σχήμα 5.10).
- ☒ **Εικόνα Β:** Η δεύτερη κύρια συνιστώσα, PC2, που προέκυψε από το μετασχηματισμό για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR (Σχήμα 5.1-b).

#### 5.3.1 Φίλτρα διευθύνσεων

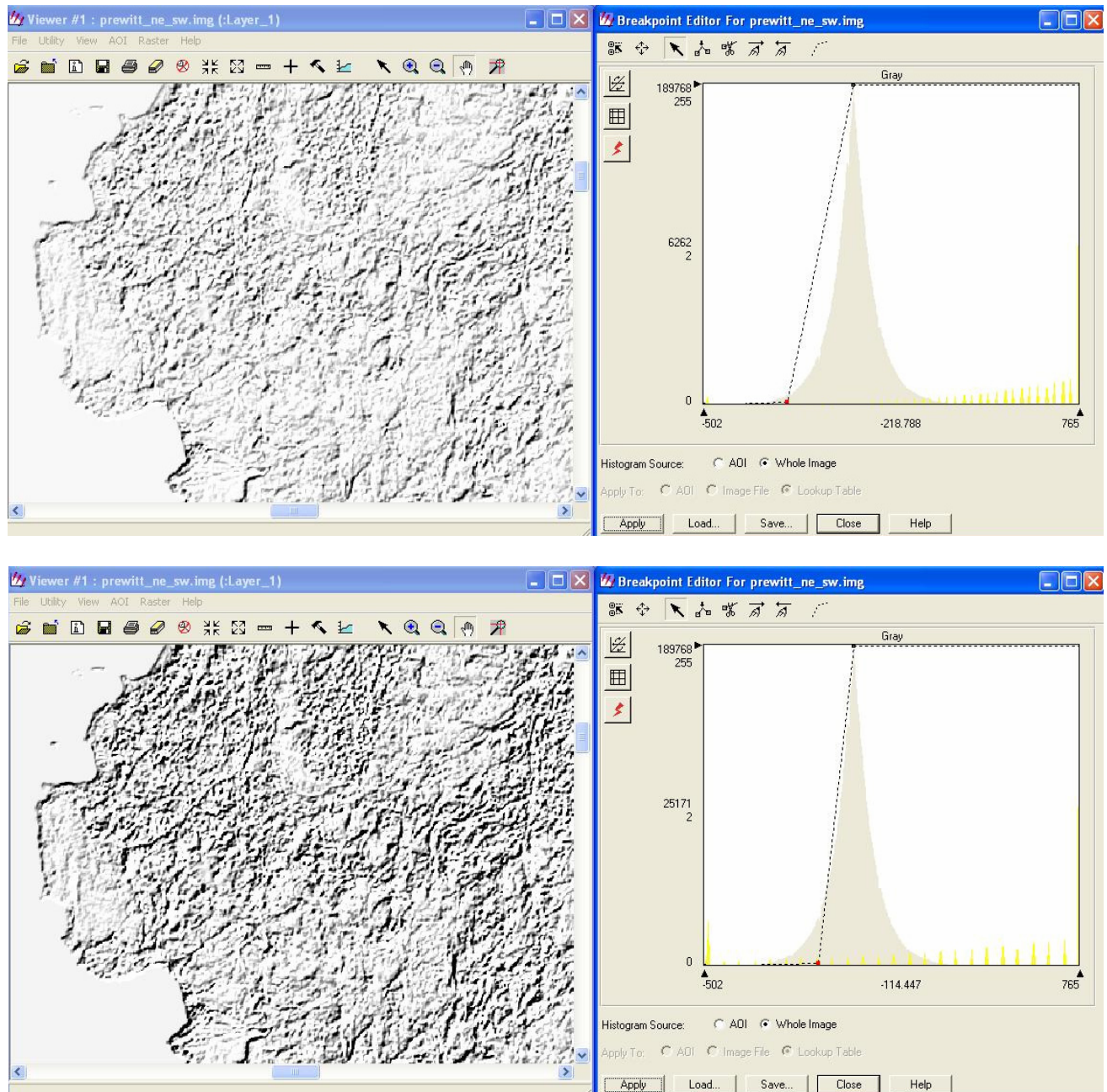
Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται τμήμα της περιοχής μελέτης μετά την εφαρμογή φίλτρου διευθύνσεως στην εικόνα Α. Το χωρικό φιλτράρισμα είχε ως στόχο την ανάδειξη των παράλληλων, στη διεύθυνση φωτισμού του Ηλίου, γραμμώσεων δηλαδή, των γραμμώσεων Βορειοανατολικής-Νοτιοδυτικής διευθύνσεως (BA-ND). Τα έντονα γραμμικά χαρακτηριστικά απεικονίζονται επί της οθόνης είτε με υψηλές τιμές φωτεινότητας (δεξί άκρο ιστογράμματος–θετικές τιμές) είτε σκοτεινά (αριστερό άκρο ιστογράμματος–αρνητικές τιμές).

Με τη βοήθεια του Inquire Cursor του Erdas επιλέχθηκαν ενδεικτικά οι θέσεις δύο γνωστών ρηγμάτων (από χάρτες ΙΓΜΕ) προκειμένου να υποδειχθεί το εύρος των τιμών φωτεινότητας εντός του οποίου κυμαίνονται οι ρηξιγενείς δομές. Τροποποιήθηκε διαδοχικά το ιστόγραμμα της εικόνας (Σχήμα 5.12-13) έως ότου καταλήξουμε στη δυαδική κατάτμηση αυτής (Σχήμα 5.13-f). Οι γραμμώσεις αποδίδονται επί της οθόνης με την τιμή μηδέν (μαύρο).

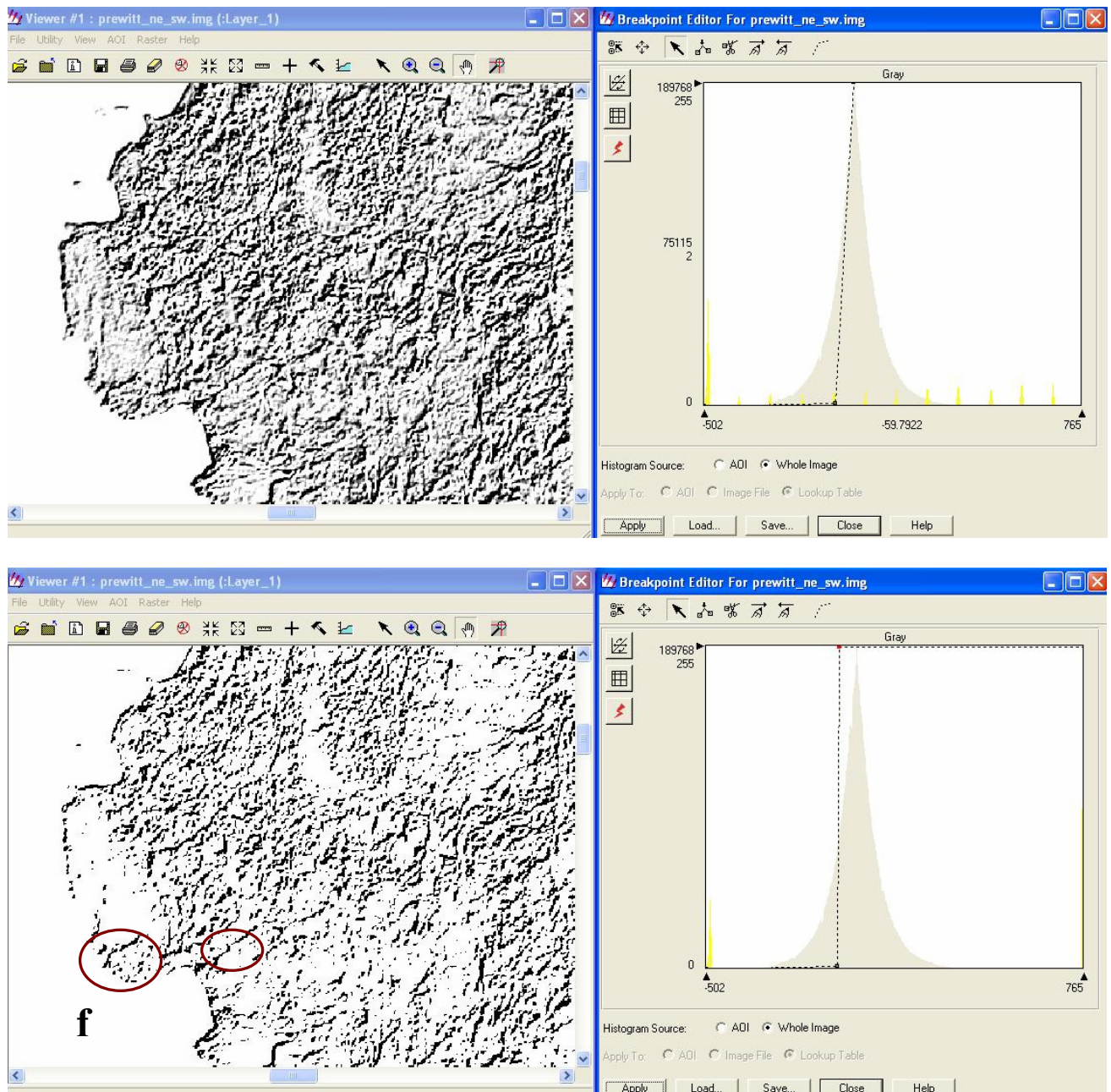
Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.



Σχήμα 5.11: Επιλογή τιμών αποκοπής με τη βοήθεια του Inquire Cursor του Erdas.



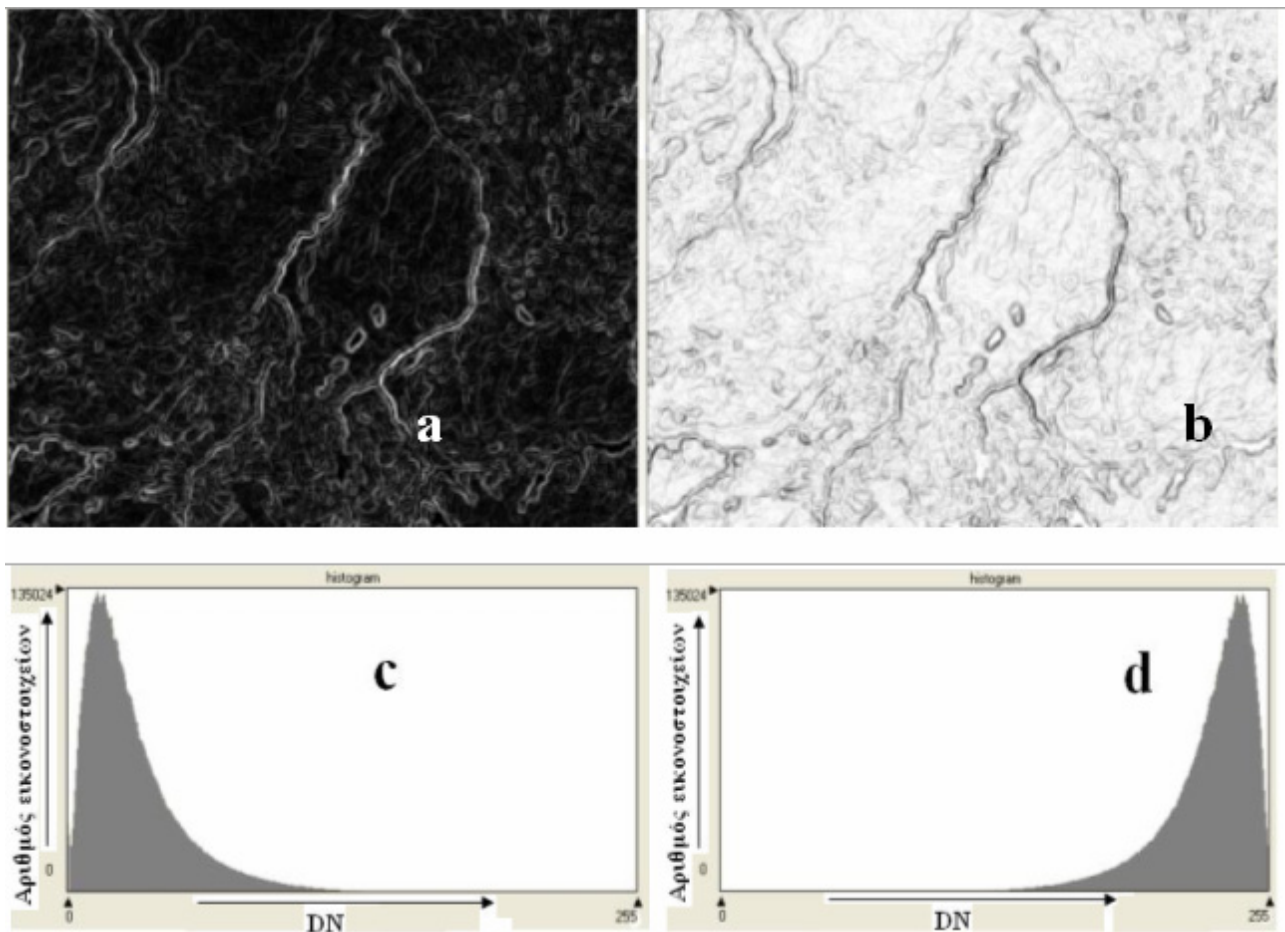
**Σχήμα 5.12:** Διαδοχική τροποποίηση του ιστογράμματος της φιλτραρισμένης εικόνας με τη βοήθεια του Breakpoint editor του Erdas. Ο οριζόντιος άξονας αφορά στις θετικές/αρνητικές τιμές που προέκυψαν από το χωρικό φιλτράρισμα της εικόνας (file pixel values). Ο κατακόρυφος άξονας αφορά στην προσαρμογή των τιμών αυτών στην κλίμακα 0-255 (Look-Up Table, LUT values) καθώς και στη συχνότητα εμφάνισής τους στην εικόνα (αριθμός εικονοστοιχείων).



**Σχήμα 5.13:** Διαδοχική τροποποίηση του ιστογράμματος της φιλτραρισμένης εικόνας με τη βοήθεια του Breakpoint editor του Erdas. f) Δυαδική κατάτμηση εικόνας και ανάδειξη ρηγμάτων BA-ΝΔ διευθύνσεως.

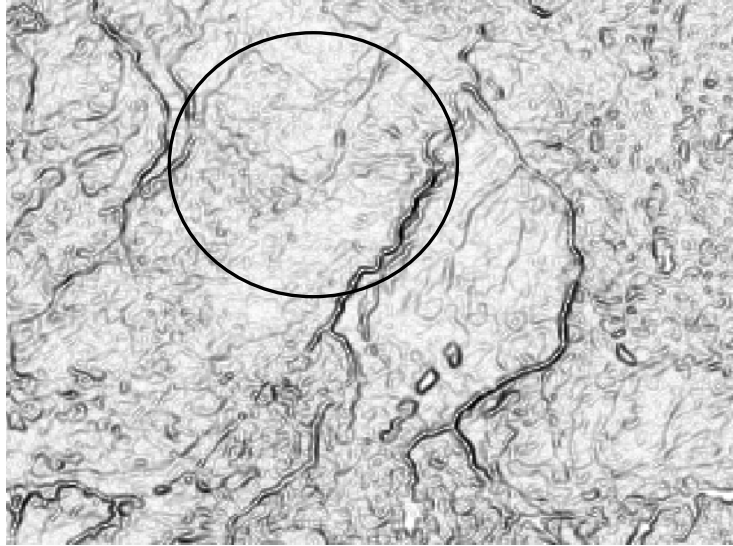
### 5.3.2 Εφαρμογή φίλτρου Sobel

Στο Σχήμα 5.14-a παρουσιάζεται η εικόνα που προέκυψε μετά την εφαρμογή του φίλτρου Sobel στην εικόνα **B**. Μετά από αντιστροφή της φωτεινότητας οι τιμές του ιστογράμματος της φιλτραρισμένης εικόνας (Σχήμα 5.14-c) προβλήθηκαν στο δεξί τμήμα της οθόνης (Σχήμα 5.14-d). Οι απότομες κλίσεις απεικονίζονται με χαμηλές τιμές φωτεινότητας σε ένα φωτεινό πλέον υπόβαθρο (Σχήμα 5.14-b).



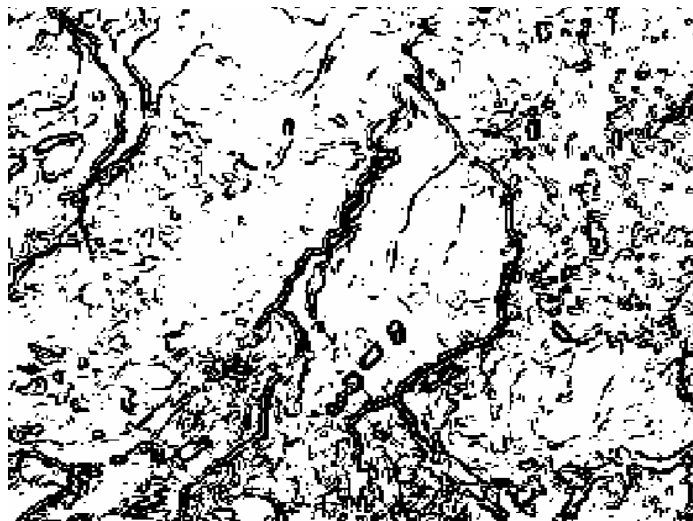
**Σχήμα 5.14:** **a)** Εφαρμογή φίλτρου Sobel στην εικόνα **B**, **b)** φιλτραρισμένη εικόνα μετά από αντιστροφή φωτεινότητας, **c)** ιστόγραμμα εικόνας **a** και **d)** ιστόγραμμα εικόνας **b**.

Πολλαπλασιάζοντας την εικόνα του Σχήματος 5.14-b με τον εαυτό της πραγματοποιήθηκε ενίσχυση ακμών που αρχικά ήταν δύσκολο να διακριθούν (Σχήμα 5.15).



**Σχήμα 5.15:** Περαιτέρω ενίσχυση ακμών μετά από πολλαπλασιασμό της φιλτραρισμένης εικόνας με τον εαυτό της.

Επιλέγοντας μια τιμή αποκοπής κάτω από την οποία ορίζονταν οι γραμμώσεις – ενδεχόμενες ρηξιγενείς δομές προέκυψε η δυαδική κατάτμηση της φιλτραρισμένης εικόνας (Σχήμα 5.16).



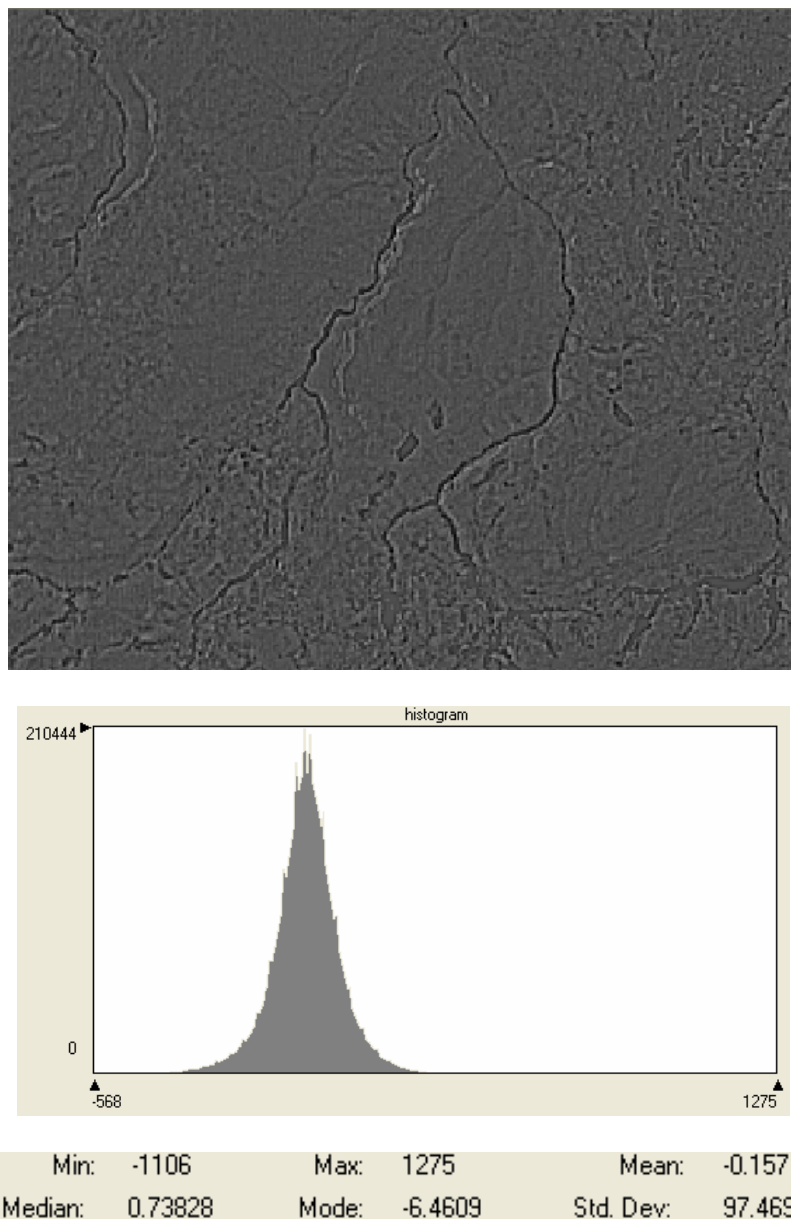
**Σχήμα 5.16:** Δυαδική κατάτμηση εικόνας φίλτρου Sobel.

### 5.3.3 Εφαρμογή φίλτρου Laplace

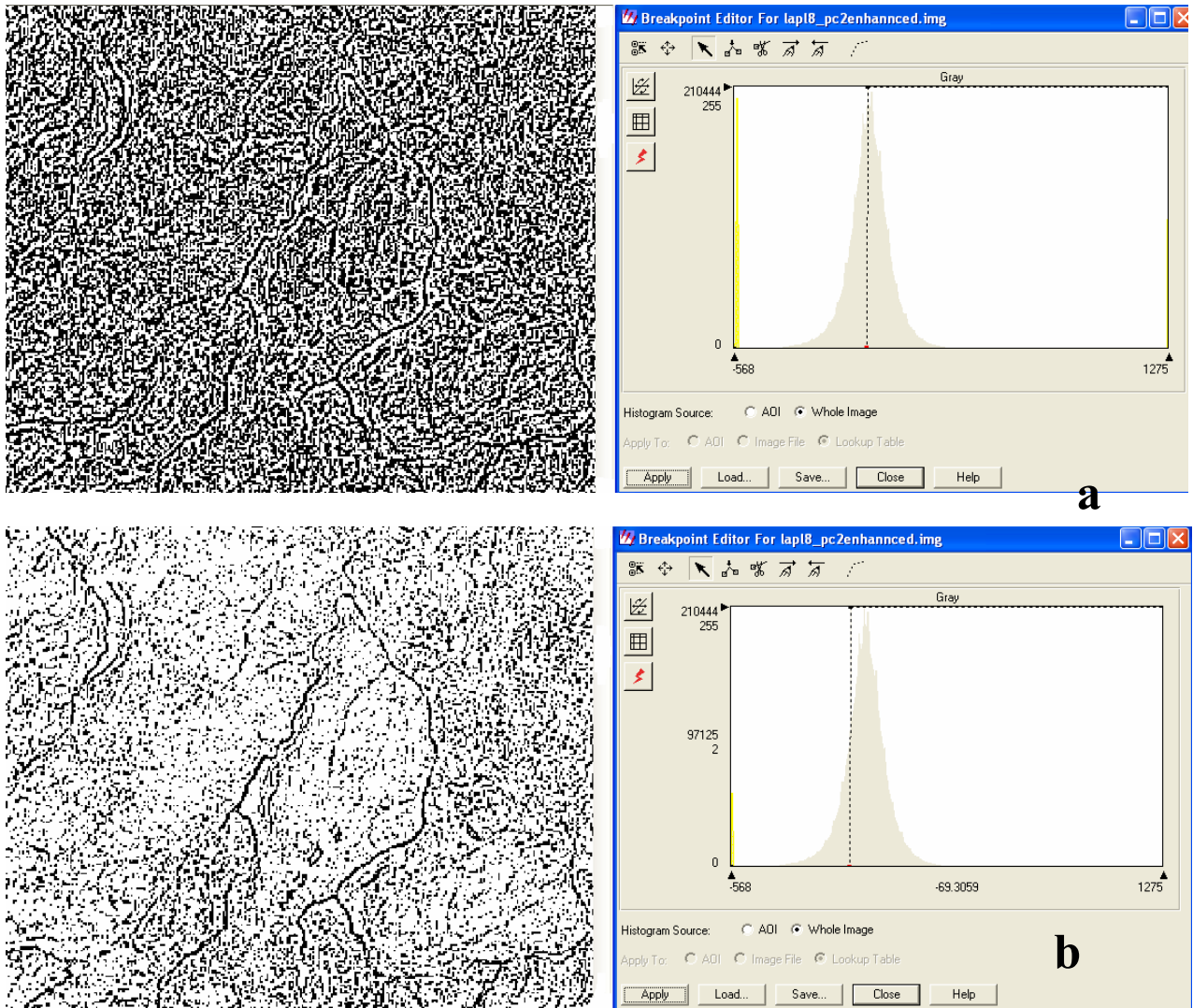
Τα φίλτρα δεύτερης παραγώγου (φίλτρα Laplace), εντοπίζουν τις απότομες μεταβολές στις τιμές φωτεινότητας με τον προσδιορισμό της θέσης μηδενισμού της συνάρτησης της παραγώγου. Αυτό σημαίνει ότι η ανάδειξη μιας ακμής πραγματοποιείται με την εναλλαγή ενός τοπικού μεγίστου διαδοχικά με ένα τοπικό ελάχιστο και μερικές μηδενικές τιμές ( $DN = 0$ ) κατά περίπτωση στην κορυφή της ακμής.

Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Laplace στην εικόνα **B**. Η κατάτμηση της εικόνας πραγματοποιήθηκε με απόδοση νέας τιμής φωτεινότητας  $DN_{\text{new}} = 0$  σε όλα τα εικονοστοιχεία της φιλτραρισμένης εικόνας για τα οποία το αποτέλεσμα της παραγωγίσης ήταν αρνητικό, δηλαδή  $DN < 0$  (Σχήμα 5.18-a). Κατά αυτό τον τρόπο προσδιορίστηκαν όλα τα αρνητικά τμήματα των ακμών.

Στην πραγματικότητα βέβαια με αυτή τη μέθοδο δεν αναδεικνύεται η ακριβής θέση των ακμών. Επιπροσθέτως ενισχύεται ο θόρυβος στη φιλτραρισμένη εικόνα και είναι δύσκολο να ερμηνεύσει κανείς το αποτέλεσμα επί της οθόνης. Με τη βοήθεια του Breakpoint Editor του Erdas ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πειραματιστεί ορίζοντας διαφορετικά, κάθε φορά, όρια αποκοπής (Σχήμα 5.18-b).



**Σχήμα 5.17:** Εφαρμογή φίλτρου Laplace στην εικόνα **B** (πάνω) και ιστόγραμμα φιλτραρισμένης εικόνας (κάτω).



**Σχήμα 5.18:** Διαδικασία κατάτμησης εικόνας φίλτρου Laplace με τη βοήθεια του Breakpoint editor του Erdas.

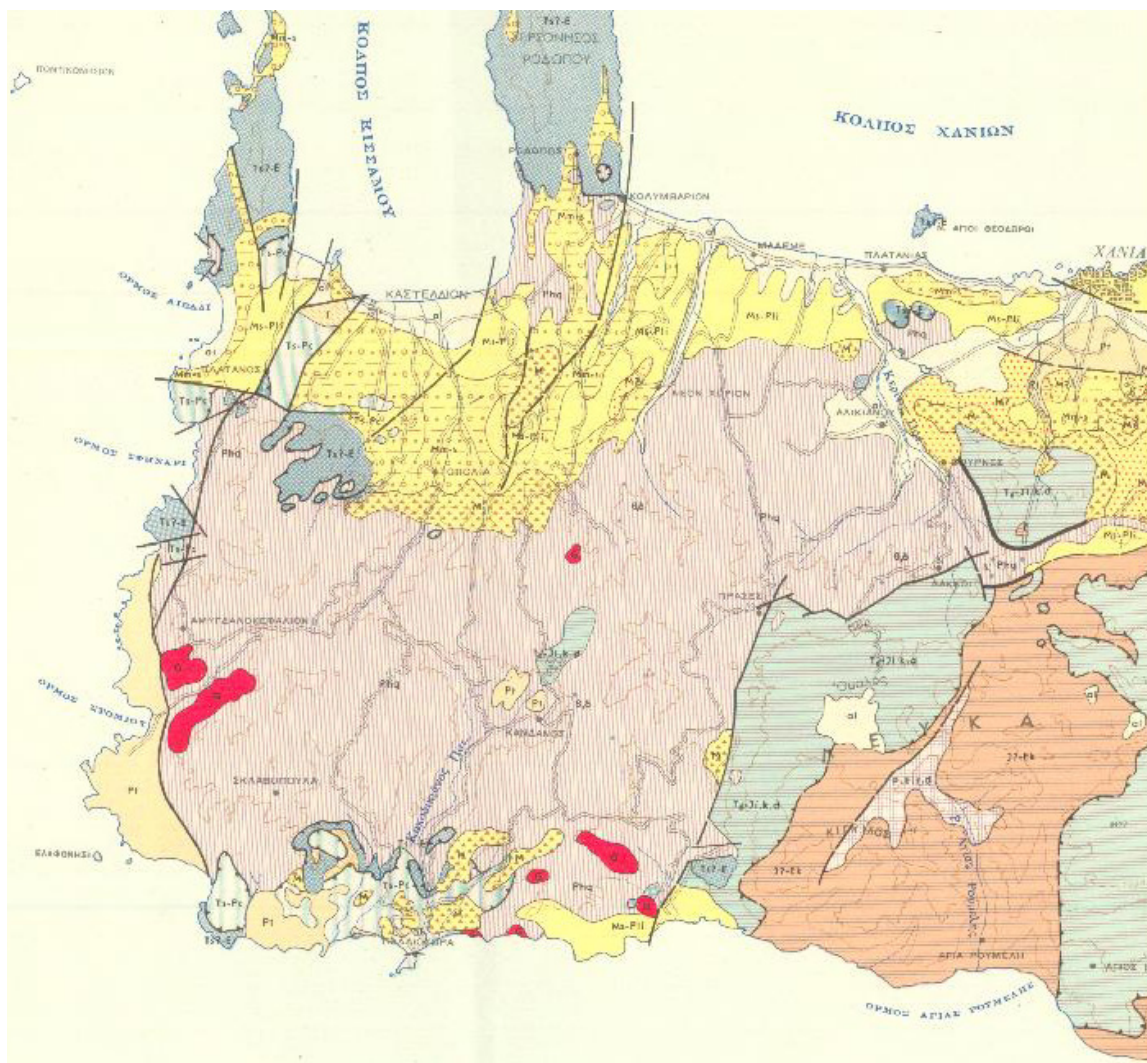
Αντιλαμβάνεται κανείς ότι σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμογής χωρικών φίλτρων απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των ορίων μια και τα ρήγματα δεν απαντούν σε όλη την εικόνα με τον ίδιο τρόπο. Έτσι κάποια ρήγματα αναδεικνύονται κάποια άλλα όμως τα οποία δεν σχετίζονται με απότομες κλίσεις του αναγλύφου ή δεν κατακρατούν υγρασία δεν γίνονται αντιληπτά.

## **5. 4 Φωτοερμηνεία – έρευνα στο πεδίο**

Η φωτοερμηνεία του πεδίου κατόπτρευσης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των:

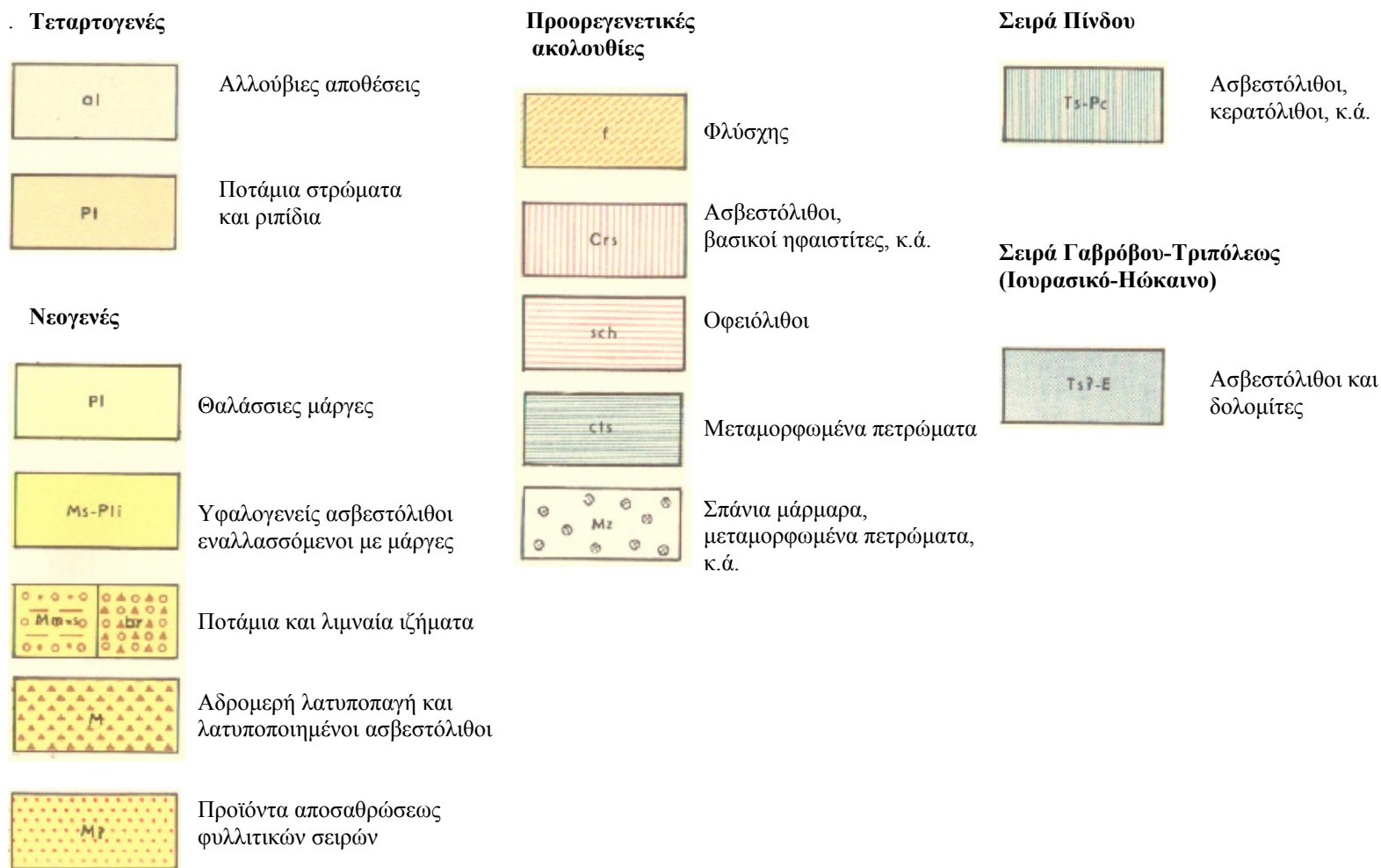
- ☒ Εικόνα PC2, που προέκυψε από την ανάλυση των κύριων συνιστωσών για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR (Εικόνα **B**, Ενότητα 5.3). Στην εν λόγω εικόνα, η διαφοροποίηση μεταξύ των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης είναι ευδιάκριτη (Σχήματα 5.19-5.21).
- ☒ Εικόνα **A** (Ενότητα 5.3). Η εικόνα αυτή αναδεικνύει το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής (Σχήμα 5.22). Οι χαμηλές τιμές φωτεινότητας αφορούν στη βλάστηση που αναπτύσσεται κατά μήκος της κοίτης των ποταμών. Αν και η εικόνα **A** δεν ενδείκνυται για την χαρτογράφηση της κατανομής των γεωλογικών σχηματισμών, αποδίδει περισσότερη ραδιομετρική λεπτομέρεια εντός των καλλιεργήσιμων περιοχών (μάργες). Συνεπώς, δύναται να χρησιμοποιηθεί για μια λεπτομερέστερη φωτοερμηνεία των περιοχών που καλύπτονται από χαλαρά, κυρίως, ιζήματα.
- ☒ Σύνθετη ψευδοχρωματική απεικόνιση της περιοχής μελέτης στο σύστημα RGB (κανάλι 8-Red, κανάλι 3N-Green, κανάλι 1-Blue). Στην εικόνα του Σχήματος 5.23, τα συμπαγή πετρώματα και τα ξηρά, γενικά, εδάφη εμφανίζουν ένα κοκκινωπό-ροζ χρώμα. Τα νεογενή και γενικότερα τα υγρά εδάφη, εμφανίζουν διάφορες αποχρώσεις του πράσινου.

Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.



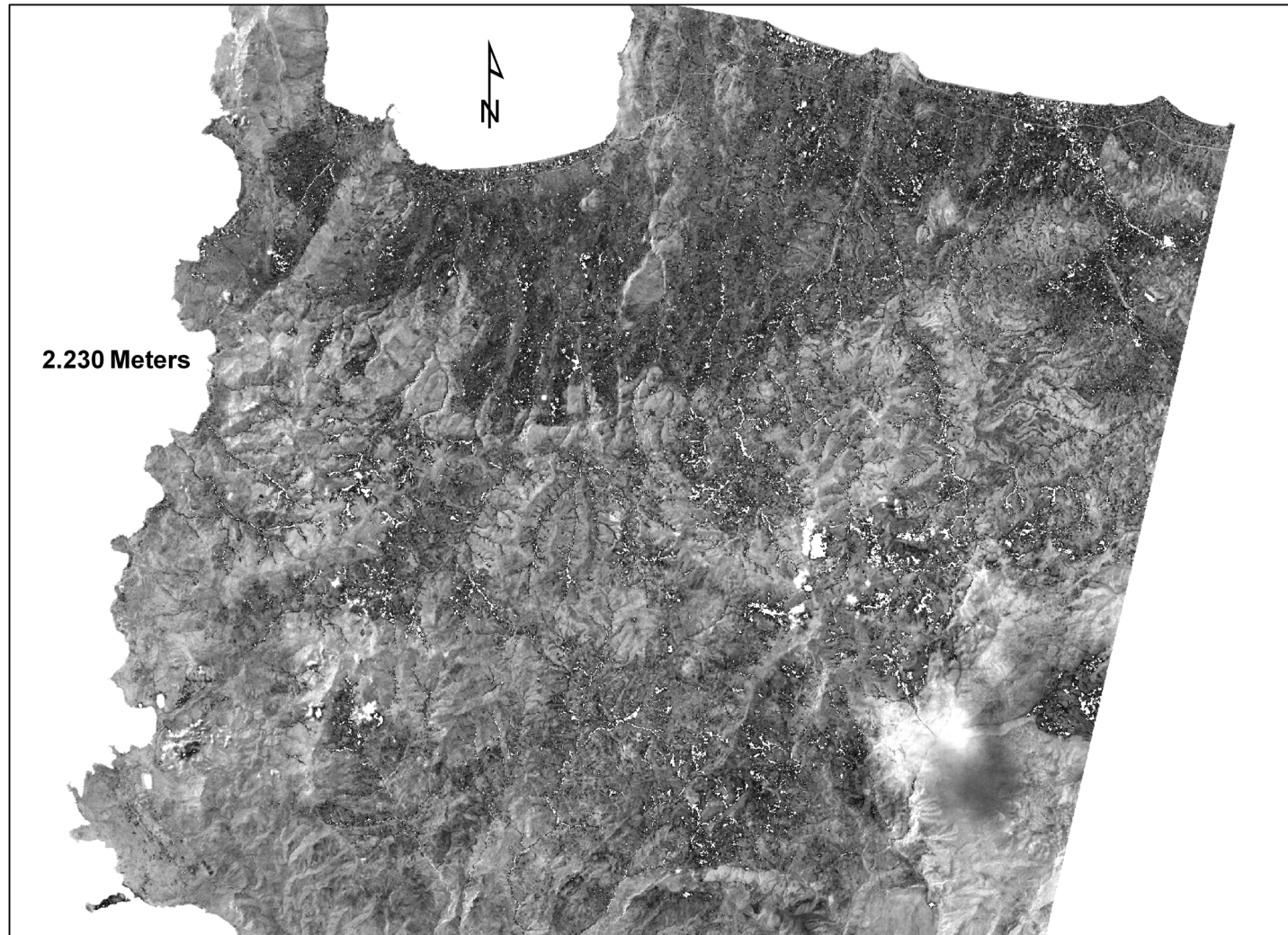
**Σχήμα 5.19:** Γενικός γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης, κλίμακας 1:200.000 (ΙΓΜΕ, 1977). Για τη χαρτογράφηση έχουν χρησιμοποιηθεί μερικώς τα αντίστοιχα φύλλα της Κρήτης 1:50.000

Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.



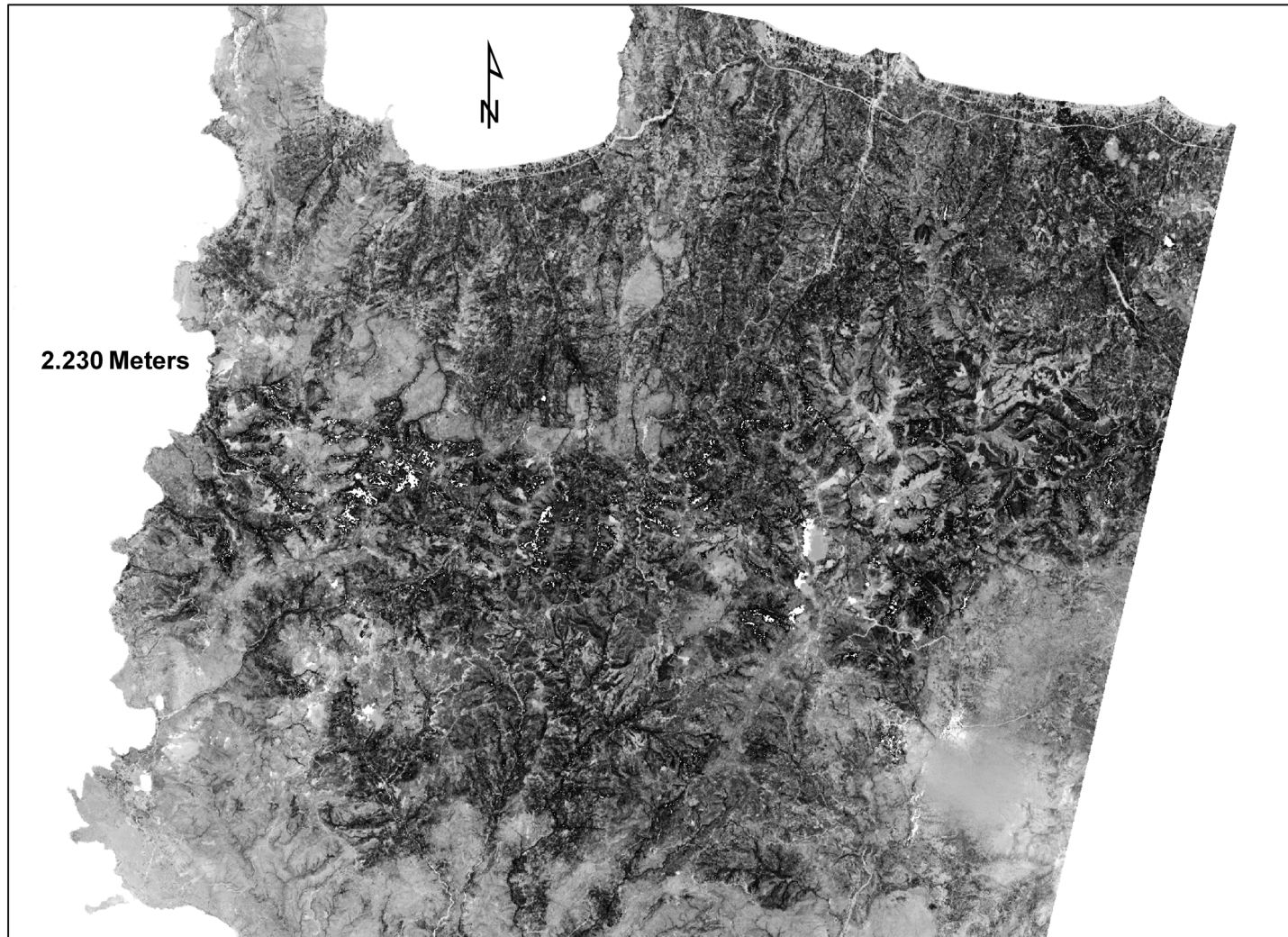
Σχήμα 5.20: Υπόμνημα γενικού γεωλογικού χάρτη κλίμακας 1:200.000.

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



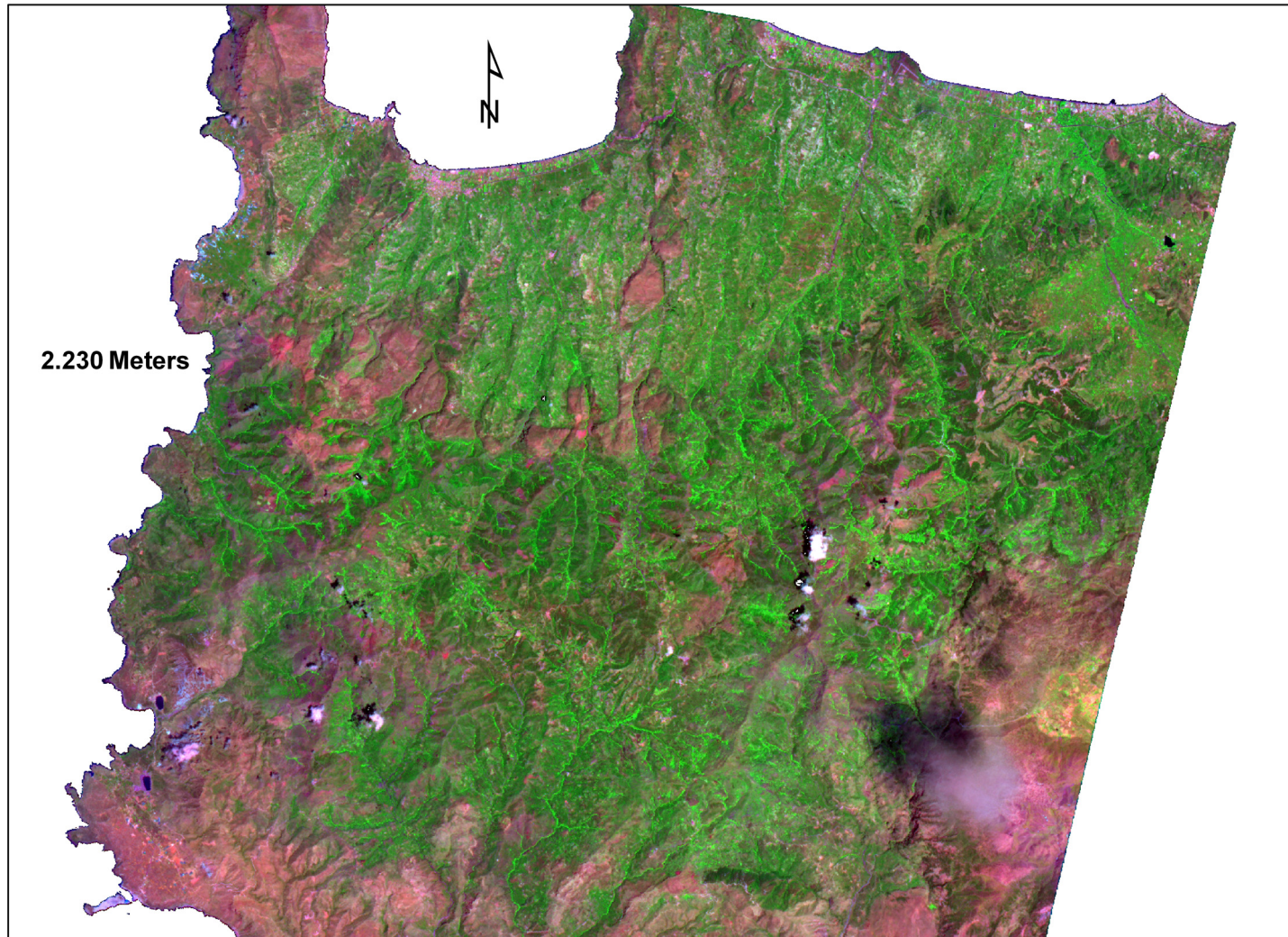
**Σχήμα 5.21:** Εικόνα Β. Ενδείκνυται για χαρτογράφηση των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών. Τα πιο συμπαγή πετρώματα (π.χ., ασβεστόλιθοι) παρουσιάζουν υψηλές τιμές φωτεινότητας. Με χαμηλές τιμές του τόνου του γκρι απεικονίζονται κυρίως οι μάργες και τα υγρά εδάφη.

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



**Σχήμα 5.22:** Εικόνα Α. Το υδρογραφικό δίκτυο εμφανίζει τόσο υψηλές (π.χ., Ταυρωνίτης ποταμός) όσο και χαμηλές τιμές φωτεινότητας. Οι σκοτεινοί τόνοι του γκρι οφείλονται στην ανάπτυξη της βλάστησης κατά μήκος της κοίτης των ποταμών.

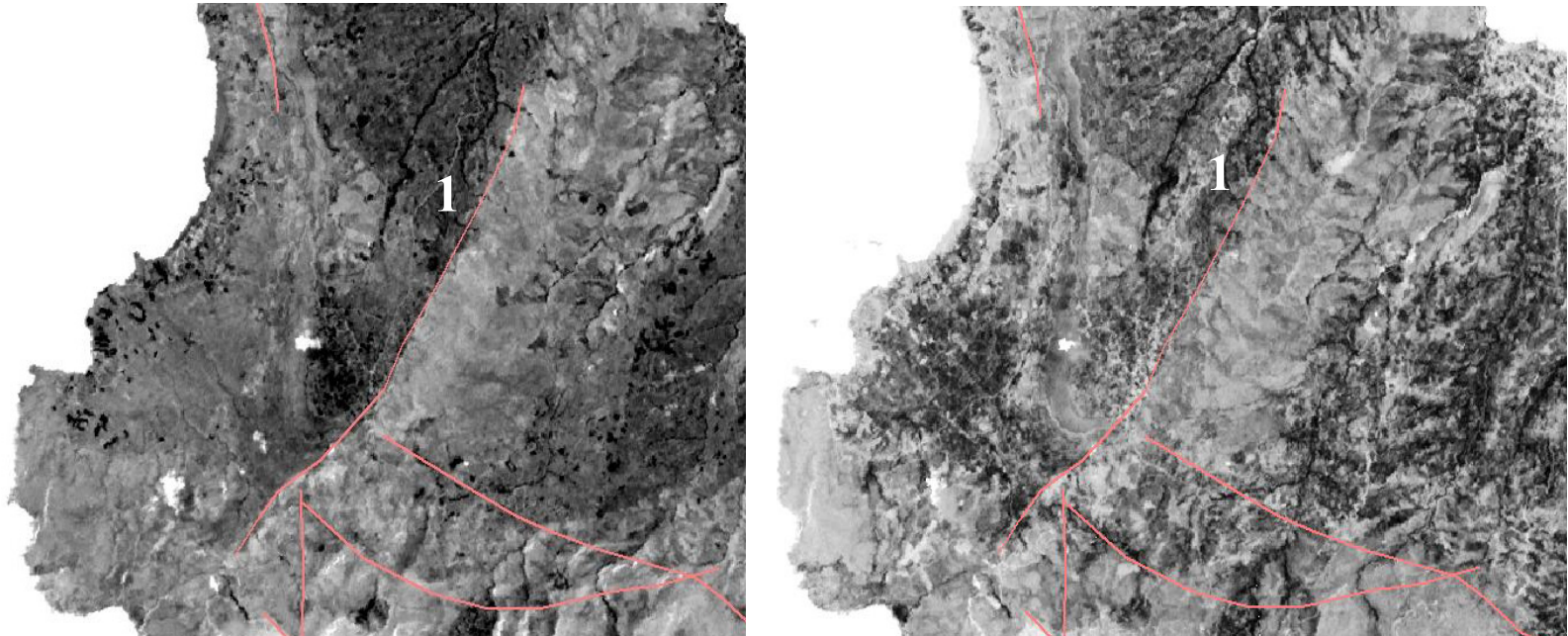
*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



**Σχήμα 5.23:** Απόδοση φασματικής πληροφορίας με χρώματα (RGB = Κανάλι8, Κανάλι3N, Κανάλι1).

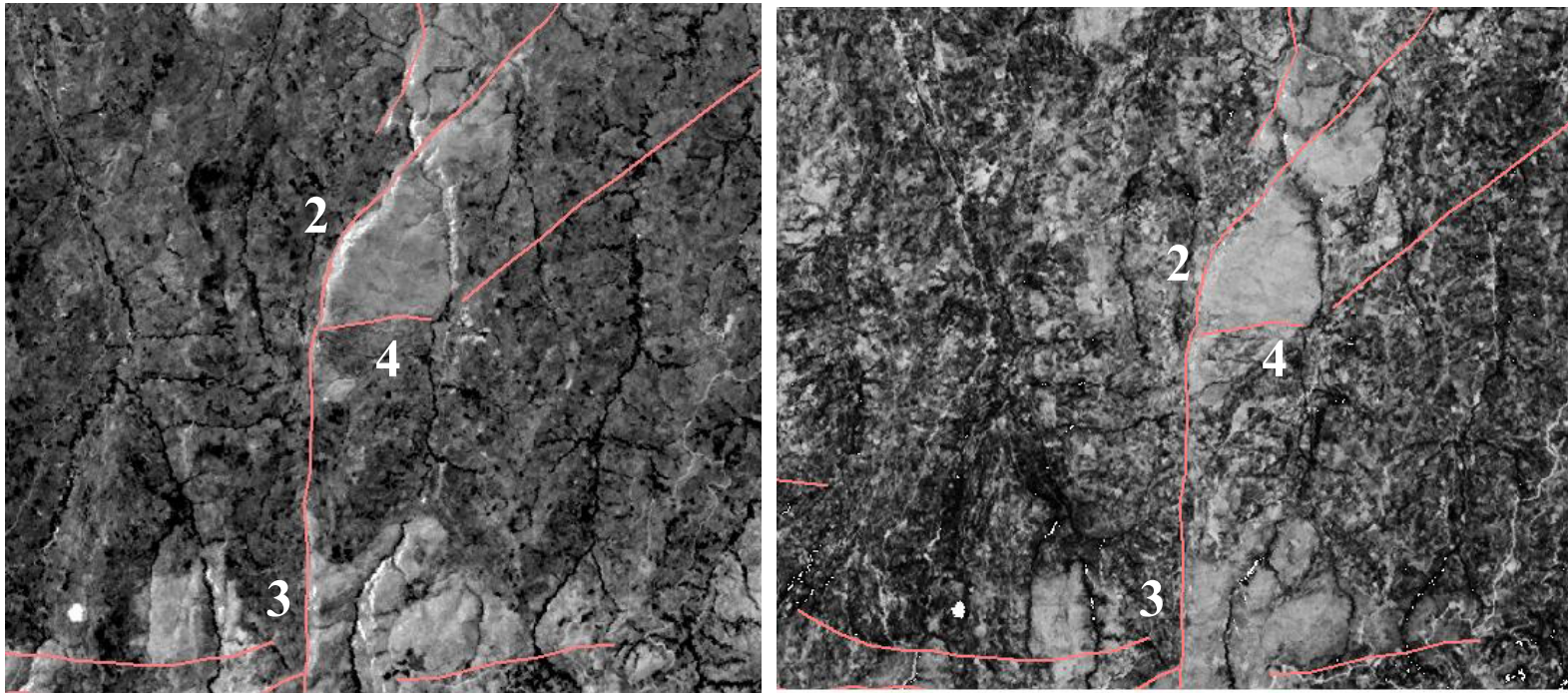
Η φωτοερμηνεία των παραπάνω εικόνων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι γραμμώσεις γεωλογικής προελεύσεως (ρήγματα) δεν αναδεικνύονται με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις εικόνες. Σε ορισμένες περιπτώσεις η ύπαρξη ενός ρήματος συνιστά γεωλογικό όριο μεταξύ πετρωμάτων παλαιότερης ηλικίας (π.χ., ασβεστόλιθοι Σειράς Πίνδου) με τα νεότερης ηλικίας ιζηματογενή (π.χ., μάργες). Στα Σχήματα 5.24-5.26, παρουσιάζονται παραδείγματα ανάδειξης της θέσης ρηγμάτων, μέσω παρατηρήσεων της γεωλογίας (όρια γεωλογικών σχηματισμών διαφορετικής ηλικίας). Η αξιολόγηση των γραμμώσεων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των γεωλογικών χαρτών του ΙΓΜΕ (κλίμακα 1:200.000 και 1:50.000).

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



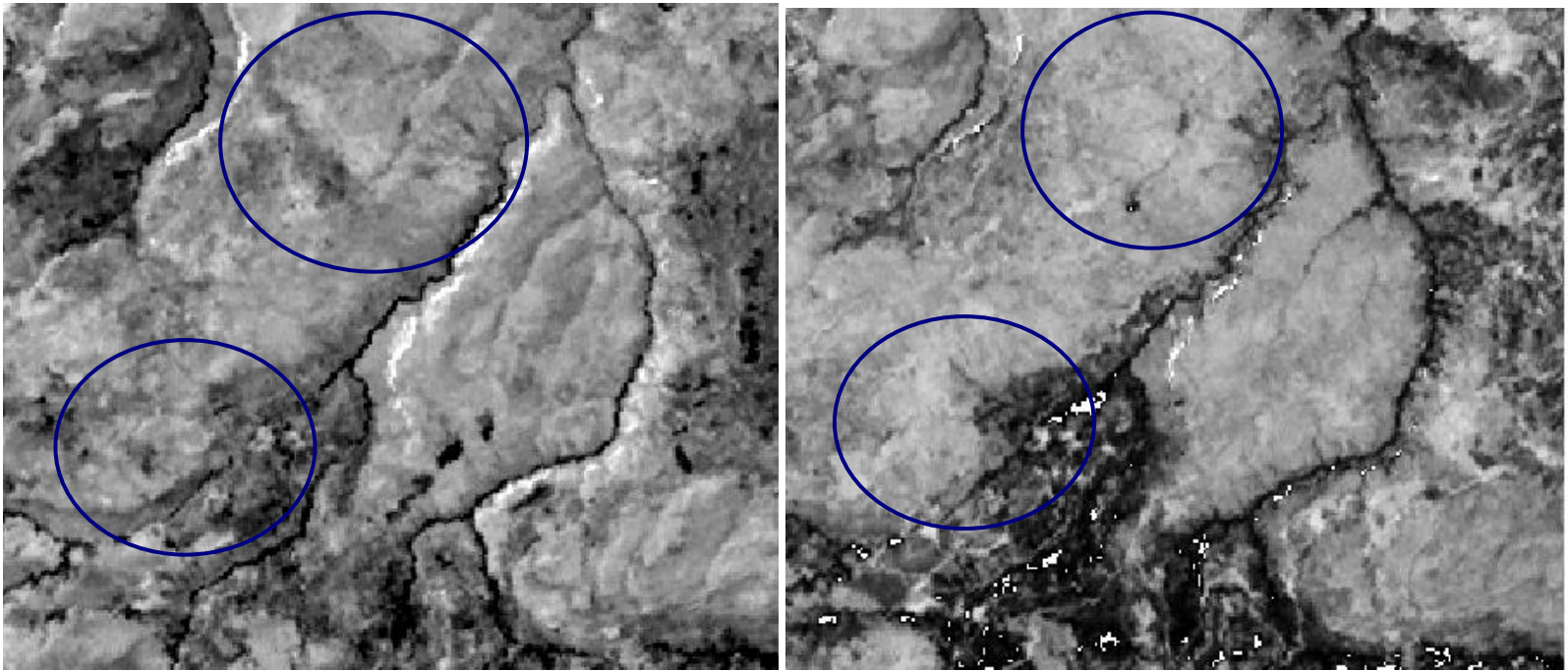
**Σχήμα 5.24:** Αριστερά: Εικόνα **B**. Η γράμμωση στη θέση *1* (ανατολικά από το χωριό Πλάτανος), αφορά σε γεωλογικό όριο μεταξύ των ασβεστολίθων της Σειράς Πίνδου με τα νεογενή ιζήματα. Αυτού του είδους η γεωλογική επαφή αναδεικνύει τη ρήξη του φλοιού στην εν λόγω θέση. Δεξιά: Η ίδια γράμμωση, *1*, δεν είναι ευδιάκριτη στην εικόνα **A**.

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



**Σχήμα 5.25:** Αριστερά: Εικόνα **B**. Οι γραμμές 2, 3 και 4 αφορούν σε ρήξη του γήινου φλοιού η οποία έχει φέρει σε επαφή τα ασβεστολιθικά πετρώματα της ζώνης Τριπόλεως με τους Μειοκαινικούς μαργαϊκούς ασβεστολίθους. Δεξιά: Οι ίδιες γραμμές δεν είναι τόσο ευδιάκριτες στην εικόνα **A**.

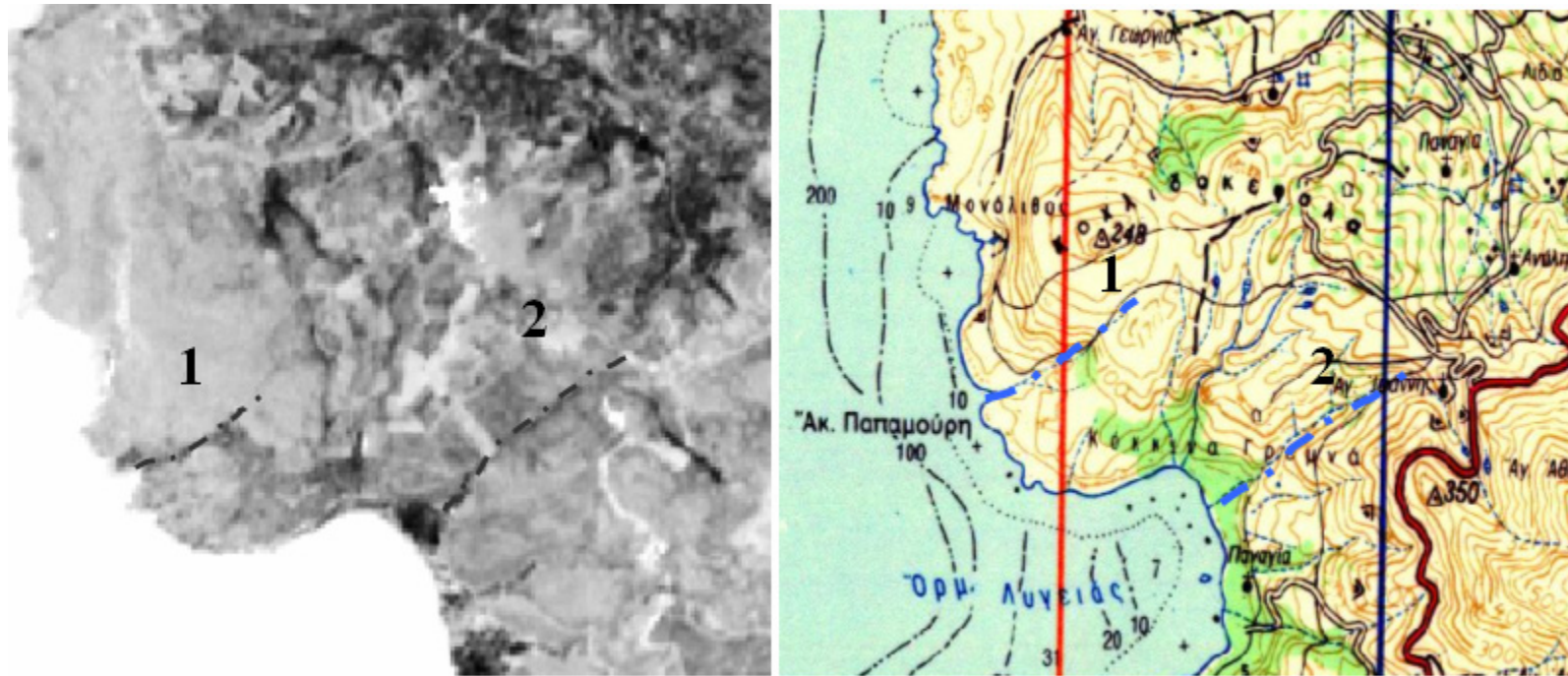
*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



**Σχήμα 5.26:** Αριστερά: Εικόνα **B**. Δεξιά: Εικόνα **A**. Οι γραμμώσεις δεν αναδεικνύονται με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις εικόνες.

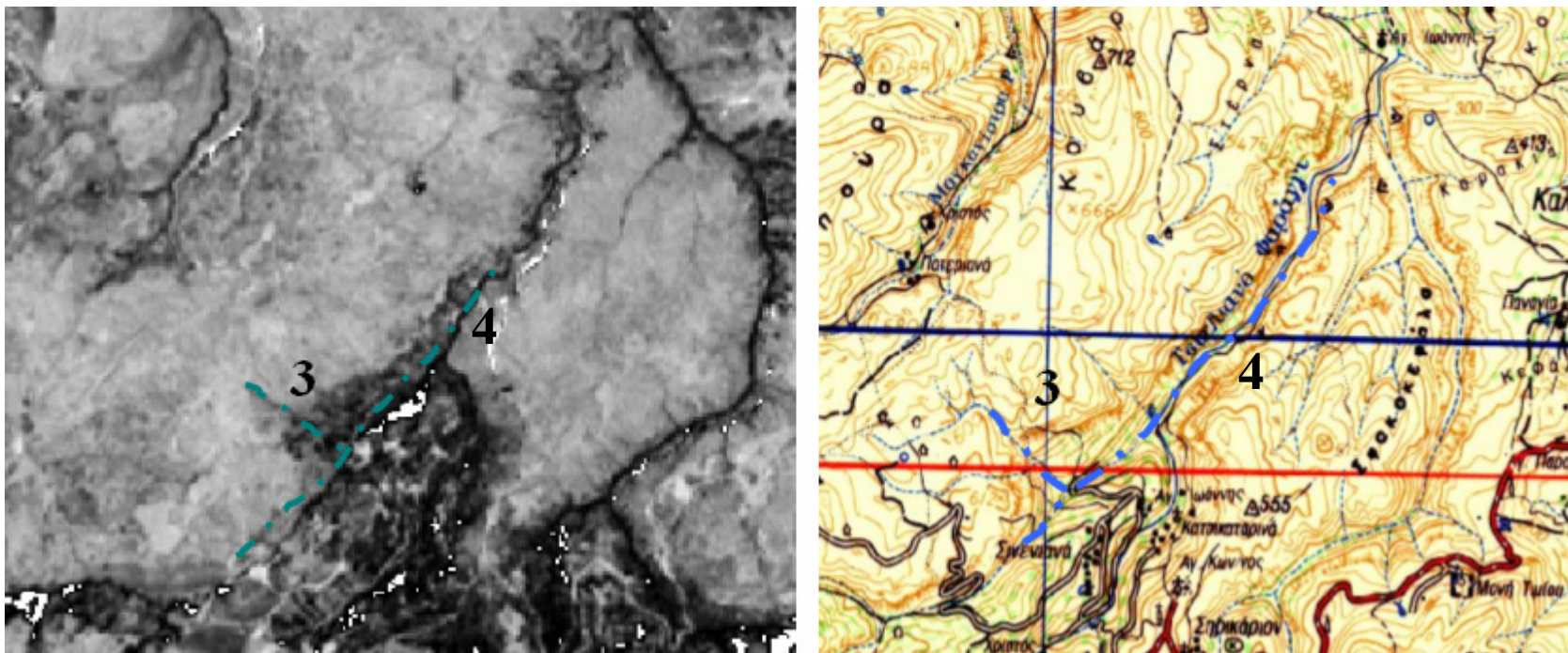
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήματα 5.27-5.31) παρουσιάζονται παραδείγματα του τρόπου με τον οποίο αναδεικνύεται η θέση ρηγμάτων από παρατηρήσεις του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής (τεκτονικές κοιλάδες, ευθύγραμμα τμήματα αποστράγγισης, απότομες εκτροπές της ροής των ρεμάτων) και της επιμήκους ανάπτυξης της βλάστησης λόγω της συγκέντρωσης υγρασίας κατά μήκος των ρηξιγενών δομών. Οι γραμμώσεις 1 έως 8 στα Σχήματα 5.27-5.31, αξιολογήθηκαν ως ρήγματα με τη βοήθεια των τοπογραφικών χαρτών της ΓΥΣ (κλίμακα 1:50.000) και των γεωλογικών χαρτών του ΙΓΜΕ (κλίμακα 1:50.000).

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



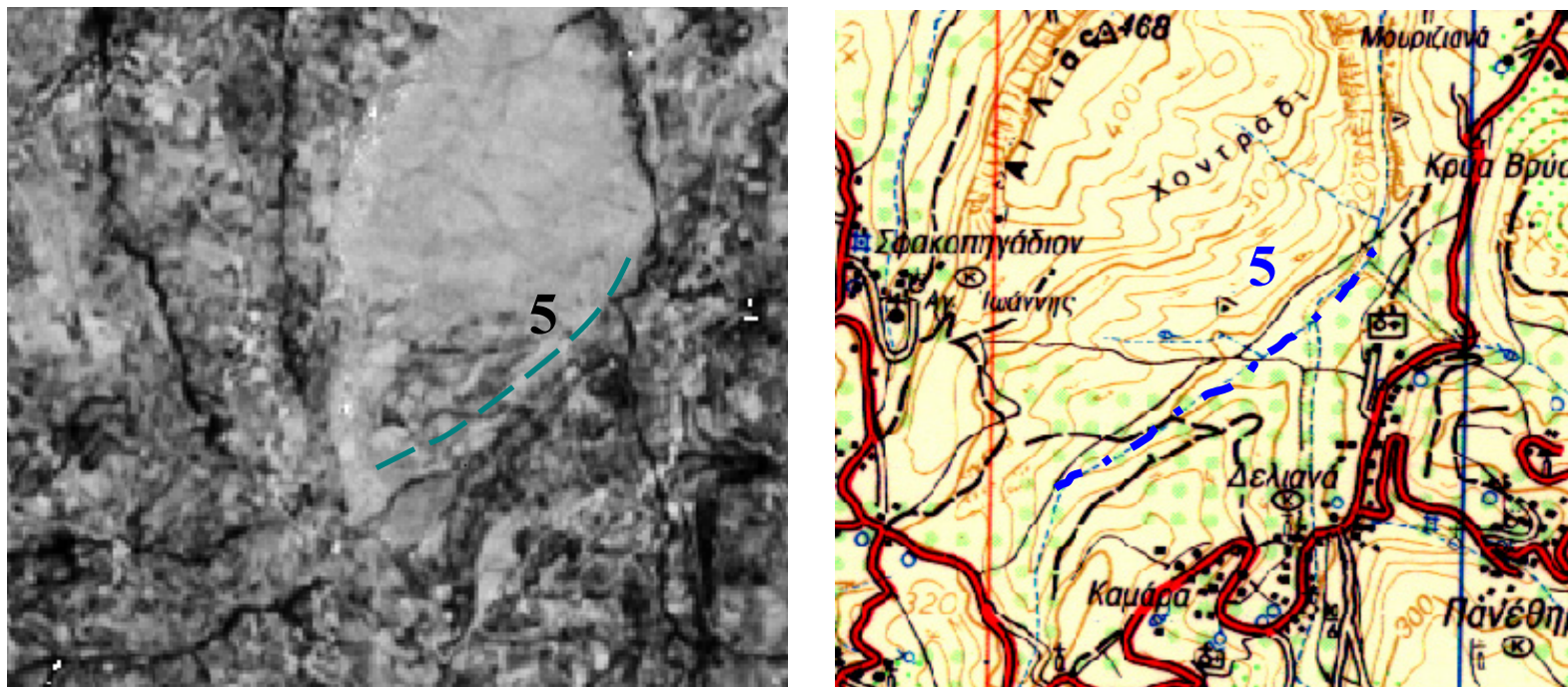
**Σχήμα 5.27:** Αριστερά: Εικόνα Α (Περιοχή Σφηναρίου). Ανάδειξη υδρογραφικού δικτύου ελεγχόμενου από ρήγματα (θέσεις 1 & 2). Δεξιά: Σύγκριση θέσεων 1 & 2 με αντίστοιχο τοπογραφικό χάρτη της περιοχής (φύλλο Παλαιόχωρας).

Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.



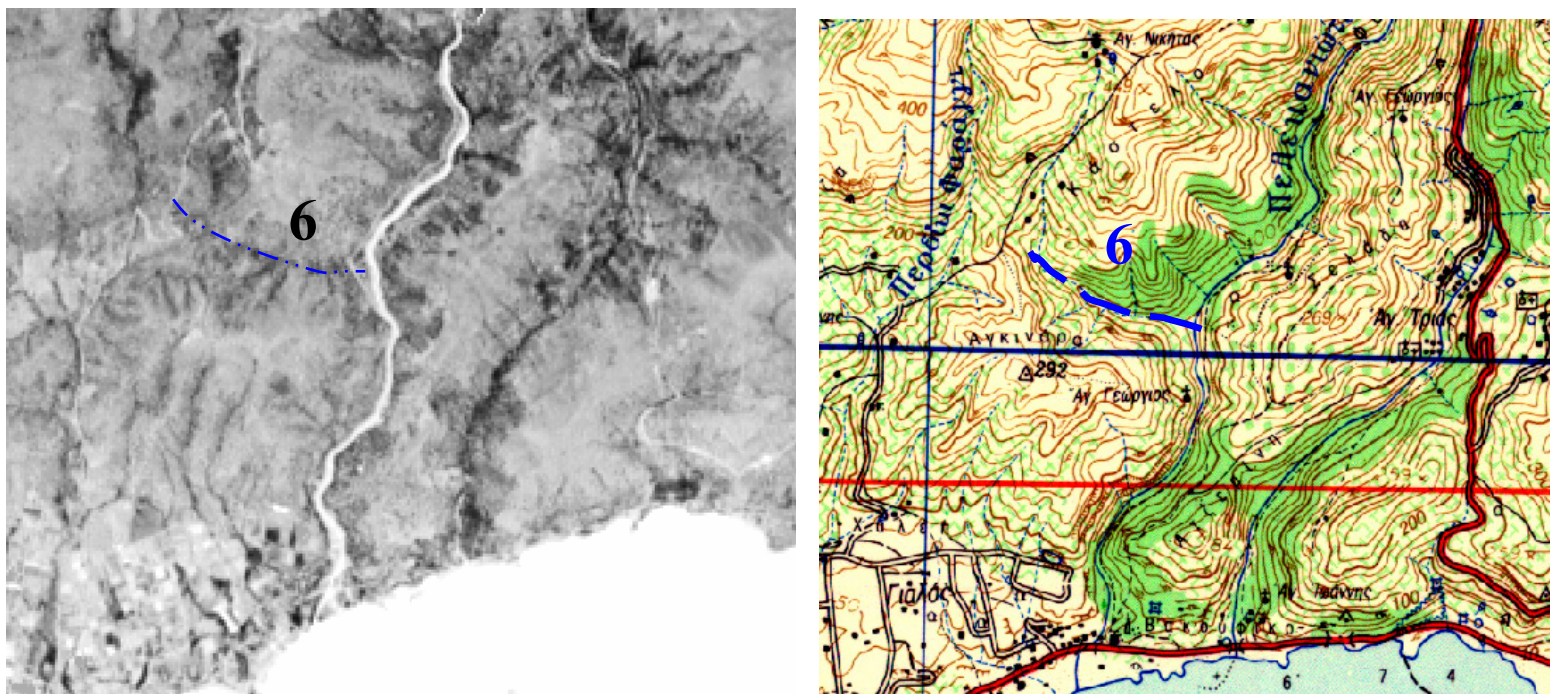
Σχήμα 5.28: Παράδειγμα απότομης εκτροπής της ροής ρέματος (θέση 3) και τεκτονικής κοιλάδας (θέση 4) .

Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.

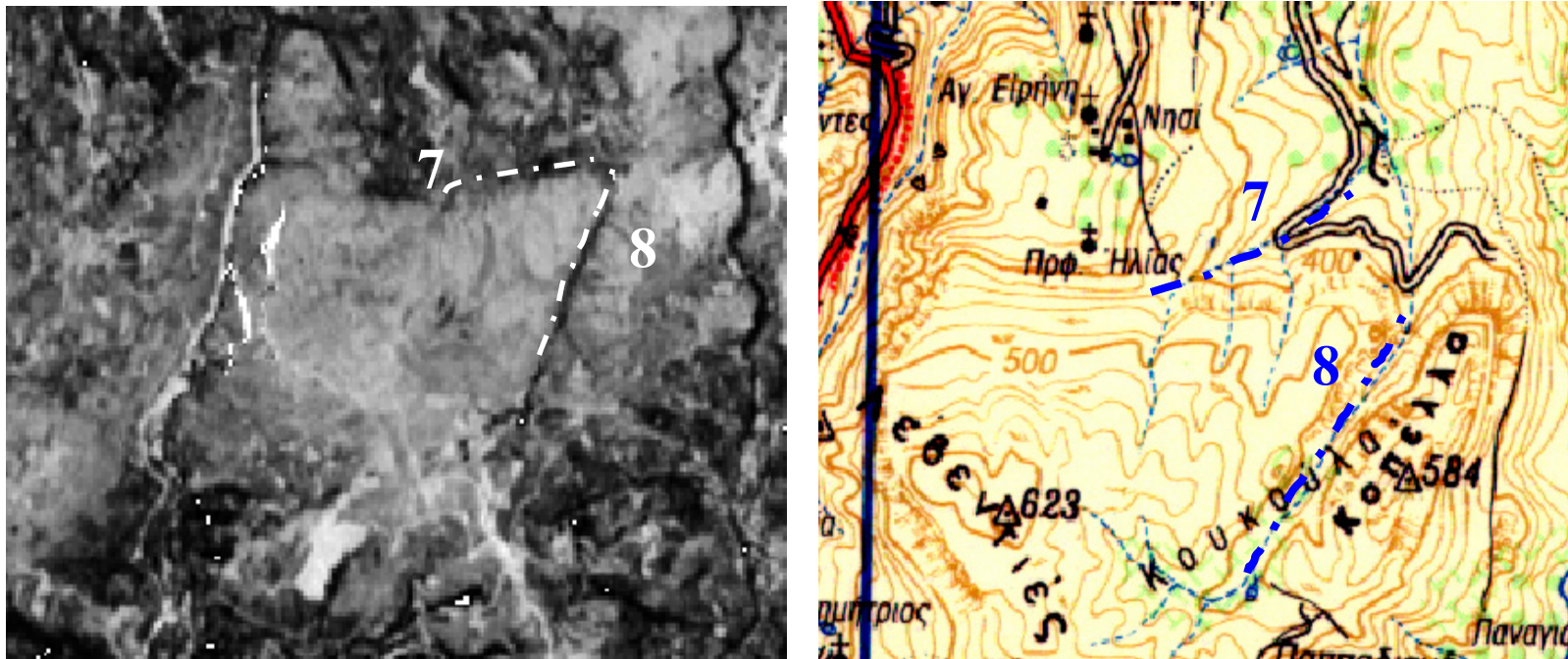


**Σχήμα 5.29:** Παράδειγμα απότομης εκτροπής της ροής ρέματος λόγω ύπαρξης ρήγματος.

*Ανάλυση & αξιολόγηση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δ. Κρήτη.*



**Σχήμα 5.30:** Παράδειγμα απότομης εκτροπής της ροής ρέματος λόγω ύπαρξης ρήγματος.

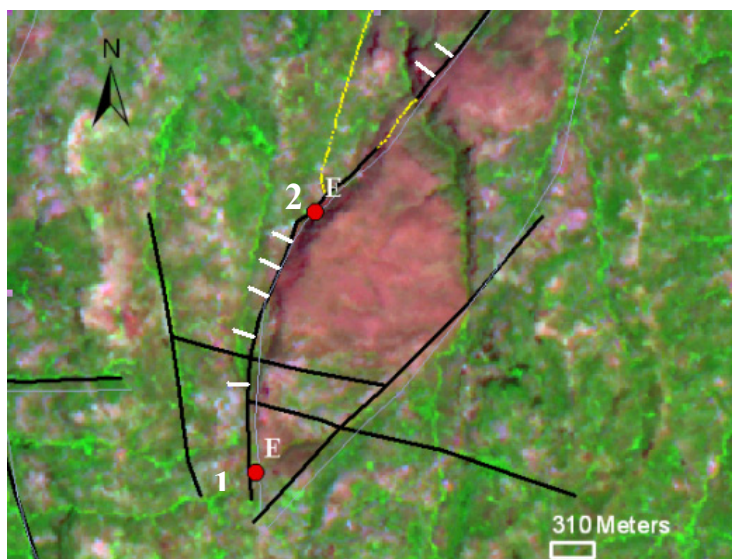


**Σχήμα 5.31:** Παράδειγμα ανάδειξης υδρογραφικού δικτύου ελεγχόμενου από ρήγματα. Τεκτονική κοιλάδα (θέση 7) και απότομη εκτροπή της ροής ρέματος (θέση 8).

Η εργασία ολοκληρώθηκε με έρευνα στο πεδίο. Στόχος της ήταν να διαπιστωθούν οι λόγοι για τους οποίους κάποια ρήγματα που έχουν χαρτογραφηθεί από το ΙΓΜΕ, αν και είναι μεγάλα σε διαστάσεις (μήκος > 2km), δεν γίνονται εύκολα αντιληπτά στις εικόνες. Για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των θέσεων των ρηγμάτων, που μελετήθηκαν από επιτόπιες παρατηρήσεις, χρησιμοποιήθηκε GPS (Global Positioning System). Οι συντεταγμένες υπολογίστηκαν σε ΕΓΣΑ '87.

Στα Σχήματα 5.32, 5.38 και 5.41 παρουσιάζονται τμήματα της σύνθετης ψευδοχρωματικής απεικόνισης στο σύστημα RGB (κανάλι 8-Red, κανάλι 3N-Green, κανάλι 1-Blue) μετά από υπέρθεση των ρηγμάτων του ΙΓΜΕ. Με μαύρο χρώμα απεικονίζονται τα ορατά ρήγματα, με κίτρινο τα πιθανά ενώ με γκρι χρώμα έχουν αποδοθεί τα ρήγματα που χαρτογραφήθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος EMERIC I.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση των ρηγμάτων στις θέσεις 1 & 2 του Σχήματος 5.32 (χωριά Κερά και Ρόκκα αντίστοιχα). Η θέση του εν λόγω ρήγματος γίνεται αντιληπτή από το απότομο τοπογραφικό ανάγλυφο και τις έντονες σκιάσεις που δημιουργεί κατά τόπους (Σχήματα 5.33-35, 5.37). Όπως προέκυψε από την ανάλυση της εικόνας **B** (Σχήμα 5.25), το ρήγμα αφορά σε γεωλογικό όριο μεταξύ ασβεστολιθικών πετρωμάτων της ζώνης Τριπόλεως και μαργαϊκών ασβεστολίθων ηλικίας Μέσο-Μειοκαίνου. Η ρήξη του φλοιού εκτείνεται βόρεια της Κεράς, με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, μέχρι την Επισκοπή.



**Σχήμα 5.32:** Σύνθετο RGB μετά από υπέρθεση των ρηγμάτων του ΙΓΜΕ. Οι θέσεις 1 & 2 υποδεικνύουν τις θέσεις όπου πραγματοποιήθηκε έρευνα υπαίθρου.



**Σχήμα 5.33:** Ρήγμα στην περιοχή Ρόκκα.



**Σχήμα 5.34:** Το ρήγμα γίνεται αντιληπτό από το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο και την οριοθέτησή του από τις καλλιέργειες.



**Σχήμα 5.35:** Το ρήγμα στην περιοχή Ρόκκα.

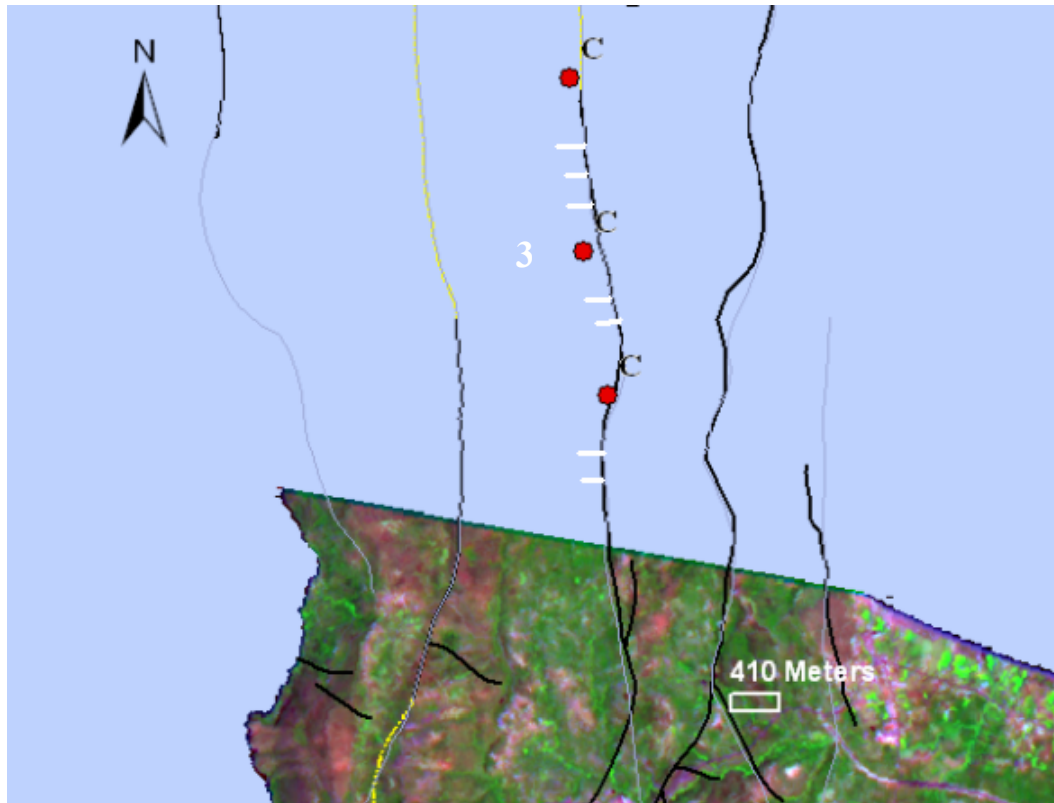


**Σχήμα 5.36:** Ο καθρέπτης του ρήγματος στη Ρόκκα, όπως έχει αποκαλυφθεί μετά από εκσκαφές των κατοίκων για τη δημιουργία καλλιεργειών.



**Σχήμα 5.37:** Το ρήγμα στην περιοχή Ρόκκα επεκτείνεται μέχρι το χωριό Κερά (θέση 1 Σχήματος 5.32).

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα μεγάλων διαστάσεων ρήγματα στην περιοχή του Ροδωπού (θέση 3 του Σχήματος 5.38). Αν και τα σημεία *C* που μετρήθηκαν με GPS είναι εκτός της περιοχής μελέτης, αξίζει να δούμε γιατί ρήγματα με όχι ιδιαίτερα έντονη τοπογραφική έκφραση (Σχήματα 5.39-5.40) δεν δύνανται να εντοπισθούν σε δορυφορικές εικόνες με χωρική ανάλυση όπως είναι αυτή του ASTER (15 m × 15 m).



Σχήμα 5.38: Χαρτογράφηση σημείων C όπως προσδιορίστηκαν μετά από επιτόπιες παρατηρήσεις.

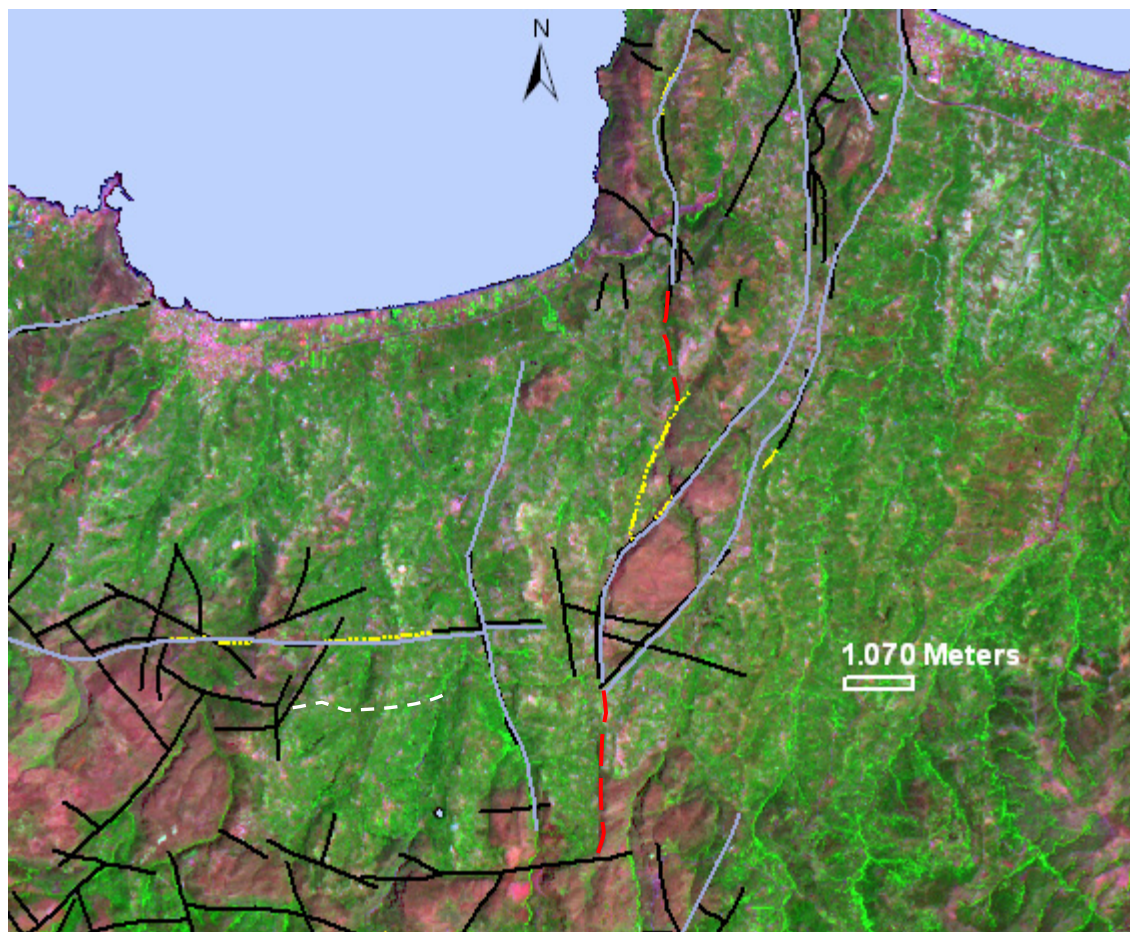


Σχήμα 5.39: Από γεωμορφολογικής απόψεως, το ρήγμα στην περιοχή Ροδωπού (δρόμος προς Άσπρα Νερά)) δεν γίνεται εύκολα αντιληπτό.



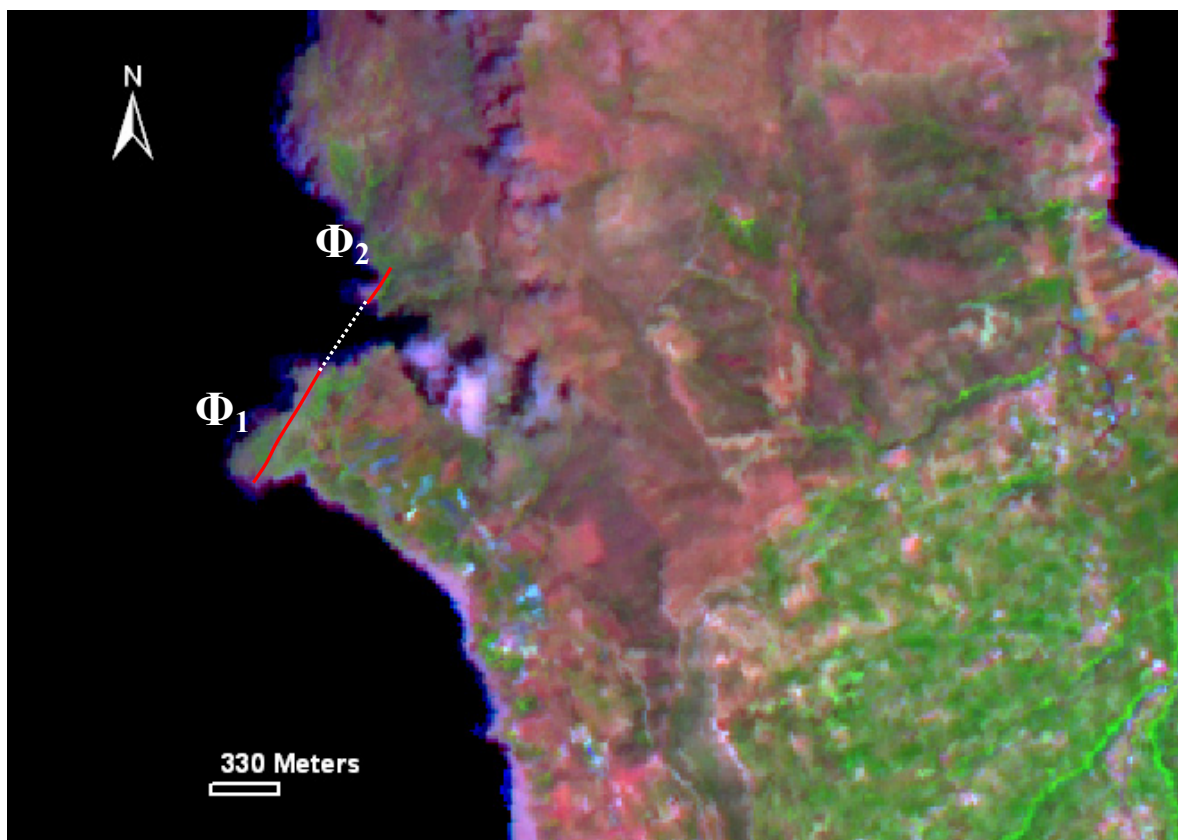
**Σχήμα 5.40:** Το ρήγμα αποκαλύπτεται σε μια ζώνη πλάτους μικρότερη των 15 m.

Μελετώντας τη σύνθετη RGB απεικόνιση, αντιλαμβάνεται κανείς ότι οι μεγάλες ασυνέχειες στην περιοχή του Ροδωπού συσχετίζονται με εκείνες στη Ρόκκα (Σχήμα 5.41). Συνεπώς, η ανάλυση των δορυφορικών εικόνων του ASTER ενδείκνυται για φωτοερμηνεία και αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο αλληλοσχετίζονται μεγάλων διαστάσεων τεκτονικές δομές. Η συσχέτιση των δύο ρηγμάτων αποδίδεται στο Σχήμα 5.41, με κόκκινες διακεκομμένες γραμμές.



**Σχήμα 5.41:** Αλληλοσυσχέτιση ρηγμάτων από μελέτες σε εκτεταμένες περιοχές.

Επιτόπιες παρατηρήσεις πραγματοποιήθηκαν και στην περιοχή Φαλάσαρνα (θέσεις  $\Phi_1$  &  $\Phi_2$  Σχήματος 5.42-5.43).



Σχήμα 5.42: Το ρήγμα στα Φαλάσαρνα.



**Σχήμα 5.43:** Το ρήγμα στα Φαλάσαρνα.

Το ρήγμα γίνεται ελάχιστα αντιληπτό λόγω των μικρών, σε πλάτος, διαστάσεων και των μικρών σκιάσεων που δημιουργεί.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία για τον εντοπισμό ρηγμάτων με τη βοήθεια δορυφορικών δεδομένων, προτείνει τη συνδυαστική εφαρμογή τεχνικών ενίσχυσης των ψηφιακών εικόνων, με στόχο την ανάδειξη του υδρογραφικού δικτύου και της βλάστησης. Τα χαρακτηριστικά αυτά του γήινου αναγλύφου έχουν συχνά φυσική εξάρτηση από τα ρήγματα (π.χ., απότομες εκτροπές της ροής των ρεμάτων, ευθύγραμμα τμήματα αποστράγγισης, τεκτονικές κοιλάδες, επιμήκης ανάπτυξη της βλάστησης).

Τα ρήγματα δεν απαντούν στις δορυφορικές εικόνες με τον ίδιο τρόπο. Συνεπώς, δεν υπάρχει κάποιος μεθοδικός κανόνας **αυτόματου** εντοπισμού των ρηγμάτων. Αν και η διαδικασία εντοπισμού των ρηξιγενών δομών με οπτική ερμηνεία των εικόνων είναι υποκειμενική, μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία απαιτεί φωτοερμηνεία από έμπειρο αναλυτή.

Κατά τους θερινούς μήνες, όπως στην περίπτωση μας, η υγρασία που κατακρατούν τα ρήγματα εντοπίζεται πιο εύκολα από ότι το χειμώνα. Όμως η γωνία ύψους του Ηλίου κατά τη λήψη της εικόνας ήταν αρκετά μεγάλη ( $\gamma = 71^\circ$ ). Γενικά είναι θεμιτές μικρές γωνίες ύψους του Ηλίου μια και πολλά ρήγματα σχετίζονται με το τοπογραφικό ανάγλυφο.

Εξίσου σημαντικό ρόλο έπαιξε ο προσανατολισμός των γραμμώσεων σε σχέση με τη θέση (αζιμούθιο) του Ηλίου αλλά και το ύψος των αντικειμένων (άλμα ρηγμάτων). Οι γραμμώσεις που ήταν προσανατολισμένες παράλληλα στη διεύθυνση του Ηλίου ( $A = 127^\circ$ ) ήταν δύσκολο ή και αδύνατον να εντοπισθούν. Επίσης, τα ρήγματα με μικρό άλμα (π.χ., περίπτωση ρήγματος στην περιοχή Ροδωπού, στο δρόμο προς Άσπρα Νερά) δεν γίνονται εύκολα αντιληπτά, εξαιτίας των μικρών σκιάσεων που δημιουργούν.

Καθότι η εμφάνιση μιας γραμμώσης εξαρτάται από τις διαστάσεις αυτής σε σχέση με την κλίμακα της παρατηρούμενης εικόνας (διαστάσεις εικονοστοιχείου), τα

ρήγματα μεγέθους μικρότερου των  $15\text{ m} \times 15\text{ m}$  (σε μήκος και πλάτος) ήταν εκ των πραγμάτων αδύνατον να εντοπισθούν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χωρική ανάλυση των πρωτογενών εικόνων δεν ξεπερνούσε τα  $15\text{ m} \times 15\text{ m}$  στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο και τα  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  στο μέσο υπέρυθρο.

Ένα άλλο πρόβλημα που οφείλεται στη χωρική ανάλυση του συστήματος καταγραφής είχε να κάνει με τα μικτά εικονοστοιχεία (mixed pixels). Αυτά προκύπτουν όταν σε ένα εικονοστοιχείο συναθροίζονται φασματικές αποκρίσεις από μικρότερα αντικείμενα τα οποία ανήκουν σε διαφορετικές θεματικές τάξεις (π.χ., συνάθροιση φασματικής απόκρισης ρηγμάτων μικρών διαστάσεων με εκείνη του περιβάλλοντος πετρώματος).

Μετά την εφαρμογή των φίλτρων διευθύνσεων θα περίμενε κανείς οι τιμές που αφορούν σε ρήγματα να εμπεριέχονται κυρίως στα άκρα του ιστογράμματος. Στην πραγματικότητα όμως τα τμήματα αυτά του ιστογράμματος αφορούν στις πολύ απότομες μεταβολές (π.χ. δρόμοι, ακτογραμμή). Η ανάδειξη των γραμμώσεων που αφορούν στα ρήγματα της περιοχής απαιτεί επεξεργασία του ιστογράμματος με ιδιαίτερη προσοχή (οι τιμές ενδιαφέροντος βρίσκονται κοντά στο κεντρικό τμήμα του ιστογράμματος). Η διαχείριση των τιμών φωτεινότητας είναι ευκολότερη στην περίπτωση εικόνων που καλύπτουν μικρότερης έκτασης περιοχές από εκείνη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή.

Επιπλέον, κάποιες ακμές και γραμμικά στοιχεία που προκύπτουν από το χωρικό φιλτράρισμα ενισχύονται σε διευθύνσεις ξέχωρες από τη ζητούμενη διεύθυνση (πλασματικές γραμμώσεις). Για την εξομάλυνση του θορύβου στις φιλτραρισμένες εικόνες δεν συνιστώνται χωρικά φίλτρα μέσης και διαμέσου τιμής. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι μαζί με το θόρυβο θαμπώνουν και τα γραμμικά χαρακτηριστικά μικρών διαστάσεων, που μπορεί να σχετίζονται με ρήγματα της υπό μελέτη περιοχής.

Όταν το πλάτος μιας γράμμωσης είναι μεγάλο, τόσο τα φίλτρο Sobel όσο και το φίλτρο Laplace προκαλούν το φαινόμενο των διπλών ακμών στην εικόνα. Κατά συνέπεια στις περιπτώσεις αυτές δεν είναι εφικτός ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης των γραμμώσεων.

Ένα άλλο θέμα που πρέπει να συνυπολογιστεί για τις απαιτήσεις της παρούσας εφαρμογής (προσδιορισμός θέσης ρηγμάτων με ακρίβεια) είναι η κλίμακα του χάρτη που

έπρεπε να χρησιμοποιηθεί κατά τη γεωμετρική αναγωγή των εικόνων. Η κλίμακα του χάρτη πρέπει πάντα να είναι καλύτερη από εκείνη της εικόνας. Στην προκειμένη περίπτωση έπρεπε να είναι τουλάχιστον 1:15.000 και όχι 1: 50.000.

### **Μελλοντικές προτάσεις**

Καθότι τα ρήγματα γίνονται αντιληπτά από έντονες μεταβολές της κλίσης του αναγλύφου κρίνεται αναγκαίο σε παρόμοιες εφαρμογές στο μέλλον ο χρήστης να έχει στη διάθεσή του το Μοντέλο Ψηφιακού Υψομετρικού Εδάφους (Digital Elevation Model ή DEM) της υπό μελέτη περιοχής. Εφαρμόζοντας ένα φίλτρο πρώτης παραγώγου (Sobel) στο DEM της περιοχής μελέτης είναι δυνατόν να εντοπισθούν οι ασυνέχειες που οφείλονται σε αλλαγές της κλίσης του εδάφους. Με άλλα λόγια περιμένει κανείς μεγάλη συσχέτιση των ακμών που θα προκύψουν από την εφαρμογή του εν λόγω φίλτρου με τα ρήγματα και τα απότομα πρηνή. Από την άλλη πλευρά η εφαρμογή ενός φίλτρου δεύτερης παραγώγου (Laplace) στο DEM δύναται να αναδείξει τους υδροκρίτες και τις κοιλάδες (ανάλογα με το πρόσημο του διπλού διαφορικού) συνεισφέροντας έτσι στη φωτοερμηνεία του πεδίου κατόπτευσης.

Οι γραμμώσεις που προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία δεν αφορούν όλες στα ρήγματα της περιοχής. Γενικά με το χωρικό φιλτράρισμα πραγματοποιείται ενίσχυση όλων των γραμμώσεων ανεξαρτήτως προελεύσεως (γεωλογικής ή μη). Κρίνεται, λοιπόν, σκόπιμο η αξιολόγηση των γραμμώσεων ως ενδεχόμενες ρηξιγενείς δομές να γίνεται συνυπολογίζοντας τη Γεωλογία, τα όρια καλύψεως της Γης, κ.ά. Προτείνεται η υλοποίηση μιας μορφής μη επιβλεπόμενης (unsupervised) ή και επιβλεπόμενης (supervised) ταξινόμησης (στην περίπτωση που έχουμε τα απαραίτητα στοιχεία από μετρήσεις στο ύπαιθρο) με στόχο τον εντοπισμό των ορίων των καλύψεων της Γης (π.χ., όρια καλλιεργειών). Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης θα είναι σε θέση να κατανοήσει τον τρόπο με τον οποίο σχετίζονται τα διάφορα αντικείμενα με τις ακμές που βγάζει ο αλγόριθμος των φίλτρων. Κατόπιν, αφαιρώντας τις ακμές που σχετίζονται με χαρακτηριστικά, όπως είναι οι δρόμοι, τα όρια των ιδιοκτησιών/καλλιεργειών, κ.ά., από τις εικόνες των φίλτρων θα μπορούσε κανείς με μεγαλύτερη ασφάλεια να οδηγηθεί σταδιακά (υπό μία έννοια αφαιρετικά) στον εντοπισμό θέσεων ρήξης του γήινου φλοιού.

Τέλος, προτείνεται η συγχώνευση (image fusion) των δεδομένων του ASTER με εικόνες καλύτερης χωρικής ανάλυσης (π.χ., εικόνες IKONOS, Quickbird, κ.ά.). Συνδυάζοντας, επί παραδείγματι, τη φασματική ανάλυση των εικόνων του ASTER με τα υψηλής ευκρίνειας δεδομένα του IKONOS (η χωρική ανάλυση φτάνει το  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ) η ποιότητα των αποτελεσμάτων θα βελτιωθεί.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### Ελληνικές βιβλιογραφικές αναφορές

Αργιαλάς, Δ.Π. (1999). *Φωτοερμηνεία - Τηλεπισκόπηση: Ψηφιακή επεξεργασία εικόνων*, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Αθήνα.

Αστάρας, Θ. (1997). *Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση στις Γεωεπιστήμες*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Κίλιας, Α.Α. (1998). *Εισαγωγή στην Τεκτονική Γεωλογία*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Μερτίκας, Σ.Π. (1999). *Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.

Μηλιαρέσης, Γ.Χ. (2003). *Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.

Σωτηριάδης, Λ.Δ. & Α.Α. Ψιλοβίκος (1984). *Ασκήσεις Γεωμορφολογίας*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Τριπωλιτσιώτης, Α. (1998). *Μελέτη και αξιολόγηση γεωμετρικών διορθώσεων δορυφορικών εικόνων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Διπλωματική διατριβή, Χανιά.

Φυτρολάκης, Ν.Λ. (1980). *Η Γεωλογική Δομή της Κρήτης – Προβλήματα, παρατηρήσεις και συμπεράσματα*, Διδακτορική Διατριβή, Εκδόσεις της έδρας Ορυκτολογίας – Πετρογραφίας – Γεωλογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.

### **Διεθνείς βιβλιογραφικές αναφορές**

Abrams, M. (2000). *ASTER User Handbook*, Version 2, Jet Propulsion Lab, California Institute of Technology.

American Society of Photogrammetry (1983). *Manual of Remote Sensing*, (ed. R.N. Colwell), Sheridan Press, USA, Second Edition.

Cracknell, A.P. & L. Hayes (1991). *Introduction to Remote Sensing*, Taylor & Francis Inc., London.

Drury, S.A. (2001). *Image Interpretation in Geology*, Blackwell Science Inc., USA, Third Edition.

Erdas Corporation (2001). *Erdas Field Guide*, Erdas Inc., Atlanta, Georgia, Fifth edition.

Gupta, R.P. (1991). *Remote Sensing Geology*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.

Johnson, R.A. & D.W. Wichern (1982). *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Prentice-Hall Inc., USA.

Kuntz, S. (2000). *Introduction to Remote Sensing*, Lecture Notes, Mediterranean Agronomic Institute of Chania, Chania, Crete, Greece.

Lillesand, T.M. & R.W. Kiefer. (1987). *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley and Sons Inc., USA, Second Edition.

Mathworks Corporation (2002). *Matlab: The language of technical computing*, Mathworks Inc.

Miller, V.C. (1961). *Photogeology*, McGraw-Hill Book Company Inc., London.

Oppenheimer, C., I. Gitas, O. Toutoubalina & P. Wiart (2000). *Applied image processing practicals 2000*, Mediterranean Agronomic Institute of Chania, Chania, Crete, Greece.

Richards, J.A. (1997). *Remote Sensing Digital Image Processing: An Introduction*, Springer-Verlag Inc., New York, Third Edition.

Sabins, F. Floyd, (1987). *Remote Sensing: Principles and Interpretation*, W.H. Freeman Inc., New York, Second edition.

## **Άρθρα**

Ali, S.A. & S. Pirasteh (2004). “Geological applications of Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM) data and Geographic Information System (GIS): mapping and structural interpretation in south-west Iran, Zagros Structural Belt”, *International Journal of Remote Sensing*, preview article.

Arlegui, L.E. & M.A. Soriano (1998). “Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the Central Ebro basin (NE Spain)”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 16, 3169-3185.

Basham, M., J.E. Pinder III & G.C. Kroh (1997). “A comparison of Landsat Thematic Mapper and Spot multi-spectral imagery for the classification of shrub and meadow vegetation in Northern California, USA”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No. 18, 3719-3728.

Green, E.P., C.D. Clark, P.J. Mumby, A.J. Edwards & A.C. Ellis (1998). “Remote Sensing techniques for mangrove mapping”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 5, 935-956.

Gupta, A. & P. Chen (2001). “Remote Sensing and Environmental evaluation in the Mekong Basin”. 22<sup>nd</sup> Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November 2001, Singapore.

Heddi, M, D.J. Eastaff & J. Petch (1999). “Relationships between tectonic and geomorphological linear features in the Guadix-Baza basin, Southern Spain”, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 24, 931-942.

Kaya, S., O. Müftüoğlu & O. Tüysüz (2004). “Tracing the geometry of an active fault using remote sensing and digital elevation model: Ganos segment, North Anatolian Fault Zone, Turkey”, International Journal of Remote Sensing, preview article.

Kenea, N.H (1997). “Improved geological mapping using Landsat TM data, Southern Red Sea Hills, Sudan: PC and HIS decorrelation stretching”, International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No. 6, 1233-1244.

Leech, D.P., P.J. Treloar, N.S. Lucas & J. Grocott (2003). “Landsat TM analysis of fracture patterns: a case study from Coastal Cordillera of northern Chile”, International Journal of Remote Sensing, Vol. 24, No. 19, 3709-3726.

Mah, A., G.R. Taylor, P. Lennox & L. Balia (1995). “Lineament Analysis of Landsat Thematic Mapper Images, Northern Territory, Australia”, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 61, No. 6, 761-773.

Migiros, G., A. Pavlopoulos & Is. Parcharidis (1995). “Recognition of Fracture Zones by using Spatial Models and Remote Sensing data: An application in Western Attica (Greece)”, Geolo.Soc.Greece, Sp. Publ., No. 4.

Moore, G.K. & Waltz F.A. (1983). “Objective Procedures for Lineament Enhancement and Extraction”, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 49, No. 5, 641-647.

Nama, E.E. (2004). “Lineament detection on Mount Cameroon during the 1999 volcanic eruptions using Landsat ETM”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 3, 501-510.

Novak, I.D. & N. Soulakellis (2000). “Identifying geomorphic features using Landsat-5/TM data processing techniques on Lesvos, Greece”, *Geomorphology*, Vol. 34, 101-109.

O’ Leary, D.W., J.D. Freidman & H.A. Pohn (1976). “Lineament, linear, lineation: Some proposed new definitions for old terms”, *Geological Society of American Bulletin*, Vol. 87, 1463-1469.

Παρχαρίδης, Ισ., Ε. Γκάρτζος & Εμ. Ψωμιάδης (1999). “Αναγνώριση ζωνών εξαλλοίωσης στη νήσο Λέσβο, με εφαρμογή λόγων των φασματικών καναλιών του Landsat 5 TM”, *Ορυκτός Πλούτος / Mineral Wealth* 112/1999.

Poscolieri, M., K. Serelis, I. Parcharidis (1996). “Integration of Landsat TM data and DEM-derived spatial models to investigate macro-scale shear zone in Lesvos island (Greece)”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXI, Part B7, 578-583.

Stefouli, M. & A. Angelopoulos (1990). “Integration of Landsat and aeromagnetic data as aid to the structural analysis of Crete and S.E. Peloponessus”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 11, No. 9, 1625-1644.

Suzen, M.L. & V. Toprak (1998). “Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in Central Turkey”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 6, 1101-1114.

Yang, X., M.C.J. Damen & R.A. Van Juidam (1999). “Use of Thematic Mapper imagery with a Geographic information System for geomorphologic mapping in a large deltaic lowland environment”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, No. 4, 659-681.

**ΠΗΓΕΣ INTERNET:**

<http://edcdaac.usgs.gov/dataproducts.asp> (10/2004)

<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/> (12/2005)

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/> (10/2004)

<http://terra.nasa.gov/About/> (16/12/2005)

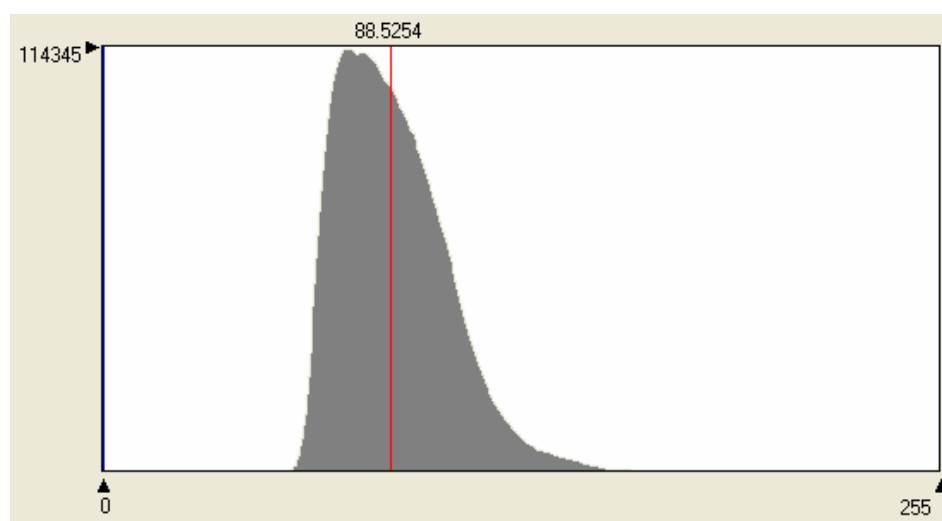
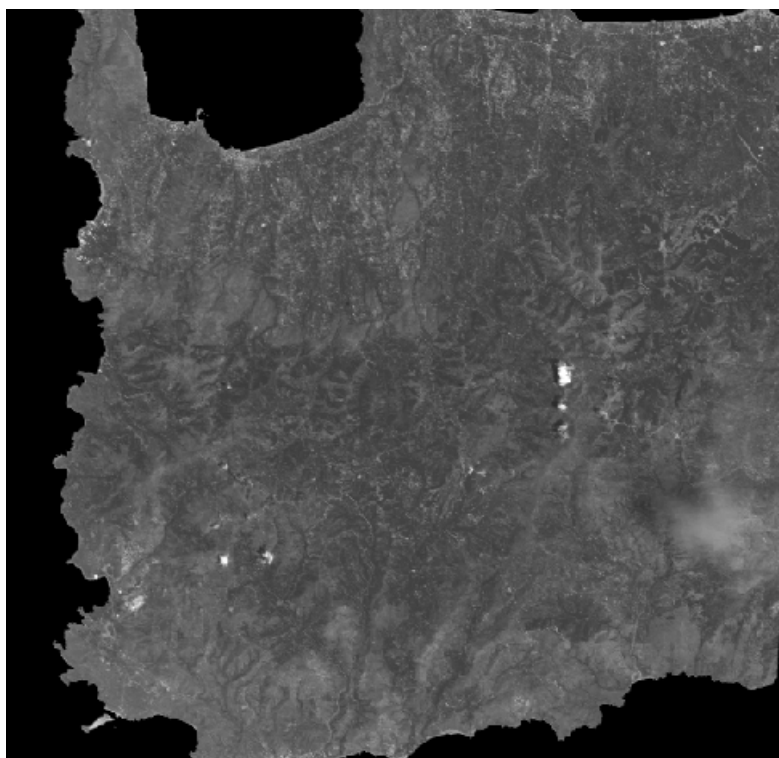
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΤΩΝ

ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

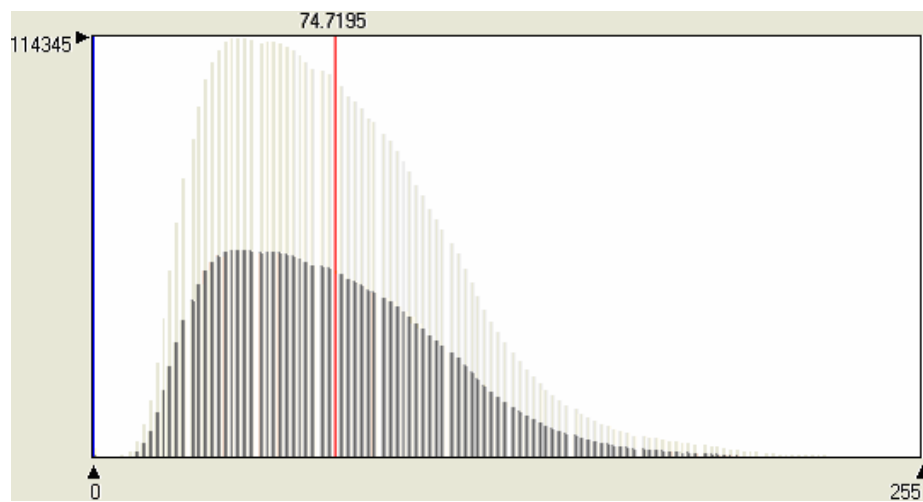
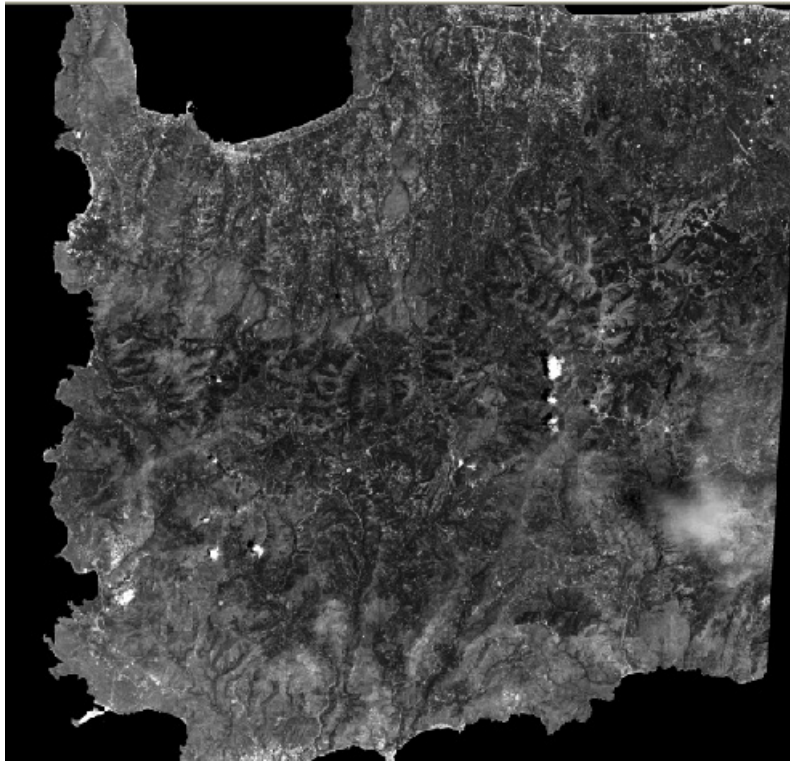
&

ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΘΕΣΕΩΝ



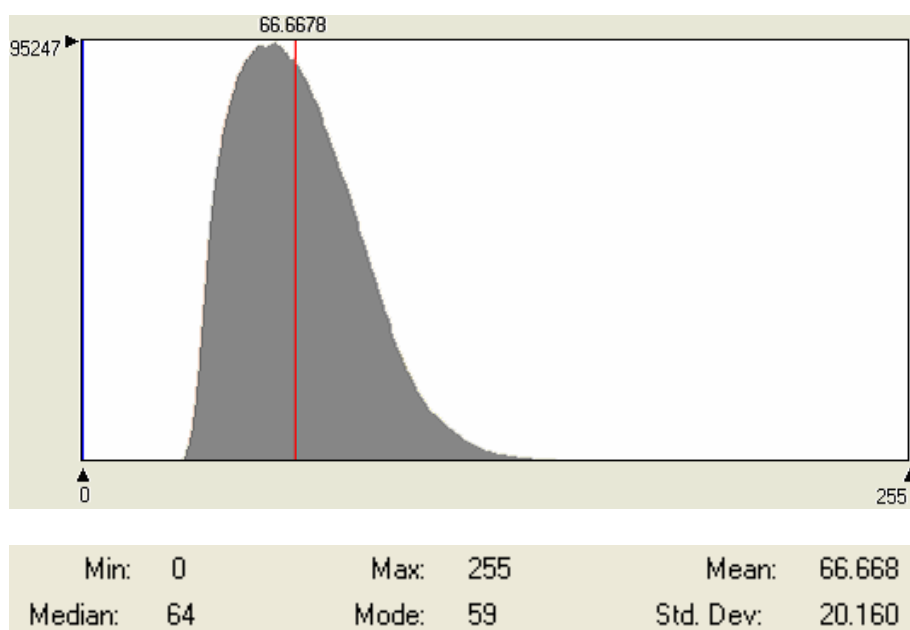
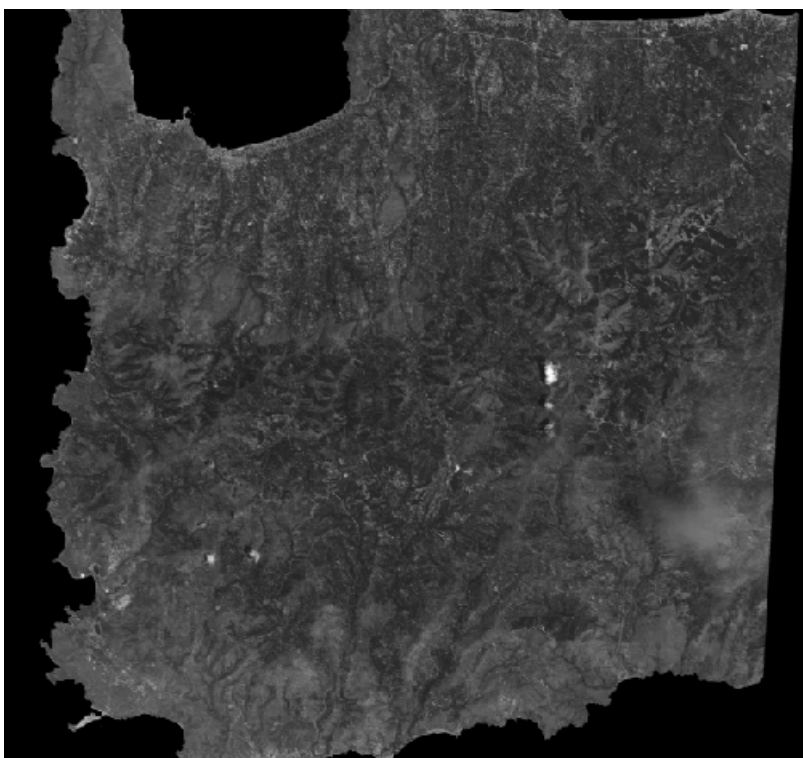
|         |    |       |     |           |        |
|---------|----|-------|-----|-----------|--------|
| Min:    | 0  | Max:  | 255 | Mean:     | 88.525 |
| Median: | 86 | Mode: | 74  | Std. Dev: | 18.171 |

**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι VNIR 1 (Green) με το ιστόγραμμα της.**

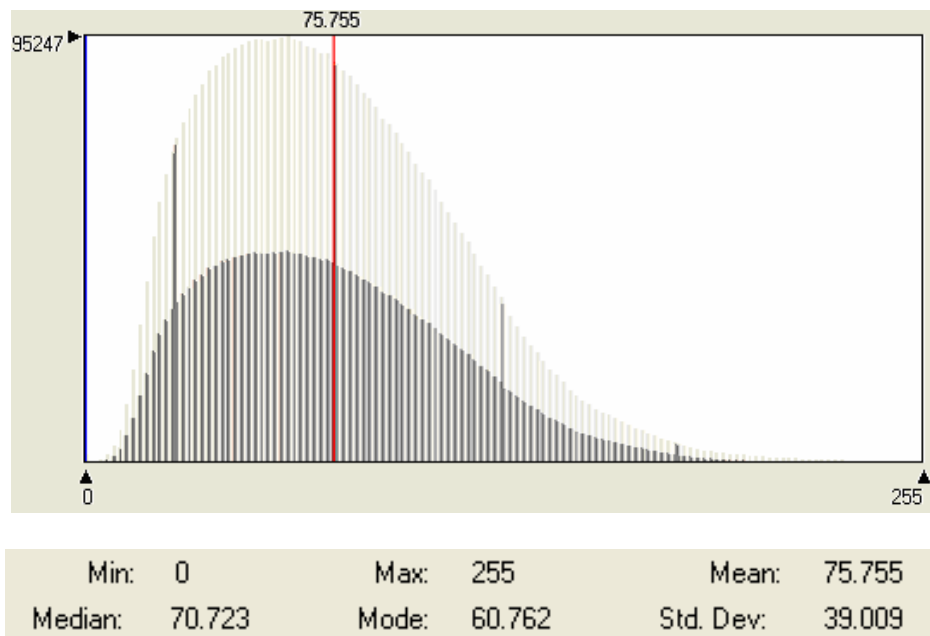
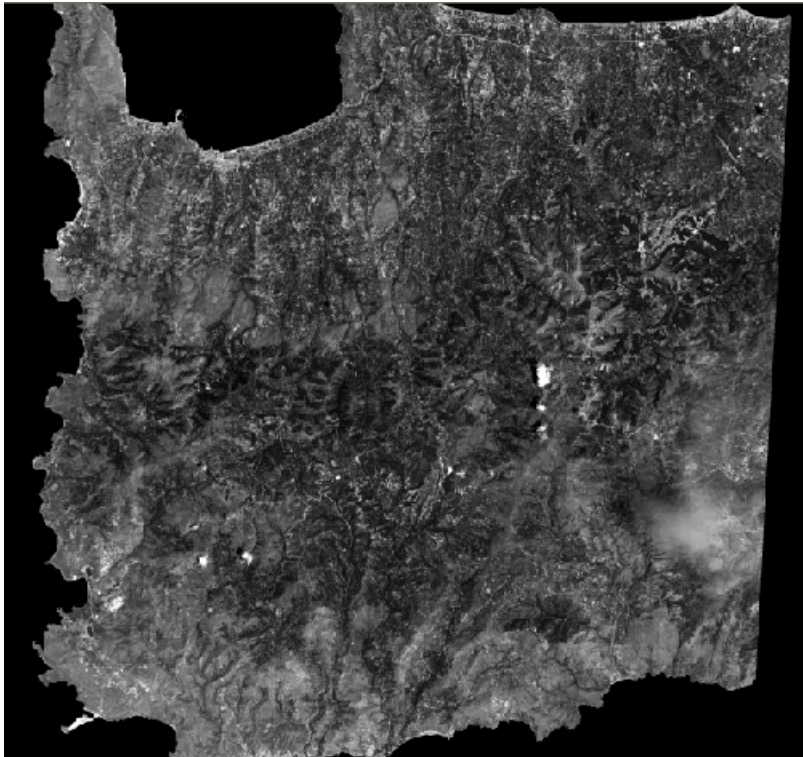


|         |        |       |        |           |        |
|---------|--------|-------|--------|-----------|--------|
| Min:    | 0      | Max:  | 255    | Mean:     | 74.720 |
| Median: | 69.727 | Mode: | 43.828 | Std. Dev: | 37.254 |

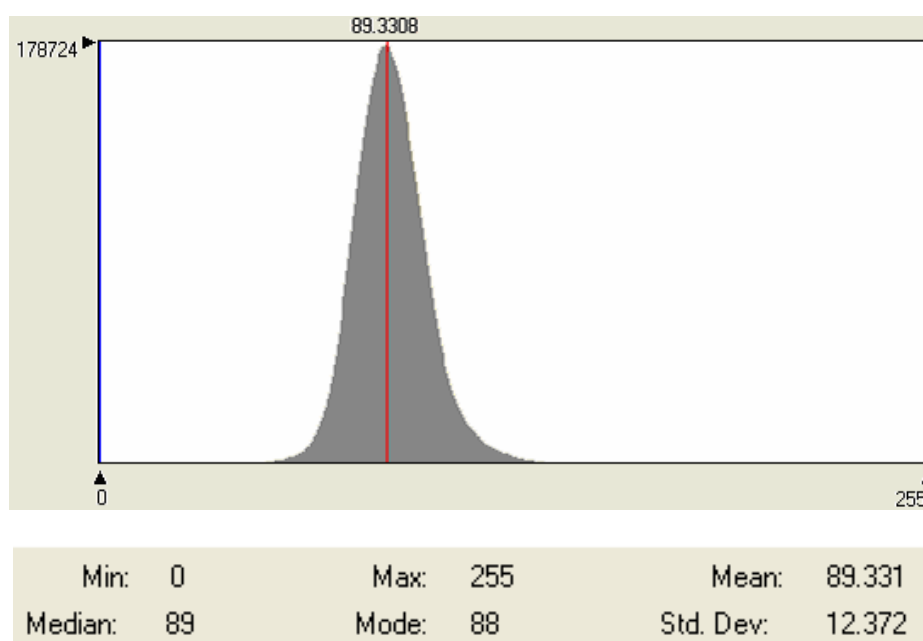
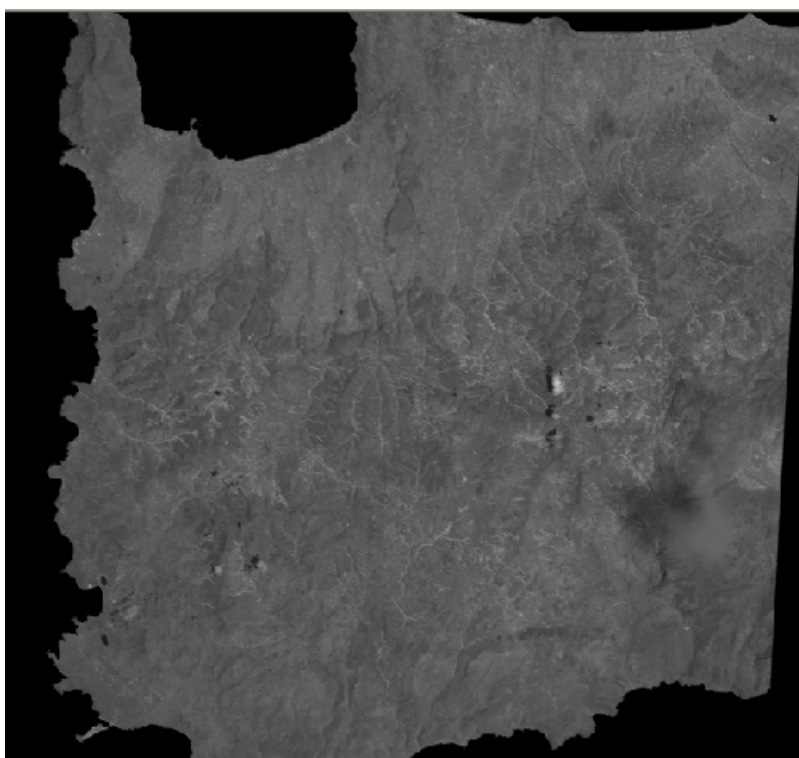
**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι VNIR 1 (Green) με το ιστόγραμμα της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.**



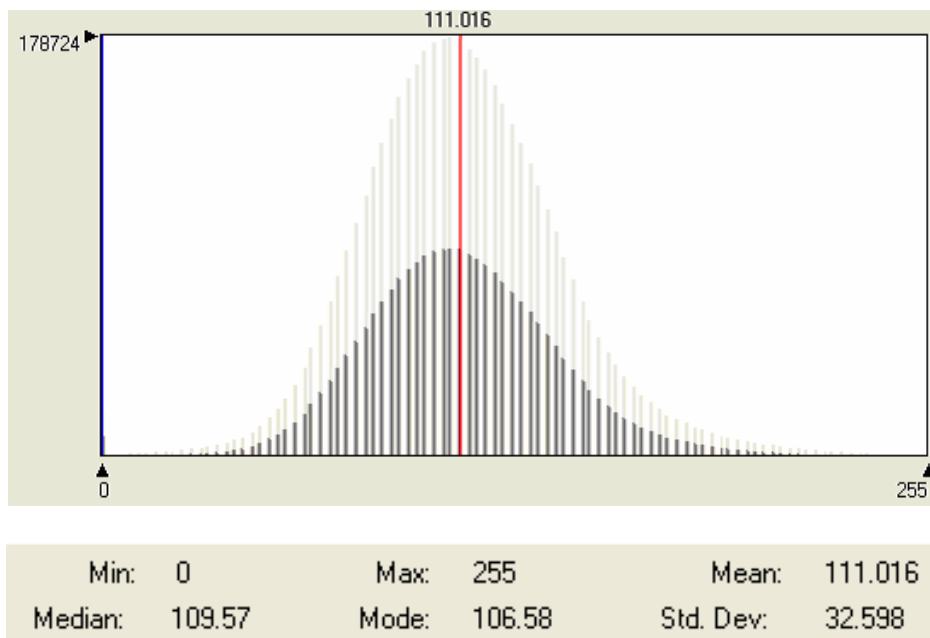
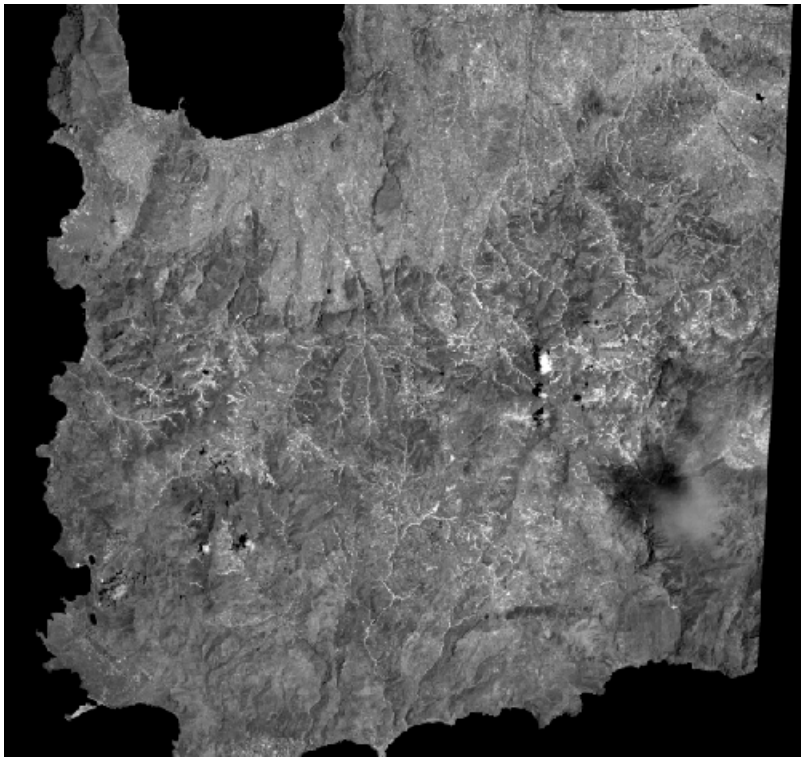
**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι VNIR 2 (Red) με το ιστόγραμμα της.**



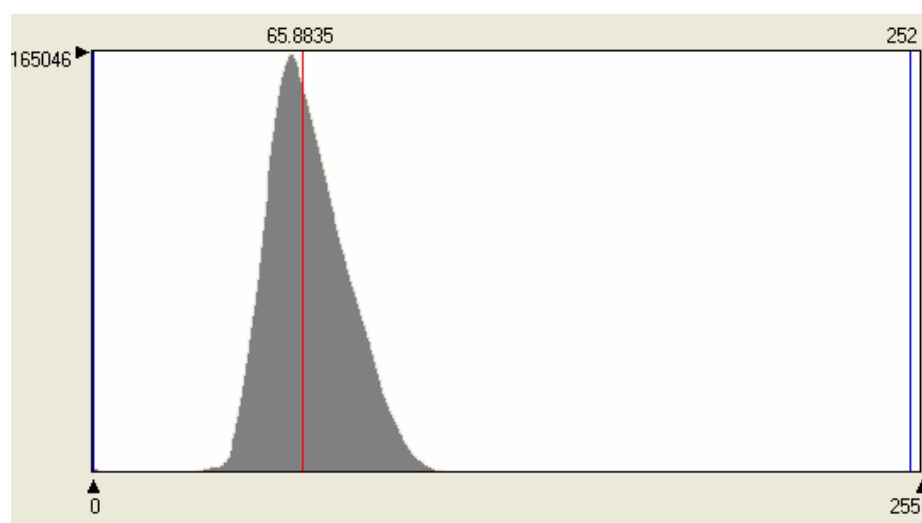
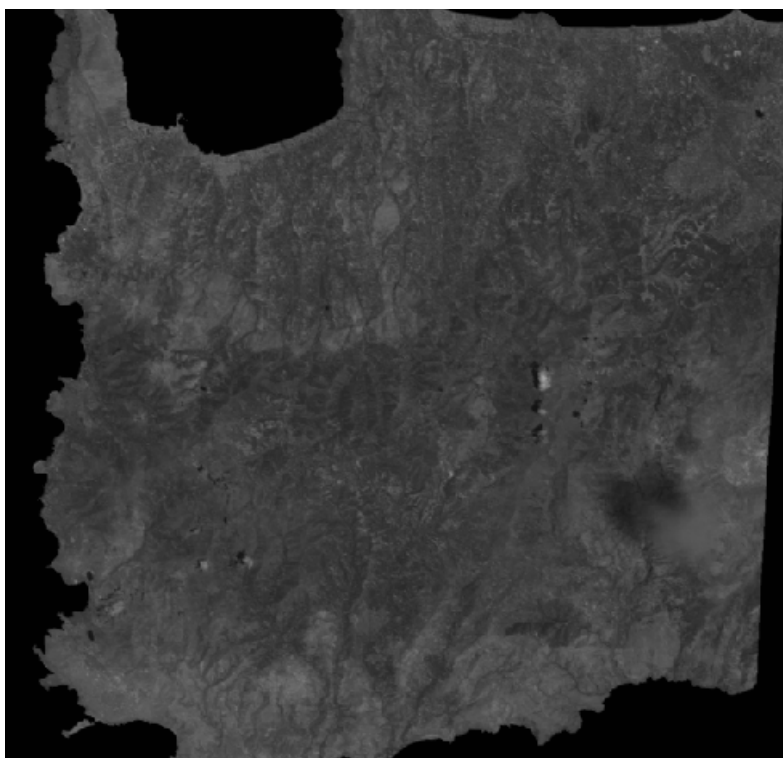
Η εικόνα στο φασματικό κανάλι VNIR 2 (Red) με το ιστόγραμμα της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.



**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι VNIR 3N (Infra-red) με το ιστόγραμμα της.**

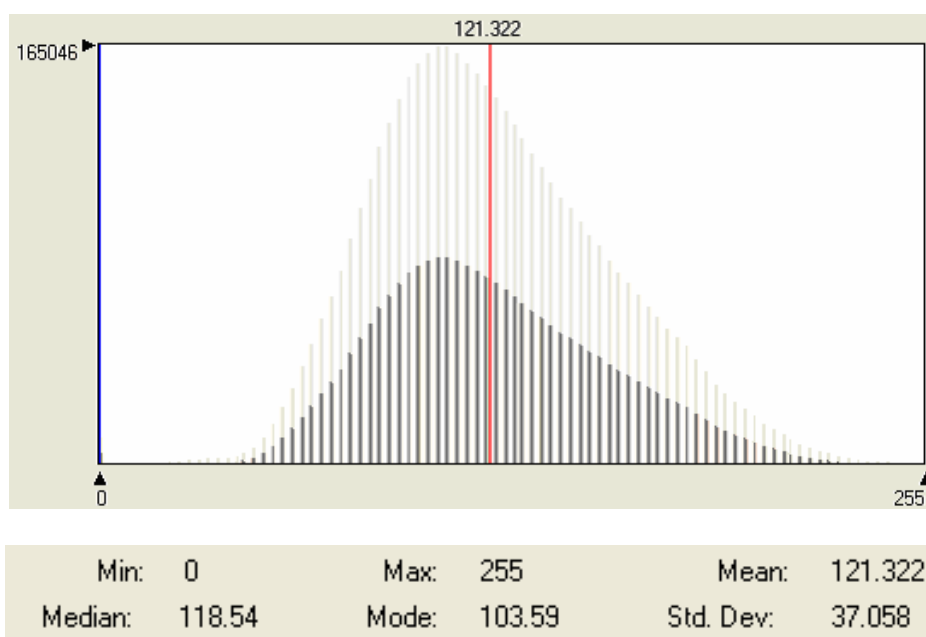
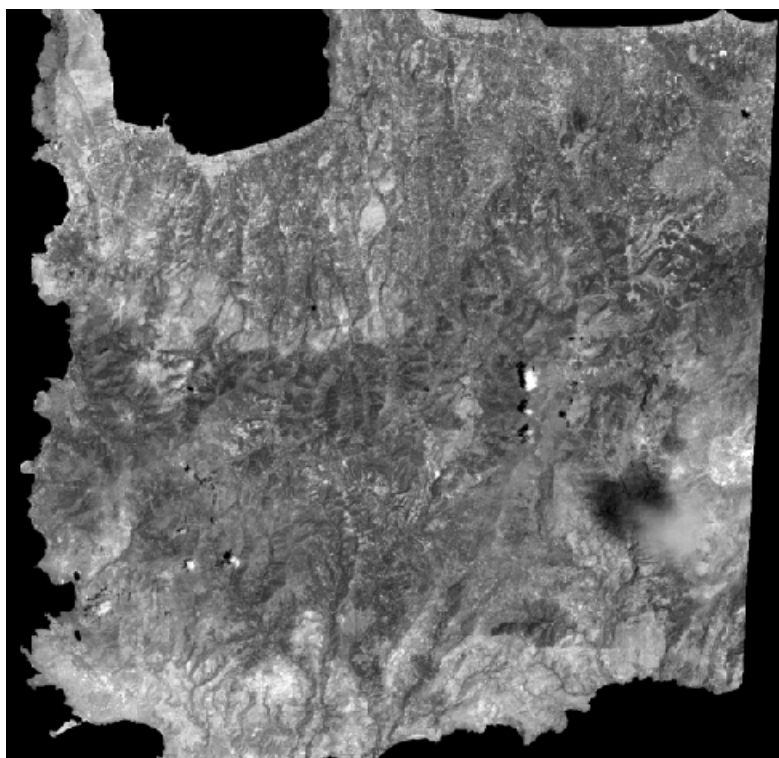


**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι VNIR 3N (Infra - red) με το ιστόγραμμα της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.**

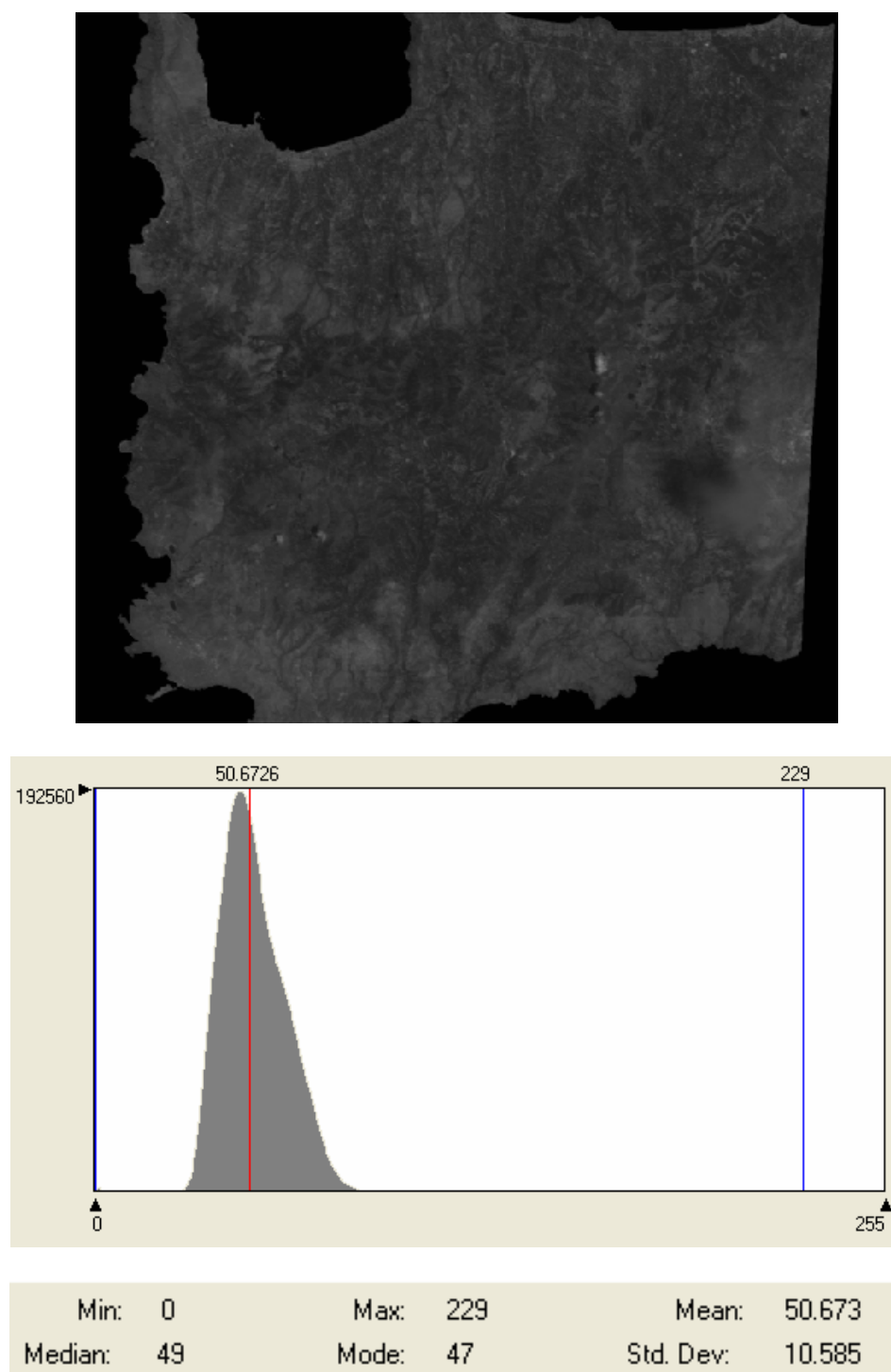


|         |    |       |     |           |        |
|---------|----|-------|-----|-----------|--------|
| Min:    | 0  | Max:  | 252 | Mean:     | 65.884 |
| Median: | 65 | Mode: | 60  | Std. Dev: | 12.685 |

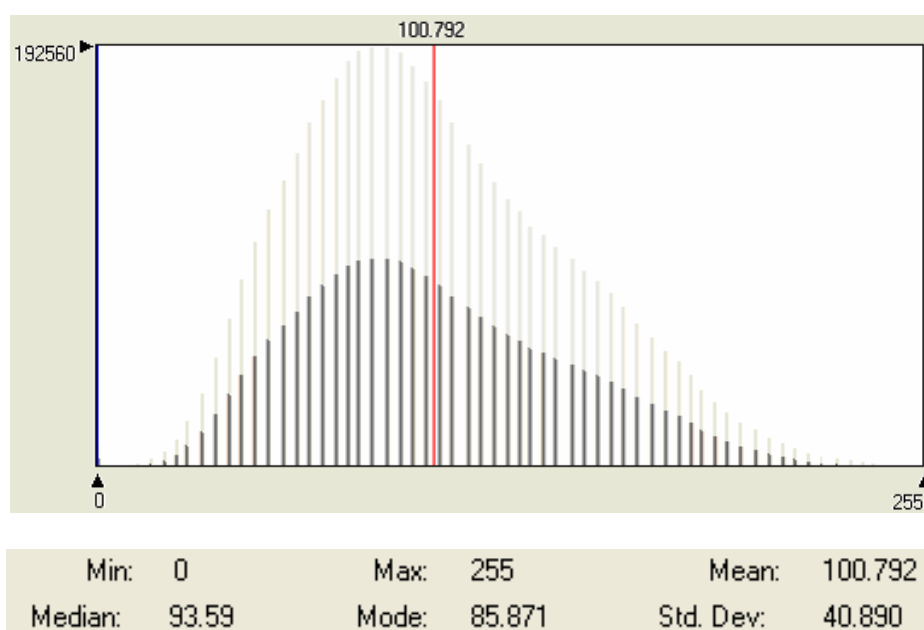
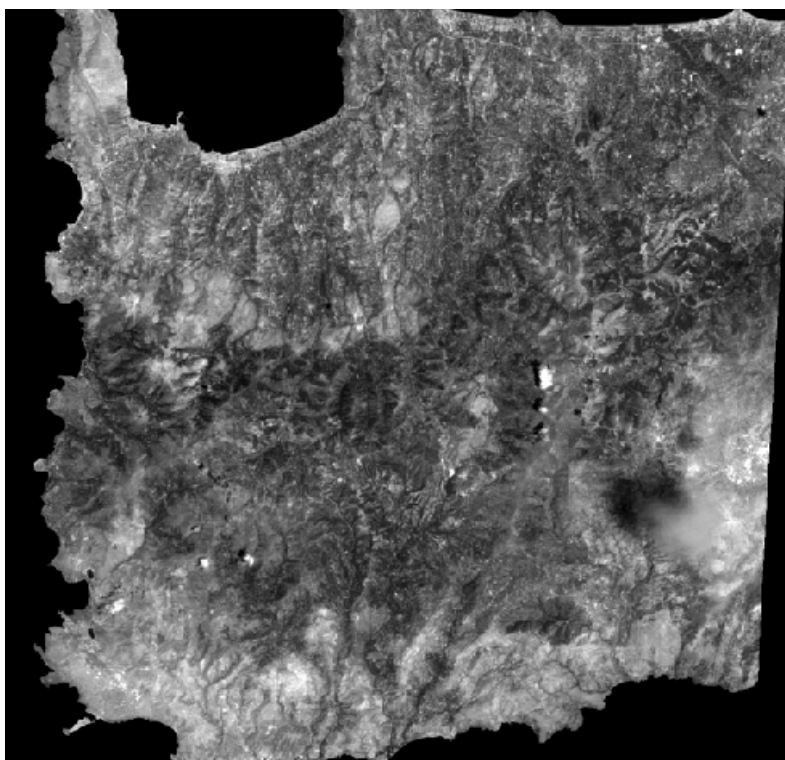
**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 4 με το ιστόγραμά της.**



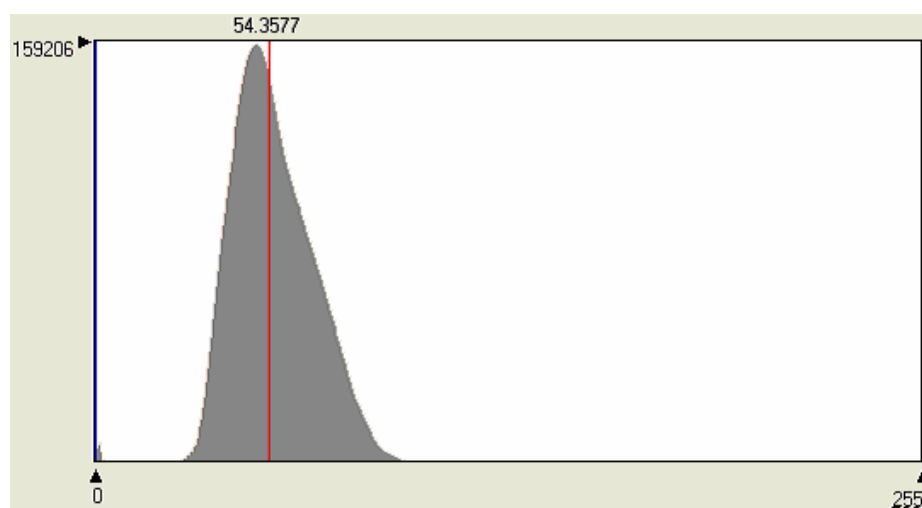
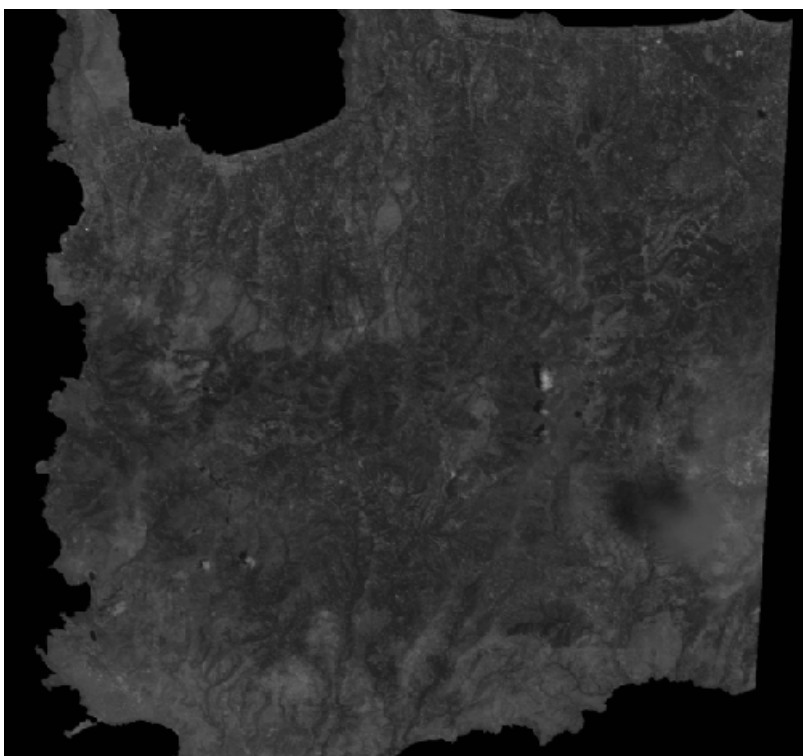
**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 4 με το ιστόγραμμα της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.**



**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 5 με το ιστόγραμμα της.**

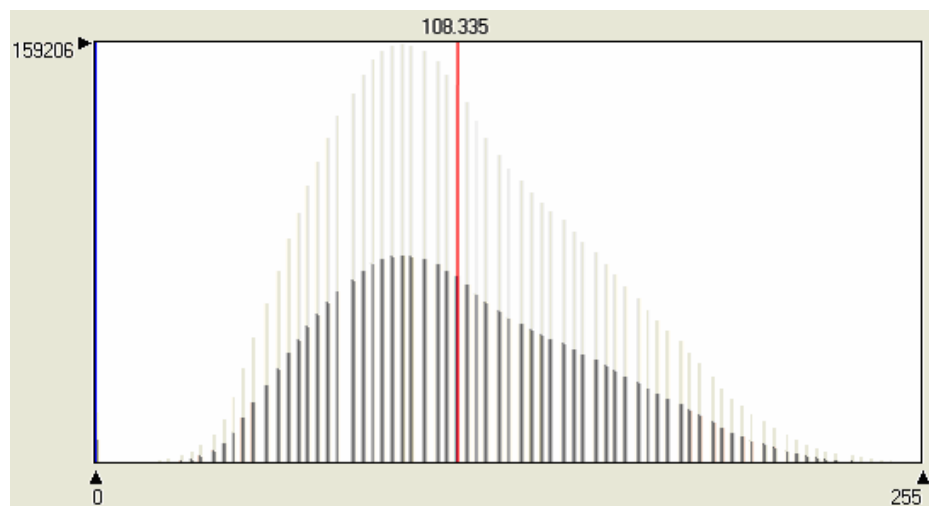
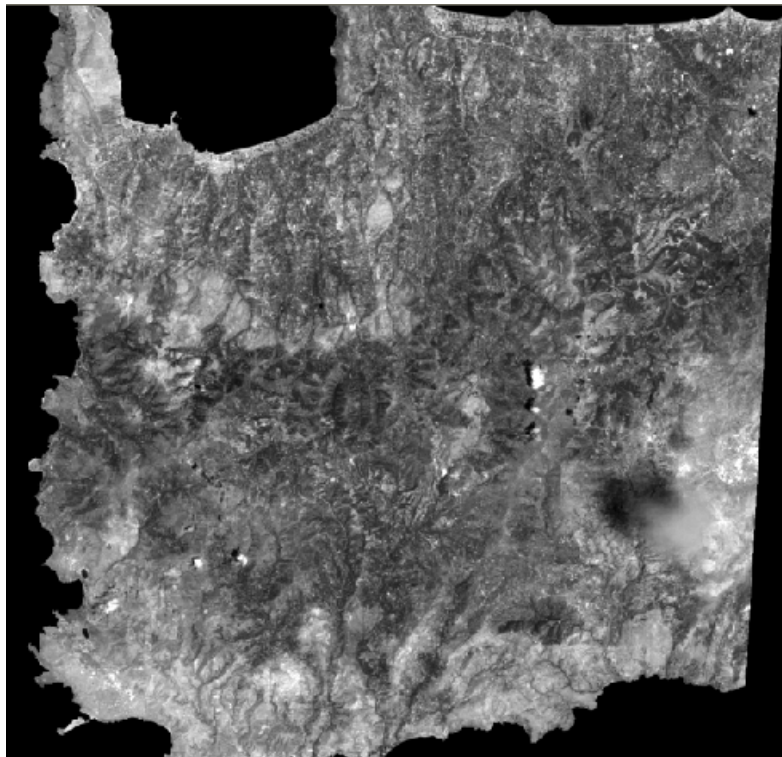


**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 5 με το ιστόγραμμα της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.**



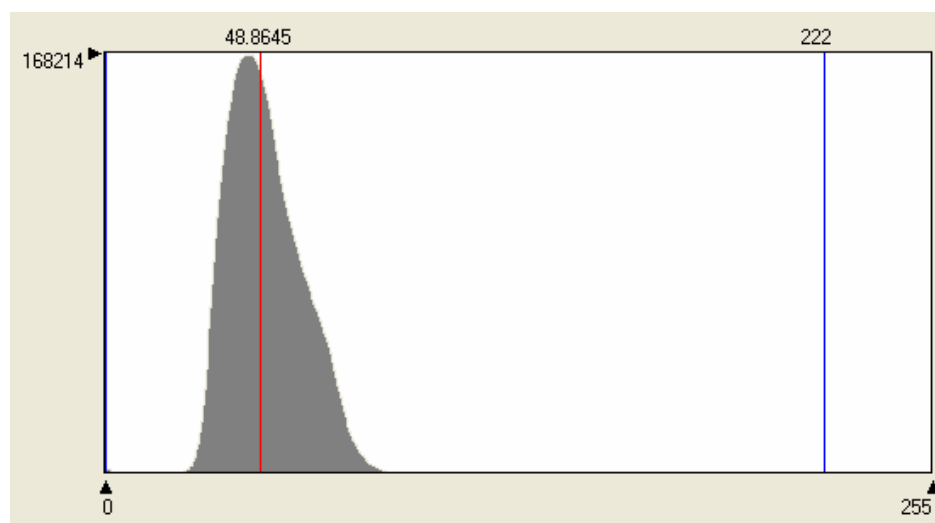
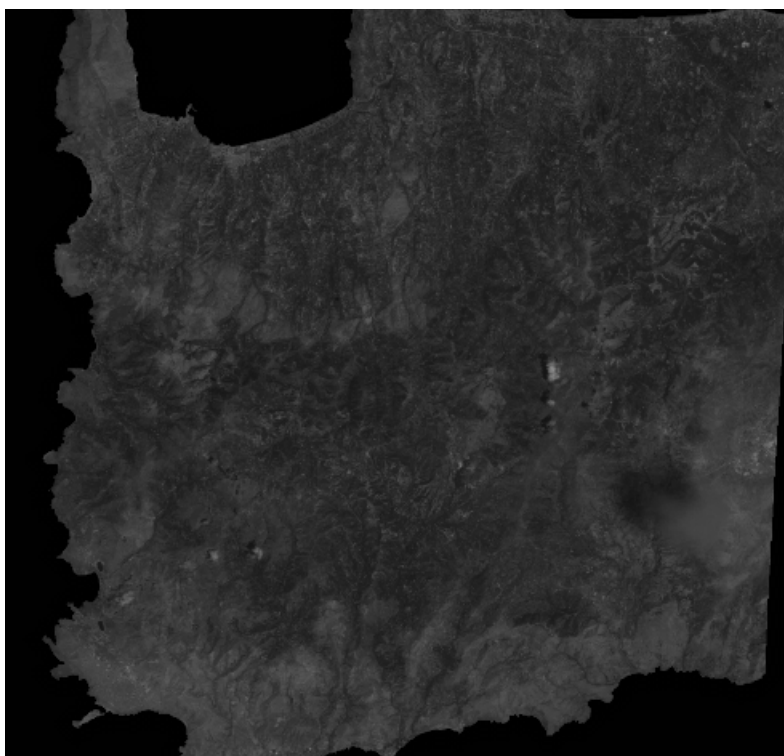
|         |    |       |     |           |        |
|---------|----|-------|-----|-----------|--------|
| Min:    | 0  | Max:  | 255 | Mean:     | 54.358 |
| Median: | 53 | Mode: | 49  | Std. Dev: | 12.982 |

**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 6 με το ιστόγραμμα της.**



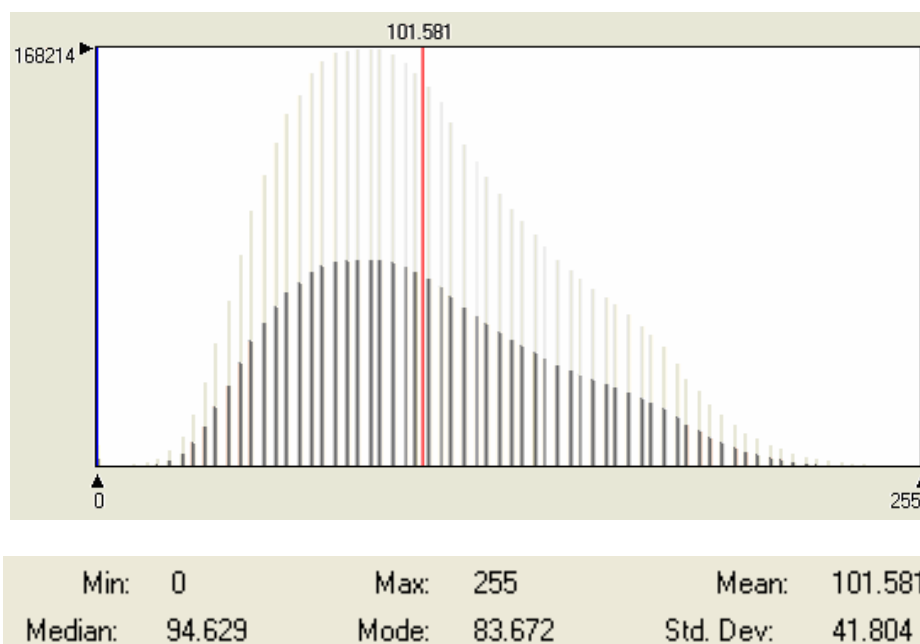
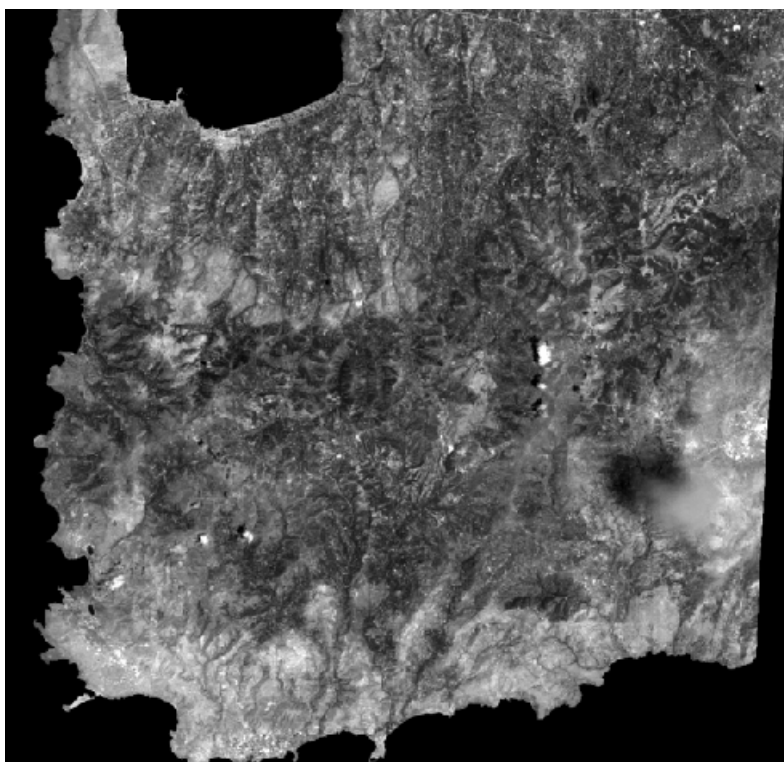
|         |        |       |        |           |         |
|---------|--------|-------|--------|-----------|---------|
| Min:    | 0      | Max:  | 255    | Mean:     | 108.335 |
| Median: | 103.78 | Mode: | 90.328 | Std. Dev: | 39.861  |

**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 6 με το ιστόγραμμα της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.**

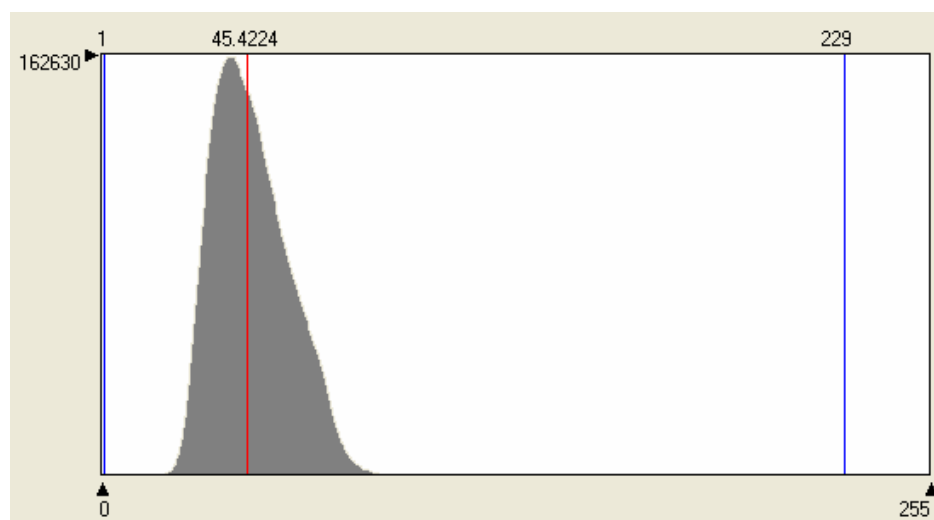
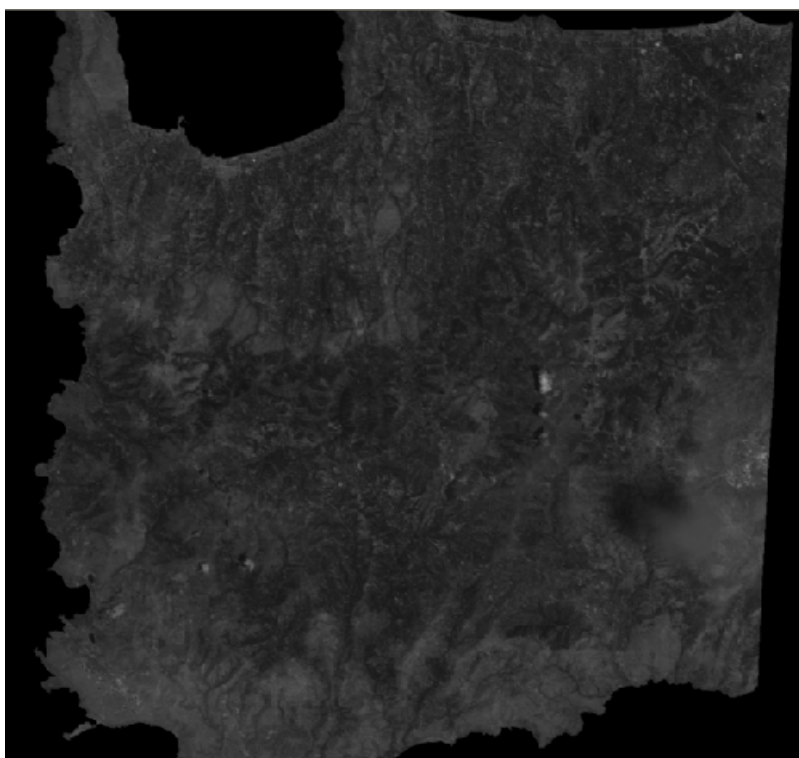


|         |    |       |     |           |        |
|---------|----|-------|-----|-----------|--------|
| Min:    | 0  | Max:  | 222 | Mean:     | 48.865 |
| Median: | 47 | Mode: | 44  | Std. Dev: | 11.618 |

**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 7 με το ιστόγραμμα της.**

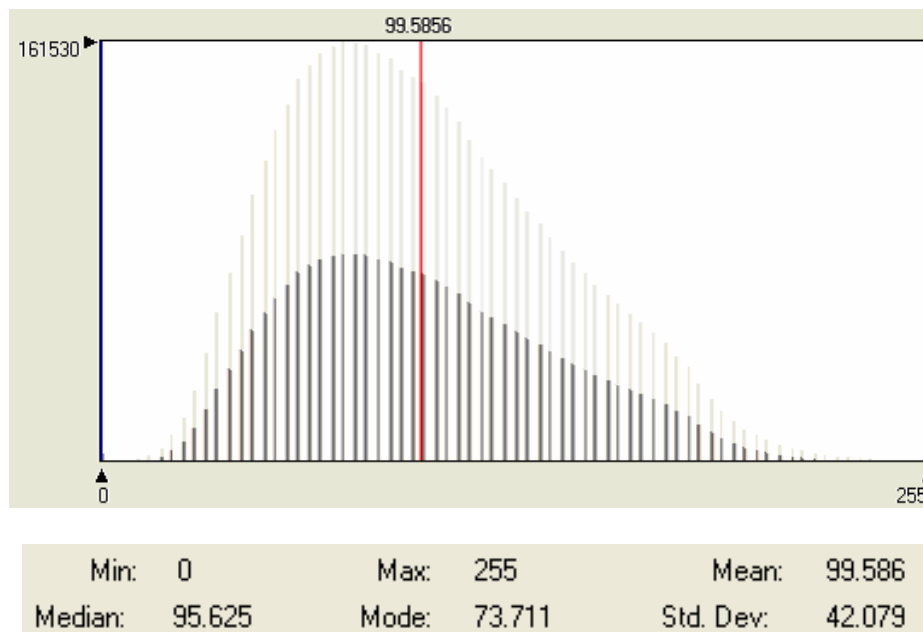
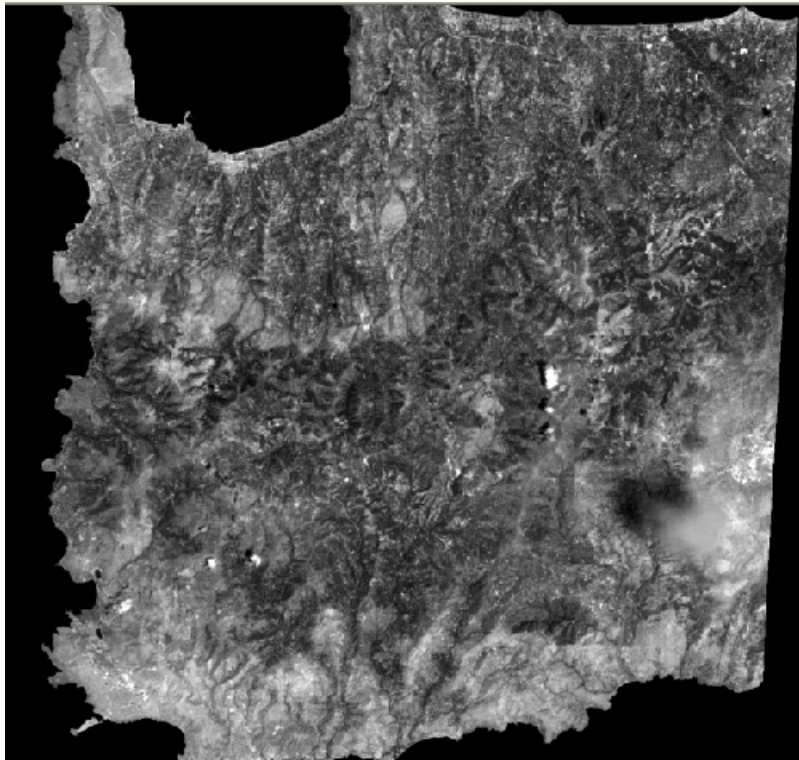


**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 7 με το ιστόγραμμα της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.**

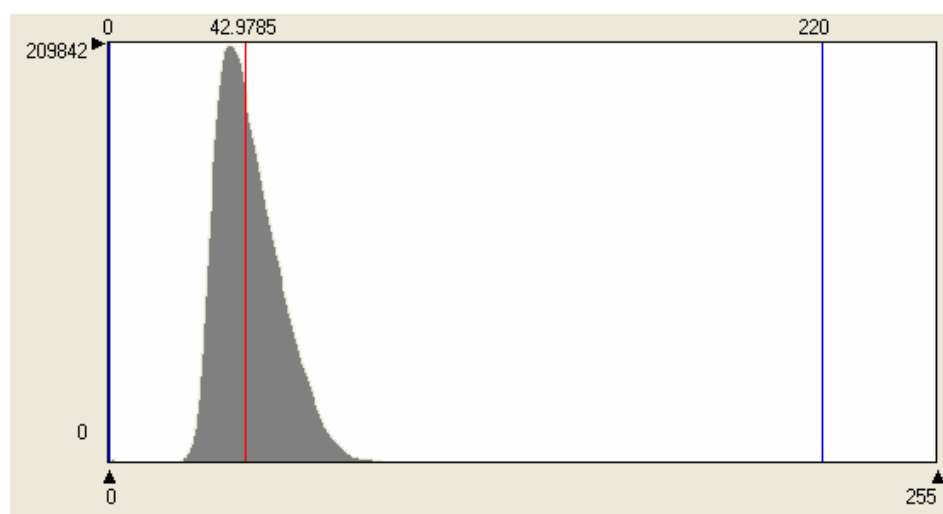
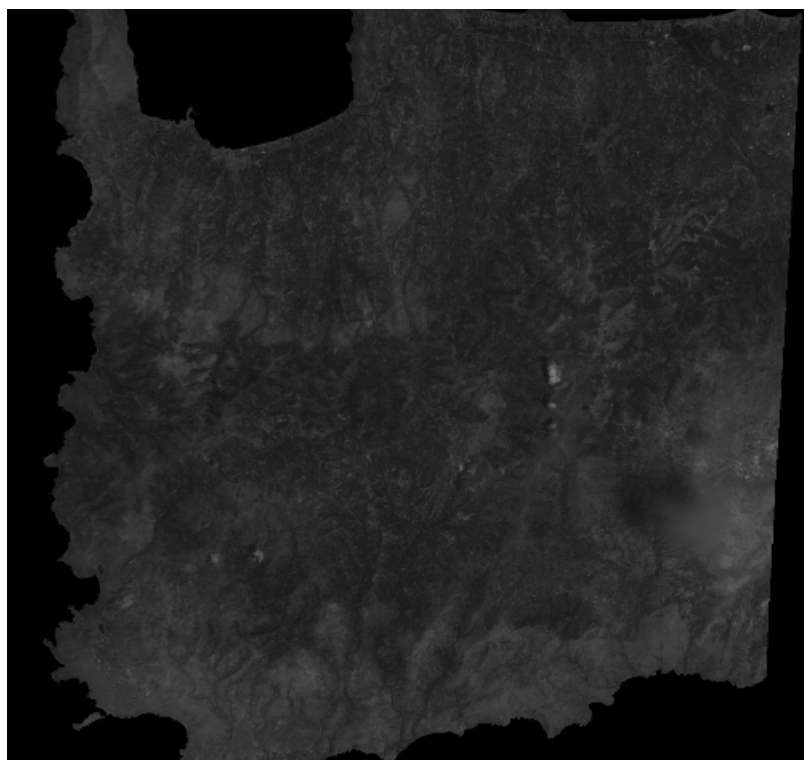


|         |    |       |     |           |        |
|---------|----|-------|-----|-----------|--------|
| Min:    | 1  | Max:  | 229 | Mean:     | 45.422 |
| Median: | 44 | Mode: | 40  | Std. Dev: | 12.050 |

**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 8 με το ιστόγραμά της.**

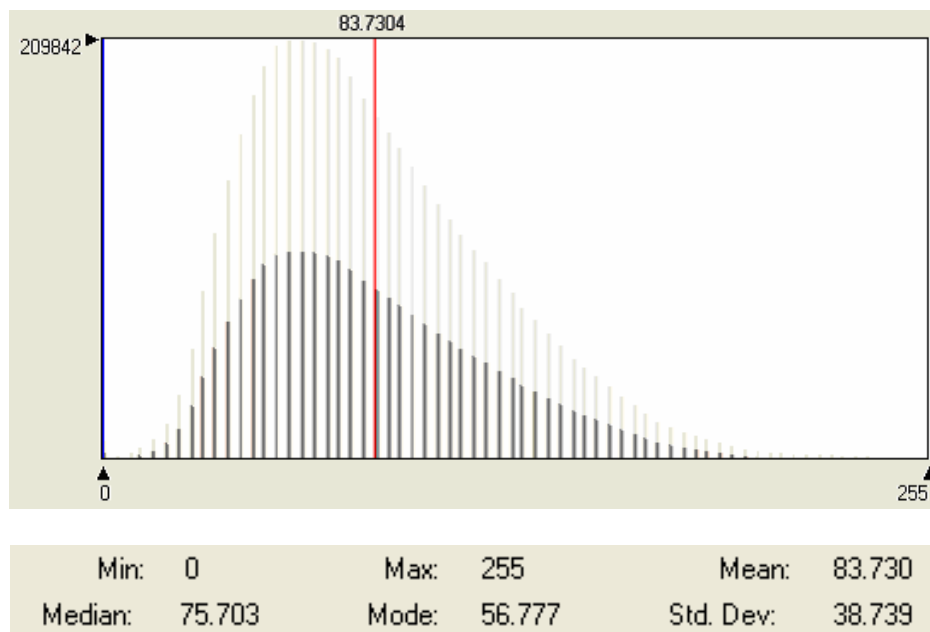
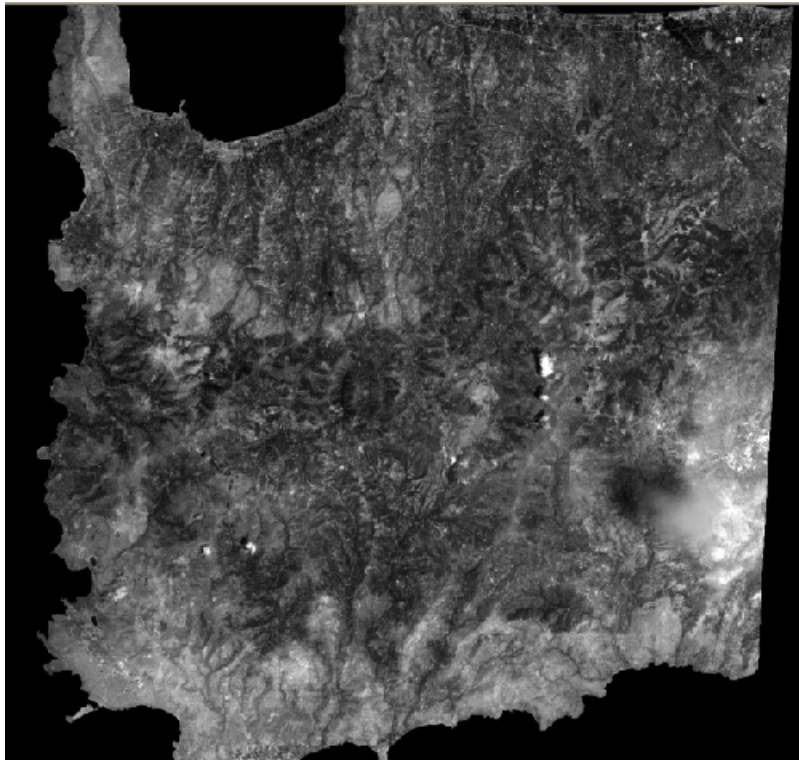


**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 8 με το ιστόγραμμα της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.**



|         |    |       |     |           |        |
|---------|----|-------|-----|-----------|--------|
| Min:    | 0  | Max:  | 220 | Mean:     | 42.979 |
| Median: | 41 | Mode: | 36  | Std. Dev: | 10.296 |

**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 9 με το ιστόγραμά της.**



**Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 9 με το ιστόγραμμα της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.**