



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 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ASTER ΓΙΑ ΤΟΝ
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΔΥΤΙΚΗ ΚΡΗΤΗ**

Παπαδάκη Σ. Ειρήνη

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Μερτίκας Στέλιος (Επιβλέπων)
Σαρρής Απόστολος
Ζερβάκης Μιχάλης

Χανιά

Νοέμβριος, 2005

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή 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 (ΜΗΧΟΠ) για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη και καθοδήγησή του κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης, τον Δρ. Απόστολο Σαρρή, ερευνητή του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών (ΙΜΣ) του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) και Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος, για τη συνεργασία και τη διάθεση των δορυφορικών εικόνων ASTER και άλλων ψηφιακών δεδομένων.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Ζερβάκη Μιχάλη, καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΗΜΜΥ) του Πολυτεχνείου Κρήτης για τις συμβουλές του σε θέματα ανάλυσης ψηφιακών εικόνων.

Ακόμη το Δρ. Φασουλά Χαράλαμπο, καθηγητή Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Κρήτης, για τη συνεισφορά του όσον αφορά στην έρευνα πεδίου και στη φωτοερμηνεία των εικόνων.

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

Νοέμβριος, 2005

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή διεκπεραιώθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος EMERIC I (Development of an Expert System for the Monitoring, Management & Protection of the Natural Landscape & Environmental Resources of the Island of Crete), σε συνεργασία με το Εργαστήριο Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπηση & Αρχαιοπεριβάλλοντος του Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών που ανήκει στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΜΣ-ΙΤΕ). Σκοπός του έργου αποτελεί ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός Έμπειρου Συστήματος παρακολούθησης, διαχείρισης και προστασίας του φυσικού τοπίου και του περιβάλλοντος της ευρύτερης περιοχής της Κρήτης.

Στόχος της εργασίας είναι η ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER (Advanced Spaceborne Thermal and Emission Radiometer) για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη και την ενημέρωση του αντίστοιχου χάρτη των γεωλογικών γραμμώσεων. Η επιλογή των κατάλληλων για περαιτέρω επεξεργασία φασματικών καναλιών καθορίστηκε από τη σχέση της ρηξιγενούς τεκτονικής με το υδρογραφικό δίκτυο και τη βλάστηση. Η ανάδειξη των γραμμώσεων – ενδεχόμενων ρηξιγενών δομών επιτεύχθηκε με την εφαρμογή τεχνικών ενίσχυσης στις πρωτογενείς εικόνες (π.χ. βελτίωση των αντιθέσεων, ανάλυση κύριων συνιστώσων, εφαρμογή χωρικών φίλτρων, αριθμητικές πράξεις μεταξύ καναλιών κ.ά.).

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασίσθηκε στους υπάρχοντες χάρτες των ρηγμάτων (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών ή ΙΓΜΕ). Η εργασία ολοκληρώθηκε με φωτοερμηνεία ασπρόμαυρων και σύνθετων ψευδοχρωματικών απεικονίσεων της περιοχής μελέτης, υπό την καθοδήγηση έμπειρου σε θέματα γεωλογικών χαρτογραφήσεων στην Κρήτη, γεωλόγου. Όπου κρίθηκε αναγκαίο πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 | 1 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 1 |
| 1.2 Στόχοι της μεταπτυχιακής διατριβής..... | 2 |
| 1.3 Δομή της διατριβής | 2 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 | 4 |
| 2.1 Βασικές αρχές Τηλεπισκόπησης | 4 |
| 2.2 Δορυφορικά συστήματα..... | 5 |
| 2.2.1 Το σύστημα καταγραφής του ASTER | 6 |
| 2.3 Γεωλογία και Τηλεπισκόπηση | 10 |
| 2.4 Γραμμώσεις γεωλογικής προελεύσεως | 11 |
| 2.4.1 Ρηξιγενείς δομές σε δορυφορικά δεδομένα..... | 12 |
| 2.4.2 Ανάλυση εικόνων για τον εντοπισμό ρηγμάτων | 13 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 | 16 |
| 3.1 Μέθοδοι επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων | 16 |
| 3.2 Τεχνικές αποκατάστασης της εικόνας..... | 17 |
| 3.3 Βελτίωση των αντιθέσεων της εικόνας | 19 |
| 3.3.1. Γραμμική ενίσχυση | 20 |
| 3.3.2 Εξισορρόπηση ιστογράμματος..... | 21 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4 Χωρικά φίλτρα | 21 |
| 3.5 Ενίσχυση με τη χρήση πολλαπλών καναλιών πολυφασματικών εικόνων.... | 28 |
| 3.5.1 Αριθμητικές πράξεις..... | 28 |
| 3.5.2 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών..... | 29 |
| 3.5.3 Δημιουργία σύνθετων ψευδοχρωματικών εικόνων..... | 30 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 | 32 |
| 4.1 Δεδομένα..... | 32 |
| 4.2 Μεθοδολογία..... | 33 |
| 4.2.1 Μετατροπή δεδομένων σε Erdas format (.img) | 35 |
| 4.2.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με υδάτινες μάζες και βλάστηση..... | 35 |
| 4.2.3 Χωρικές μάσκες..... | 36 |
| 4.2.4 Επανάληψη δειγματοληψίας για τα κανάλια του SWIR..... | 38 |
| 4.2.5 Ενίσχυση αντιθέσεων στις εικόνες..... | 39 |
| 4.2.6 Ανάλυση κύριων συνιστωσών..... | 40 |
| 4.2.7 Αριθμητικές πράξεις μεταξύ καναλιών | 41 |
| 4.2.8 Εφαρμογή χωρικών φίλτρων..... | 43 |
| 4.2.9 Επεξεργασία φιλτραρισμένων εικόνων..... | 47 |
| 4.2.10 Χαρτογραφική προβολή εικόνων σε ΕΓΣΑ '87..... | 48 |
| 4.2.11 Λέπτυνση και διανυσματοποίηση γραμμώσεων | 51 |
| 4.2.12 Φωτοερμηνεία – Σύγκριση αποτελεσμάτων | 51 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 | 52 |
| Αποτελέσματα..... | 52 |
| 5.1. Ανάλυση κύριων συνιστωσών..... | 52 |
| 5.1.1 Για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR | 53 |
| 5.1.2 Για τα κανάλια του μέσου υπερύθρου..... | 61 |

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

| | |
|---|------------|
| 5.1.3 Για τα κανάλια 1, 3N και 8..... | 62 |
| 5.2 Αριθμητικές πράξεις μεταξύ φασματικών καναλιών | 65 |
| 5.2.1 Αφαίρεση..... | 65 |
| 5.2.3 Λόγος φασματικών καναλιών 3N/2 | 68 |
| 5.3 Χωρικά φίλτρα | 72 |
| 5.3.1 Φίλτρα διευθύνσεων | 72 |
| 5.3.2 Εφαρμογή φίλτρου Sobel | 76 |
| 5.3.3 Εφαρμογή φίλτρου Laplace..... | 80 |
| 5.4 Φωτοερμηνεία – έρευνα πεδίου | 83 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 | 95 |
| Συμπεράσματα..... | 95 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ | 99 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α..... | 105 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Εισαγωγή

Τα ρήγματα αποτελούν φυσικές διόδους των υπόγειων υδάτων. Σύμφωνα με τον Drury (2001) η οικονομική σημασία της συγκέντρωσης και εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών 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.

Επιπλέον ο εντοπισμός και καθορισμός της κίνησης των τεμαχών εκατέρωθεν ενός σεισμογόνου ρήγματος είναι διπλής σημασίας για ένα γεωλόγο. Οι συνέπειες ενός σεισμού μπορεί να είναι η πρόκληση οικονομικών καταστροφών σε κτίρια, δρόμους, οικισμούς κ.ά. αλλά και η απώλεια ανθρώπινων ζωών (Colwell, 1983).

Οι παραδοσιακές μέθοδοι χαρτογράφησης των ρηγμάτων απαιτούν έρευνα πεδίου. Ο χρόνος όμως και το κόστος των επιτόπιων παρατηρήσεων αυξάνουν ανάλογα με την έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος. Επιπροσθέτως, δεν είναι πάντα εύκολο για ένα γεωλόγο 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 την διάκριση δομών, όπως είναι τα ρήγματα, από μικρού βεληνεκούς αποστάσεις από τον παρατηρητή. Τέλος, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου λόγω του δυσπρόσιτου / απρόσιτου των περιοχών (απότομο ανάγλυφο, πυκνή βλάστηση κ.ά.) η χαρτογράφηση δεν έχει ολοκληρωθεί (π.χ. περιοχή Λευκών Ορέων – Δυτική Κρήτη).

Η συνεισφορά των τηλεπισκοπικών δεδομένων στη γεωλογική γνώση είναι σημαντική. Οι δορυφορικές εικόνες παρέχουν μια συνοπτική άποψη της υπό μελέτη περιοχής περιορίζοντας πολλά από 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 στο φωτογεωλόγο – φωτοερμηνευτή τη

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

δυνατότητα να αποκαλύψει με ασφαλή τρόπο την αλληλοσυσχέτηση χαρακτηριστικών της γεωμορφολογίας σε εκτεταμένες περιοχές.

1.2 Στόχοι της μεταπτυχιακής διατριβής

Η παρούσα εργασία περιγράφει μια μεθοδολογία ανάλυσης δορυφορικών εικόνων ASTER (Advanced Spaceborne Thermal and Emission Radiometer) για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη και την ενημέρωση του αντίστοιχου χάρτη των γεωλογικών γραμμώσεων. Στην ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Κρήτης χρησιμοποιούνται πρώτη φορά για γεωλογικές εφαρμογές δορυφορικά δεδομένα ASTER (14 φασματικά κανάλια με χωρική διακριτική ικανότητα που φτάνει τα 15m στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο).

Τα ρήγματα απαντούν στις δορυφορικές εικόνες με τη μορφή γραμμώσεων (lineaments). Για τον εντοπισμό των γραμμώσεων εφαρμόστηκαν τεχνικές ενίσχυσης στις πρωτογενείς εικόνες (βελτίωση των αντιθέσεων, εφαρμογή χωρικών φύλτρων, αριθμητικές πράξεις μεταξύ καναλιών κ.ά.). Η αξιολόγηση των γραμμώσεων ως ενδεχόμενες ρηξιγενείς δομές βασίσθηκε στους υπάρχοντες χάρτες των γεωλογικών ρηγμάτων, κλίμακας 1:50.000 (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών ή ΙΓΜΕ). Όπου κρίθηκε αναγκαίο πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου.

1.3 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 τρίτο Κεφάλαιο περιγράφεται ένα ικανό υποσύνολο των σύγχρονων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων που εφαρμόστηκαν συνδυαστικά στα πλαίσια της εργασίας.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Στο τέταρτο και σημαντικότερο Κεφάλαιο της παρούσας διατριβής περιγράφονται τα επιμέρους στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας εντοπισμού των γραμμώσεων - ενδεχόμενων ρηξιγενών δομών στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στο πέμπτο Κεφάλαιο.

Στο έκτο και τελευταίο Κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα και κάποιες προτάσεις για την μελλοντική επέκταση της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

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 ως εξής (Πίνακας 2.1):

Πίνακας 2.1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

| ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ | ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ |
|---|-------------------|
| Ακτίνες γάμμα | < 0,03 nm |
| Ακτίνες X | 0,03 nm - 300 nm |
| Υπεριώδης ακτινοβολία | 0,30 μm - 0,38 μm |
| Ορατό (Visible ή V) | 0,38 μm - 0,72 μm |
| Εγγύς υπέρυθρο (Near Infra-Red ή NIR) | 0,72 μm - 1,30 μm |
| Μέσο υπέρυθρο (Short-Wave Infra-Red ή SWIR) | 1,30 μm - 3 μm |
| Άπω υπέρυθρο | 7,00 μm - 15 μm |
| Μικροκύματα | 0,3 cm - 30 cm |
| Ραδιοφωνικά κύματα | ≥ 30 cm |

Οι απεικονίσεις της Τηλεπισκόπησης μπορεί να είναι είτε σε κλασική αναλογική φωτογραφική μορφή (π.χ. αναλογικές αεροφωτογραφίες) είτε σε ψηφιακή μορφή. Η επεξεργασία των αναλογικών αεροφωτογραφιών γίνεται με τη βοήθεια της φωτογραμμετρίας και της φωτοερμηνείας, ενώ η επεξεργασία των ψηφιακών εικόνων πραγματοποιείται με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Η ψηφιακή εικόνα αναφέρεται σε μια δισδιάστατη διακριτή (με τη μορφή πίνακα) συνάρτηση $f(x,y)$. Ο πίνακας αποτελείται από διακριτά στοιχεία (εικονοστοιχεία ή

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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 πλεγματική ψηφιακή διάταξη είναι γνωστά ως αρχεία raster.

Η ποιότητα και το περιεχόμενο μιας ψηφιακής εικόνας καθορίζονται από:

1. Τη φασματική διαχωριστική ικανότητα του συστήματος ανίχνευσης (spectral resolution). Εξαρτάται από το πλήθος και το εύρος των φασματικών ζωνών καταγραφής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.
2. Τη ραδιομετρική ανάλυση (radiometric resolution). Αναφέρεται στον αριθμό των διαβαθμίσεων 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 μέτρα) καθορίζεται από τις διαστάσεις του εικονοστοιχείου (pixel).
4. Τη διαχρονική διαχωριστική ικανότητα ή διαχρονική ανάλυση (temporal resolution). Αναφέρεται στη συχνότητα δειγματοληψίας εικόνων από μια περιοχή.

2.2 Δορυφορικά 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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

(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.

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 ινστιτούτων 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 συννεφών κ.ά.

Ο ASTER είναι εγκατεστημένος στο δορυφορικό σύστημα Terra (= Γη) μαζί με άλλους τέσσερις αισθητήρες καταγραφής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2: Αισθητήρες καταγραφής στο δορυφορικό σύστημα Terra.

Advanced Spaceborne Thermal and Emission Reflection Radiometer (ASTER)

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer (MISR)

Clouds and Earth's Radiant Energy System (CERES)

Measurements Of Pollution In The Troposphere (MOPITT)

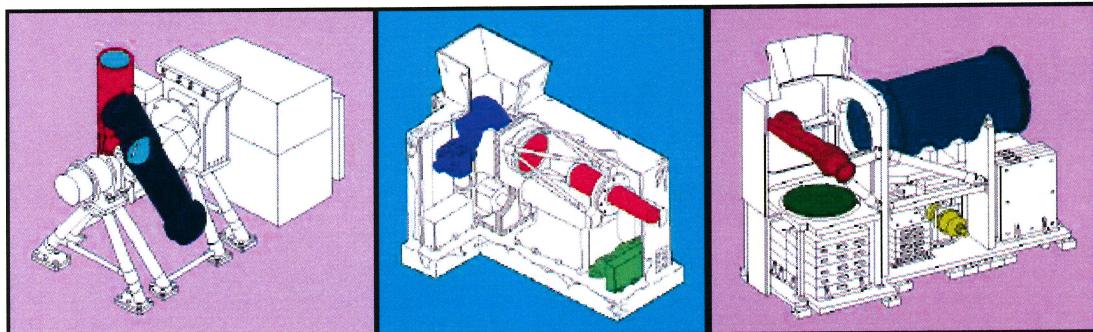
Ο δορυφόρος Terra τέθηκε σε λειτουργία την 16^η Δεκεμβρίου του 1999 με σκοπό την παρακολούθηση και προστασία του περιβάλλοντος. Εκτελεί μια ηλιο-σύγχρονη,

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

σχεδόν πολική τροχιά σε ύψος 705 km, με χρόνο διέλευσης από τον ισημερινό ($\phi = 40^{\circ}\text{N}$), 10:30 π.μ (τοπικός ηλιακός χρόνος). Η λήψη εικόνων ASTER από μια περιοχή πραγματοποιείται κάθε 16 ημέρες (Abrams, 2000).

Το σύστημα του ASTER αποτελείται από τρία υποσυστήματα καταγραφής της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (Σχήμα 2.1), σε 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 (3N και 3B του VNIR). Ειδικότερα, η λήψη στο ναδίρ ονομάζεται 3N (nadir) ενώ η λήψη υπό γωνία στο κανάλι 3B (backward looking) γίνεται καθώς ο δορυφόρος απομακρύνεται από το πεδίο κατόπτευσης.
- 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).



Σχήμα 2.1: Καταγραφικά συστήματα VNIR, SWIR, TIR, από αριστερά προς τα δεξιά (Abrams, 2000).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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 της πληροφορίας.

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά υποσυστημάτων καταγραφής ASTER.

| Υποσύστημα καταγραφής | Δίαυλος No | Φασματική διαχωριστική ικανότητα (μμ) | Χωρική διαχωριστική ικανότητα (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 | | | |
| | 10 | 8,125-8,475 | | | |
| | 11 | 8,475-8,825 | | | |
| | 12 | 8,925-9,275 | | 12bits | |
| TIR | 13 | 10,25-10,95 | 90 | | |
| | 14 | 10,95-11,65 | | | |

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

- Επίπεδο επεξεργασίας – Level_1A (L1A): πρόκειται για πρωτογενή ανεπεξέργαστα δορυφορικά δεδομένα τα οποία διατίθενται δωρεάν από το διαδίκτυο.
- Επίπεδο επεξεργασίας – Level_1B (L1B): 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 L1A εικόνες. Ο προκαθορισμένος από την

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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). Μετά από ειδική παραγγελία είναι δυνατόν η επεξεργασία των L1A να οριστεί βάσει άλλων μεθόδων χαρτογραφικής προβολής (π.χ. Lambert Conformal Conic) καθώς και επαναδειγματοληψίας των τιμών φωτεινότητας της εικόνας (π.χ. μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου).

Καθημερινά παράγονται 650 εικόνες L1A, 150 από τις οποίες υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία (εικόνες L1B). Κάθε εικόνα καλύπτει έκταση 60 km × 60 km.

Επιπλέον, με κατάλληλες ραδιομετρικές διορθώσεις και μετασχηματισμούς είναι δυνατή η μετατροπή των τιμών φωτεινότητας που καταγράφει ο σαρωτής σε παραμέτρους με φυσικές ιδιότητες (π.χ. τιμές θερμοκρασίας, υψομετρικές τιμές κ.ά.). Πρόκειται για ανώτερης επεξεργασίας εικόνες (L2 προϊόντα) που παρασκευάζονται και διατίθενται μετά από ειδική παραγγελία (<http://www.asterweb.com>, 10/2004)

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).

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

Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τον ίδιο συγγραφέα, οι τεκτονικές παραμορφώσεις του γήινου αναγλύφου, το υδρογραφικό δίκτυο μιας περιοχής κ.ά., έχουν συνήθως έκταση δεκάδων ή και εκατοντάδων χιλιομέτρων. Συνεπώς δεν είναι πάντα εύκολο για ένα γεωλόγο να αποκαλύψει και να κατανοήσει τον τρόπο με τον οποίο σχετίζονται μεταξύ τους γεωμορφολογικές δομές που καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις. Επισημαίνεται ότι προβλήματα, όπως είναι αυτό της πυκνής βλάστησης, καθιστούν δύσκολη την 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 με ασφαλή τρόπο να αποκαλύψουν την αλληλοσυσχέτηση χαρακτηριστικών της γεωμορφολογίας σε εκτεταμένες περιοχές (Drury, 2001).

Το κόστος και ο χρόνος της χαρτογράφησης μειώνονται σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους που απαιτούν έρευνα πεδίου. 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).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Επιπλέον, τα δεδομένα συλλέγονται την ίδια ώρα της ημέρας και ο δορυφόρος επαναλαμβάνει την κάλυψη της ίδιας περιοχής σε τακτά χρονικά διαστήματα. 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 όλο και μεγαλύτερης ευκρίνειας δορυφορικών εικόνων εφαρμόζεται με επιτυχία τόσο για τη χαρτογράφηση όσο και για την παρακολούθηση του φυσικού περιβάλλοντος.

Πολυνασματικές απεικονίσεις του 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 ποιότητα των αναλύσεων βελτιώνεται στην περίπτωση συγχώνευσης δεδομένων από διαφορετικά συστήματα καταγραφής (Basham et al., 1997, Green et al., 1998).

2.4 Γραμμώσεις γεωλογικής προελεύσεως

Ο όρος γράμμωση αφορά σε γραμμικά χαρακτηριστικά (π.χ. αυτοκινητόδρομοι, αεροδιάδρομοι, όρια μεταξύ ιδιοκτησιών ή καλλιεργειών, ακτογραμμή) που προκύπτουν από την ανάλυση εικόνων 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 αντανακλούν ένα υποεπιφανειακό φαινόμενο (π.χ. ρήγματα)».

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Στη γεωλογία ο όρος γράμμωση χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την ύπαρξη διαφόρων γεωλογικών χαρακτηριστικών όπως είναι (α) οι ζώνες διάτμησης / ρήγματα (τα οποία αποτελούν αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας), (β) οι ρηγματογενείς 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 Ρηγματείς δομές σε δορυφορικά δεδομένα

Ο εντοπισμός των ρηγμάτων με τη βοήθεια δορυφορικών εικόνων εξαρτάται από την χωρική ανάλυση των εικόνων σε σχέση με τις διαστάσεις των ρηγμάτων. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο τα τектονικά στοιχεία μεγέθους εκατοντάδων χιλιομέτρων πρέπει να μελετηθούν σε ψηφιακές τηλεπισκοπικές απεικονίσεις που καλύπτουν μεγάλης έκτασης περιοχές (π.χ. δορυφορικές εικόνες) και όχι σε αεροφωτογραφίες (Gupta, 1991).

Τα ρήγματα γίνονται συνήθως αντιληπτά από τη σκιά τοπογραφικών ανωμαλιών που καταγράφονται στην εικόνα. Η εμφάνιση και το μέγεθος των σκιάσεων εξαρτώνται από τη γωνία ύψους του Ήλιου τη στιγμή της λήψης της εικόνας, την ύπαρξη νέφωσης αλλά και τη σχετική θέση / προσανατολισμό των γραμμώσεων σε σχέση με τη θέση της πηγής φωτισμού (Μηλιαρέσης, 2003). Ιδανικές συνθήκες για την ανάδειξη των ρηγμάτων θεωρούνται εκείνες κατά τις οποίες ο Ήλιος δεν είναι ιδιαίτερα ψηλά και το ρήγμα φωτίζεται πλάγια από το επίπεδο μετατόπισης. Αν το ρήγμα είναι προσανατολισμένο παράλληλα στη διεύθυνση φωτισμού του Ήλιου είναι δύσκολο ή αδύνατον να εντοπισθεί στην εικόνα.

Επίσης τα ρήγματα αποτελούν φυσικές διόδους των υδάτων. Κατά συνέπεια η υγρασία που αναπτύσσεται κατά μήκος των ζωνών διάρρηξης επηρεάζει τη σύσταση του εδάφους και την ανάπτυξη των διαφόρων ειδών των φυτών. Απότομες μεταβάσεις από ένα είδος βλάστησης σε ένα άλλο καθώς και η κατά προτίμηση επιμήκης ανάπτυξη αυτής, υποδεικνύουν θέσεις γεωλογικών ρηγμάτων (Miller, 1961). Επισημαίνεται το γεγονός ότι ευκρινείς σχέσεις μεταξύ των ρηγμάτων και της μορφολογίας διακρίνονται σε περιοχές με

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Αντική Κρήτη.

λίγη βλάστηση και αβαθή εδάφη. 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 γεγονός ότι η διάβρωση κατά μήκος των ζωνών των ρηγμάτων έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου ελεγχόμενου 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 ρίζης του φλοιού.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται και στη γεωλογία της περιοχής μελέτης καθότι 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 (π.χ. ασβεστόλιθοι) πετρωμάτων (Κίλιας, 1998).

Τέλος, τα ρήγματα μικρής γωνίας κλίσης ($<45^\circ$) συνήθως δεν αφήνουν 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 συνιστώσων σε δεδομένα του Landsat ETM (Enhanced Thematic Mapper). Η εφαρμογή της ίδιας τεχνικής σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους επεξεργασίας

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Αντική Κρήτη.

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 μμ) του Landsat 7-ETM και η μετέπειτα δημιουργία σύνθετων ψευδοχρωματικών εικόνων οδήγησε στη χαρτογράφηση και ερμηνεία δομών στο Νοτιοδυτικό Ιράν (Ahmad *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).

Καθότι τα αποτελέσματα της φωτοερμηνείας ποικίλλουν από ερευνητή σε ερευνητή, το 1996 (Poscolieri *et al.*) έγινε μια προσπάθεια επεξεργασίας δεδομένων Landsat για τον εντοπισμό ρηγμάτων 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, Hreddi *et al.*, 1999).

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι δυνατότητες της Τηλεπισκόπησης ενισχύονται σημαντικά από εκείνες που παρέχονται στα πλαίσια ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems ή GIS). Τα σύγχρονα λογισμικά προγράμματα των GIS δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων απεικονίσεων του γήινου αναγλύφου. Σε συνδυασμό με τη φασματική πληροφορία των δορυφορικών δεδομένων και τη μετέπειτα δημιουργία σύνθετων ψευδοχρωματικών

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Λυτική Κρήτη.

εικόνων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η χαρτογράφηση και ερμηνεία γεωλογικών δομών σε μεγάλης έκτασης περιοχές (Μίγγιρος κ.ά., 1995, Ali *et al.*, 2004).

Δεν υπάρχει κάποιος μεθοδικός κανόνας για τον εντοπισμό των ρηγμάτων. Αυτό ισχύει καθότι η εμφάνισή τους εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων (χωρική ανάλυση), τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τη θέση του Ήλιου, 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 εξογιωγής 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 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 εικόνων (ανάλυση ψηφιακών εικόνων). Τα αποτελέσματα της φωτοερμηνείας μπορεί να ποικίλλουν από ερευνητή σε ερευνητή κι επομένως η τεχνική δεν συνιστάται ως μια αντικειμενική μέθοδο ανίχνευσης των γραμμώσεων.

Από την άλλη πλευρά, οι δυνατότητες που παρέχουν τα σημερινά λογισμικά προγράμματα για την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων είναι τεράστιες. Ο ανθρώπινος οφθαλμός δεν έχει τη δυνατότητα διάκρισης μικρών ραδιομετρικών ή φασματικών διαφορών που χαρακτηρίζουν τα διάφορα αντικείμενα πάνω στην επιφάνεια της Γης. Η ψηφιακή ενίσχυση (βελτίωση) των εικόνων αποσκοπεί στην ενίσχυση αυτών των διαφορών ώστε να γίνονται εύκολα αντιληπτές κατά τη φωτοερμηνεία του πεδίου κατόπινευσης.

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 μεταβάλλουν τις τιμές του τόνου του γκρι λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των γειτονικών εικονοστοιχείων.

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 RGB - Red Green Blue).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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 αποκατάστασης της εικόνας,
- 2) τεχνικές βελτίωσης των αντιθέσεων,
- 3) τεχνικές χωρικού φίλτραρισματος,
- 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 τη διαφορά στη φασματική απόκριση των υλικών του γήινου αναγλύφου λόγω της επίδρασης της τοπογραφίας, της επίδρασης της ατμόσφαιρας, τα ραδιομετρικά σφάλματα που προκαλούνται λόγω κακής λειτουργίας ή απορύθμισης 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, 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 στον ηλεκτρονικό υπολογιστή 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, όπως είναι το ύψος και η ταχύτητα του δορυφόρου, που όμως δεν καταγράφονται συνεχώς (Μηλιαρέσης, 2003).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Χαρτογραφική προβολή εικόνων

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

Κατά την εγγραφή των δεδομένων σε ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς χρησιμοποιείται μια εικόνα ή χάρτης ως αναφορά. Ο μετασχηματισμός (γραμμικός, πολυωνυμικός κ.ά.) υλοποιείται με τον προσδιορισμό σταθερών σημείων ελέγχου (Ground Control Points ή GCPs) κοινών στην εικόνα και το χάρτη. Στην πράξη για τη μετατροπή από τις συντεταγμένες της εικόνας στις συντεταγμένες του χάρτη χρησιμοποιούνται πολυώνυμα μέχρι 3^{ου} βαθμού (Richards, 1997). Για τις αεροφωτογραφίες π.χ. χρησιμοποιούνται πάντα πολυώνυμα 1^{ου} βαθμού. Γενικά, όσο αυξάνει ο βαθμός του πολυωνύμου η ακρίβεια του μετασχηματισμού θα είναι υψηλή στην περιοχή ανάμεσα στα GCPs όμως στις περιοχές της εικόνας εκτός των GCPs η παραμόρφωση είναι πολύ πιθανή (Τριπολιτσιώτης, 1998).

Το μέτρο της προσαρμογής της εικόνας στον χάρτη προσδιορίζεται από τις τιμές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square ή 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) στο χάρτη:

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

όπου,

x_r, y_r : συντεταγμένες σημείου στην μετασχηματισμένη εικόνα

x_i, y_i : συντεταγμένες σημείου στον χάρτη

Για το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 ή ΕΓΣΑ'87, το RMS υπολογίζεται σε μονάδες μήκους (m).

Καθότι μετά το μετασχηματισμό οι θέσεις των εικονοστοιχείων έχουν αλλάξει, είναι αναγκαίο να επαναπροσδιοριστούν οι τιμές φωτεινότητας στις νέες θέσεις των

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

ψηφίδων. Στην προκύπτουσα εικόνα λαμβάνει χώρα επανάληψη της δειγματοληψίας (resampling) βάσει διαφόρων μεθόδων παρεμβολής (π.χ. μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου, διγραμμική παρεμβολή, 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 πλησιέστερα στην υπό παρεμβολή ψηφίδα. Θεωρείται αρκετά χρονοβόρα και λόγω της εξομάλυνσης που προκαλείται στην μετασχηματισμένη εικόνα δεν ενδείκνυται για εξαγωγή συμπερασμάτων. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία (Μερτίκας, 1999).

3.3 Βελτίωση των αντιθέσεων της εικόνας

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 χαμηλή αντίθεση (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).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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 επί της οθόνης υλοποιείται με τη βοήθεια μιας γραμμικής εξίσωσης της μορφής:

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

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 γκρίζου όσα και για αυτές μεγαλύτερης συχνότητας εμφανίσης, στο κέντρο του ιστογράμματος (Αργιαλάς, 1999).

Για να διορθωθεί αυτό μπορούν να καθοριστούν από το χρήστη τα όρια αποκοπής, a και b, βάσει των, μικρής συχνότητας, εμφανίσεων αυτών από το ιστόγραμμα. Εναλλακτικά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τα ποσοστιαία σημεία (percentiles) του ιστογράμματος (π.χ. ενίσχυση μεταξύ των 5^{ου} και 95^{ου} ποσοστιαίων σημείων, 10^{ου} - 90^{ου} κοκ.).

Σημειώνεται ότι τα σημερινά λογισμικά προγράμματα για την επεξεργασία εικόνων δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα να διαχειριστεί συγκεκριμένα εύρη τιμών φωτεινότητας, ανάλογα με το αν θέλει να ενισχύσει, συμπιέσει ή ακόμα και να αφήσει αμετάβλητες ορισμένες περιοχές τιμών.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

3.3.2 Εξισορρόπηση ιστογράμματος

Στην προσπάθεια να αντιμετωπισθεί το κύριο μειονέκτημα του γραμμικού μετασχηματισμού (απόδοση των ίδιων διαβαθμίσεων του γκρίζου 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 ομαδοποίησεις 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 κ , ορίζεται ως εξής:

$$\kappa = \frac{1}{\lambda}$$

όπου,

λ : χωρική περίοδος (σε μονάδες μήκους)

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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Πρακτικά η χωρική συχνότητα γίνεται αντιληπτή από την «τραχύτητα» των εναλλαγών του τόνου του γκρίζου ή αλλιώς από το κατά πόσο απότομες ή ομαλές μπορούν να χαρακτηριστούν οι μεταβολές των τιμών 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 φίλτραρισματος 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. 3×3 , 5×5 , 7×7) έτσι ώστε να υπάρχει πάντα ένα κεντρικό εικονοστοιχείο. Η επιλογή των διαστάσεων εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Μεγάλες διαστάσεις (π.χ. 7×7 , 11×11) 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 γκρι.

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

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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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

| | | |
|-------|-------|-------|
| f_1 | f_2 | f_3 |
| f_4 | f_5 | f_6 |
| f_7 | f_8 | f_9 |

Το φίλτρο ρισματικής εικόνας αφορά καταρχήν στον υπολογισμό των γινομένων των συντελεστών w_i με τις αντίστοιχες τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων που βρίσκονται κάτω από το 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 :

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

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 W (normalization of kernel).

Το παράθυρο μετακινείται στην επόμενη ψηφίδα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Ανίχνευση και ενίσγυνση 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. Η εικόνα είναι μια δισδιάστατη, διακριτή συνάρτηση (τα κέντρα των ψηφίδων είναι διακριτά σημεία στο χώρο). Στην απλούστερη περίπτωση, η πρώτη παράγωγος στο σημείο (x, y) ως προς τη διεύθυνση x που ορίζουν οι γραμμές του πίνακα της εικόνας (Ενότητα 2.1) ορίζεται από τη διαφορά:

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = f(x+1, y) - f(x, y)$$

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 παραγώγισης. Το πλεονέκτημα αυτού του είδους των φίλτρων (directional filters) έγκειται στην επιλεκτική ενίσχυση των ακμών σε συγκεκριμένες διευθύνσεις.

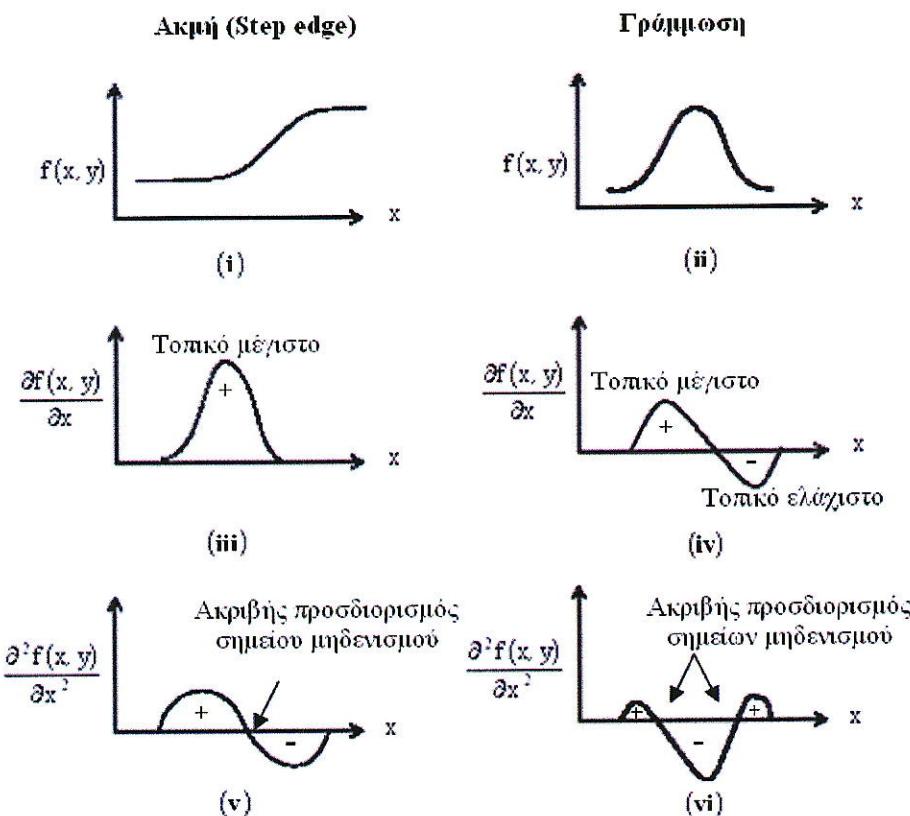
Με τη βοήθεια ενός επιπλέον διαφορικού μπορεί να υπολογισθεί και η δεύτερη παράγωγος σε σημείο. Π.χ. στο σημείο (x, y) ως προς τη διεύθυνση των γραμμών, x, η δεύτερη παράγωγος υπολογίζεται ως εξής:

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

Ας σημειωθεί ότι 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 γκρίζου ενώ οι ακμές εμφανίζονται είτε σκοτεινές (αρνητικό αποτέλεσμα παραγώγισης) 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 και 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. 3x3), 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 κούλων και κυρτών σημείων). 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.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Η ολική πρώτη παράγωγος (gradient operator) σε ένα σημείο (x, y) της εικόνας, 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.

Ισχύουν τα παρακάτω:

$$\vec{\nabla f(x,y)} = \frac{\partial f(x,y)}{\partial x \partial y} = \left(\frac{\partial f(x,y)}{\partial x}, \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right)$$

Το μέτρο (magnitude) του διανύσματος της κλίσης (ή της πρώτης παραγώγου) σε κάθε εικονοστοιχείο θα είναι:

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

ή

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

Χαρακτηριστικό παράδειγμα φίλτρων πρώτης παραγώγου που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέτρου της κλίσης της φωτεινότητας, αποτελεί η διαδοχική εφαρμογή των πινάκων κατά Prewitt (Σχήμα 3.2).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

$$\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Σχήμα 3.2: Πίνακες κατά Prewitt.

Η ολική δεύτερη παράγωγος στο εν λόγω σημείο (x, y) υπολογίζεται ως εξής:

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

όπου,

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

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

με αποτέλεσμα,

$$\nabla^2 f(x,y) = f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y)$$

Χαρακτηριστικό παράδειγμα φίλτρων δεύτερης παραγώγου είναι τα φίλτρα Laplace. Υπάρχουν διάφορες επιλογές για τη σύνθεση ενός φίλτρου Laplace (Σχήμα 3.3). Το αποτέλεσμα μπορεί να είναι είτε ένας θετικός είτε ένας αρνητικός αριθμός.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

| | | |
|---|----|---|
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | -4 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |

| | | |
|---|----|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | -8 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

Σχήμα 3.3: Φίλτρα δεύτερης παραγώγου (Laplace).

Σημειώνεται ότι τα φίλτρα Laplace αν και ανταποκρίνονται σε απότομες μεταβολές είναι ευαίσθητα στο 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 στο 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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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 π.χ. μιας εικόνας X με τον εαυτό της ($Y = X^2$) 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 ψηφιακής επεξεργασίας μιας 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 ή PCA) αφορά σε ένα γραμμικό μετασχηματισμό των δεδομένων με βάση τους συντελεστές μεταβλητών - συμμεταβλητών των πρωτογενών εικόνων. Μια βασική εφαρμογή της μεθόδου είναι η μείωση του αριθμού των αρχικών καναλιών μιας πολυφασματικής εικόνας 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 (eigenvalues) και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων (eigenvectors) που προκύπτουν από τον πίνακα διασποράς (ή πίνακα μεταβλητών - συμμεταβλητών). Η συνολική διασπορά που υπάρχει στα δεδομένα προσεγγίζεται από το άθροισμα των ιδιοτιμών των κύριων συνιστωσών. 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:

Análysi δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

$$\lambda_{PC1} > \lambda_{PC2} > \lambda_{PC3} \dots$$

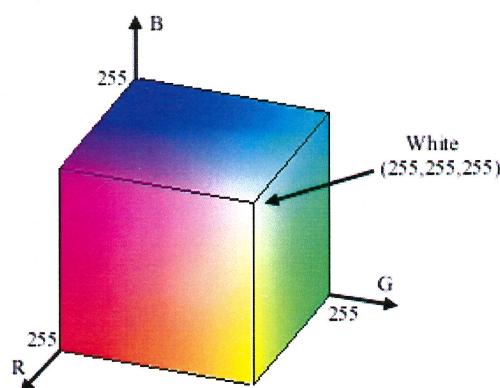
όπου λ : ιδιοτιμή

Σημειώνεται ότι οι πολύπλοκοι μαθηματικοί υπολογισμοί που λαμβάνουν χώρα στα πλαίσια της ανάλυσης των κύριων συνιστώσων βασίζονται στην Άλγεβρα Πινάκων (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 κύρια χρώματα δηλ. το ερυθρό, το πράσινο και το ιώδες.

Το κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύεται από ένα τρισδιάστατο διάνυσμα το οποίο βρίσκεται μέσα στον χρωματικό κύβο RGB (Σχήμα 3.4). 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.



Σχήμα 3.4: Το χρωματικό μοντέλο RGB (από Erdas, 2001).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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 όταν απεικονίζεται με τις διάφορες διαβαθμίσεις του τόνου του γκρι.

Στις προηγούμενες παραγράφους υποδείχθηκε ένα ικανό υποσύνολο των τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας μιας εικόνας που εφαρμόστηκαν συνδυαστικά στο Κεφάλαιο 3 για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Οι τεχνικές αυτές αφορούν σε μετασχηματισμούς που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο της εικόνας. Υπάρχει και μια δεύτερη κατηγορία ενισχύσεων που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο των συχνοτήτων. 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 χωρικό πεδίο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Δεδομένα

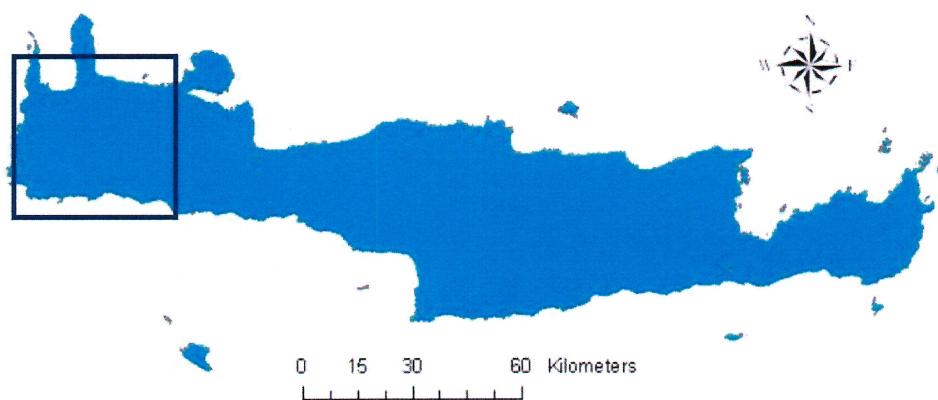
Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής χρησιμοποιήθηκαν τα πολυνφασματικά δεδομένα του συστήματος ASTER (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1. Δεδομένα

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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Η εν λόγω πολυφασματική εικόνα του ASTER απεικονίζει το μεγαλύτερο τμήμα της Δυτικής Κρήτης (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Περιοχή μελέτης

Οι επιμέρους εικόνες για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR μαζί με τα αντίστοιχα ιστογράμματα και τα στατιστικά στοιχεία των κατανομών παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

4.2 Μεθοδολογία

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 μεταπυχαική διατριβή είναι 127 MB. Αντιλαμβάνεται, λοιπόν, κανείς ότι για τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής ο αναλυτής πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσει τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ / περιφερειακά μέσα αποθήκευσης που χρειάζονται για την επεξεργασία των δεδομένων σε συνδυασμό με την έκταση της περιοχής μελέτης και την απαιτούμενη φασματική διακριτική ικανότητα των διαύλων.

Στην παρούσα εργασία η επιλογή των κατάλληλων για περαιτέρω επεξεργασία φασματικών καναλιών καθορίστηκε από τη σχέση της ρηξιγενούς τεκτονικής με τα παρακάτω γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά:

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

1) Το υδρογραφικό δίκτυο. Τα ρήγματα αποτελούν φυσικές διόδους των υπόγειων υδάτων. Αντό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της υγρασίας του εδάφους στις επίμαχες θέσεις της διάρρηξης. Απότομες εκτροπές της ροής των ρεμάτων και ασύμμετρες κοιλάδες συνδέονται άμεσα με την τектονική κατάσταση της υπό μελέτη περιοχής.

2) Τη βλάστηση. Τα ρευστά που βρίσκονται φυσικές διόδους δια μέσω των ρηγμάτων, επηρεάζουν την υγρασία και τη σύσταση του εδάφους και κατά συνέπεια την ανάπτυξη και διαβίωση των διαφόρων ειδών των φυτών (Miller, 1961). Απότομες, λοιπόν, μεταβάσεις από ένα είδος βλάστησης σε ένα άλλο αλλά και η κατά προτίμηση επιμήκης ανάπτυξη της βλάστησης, υποδεικνύουν θέσεις ρήξης του φλοιού (Κεφάλαιο 2).

Η παράβλεψη των φασματικών καναλιών στο TIR οφείλεται στην ιδιαίτερα μικρή χωρική διακριτική ικανότητα ($90m \times 90m$) στις αντίστοιχες φασματικές ζώνες καταγραφής της ακτινοβολίας.

Η χαρτογραφική προβολή των εικόνων στο ΕΓΣΑ '87 κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί στα τελευταία στάδια της μελέτης έτσι ώστε να αποφευχθεί ο μετασχηματισμός της θέσης και των τιμών φωτεινότητας των ψηφίδων πριν από την ανάλυση των εικόνων.

Η ψηφιακή επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των λογισμικών προγραμμάτων ERDAS Imagine V8.7, Matlab R13, ArcView 8x και WinTopo Freeware.

Τα επιμέρους στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι τα εξής:

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Αντική Κρήτη.

4.2.1 Μετατροπή δεδομένων σε Erdas format (.img)

Στη πρώτη στάδιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε η μετατροπή των δεδομένων από EOS format (.hdf) σε Erdas format (.img) ώστε η επεξεργασία τους να μπορεί να πραγματοποιηθεί με το διαθέσιμο λογισμικό.

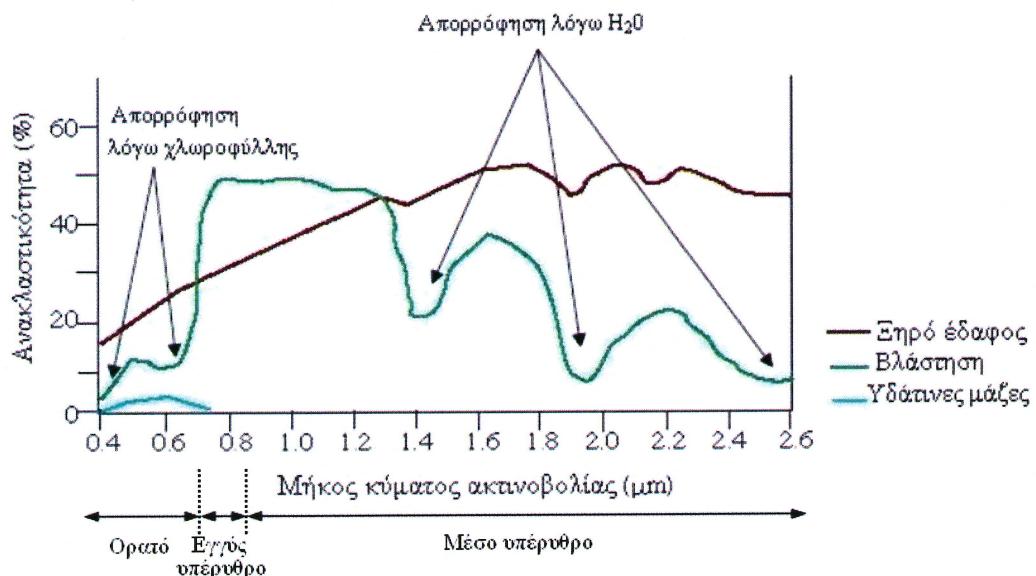
4.2.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με υδάτινες μάζες και βλάστηση

Σε κάθε καμπύλη του Σχήματος 4.2 απεικονίζεται το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος, από τις υδάτινες μάζες, τη βλάστηση και το ξηρό (γυμνό) έδαφος. Η επιλογή των φασματικών καναλιών για την ανάδειξη του υδρογραφικού δικτύου και της βλάστησης καθορίστηκε από 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 μμ). Η βλάστηση απεικονίζεται επί της οθόνης με υψηλές τιμές φωτεινότητας.
- 2) Απορρόφηση της ακτινοβολίας από τη βλάστηση (χαμηλές τιμές φωτεινότητας επί της οθόνης) στο κόκκινο τμήμα του ορατού φάσματος (φασματικό κανάλι 2, εύρος φασματικής καταγραφής 0,63-0,69 μμ).
- 3) Απορρόφηση της ακτινοβολίας από το H₂O σε μήκος κύματος 1,9 μμ.
- 4) Απορρόφηση του υδροξυλίου (OH⁻) σε μήκη κύματος 2,2 – 2,3 μμ (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 υπερύθρου. Όσο περισσότερη είναι η περιεχόμενη υγρασία τόσο πιο σκοτεινό εμφανίζεται το έδαφος επί της οθόνης (αντίθεση μεταξύ υγρών / ξηρών εδαφών).
- 6) Η ακτινοβολία παρουσιάζει υψηλή (σχετικά) ανακλαστικότητα από το νερό σε μήκη κύματος 0,52-0,60 μμ (φασματικό κανάλι 1 του ASTER) και απορροφάται από τις υδάτινες μάζες στο εγγύς υπέρυθρο (κανάλι 3N). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα,

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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 νερού, βλάστησης και ξηρού εδάφους.

4.2.3 Χωρικές μάσκες

Το στάδιο αυτό αφορούσε στη δημιουργία **χωρικών μασκών** (μία για τα κανάλια του VNIR και μία για τα κανάλια του SWIR) προκειμένου να απομονωθεί η θάλασσα (απόδοση ψηφιακής τιμής $DN = 0$) και να καταστεί έτσι εφικτή η επεξεργασία της περιοχής που καλύπτεται μόνο από την 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 επηρεάσουν 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 της ακτογραμμής επί της οθόνης και την δυαδική κατάτμηση των εικόνων έτσι ώστε:

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

$$N(x, y) = g(x, y) \times h(x, y)$$

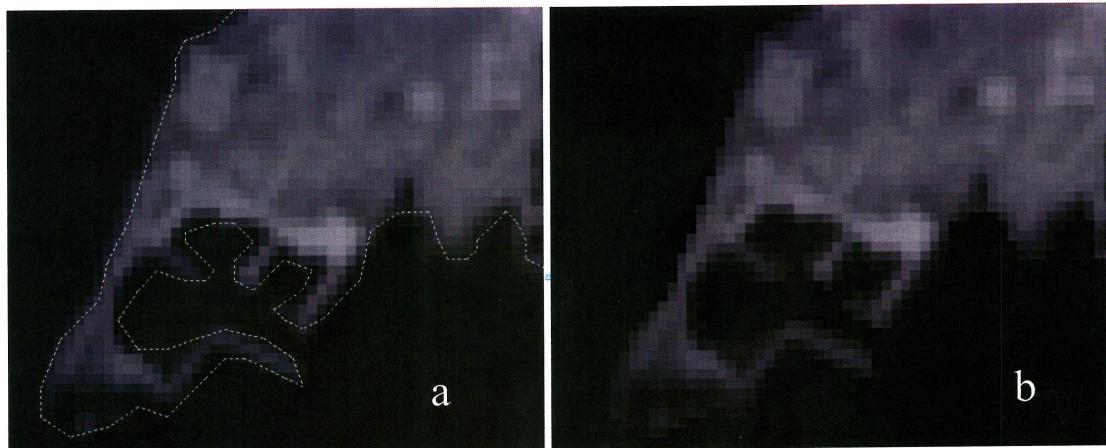
όπου,

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

$g(x, y)$: εικόνα εισόδου

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

Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι με ψηφιοποίηση της ακτογραμμής επί της οθόνης δεν είναι εφικτή η οριοθέτηση της ξηράς από τη θάλασσα με ακρίβεια (Σχήμα 4.3-b). Αυτό αναμένεται να δημιουργήσει πρόβλημα στην προσπάθεια προσδιορισμού των GCPs επί των εικόνων κατά τη γεωμετρική τους αναγωγή. Σημειώνεται ότι τα σημεία προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια της εικόνας $3N$ πριν από οποιαδήποτε επεξεργασία καθότι στο εγγύς υπέρυθρο (απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα νερά) ο διαχωρισμός της ξηράς από τη θάλασσα γίνεται εύκολα αντιληπτός. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη χαρτογραφική προβολή των εικόνων παρατίθενται στην Ενότητα 4.2.10.

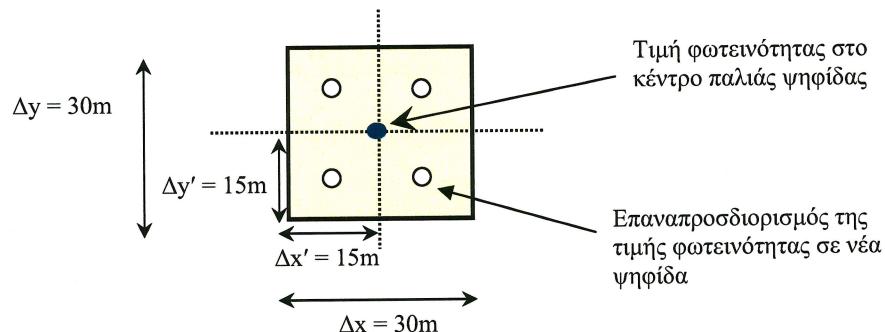


Σχήμα 4.3: a) Δημιουργία χωρικής μάσκας με ψηφιοποίηση της ακτογραμμής επί της οθόνης. b) Εικόνα μετά την εφαρμογή της χωρικής μάσκας.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

4.2.4 Επανάληψη δειγματοληψίας για τα κανάλια του SWIR

Προκειμένου να δημιουργηθούν εικόνες που να συνδυάζουν την υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα (15m) στα κανάλια του VNIR με την υψηλή φασματική δειγματοληψία στα κανάλια του μέσου υπερύθρου (SWIR), κρίθηκε σκόπιμο να επαναληφθεί η διαδικασία της δειγματοληψίας (resampling) για τα κανάλια 4, 5, 6, 7, 8 και 9. Κάθε εικονοστοιχείο διαστάσεων $\Delta x = \Delta y = 30\text{m}$ διαιρέθηκε σε τέσσερα (4) νέα εικονοστοιχεία, ορίζοντας με αυτό το τρόπο το νέο διάστημα δειγματοληψίας $\Delta x' = \Delta y' = 15\text{m}$ (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^ο βαθμού (cubic spline interpolation). Για περισσότερες λεπτομέρειες όσον αφορά στη συγκεκριμένη μέθοδο, ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία (Matlab, 2002).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

4.2.5 Ενίσχυση αντιθέσεων στις εικόνες

Η ενίσχυση των αντιθέσεων στις εικόνες (contrast stretching) πραγματοποιήθηκε με γραμμική επέκταση του ιστογράμματος μεταξύ μιας ελάχιστης (DN_{min}) και μιας μέγιστης (DN_{max}) ψηφιακής τιμής (Παράρτημα A). Η επιλογή των DN_{min} και DN_{max} (Πίνακας 4.2) βασίσθηκε στην ιδιαίτερα μικρή συχνότητα εμφάνισης αυτών στα ιστογράμματα των αντίστοιχων εικόνων.

Πίνακας 4.2: Τιμές στις οποίες βασίσθηκε η γραμμική ενίσχυση των αντιθέσεων στις εικόνες.

| Υποσύντημα καταγραφής | Δίαυλος | Φασματική διαχωριστική ικανότητα (μm) | Ελάχιστη τιμή (DN_{min}) | Μέγιστη τιμή (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 |

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

4.2.6 Ανάλυση κύριων συνιστώσων

Στη συνέχεια εφαρμόσθηκε η τεχνική της ανάλυσης των κύριων συνιστώσων για όλα καθώς και για επιλεγμένα κανάλια του VNIR και του SWIR. Ειδικότερα η PCA έλαβε χώρα για:

- i) Όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR.
- ii) Όλα τα φασματικά κανάλια του SWIR με σκοπό τον υπολογισμό μίας συνιστώσας που θα εκφράζει το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής διασποράς στα κανάλια του μέσου υπερύθρου.
- iii) Επιλεγμένα κανάλια όπου η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τις υδάτινες μάζες και τη βλάστηση παρουσιάζει ενδιαφέρον. 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 (OH^-) στην περιοχή $2,2 - 2,3 \mu\text{m}$ του φάσματος (φασματικό εύρος καταγραφής κατά προσέγγιση από το εν λόγω κανάλι). Λόγω της υψηλής συσχέτισης των καναλιών του SWIR (Κεφάλαιο 5, Πίνακας 5.1), η επιλογή του 6^{ου} ή του 7^{ου} καναλιού έναντι του 8^{ου} που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν δεν θα δημιουργούσε ουσιαστική διαφοροποίηση στα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

4.2.7 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. Η επιφανειακή υγρασία σχετίζεται με $DN > 0$ ενώ η βλάστηση αφορά σε $DN < 0$.

Υπενθυμίζουμε ότι η οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή δύναται να απεικονίσει τις τιμές εξόδου στην ικλίμακα 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. Λόγοι μεταξύ καναλιών (π.χ. $\frac{\text{ΚανάλιI}}{\text{ΚανάλιJ}}$). Για την ενίσχυση των αντιθέσεων στην εικόνα εξόδου, στην περίπτωση που οι ψηφιακές τιμές της εικόνας του αριθμητή είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του παρονομαστή ($DN_{\text{ΚανάλιI}} \gg DN_{\text{ΚανάλιJ}}$), αρκεί ο πολλαπλασιασμός του αποτελέσματος με μια σταθερά. Δεν ισχύει όμως το ίδιο όταν $DN_{\text{ΚανάλιI}} \ll DN_{\text{ΚανάλιJ}}$. Στην περίπτωση αυτή το εύρος των τιμών είναι πολύ μικρό και περιορίζεται στην περιοχή πλησίον του μηδενός. Σύμφωνα με το Faust (1992) καλύτερα οπτικά αποτελέσματα επιτυγχάνονται με τον υπολογισμό της σχέσης K (Erdas, 2001):

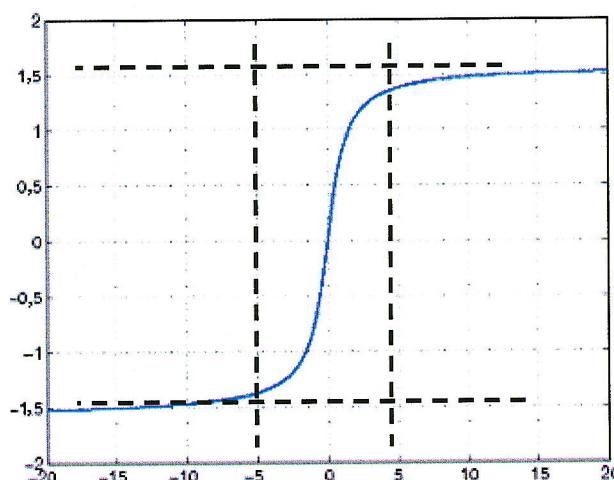
$$K = \text{atan}\left(\frac{\text{ΚανάλιI}}{\text{ΚανάλιJ}}\right)$$

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

όπου,

atan (arctangent): συνάρτηση αντίστροφης εφαπτομένης

Η atan (Σχήμα 4.5) έχει την ιδιότητα να ενισχύει τις ψηφιακές τιμές στο κέντρο του ιστογράμματος σε ένα μεγαλύτερο εύρος από εκείνο που προκύπτει με τον υπολογισμό των απλών λόγων.



Σχήμα 4.5: Η συνάρτηση της αντίστροφης 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.

Επισημαίνεται ότι 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 των καναλιών στο VNIR, η οποία είναι γνωστή ως η μέθοδος των σκοτεινών στόχων (dark pixel subtraction).

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

Για την διόρθωση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων, προσδιορίστηκε από το ιστόγραμμα της εικόνας $3N$ (πριν από την εφαρμογή της χωρικής μάσκας) η τιμή

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

διαχωρισμού της θάλασσας από την ξηρά, $DN = 33$. Η εν λόγω τιμή αφαιρέθηκε στη συνέχεια από τις τιμές φωτεινότητας για κάθε ψηφίδα της εικόνας $3N$ έτσι ώστε στην εικόνα εξόδου τα εικονοστοιχεία που αφορούν στις υδάτινες μάζες να έχουν $DN \approx 0$. Η ίδια τιμή αφαιρέθηκε και από τις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων του διαύλου 2.

Μετά τις απαιτούμενες ατμοσφαιρικές διορθώσεις και με στόχο την ενίσχυση των ρεμάτων και της βλάστησης υπολογίστηκε η εξής μαθηματική πράξη:

$$\text{Atan} \left(\frac{\text{Κανάλι}3N}{\text{Κανάλι}2} \right)$$

Οι υψηλές τιμές αφορούν στη βλάστηση (για τον επίμαχο στόχο ισχύει $DN_{\text{Κανάλι}3N} > DN_{\text{Κανάλι}2}$), ενώ οι χαμηλές τιμές φωτεινότητας αφορούν στις υδάτινες μάζες ($DN_{\text{Κανάλι}3N} < DN_{\text{Κανάλι}2}$).

4.2.8 Εφαρμογή χωρικών φίλτρων

Καθότι η διακριτική ικανότητα του συστήματος καταγραφής του ASTER φτάνει τα 15m στο VNIR και μόλις τα 30m στο SWIR, είναι εκ των προτέρων αδύνατο να εντοπισθούν στην εικόνα ρήγματα μήκους ή πλάτους $< 15m$. Συνεπώς η επιλογή των κατάλληλων χωρικών φίλτρων πρέπει να γίνει μεταξύ πινάκων μικρών διαστάσεων (π.χ. 1×3 , 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 και από παλαιότερες μελέτες τόσο με παραδοσιακές μεθόδους χαρτογράφησης (Φυτρολάκης, 1980) όσο και με τη βοήθεια δορυφορικών δεδομένων

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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 το λόγο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο να εφαρμοστούν φίλτρα ενίσχυσης των ακμών ως προς τις συγκεκριμένες διευθύνσεις (Σχήμα 4.6).

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 & -1 \\ \hline \end{array} \quad \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline \end{array}$$

Σχήμα 4.6: Χωρικά φίλτρα για την ενίσχυση των γραμμώσεων διευθύνσεως Βορρά-Νότου (αριστερά) και Ανατολής-Δύσης (δεξιά).

Δεδομένου ότι το αζιμούθιο του Ηλίου ήταν 127° τη στιγμή λήψης της εικόνας εφαρμόστηκε φίλτρο ενίσχυσης των παράλληλων στη διεύθυνση φωτισμού γραμμώσεων (Σχήμα 4.7).

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -1 & 0 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Σχήμα 4.7: Χωρικό φίλτρο ενίσχυσης των γραμμώσεων Βορειοανατολικής - Νοτιοδυτικής διευθύνσεως.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Φίλτρα δεύτερης παραγώγου

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

| | | |
|---|----|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | -8 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

Σχήμα 4.8: Φίλτρο Laplace.

Φίλτρα ολικής πρώτης παραγώγου

Καθότι η ολική πρώτη παράγωγος (gradient operator) 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:

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

όπου,

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -2 & 0 & 2 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

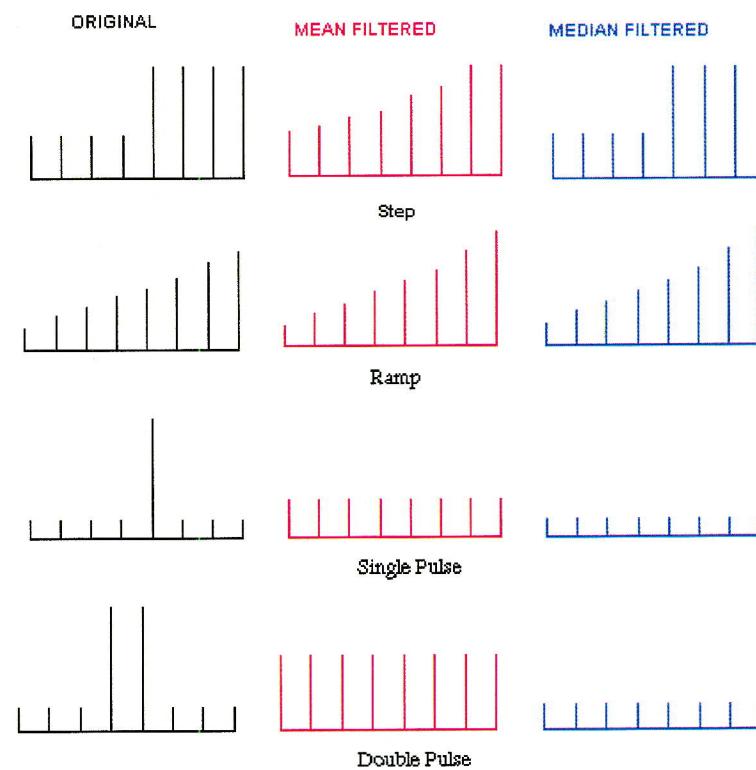
Οι υψηλές τιμές φωτεινότητας στην εικόνα εξόδου αφορούν σε περιοχές όπου το μέτρο της κλίσης της παραγώγου είναι μεγάλο (απότομη μεταβολή των τιμών φωτεινότητας μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων). Οι ομοιόμορφες περιοχές (μηδενικό μέτρο κλίσης) απεικονίζονται επί της οθόνης με DN=0.

2. Αντιστροφή της φωτεινότητας στην φλιταρισμένη εικόνα έτσι ώστε οι υψηλές τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων να προβληθούν στο αριστερό τμήμα της οθόνης ($DN_{new} = 255 - DN_{old}$). Σε ένα φωτεινό πλέον υπόβαθρο (ομοιόμορφες περιοχές) ο ανθρώπινος οφθαλμός αντιλαμβάνεται καλύτερα τις διάφορες διαβαθμίσεις του τόνου του γκρίζου.
3. Πολλαπλασιασμός της εικόνας με τον εαυτό της για περαιτέρω ενίσχυση των ακμών.
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) 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. Τα φίλτρα μέσης (mean filters) προκαλούν ακόμα μεγαλύτερη εξομάλυνση. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9 ο κίνδυνος εξομάλυνσης των ακμών (στην προκείμενη 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 εργασίας.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

4.2.9 Επεξεργασία φιλτραρισμένων εικόνων

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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

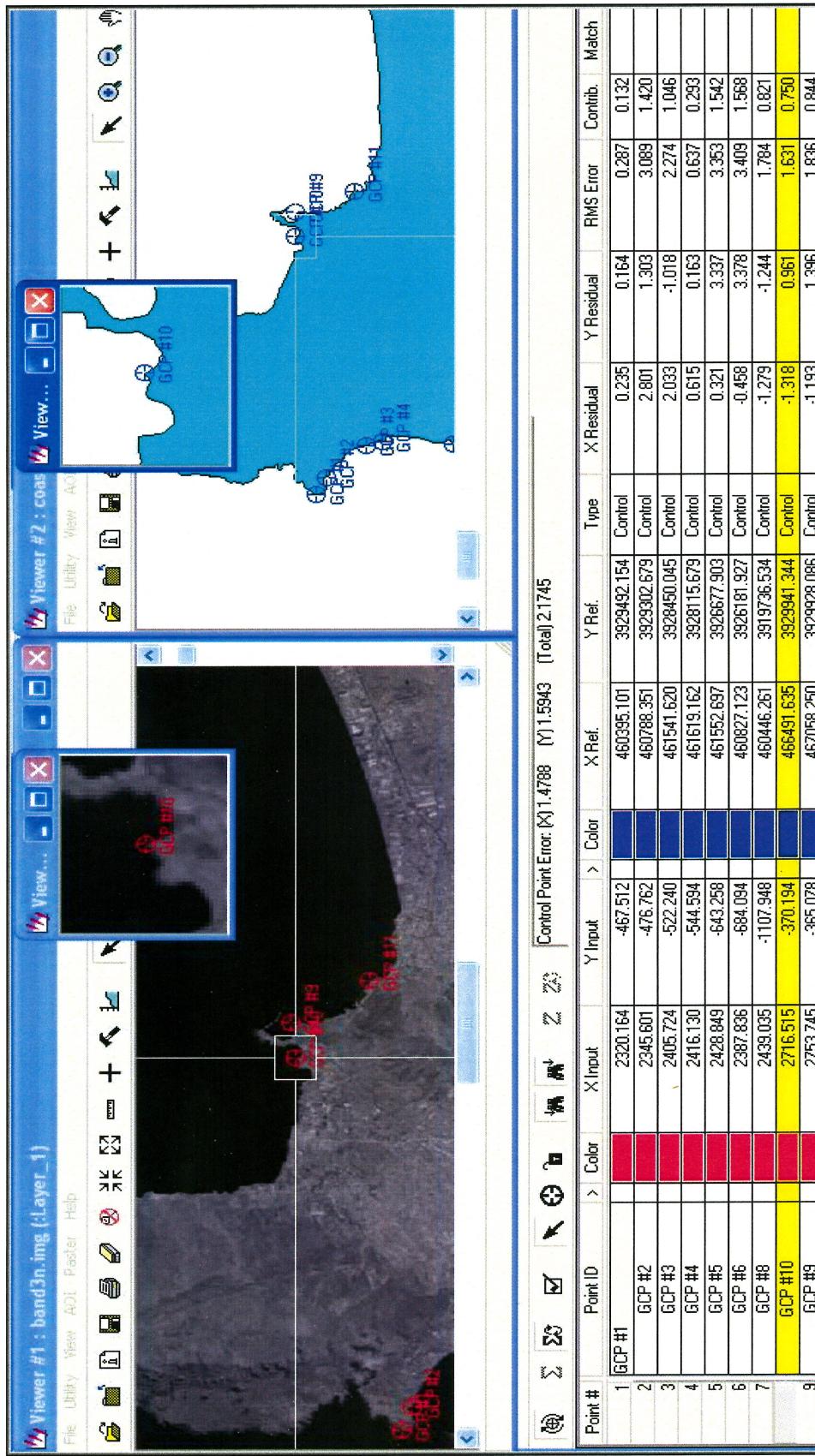
4.2.10 Χαρτογραφική προβολή εικόνων σε ΕΓΣΑ '87

Για τον προσδιορισμό των GCPs χρησιμοποιήθηκε η εικόνα από την περιοχή του εγγύς υπερύθρου (κανάλι 3N) πριν από οποιαδήποτε επεξεργασία. Η επιλογή του συγκεκριμένου καναλιού οφείλεται στο γεγονός ότι στο εγγύς υπέρυθρο, λόγω της απορρόφησης της ακτινοβολίας από τα νερά, ο διαχωρισμός της ξηράς από τη θάλασσα γίνεται εύκολα αντιληπτός.

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 κατανευμημένων στα περιθώρια της εικόνας (Σχήμα 4.10). Η προσαρμογή της εικόνας στο χάρτη έγινε με πολυωνυμική προσέγγιση δευτέρου βαθμού. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα υπολογίστηκε σε αριθμό εικονοστοιχείων ($RMS \cong 2$ pixel ή $RMS \cong 2 \times 15m = 30m$).

Ο επαναπροσδιορισμός των τιμών φωτεινότητας στις νέες θέσεις των ψηφίδων βασίσθηκε 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 δομημορφικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρημάτων στην Αντική Κοίτη.



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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο να γίνουν δύο επισημάνσεις:

1) Η χωρική ανάλυση των εικόνων στο VNIR φτάνει τα 15m. Έστω γραφικό σφάλμα της τάξης των 0,5mm που αντιστοιχεί σε 7,5 m στο έδαφος (διαστάσεις 1/2 εικονοστοιχείου στο έδαφος). Με άλλα λόγια αν για ένα οριζοντιογραφικό σφάλμα $RMS = 7,5\text{m}$ γίνει η αντιστοίχιση με το γραφικό σφάλμα, δηλ. 0,5 mm, είναι δυνατόν να υπολογισθεί η κλίμακα του χάρτη που είναι κατάλληλη για τη χαρτογραφική προβολή της εικόνας. Έτσι:

Για οριζοντιογραφικό σφάλμα 7500mm → το γραφικό σφάλμα είναι 0,5mm

$$X = ; \quad 1\text{mm}$$

$$X = \frac{7500}{0,5} = 15000\text{mm}$$

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 (αδυναμία καθορισμού GCPs στο κεντρικό και ανατολικό κομμάτι της περιοχής μελέτης). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση της εικόνας στα σημεία όπου παρατηρείται έλλειψη GCPs. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι γραμμώσεις κοντά στα Βόρεια, Νότια και Δυτικά παράλια ταυτίζονται με εκείνες του χάρτη του ΙΓΜΕ. Δεν παρατηρείται όμως το ίδιο και για το εσωτερικό κομμάτι της εικόνας (αποκλίσεις των γραμμώσεων από τις πραγματικές θέσεις των ρηγμάτων).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

4.2.11 Λέπτυνση και διανυσματοποίηση γραμμώσεων

Καθότι οι γραμμώσεις που προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία είχαν πλάτος μεγαλύτερο από εκείνο ενός εικονοστοιχείου, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί λέπτυνση (thinning) των γραμμώσεων έτσι ώστε το πλάτος τους να είναι ίσο με εκείνο ενός pixel. Ακολούθησε η μετατροπή των γραμμώσεων σε διανυσματική μορφή (raster to vector format).

Για τη λέπτυνση και διανυσματοποίηση των γραμμώσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό WinTopo Freeware το οποίο διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο (<http://wintopo.com/>). Υπάρχει και η επαγγελματική (Professional) έκδοση την οποία κάποιος πρέπει να αγοράσει. Οι δυνατότητες που παρέχει η δωρεάν έκδοση καλύπτουν τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

4.2.12 Φωτοερμηνεία – Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο τελευταίο Στάδιο της μεταπυχιακής διατριβής πραγματοποιήθηκε σύγκριση των γραμμώσεων που προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία με τα ήδη χαρτογραφημένα ρήγματα της περιοχής μελέτης (χάρτες ΙΓΜΕ). Η φωτοερμηνεία του πεδίου κατόπτευσης βασίσθηκε στο συνδυασμό των καναλιών 8 (Red) 3N (Green) και 1 (Blue).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αποτελέσματα

Στις παραγόφους που ακολουθούν παρουσιάζονται 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.

5.1. Ανάλυση κύριων συνιστωσών

Στα πλαίσια της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών υπολογίστηκαν:

- ❖ Ο πίνακας συνδιασποράς ή συμμεταβλητότητας.
- ❖ Ο πίνακας συσχέτισης.
- ❖ Οι συντελεστές του γραμμικού μετασχηματισμού (ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα).

Τα αποτελέσματα για όλα καθώς και για επιλεγμένα κανάλια του VNIR και SWIR παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

5.1.1 Για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR

Ο πίνακας συμμεταβλητήτας (Πίνακας 5.1) είναι συμμετρικός. Τα στοιχεία της κύριας διαγωνίου εκφράζουν τη διασπορά ανά φασματικό κανάλι ενώ το άθροισμά τους (ίχνος) εκφράζει τη συνολική διασπορά που υπάρχει στα αρχικά δεδομένα. Στην περίπτωσή μας η υπολογιζόμενη διασπορά είναι 13625,296.

Από τον πίνακα συσχέτισης 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 (0,975) παρουσιάζουν και τα κανάλια 1 (ορατό-πράσινο) και 2 (ορατό-κόκκινο). 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 (Πίνακας 5.3) προσδιορίζουν το νέο ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων του μετασχηματισμού καθορίζοντας τη γραμμική σχέση των κύριων συνιστωσών συναρτήσει των αρχικών καναλιών ως εξής (π.χ. για την πρώτη κύρια συνιστώσα, PC1):

$$DN_{PC1} = 0,302 \times DN_{Κανάλι\ 1} + 0,326 \times DN_{Κανάλι\ 2} + 0,028 \times DN_{Κανάλι\ 3N} + 0,330 \times DN_{Κανάλι\ 4} + 0,377 \times DN_{Κανάλι\ 5} + 0,365 \times DN_{Κανάλι\ 6} + 0,387 \times DN_{Κανάλι\ 7} + 0,389 \times DN_{Κανάλι\ 8} + 0,341 \times DN_{Κανάλι\ 9}$$

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δοτική Κρήτη.

Πίνακας 5.1: Ο πίνακας συνδιοσποράς - συμμεταβλητότητας (για τα κανάλια του VNIR και SWIR).

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

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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για την εντοποσύνη ρηματών στη Δονιά Κρήτη.

Πίνακας 5.3: Ο πίνακας των ιδιοδιανυσμάτων (για τα κανάλια του VNIR και SWIR).

| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 | PC6 | PC7 | PC8 | PC9 |
|------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 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 |

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Αντική Κρήτη.

Το μέγεθος της διασποράς για κάθε καινούρια συνιστώσα προσδιορίζεται από τις ιδιοτιμές (Πίνακας 5.4). Η πρώτη π.χ. κύρια συνιστώσα (PC1) έχει διασπορά 11360,207 σε συνολική διασπορά SUM = 13625,296. Γίνεται επίσης φανερό ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της φασματικής πληροφορίας εμπεριέχεται κυρίως στις δύο πρώτες κύριες συνιστώσες PC1 και PC2 (~ 91,5%).

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

| | Ιδιοτιμές | % διασποράς |
|------------|-----------|---------------|
| PC1 | 11360,207 | 83,376 |
| PC2 | 1105,654 | 8,115 |
| PC3 | 792,376 | 5,815 |
| PC4 | 203,313 | 1,492 |
| PC5 | 50,595 | 0,371 |
| PC6 | 35,811 | 0,263 |
| PC7 | 34,547 | 0,254 |
| PC8 | 29,089 | 0,213 |
| PC9 | 13,703 | 0,101 |
| SUM | 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. Η πληροφορία (% διασποράς από Πίνακα 5.4) ελαττώνεται σταδιακά για τις συνιστώσες μεγάλου βαθμού κάτι που γίνεται αντιληπτό και από τα Σχήματα 5.1 και 5.2.

Οι συντελεστές συνεισφοράς (factor loadings) με τους οποίους τα επιμέρους φασματικά κανάλια ($\kappa = 1, 2, 3N, \dots, 9$) συμβάλλουν στη διαμόρφωση της κάθε καινούριας συνιστώσας ($\sigma = PC1, PC2, PC3, \dots, PC9$) υπολογίζεται με τη βοήθεια της ακόλουθης μαθηματικής σχέσης (Oppenheimer *et al.*, 2000):

$$P(\kappa, \sigma) = \text{ιδιοδιάνυσμα}(\kappa, \sigma) \times \sqrt{\text{ιδιοτιμή}(\sigma)} / \sqrt{\text{διασπορά}(\kappa)}$$

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

όπου,

$P(\kappa, \sigma)$: factor loading μεταξύ κ^{οστού} φασματικού καναλιού και σ^{οστής} κύριας συνιστώσας

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

$\sigma = PC1, PC2, PC3, \dots, PC9$

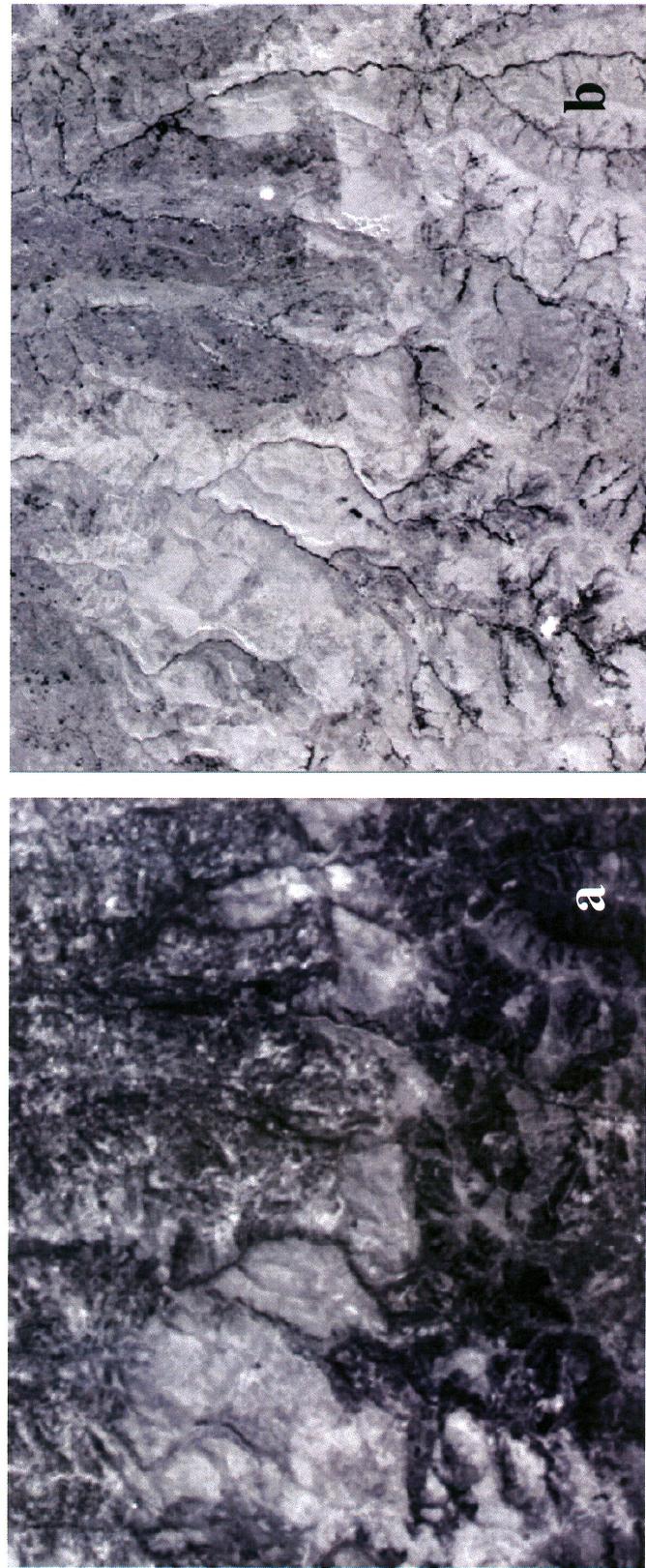
Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε Πίνακα (Πίνακας 5.5) όπου οι γραμμές αφορούν στα φασματικά κανάλια που λαμβάνουν χώρα στο μετασχηματισμό ενώ οι στήλες αφορούν στις προκύπτουσες κύριες συνιστώσες. Οι τιμές κυμαίνονται εντός του διαστήματος [-1, 1]. Όσο ανδέινει η απόκλιση από το μηδέν, τόσο μεγαλύτερη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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό φυγέων στη Δυτική Κοίτη.

Πίνακας 5.5: Factor loadings (για τα κανύλαια του VNIR και SWIR).

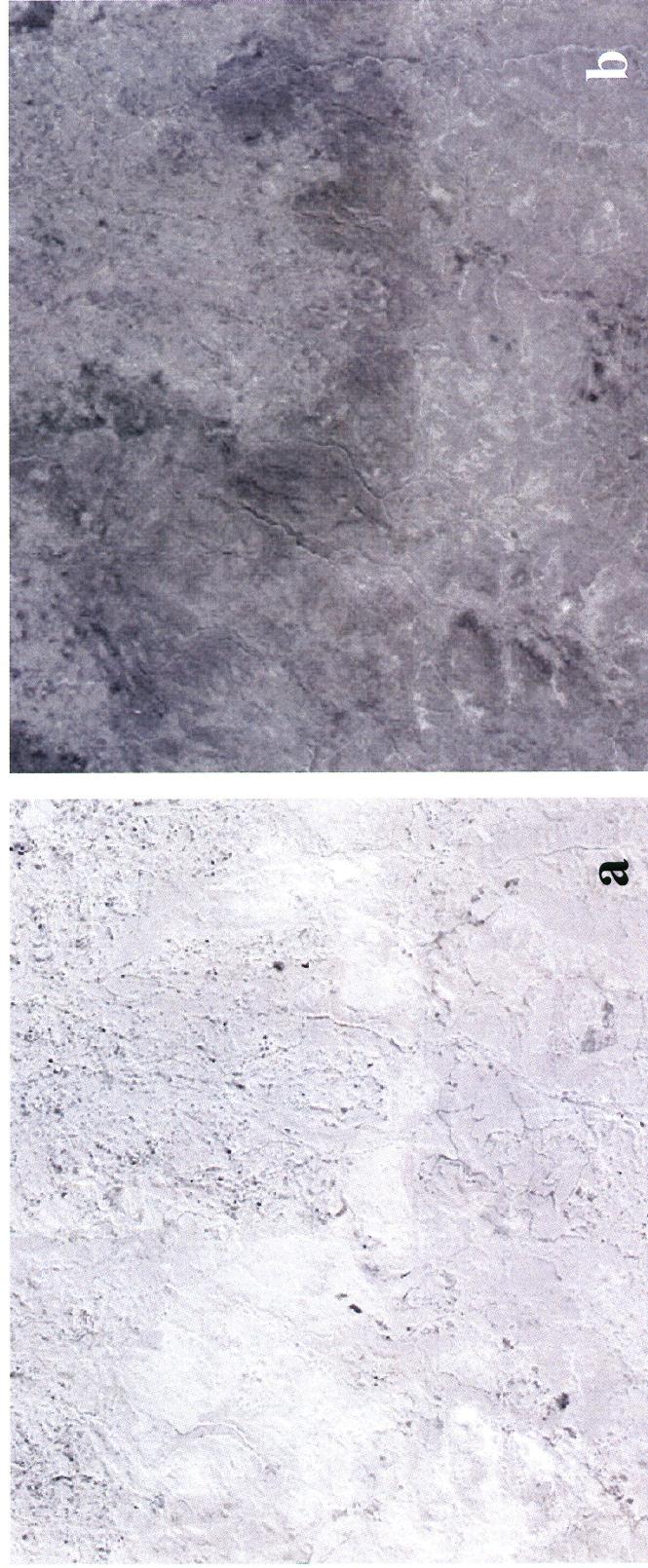
| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 | PC6 | PC7 | PC8 | PC9 |
|-------------------|-------|---------------|--------|--------|--------|--------|---------|----------|---------|
| Kaválla 1 | 0,864 | -0,001 | -0,491 | 0,031 | -0,029 | -0,043 | -0,009 | 0,089 | -0,009 |
| Kaválla 2 | 0,890 | 0,036 | -0,442 |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

Ανύλωση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρημάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

Ανόδηνης δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρημάτων στη Δυτική Κοίτη.



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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

5.1.2 Για τα κανάλια του μέσου υπερύθρου

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

Πίνακας 5.6: Ο πίνακας των ιδιοδιαγνούσματων (για τα κανάλια του SWIR).

| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 | PC6 |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Κανάλι 4 | 0,369 | -0,587 | -0,659 | -0,217 | 0,154 | -0,121 |
| Κανάλι 5 | 0,421 | -0,130 | 0,124 | 0,073 | -0,886 | -0,018 |
| Κανάλι 6 | 0,407 | -0,242 | 0,673 | -0,493 | 0,283 | -0,008 |
| Κανάλι 7 | 0,432 | 0,017 | -0,007 | 0,456 | 0,224 | 0,745 |
| Κανάλι 8 | 0,434 | 0,184 | 0,081 | 0,532 | 0,247 | -0,654 |
| Κανάλι 9 | 0,382 | 0,739 | -0,301 | -0,463 | -0,008 | 0,045 |

Από τον πίνακα των ιδιοτιμών (Πίνακας 5.7) προκύπτει ότι το 95% της συνολικής διασποράς εμπεριέχεται στην πρώτη κύρια συνιστώσα, PC1. Η εικόνα αυτή (Σχήμα 5.3) ενδείκνυται για φωτοερμηνεία. Η αντίθεση μεταξύ των υγρών (χαμηλοί τόνοι φωτεινότητας) και ξηρών (υψηλοί τόνοι φωτεινότητας) είναι εμφανής.

Πίνακας 5.7: Ο πίνακας των ιδιοτιμών (για τα κανάλια του SWIR).

| | Ιδιοτιμές | % συνολικής διασποράς |
|------------|-----------|-----------------------|
| 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 |
| SUM | 9653,146 | 100 |

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



Σχήμα 5.3: PC1 για τα κανάλια του SWIR.

5.1.3 Για τα κανάλια 1, 3N και 8

Οι Πίνακες των ιδιοδιανυσμάτων (Πίνακας 5.8), των ιδιοτιμών (Πίνακας 5.9) καθώς και των factor loadings (Πίνακας 5.10) που προέκυψαν από την ανάλυση των κύριων συνιστωσών για τα επιλεγμένα κανάλια 1, 3N και 8 είναι οι ακόλουθοι:

Πίνακας 5.8: Ο πίνακας των ιδιοδιανυσμάτων για τα κανάλια 1, 3N και 8.

| | PC1 | PC2 | PC3 |
|-----------|-----------|------------|------------|
| Κανάλι 1 | 6,509E-01 | -1,240E-04 | -7,592E-01 |
| Κανάλι 3N | 6,656E-02 | 9,962E-01 | 5,690E-02 |
| Κανάλι 8 | 7,563E-01 | -8,757E-02 | 6,484E-01 |

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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

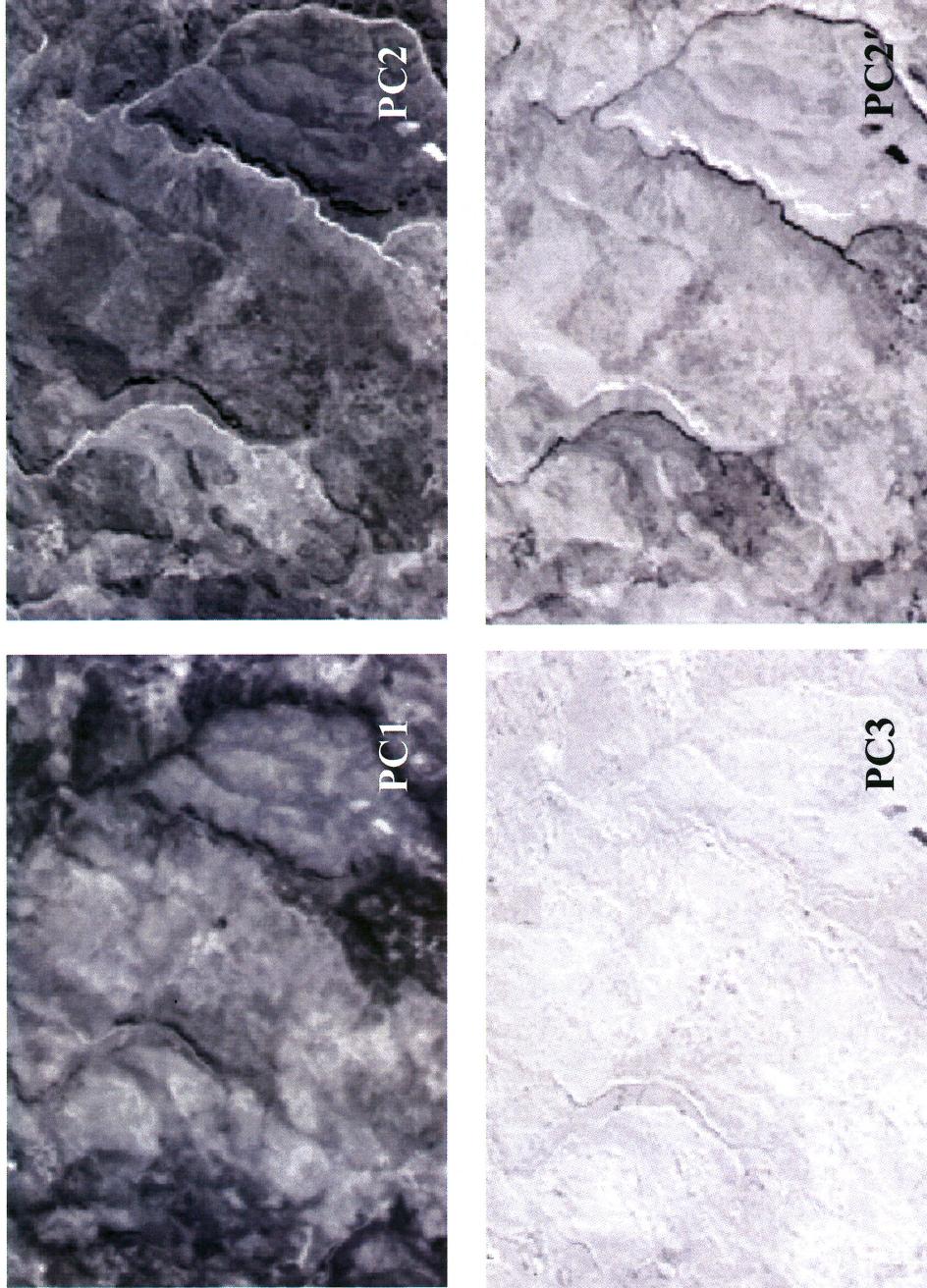
| | Ιδιοτιμές | % διασποράς |
|-----|-----------|-------------|
| PC1 | 2853,236 | 67,594 |
| PC2 | 1057,095 | 25,043 |
| PC3 | 310,832 | 7,364 |
| SUM | 4221,163 | 100 |

Πίνακας 5.10: Factor loadings για τα κανάλια 1, 3N και 8.

| | PC1 | PC2 | PC3 |
|-----------|-------|--------------|--------|
| Κανάλι 1 | 0,933 | -1,1E-04 | -0,359 |
| Κανάλι 3N | 0,109 | 0,994 | 0,031 |
| Κανάλι 8 | 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 την δεύτερη κύρια συνιστώσα που προέκυψε από την ανάλυση για όλα τα κανάλια του VNIR και SWIR (Σχήμα 5.1-b).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρημάτων στην Αντική Κοίτη.



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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Αντική Κρήτη.

5.2 Αριθμητικές πράξεις μεταξύ φασματικών καναλιών

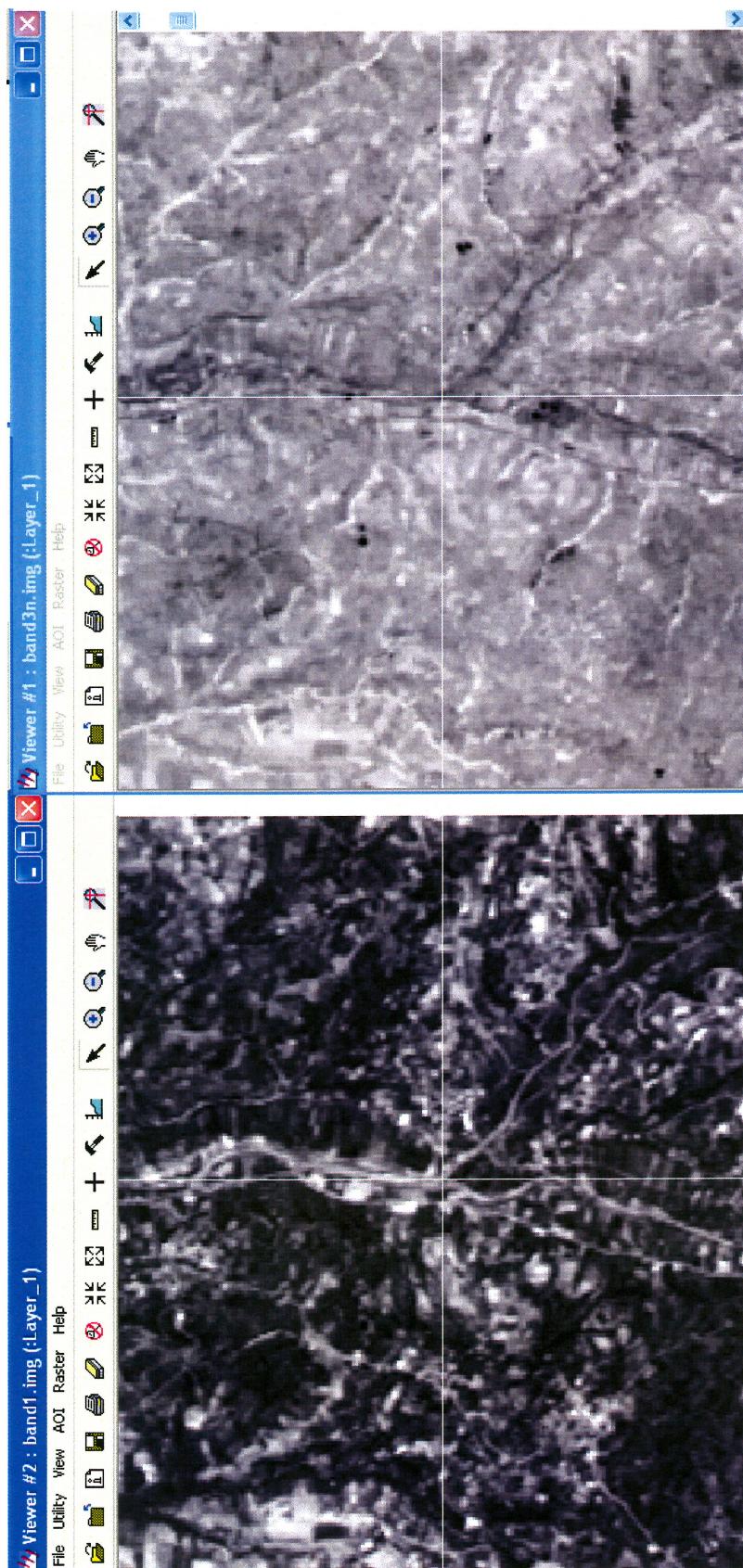
5.2.1 Αφαίρεση

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 εμφανίζεται με 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).

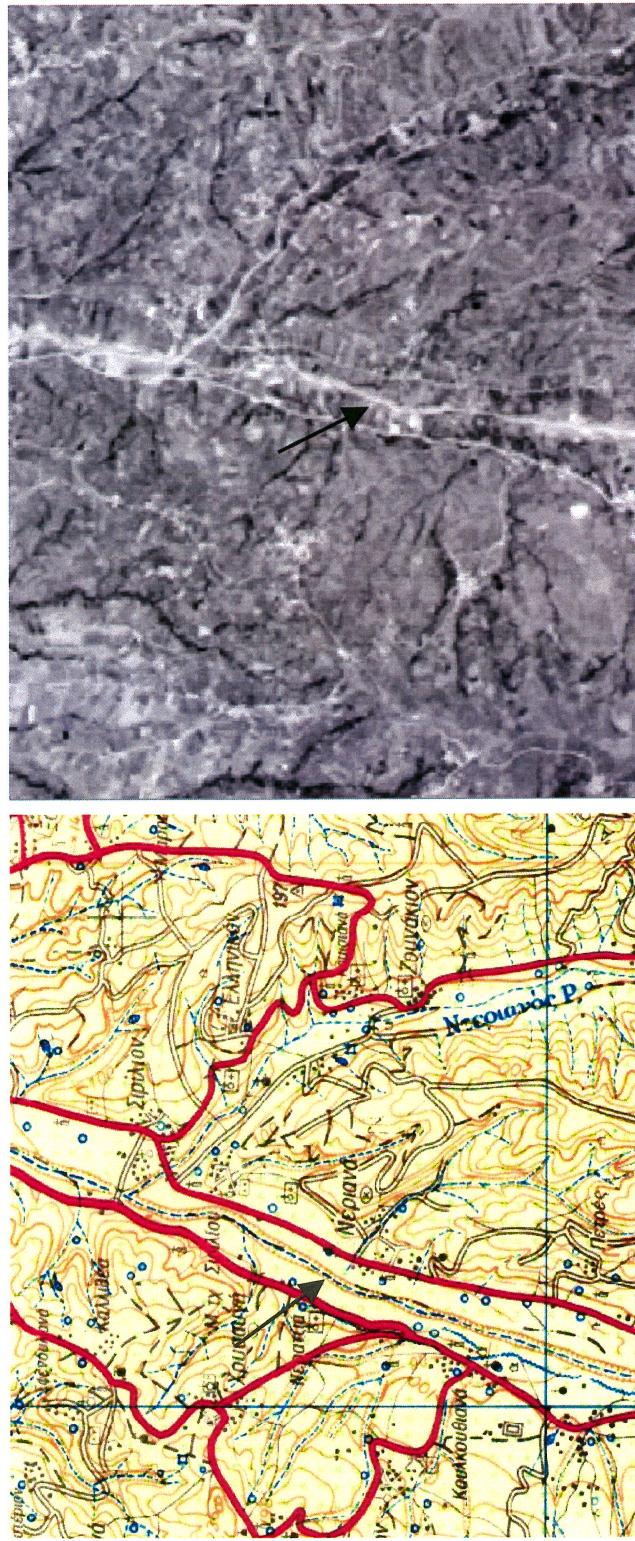
Επισημαίνεται ότι πρέπει να υπάρχει στη διάθεση του χρήστη ο αντίστοιχος της περιοχής μελέτης τοπογραφικός χάρτης με την οδοποιία (Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού ή ΓΥΣ). Αυτό ισχύει διότι εκτός από τα νερά, υψηλή ανακλαστικότητα στη ζώνη του ορατού παρουσιάζει και η άσφαλτος. Κατά συνέπεια είναι πολύ εύκολο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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρημάτων στη Δοτού Κορίνθη.



Σχήμα 5.5: Φασματική απόκριση υδάτων στο κανάλι 1 του ορατού (αριστερά) και 3N του εγγάνις υπερόθιρου (δεξιά) στην περιοχή του Ταυρονίτη.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στην Αντική Κοίτη.

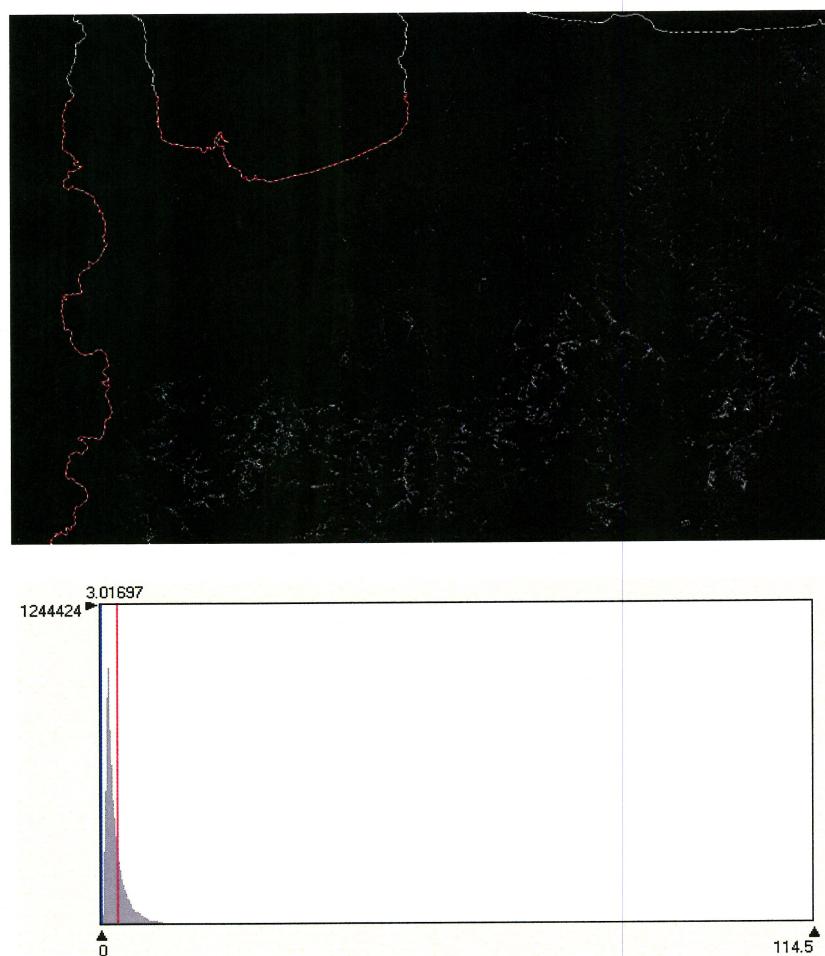


Σχήμα 5.6: Αριστερό: Τοπογραφικός χάρτης της ΓΥΣ, κλίμακα 1:50000 (Φρύλλο Περιβόλωα). Με το κόκκινο χρώμα διακρίνεται η οδοποιία ενώ με τις γαλάζιες διακεκομένες γραμμές αποτυπώνεται το υδρογραφικό δίκτυο. Δεξιό: Προϊόν αφαίρεσης των τυμών DNκανάν 1 - DNκανάν 3N. Η φραγμοτική απόκριση των υδάτων παρουσιάζει ομοιότητες με εκείνη της ασφάλτου (δρόμοι).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

5.2.3 Λόγος φασματικών καναλιών 3N/2

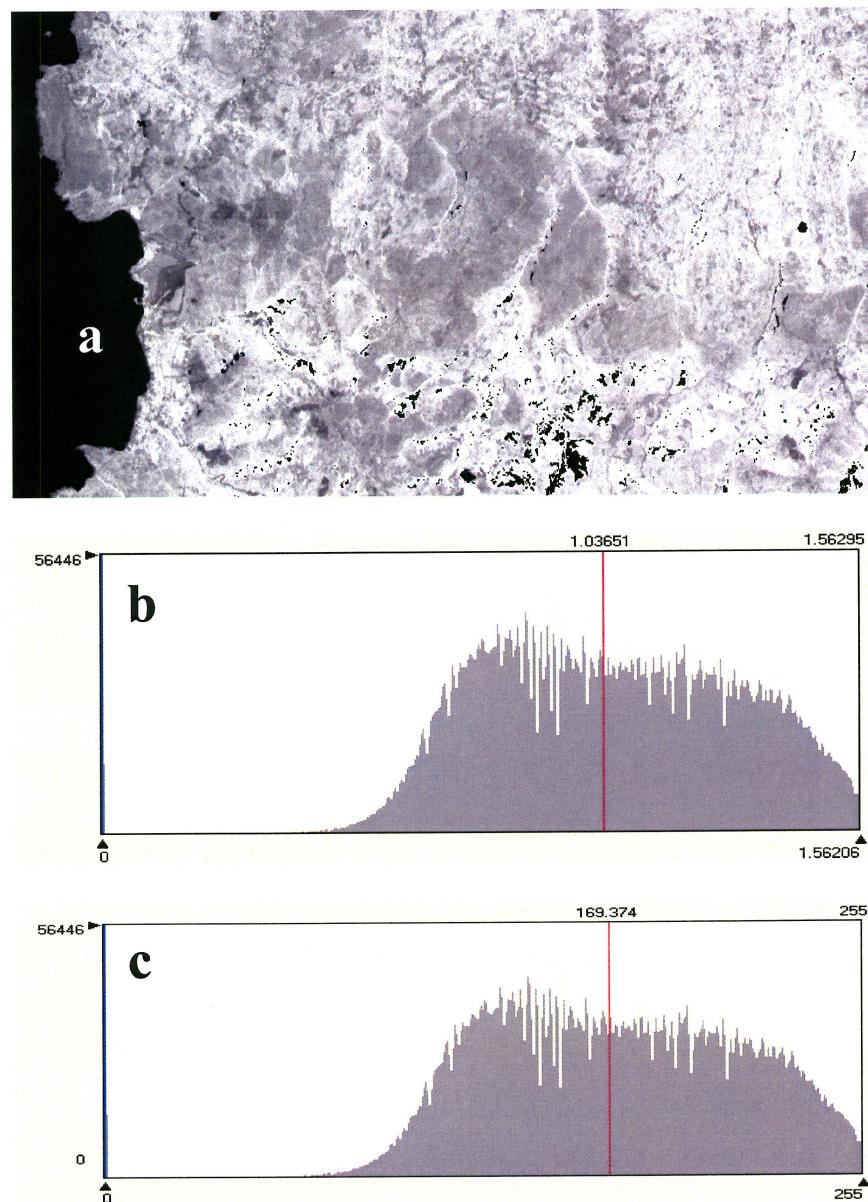
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο (Ενότητα 4.2.7) το εύρος των τιμών που προκύπτει από λόγους μεταξύ φασματικών καναλιών είναι πολύ μικρό. Στο ιστόγραμμα της εικόνας που ακολουθεί (Σχήμα 5.7) γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές κυμαίνονται εντός ενός πολύ μικρού εύρους, πλησίον του μηδενός, με αποτέλεσμα η εικόνα να παρουσιάζει πολύ χαμηλές αντιθέσεις.



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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

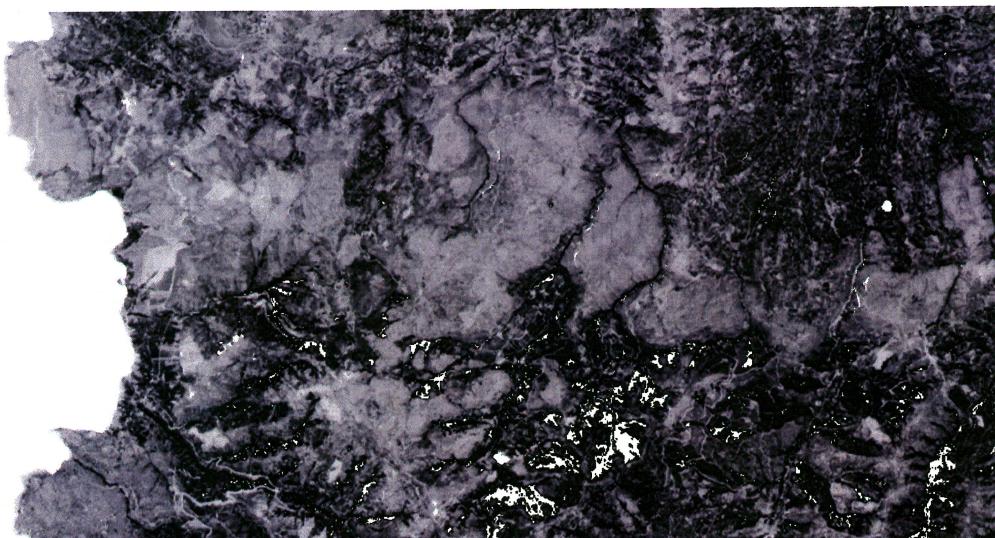
Υπολογίζοντας την αντίστροφη της εφαπτομένης για το συγκεκριμένο λόγο (δηλ. atan (3N/2)) προκύπτει η εικόνα του Σχήματος 5.8. Η ενίσχυση των αντιθέσεων σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα του Σχήματος 5.7 είναι εμφανής.



Σχήμα 5.8: a) Εικόνα atan (3N/2). b) Ιστόγραμμα εικόνας και c) ιστόγραμμα μετά από προσαρμογή των τιμών φωτεινότητας στην κλίμακα 0-255.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

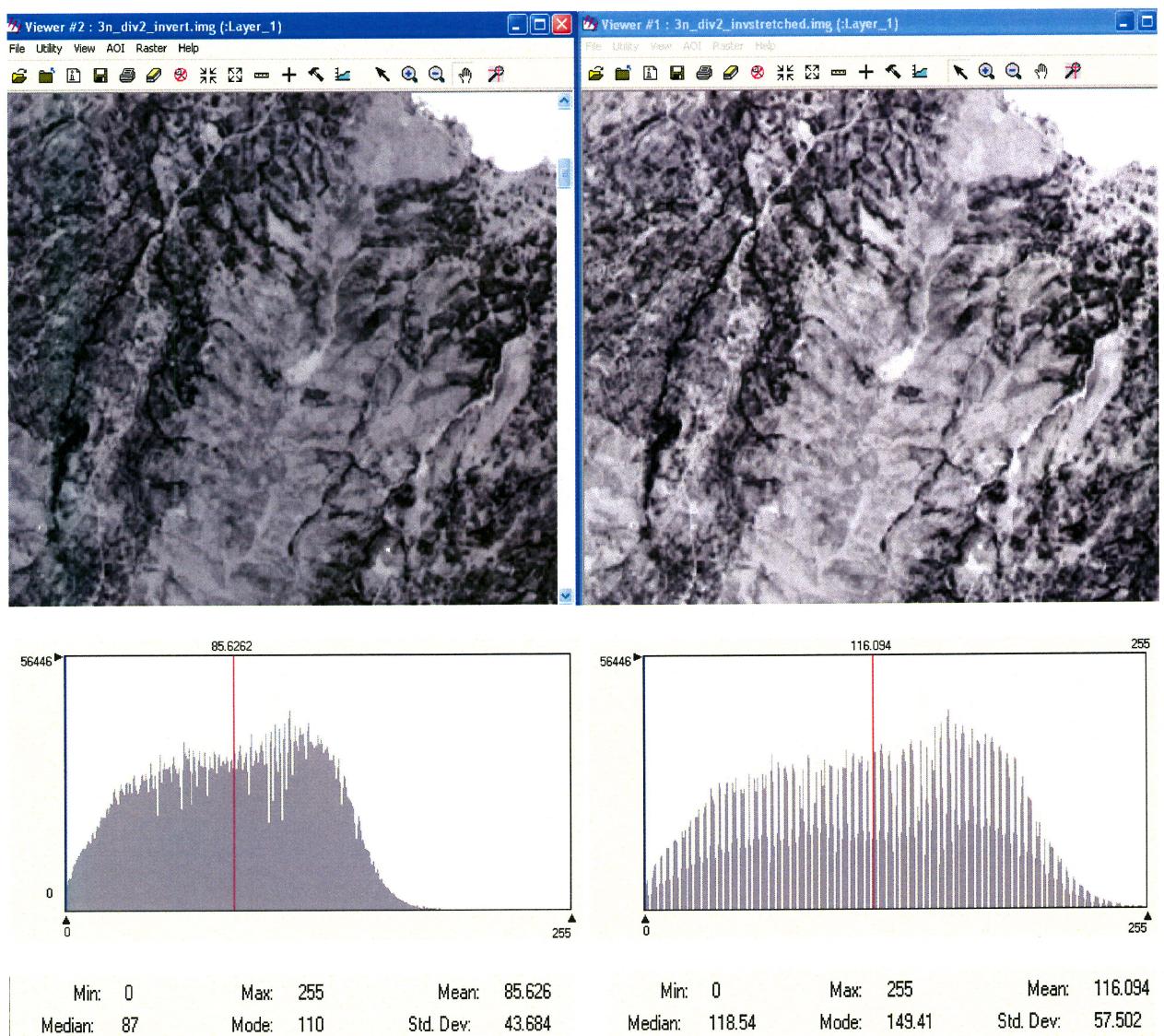
Με αντιστροφή της φωτεινότητας ($255 - \text{atan}(3N/2)$) οι περιοχές με βλάστηση (Σχήμα 5.9) γίνονται εύκολα αντιληπτές (χαμηλές τιμές φωτεινότητας σε ένα πιο φωτεινό υπόβαθρο).



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

Περαιτέρω ενίσχυση των αντιθέσεων στην εικόνα του Σχήματος 5.9 πραγματοποιήθηκε με γραμμική επέκταση του ιστογράμματος (Σχήμα 5.10).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

5.3 Χωρικά φίλτρα

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

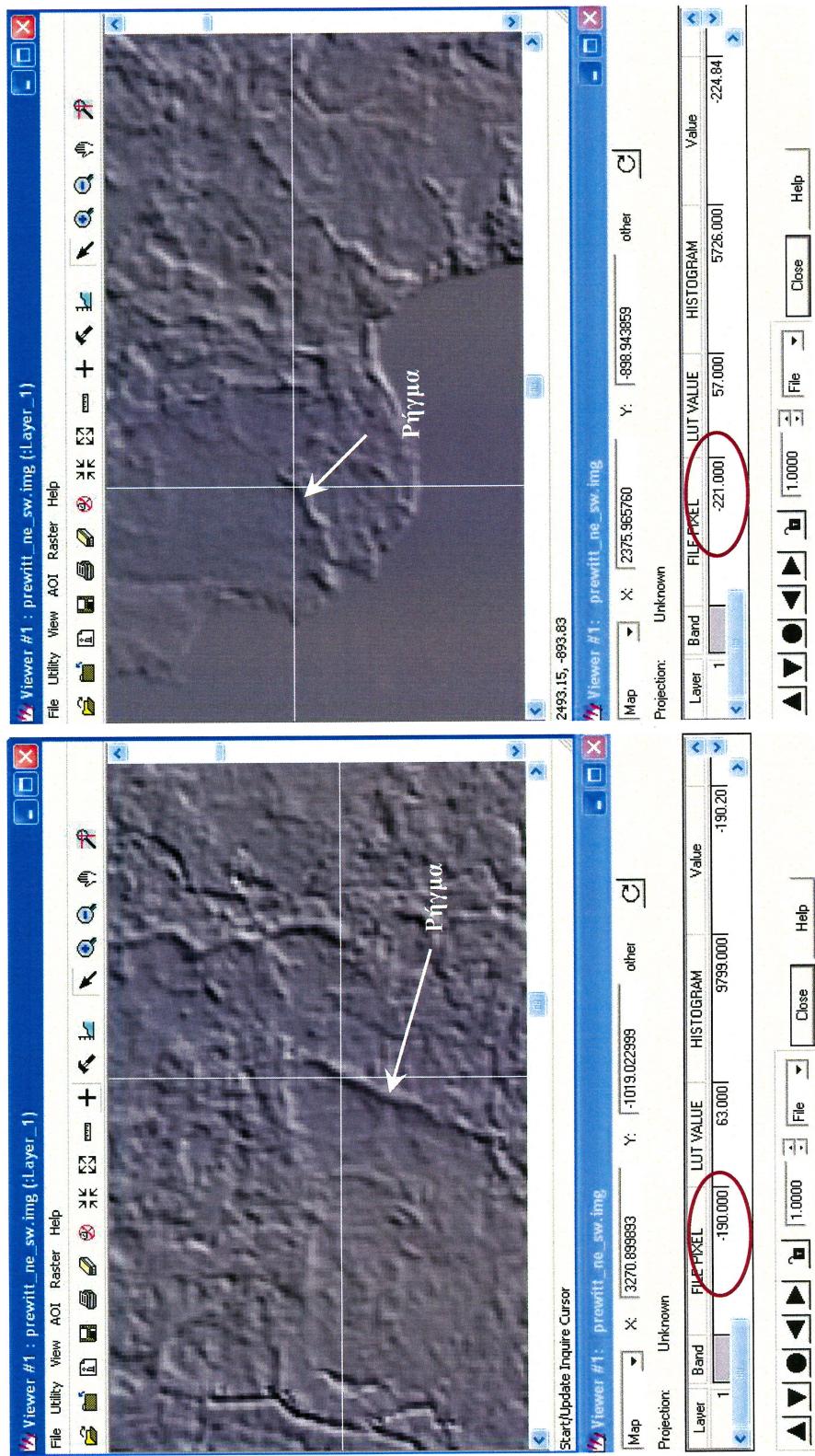
- Εικόνα A:** η εικόνα atan(3N/2) που προέκυψε μετά από αντιστροφή φωτεινότητας και γραμμική επέκταση ιστογράμματος (Σχήμα 5.10).
- Εικόνα B:** Η πρώτη κύρια συνιστώσα, PC1, που προέκυψε από το μετασχηματισμό για τα κανάλια του SWIR (Σχήμα 5.3)
- Εικόνα C:** Η δεύτερη κύρια συνιστώσα, PC2, που προέκυψε 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 (Σφηνάρι) μετά την εφαρμογή φίλτρου διευθύνσεως στην εικόνα A. Το χωρικό φιλτράρισμα είχε ως στόχο την ανάδειξη των παράλληλων στη διεύθυνση του Ήλιου γραμμώσεων, δηλ. των γραμμώσεων Βορειοανατολικής - Νοτιοδυτικής διευθύνσεως (ΒΑ-ΝΔ). Τα έντονα γραμμικά χαρακτηριστικά απεικονίζονται επί της οθόνης είτε με υψηλές τιμές φωτεινότητας (δεξιά άκρο ιστογράμματος – θετικές τιμές) είτε σκοτεινά (αριστερό άκρο ιστογράμματος – αρνητικές τιμές).

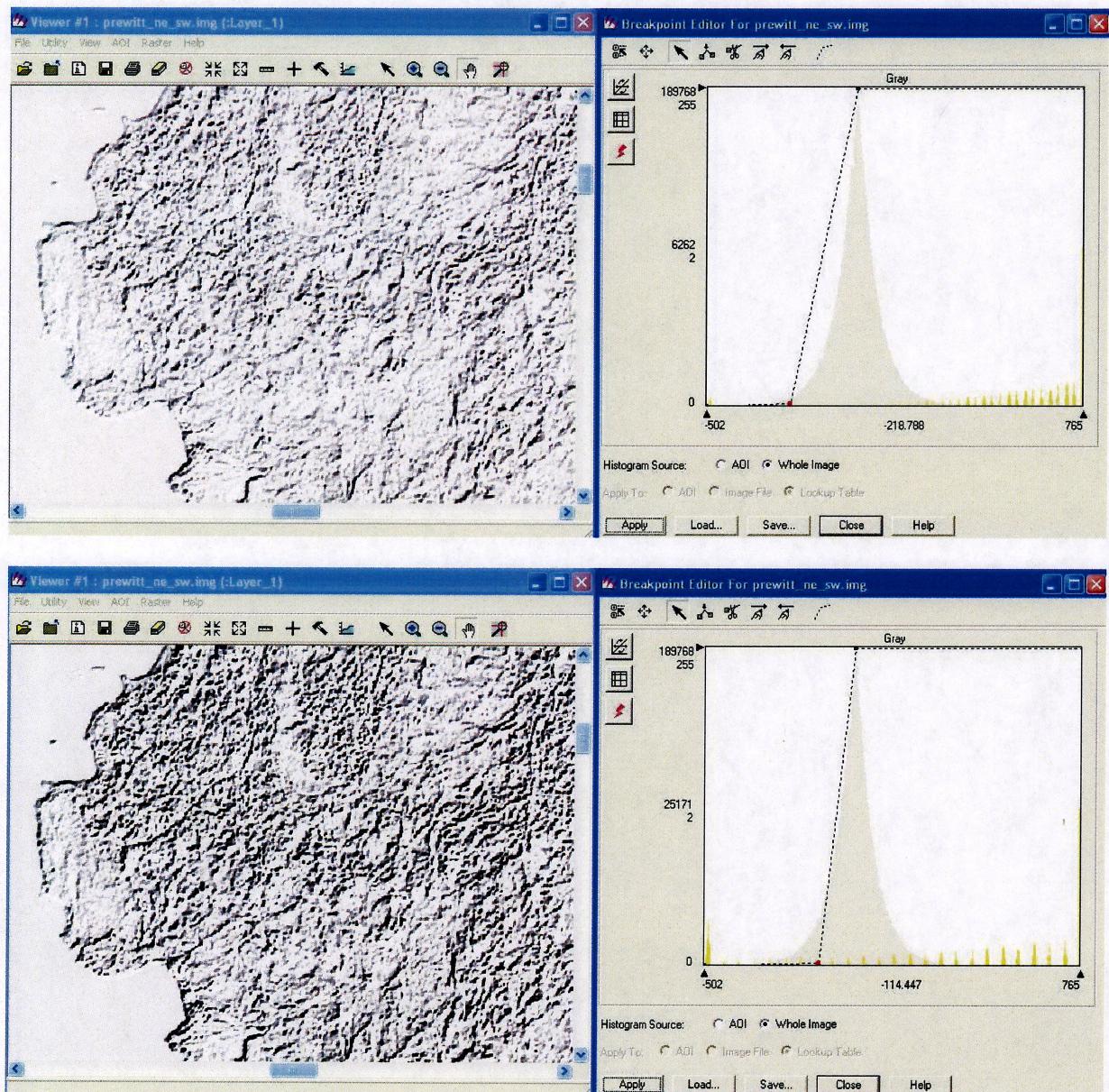
Με τη βοήθεια του Inquire Cursor του Erdas επιλέχθηκαν ενδεικτικά οι θέσεις δύο γνωστών ρηγμάτων (από χάρτες ΙΓΜΕ) προκειμένου να υποδειχθεί το εύρος των τιμών φωτεινότητας εντός του οποίου κυμαίνονται οι ρηξιγενείς δομές. Διαδοχικά τροποποιήθηκε το ιστόγραμμα της εικόνας (Σχήμα 5.12-13) έως ότου καταλήξουμε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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Διυτική Κρήτη.



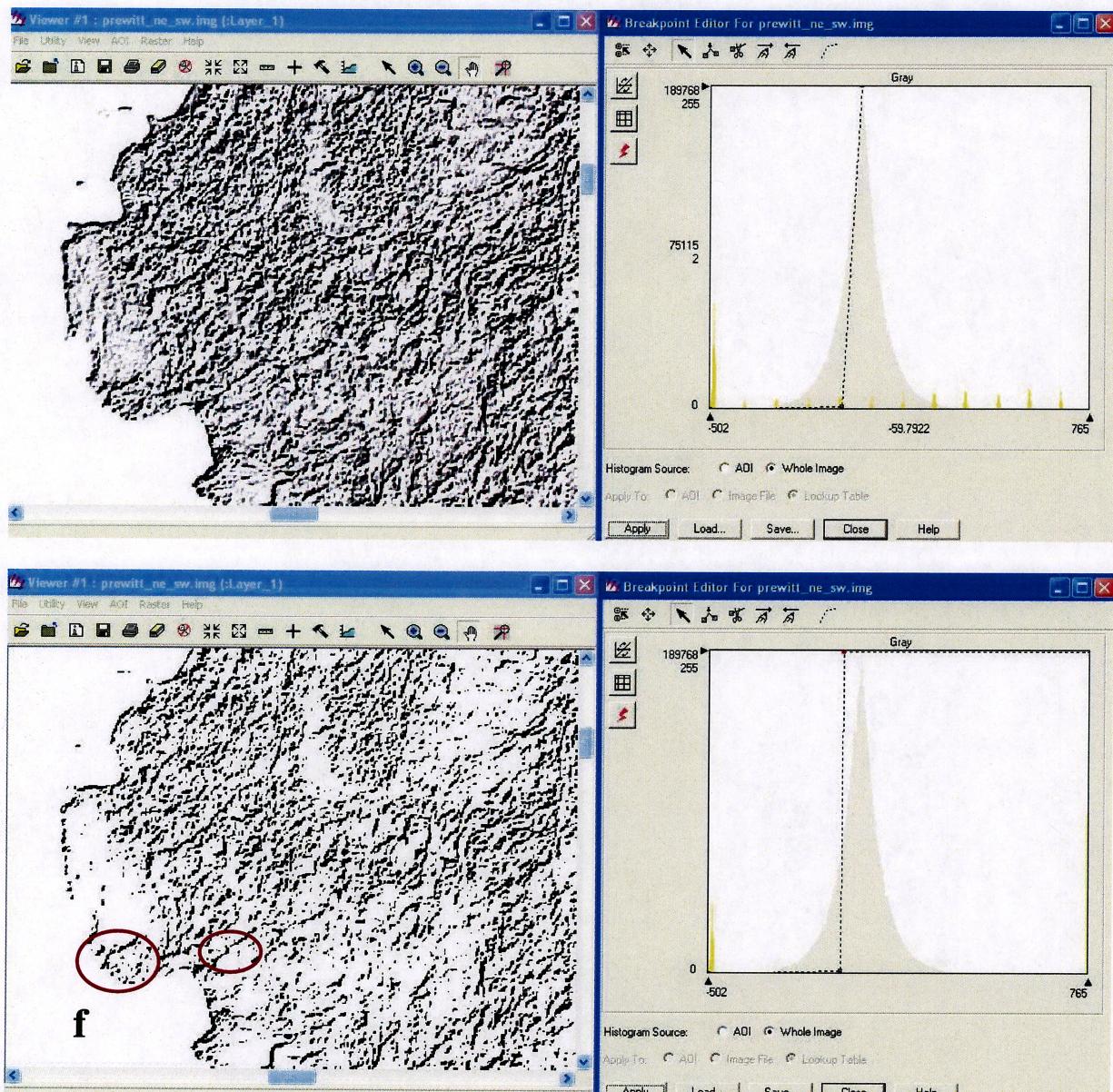
Σχήμα 5.11: Επιλογή πυμόν αποκοπής με τη βοήθεια του Inquire Cursor του Erdas.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



Σχήμα 5.12: Διαδοχική τροποποίηση του ιστογράμματος της φιλτραρισμένης εικόνας με τη βοήθεια του Breakpoint editor του Erdas.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

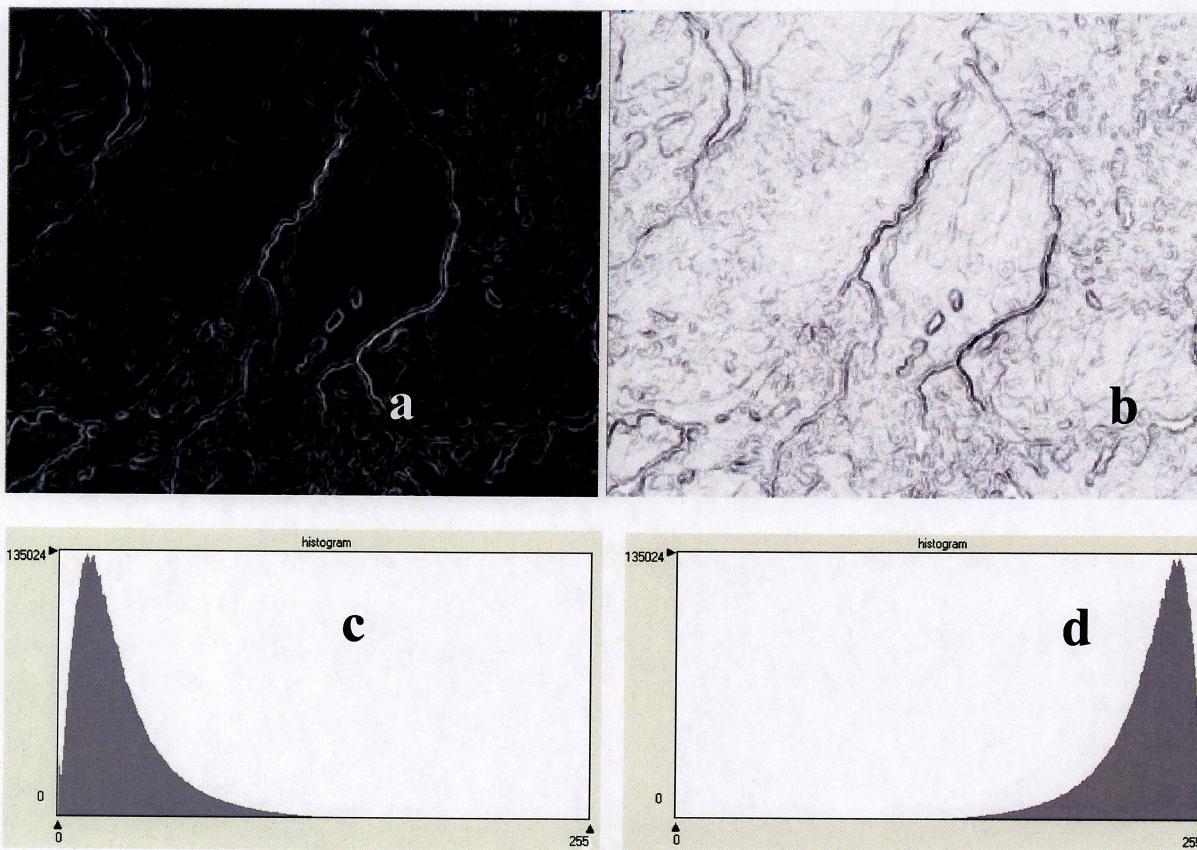


Σχήμα 5.13: Διαδοχική τροποποίηση του ιστογράμματος της φιλτραρισμένης εικόνας με τη βοήθεια του Breakpoint editor του Erdas. f) Δυαδική κατάτμηση εικόνας και ανάδειξη ρηγμάτων BA-ΝΔ διευθύνσεως.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

5.3.2 Εφαρμογή φίλτρου Sobel

Στο Σχήμα 5.14-*a* παρουσιάζεται η εικόνα που προέκυψε μετά την εφαρμογή του φίλτρου Sobel στην εικόνα C. Μετά από αντιστροφή 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 σε εικόνα C, **b)** φιλτραρισμένη εικόνα μετά από αντιστροφή φωτεινότητας, **c)** ιστόγραμμα εικόνας **a** και **d)** ιστόγραμμα εικόνας **b**.

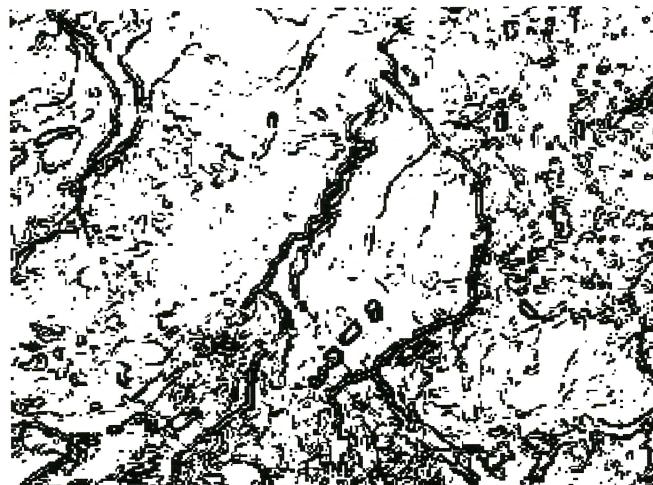
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Πολλαπλασιάζοντας την εικόνα του Σχήματος 5.14-b με τον εαυτό της πραγματοποιήθηκε ενίσχυση των 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 ορίζονται οι γραμμώσεις – ενδεχόμενες ρηξιγενείς δομές προέκυψε η δυαδική κατάτμηση της φιλτραρισμένης εικόνας (Σχήμα 5.16).

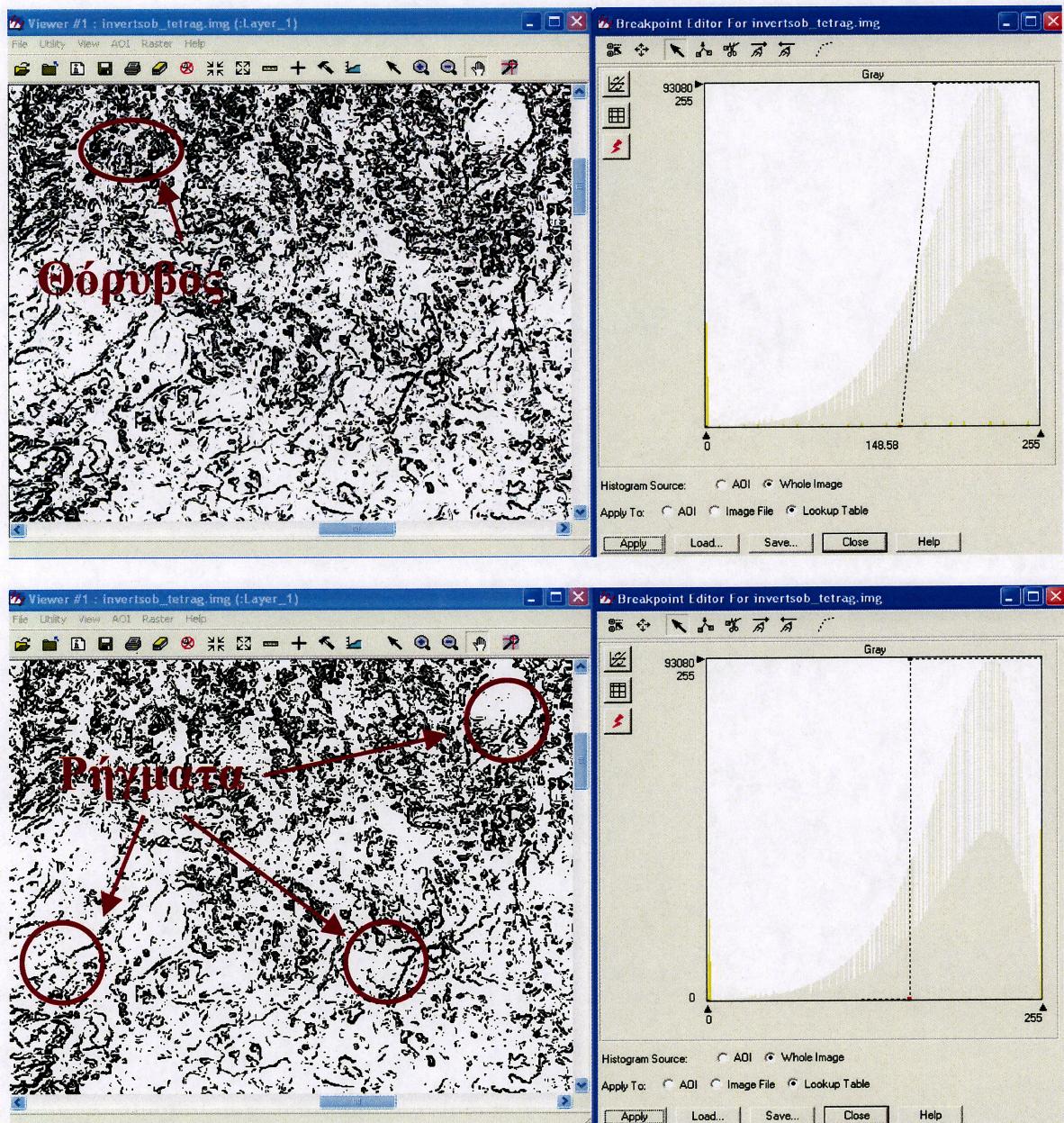


Σχήμα 5.16: Δυαδική κατάτμηση εικόνας φίλτρου Sobel.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Η ίδια διαδικασία (εφαρμογή φίλτρου Sobel, αντιστροφή φωτεινότητας φιλτραρισμένης εικόνας, πολλαπλασιασμός φιλτραρισμένης εικόνας με τον εαυτό της) εφαρμόστηκε και στην εικόνα B (PC1 που προέκυψε από το μετασχηματισμό για τα κανάλια του SWIR). Υπενθυμίζεται ότι στην εικόνα B παρουσιάζονται έντονες οι αντιθέσεις μεταξύ των υγρών και των ξηρών εδαφών. Παρά τη μικρή χωρική ανάλυση της εικόνας (30m) τα ρήγματα με έντονη τοπογραφική έκφραση έγιναν εύκολα αντιληπτά (Σχήμα 5.17). Ο θόρυβος όμως ενισχύθηκε μετά την εφαρμογή του φίλτρου κάτι που δεν μας επέτρεψε να προχωρήσουμε σε λέπτυνση και διανυσματοποίηση των γραμμώσεων.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



Σχήμα 5.17: Εφαρμογή φίλτρου Sobel σε εικόνα B (μετά από αντιστροφή φωτεινότητας και πολλαπλασιασμό φιλτραρισμένης εικόνας με εαυτό της) και δυαδική κατάτμηση με τη βοήθεια του Breakpoint editor του Erdas.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

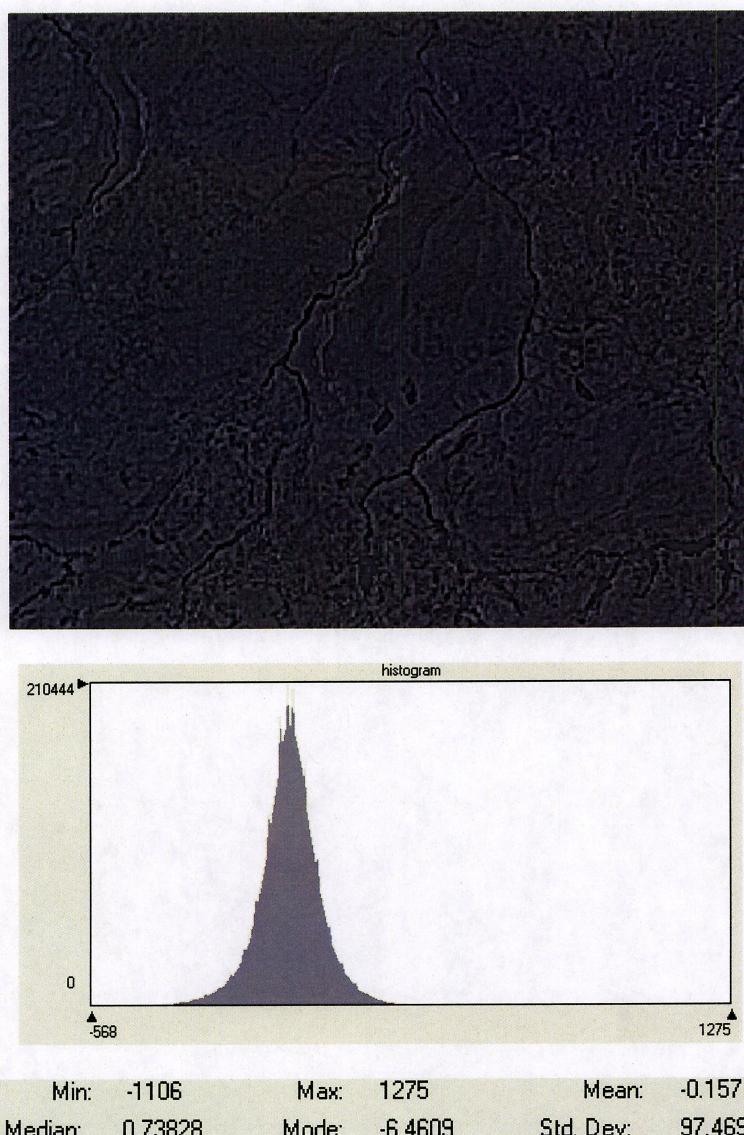
5.3.3 Εφαρμογή φίλτρου Laplace

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 5.18 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Laplace στην εικόνα C. Η κατάτμηση της εικόνας πραγματοποιήθηκε με απόδοση νέας τιμής φωτεινότητας $DN_{new} = 0$ σε όλα τα εικονοστοιχεία της φιλτραρισμένης εικόνας για τα οποία το αποτέλεσμα της παραγώγισης ήταν αρνητικό, δηλ. $DN < 0$ (Σχήμα 5.19-a). Κατά αυτό τον τρόπο προσδιορίστηκαν όλα τα αρνητικά τμήματα των ακμών.

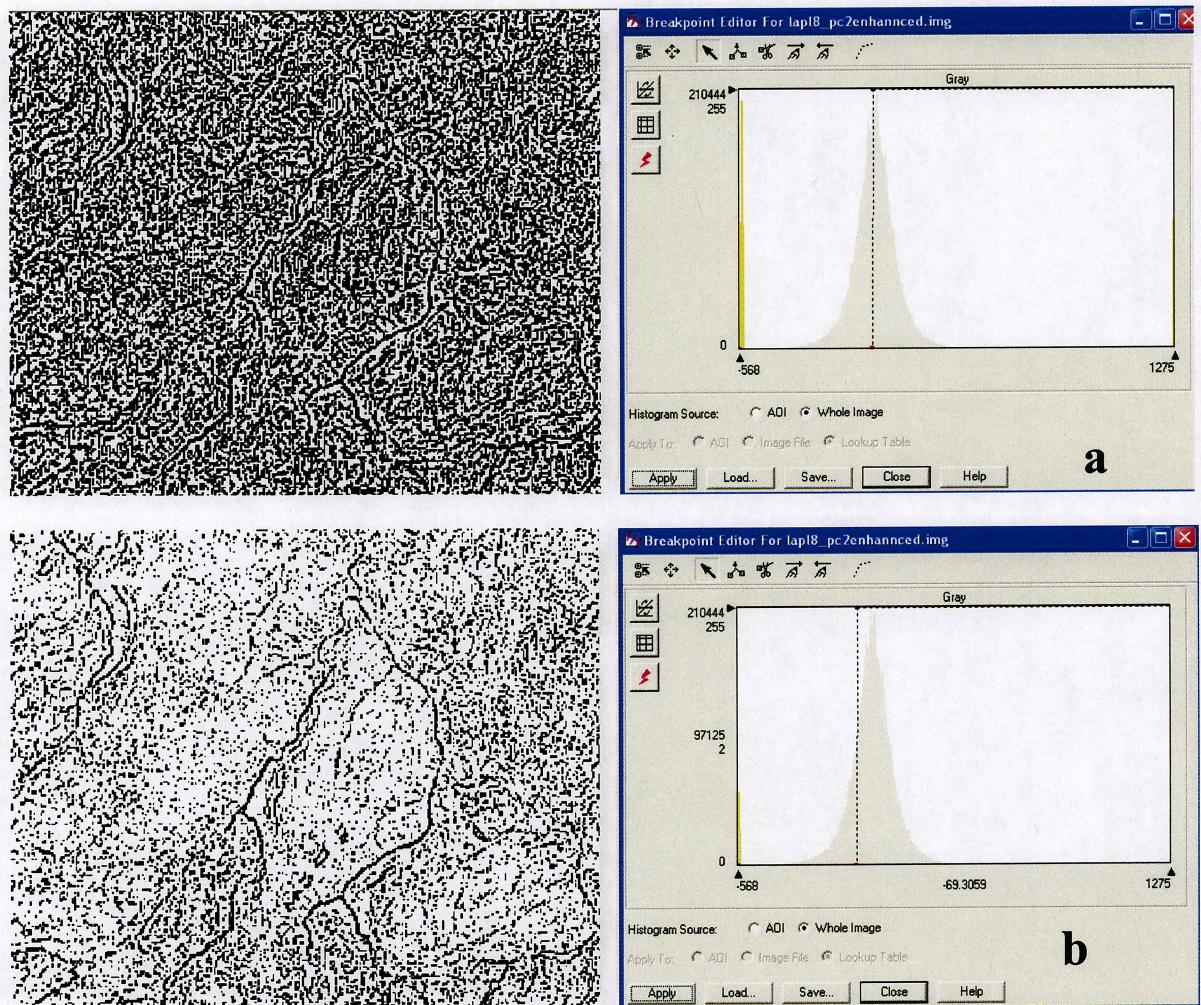
Στην πραγματικότητα βέβαια με αυτή τη μέθοδο δεν αναδεικνύεται η ακριβής θέση των ακμών. Επιπροσθέτως ενισχύεται ο θόρυβος στη φλιταρισμένη εικόνα και είναι δύσκολο να ερμηνεύσει κανείς το αποτέλεσμα επί της οθόνης. Με τη βοήθεια του Breakpoint Editor του Erdas ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πειραματιστεί ορίζοντας διαφορετικά κάθε φορά όρια αποκοπής (Σχήμα 5.19-b). Όμως για την ανάδειξη των ρηγμάτων υπάρχει πάντα ο κίνδυνος απώλειας πληροφορίας.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



Σχήμα 5.18: Εφαρμογή φίλτρου Laplace σε εικόνα C (πάνω) και ιστόγραμμα φιλτραρισμένης εικόνας (κάτω).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



Σχήμα 5.19: Δυαδική κατάτμηση 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 νυγασία δεν γίνονται αντιληπτά.

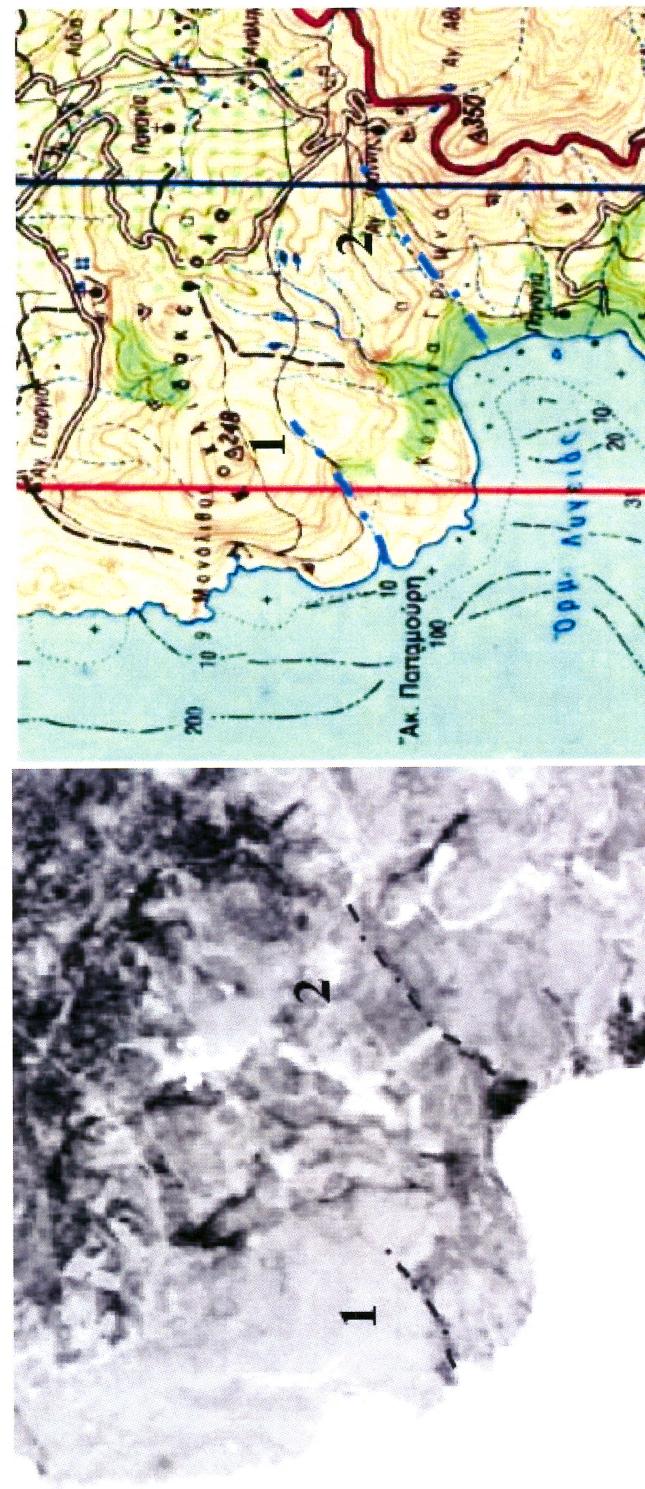
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

5. 4 Φωτοερμηνεία – έρευνα πεδίου

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των τοπογραφικών χαρτών της ΓΥΣ (κλίμακα 1:50000) και των γεωλογικών χαρτών του ΙΓΜΕ (κλίμακα 1:50000). Η εργασία ολοκληρώθηκε με έρευνα πεδίου.

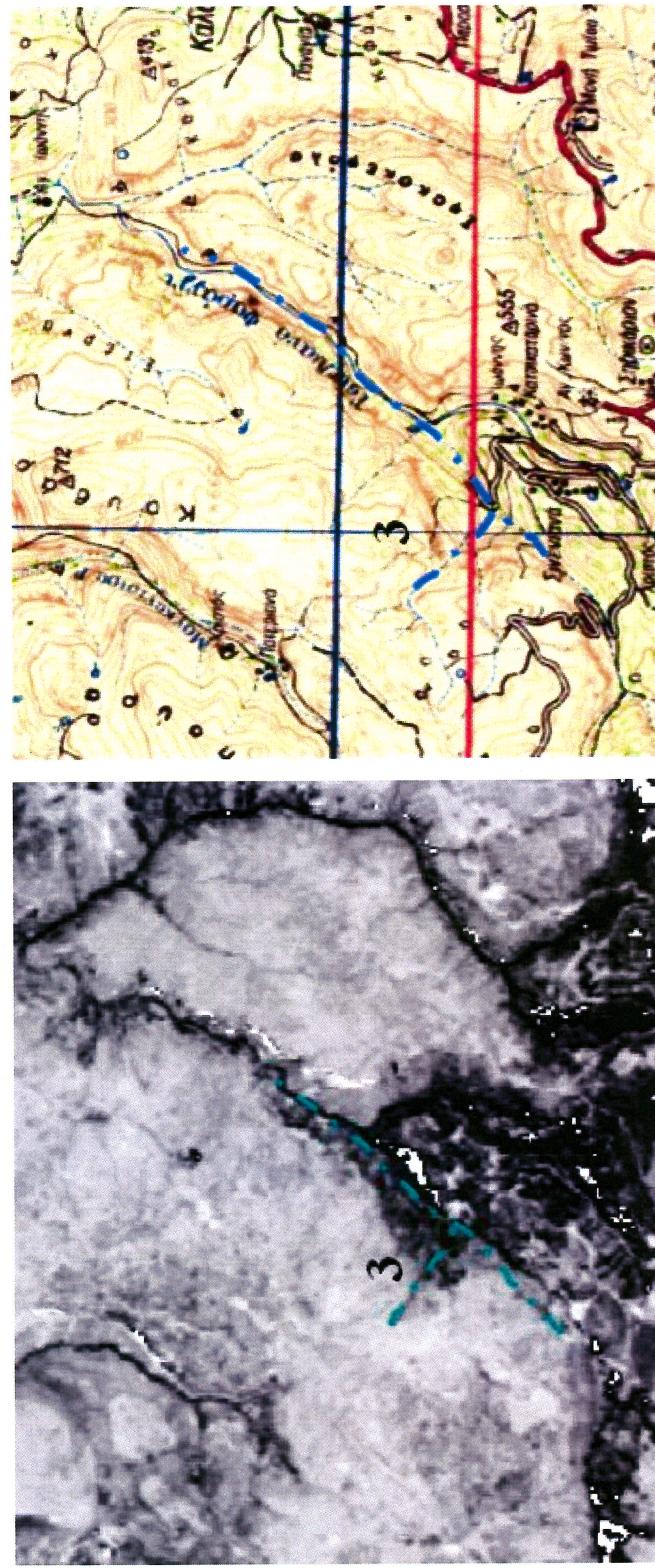
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχήματα 5.20-5.24) παρουσιάζονται παραδείγματα του τρόπου με τον οποίο αναδεικνύεται η θέση ρηγμάτων από παρατηρήσεις του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής (τεκτονικές κοιλάδες, ευθύγραμμα τμήματα αποστράγγισης, απότομες εκτροπές της ροής των ρεμάτων). Οι γραμμώσεις 1 έως 6 στα Σχήματα 5.20-5.24, προέκυψαν από ανάλυση των πρωτογενών εικόνων και αξιολογήθηκαν ως ρήγματα με τη βοήθεια των γεωλογικών χαρτών του ΙΓΜΕ (1:50000).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρημάτων στη Δυτική Κορίνθη.



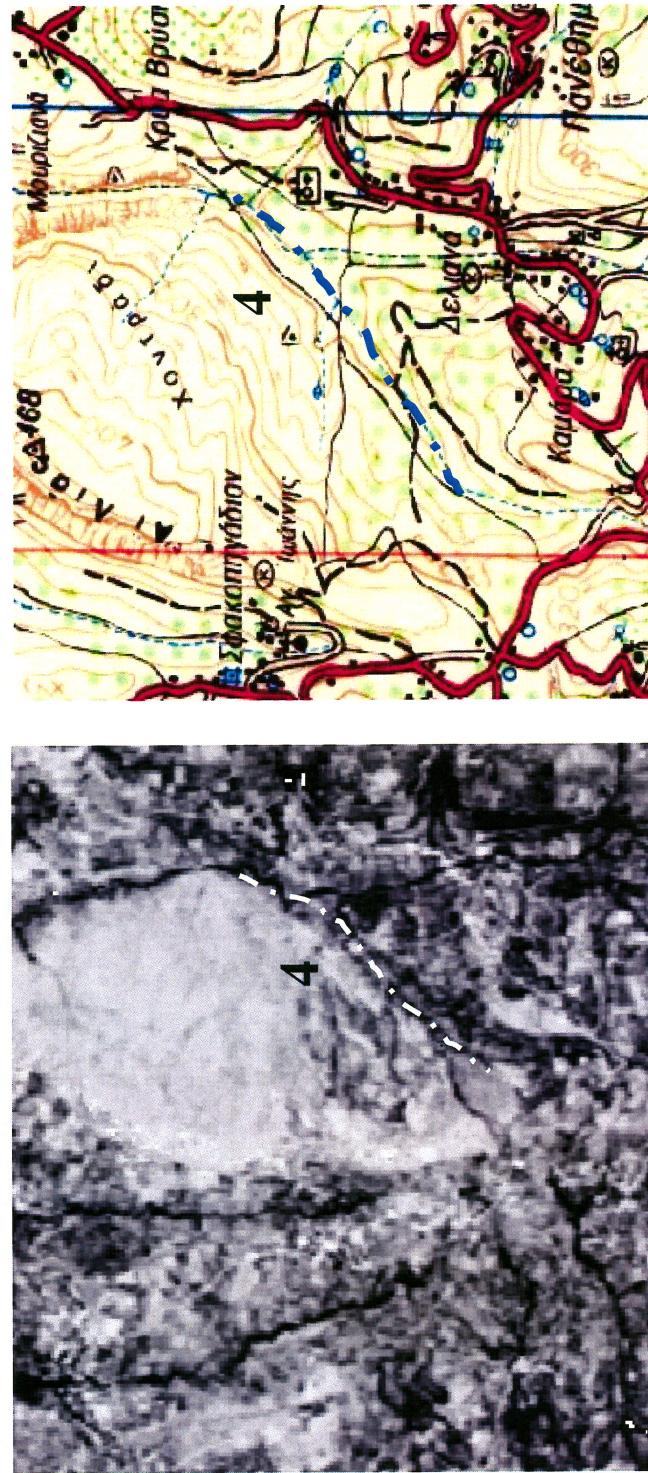
Σχήμα 5.20: Αριστερά - Εικόνα A και ανάδειξη υδρογραφικού δικτύου ελεγχόμενου από ρήγματα (Θέσεις 1 & 2). Δεξιά - Σύγκριτη θέσεων 1 & 2 με τοπογραφικό χάρτη περιοχής (φύλλο Παλαιόχωρας).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κοριτσί.



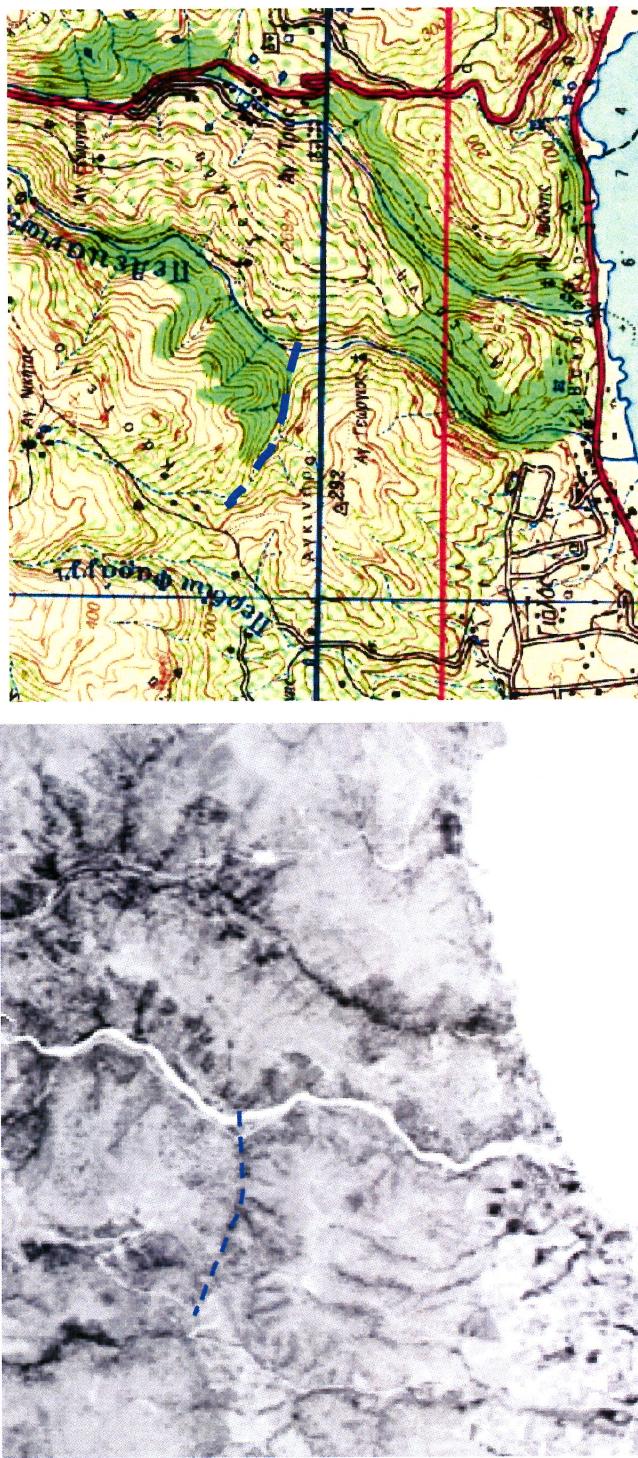
Σχήμα 5.21: Παράδειγμα ανάδειξης υδρογραφικού δικτύου ελεγχόμενου από ρήγματα (τεκτονική κοιλάδα).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρημάτων στη Δυτική Κοριτσί.



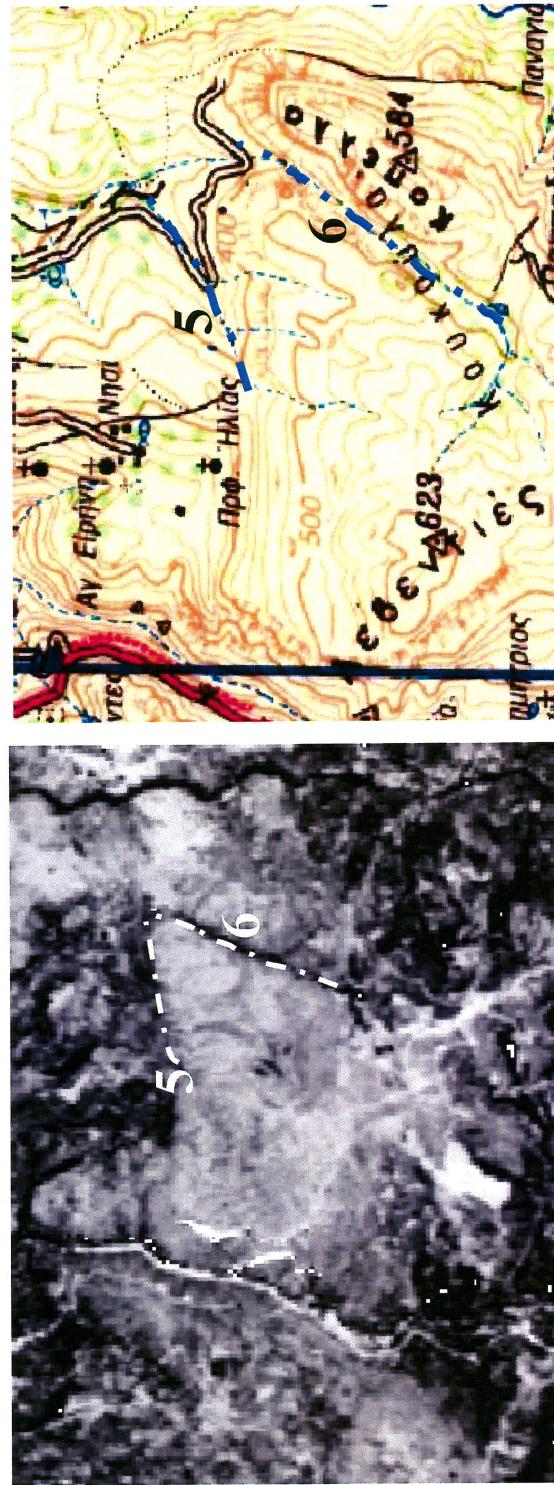
Σχήμα 5.22: Παράδειγμα απότομης εκτροπής της ροής ρέματος λόγω ύπαρξης ρήγματος.

Ανύλωση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρημάτων στη Δυτική Κορίνθη.



Σχήμα 5.23: Παράδειγμα απότομης εκτροπής της ροής ρέματος λόγω υπαρξής ρήγματος.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρημάτων στη Δυτική Κρήτη.



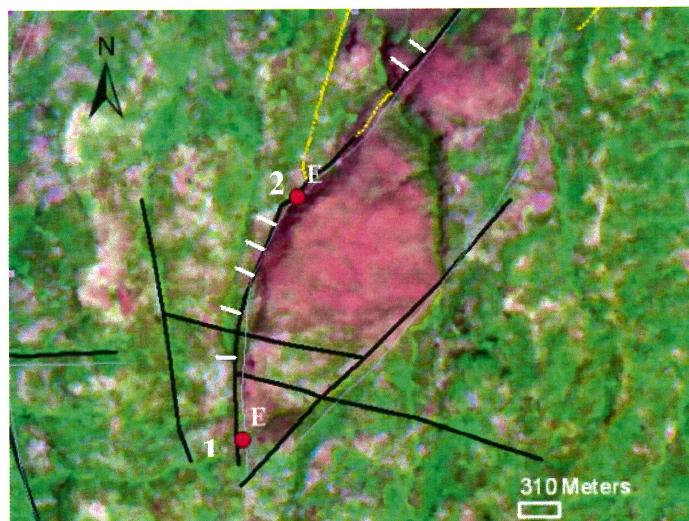
Σχήμα 5.24: Παράδειγμα ανάδειξης υδρογραφικού δικτύου ελεγχόμενου από ρήματα (τεκτονικές κοιλάδες).

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Η έρευνα πεδίου πραγματοποιήθηκε στα τελευταία στάδια της μεταπτυχιακής διατριβής. 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 θέσεων των ρηγμάτων που μελετήθηκαν από επιτόπιες παρατηρήσεις χρησιμοποιήθηκε GPS (Global Positioning System). Οι συντεταγμένες των θέσεων E και C στα Σχήματα 5.25 και 5.30 υπολογίστηκαν σε ΕΓΣΑ '87.

Σημειώνεται ότι στα Σχήματα 5.25, 5.30 και 5.32 απεικονίζεται το σύνθετο RGB (κανάλι 8-Red, κανάλι 3N-Green, κανάλι 1-Blue) που χρησιμοποιήθηκε για φωτοερμηνεία 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 μετά από έρευνα υπαίθρου στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος EMERIC I.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση των ρηγμάτων στην περιοχή Ρόκα (θέσεις 1 & 2 του Σχήματος 5.25). Η θέση του εν λόγω ρήγματος γίνεται αντιληπτή από το απότομο τοπογραφικό ανάγλυφο και τις έντονες σκιάσεις που δημιουργεί κατά τόπους (Σχήμα 5.26-29).

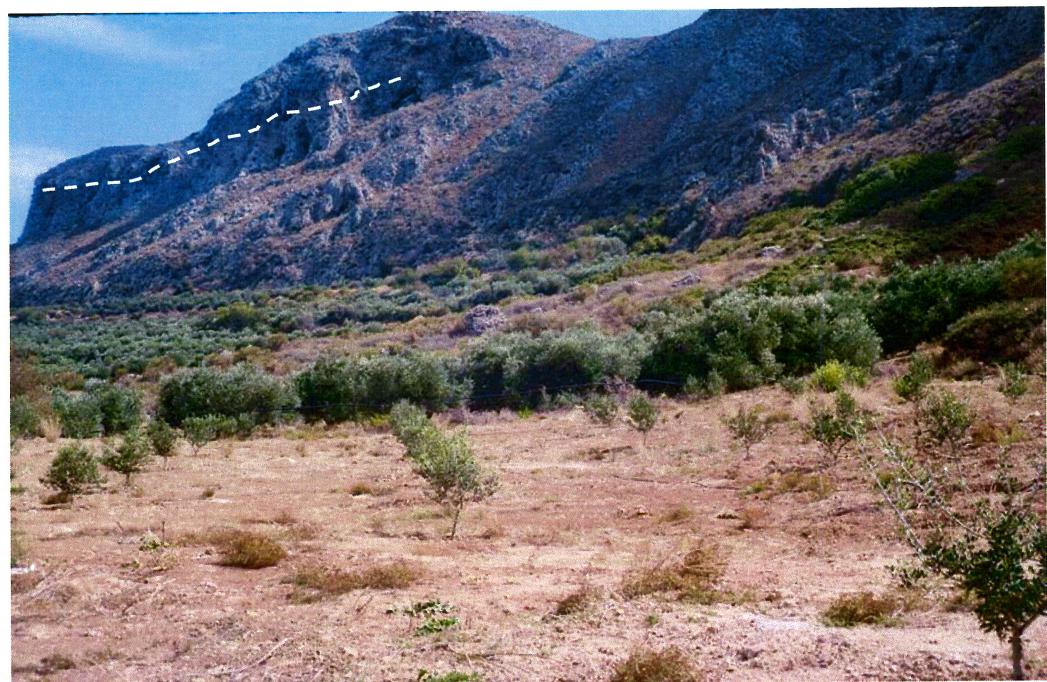


Σχήμα 5.25: Σύνθετο RGB μετά από υπέρθεση των ρηγμάτων του ΙΓΜΕ. Οι θέσεις 1 & 2 υποδεικνύουν τις θέσεις όπου πραγματοποιήθηκε έρευνα υπαίθρου.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



Σχήμα 5.26: Ρήγμα στην περιοχή Ρόκα.



Σχήμα 5.27: Άλμα ρήγματος στην περιοχή Ρόκα.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



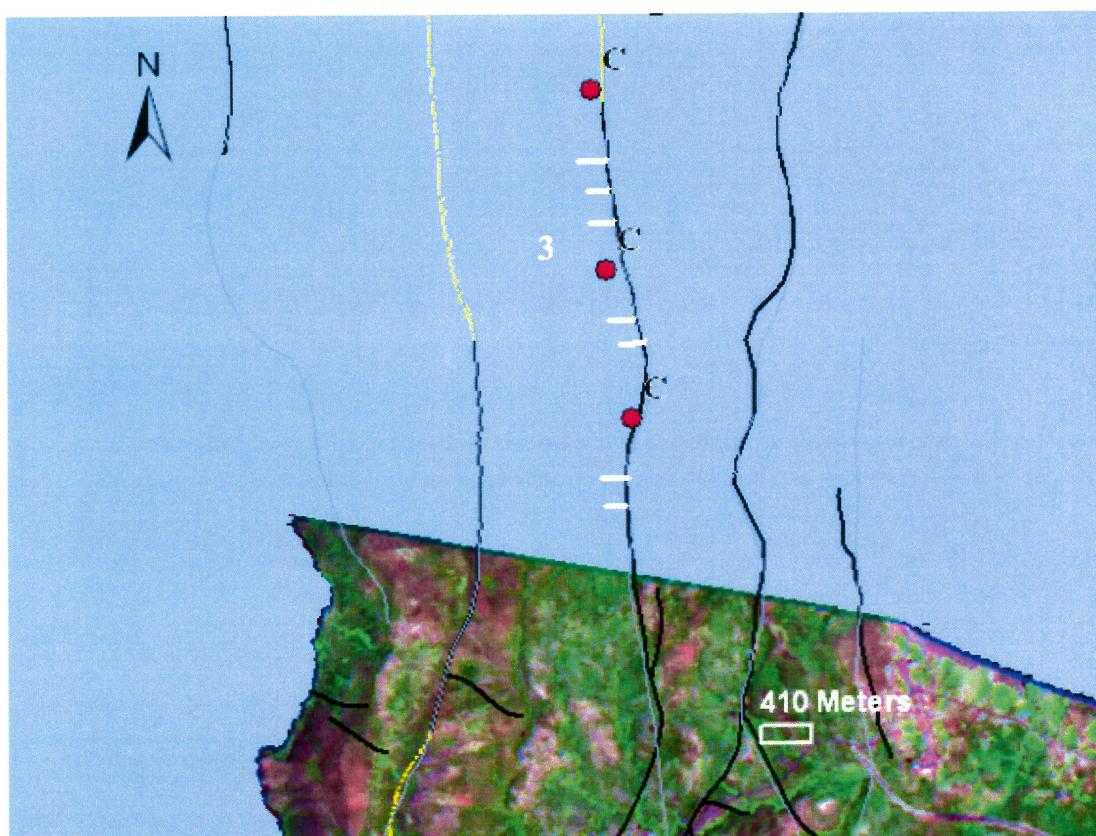
Σχήμα 5.28: Το ρήγμα γίνεται αντιληπτό από το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο και την οριοθέτησή του από τις καλλιέργειες.



Σχήμα 5.29: Ο καθρέπτης του ρήγματος στη Ρόκα όπως έχει αποκαλυφθεί μετά από εκσκαφές των κατοίκων για τη δημιουργία καλλιεργειών.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα μεγάλων διαστάσεων ρήγματα στην περιοχή του Ροδωπού (θέση 3 του Σχήματος 5.30). 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 δεν δύνανται να εντοπισθούν σε δορυφορικές εικόνες με χωρική ανάλυση όπως είναι αυτή του ASTER (15m).



Σχήμα 5.30: Χαρτογράφηση σημείων C όπως προσδιορίστηκαν μετά από επιτόπιες παρατηρήσεις.

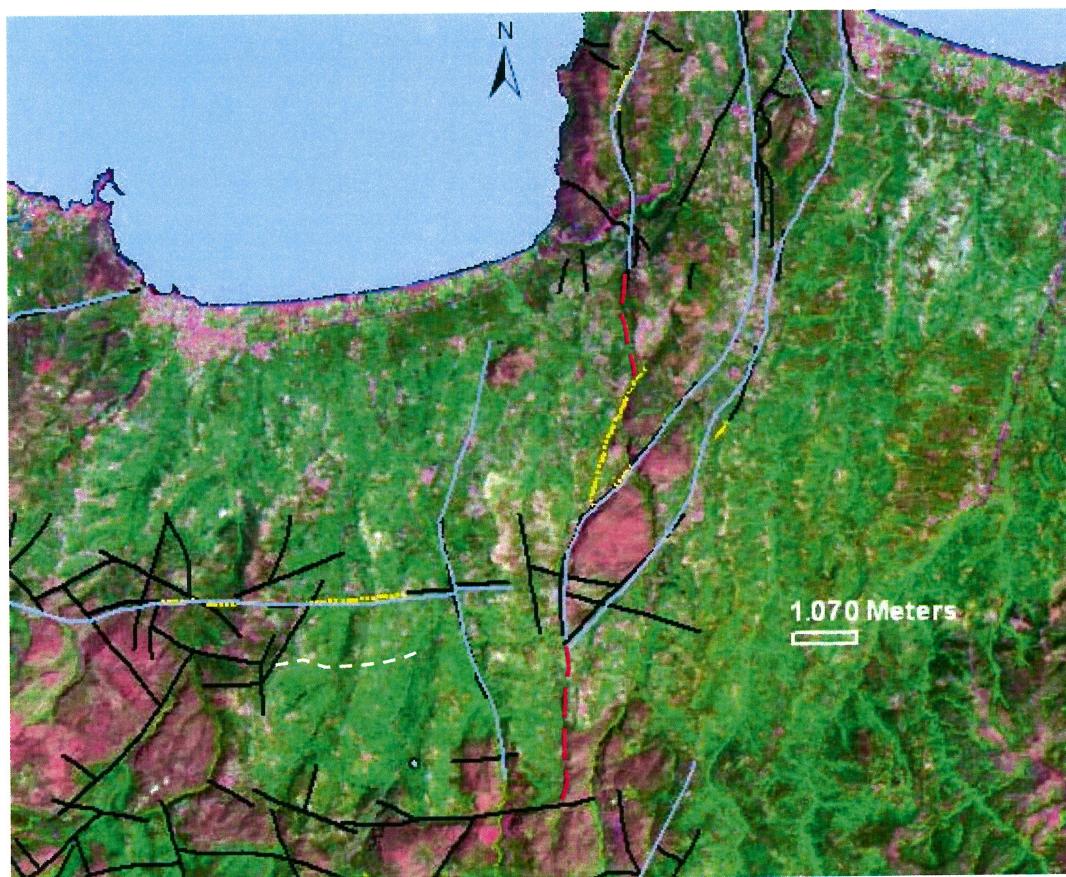
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



Σχήμα 5.31: Το ρήγμα στην περιοχή Ροδωπού (θέση 3 Σχήματος 5.30) αποκαλύπτεται σε μια ζώνη πλάτους μικρότερη των 15m και δεν γίνεται αντιληπτό στις εικόνες του ASTER.

Μελετώντας τη σύνθετη RGB απεικόνιση αντιλαμβάνεται κανείς ότι οι μεγάλες ασυνέχειες στην περιοχή του Ροδωπού και της Ρόκας δεν φαίνονται να είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Η ανάλυση των δορυφορικών εικόνων του ASTER ενδείκνυται για φωτοερμηνεία και αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο αλληλοσχετίζονται μεγάλων διαστάσεων τεκτονικές δομές. Η συσχέτιση του ρήγματος στην περιοχή Ροδωπού με εκείνο στη Ρόκα αποδίδεται στο Σχήμα 5.32 με κόκκινες διακεκομμένες γραμμές.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



Σχήμα 5.32: Αλληλοσυσχέτιση ρηγμάτων μελετώντας μεγάλης έκτασης περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα

Από την παρούσα εργασία προκύπτει ότι δεν υπάρχει κανένας μεθοδικός κανόνας αυτόματου εντοπισμού των ρήγμάτων με τη βοήθεια δορυφορικών δεδομένων όπως είναι οι εικόνες του ASTER. Σε όλα τα στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας η ανθρώπινη παρέμβαση ήταν επιτακτική ανάγκη.

Αν και η διαδικασία εντοπισμού των ρήγμάτων με οπτική ερμηνεία των εικόνων είναι υποκειμενική, μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία απαιτεί φωτοερμηνεία από έμπειρο φωτογεωλόγο – φωτοερμηνευτή. Η έρευνα πεδίου είναι εξίσου σημαντική.

Τα ρήγματα δεν απαντούν στις δορυφορικές εικόνες με τον ίδιο τρόπο. Ο εντοπισμός τους βασίζεται σε παρατηρήσεις της γεωμορφολογίας. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η παρούσα εργασία προτείνει αρχικά την ανάδειξη χαρακτηριστικών του γήινου αναγλύφου (π.χ. νερά και βλάστηση) που σχετίζονται με ρηξιγενή τεκτονική (π.χ. ανάδειξη υδρογραφικού δικτύου ελεγχόμενου από τα ρήγματα).

Επιπλέον, αν και κατά τους θερινούς μήνες, όπως στην περίπτωσή μας, η υγρασία που κατακρατούν τα ρήγματα εντοπίζεται πιο εύκολα από ότι το χειμώνα, η γωνία ύψους του Ήλιου κατά τη λήψη της εικόνας ήταν αρκετά μεγάλη (71°). Γενικά είναι θεμιτές μικρές γωνίες ύψους του Ήλιου μια και πολλά ρήγματα σχετίζονται με το τοπογραφικό ανάγλυφο.

Εξίσου σημαντικό ρόλο έπαιξε ο προσανατολισμός των γραμμώσεων σε σχέση με τη θέση της πηγής φωτισμού (αζιμούθιο Ήλιου) αλλά και το ύψος των αντικειμένων (άλμα ρήγμάτων). Οι γραμμώσεις που ήταν προσανατολισμένες παράλληλα στη διεύθυνση του Ήλιου (127° , 634) ήταν δύσκολο ή και αδύνατον να εντοπισθούν. Επίσης τα ρήγματα με μικρό άλμα δεν έγιναν εύκολα αντιληπτά εξαιτίας των μικρών σκιάσεων που δημιουργούν.

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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρήγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

ρήγματα μεγέθους μικρότερου των 15m (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 15m στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο και τα 30m 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. Στην παρούσα εργασία μετά από έρευνα πεδίου προέκυψε ότι τα ρήγματα στην περιοχή Ροδωπού αν και έχουν μεγάλες γωνίες κλίσης (σχεδόν κατακόρυφα) δεν έγιναν εύκολα αντιληπτά στην εικόνα. Το γεγονός ότι αποκαλύπτονται σε μια ζώνη πλάτους μικρότερη των 15m είχε ως αποτέλεσμα τη συνάθροιση της φασματικής τους απόκρισης 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). Επισημαίνεται ότι 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 θα μπώνουν και τα γραμμικά χαρακτηριστικά μικρών διαστάσεων, που μπορεί να σχετίζονται με ρήγματα της υπό μελέτη περιοχής.

Όταν το πλάτος μιας γράμμωσης είναι μεγάλο, τόσο το φίλτρο Sobel όσο και το φίλτρο Laplace προκαλούν το φαινόμενο των διπλών ακμών στην εικόνα. Κατά συνέπεια

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Λυτική Κρήτη.

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 προκείμενη περίπτωση έπρεπε να είναι 1: 15000 και όχι 1: 50000).

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 πρανή. 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 φίλτράρισμα 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.. Θα μπορούσε π.χ. να πραγματοποιηθεί μια μορφή 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) καθώς και του τρόπου με τον οποίο σχετίζονται αυτά με τις ακμές που βγάζει ο αλγόριθμος των φίλτρων. Με αφαίρεση των ακμών 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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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 τη φασματική ανάλυση των εικόνων του ASTER με τα υψηλής ευκρίνειας δεδομένα π.χ. του IKONOS (η χωρική ανάλυση φτάνει το 1m) η ποιότητα των αποτελεσμάτων θα βελτιωθεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ελληνικές βιβλιογραφικές αναφορές

Αργιαλάς, Π. Δημήτρης (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. Αδαμάντιος (1998). *Εισαγωγή στην Τεκτονική Γεωλογία*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, p 117, pp 145-149.

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

Μηλιαρέσης, Χαρ. Γεώργιος (2003). *Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.

Τριπολιτσιώτης, Α., Μερτίκας Σ. (1998). *Μελέτη και αξιολόγηση γεωμετρικών διορθώσεων δορυφορικών εικόνων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Διπλωματική διατριβή.

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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Διεθνείς βιβλιογραφικές αναφορές

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

Colwell, R.N., editor, (1983). *Manual of Remote Sensing (second edition)*, American Society of Photogrammetry, Sheridan Press, USA.

Cracknell, P. Arthur & Landson Hayes (1991). *Introduction to Remote Sensing*, Taylor & Francis Inc., London, pp. 208-209.

Drury, S.A. (2001). *Image Interpretation in Geology (3rd edition)*, Blackwell Science Inc., USA.

“Erdas Field Guide” (2001) - Fifth edition, Erdas Inc., Atlanta, Georgia.

Gupta, P. Ravi (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, Steffen (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 (second edition)*, John Wiley and Sons Inc., USA.

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

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

Miller, C. Victor (1961). *Photogeology*, McGraw-Hill Book Company Inc., London, pp. 93-100, 188-192.

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

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 (second edition)*, W.H. Freeman Inc., New York.

Αρθρα

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”, Int. J. 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) ”, Int. J. Remote Sensing, Vol. 19, No. 16, 3169-3185.

Basham, A.M. May, 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”, Int. J. Remote Sensing, Vol. 18, No. 18, 3719-3728.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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

Gupta, A. & P. Chen (2001). “Remote Sensing and Environmental evaluation in the Mekong Basin”. 22nd 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-Basa 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”, Int. J. 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”, Int. J. 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”, Int. J. 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.

Migiroς, 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.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

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”, Int. J. 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.

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”, Int. J. 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”, Int. J. 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”, Int. Remote Sensing, Vol. 20, No. 4, 659-681.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

ΠΗΓΕΣ INTERNET:

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

<http://www.asterweb.com> (10/2004)

<http://wintopo.com> (9/2005)

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.

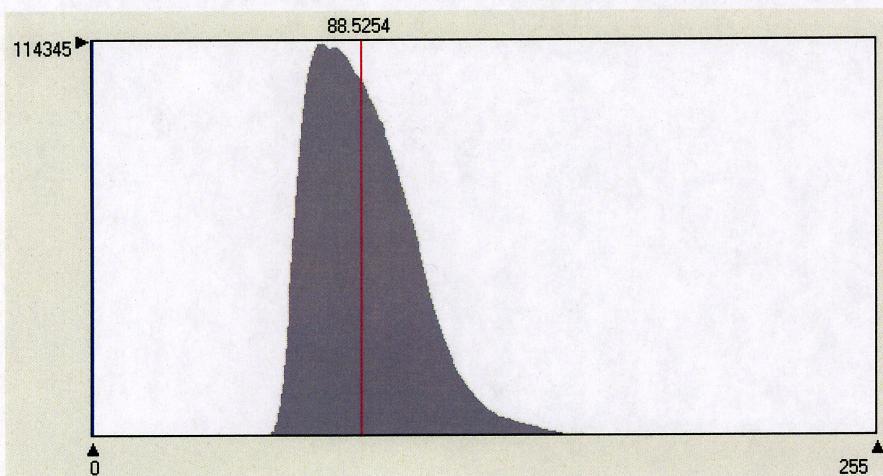
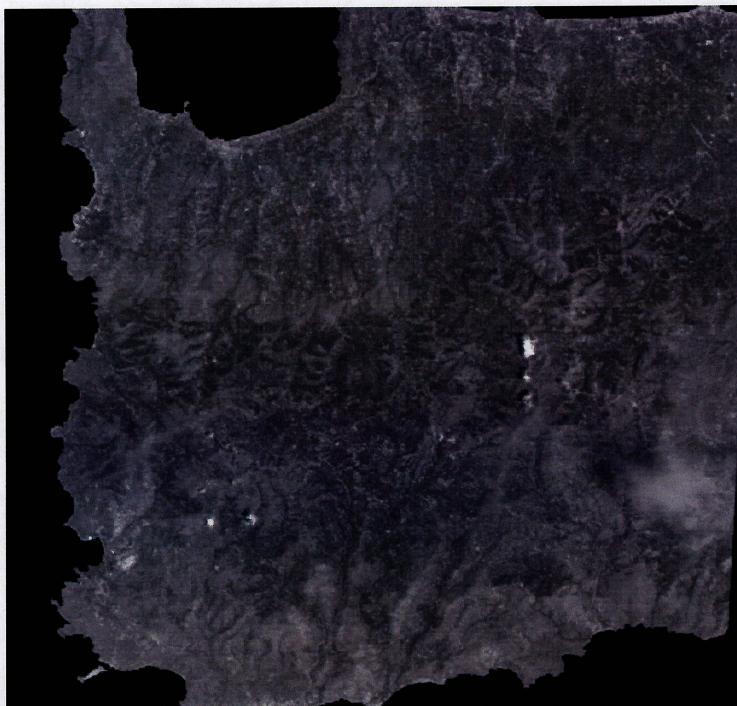
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

&

ΕΙΚΟΝΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΘΕΣΕΩΝ

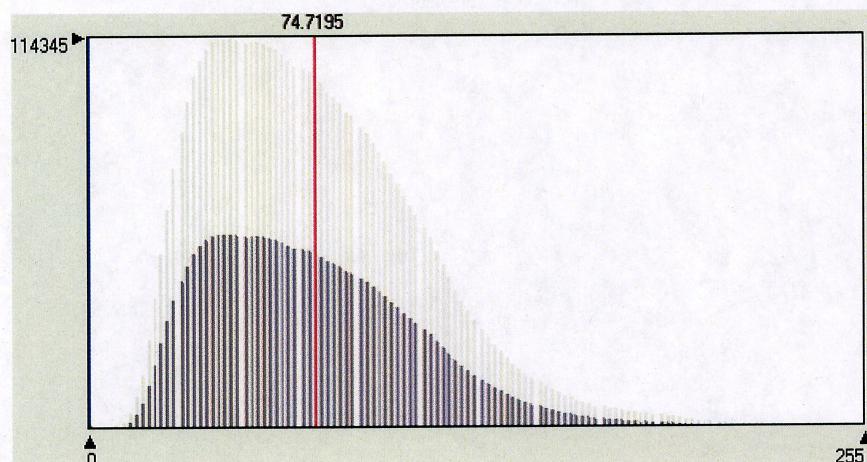
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|----|-------|-----|-----------|--------|
| 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 ιστόγραμμά της.

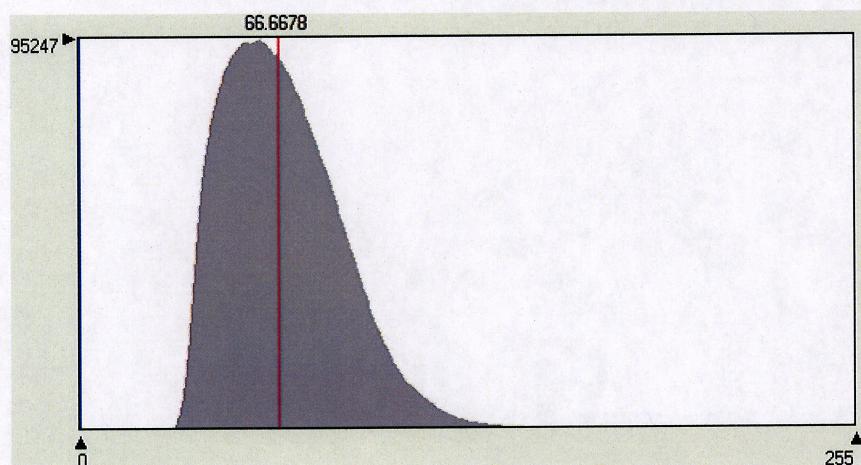
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

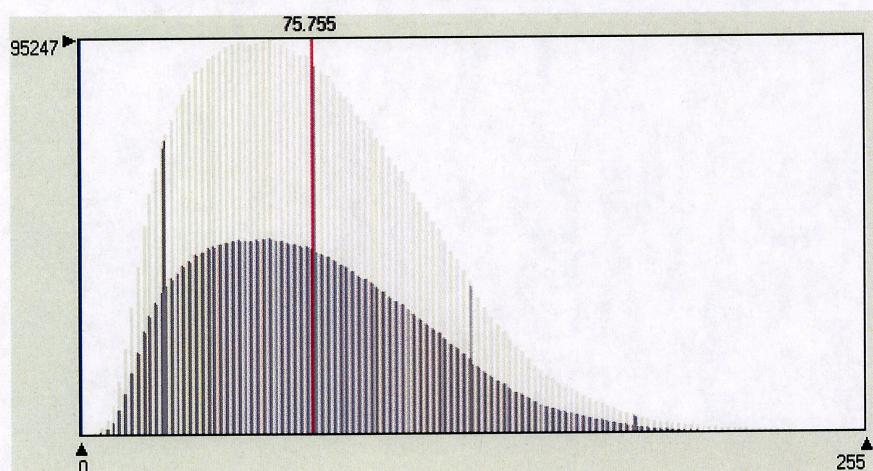
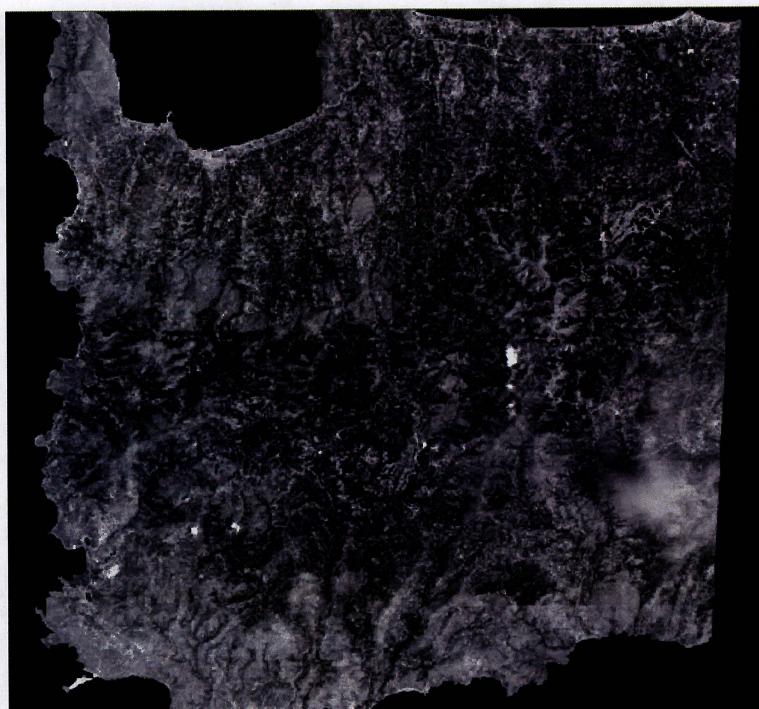
Η εικόνα στο φασματικό κανάλι VNIR 1 (Green) με το ιστόγραμμά της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

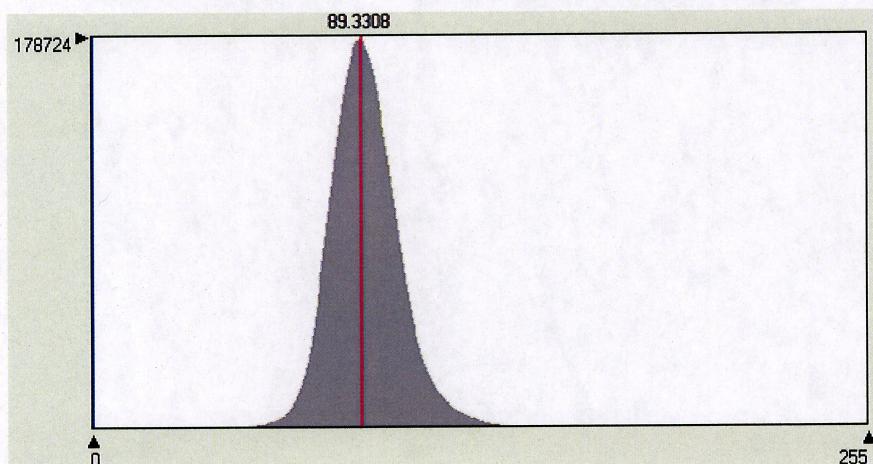
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-----------|--------|
| Min: | 0 | Max: | 255 | Mean: | 75.755 |
| Median: | 70.723 | Mode: | 60.762 | Std. Dev: | 39.009 |

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

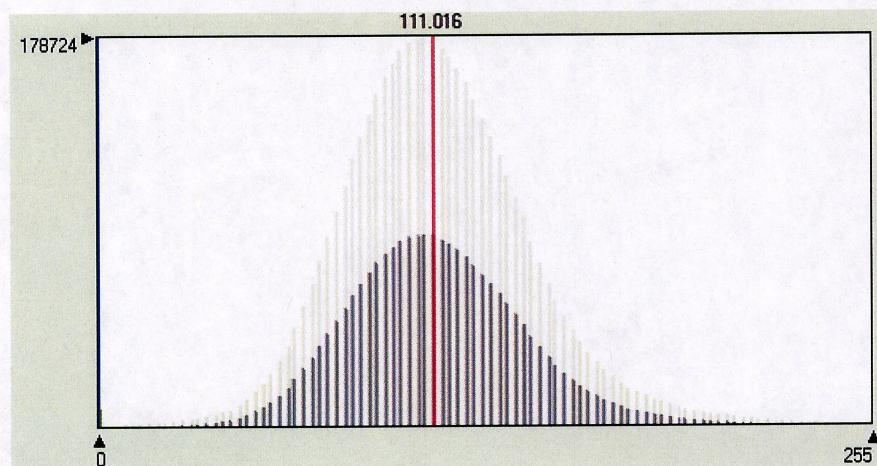
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|----|-------|-----|-----------|--------|
| Min: | 0 | Max: | 255 | Mean: | 89.331 |
| Median: | 89 | Mode: | 88 | Std. Dev: | 12.372 |

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

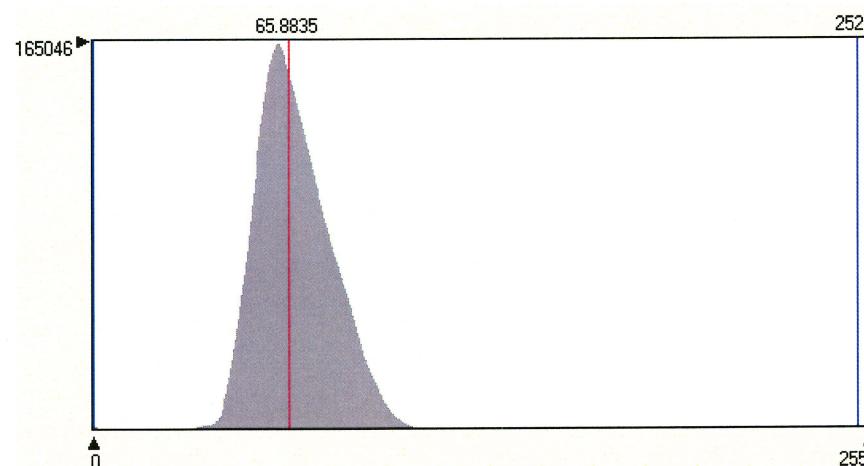
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-----------|---------|
| Min: | 0 | Max: | 255 | Mean: | 111.016 |
| Median: | 109.57 | Mode: | 106.58 | Std. Dev: | 32.598 |

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

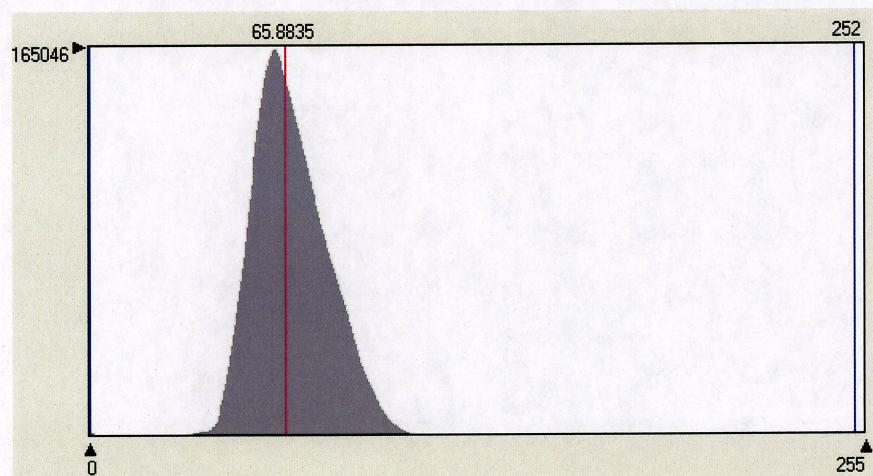
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 4 με το ιστόγραμμά της.

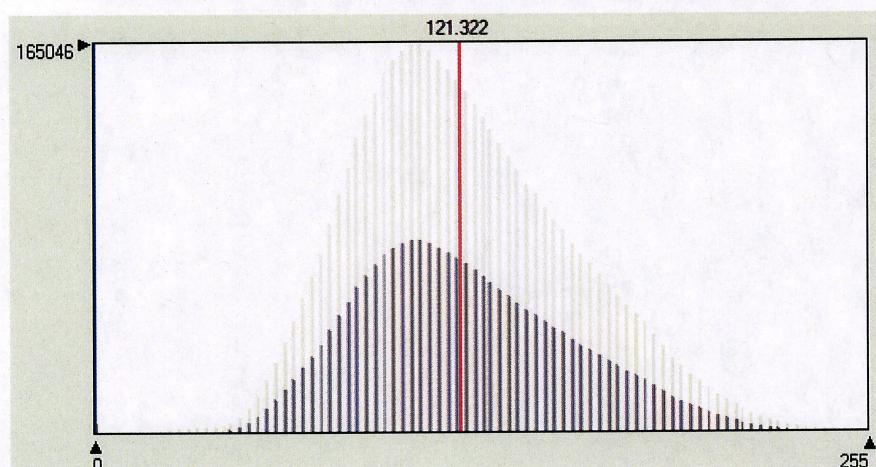
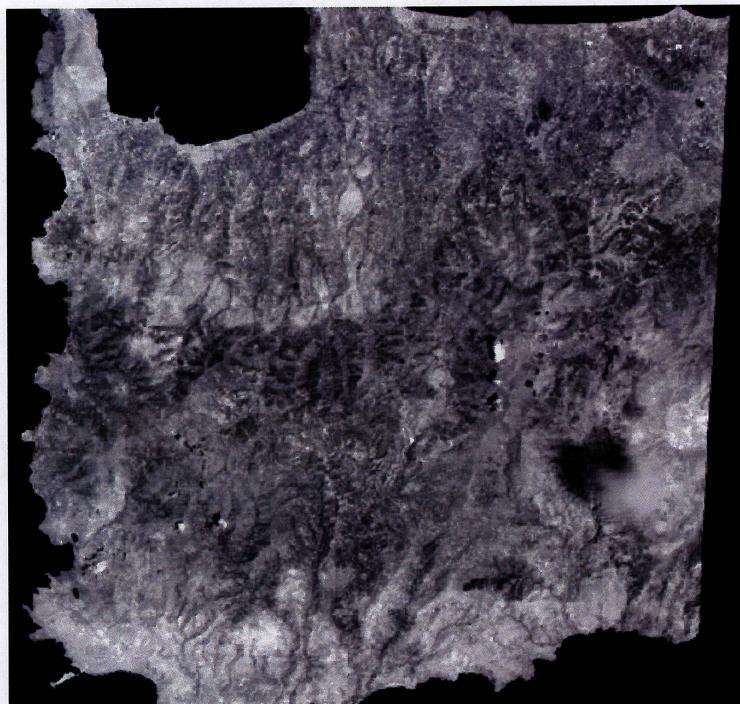
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 4 με το ιστόγραμμά της.

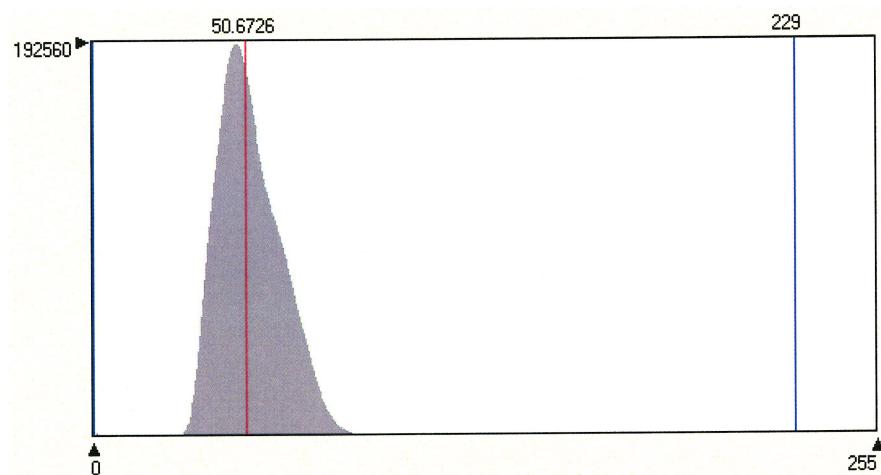
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-----------|---------|
| Min: | 0 | Max: | 255 | Mean: | 121.322 |
| Median: | 118.54 | Mode: | 103.59 | Std. Dev: | 37.058 |

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

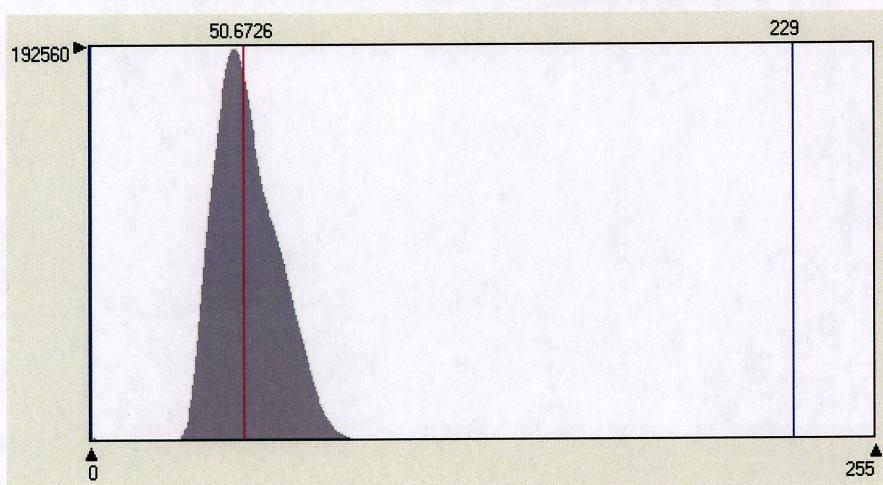
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|----|-------|-----|-----------|--------|
| Min: | 0 | Max: | 229 | Mean: | 50.673 |
| Median: | 49 | Mode: | 47 | Std. Dev: | 10.585 |

Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 5 με το ιστόγραμμά της.

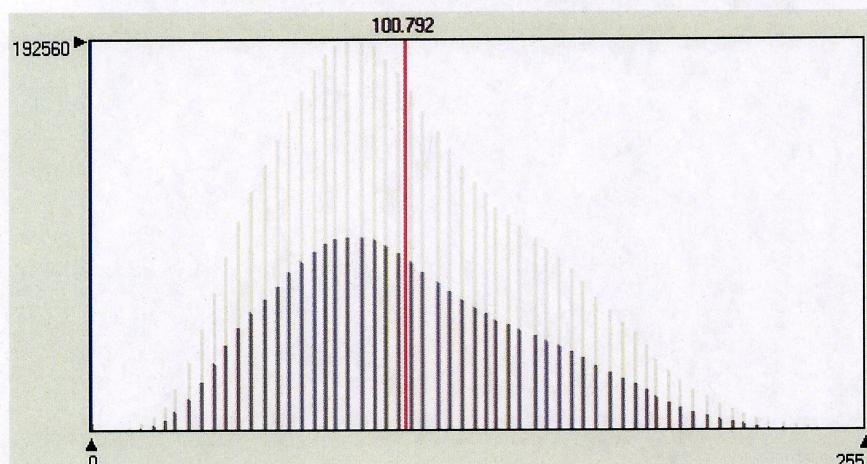
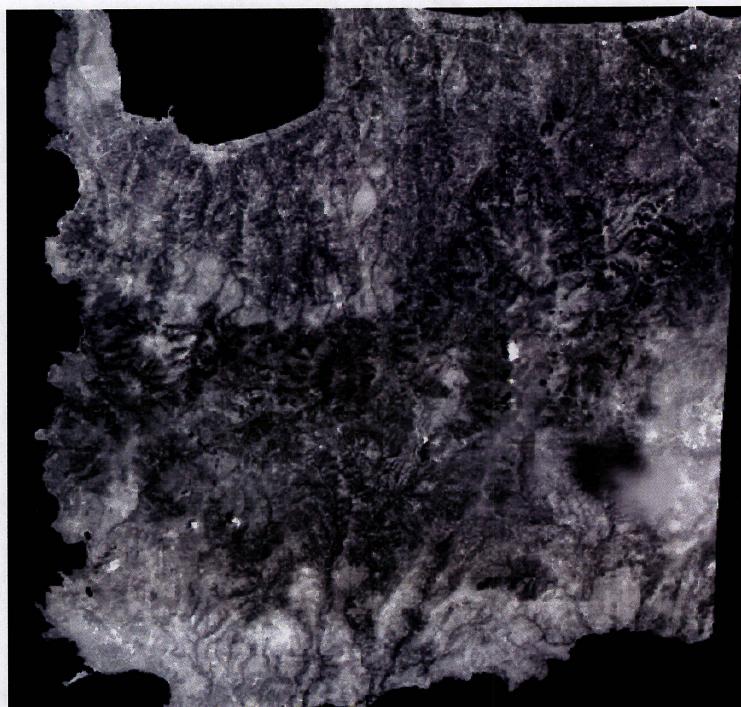
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|----|-------|-----|-----------|--------|
| Min: | 0 | Max: | 229 | Mean: | 50.673 |
| Median: | 49 | Mode: | 47 | Std. Dev: | 10.585 |

Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 5 με το ιστόγραμμά της.

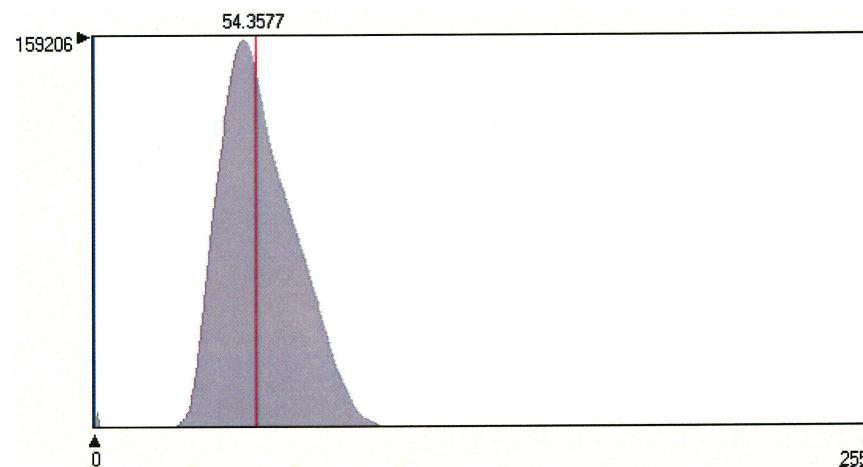
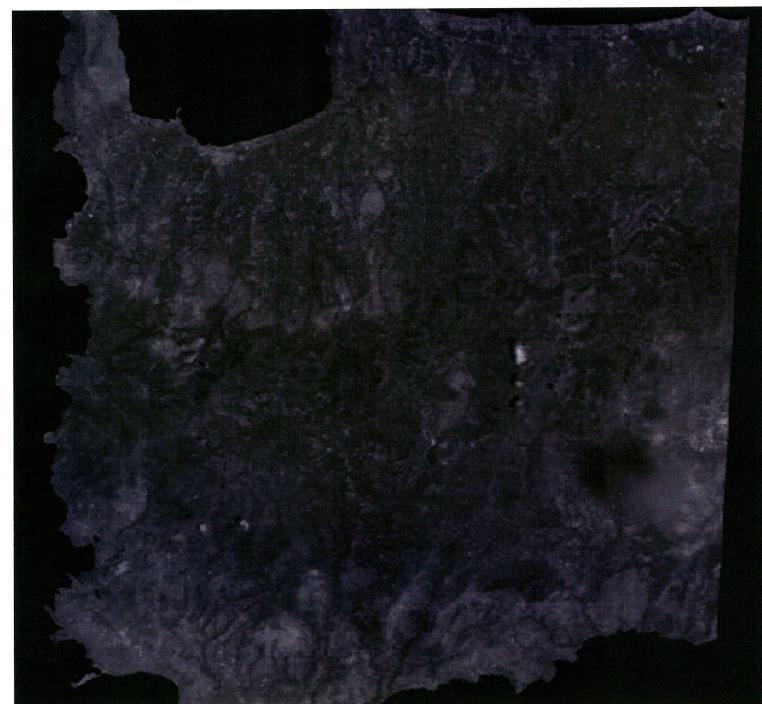
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|-------|-------|--------|-----------|---------|
| Min: | 0 | Max: | 255 | Mean: | 100.792 |
| Median: | 93.59 | Mode: | 85.871 | Std. Dev: | 40.890 |

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

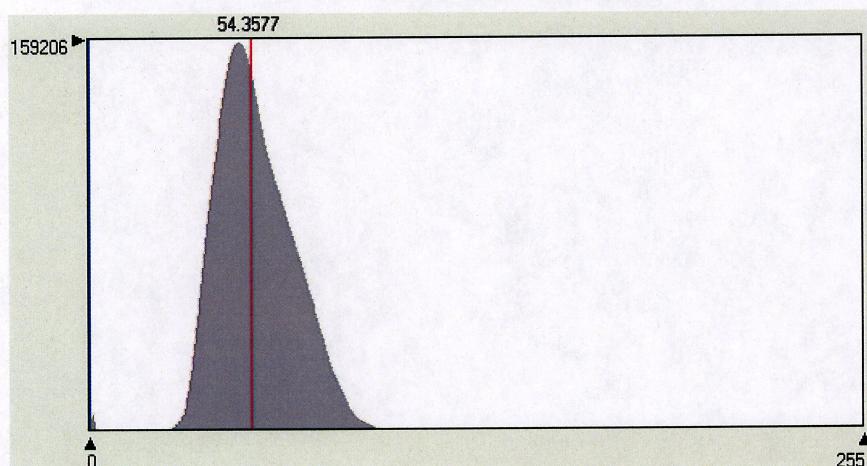
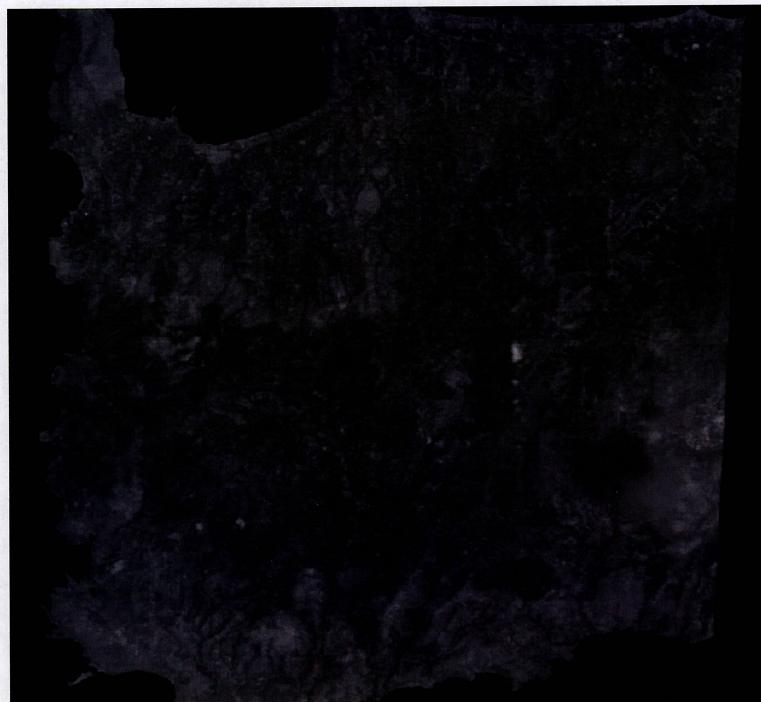
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 6 με το ιστόγραμμά της.

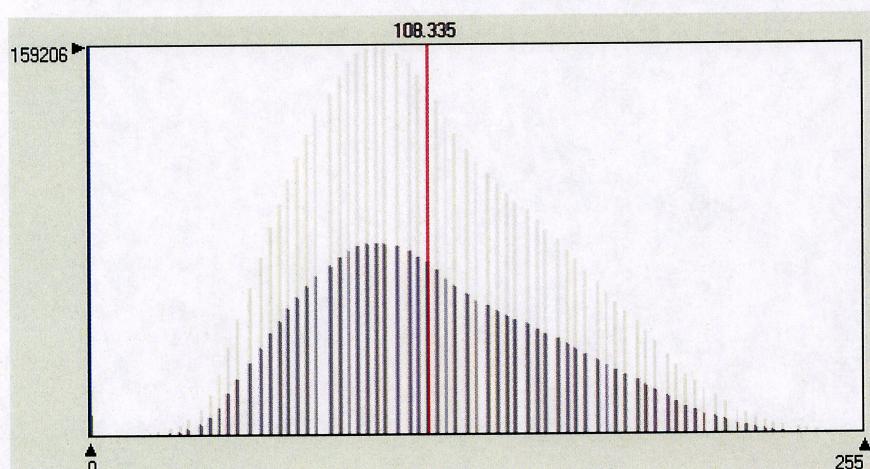
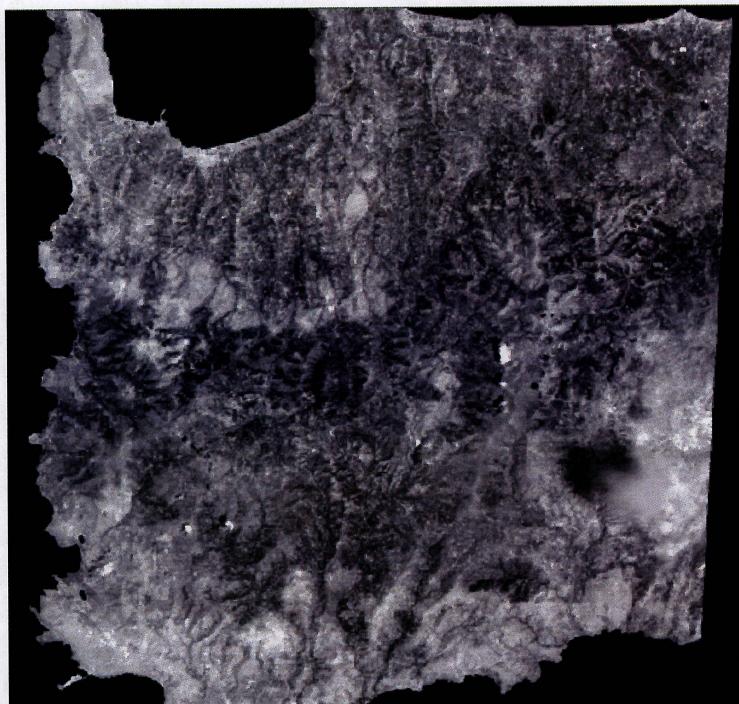
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 6 με το ιστόγραμμά της.

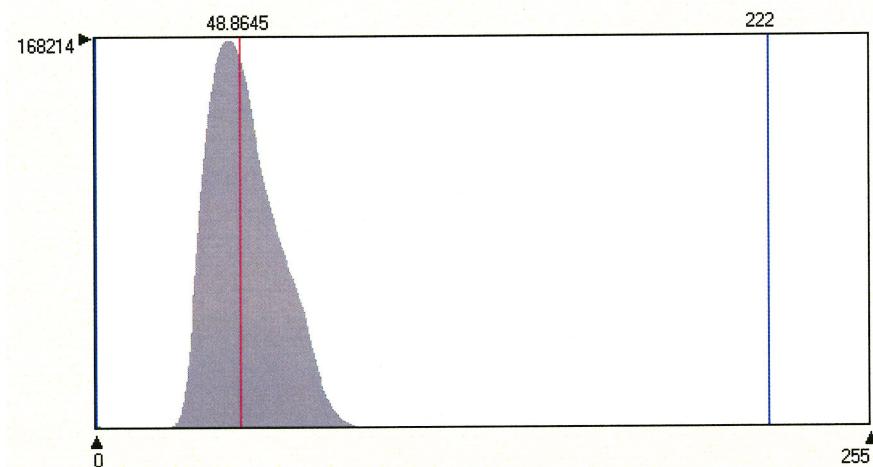
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-----------|---------|
| 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 ιστόγραμμά της μετά από ενίσχυση των αντιθέσεων.

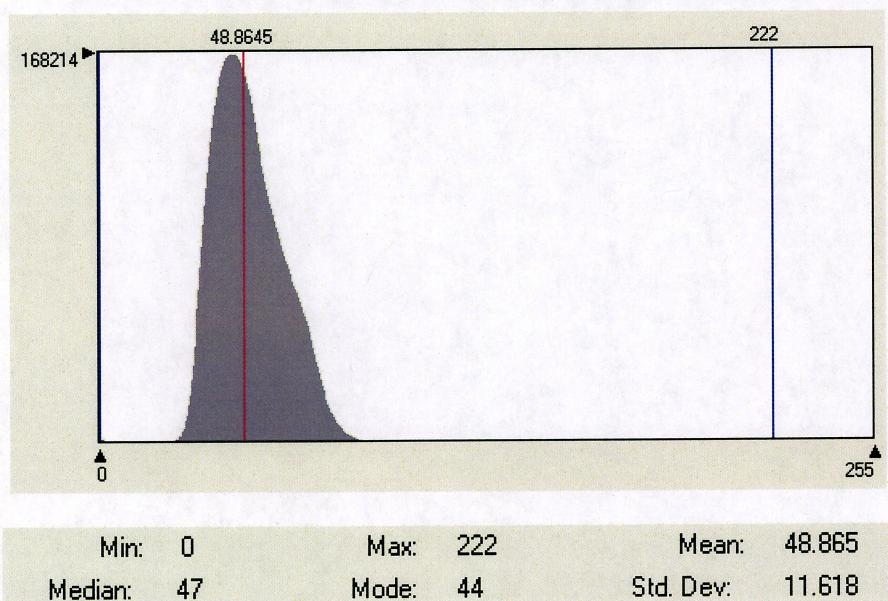
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

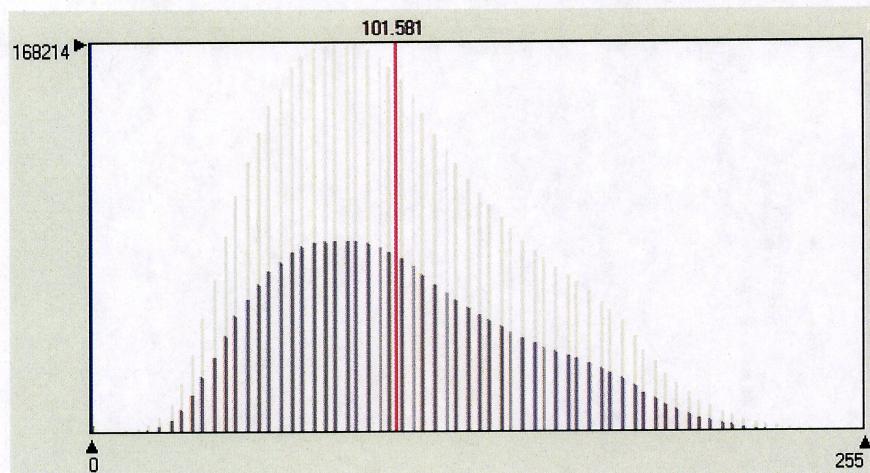
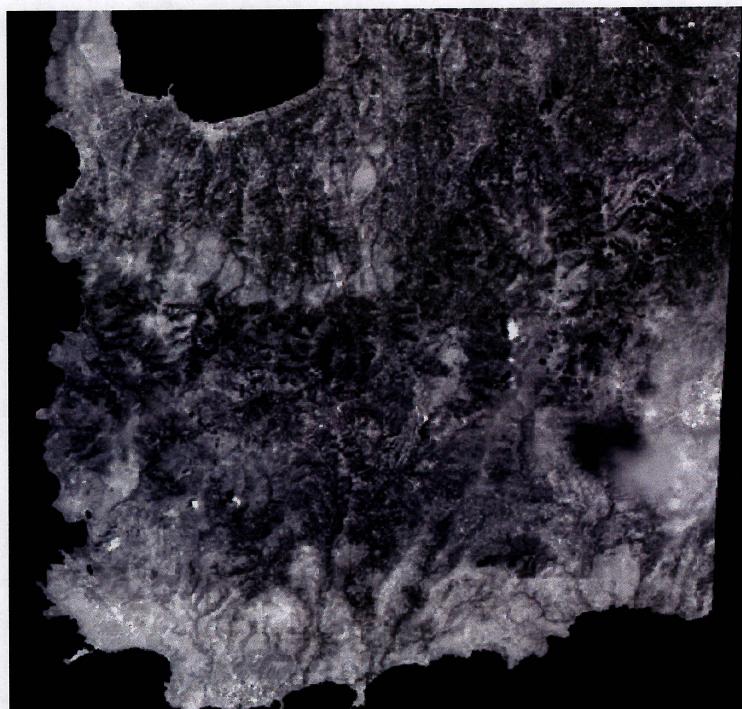
Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 7 με το ιστόγραμμά της.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 7 με το ιστόγραμμά της.

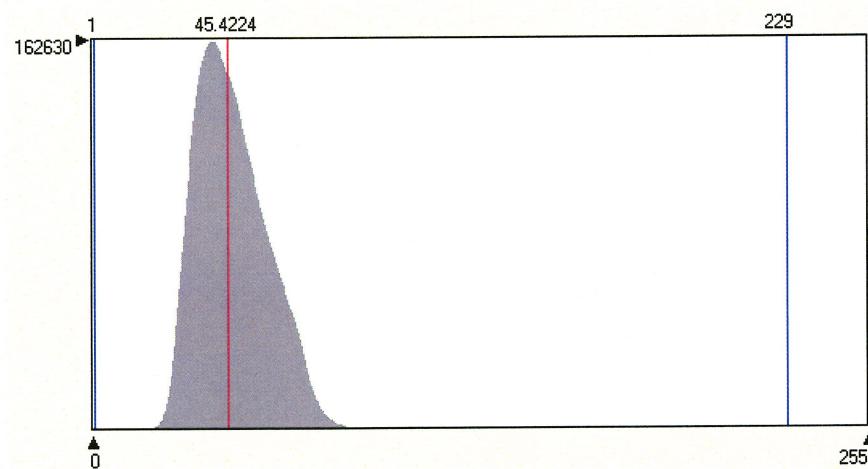
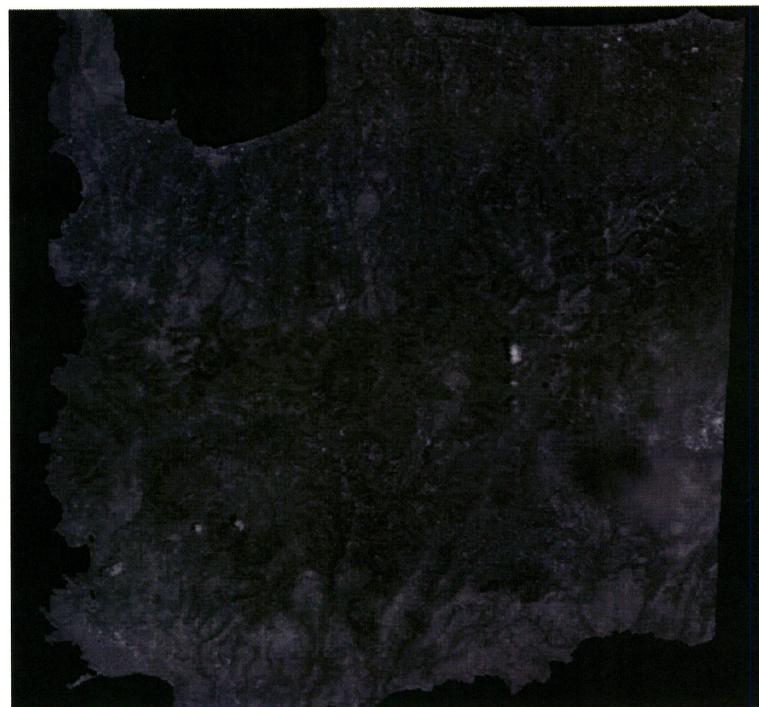
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-----------|---------|
| Min: | 0 | Max: | 255 | Mean: | 101.581 |
| Median: | 94.629 | Mode: | 83.672 | Std. Dev: | 41.804 |

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

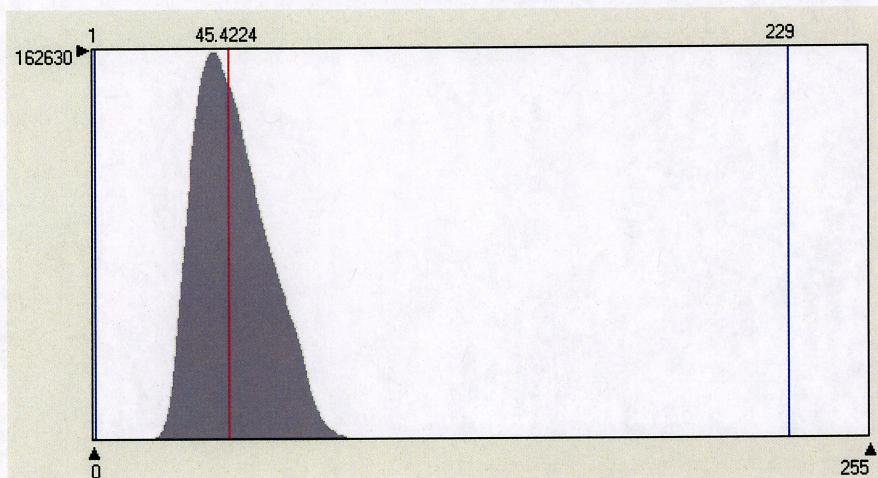
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 8 με το ιστόγραμμά της.

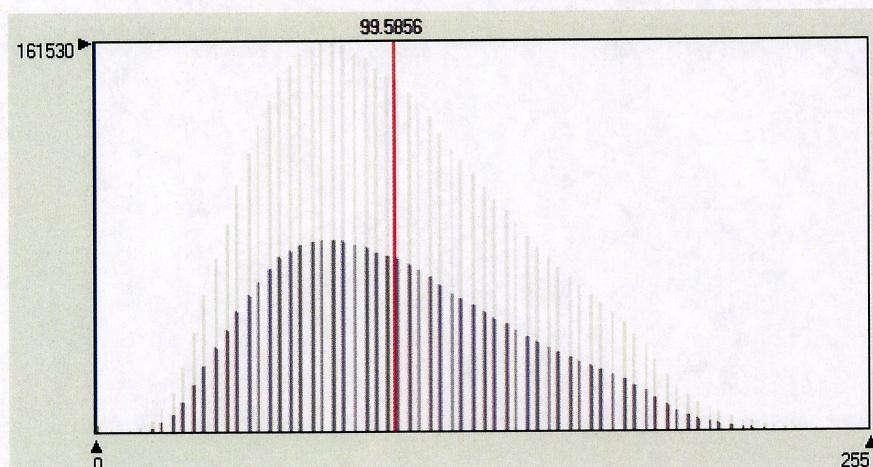
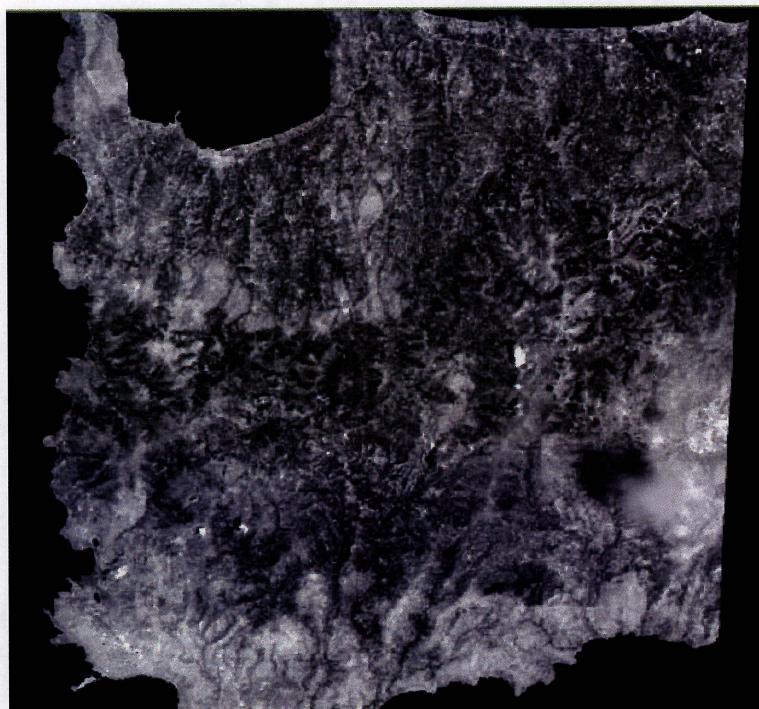
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 8 με το ιστόγραμμά της.

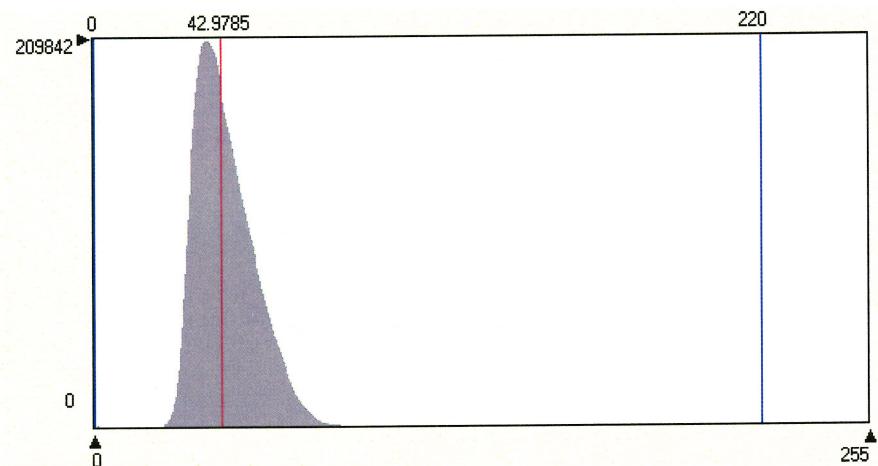
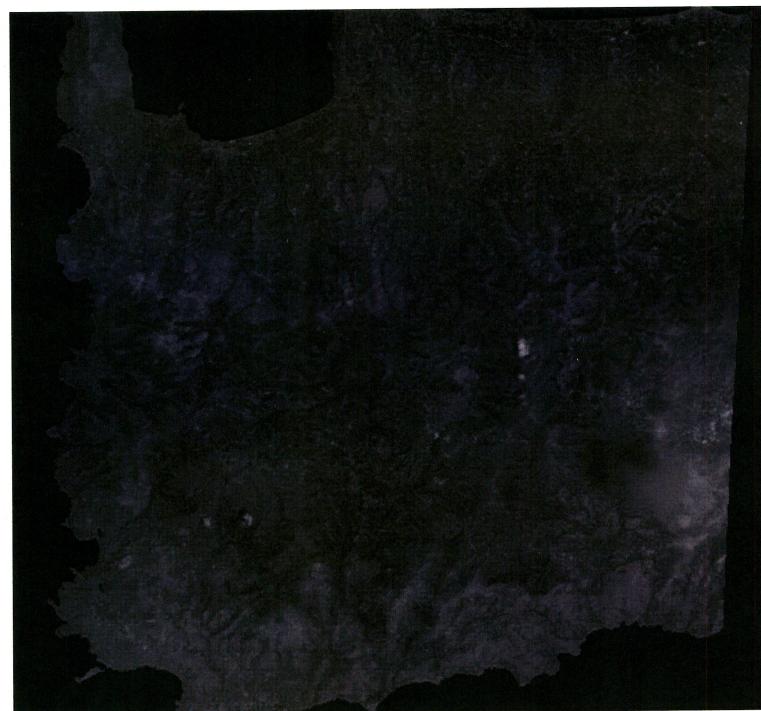
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-----------|--------|
| Min: | 0 | Max: | 255 | Mean: | 99.586 |
| Median: | 95.625 | Mode: | 73.711 | Std. Dev: | 42.079 |

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

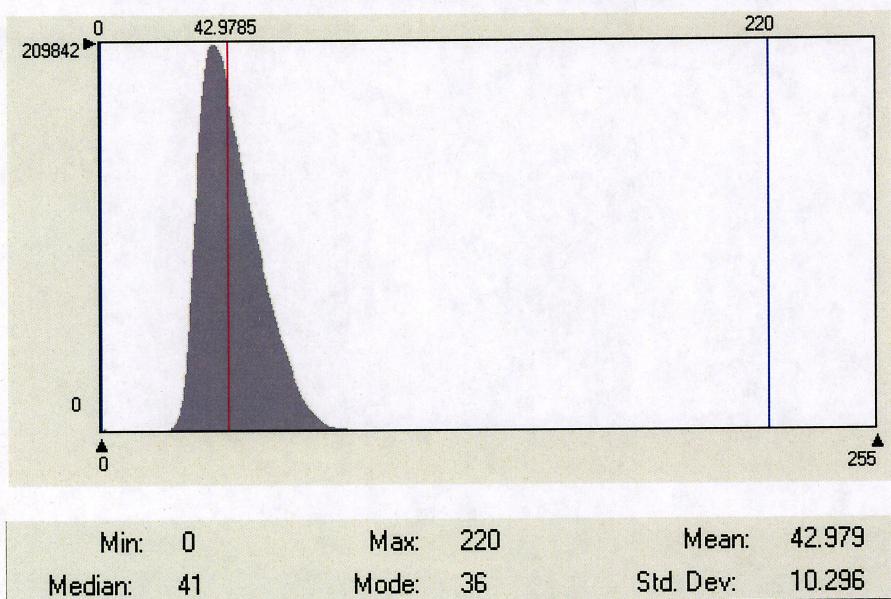
Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



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

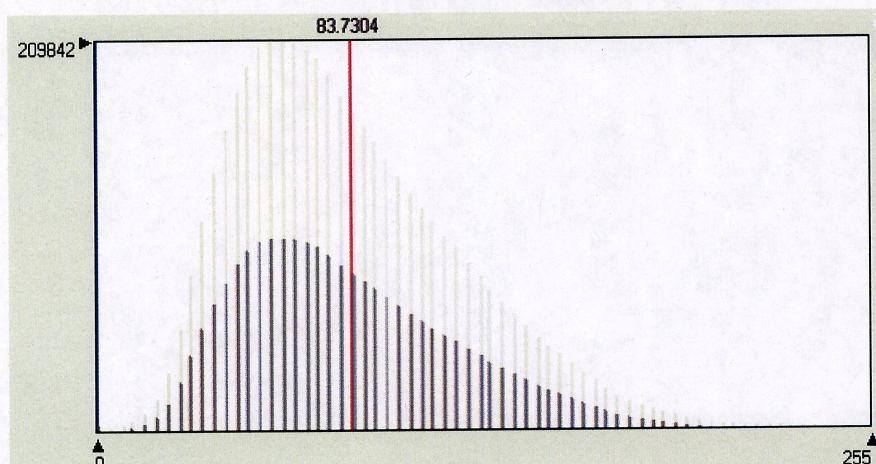
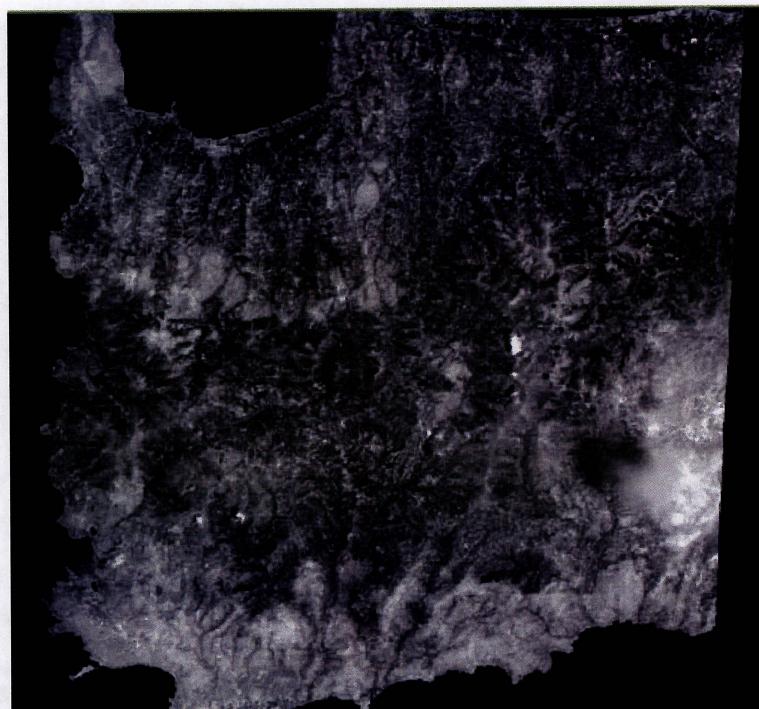
Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 9 με το ιστόγραμμά της.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



Η εικόνα στο φασματικό κανάλι SWIR 9 με το ιστόγραμμά της.

Ανάλυση δορυφορικών εικόνων ASTER για τον εντοπισμό ρηγμάτων στη Δυτική Κρήτη.



| | | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-----------|--------|
| Min: | 0 | Max: | 255 | Mean: | 83.730 |
| Median: | 75.703 | Mode: | 56.777 | Std. Dev: | 38.739 |

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