

Μοντέλο μορφο-τεκτονικής εξέλιξης των Δ. Αστερουσίων (Κρήτης), βασισμένο σε τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων Τηλεπισκόπησης και Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών

ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ⁽¹⁾

ABSTRACT

The products of digital satellite image interpretation are very important tools for mapping lithologies and morpho-tectonic structures. Improved ortho-rectifying techniques along with image matching and merging, even if the available remote sensing data have different spatial and spectral characteristics are ideal for the production of very high spatial resolution images which can be very helpful during high detail field mapping. The procedure continues with digitizing the contacts and verifying them as well as the several outcropping rock types during fieldwork. The combination of the field data requires a GIS platform and the capabilities of such systems are very helpful for creating the individual blocks using three dimensions. The basic idea is to model the relative displacement of the fault blocks by reconstructing backwards in time the vertical and/or horizontal movements of every block estimating the most probable initial conditions. This methodology requires high detail morphological, stratigraphic and tectonic data interpretation throughout time in order to portray a realistic morpho-tectonic evolution. The area of western Asteroussia Mts in Crete seems to be ideal for such kind of analysis because of the existence of the basal unconformity of the Tortonian marine sediments on the alpine basement, the disconformity between the Tortonian and Messinian marine terraces and finally the large number of normal fault zones which bound the recently tilted blocks.

Keywords: remote sensing, 3d tectonic modelling, Messara basin, tectonic reconstruction, GIS.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα προϊόντα της ψηφιακής επεξεργασίας δεδομένων τηλεπισκόπησης αποτελούν, εδώ και χρόνια, σημαντικά εργαλεία για τη χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών και μορφο-τεκτονικών δομών. Με τις σύγχρονες τεχνικές ορθοαναγωγής, ταύτισης και συγχώνευσης εικόνων, ακόμη κι αν προέρχονται από συστήματα με διαφορετικά γεωμετρικά και φασματικά χαρακτηριστικά, παράγονται εικόνες πολύ υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας, οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις μπορούν να συμβάλλουν στην αύξηση της ακρίβειας σε μεγάλης κλίμακας γεωλογική χαρτογράφηση. Η λεπτομερέστερη αποτύπωση των γεωλογικών επαφών βοηθάει στη δημιουργία τρισδιάστατων μπλοκ διαγραμμάτων, απεικονίζοντας το υφιστάμενο μορφο-τεκτονικό καθεστώς της υπό έρευνα περιοχής. Βασικό στόχο αποτελεί η μοντελοποίηση των σχετικών κινήσεων των ρηξιτεμαχών από τα οποία συντίθεται η περιοχή, όσο το δυνατόν πιο πίσω στο χρόνο, με αποτέλεσμα την εκτίμηση της αρχικής κατάστασης από την οποία προήλθε η σύγχρονη δομή. Η διαδικασία προϋποθέτει τη σταδιακή μορφολογική, στρωματογραφική και τεκτονική αναδόμηση της περιοχής, συμπεριλαμβανομένης της διάστασης του χρόνου και οδηγώντας στην ανάλυση της μορφο-τεκτονικής εξέλιξής της. Η περιοχή των δυτικών Αστερουσίων προσφέρεται για τέτοιου είδους ανάλυση λόγω της παρουσίας της ασυμφωνίας των μεταλλικών σχηματισμών στο αλπικό υπόβαθρο, καθώς και πλήθους εφελκυστικών ρηξιγενών ζωνών που έχουν διαρρήξει πρόσφατα την περιοχή.

Λέξεις κλειδιά: τρισδιάστατη απεικόνιση, λεκάνη Μεσσαράς, τεκτονική αναδόμηση.

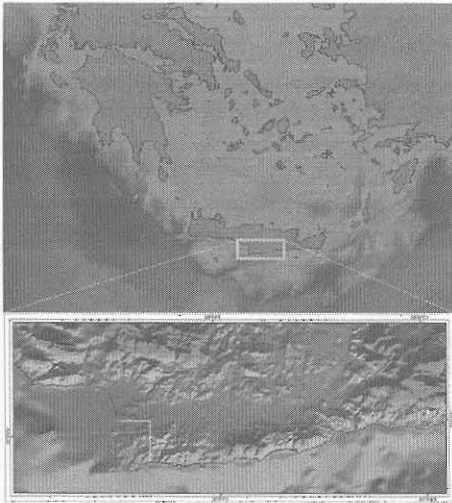
MORPHO-TECTONIC EVOLUTION OF WESTERN ASTEROUSSIA (CRETE) BASED ON REMOTE SENSING AND GIS TECHNIQUES

¹Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής & Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Ε.Κ.Π.Α., evasilak@geol.uoa.gr

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οροσειρά των Αστερουσίων, με διεύθυνση Α-Δ, αποτελεί το νοτιότερο όριο της Κρήτης προς το Λιβυκό πέλαγος. Οριοθετεί προς νότο την Τεταρτογενή λεκάνη της Μεσσαράς, της οποίας η γεωλογική – γεωμορφολογική ιστορία συνδέεται άμεσα με τη δράση ρηγμάτων αποκόλλησης, καθώς αναπτύσσεται στην κορυφή του κατερχόμενου ρηξιτεμάχου ενός κανονικού ρήγματος με μικρή κλίση προς νότο (Vassilakis, 2006). Η θραυστιγενής παραμόρφωση που παρατηρείται σε αυτού του είδους τις λεκάνες είναι ένα θέμα που απασχολεί τη διεθνή επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια, οπότε και έγινε ευρύτερα αποδεκτή η θεωρία των ρηγμάτων αποκόλλησης ως των κυρίων μορφών έκφρασης εφελακτισμού και λέππυνσης του φλοιού σε περιοχές σύγκλισης τεκτονικών πλακών (Burchfiel, 2004).



Σχήμο 1: Γεωγραφική θέση της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

Η μελέτη της ιστορίας της παραμόρφωσης στο κατερχόμενο τέμαχος του ρήγματος αποκόλλησης της Νότιας Κρήτης (Paranikolaou & Vassilakis, 2008), με τη μέθοδο της μορφοτεκτονικής αναδόμησης, αποτελεί τον κύριο στόχο της παρούσης εργασίας. Για το λόγο αυτό χρειάστηκε μεγάλη λεπτομέρεια και ακρί-

βεια στην αποτύπωση των τεκτονοστρωματογραφικών στοιχείων, ιδιαίτερα των σχηματισμών που αποτέθηκαν μετά αλλά και κατά τη διάρκεια της δραστηριότητας της συγκεκριμένης επιφάνειας αποκόλλησης.

Η υπαίθρια εργασία πλαισιώθηκε από μεθοδολογία που περιλάμβανε τεχνικές τηλεπισκόπησης για την όσο το δυνατό λεπτομερέστερη και ακριβέστερη γεωλογική χαρτογράφηση και στη συνέχεια παρουσίαση των δεδομένων σε τρεις διαστάσεις μέσω διαδικασιών και αλγορίθμων που συμπεριλαμβάνονται σε Συστήματα επεξεργασίας Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS).

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η περιοχή που επιλέχθηκε για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται παρακάτω, αποτελεί το δυτικότερο τμήμα του γεωλογικού χάρτη 1:50.000, φύλλο Αντισκάρι, που έχει εκδοθεί από το Ι.Γ.Μ.Ε. (Δαβή & Bonneau, 1985). Η επιλογή της έγινε λόγω της έντονης παρουσίας μεταλλικών σχηματισμών εκτός των ορίων της σημερινής λεκάνης της Μεσσαράς, γεγονός που δεν συμβαίνει σε κάποιο άλλο σημείο, αλλά και λόγω του ιδιαίτερου τεκτονισμού που εκφράζεται μέσω της συστηματικής στρέψης ρηξιτεμάχων γύρω από άξονα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ. Η ήδη υπάρχουσα χαρτογράφηση αποτέλεσε τη βάση για την λεπτομερέστερη αποτύπωση των τεκτονικών και στρωματογραφικών επαφών σε χάρτες μεγαλύτερης κλίμακας (1:5.000).

Η περιοχή που αναδομήθηκε εκτείνεται από τον αρχαιολογικό χώρο του Κομαύ (στα βόρεια των Ματάλων) μέχρι το χωριό Καλοί Λιμένες (Σχ. 1) και αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κατάτμησης που έχει προκληθεί από πρόσφατο εντατικό πεδίο, καθώς παρατηρούνται γεωμορφολογικές δομές (κατά βάθος διάβρωση, μορφολογικές ασυνέχειες, κεκλιμένες επιπέδωσης, κλπ) που αντιστοιχούν σε ενεργή περιοχή.

Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα σύνολο από ρηξιτεμάχη που έχουν κινηθεί σχεδόν ανεξάρτητα και διαχωρίζονται από μικρές ή μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες, οι οποίες και τα οριοθετούν. Η σημερινή τοποθέτησή τους αποτελεί την αρχική κατάσταση από την οποία ξεκινά η εφαρμογή

της μεθοδολογίας και κατά συνέπεια είναι επιβεβλημένη η ακριβής γεωλογική χαρτογράφηση.

Γενικά, στην περιοχή μεταξύ Κομού και Καλών Λιμένων εμφανίζονται μεταλλικοί σχηματισμοί Μειοκαινικής ηλικίας να καλύπτουν ασύμφωνα το αλπικό υπόβαθρο, το οποίο δομούν αρκετές αλπικές ενότητες. Για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας το αλπικό υπόβαθρο θεωρήθηκε ενιαίο (Σχ. 2). Οι μεταλλικοί σχηματισμοί που το καλύπτουν ασύμφωνα περιγράφονται στη συνέχεια σε συντομία:

Σχηματισμός Αμπελούζου (Τορτόνιο)

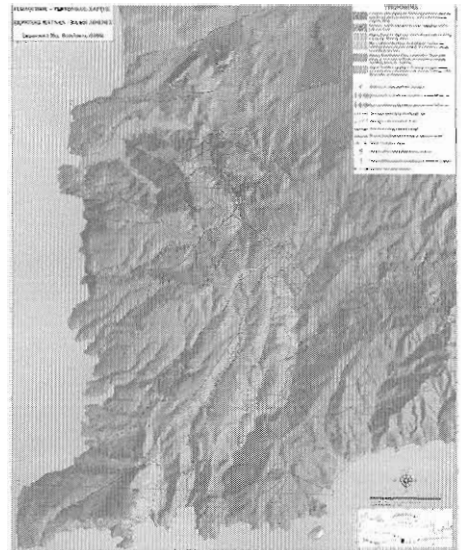
Στην περιοχή που περιγράφεται εντοπίζονται τα ανώτερα μέλη του σχηματισμού Αμπελούζου να καλύπτουν απ' ευθείας το αλπικό υπόβαθρο. Πρόκειται για αποθέσεις βαθιάς θάλασσας, ηλικίας Ανώτερου Τορτονίου, με πολύ καλά στρωμένες μάργες, άμμους και ψαμμίτες να περιλαμβάνουν απολιθώματα *Pecten*, *Clypeaster*, *Lithothamnium* και *Ostrea* (Krijgsman, 1994).

Ο πιο χαρακτηριστικός ορίζοντας του σχηματισμού είναι αυτός με τη "θανατοκοινωνία" των *Ostrea*, ο οποίος βρίσκεται λίγα μέτρα επάνω από την ασυμφωνία με τα αλπικά πετρώματα και ακριβώς κάτω από την ασυμφωνία με τους ορίζοντες του υπερκείμενου σχηματισμού της Αγ. Βαρβάρας. Το πάχος του ορίζοντα δεν υπερβαίνει το ένα μέτρο, ενώ συναντάται μόνο στο βόρειο τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος, αφού μόνο εκεί υπάρχει εμφάνιση του σχηματισμού Αμπελούζου. Στο νότιο τμήμα παρατηρείται απουσία του σχηματισμού αυτού γεγονός που αποτέλεσε την αφορμή για την εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής στην περιοχή.

Σχηματισμός Αγ. Βαρβάρας (Μεσσήνιο)

Σε όλη τη περιοχή μελέτης παρατηρήθηκαν τα ιζήματα του σχηματισμού Αγίας Βαρβάρας (Meulenkamp, et al., 1979), τα οποία έχουν ηλικία Μεσσήνιο (Sissingh, 1972). Αποτελούνται, γενικά, από βιοκλαστικούς ασβεστόλιθους των οποίων η απόθεση άρχισε την περίοδο του Ανώτερου Τορτονίου – Μεσσηνίου (Krijgsman, 1996). Τα κατώτερα τμήματα της ακολουθίας αποτελούνται από αναμιγμένα κλαστικά προϊόνα αποσάθρωσης με ανθρακικής σύστασης αποθέσεις μικρού θαλάσσιου βάθους. Αυτοί οι

μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι βρίσκονται σε ασυμφωνία όχι μόνο με τα υποκείμενα στρώματα του σχηματισμού Αμπελούζου αλλά και με τις αλπικές ενότητες τις οποίες καλύπτουν απ' ευθείας στην κεντρική και νότια περιοχή. Σύμφωνα με χρονολόγηση της επαφής του με τον υποκείμενο σχηματισμό Αμπελούζου, άρχισε να αποτίθεται πριν από 6,941 Ma (ten Veen & Meijer, 1998). Η ασυμφωνία με τις υποκείμενες ενότητες συνδυάζεται τις περισσότερες φορές με την ύπαρξη κροκαλοπαγούς, άλλοτε με μικρές και άλλοτε με μεγάλες κροκάλες, ποικίλης σύστασης και πάχους που δεν ξεπερνάει τα δύο μέτρα. Συχνά απαντούν τα απολιθώματα *Lithothamnium*, *Clypeaster*, *Pecten* (Krijgsman et al., 1994).



Σχήμα 2: Ψευδο-τριδιάστατος γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Vassilakis, 2006).

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τηλεπισκόπηση

Τα ψηφιακά δεδομένα τηλεπισκόπησης που υπήρχαν διαθέσιμα για περαιτέρω επεξεργασία ώστε να είναι δυνατή η ανάδειξη τεκτονικών δομών και τα όρια των επιφανειακών εμφανίσεων των διαφόρων λιθολογιών, αφορούν πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες LANDSAT-7/ETM+, SPOT-4, IKONOS-2 καθώς και μωσαϊκό παγχρωματικών ορθοφωτογρα-

φιών. Η επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων έγινε μέσω εξειδικευμένων λογισμικών πακέτων, σχετικών με την ψηφιακή επεξεργασία και ανάλυση δορυφορικών εικόνων, ξεκινώντας από τη διαδικασία γεωμετρικής ταύτισης των ψηφιακών εικόνων σε ενιαίο σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται εικόνες με πολύ μεγάλη χωρική διακριτική ικανότητα, σε περιοχές με έντονη τοπογραφία αλλά και σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται αεροφωτογραφίες για την παραγωγή μωσαϊκών σε ενιαίες ψηφιακές εικόνες, είναι απαραίτητη η συμμετοχή του παράγοντα «επιφανειακό ανάγλυφο», στην διαδικασία της γεωμετρικής διόρθωσης.

Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ορθοαναγωγή και μέσω αυτής, στις νέες συντεταγμένες του κελιού, λαμβάνεται υπ' όψιν και το υψόμετρο της νέας θέσης, κατά τη διαδικασία ταύτισης των δεδομένων μεταξύ τους. Δεν διαφέρει πολύ από τη γεωμετρική διόρθωση, εκτός του γεγονότος ότι, συνήθως, χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου με ανάλυση αντίστοιχη της χωρικής διακριτικής ικανότητας της εικόνας. Σε σχετικά επίπεδες περιοχές, τα αποτελέσματα της ορθοαναγωγής δεν είναι πολύ διαφορετικά, όμως σε περιοχές με έντονη αυξομείωση του αναγλύφου, είναι απαραίτητη ώστε να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια.

Η ψηφιοποίηση του τοπογραφικού υποβάθρου από διαγράμματα της Γ.Υ.Σ. με κλίμακα 1:5.000 και η κατασκευή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου υψηλής ακρίβειας και μεγάλης ανάλυσης, βοήθησε στην ορθοαναγωγή όλων των δεδομένων τηλεπισκόπησης, με σκοπό τον συνδυασμό των χωρίς χωρικές στρεβλώσεις που θα οδηγούσαν σε λάθος συμπεράσματα.

Η μεθοδολογία, εκτός της συμβατικής παρατήρησης της περιοχής με συνδυασμούς καναλιών είτε από το ορατό ή το υπέρυθρο τμήμα του φάσματος συμπεριλαμβάνει τη δημιουργία λόγων μεταξύ καναλιών, οι οποίοι είναι χρήσιμοι στη διάκριση μεταξύ τύπων πετρωμάτων που έχουν σχετικά μεγάλες περιεκτικότητες σε ορισμένα στοιχεία (Jensen, 1989). Η τεχνική συμπεριλαμβάνει τη δημιουργία μιας νέας εικόνας βασισμένης στο λόγο των ψηφιακών τιμών δύο επιλεγμένων φασματικών ζωνών, για κάθε κελί. Η επιλογή των φασματικών ζωνών εξαρτά-

ται από γνώση των φασματικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων που χρειάζεται να αναδειχθούν (Scanvic, 1997). Γενικά, η διαίρεση φασματικών καναλιών είναι μια μέθοδος, με την οποία δημιουργούνται ψευδέγχρωμες εικόνες που βελτιώνουν τις λεπτές χρωματικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιφανειακών υλικών, που συχνά είναι δύσκολο να ανιχνευτούν στις αρχικές εικόνες. Αν και οι λόγοι καναλιών είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος μαθηματικής επεξεργασίας των πρωτογενών τιμών των κελιών μιας εικόνας, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μπορεί να γίνουν όλων των ειδών οι μαθηματικές πράξεις, αρκεί να υποστηρίζονται από το λογισμικό επεξεργασίας τους.

Η χρωματική κλίμακα μιας εικόνας που έχει προκύψει από τη διαίρεση των τιμών των κελιών, δύο καναλιών, έχει τις 256 διαβαθμίσεις του γκρι και το ιστόγραμμα της μπορεί να μετασχηματιστεί με τους κλασσικούς τρόπους, ώστε να βελτιωθεί η οπτική της παρουσίαση (Sabins, 1997). Οποιοδήποτε τρεις λόγοι καναλιών μπορούν να συνδυαστούν στα τρία βασικά χρώματα (R,G,B) και να σχηματιστεί μια ψευδέγχρωμη εικόνα. Οι νέες εικόνες που προκύπτουν, πολλές φορές περιέχουν μεγαλύτερη γεωλογική πληροφωρία, αφού δημιουργείται μεγαλύτερη αντίθεση μεταξύ περισσότερων στοιχείων, καθότι λαμβάνονται υπ' όψιν περισσότερες φασματικές περιοχές. Το βασικό μειονέκτημα σε αυτή τη διαδικασία είναι η πολύ συχνή ανάδειξη θορύβου, η οποία εκφράζεται μέσα από σειρές κελιών με μηδενική τιμή.

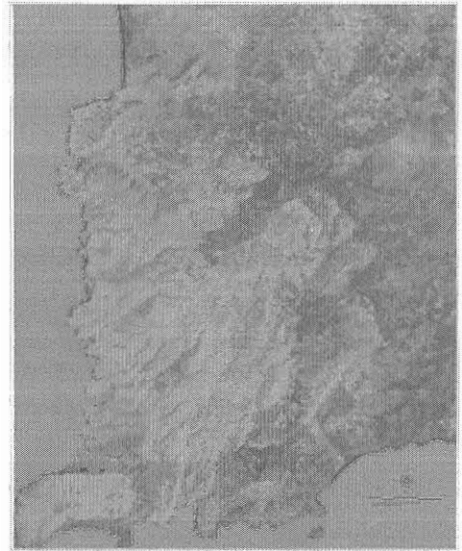
Σε γενικές γραμμές έχει αποδειχθεί ότι τα πετρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε ορυκτά στα οποία συμμετέχουν σιδηρούχα οξείδια (Campbell, 1996), παρουσιάζουν μεγάλη φωτεινότητα, μετά την εφαρμογή του λόγου με αριθμητή το κανάλι 3 και παρονομαστή το κανάλι 2 του των δορυφορικών εικόνων LANDSAT 7-ETM+. Ακόμη, ο λόγος με αριθμητή το κανάλι 5 και παρονομαστή το κανάλι 4 των ίδιων εικόνων, αναδεικνύει τα πετρώματα που συνίστανται από μεγάλη περιεκτικότητα σε ορυκτά που περιέχουν σίδηρο. Επίσης, η εφαρμογή του λόγου με αριθμητή το κανάλι 5 και παρονομαστή το κανάλι 7 των ίδιων εικόνων, αναδεικνύει τις περιοχές με υψηλή συγκέντρωση αργίλου, που συνήθως σχετίζεται με την χημική εξαλλοί-

ωση των επιφανειακών στρωμάτων του υποβάθρου (Sabins, 1997). Φυσικά, οι ιδανικές συνθήκες εφαρμογής των παραπάνω λόγων αφορούν πλήρη απαλοιφή των ατμοσφαιρικών επιδράσεων και την πλήρη απουσία βλάστησης. Όμως σε κάθε περίπτωση η μεθοδολογία αυτή είναι ενδεικτική για επιφανειακές αλλαγές που αξίζουν την υπαίθρια διερεύνησή τους. Για γεωλογικές εφαρμογές, είναι αρκετά συχνή η σύνθεση ψευδεγχρωμων εικόνων με λόγους δύο φασματικών καναλιών των εικόνων LANDSAT 7/ETM+, όπως είναι για παράδειγμα η χρησιμοποίηση του συνδυασμού 3/1, 5/4, 5/7 (R,G,B), με σκοπό να διακριθούν διαφορετικά είδη πετρωμάτων (Σχ. 3) ή των λόγων 4/3, 3/1 και 5/7 (Σχ. 4) για την καταγραφή επιφανειακών εξαλλοιώσεων λόγω παρουσίας νερού και μεγάλων εναλλαγών θερμοκρασίας και υγρασίας (Avery & Berlin, 1992), (Παρχαρίδης, et al., 1999).



Σχήμα 3: Επεξεργασμένη δορυφορική εικόνα LANDSAT-7 για την οποία χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός των λόγων 3/1, 5/4, 5/7 (R,G,B) με σκοπό να γίνουν ορατές και εκμεταλλεύσιμες, ως προς τη γεωλογική χαρτογράφηση, οι ορυκτολογικές διαφοροποιήσεις των επιφανειακών σχηματισμών. Εμφανίζονται διαφοροποιήσεις εντός των σχηματισμών με υψηλές περιεκτικότητες σε CaCO_3 , προφανώς λόγω της συμμετοχής και άλλων ορυκτών.

Όσον αφορά στο τμήμα της μεθοδολογίας που αφορά στην Τηλεπισκόπηση, αυτό συμπληρώνεται από την διαδικασία της συγχώνευσης των δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές. Η συγχώνευση των δεδομένων (merging) έδωσε μία νέα ώθηση την τελευταία δεκαετία, με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση της πληθώρας των δεδομένων που παρέμεναν ανεκμετάλλευτα σε πολλές εφαρμογές. Τα τελικά προϊόντα παρέχουν πολλές φορές αυξημένες ικανότητες ερμηνείας, αφού συνδυάζονται δεδομένα με διαφορετικά χαρακτηριστικά (Pohl & van Genderen, 1998).



Σχήμα 4: Επεξεργασμένη δορυφορική εικόνα LANDSAT-7 για την οποία χρησιμοποιήθηκαν οι λόγοι 4/3, 3/1, 5/7 (R,G,B) με σκοπό να απεικονισθούν καλύτερα οι περιοχές που δεν εμφανίζονται ανθρακικά πετρώματα.

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

των δορυφορικών εικόνων LANDSAT, είναι η σχετικά μέτρια διακριτική ικανότητά τους, σε αντίθεση με την πολύ σημαντική πολυφασματική πληροφορία που είναι ενσωματωμένη στα πολλά κανάλια που διαθέτουν. Η αύξηση της διακριτικής ικανότητας, αυτών των εικόνων, μπορεί να επιτευχθεί με τη συγχώνευσή τους με δεδομένα που έχουν καλύτερα χωρικά χαρακτηριστικά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και επειδή η περιοχή που έπρεπε να χαρτογραφηθεί με μεγάλη λεπτομέρεια ήταν σχετικά μικρή, προτιμήθηκε η συγχώνευση της εικόνας LANDSAT με το ψηφιακό ορθο-μωσαϊκό από τις αεροφωτογραφίες. Το βασικότερο πλεονέκτημά του είναι η πολύ καλή χωρική διακριτική ικανότητα που διαθέτει ($<1\mu$), ενώ μειονεκτεί στο γεγονός ότι η απεικόνιση της περιοχής γίνεται παγχρωματικά, δηλαδή χρησιμοποιώντας την περιοχή του ορατού φάσματος σε ένα μόνο κανάλι με διαβαθμίσεις του γκρι.

Για την εφαρμογή της ιδέας της συγχώνευσης εικόνων δημιουργήθηκε ένας σημαντικός αριθμός από αλγορίθμους (Welch & Ehlers, 1987). Αυτοί βασίζονται σε μετασχηματισμούς χρωματικών μοντέλων μεταξύ των βασικών χρωμάτων (RGB - κόκκινο, πράσινο, μπλε) και των θεμελιωδών φυσιολογικών στοιχείων της ανθρώπινης όρασης (IHS - ένταση, χροιά, καθαρότητα) (Buchanan & Pendergrass, 1980). Μια έγχρωμη εικόνα, η οποία απεικονίζεται με το συνδυασμό των τριών βασικών χρωμάτων, μετασχηματίζεται στο συνδυασμό έντασης-χροιάς-καθαρότητας. Στο αποτέλεσμα της εφαρμογής του μετασχηματισμού αυτού, απομονώνεται ο παράγοντας ένταση, ο οποίος περιλαμβάνει τις πληροφορίες σχετικά με τις αλλαγές του φωτισμού που οφείλονται στις μεταβολές του αναγλύφου. Αντίθετα, παραμένουν οι δύο άλλοι παράγοντες, που περιέχουν τις φασματικές πληροφορίες, που αντιστοιχούν στην ανακλαστικότητα της επιφάνειας. Ο παράγοντας ένταση αντικαθίσταται από μια παγχρωματική εικόνα μεγαλύτερης διακριτικής ικανότητας και γίνεται εκ νέου μετασχηματισμός στα τρία βασικά χρώματα. Μετά από αυτόν το νέο μετασχηματισμό, δημιουργείται μια νέα εικόνα με τα ίδια φασματικά χαρακτηριστικά αλλά με καλύτερη χωρική ανάλυση. Ένα βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι ότι μπορούν να συμμετέ-

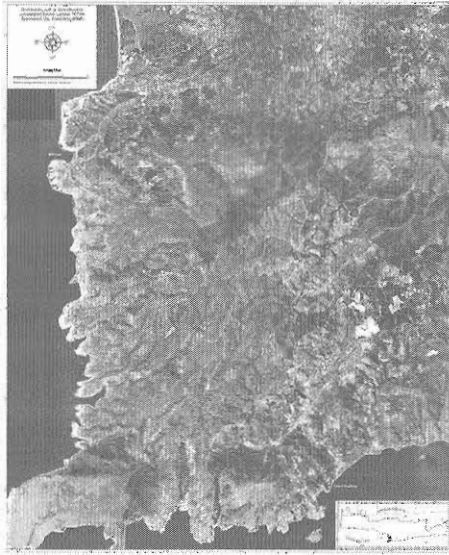
χουν μόνο τρία κανάλια κάθε φορά και κατά συνέπεια, θα πρέπει να επαναλαμβάνεται η διαδικασία για κάθε συνδυασμό καναλιών (Rigol & Chica-Olmo, 1998).

Η μεθοδολογία που εφαρμόζει μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα σε όλα τα κανάλια βασίζεται στην ανάλυση των κυρίων συνιστωσών (principal component analysis) (Chavez, et al., 1991). Η ανάλυση αυτή γίνεται μέσα από στατιστικές διεργασίες, το αντικείμενο των οποίων είναι πέρα από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Η ουσία είναι ότι μέσα από αυτήν τη διαδικασία υπολογισμού, αναλύεται η πληροφορία που έχει καταγραφεί σε κάθε κελί και αυτή που είναι κοινή για όλες τις φασματικές ζώνες, καθορίζεται ως πρώτη κύρια συνιστώσα. Το περιεχόμενο της σχετίζεται με την παγχρωματική πληροφορία της πολυφασματικής εικόνας και κατά συνέπεια μπορεί να αντικατασταθεί με μια παγχρωματική εικόνα μεγαλύτερης χωρικής ανάλυσης. Στο τέλος της μεθοδολογίας η εικόνα αναδομείται με μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα, χωρίς να έχουν αλλοιωθεί οι τιμές των κελιών που αντιπροσωπεύουν την ανάκλαση που έχει καταγραφεί στις διάφορες φασματικές περιοχές (Welch & Ehlers, 1987).

Η τελευταία μεθοδολογία εφαρμόστηκε στη συγχώνευση πολυφασματικών δεδομένων από εικόνα LANDSAT-7/ETM+ με το μωσαϊκό από αεροφωτογραφίες, με διακριτική ικανότητα μικρότερη του ενός μέτρου, ενώ σε όλα τα δεδομένα είχε γίνει ήδη ορθοαναγωγή και ταύτιση (Σχ. 5). Το τελικό αποτέλεσμα θεωρήθηκε ιδανικό για την περίπτωση της γεωλογικής χαρτογράφησης της περιοχής, αφού το προϊόν που δημιουργήθηκε έχει όλα τα φασματικά χαρακτηριστικά μιας δορυφορικής εικόνας LANDSAT-7 αλλά με σαφώς καλύτερη χωρική διακριτική ικανότητα ($<1\mu$).

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε με τα προϊόντα που προέκυψαν από την εκτέλεση λόγων μεταξύ των καναλιών και αναφέρθηκαν προηγουμένως. Κατά συνέπεια, η οριοθέτηση των επαφών που χαρτογραφήθηκαν λόγω της διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης των διαφόρων λιθολογικών εμφανίσεων ή ακόμα και του μανδύα αποσάθρωσής των, γίνεται με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ο συνδυασμός των παραπάνω τεχνι-

κών με την εργασία υπαίθρου δίνει μεγάλη αξιοπιστία στη γεωλογική χαρτογράφηση, η οποία αποτελεί τη βάση στην οποία στηρίζεται η μορφοτεκτονική αναδόμηση της περιοχής.



Σχήμα 5: Εικόνα σε πραγματικό χρώμα, που προήλθε από τη συγχώνευση δορυφορικής εικόνας LANDSAT-7 και μωσαϊκού αεροφωτογραφιών της περιοχής μελέτης. Είναι εμφανής η τεράστια διαφορά στην ευκρίνεια σε σχέση με τις εικόνες των Σχ. 3&4.

Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών

Εκτός από τα παραπάνω προϊόντα που έχουν ιδιότητες προσανατολισμένου χάρτη δύο διαστάσεων, θεωρήθηκε αναγκαία η τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής και μέσω διαδικασιών εικονικής πραγματικότητας, να βοηθηθεί η διαδικασία της εξαγωγής συμπερασμάτων σχετικά με τη χωροθέτηση των ρηξιγενών ζωνών και κατά συνέπεια την οριοθέτηση των διαφόρων ρηξιτεμαχών.

Ο συνδυασμός των συγχωνευμένων εικόνων, με πολύ καλή χωρική διακριτική ικανότητα και των ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου, πολύ μεγάλης χωρικής ανάλυσης, έδωσε τη δυνατότητα για υψηλής ποιότητας τρισδιάστατες απεικονίσεις. Οι απεικονίσεις αυτού του τύπου δίνουν μια νέα διάσταση στις γεωλογικές παρατηρήσεις, αφού εκμεταλλευόμενοι τους ενσωματωμένους αλγορίθμους ορισμένων λογισμικών,

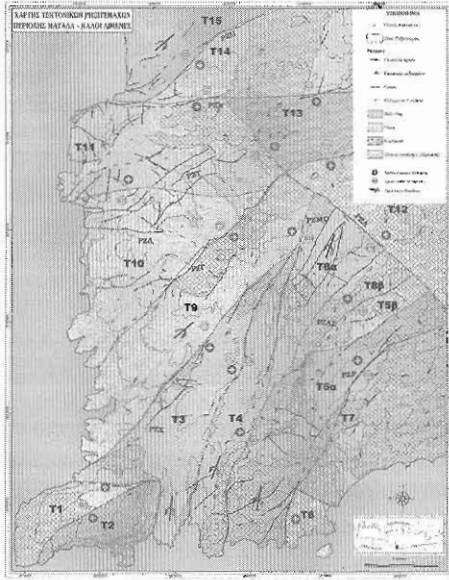
είναι δυνατή η αλλαγή της γωνίας θέασης, είτε σε σχέση με τον ορίζοντα, είτε σε σχέση με το βορά. Οι δυνατότητες αυτές δίνουν την αίσθηση της υπαίθρου κατάστασης, που αφ' ενός έχουν πολύ μεγάλη λεπτομέρεια, αλλά αφ' ετέρου πρόκειται για εικονική πραγματικότητα, η οποία αρκετές φορές δεν έχει τόσο μεγάλη σχέση με την αληθινή εικόνα.

Η μεγαλύτερη προσπάθεια για την επίτευξη του καλύτερου οπτικού αποτελέσματος γίνεται στη φάση ορθοαναγωγής της εικόνας, η οποία χρησιμοποιείται για να «καλύψει» το ανάγλυφο, που δημιουργείται με βάση τις υψομετρικές τιμές των κελιών του ψηφιακού μοντέλου. Ουσιαστικά, στην τιμή κάθε κελιού ενσωματώνεται η υψομετρική πληροφορία και αυτό τοποθετείται στο απόλυτο υψόμετρο, διατηρώντας παράλληλα και την φασματική πληροφορία. Το ίδιο μπορεί να γίνει και με διανυσματικά επίπεδα πληροφορίας (π.χ. ρηξιγενείς ζώνες, λιθολογικά όρια) με απώτερο στόχο τη διόρθωση και λεπτομερή αποτύπωσή τους. Μέσα σε αυτές τις δυνατότητες περιλαμβάνεται η αλλαγή της ψευδοσκίασης, με εικονική αλλαγή της θέσης της φωτεινής πηγής, που υποκαθιστά τον ηλιακό φωτισμό. Με αυτόν τον τρόπο αναδεικνύονται γεωλογικά όρια, τα οποία συνήθως ταυτίζονται με γεωμορφολογικές δομές που είναι δύσκολο να ανιχνευθούν σε δύο διαστάσεις και τελικά γίνεται σωστή διάκριση των τεκτονικών ρηξιτεμαχών που χρειάζονται για την προσομοίωση της μορφο-τεκτονικής εξέλιξης της περιοχής.

Συνολικά διακρίθηκαν 15 ρηξιτεμάχια, για κάθε ένα από τα οποία υπολογίστηκε η κίνησή του από την περίοδο του ανώτερου Τορτονίου μέχρι και σήμερα, με βάση τους σχηματισμούς που τα καλύπτουν, τα στρωματογραφικά χαρακτηριστικά τους και την κινηματική ιστορία που τους προσδίδουν τα ρήγματα που τα οριοθετούν (Σχ. 6). Στην κινηματική ιστορία του κάθε ρηξιτεμάχους συμπεριλήφθηκε το υψόμετρο στο οποίο βρισκόταν κατά τη διάρκεια απόθεσης των μεταλλικών ιζημάτων αλλά και η σημερινή του θέση και μορφολογία (Vassilakis, 2006).

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας και την τελική μορφο-τεκτονική εξέλιξη της περιοχής χρειάστηκε να ληφθούν ορισμένες παραδοχές, που όμως κρίνεται ότι δεν μπορεί να αλλοιώσουν το τελικό αποτέλεσμα σε ότι αφορά στην

σχετική κίνηση των ρηξιτεμαχών. Οι παραδοχές αυτές σχετίζονται με το αρχικό μορφολογικό ανάγλυφο των ρηξιτεμαχών πριν τη βύθισή τους και μετά την ανάδυσή τους από τη λεκάνη ιζηματογένεσης και κατ' επέκταση αν ο βαθμός διάβρωσης είναι ομοιόμορφος σε ολόκληρη την περιοχή.



Σχήμα 6: Χάρτης τεκτονικών ρηξιτεμαχών στα οποία διακρίθηκε η περιοχή μελέτης και χρησιμοποιήθηκαν για την αναδόμησή της από το Αν. Μειόκαινο μέχρι σήμερα.

4. ΜΟΡΦΟ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Ξεκινώντας από την περίοδο του Νεογενούς, οπότε και η περίοδος της αλπικής παραμόρφωσης και τοποθέτησης των γεωτεκτονικών καλυμμάτων βρίσκεται στο τέλος της, η περιοχή αναδύεται (Σχ. 7a) και δημιουργείται το ανάγλυφο του αλπικού υποβάθρου που θα αποτελέσει στη συνέχεια τον πυθμένα της μετααλπικής λεκάνης ιζηματογένεσης (Σχ. 7b).

Στη συνέχεια, σε χρονική περίοδο που προηγείται της απόθεσης του σχηματισμού Αμπελούζου (Ανώτερο Τορτόνιο), φαίνεται να ενεργοποιήθηκε μια εφελκυστική τεκτονική ζώνη με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, η οποία βυθίζει το ΒΔ τμήμα, σε σχέση με το ΝΑ που ανυψώνεται σχετικά (Σχ. 7c). Άμεσο αποτέλεσμα αυτών των

κανονικών ρηγμάτων, με κλίση προς τα ΒΔ, που συνθέτουν τη ζώνη, είναι ο διαχωρισμός του αλπικού παλαιοαναγλύφου σε δύο τμήματα. Στο ΒΔ τμήμα, που συνεχίζεται να βυθίζεται κατά το Τορτόνιο, αποτίθενται οι μαργαίκοι ορίζοντες του σχηματισμού Αμπελούζου. Το ΝΑ τμήμα που ανυψώθηκε, παραμένει εκτός της λεκάνης ιζηματογένεσης του Τορτόνιου.

Στο τέλος της περιόδου του Ανώτερου Τορτόνιου, και όσο το ΒΔ τμήμα βρισκόταν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και εξελισσόταν η ιζηματογένεση του σχηματισμού του Αμπελούζου, το εντατικό πεδίο που φαίνεται να αλλάζει. Τα συνηματογενή ρήγματα που εντοπίστηκαν στην περιοχή έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και κανονικό χαρακτήρα. Ανάλογες δομές εντοπίστηκαν και σε ορίζοντες του σχηματισμού της Αγ. Βαρβάρας και κατά συνέπεια το ίδιο εντατικό πεδίο συνεχίστηκε και μετά την καταβύθιση ολόκληρης της περιοχής. Η τεκτονική ζώνη που ενεργοποιήθηκε και είχε ως αποτέλεσμα την καταβύθιση της περιοχής, θα πρέπει να έχει διεύθυνση εγκάρσια στη ΒΑ-ΝΔ, ώστε να επηρεάσει και τα δύο τμήματα της περιοχής, ενώ η κλίση της οφείλει να είναι προς τη λεκάνη ιζηματογένεσης, δηλαδή προς τα ΝΔ (Σχ. 7d). Η ηλικία της κίνησης προσδιορίζεται να έγινε πριν από 6,9 εκατομμύρια χρόνια (ten Veen and Kleinspehn, 2000) οπότε και ξεκινάει η απόθεση των ιζημάτων του σχηματισμού της Αγίας Βαρβάρας με ηλικία Μεσσήνιο.

Σε όλες τις παραπάνω χρονικές περιόδους παρέμειναν εκτός λεκανών ιζηματογένεσης οι κορυφές των Αστερουσιών που βρίσκονται ανατολικότερα αλλά και οι κορυφές στα ακρωτήρια Κεφάλι και Καλόγηρος, δημιουργώντας παλαιονησίδες (Σχ. 7e) (Welter-Schultes, 2000). Μετά το Μεσσήνιο άρχισε η σταδιακή ανάδυση της περιοχής με ταυτόχρονη αλλαγή του εντατικού πεδίου, το οποίο παραμένει όμως εφελκυστικού τύπου (Σχ. 7f). Ο κύριος άξονας παραμόρφωσης έχει (σημερινή) διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ ως ΒΒΔ-ΝΝΑ. Δημιουργούνται ρηξιγενείς ζώνες με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ ως ΔΝΔ-ΑΒΑ (Σχ. 7h). Την ίδια διεύθυνση έχουν άξονες ιπυχών, που δημιουργήθηκαν είτε από πάρελξη κοντά σε ρηξιγενείς ζώνες, είτε από κάμψεις λόγω βαρύτητας, καθώς τα κανονικά ρήγματα που δραστηριοποιούνται είναι λιστρικού τύπου, με σχετικά

μικρή κλίση και καταλήγουν στο μεγάλο ρήγμα αποκόλλησης της Νότιας Κρήτης, προκαλώντας τη στρέψη των ρηξιτεμαχών για την πλήρωση του κενού χώρου που δημιουργείται στο βάθος (Vassilakis, 2006).

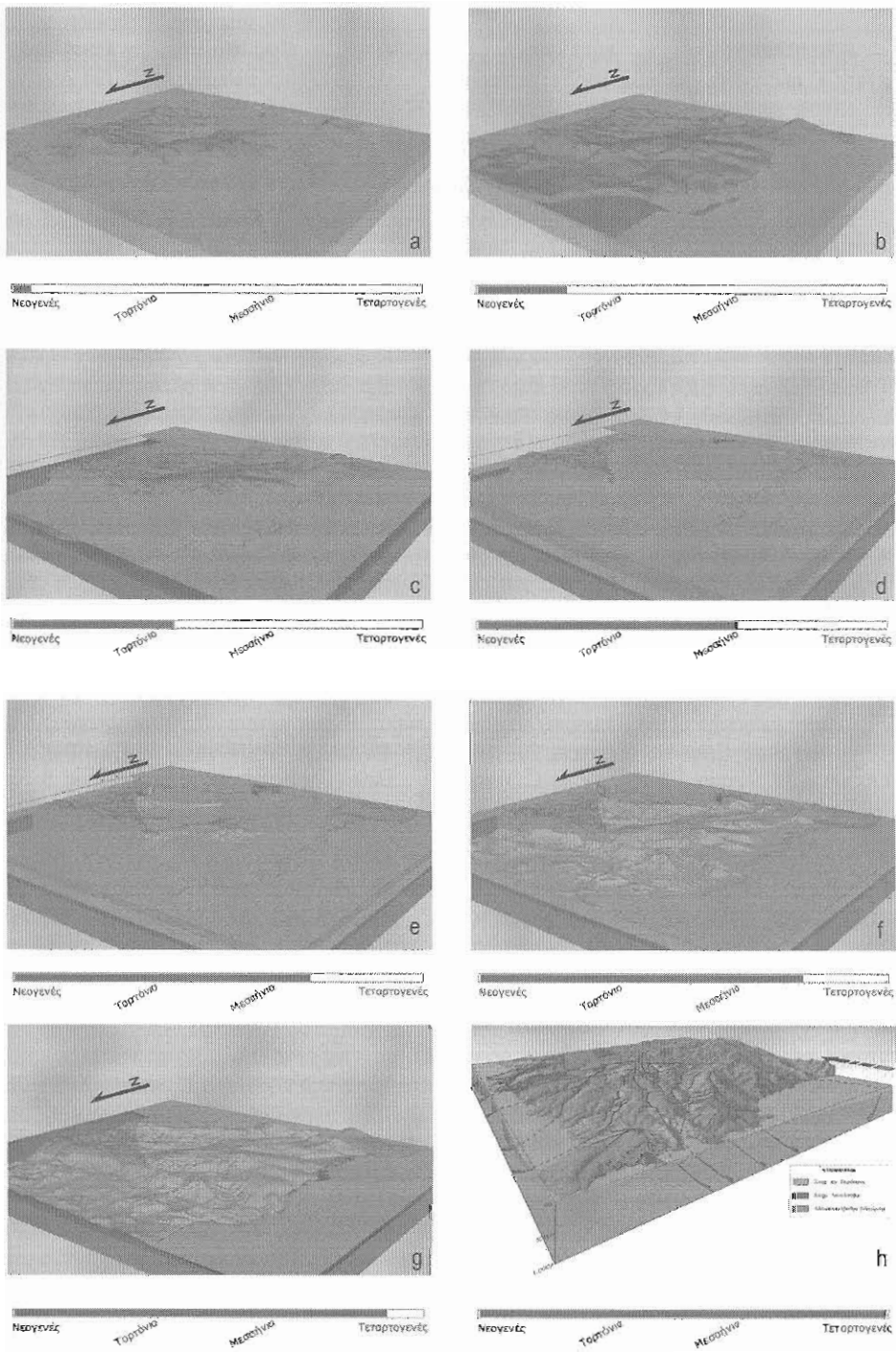
Η πιο πρόσφατη κίνηση της περιοχής αφορά την περιστροφή, γύρω από οριζόντιο άξονα του συνόλου της περιοχής και σχετίζεται με την ανύψωση του νοτιοανατολικού τμήματος. Ο άξονας αυτής της περιστροφής τοποθετείται κατά προσέγγιση στη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Η μεγαλύτερη σχετική ανύψωση παρατηρείται στις νότιες ακτές όπου σχηματίζονται τα φαράγγια Μαρτσέλο και Αγιοφάραγγο, κυρίως λόγω της έντονης κατά βάθος διάβρωσης. Αντίθετα, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των ΒΔ ακτών οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει σχετική βύθισή τους.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε αφορά την συνένωση αρκετών καινοτόμων και κλαστικών τεχνικών με μοναδικό στόχο την ακριβέστερη αναπαράσταση των επιφανειακών μετακινήσεων μιας περιοχής. Η πολυπαραμετρική προσέγγιση μιας περιοχής αποτελεί σημαντικότατο παράγοντα στην εφαρμογή της τεχνικής της αναδόμησης, όταν απώτερος στόχος είναι η μορφο-τεκτονική εξέλιξή της. Η ακριβής αποτύπωση των στρωματογραφικών και τεκτονικών επαφών καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, μέσω των οποίων προκύπτει η ιστορία τους, είναι το πιο σημαντικό κομμάτι της μεθοδολογίας που περιγράφεται και σε αυτό συμβάλλει καθοριστικά η σωστή εκμετάλλευση των δεδομένων τηλεπισκόπησης καθώς και των προϊόντων που προκύπτουν από την επεξεργασία τους. Η αύξηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας επιτρέπει την λεπτομερέστερη τοποθέτηση σημαντικών επαφών και κατά συνέπεια την ακριβέστερη διάκριση των ρηξιτεμαχών που συμμετέχουν στην παλινσπαστική διαδικασία. Η εισαγωγή των δεδομένων αυτών σε σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών με δυνατότητα αναγνώρισης της τρίτης διάστασης αποτελεί σημαντικότατο βήμα και πρέπει να γίνεται προσεκτικά, αφού ενδέχεται να επηρεάσει την αναδόμηση προς τις παρελθόντες περιόδους. Έτσι,

κι ενώ συνεχίζεται η επανατοποθέτηση των ρηξιτεμαχών σε διαφορετικές θέσεις είτε με κατακόρυφες ή οριζόντιες κινήσεις προσαρμόζεται η κοινή, για όλη την περιοχή, επιφάνεια της θάλασσας. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα να προσομοιώνεται η σχετική κίνηση των ρηξιτεμαχών έχοντας ως σημείο αναφοράς την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Τα τεκτονικά στοιχεία (ρήγματα, περιστροφές ρηξιτεμαχών κλπ.) δίνουν πληροφορίες για τις πιο πρόσφατες κινήσεις, ενώ τα στρωματογραφικά δεδομένα τροφοδοτούν το μοντέλο της αναπαράστασης με πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον δημιουργίας των σχηματισμών (βάθος απόθεσης κλπ).

Τα αποτελέσματα κρίνονται άκρως ικανοποιητικά αφού ανταποκρίνονται σε μεγάλο ποσοστό στην πραγματικότητα, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν αποκλίσεις από την αληθινή γεωλογική ιστορία της περιοχής. Μάλιστα, αρκετές ήταν οι φορές όπου δεν συμβαδίζαν τα δεδομένα μεταξύ τους και μετά από νέα υπαίθρια εργασία γίνονταν αντιληπτό κάποιο νέο στοιχείο που είτε αφορούσε κάποιο καλυμμένο ρήγμα (και κατά συνέπεια άλλαζαν εκ νέου τα όρια των ρηξιτεμαχών), είτε κάποια λανθασμένη μέτρηση ή ακόμα και κακή εκτίμηση κάποιας επαφής. Σε γενικές γραμμές, οι παραδοχές που γίνονται σχετικά με το αρχικό ανάγλυφο αλλά και τον τρόπο δημιουργίας της σημερινής μορφολογίας κρίνονται ως αναγκαίες, καθώς δεν έχει αναπτυχθεί ικανοποιητική μεθοδολογία για τον υπολογισμό της διάβρωσης σε αντίστοιχη κλίμακα. Δε φαίνεται, πάντως, να επηρεάζεται το τελικό αποτέλεσμα σε μεγάλο βαθμό. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται, σε τεκτονικά ενεργές περιοχές, όπως η Κρήτη, όπου υπάρχουν σημαντικότερες κατακόρυφες και οριζόντιες κινήσεις κατά τη διάρκεια της Νεογενούς περιόδου, μπορεί να δώσει απαντήσεις σε σημαντικά ερωτήματα που αφορούν τη γεωλογική ιστορία τους. Η σύνδεση μικρότερων περιοχών σε ένα ευρύτερο γεω-τεκτονικό πλαίσιο μπορεί να γεννήσει ακόμη και νέα ερωτηματικά με απώτερο στόχο τη βελτίωση των γνώσεων που έχουμε για το γεωλογικό παρελθόν και η συμμετοχή τεχνικών τηλεπισκόπησης και συστημάτων διαχείρισης γεωγραφικών πληροφοριών είναι αναγκαία και επιβεβλημένη.



Σχήμα 7: Μοντέλο μορφο-τεκτονικής εξέλιξης για την περιοχή μελέτης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Avery, T. and Berlin, G., 1992. Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation. Macmillan Publishing Company, New York, 472 pp.
- Buchanan, M. and Pendergrass, R., 1980. Digital image processing: can intensity, hue and saturation replace red, green and blue? *Electro-optical systems designs*, 12(3): 29-36.
- Burchfiel, B.C., 2004. 2003 PRESIDENTIAL ADDRESS: New Technology; New Geological Challenges. *GSA Today*, 14(2): 4-9.
- Campbell, B., 1996. Introduction to Remote Sensing. The Guilford Publications Press, New York, 352 pp.
- Chavez, P., Sides, S. and Anderson, J., 1991. Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(3): 295-303.
- Krijgsman, W., 1996. Miocene magnetostratigraphy and cyclostratigraphy in the Mediterranean: extension of the astronomical polarity time scale, University of Utrecht, 207 pp.
- Krijgsman, W., Hilgen, F.J., Langereis, C.G. and Zachariasse, W.J., 1994. The age of the Tortonian/Messinian boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 121: 533-547.
- Meulenkamp, J.E., Dermitzakis, M., Georgiadou-Dikeoulia, E., Jonkers, H. and Boger, H., 1979. Field guide to the Neogene of Crete. Publications of the Department of Geology & Paleontology, A, 32. N. K. University of Athens, 32 pp.
- Papanikolaou, D. and Vassilakis, E., 2008. Middle Miocene E-W tectonic horst structure of Crete through extensional detachment faults. *Earth and Environmental Science*, 2: 012003.
- Pohl, C. and van Genderen, J., 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5): 823-854.
- Rigol, J. and Chica-Olmo, M., 1998. Merging remote-sensing images for geological environmental mapping: application to the Cabo de Gata-Nivjar Natural Park, Spain. *Environmental Geology*, 34(2): 194-202.
- Sabins, F., 1997. Remote sensing: principles and interpretation. Freeman & Co, New York, 494 pp.
- Scanvic, J., 1997. *Aerospatial remote sensing in geology*. A. A. Balkema, Rotterdam, 239 pp.
- Sissingh, W., 1972. Late Cenozoic Ostracoda of the South Aegean island arc. *Utrecht Micropal. Bull.*, 6: 187.
- ten Veen, J.H. and Kleinspehn, K.L., 2000. Quantifying the timing and sense of fault dip slip: New application of biostratigraphy and geohistory analysis. *Geology*, 28(5): 471-474.
- ten Veen, J.H. and Meijer, P.T., 1998. Late Miocene to recent tectonic evolution of Crete (Greece): geological observations and modern analysis. *Tectonophysics*, 298: 191-208.
- Vassilakis, E., 2006. Study of the tectonic structure of Messara basin, central Crete, with the aid of remote sensing techniques and G.I.S. PhD Thesis, N. K. University of Athens, Greece, Athens, 546 pp.
- Welch, R. and Ehlers, W., 1987. Merging Multiresolution SPOT HRV and Landsat TM Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 53(3): 301-303.
- Welter-Schultes, F.W., 2000. The paleogeography of late Neogene central Crete inferred from the sedimentary record combined with Albinaria land snail biogeography. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 157: 27-44.
- Δαβή, Ε. and Βορνεαυ, Μ., 1985. Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας 1:50.000, Φύλλο Αντισκάρι. Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα.
- Παρχαρίδης, Ι., Γκάριτζος, Ε. and Ψωμιιάδης, Ε., 1999. Αναγνώριση ζωνών εξαλλοίωσης στη νήσο Λέσβο, με εφαρμογή λόγων των φασματικών καναλιών του Landsat 5 TM. *Ορυκτός Πλούτος*, 112: 37-46.