



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

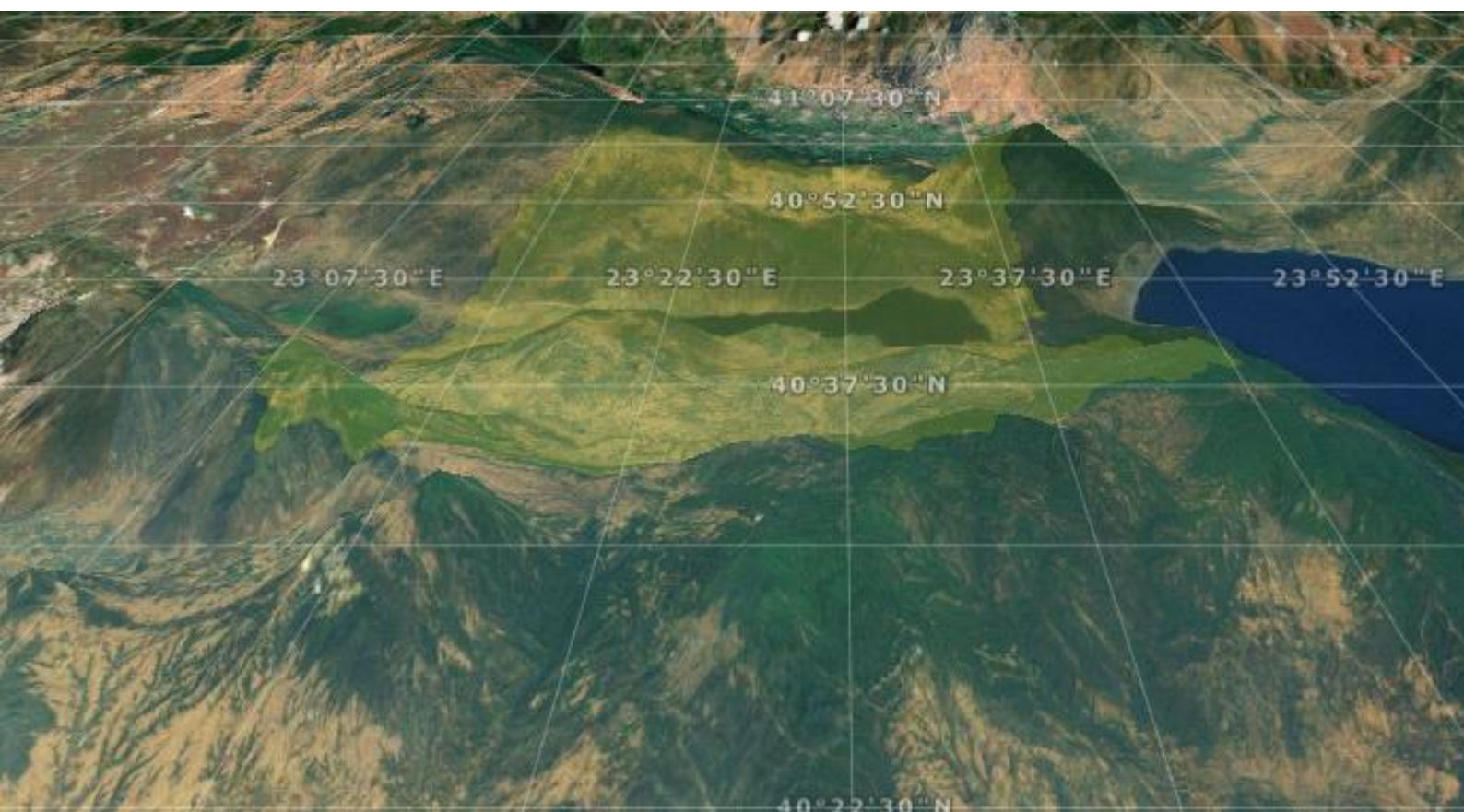


ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ Δ. ΜΑΚΡΟΒΑΣΙΛΗ
ΓΕΩΛΟΓΟΣ

**«ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ-ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ
ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΝ ΤΗ ΛΙΜΝΗ ΒΟΛΒΗ ΜΕ ΤΗ
ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (GIS) & ΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ»**



ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2012

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΟΥ
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑΣ ΜΑΚΡΟΒΑΣΙΑΗ

ΜΕ ΘΕΜΑ

**«ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ-ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ
ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΝ ΤΗ ΛΙΜΝΗ ΒΟΛΒΗ ΜΕ ΤΗ
ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (GIS) & ΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ»**

Υπό την επίβλεψη του :

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΗ, ΛΕΚΤΟΡΑ

Και της συμβουλευτικής επιτροπής :

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΒΟΥΒΑΛΙΔΗ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΥ ΚΑΘΗΓΗΤΗ
ΘΕΟΔΩΡΟΥ ΑΣΤΑΡΑ, ΟΜΟΤΙΜΟΥ ΚΑΘΗΓΗΤΗ**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2012

*Αφιερώνεται στους γονείς μου,
Δημήτρη και Ελευθερία,
την αδερφή μου Μάχη
και ολόκληρη την οικογένειά μου.*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Διατριβή Ειδίκευσης εκπονήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, στον Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, κατά την περίοδο 2009-2012.

Με την ολοκλήρωση της, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον κύριο επιβλέποντα της εργασίας, Λέκτορα του Τμήματος Γεωλογίας, κ. Δημήτριο Οικονομίδη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την άψογη συνεργασία που είχαμε, καθώς επίσης και την επιστημονική του καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές του, το χρόνο και την υπομονή που διέθεσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας κ. Κωνσταντίνο Βουβαλίδη, μέλος της τριμελούς επιτροπής, για τη συνεχή του επίβλεψη, τις επιστημονικές γνώσεις που μου προσέφερε και τις σημαντικές διορθώσεις επί της εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ ιδιαίτερος τον Ομότιμο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας κ. Θεόδωρο Αστάρα, μέλος της τριμελούς επιτροπής, για τη συμβολή του στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά των Υδρογεωλόγο του Ι.Γ.Μ.Ε. Θεσσαλονίκης, κ. Νικόλαο Βεράνη, για την παραχώρηση δεδομένων και συγγραμμάτων, καθώς επίσης και για τις επιστημονικές γνώσεις που μου προσέφερε. Ευχαριστώ, επίσης, και το υπόλοιπο προσωπικό του Ι.Γ.Μ.Ε. Θεσσαλονίκης για τη βοήθεια που μου παρείχαν σε διάφορους τομείς.

Ευχαριστώ τον Χρήστο Δομακίνη (υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας), τη Σοφία Πεχλιβανίδου (Διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας) και τον Χρήστο Χρηστίδη (υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων) για την πολύτιμη βοήθειά τους.

Ευχαριστώ τον κ. Κωνσταντίνο Ασημακόπουλο, Λέκτορα του Τμήματος Εμπορίας και Διαφήμισης του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, και την παιδική μου φίλη Σάντρα για τη βοήθεια τους σε θέματα τεχνολογίας.

Ευχαριστώ πολύ τις φίλες και συμφοιτήτριές μου στο μεταπτυχιακό, Μαρία, Στέλλα, Νάνσυ, Σοφία, για την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της φοίτησής μας και για την υποστήριξή τους.

Ευχαριστώ πάρα πολύ τη Δέσποινα, την Αλεξάνδρα, τη Μορφούλα, την Έλενα και το Νίκο για τη συμπαράστασή τους.

Ευχαριστώ όλους όσους εργάζονται στον Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας.

Τέλος, οι θερμότερες ευχαριστίες πηγαίνουν στους γονείς μου, την αδερφή μου και ολόκληρη την οικογένειά μου, για την ηθική και υλική στήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής ειδίκευσης είναι η μελέτη της γεωμορφολογίας και της γεωλογίας της λεκάνης απορροής της λίμνης Βόλβης, με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και της Τηλεπισκόπησης, και η συνεισφορά των τεχνολογιών αυτών στη μελέτη μίας περιοχής.

Στη διατριβή αυτή χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακά δεδομένα του υδρογραφικού δικτύου, της λιθολογίας και της τεκτονικής, που προήλθαν από ψηφιοποίηση των τοπογραφικών χαρτών της Γ.Υ.Σ. και των γεωλογικών χαρτών του Ι.Γ.Μ.Ε., κλίμακας 1:50.000. Επίσης, διαχειρίστηκαν ψηφιακά υψομετρικά δεδομένα την αυτόματη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, τη χωρική και μορφοτεκτονική ανάλυση της περιοχής. Τέλος, επεξεργάστηκε και μία δορυφορική εικόνα Landsat-7/ETM+, από την οποία προέκυψε η λιθολογία και η τεκτονική της περιοχής. Τα αποτελέσματα συνδυάστηκαν για την εξαγωγή των συμπερασμάτων.

Η λεκάνη απορροής της λίμνης Βόλβης βρίσκεται ανατολικά της Θεσσαλονίκης και έχει έκταση 1.280 km², συμπεριλαμβανομένης και της έκτασης που καλύπτει η λίμνη Βόλβη, η οποία έκταση ανέρχεται στα 70 km².

Η σύγκριση του υδρογραφικού δικτύου που προέκυψε από την ψηφιοποίηση των τοπογραφικών χαρτών και αυτού που προέκυψε αυτόματα από τα ψηφιακά υψομετρικά δεδομένα, έδειξε ότι τα ψηφιακά υψομετρικά δεδομένα αποτελούν αξιόπιστη επιλογή υψομετρικής πληροφορίας και είναι κατάλληλα για μία πληθώρα εφαρμογών.

Η μελέτη του μορφολογικού αναγλύφου πραγματοποιήθηκε με την ανάλυση των ψηφιακών υψομετρικών δεδομένων, καθώς και με τον υπολογισμό του υψομετρικού ολοκληρώματος και την κατασκευή της υψομετρικής καμπύλης των λεκανών απορροής. Προέκυψε ότι η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από ένα ώριμο λοφώδες ανάγλυφο, με μέσες μορφολογικές κλίσεις. Εξαίρεση αποτελεί το νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής, το οποίο έχει εξομαλυνθεί και βρίσκεται στο στάδιο του γήρατος, καθώς επίσης και το τμήμα βόρεια της λίμνης Βόλβης που παρουσιάζει τραχύ ανάγλυφο με μεγαλύτερες μορφολογικές κλίσεις και βρίσκεται στο στάδιο νεότητας.

Από τον υπολογισμό του δείκτη SL παρατηρείται ότι κατά θέσεις η τιμή του αυξάνεται υπερβολικά, γεγονός που μαρτυρά την επίδραση της τεκτονικής δραστηριότητας, και συγκεκριμένα της παλαιότερης τεκτονικής δράσης, στην εξέλιξη

του υδρογραφικού δικτύου, τόσο στο βόρειο όσο και στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης.

Τέλος, έγινε σύγκριση της λιθολογίας και της τεκτονικής που προέκυψαν από ψηφιοποίηση των γεωλογικών χαρτών και αυτών που προέκυψαν από την επεξεργασία της δορυφορικής εικόνας, και εντοπίστηκαν αλλαγές στα όρια των σχηματισμών, καθώς επίσης και φωτογραμμώσεις, οι οποίες μπορεί να αποτελούν πιθανά ρήγματα.

ABSTRACT

The aim of the present master thesis is the study of geomorphology and geology of the basin of Lake Volvi, using GIS and Remote Sensing, and the contribution of these technologies in a study area.

For this study were used digital data of the drainage network, lithology and tectonics, derived from digitized topographic maps of Military Geographical Service and geological maps of IGME, scale 1:50.000. In addition, digital elevation data were used for automatic exportation of drainage network, spatial and morphotectonics analysis of the area. Finally, were processed and a satellite image Landsat-7/ETM +, which revealed the lithology and tectonics of the area. The results were combined to derive the conclusions.

The basin of Lake Volvi located east of Thessaloniki, with a total area 1.280 km², including the area covered by Lake Volvi, which is about 70km².

The comparison of the drainage network resulting from the digitization of topographic maps and the drainage network came automatically from digital elevation data, showed that digital elevation data are reliable choice of elevation information and are suitable for a variety of applications.

The DEM analysis and the estimation of the hypsometric integrals releaved the landscape morphology. The terrain analysis showed a low altitude hilly terrain with gentle slopes, indicating a mature stage of development The exception is the southwestern part of the region, which has normalized and indicate an old stage of development, as well as the northern part of Lake Volvi showing rugged terrain with steep slopes, indicating a youth stage of development.

The calculation of the index SL is observed that the value increased too, reflecting the influence of tectonic activity, particularly the older tectonic action, in the development of the drainage network.

Finally, the comparison of the lithology and tectonics resulting from the digitization of geological maps and those derived from the processing of satellite images, identified changes in the limits of the formations, and lineaments, which may represent potential faults.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Σκοπός εργασίας	1
1.2 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.)	1
1.3. Τηλεπισκόπηση	3
1.4. Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου	4
1.5. Δορυφόρος Landsat-7/ETM+	7
1.6. Διοικητική υπαγωγή περιοχής μελέτης	7
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	10
2.1. Γεωγραφία	10
2.2. Μορφολογία	12
2.3. Υδρογραφία	12
2.4. Παλαιογεωγραφική εξέλιξη	16
2.5. Γεωλογία	17
2.6. Νεοτεκτονική	23
2.7. Γεωθερμία	28
2.8. Κλίμα	29
3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	30
3.1. Υλικά	30
3.2. Μέθοδοι	31
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	37
4.1. Υδρολογική λεκάνη της λίμνης Βόλβης	37
4.2. Υδρογραφία	37
4.2.1. Γενικά	37
4.2.2. Ποσοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου-Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου	38
4.2.3. Ποιοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου-Μορφή υδρογραφικού δικτύου	39

4.2.4. Αυτόματη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου	41
4.3. Χωρική ανάλυση	46
4.3.1. Γενικά	46
4.3.2. Ταξινόμηση υψομέτρου	46
4.3.3. Κλίση κλιτύων	49
4.3.4. Προσανατολισμός κλιτύων	54
4.3.5. Χάρτης Σκιασμένου Αναγλύφου	56
4.4. Μορφοτεκτονική ανάλυση	58
4.4.1. Γενικά	58
4.4.2. Υψομετρική καμπύλη και Υψομετρικό ολοκλήρωμα	60
4.4.3. Μήκος ρέματος (κλάδος υδρογραφικού δικτύου-Δείκτης κλίσης του (SL))	71
4.5. Λιθολογία	79
4.5.1. Χαρτογράφηση λιθολογικών σχηματισμών	79
4.5.2. Υδρογραφική πυκνότητα λιθολογικών σχηματισμών	82
4.5.3. Διάκριση της λιθολογίας με τη βοήθεια της Τηλεπισκόπησης	100
4.5.3.1. Γενικά	100
4.5.3.2. Δείκτης βλάστησης	103
4.5.3.3. Εντοπισμός και χαρτογράφηση λιθολογικών σχηματισμών	105
4.6. Τεκτονική	119
4.6.1. Γενικά	119
4.6.2. Χαρτογράφηση ρηγμάτων	119
4.6.3. Εντοπισμός και χαρτογράφηση φωτογραμμώσεων	122
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	125
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	130
6.1. Ελληνική Βιβλιογραφία	130
6.2. Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	133
6.3. Ιστολόγιο	136

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Σκοπός εργασίας

Ο Σκοπός της παρούσας διατριβής ειδίκευσης είναι η γεωμορφολογική και γεωλογική μελέτη της λεκάνης απορροής της λίμνης Βόλβης, με τη βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.) και της Τηλεπισκόπησης, και η αξιολόγηση της συνεισφοράς των τεχνολογιών αυτών στη μελέτη μίας περιοχής, δίχως τη συνδρομή δεδομένων πεδίου. Επίσης, να γίνει προσδιορισμός πιθανών αλλαγών στους υπάρχοντες χάρτες.

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου, του μορφολογικού αναγλύφου, καθώς και της λιθολογίας και της τεκτονικής της περιοχής μελέτης. Η Τηλεπισκόπηση χρησιμοποιήθηκε για τη χαρτογράφηση της λιθολογίας και της τεκτονικής.

Τα αποτελέσματα των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και της Τηλεπισκόπησης χρησιμοποιήθηκαν είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό.

1.2. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.)

Η Ψηφιακή Χαρτογραφία είναι το αυτοδύναμο εκείνο κομμάτι της Χαρτογραφίας, το οποίο συλλέγει, επεξεργάζεται και αποδίδει τα χαρτογραφημένα δεδομένα, χρησιμοποιώντας ως εργαλείο τους Η/Υ και τις ειδικές περιφερειακές συσκευές τους (Παρασχάκης κ.ά., 1990).

Όλα αυτά γίνονται σε συνδυασμό με τις δυνατότητες που παρέχουν τα διάφορα λογισμικά. Έτσι, η Ψηφιακή Χαρτογραφία, η σύγχρονη δηλαδή έκδοση της Χαρτογραφίας, τείνει να αντικαταστήσει εξ'ολοκλήρου τις παραδοσιακές χαρτογραφικές μεθόδους (Αστάρας, 2007).

Ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών/ΓΣΠ (Geographic Information Systems/GIS) είναι μια οργανωμένη συλλογή εξοπλισμού λογισμικού, γεωγραφικών δεδομένων και προσωπικού, σχεδιασμένη έτσι ώστε να συγκεντρώνει, αποθηκεύει, ενημερώνει, επεξεργάζεται, αναλύει και παρουσιάζει όλους τους τύπους γεωγραφικών πληροφοριών (Marathon Data Systems, 2004).

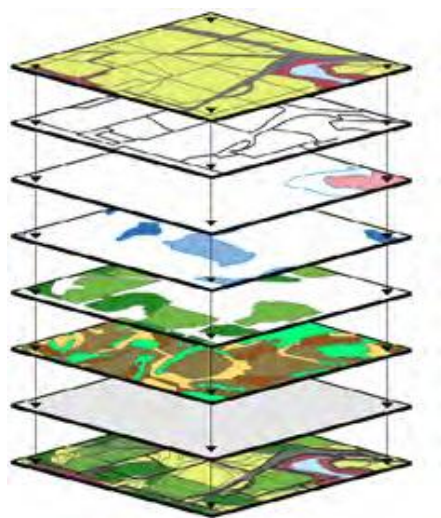
Ένας ευρύτερος ορισμός για τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών είναι ότι αποτελούν ένα «δυναμικό εργαλείο» συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάκτησης, μετασχηματισμού και απεικόνισης χωρικών δεδομένων σχετικών με φαινόμενα που απαντούν/εξελίσσονται στον πραγματικό κόσμο (Goodchild 1985, Burrough 1992, Burrough & McDonnell 2000, από Αστάρα, 2007).

Ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών αποτελείται από (Αστάρας, 2007) :

- ✓ Το υπολογιστικό σύστημα και τα περιφερειακά μηχανήματα.
- ✓ Το λογισμικό (software) που θα καταστήσει ικανό το υπολογιστικό σύστημα να επεξεργαστεί το σύνολο των δεδομένων.
- ✓ Τα δεδομένα (data) που θα εισαχθούν στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.
- ✓ Το ανθρώπινο δυναμικό, το οποίο θα διαχειριστεί το σύστημα.

Η λειτουργία των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στηρίζεται στη σύνδεση μιας βάσης δεδομένων (database), η οποία περιέχει περιγραφικά (μη χωρικά) δεδομένα, με διάφορα επίπεδα (layers) χωρικών πληροφοριών (Σχήμα 1.1), τα οποία διαθέτουν κάποιου είδους γεωγραφική αναφορά.

Τόσο τα χωρικά (π.χ. υδρογραφικό δίκτυο, γεωλογία κ.α.) όσο και τα αντίστοιχα μη χωρικά (π.χ. ταξινόμηση υδρογραφικού δικτύου, είδος πετρώματος) δεδομένα δύνανται να είναι εξαιρετικά ετερογενή (π.χ. τοπογραφικά, γεωλογικά, εδαφολογικά, σεισμολογικά κ.α.), σε σημείο που η μεταξύ τους σύνδεση θα ήταν αδύνατη ή πολύπλοκη, δίχως την ύπαρξη ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών.



Σχήμα 1.1. Ο συνδυασμός διαφορετικών επιπέδων (layers) χωρικών πληροφοριών, τα οποία υπερτίθενται το ένα πάνω στο άλλο, σύμφωνα με τη γεωγραφική τους αναφορά και συνοδεύονται από μία βάση δεδομένων, συνθέτουν τη βασική δομή ενός GIS (από Μουρατίδη, 2010).

Ο αντικειμενικός σκοπός της συλλογής και διαχείρισης των δεδομένων σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών είναι η συσχέτισή τους και η λήψη αποφάσεων. Έτσι, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών δεν αποτελούν πλέον απλά μια τεχνολογία παραγωγής ψηφιακών προϊόντων (χάρτες, πίνακες κ.λ.π.). Αντίθετα, παρέχουν δυνατότητες για την κάλυψη οργανωτικών και διαχειριστικών αναγκών, τη δημιουργία μοντέλων και την πρόβλεψη φαινομένων και καταστάσεων (Μουρατίδης, 2010).

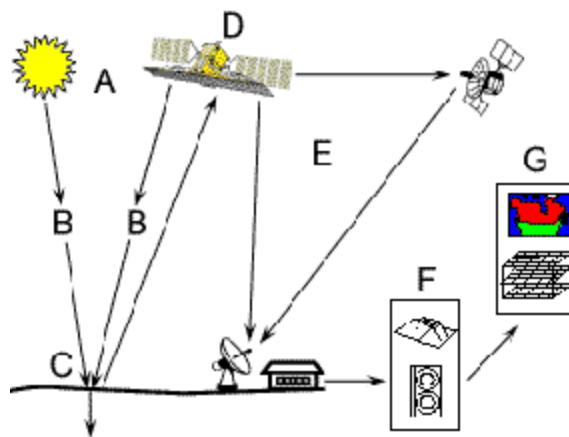
1.3. Τηλεπισκόπηση

Ως *Τηλεπισκόπηση* (Remote Sensing) ορίζεται η επιστήμη μέτρησης από μακριά, με τη βοήθεια δεκτών που δίδουν εικόνες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (κυρίως μεταξύ 0,4μm-30cm), η οποία ανακλάται, σκεδάζεται ή εκπέμπεται από ένα ή περισσότερα αντικείμενα πάνω στην επιφάνεια της Γης, με τελικό σκοπό να προσδιοριστούν, με τη βοήθεια των συστημάτων οπτικής και ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων, η φύση και οι ιδιότητες των αντικειμένων αυτών (Αστάρας, 2006).

Η κύρια διαδικασία που λαμβάνει χώρα κατά την Τηλεπισκόπηση περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση ανάμεσα στην προσπίπτουσα ακτινοβολία και τους στόχους που μας ενδιαφέρουν. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επεξηγηθεί μέσω των χρησιμοποιούμενων απεικονιστικών συστημάτων, τα οποία περιλαμβάνουν επτά διαφορετικά στάδια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η Τηλεπισκόπηση περιλαμβάνει επίσης και τη μέτρηση της εκπεμπόμενης ενέργειας με τη χρήση μη απεικονιστικών συστημάτων. Τα επτά στάδια (Σχήμα 1.2) που αποτελούν την τηλεπισκοπική διαδικασία είναι τα ακόλουθα (Κανελλοπούλου, 2003) :

1. Πηγή ενέργειας ή ακτινοβολία (Α). Η πρώτη απαίτηση για την Τηλεπισκόπηση είναι η ύπαρξη μιας πηγής ενέργειας η οποία θα φωτίζει ή θα παρέχει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στον στόχο του ενδιαφέροντός μας.
2. Ακτινοβολία και ατμόσφαιρα (Β). Καθώς η ενέργεια διαδίδεται από την πηγή προς τον στόχο θα έρθει σε επαφή και θα αλληλεπιδράσει με την ατμόσφαιρα μέσα από την οποία διέρχεται. Αυτή η αλληλεπίδραση θα λάβει χώρα και δεύτερη φορά καθώς η ενέργεια θα διαδίδεται από τον στόχο προς τον αισθητήρα.

3. Αλληλεπίδραση με το στόχο (C). Καθώς η ενέργεια προσπίπτει στον στόχο περνώντας μέσα από την ατμόσφαιρα, αλληλεπιδρά με το στόχο ανάλογα με τις ιδιότητες τόσο του στόχου όσο και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
4. Καταγραφή της ενέργειας από τον αισθητήρα (D). Μετά τη σκέδαση ή την εκπομπή της ακτινοβολίας από το στόχο απαιτείται ένας αισθητήρας (τηλεπισκοπικός, όχι σε επαφή με το στόχο) για τη συλλογή και την καταγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.
5. Εκπομπή, λήψη και επεξεργασία (E). Η καταγραφόμενη ενέργεια από τον αισθητήρα πρέπει να μεταδοθεί, συνήθως σε ηλεκτρονική μορφή, σε έναν σταθμό λήψης και επεξεργασίας όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία επεξεργασίας της πληροφορίας σε εικόνα.
6. Ερμηνεία και ανάλυση (F). Η παραγόμενη πληροφορία αναλύεται οπτικά ή/και ψηφιακά ή ηλεκτρονικά για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τον αρχικά ακτινοβολούμενο στόχο.
7. Εφαρμογή (G). Το τελευταίο στάδιο της τηλεπισκοπικής διαδικασίας περιλαμβάνει την εφαρμογή της εξαγόμενης πληροφορίας από την εικόνα, για την καλύτερη κατανόησή της, την απόκτηση καινούριας πληροφορίας ή τη συμβολή της στην επίλυση κάποιου συγκεκριμένου προβλήματος.



Σχήμα 1.2. Στάδια τηλεπισκοπικής διαδικασίας (από Κανελλοπούλου, 2003).

1.4. Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου

Το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (Digital Elevation Model/DEM) αποτελεί μία ψηφιακή αναπαράσταση του γήινου αναγλύφου, η οποία περιγράφει τη γεωμετρία της γήινης επιφάνειας. Οι υψομετρικές μεταβολές της επιφάνειας, π.χ. εδαφικό ανάγλυφο, μπορούν να περιγράψουν μαθηματικά σαν υψόμετρο σε συνάρτηση με τη

θέση του. Η θέση του μπορεί να οριστεί, τόσο με γεωγραφικές συντεταγμένες (φ,λ), όσο και με ορθογώνιες συντεταγμένες (X,Y) σε μία χαρτογραφική προβολή (π.χ. UTM) (Βαϊόπουλος κ.ά., 2004).

Η βασική επιδίωξη κατά τον υπολογισμό ενός Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου είναι η κατά το δυνατόν καλύτερη προσαρμογή του στα δεδομένα της πραγματικής επιφάνειας του εδάφους που πρόκειται να απεικονίσει. Η ακρίβεια του παραγόμενου Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ανάλυσή του (η απόσταση μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας), η μορφή των δεδομένων καθώς και η ακρίβεια και η αξιοπιστία με την οποία έγιναν οι πρωτογενείς μετρήσεις του μεγέθους μελέτης (Νικολαΐδου, 2009).

Πηγή δημιουργίας ενός Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου αποτελούν οι υπάρχοντες τοπογραφικοί χάρτες, οι οποίοι παρέχουν τις απαραίτητες μορφολογικές λεπτομέρειες για την αναπαράσταση του αναγλύφου. Ψηφιοποιούνται οι ισοϋψείς καμπύλες και τα τριγωνομετρικά σημεία, ενώ απαιτείται και η εφαρμογή μεθόδων παρεμβολής για τον υπολογισμό των υψομέτρων ανάμεσα στις ισοϋψείς. Αν και μεγάλος αριθμός αλγορίθμων παρεμβολής έχει αναπτυχθεί, η αξιοπιστία των αρχικών δεδομένων αναπόφευκτα μειώνεται, ανεξάρτητα από τη μέθοδο της επεξεργασίας (Gens, 1998, από Μουρατίδη, 2010).

Υπάρχουν και άλλοι τρόποι παραγωγής Ψηφιακών Μοντέλων Αναγλύφου, όπως (Μουρατίδης, 2010) :

- ✓ Η χρήση κλασικών και εξελιγμένων τοπογραφικών οργάνων (θεοδόλιχα, ταχύμετρα, χωροβάτες, total stations κ.α.) και μεθόδων (ταχυμετρία, χωροστάθμιση κ.τ.λ.), καθώς και σύγχρονων οργάνων, τα οποία χρησιμοποιούν το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System/GPS).
- ✓ Η εναέρια φωτογραμμετρία.
- ✓ Οι τεχνικές οπτικής στερεοσκοπίας από το διάστημα.
- ✓ Οι τεχνικές ραντάρ.
- ✓ Συστήματα λέιζερ.

Το 2000, η αποστολή SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) έδωσε για πρώτη φορά ένα παγκόσμιο, υψηλής ποιότητας Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου, με διακριτική ικανότητα ενός και τριών δευτερολέπτων της μοίρας (1 και 3 arcsecond), χρησιμοποιώντας την τεχνική της διαστημικής συμβολομετρίας ραντάρ μονής διέλευσης (single-pass SAR Interferometry). Το Ψηφιακό αυτό Μοντέλο Αναγλύφου καλύπτει την επιφάνεια της Γης μεταξύ των γεωγραφικών πλατών 60°N και 57°S.

Όλα τα δεδομένα συλλέχθηκαν σε διάστημα 11 ημερών (11-22 Φεβρουαρίου 2000), χρησιμοποιώντας δύο ζεύγη κεραιών ραντάρ, τα οποία λειτουργούσαν στις φασματικές ζώνες C και X, «φωτίζοντας» ταυτόχρονα την επιφάνεια της Γης και καταγράφοντας τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα ραντάρ, πάνω στο διαστημικό λεωφορείο Endeavour. Η αποστολή SRTM αποτέλεσε συνεργασία της NASA, του Κέντρου Αεροδιαστημικών Ερευνών της Γερμανίας (DLR) και της Ιταλικής Διαστημικής (ASI). Η απόλυτη και σχετική υψομετρική ακρίβεια του SRTM DEM δίνεται από τις προδιαγραφές ως $\pm 16\text{m}$ για το 90% των δεδομένων και $\pm 6\text{m}$ σε τοπική (50-100km) κλίμακα αντίστοιχα (Farr & Kobrick 2000, Werner 2001, Rabus et al. 2003, Farr et al. 2007). Εξαιτίας της πολλή πιο ομογενούς, από οποιαδήποτε προγενέστερα παγκόσμια δεδομένα, υψομετρικής ακρίβειας των περίπου 15m σε γεωγραφικές μονάδες των 30m ή 90m περίπου (1arcsec ή 3arcsec) και της διαθεσιμότητάς τους, τα δεδομένα SRTM, έγιναν ιδιαίτερα δημοφιλή, ακόμα και με μειωμένη ακρίβεια και ανάλυση, με περιορισμούς για ορισμένες εφαρμογές (Massonnet & Elachi, 2006). Σε κάθε περίπτωση, τα δεδομένα SRTM, παρά τη χωρική ανάλυση των 90m και το γεγονός, ότι υποτιμούν γενικά τις μεγάλες κλίσεις, αποτελούν μία αξιόπιστη επιλογή υψομετρικής πληροφορίας και είναι κατάλληλα για μία πληθώρα εφαρμογών (από Μουρατίδη, 2010). Η διάθεση τόσο του SRTM είναι δωρεάν και γίνεται μέσω του διαδικτύου.

Επίσης, δωρεάν στο διαδίκτυο διατίθεται και το πλέον πρόσφατο (Ιούνιος 2009) παγκόσμιο Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου, το οποίο παράχθηκε με τη μέθοδο της στερεοσκοπίας δορυφορικών εικόνων ASTER, το ASTER-GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model). Καλύπτει τη γήινη επιφάνεια μεταξύ 83°N και 83°S και αποτελείται από 22.600 επιμέρους τμήματα των 1°x1°, καθένα από τα οποία περιέχει τουλάχιστον 0.01% ξηράς. Χρησιμοποιεί γεωγραφικές συντεταγμένες (WGS84/EGM96) και έχει μέγεθος εικονοστοιχείου 1 arcsecond ($\approx 30\text{m} \times 30\text{m}$). Η υψομετρική του ακρίβεια εκτιμάται στα 20m (95% επίπεδο εμπιστοσύνης), ενώ η οριζοντιογραφική του ακρίβεια υπολογίζεται στα 30m (95% επίπεδο εμπιστοσύνης) (Μουρατίδης, 2010).

Για όλα τα Ψηφιακά Μοντέλα Αναγλύφου, η κλίση του αναγλύφου αποτελεί τον κυρίαρχο ρυθμιστή της υψομετρικής ακρίβειάς τους. Εξετάζοντας συνολικά την χωρική ανάλυση και την υψομετρική ακρίβεια, το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου που προκύπτει από την ψηφιοποίηση των τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:50.000 εξακολουθεί να είναι ανώτερης ποιότητας από τα SRTM και GDEM, ιδιαίτερα σε

περιοχές απότομου αναγλύφου (ορεινές περιοχές), αλλά με την συνεχή βελτίωση των παγκόσμιων ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου από διάφορες πηγές, φαίνεται πως σχετικά σύντομα θα ξεπεραστεί (Μουρατίδης, 2010).

1.5. Δορυφόρος Landsat-7/ETM+

Το 1999 εκτοξεύτηκε (από NASA/NOOA) ο δορυφόρος Landsat-7 (Σχήμα 1.3), που φέρει τον *‘ενισχυμένο πολυφασματικό σαρωτή’* ETM+ (Enhanced Thematic Mapper/Ενισχυμένος Θεματικός Χαρτογράφος), με 7 φασματικές ζώνες, με χωρική ανάλυση 30m (εξαιρουμένης της θερμικής ζώνης, με χωρική ανάλυση 60m) και επιπλέον την παγχρωματική φασματική ζώνη (PAN), με χωρική ανάλυση 15m (Kramer, 2002, από Αστάρια, 2006).



Σχήμα 1.3. Ο δορυφόρος Landsat-7/ETM+.

1.6. Διοικητική υπαγωγή περιοχής μελέτης

Διοικητικά η περιοχή μελέτης ανήκει στο Νομό Θεσσαλονίκης και ένα μικρό τμήμα της στο Νομό Χαλκιδικής. Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρέχει η Εθνική Υποδομή Γεωχωρικών Πληροφοριών (Ε.Υ.ΓΕ.Π.) ([url1](#)).

Οι δήμοι που βρίσκονται στην περιοχή, με βάση των διαχωρισμό *‘Καλλικράτης’* (Σχήμα 1.4) ([url1](#)) είναι οι :

1. Δήμος Λαγκαδά.
2. Δήμος Βόλβης.
3. Δήμος Θέρμης.
4. Δήμος Πολυγύρου.

(Οι δήμοι αυτοί ανήκουν στο Νομό Θεσσαλονίκης).

5. Δήμος Αριστοτέλη

(Οι δήμοι αυτοί ανήκουν στο Νομό Χαλκιδικής).

Οι δήμοι που υπήρχαν στην περιοχή πριν από την ένωση με το σχέδιο του 'Καλλικράτη' (σχέδιο 'Καποδίστριας') (Σχήμα 1.5) (url1) ήταν οι :

1. Δήμος Βερτίσκου.

2. Δήμος Σοχού.

3. Δήμος Κορώνειας.

4. Δήμος Καλλινδοίων.

(Οι δήμοι αυτοί ανήκουν στο Δήμο Λαγκαδά).

5. Δήμος Αρέθουσας.

6. Δήμος Εγνατίας.

7. Δήμος Ρεντίνας.

8. Δήμος Αγίου Γεωργίου.

9. Δήμος Απολλωνίας.

10. Δήμος Μαδύτου.

(Οι δήμοι αυτοί ανήκουν στο Δήμο Βόλβης).

11. Δήμος Βασιλικών.

(Ο δήμος αυτός ανήκει στο Δήμο Θέρμης).

12. Δήμος Ανθεμούντα.

13. Δήμος Ζερβοχωρίων.

14. Δήμος Πολυγύρου.

(Οι δήμοι αυτοί ανήκουν στο Δήμο Πολυγύρου).

15. Δήμος Αρναίας.

16. Δήμος Σταγείρων-Ακάνθου.

(Οι Δήμοι αυτοί ανήκουν στο Δήμο Αριστοτέλη).

Σχήμα 1.5. Στο χάρτη απεικονίζονται οι δήμοι της περιοχής σύμφωνα με το σχέδιο 'Καποδίστριας'.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1. Γεωγραφία

Η περιοχή μελέτης (Σχήμα 2.1) της παρούσας διατριβής είναι η λεκάνη απορροής της λίμνης Βόλβης, η οποία αποτελεί υπολεκάνη της λεκάνης της Μυγδονίας. Εκτείνεται κυρίως στο Νομό Θεσσαλονίκης, ενώ ένα μικρό τμήμα της βρίσκεται στο Νομό Χαλκιδικής. Καλύπτει έκταση $1.280,11\text{km}^2$ (συμπεριλαμβανομένης και της έκτασης που καλύπτει η λίμνη Βόλβη) περίπου και οι γεωγραφικές συντεταγμένες υπό των οποίων ορίζεται η λεκάνη είναι :

- ✓ $\varphi = 40^{\circ} 27' \text{ έως } 40^{\circ} 50'$ Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος
- ✓ $\lambda = 22^{\circ} 53' \text{ έως } 23^{\circ} 40'$ Ανατολικό Γεωγραφικό Μήκος

Η λεκάνη ορίζεται στα ανατολικά από τα Κερδύλλια όρη (στα βορειοανατολικά) και το Στρατονικό όρος (στα νοτιοανατολικά) και επικοινωνεί με το Στρυμονικό κόλπο μέσω της κοιλάδας της Ρεντίνας, από την οποία διέρχεται ο Ρήχιος ποταμός. Προς το βορρά σημαντική θέση κατέχουν τα όρη της Βόλβης και το όρος Βερτίσκο, ενώ νοτιοδυτικά βρίσκεται το όρος Κισσός (Χορτιάτης) και νότια το όρος Υψίζωνος (Χολομώντας) (Ψιλοβίκος, 1977).

Η λίμνη Βόλβη είναι η δεύτερη μεγαλύτερη λίμνη της Ελλάδας με έκταση $70,27\text{km}^2$, περίμετρο ακτογραμμής $56,04\text{km}$ και μέγιστο βάθος 20m . Οι γεωγραφικές συντεταγμένες της είναι :

- ✓ $\varphi = 40^{\circ} 37' \text{ έως } 40^{\circ} 41'$ Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος
- ✓ $\lambda = 23^{\circ} 21' \text{ έως } 23^{\circ} 36'$ Ανατολικό Γεωγραφικό Μήκος

Από τη βόρεια πλευρά της περνάει η Εγνατία Οδός, στα ανατολικά της βρίσκονται τα στενά της Ρεντίνας (ή αλλιώς Μακεδονικά Τέμπη), ενώ δυτικά της υπάρχει η λίμνη Κορώνεια.

Οι δύο αυτές γειτονικές λίμνες αποτελούν υπολειμματικές μορφές της μεγάλης πλειστοκαινικής Μυγδονίας λίμνης (Ψιλοβίκος, 1977).

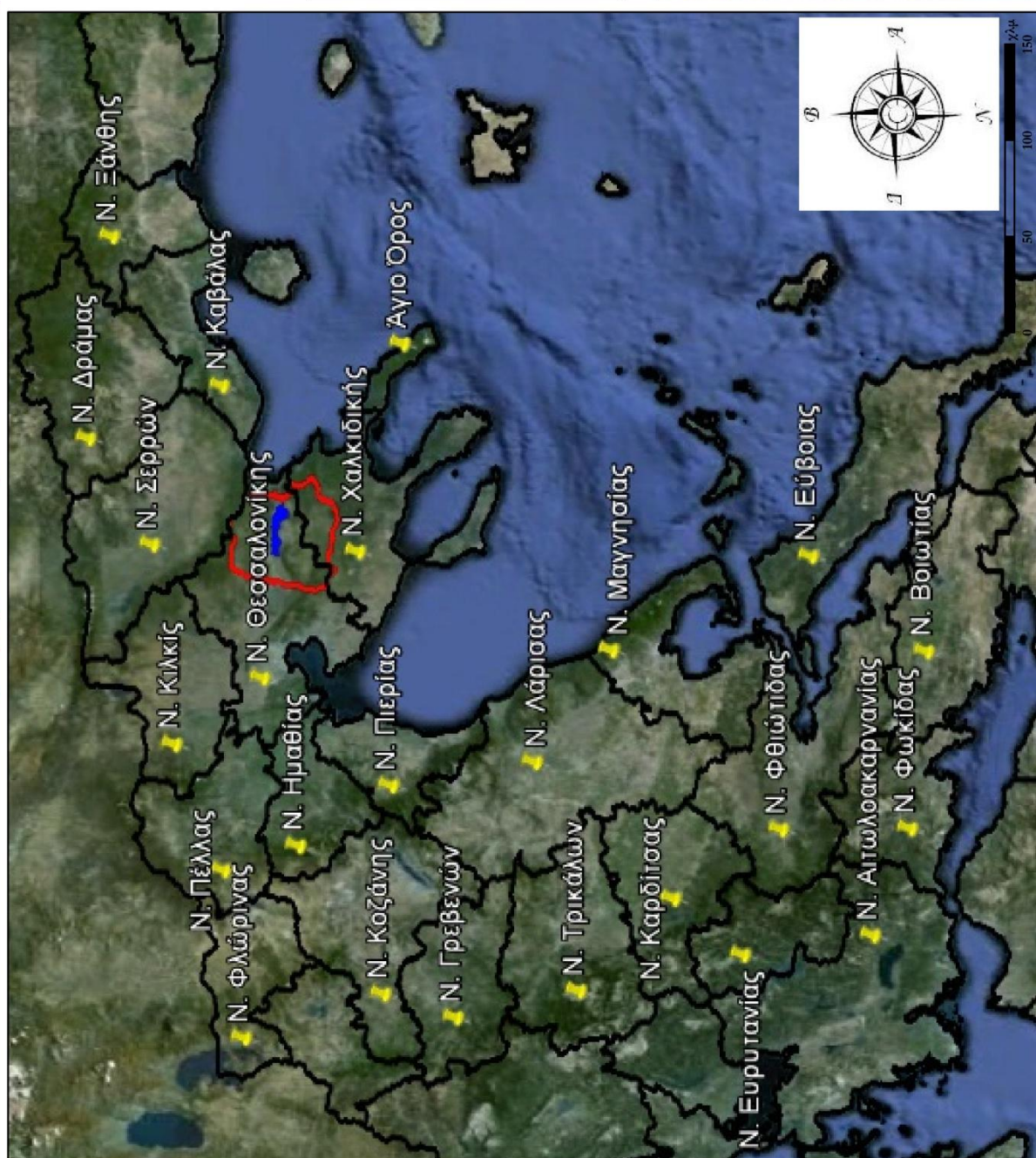
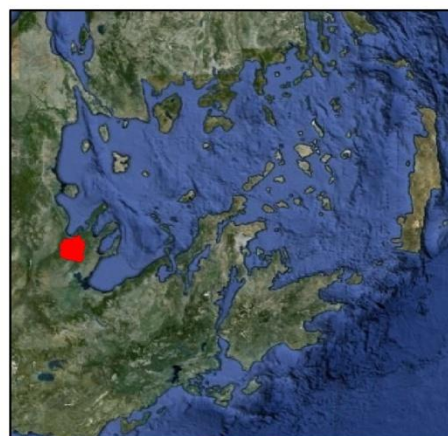
Περιοχής μελέτης



ΠΙΜΣ Τμήματος Γεωλογίας
Ειδικευση : Γεωγραφία
&
Περιβάλλον

Υπόμνημα

- Όριο περιοχής μελέτης
- Λίμνη Βόλβη
- Όρια Νομών
- ✚ Νομοί



2.2. Μορφολογία

Η λεκάνη απορροής της λίμνης Βόλβης έχει περίπου τετράγωνο σχήμα, με μήκος που κυμαίνεται από 30 έως 43km και πλάτος 40km. Καταλαμβάνει το πεδινό έως και το ορεινό τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης με υψόμετρα από 27 έως 1122m και το μέσο υψόμετρο είναι 350m. Μορφολογικά αποτελείται από ένα πεδινό τμήμα (0-150m) περιμετρικά της λίμνης, ενώ όσο πλησιάζουμε προς το βόρειο και το νότιο όριο της λεκάνης απορροής το ανάγλυφο γίνεται λοφώδες-ημιορεινό (150-900 m) έως ορεινό (>900 m) (Σχήμα 2.2).

Οι μεγάλες πεδινές εκτάσεις διαπιστώνονται νότια της λίμνης με κύριο γνώρισμα τη δημιουργία δελταϊκών σχηματισμών, και δυτικά με την ανάπτυξη αλλουβιακού πεδίου. Στα βόρεια καθοριστική είναι η παρουσία των ορέων της Βόλβης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία απότομου αναγλύφου άνωθεν των ακτών (Ψιλοβίκος, 1977).

Η λίμνη Βόλβη έχει επίμηκες σχήμα με προσανατολισμό Α-Δ. Το μήκος της είναι 20km και το πλάτος της κυμαίνεται από 2km στο κεντρικό τμήμα και φτάνει τα 4 και 6km στα δυτικά και ανατολικά, αντίστοιχα (Σχήμα 2.2).

Οι ακτές της λίμνης παρουσιάζουν μορφολογικές αντιθέσεις. Οι ακτές της νότιας πλευράς είναι ομαλές, χαμηλές και αμμώδεις, εκτός από ορισμένες ζώνες απότομων βραχωδών και χαμηλών ιλυωδών ακτών. Οι ακτές της βόρειας πλευράς είναι απότομες, με πλούσιο διαμελισμό και βραχώδεις, εκτός από τα δύο ακραία τμήματα όπου επικρατούν ομαλές και χαμηλές ακτές. Στην ανατολική και δυτική πλευρά οι ακτές είναι χαμηλές, ιλυώδους και αμμώδους σύστασης (Ψιλοβίκος, 1977).

2.3. Υδρογραφία

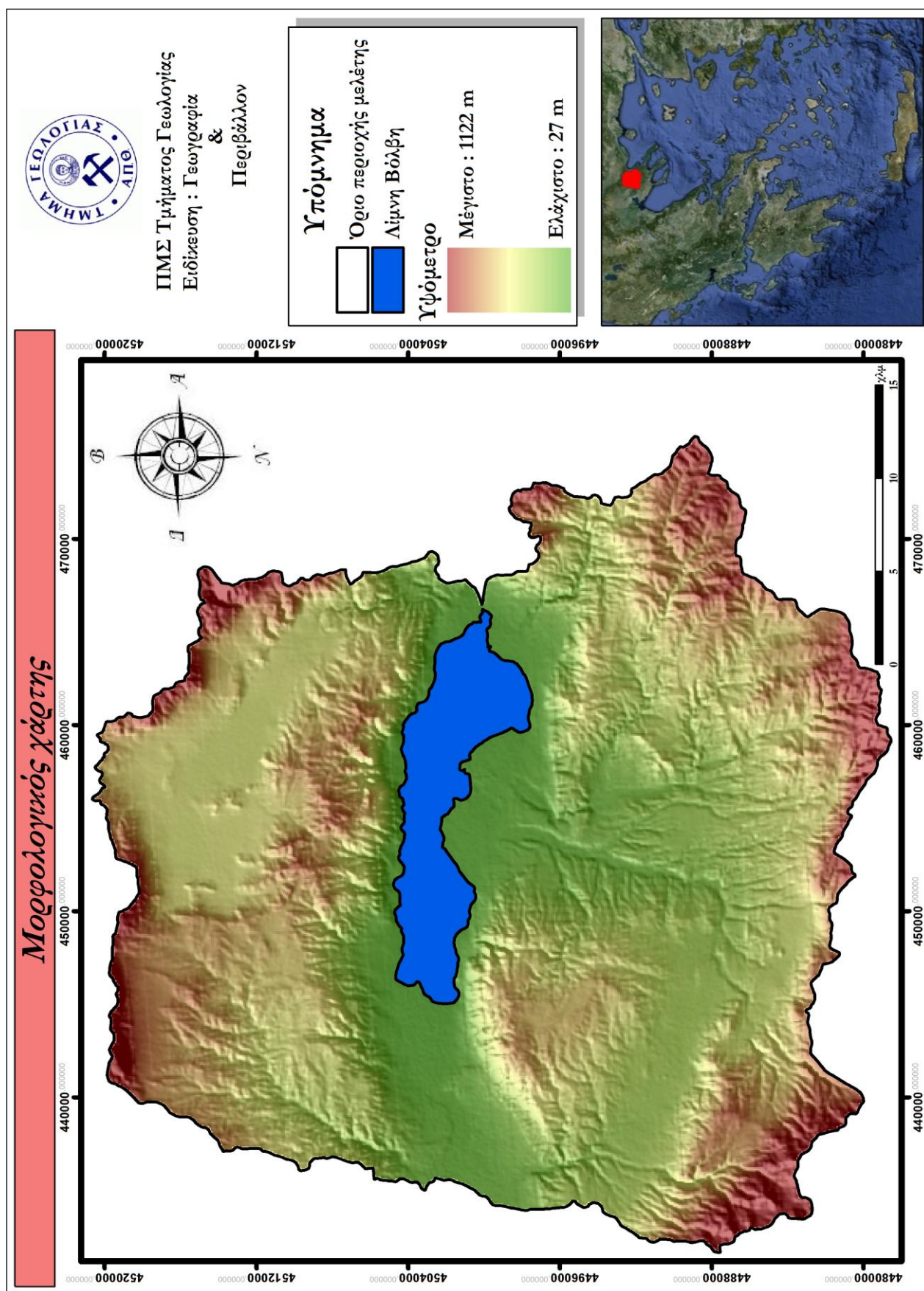
Στη λεκάνη της λίμνης Βόλβης συγκεντρώνονται τα ύδατα των ανατολικών κλιτύων του Χορτιάτη και των βόρειων κλιτύων του Χολομώντα και του Στρατονικού, τα οποία διέρχονται από τις λεκάνες του Ζαγκλιβερίου και της Μαραθούσας. Συγκεντρώνονται, επίσης, τα ύδατα των νότιων κλιτύων του Βερτίσκου και των δυτικών κλιτύων των Κερδυλλίων, τα οποία διέρχονται από τη λεκάνη των Βρωμολιμνών και τέλος τα ύδατα των ορέων της Βόλβης (Σχήμα 2.3). Οι κυριότεροι χείμαρροι είναι οι εξής (Ψιλοβίκος, 1977):

- **Ποταμιά ρέμα (Δαφνούντας).** Συγκεντρώνει τα ύδατα της περιοχής του Σοχού, διέρχεται δυτικά του χωριού Σχολάριον και με τον ποταμό Δερβένι, εκβάλλει στη λίμνη.
- **Βαμβακιάς ρέμα.** Αποστραγγίζει τη λεκάνη των Βρωμολιμνών, διέρχεται ανατολικά του χωριού Βαμβακιά, και κανονικά ενώνεται με το Ρήχιο ποταμό στην είσοδο της κοιλάδας της Ρεντίνας. Κατόπιν, όμως, από τεχνητή αλλαγή της κοίτης του ρέματος, αυτό εκβάλλει στο ανατολικό άκρο της λίμνης.
- **Πλατανόρεμα (Λαγκαδικίων).** Αποστραγγίζει τη λεκάνη του Ζαγκλιβερίου, διέρχεται δυτικά του χωριού Λαγκαδίκια και ενώνεται με τον ποταμό Δερβένι κοντά στο Σχολάριον.
- **Μεγάλο ρέμα (Παζαρούδα).** Αποστραγγίζει τη λεκάνη της Μαραθούσας, εκτός της μικρής λεκάνης του Μελισσουργού στα ανατολικά. Διέρχεται ανατολικά του χωριού Νέα Απολλωνία και εκβάλλει στο κέντρο περίπου της νότιας πλευράς της λίμνης.
- **Χολομώντας ρέμα.** Πηγάζει από την περιοχή της Αρναίας και αποτελεί τον μεγαλύτερο σε ανάπτυξη χείμαρρο ολόκληρης της λεκάνης. Κατά την πορεία του προς τη λίμνη, διέρχεται ανατολικά του χωριού Μελισσουργός, μέσω ενός στενού και απότομου φαράγγιού, επί του κρυσταλλοσχιστώδους υποβάθρου και των ιζηματογενών σχηματισμών δυτικά του χωριού Κοκκαλούς και ανατολικά του χωριού Απολλωνία.
- **Κερασιάς ρέμα.** Συγκεντρώνει τα ύδατα των βόρειων κλιτύων του Στρατονικού, διέρχεται νοτιοδυτικά του χωριού Μόδιον και εκβάλλει στο νοτιοανατολικό τμήμα της λίμνης.

Οι χείμαρροι Μεγάλο ρέμα (Παζαρούδα), Χολομώντας και Κερασιάς στις εκβολές τους εντός της λίμνης σχηματίζουν δελταϊκές αποθέσεις.

Ο ποταμός **Δερβένι** συνδέει τη λίμνη Κορώνεια με τη λίμνη Βόλβη, δέχεται τα ύδατα των χειμάρρων Ποταμιάς και Πλατανορέματος και διαρρέει την πεδινή περιοχή κατά την διεύθυνση Δ-Α.

Τέλος, ο ποταμός Ρήχιος διοχετεύει τα ύδατα της λίμνης Βόλβης προς τη θαλάσσια περιοχή του Στρυμονικού κόλπου, διερχόμενος την κοιλάδα της Ρεντίνας.



Σχήμα 2.2. Μορφολογικός χάρτης (από το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου), όπου παρουσιάζεται το ανάγλυφο και η γεωμετρία της λεκάνης απορροής της λίμνης Βόλβης.

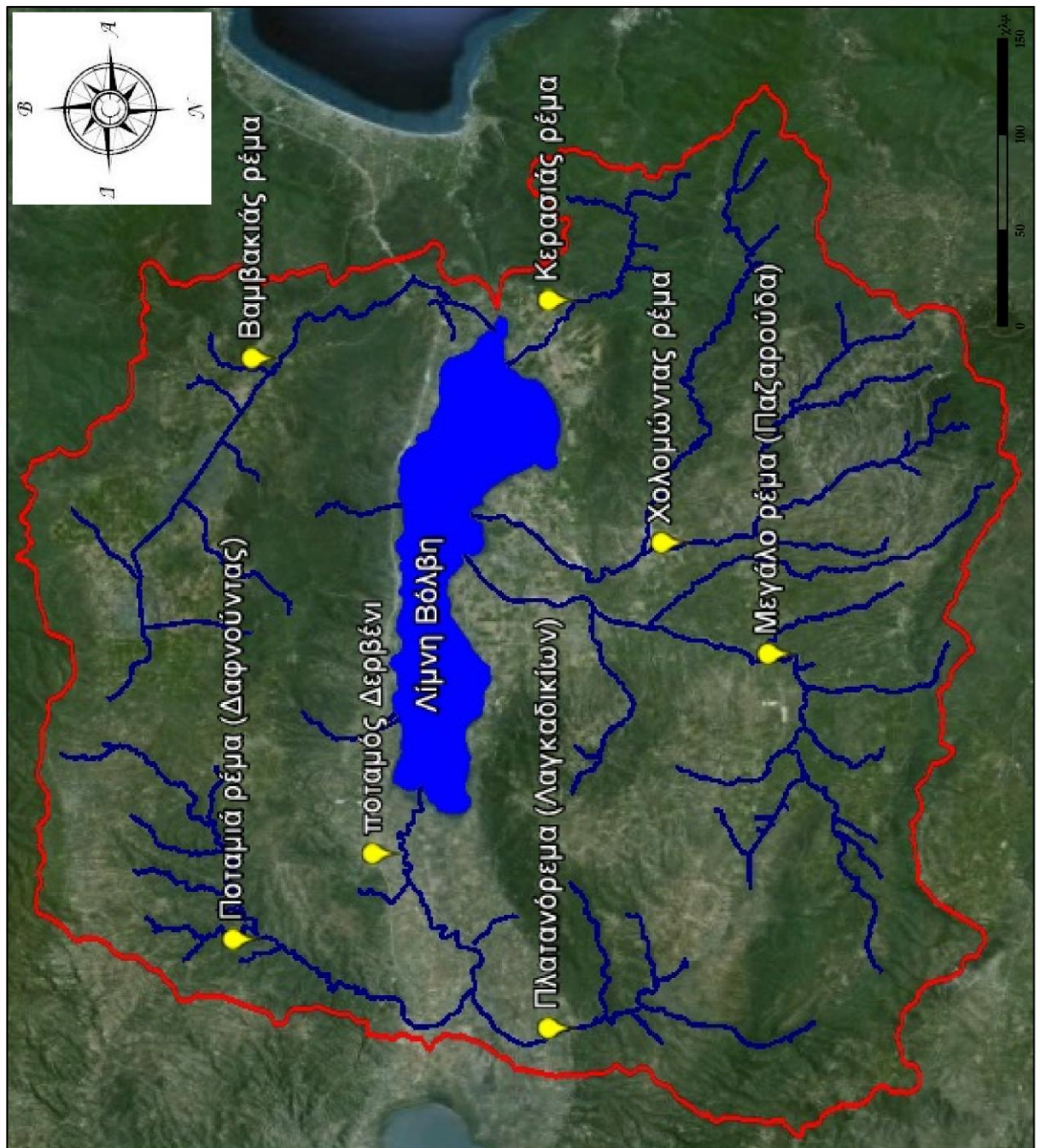
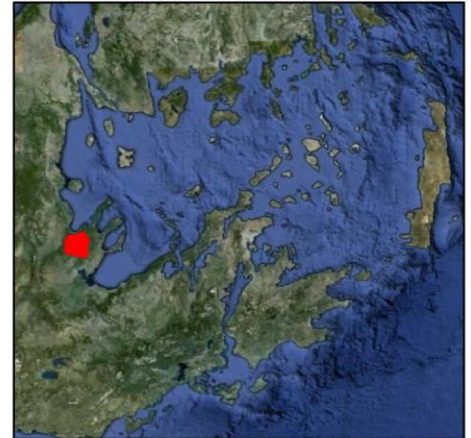
Κύρια ρέματα περιοχής μελέτης



ΠΜΣ Τμήματος Γεωλογίας
Ειδικευση : Γεωγραφία
&
Περιβάλλον

Υπόμνημα

- Όριο περιοχής μελέτης
- Λίμνη Βόλβη
- Κύρια ρέματα περιοχής μελέτης
- Όνομα ρέματος



Σχήμα 2.3. Υδρολογικός χάρτης στον οποίο παρουσιάζονται οι χείμαρροι που τροφοδοτούν τη λίμνη Βόλβη.

2.4. Παλαιογεωγραφική εξέλιξη

Όπως έχει προαναφερθεί (Υποκεφάλαιο 2.1), η περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα της λεκάνης της Μυγδονίας, και για το λόγο αυτό, γίνεται περιγραφή της παλαιογεωγραφικής εξέλιξης ολόκληρης της λεκάνης. Η εξέλιξη είναι η ακόλουθη (Βεράνης, 2010):

- Κατά το Κάτω Πλειστόκαινο έγινε βύθιση της Προμυγδονιακής λεκάνης στο χώρο μεταξύ Καμήλας και Ρεντίνας και σχηματίστηκε η λεκάνη Μυγδονίας, που στη συνέχεια πληρώθηκε από τα νερά της λίμνης Μυγδονίας. Το Προμυγδονιακό σύστημα εκτείνονταν από το Στρυμονικό κόλπο, τη λεκάνη Μαραθούσας, τη λεκάνη Ζαγκλιβερίου έως τη λεκάνη του Γαλλικού ποταμού και τη λεκάνη Ανθεμούντα.
- Κατά το τέλος του Τεταρτογενούς άδειασε ένα τμήμα της λίμνης Μυγδονίας στο Στρυμονικό κόλπο και έτσι προέκυψαν οι υπολειμματικές λίμνες Βόλβης και Κορώνειας.

Οι γεωμορφολογικοί σχηματισμοί της περιοχής είναι αποτέλεσμα των νεοτεκτονικών κινήσεων με κύριο γεωμορφολογικό χαρακτηριστικό τη ρηξιγενούς προέλευσης λεκάνης Μυγδονίας.

- Σε πρώτη φάση δημιουργούνται οι επιφάνειες επιπέδωσης ως αποτέλεσμα της ωριμότητας του ανάγλυφου σε χαμηλά υψόμετρα (100-200m). Στη συνέχεια, οι Μειοκαινικής ηλικίας επιφάνειες τεμαχίσθηκαν κατά το Μέσο-Άνω Μειόκαινο και τα τεμάχια τους είτε ανυψώθηκαν στο χώρο των ορεινών όγκων, είτε βυθίσθηκαν και καλύφθηκαν από νεότερες ιζηματογενείς αποθέσεις. Η σημερινή επιφάνεια επιπέδωσης, στην περιοχή του ορεινού συγκροτήματος του Βερτίσκου (Πέντε Βρύσες-Κρυονέρι-Ασκός) των 400-600m είναι Κάτω-Μέσω Μειοκαινικής ηλικίας, και η σημερινή της θέση αποδίδεται σε νεότερες ανυψωτικές κινήσεις. Κατά τον Ψιλοβίκο (1977) τα τεμάχια που ακολούθησαν θετικές κατακόρυφες κινήσεις ανυψώθηκαν κατά 400-600m και αποτελούν σήμερα τα εξάρματα του Βερτίσκου και του Χορτιάτη. Τα τεμάχια που ακολούθησαν αρνητική κατακόρυφη κίνηση αποτελούν το δάπεδο των ταφρολεκανών (λεκάνη Προμυγδονίας και Στρυμόνα).
- Στη συνέχεια γίνεται πλήρωση της Προμυγδονιακής ταφρολεκάνης από ιζήματα Μειοκαινικής-Πλειοκαινικής ηλικίας και του Βιλλαφράγκιου. Τα

ιζήματα αυτά είναι ηπειρωτικής κυρίως προέλευσης και το συνολικό πάχος τους είναι 350m. Η βύθιση του πυθμένα της Προμυγδονίας λεκάνης είναι κατά 100-200m μεγαλύτερη από το συνολικό πάχος των Νεογενών αποθέσεων.

- Κατά το Τεταρτογενές ακολουθούν τεκτονικές κινήσεις δευτέρης φάσης που σχετίζονται με τη δημιουργία μικρότερων λεκανών. Γίνεται ο τεμαχισμός των Βιλλαφράγκιας ηλικίας ερυθροστρωμάτων της Προμυγδονιακής ομάδας και πλήρωση των λεκανών με Τεταρτογενούς ηλικίας ιζήματα. Στην υπολεκάνη Κορώνειας η συνολική βύθιση κατά το Τεταρτογενές εκτιμάται σε 220m.
- Από στρωματογραφική και παλαιογεωγραφική ανάλυση προκύπτει ότι το άθροισμα ανύψωσης και βύθισης στη λεκάνη Μυγδονίας ήταν 800-900m.
- Η μέση ταχύτητα βύθισης και η αντίστοιχη ταχύτητα ιζηματογένεσης κατά το Τεταρτογενές ήταν $5 \cdot 10^{-2}$ mm/y έως $6 \cdot 10^{-1}$ mm/y. Οι αντίστοιχες τιμές κατά το Νεογενές υπολογίζονται σε $2,3 \cdot 10^{-2}$ mm/y έως $2 \cdot 10^{-1}$ mm/y. Οι ταχύτητες αυτές θεωρούνται μεγάλες, γεγονός που αποδίδεται στην έντονη νεοτεκτονική δραστηριότητα στη λεκάνη της Μυγδονίας.
- Άλλα μορφοτεκτονικά χαρακτηριστικά που αποδίδονται στη δράση των ρηγμάτων είναι η κατά θέσεις απότομη μεταβολή των πρηνών, η οριοθέτηση της ταφρολεκάνης Μυγδονίας, η δημιουργία τεκτονικών αναβαθμίδων, η μονόπλευρη ανάπτυξη των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Ο συνδυασμός των δύο κατευθύνσεων ρηγμάτων ΒΔ-ΝΑ και Α-Δ ,υπήρξε η γενικότερη μορφή που παρουσιάζει το βύθισμα.

2.5. Γεωλογία

Η περιοχή μελέτης, από γεωλογικής απόψεως ανήκει στη Σερβομακεδονική μάζα, ενώ ένα πολύ μικρό τμήμα στα νοτιοδυτικά ανήκει στην Περιοδοπική ζώνη (Σχήμα 2.4, Σχήμα 2.5).

Σύμφωνα με τα μοντέλα λιθοσφαιρικών πλακών που έχουν προταθεί, η Σερβομακεδονική θεωρείται ηπειρωτική μάζα, τμήμα της Λαυρασίας. Αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα και διαιρείται σε δύο σειρές, την κατώτερη και αρχαιότερη *σειρά των Κερδυλλίων* και την ανώτερη (νεότερη) *σειρά του Βερτίσκου* (Μουντράκης, 1985).

Η Περιοδοτική ζώνη αποτελείται από Περμοτριάδικα και Ιουρασικά μετα-ιζήματα, και χωρίζεται σε τρεις ενότητες. Την ενότητα Ντεβέ Κοράν-Δουμπιά, την ενότητα Μελισσοχωρίου-Χολομώντα και την ενότητα Άσπρης Βρύσης-Χορτιάτη (Μουντράκης, 1985).

Οι προνεογενείς σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή μελέτης είναι οι εξής :

Γνεύσιοι

Οι σχηματισμοί των γνευσίων διακρίνονται στην κατώτερη σειρά των Κερδυλλίων, στο ανατολικό τμήμα της περιοχής, και στην ανώτερη σειρά του Βερίσκου, στο κεντρικό και το δυτικό τμήμα της περιοχής. Οι γνεύσιοι της σειράς των Κερδυλλίων είναι κυρίως βιοτιτικοί, χαλαζοδιοριτικής σύστασης, εξαπλώνονται με διεύθυνση Β-Ν στο ανατολικό όριο της λεκάνης, προέρχονται από μεταμόρφωση παλαιών ιζημάτων ασβεσταλκαλικής σύστασης και θεωρούνται παρα-γνεύσιοι. Οι γνεύσιοι της σειράς Βερτίσκου είναι διμαρμαρυγιακοί, βιοτιτικοί και μοσχοβιτικοί, με εμφανή σχιστότητα. Η ηλικία των πετρωμάτων αυτών είναι Παλαιοζωική-Προπαλαιοζωική (Ψιλοβίκος, 1977).

Μάρμαρα

Τα μάρμαρα απαντώνται υπό μορφή ταινιών ή οριζόντων, εντός των γνευσιακών πετρωμάτων της ανατολικής περιοχής. Παρόμοιοι ορίζοντες εντοπίζονται και εντός των γνευσίων του Βερτίσκου (Ψιλοβίκος, 1977).

Αμφιβολίτες

Το σύστημα των αμφιβολιτών κατέχει τη βόρεια πλευρά της λεκάνης, όμως μικρής έκτασης εμφανίσεις υπάρχουν και νοτιοανατολικά της λίμνης Βόλβης Δεν αποτελούν ομογενή σχηματισμό, αλλά στη σύσταση τους συμμετέχουν βασικά και όξινα πλαγιόκλαστα σε διάφορες αναλογίες, καθώς επίσης και πυρόξενοι κατά θέσεις. Η κεροστίλβη αποτελεί το κύριο ορυκτό συστατικό, ενώ οι άστριοι και ο χαλαζίας συμμετέχουν σε μικρό ποσοστό. Η προέλευση τους αποδίδεται στη μεταμόρφωση παλαιών εκρηξιγενών βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων του Παλαιοζωικού. Μεμονωμένες εμφανίσεις αμφιβολιτών, εντός των γνευσιακών πετρωμάτων της σειράς των Κερδυλλίων, βρέθηκε ότι προήλθαν από μεταμόρφωση παλαιών ιζημάτων και θεωρούνται παρα-αμφιβολίτες (Ψιλοβίκος, 1977).

Φυλλιτική σειρά

Πρόκειται για ένα ιδιαίτερο σύστημα πετρωμάτων φυλλιτικής σύστασης, τα οποία διαφέρουν από τους πετρολογικούς σχηματισμούς της Σερβομακεδονικής

μάζας και κατέχουν τη νοτιοδυτικά πλευρά της λεκάνης. Η σειρά αποτελείται από ημιμεταμορφωμένα και ιζηματογενή πετρώματα, κυρίως φυλλίτες, γραφιτικούς και ψαμμιτικούς, εναλλασσόμενους με ψαμμιτικούς ασβεστολίθους και χαλαζίτες με παρενθέσεις μαρμάρων και φακούς ασβεστολίθων. Οι φυλλιτικοί σχηματισμοί ανήκουν στην ενότητα Μελισσοχωρίου-Χολομώντα (Περιοδοπική ζώνη) και η ηλικία τους θεωρείται Παλαιοζωική (Ψιλοβίκος, 1977).

Ασβεστόλιθοι

Πρόκειται για συμπαγείς ασβεστολίθους, στρωσιγενείς, με εναλλαγές μαρμάρων και δολομιτικών ασβεστολίθων. Εντοπίζονται στο νότιο τμήμα της λεκάνης προς τα δυτικά, ανήκουν στην ενότητα Ντεβέ Κοράν-Δουμπία και στην ενότητα Άσπρης Βρύσης-Χορτιάτη (Περιοδοπική ζώνη) και η ηλικία τους είναι Μέσο – Άνω Τριαδική (Ψιλοβίκος, 1977).

Χαλαζίτες

Εντοπίζονται στο νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης. Ανήκουν στην ενότητα Μελισσοχωρίου-Χολομώντα (Περιοδοπική ζώνη).

Γρανίτες

Οι γρανίτες απαντώνται εντός του συστήματος των γνευσίων της σειράς του Βερτίσκου υπό μορφή γρανιτικών διεισδύσεων, στην περιοχή εκατέρωθεν του δυτικού τμήματος της λίμνης Βόλβης. Οι γρανίτες αυτοί είναι μοσχοβιτικοί, βιοτιτικοί, λευκοκρατικοί, εν μέρει πηγματιτικοί του τύπου Αρναίας, και ηλικίας Μεσοζωικής. Σε ορισμένες περιοχές έχουν γνευσιακή εμφάνιση. Εξαπλώνονται υπό μορφή ζώνης από τα ΝΑ προς τα ΒΔ, και διακόπτονται στην κεντρική περιοχή, της νότιας πλευράς της λίμνης, λόγω κάλυψής τους από ιζηματογενείς σχηματισμούς νεότερης ηλικίας (Ψιλοβίκος, 1977).

Άλλοι προγεογενείς σχηματισμοί

Στην περιοχή μελέτης εμφανίζονται και άλλοι προγεογενείς σχηματισμοί περιορισμένης όμως έκτασης. Πρόκειται για σχιστολίθους, γάββρους, διορίτες, υπερβασικά πετρώματα και ρυολίθους.

Τα ιζήματα, τα οποία εντοπίζονται στη λεκάνη απορροής της λίμνης Βόλβης, διακρίνονται σε δύο μεγάλα συστήματα, το *Προμυγδονιακό* και το *Μυγδονιακό* σύστημα (Ψιλοβίκος, 1977).

Προμυγδονιακό σύστημα

Με τον όρο Προμυγδονιακό σύστημα νοούνται οι ιζηματογενείς σχηματισμοί, οι οποίοι αποτέθηκαν πριν από το σχηματισμό της λεκάνης της Μυγδονίας, μέσα σε

μια ευρύτερη και παλαιότερης ηλικίας λεκάνη, που ονομαζόταν Προμυγδονιακή. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι παλαιότερης ηλικίας των ιζημάτων της Μυγδονίας και υπόκεινται αυτών. Η ηλικία του συστήματος αυτού τοποθετείται μεταξύ Άνω Μειοκαίνου-Κάτω Πλειστοκαίνου. Τα σημαντικότερα μέλη του Προμυγδονιακού συστήματος, από κάτω προς τα πάνω, είναι τα εξής :

1. Ορίζοντες αποσάθρωσής του μεταμορφωμένου υποβάθρου με ανάπτυξη ασβεστιτικών συγκριμάτων. Πρόκειται για μία ζώνη αποσάθρωσης του μαρμαρυγιακού σχιστολίθου και του γνευσίου της περιοχής, αποτελούμενη από αργιλικά υλικά, μέσα στα οποία σχηματίζονται ασβεστιτικά συγκρίματα.
2. Κροκαλοπαγή. Αποτελούν τον κατώτερο σχηματισμό του συστήματος και επικάθονται του μεταμορφωμένου υποβάθρου. Συνίσταται από ψαμμιτικό υλικό, μέσα στο οποίο βρίσκονται κροκάλες διαφόρων μεγεθών, χωρίς εσωτερική διάταξη και προσανατολισμό και με χαλαρή συγκόλληση.
3. Ψαμμίτες. Πρόκειται για το δεύτερο μέλος του Προμυγδονιακού συστήματος και διαδέχονται τα κροκαλοπαγή. Αποτελούνται κυρίως από χαλαζία και σε μικρότερο ποσοστό από αστρίους, μαρμαρυγίες και άλλα μικρότερης σημασίας ορυκτά.
4. Αργιλοψαμμιτικά ιζήματα. Πρόκειται για εναλλασσόμενους σχηματισμούς αργίλου και άμμου. Τα στρώματα άμμου έχουν χαλαρή συνοχή και περιέχουν αστρίους, μαρμαρυγίες, τεμάχια σχιστολίθων και άλλα μικρότερης σημασίας ορυκτά. Εντός των αργιλικών στρωμάτων απαντώνται σε μεγάλη αναλογία μαρμαρυγίες, κυρίως μοσχοβίτης.
5. Ερυθροστρώματα. Με τον όρο ερυθροστρώματα περιγράφονται οι αποθέσεις αργίλου, άμμου και κροκαλών, χαλαρής συνοχής, ερυθρού χρώματος. Οι κροκάλες αποτελούνται από γνευσίους και μαρμαρυγιακό σχιστόλιθο, και σε μικρότερο ποσοστό από πηγματίτη, χαλαζία και σχιστολίθους. Η άμμος είναι χαλαζιακή και περιέχει, επίσης, αστρίους μαρμαρυγία και τεμάχια σχιστολίθων. Η άργιλος είναι εμπλουτισμένη σε μαρμαρυγία ,κυρίως μοσχοβίτη.

Μυγδονιακό σύστημα

Οι σχηματισμοί που βρίσκονται εντός της λεκάνης της Μυγδονίας και χρονολογούνται από τη δημιουργία αυτής (Κάτω Πλειστόκαινο) μέχρι σήμερα, ονομάζονται Μυγδονιακοί και αποτελούν μέλη του Μυγδονιακού συστήματος. Το

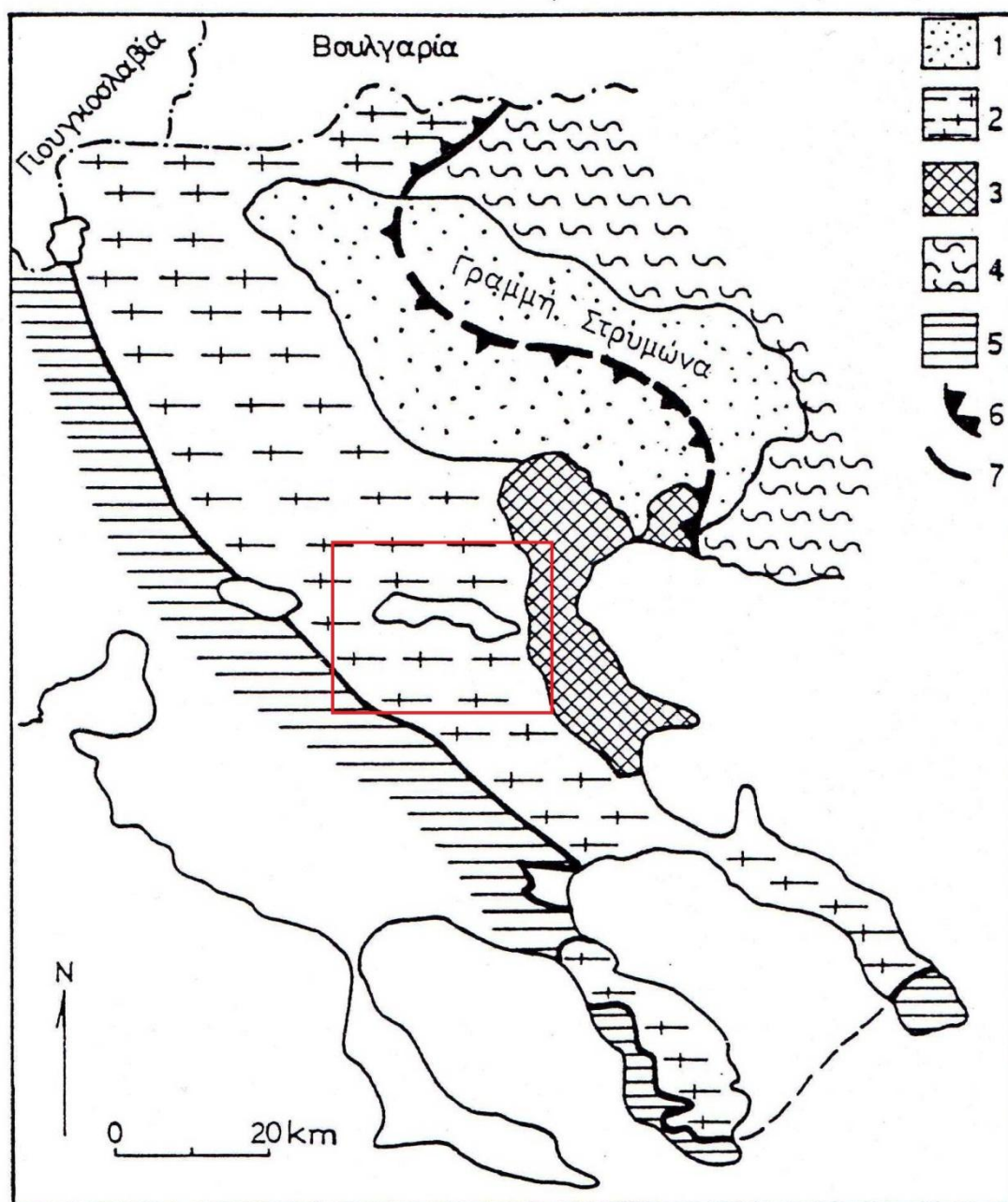
σύστημα αποτελείται από δύο κύριες ακολουθίες ιζημάτων. Η κατώτερη ακολουθία σχηματίστηκε κατά τη φάση πλήρωσης της λεκάνης και περιλαμβάνει :

1. Κατώτερο στρώμα κροκαλών. Στο στρώμα αυτό παρατηρείται ανάμιξη κροκαλών με χονδρόκοκοι άμμο. Οι μεγαλύτερες κροκάλες αποτελούνται από γνεύσιο, μαρμαρυγικό σχιστόλιθο, χαλαζία και πηγματίτη, ενώ οι μικρότερες κροκάλες αποτελούνται από φυλλίτη. Η άμμος έχει μικτή σύσταση, με υπερέχοντα τα φυλλιτικά συστατικά.
2. Στρώμα άμμου με σαφή διαβάθμιση. Η άμμος στο κατώτερο τμήμα του στρώματος είναι χονδρόκοκοι αναμεμιγμένη με μικρές κροκάλες, ενώ στα ανώτερα τμήματα παρατηρείται βαθμιαία μείωση του μεγέθους της προς μεσόκοκκο και λεπτόκοκκο. Ο χαλαζίας, ο φυλλίτης και οι μαρμαρυγίες αποτελούν τα σημαντικότερα συστατικά της άμμου.
3. Στρώμα αργιλικών στρώσεων. Το στρώμα αυτό υπέρκειται του στρώματος της άμμου και στο όριο αυτών παρατηρείται μία φάση εναλλασσόμενων στρώσεων αργίλου και άμμου.
4. Ανώτερο στρώμα άμμου. Αποτελείται από χαλαζία και μαρμαρυγία, και περιέχει, επίσης, και αργιλικό υλικό σε ανάμιξη. Η άμμος είναι λεπτόκοκη.

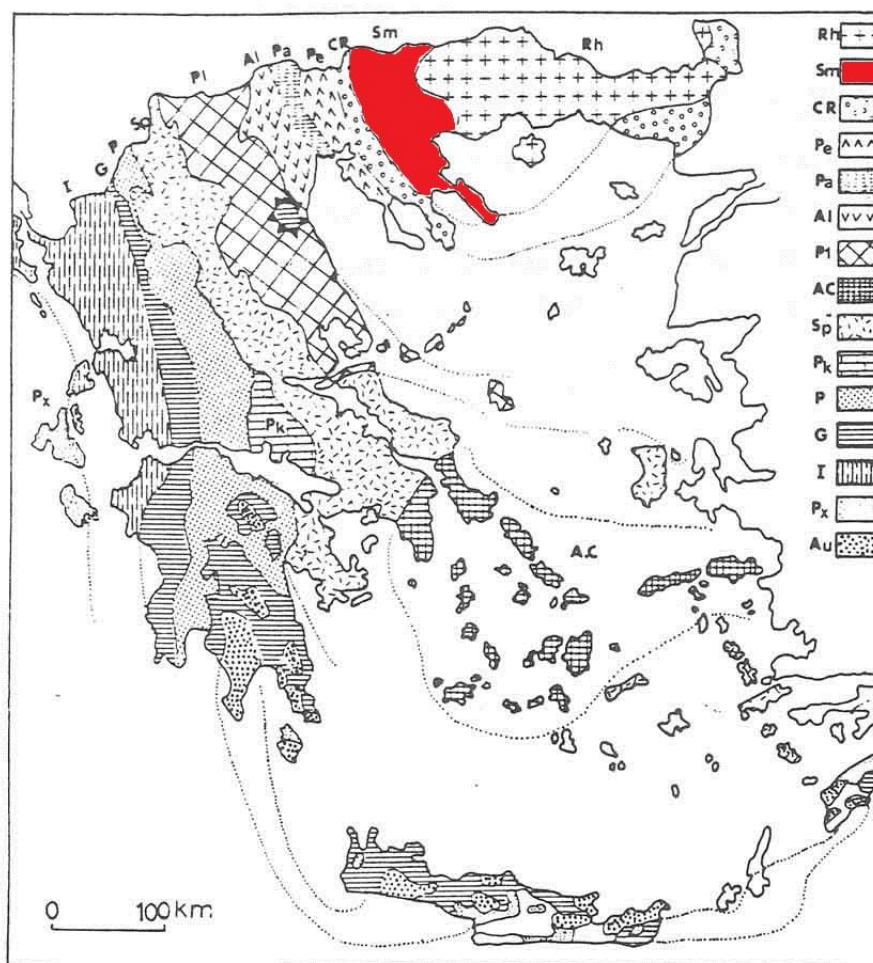
Η ανώτερη ακολουθία σχηματίστηκε κατά τη φάση υποχώρησης της ελεύθερης στάθμης της Μυγδονίας λίμνης και περιλαμβάνει :

1. Στρώματα αργιλικών στρώσεων.
2. Στρώμα εναλλασσόμενων στρώσεων αργίλου και άμμου.
3. Στρώμα άμμου με σαφή διαβάθμιση.
4. Στρώμα παράκτιων κροκαλών και άμμου.
5. Στρώμα χημικών ιζημάτων.

Η ανάπτυξη των στρωμάτων των δύο ακολουθιών παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Τα λιμναία αργιλικά στρώματα αποκτούν μεγάλο πάχος στο χαμηλό κεντρικό τμήμα της λεκάνης, ενώ στα περιθώρια αυτής η παρουσία παράκτιων, δελταϊκών, ριπιδιοδελταϊκών και άλλων ποταμολιμναίων ιζημάτων είναι σημαντική. Η εξάπλωση των χημικών ιζημάτων γίνεται ανομοιόμορφα εντός της λεκάνης, και οφείλεται στην κατά περιοχή δράση θερμομεταλλικών πηγών κατά το παρελθόν.



Σχήμα 2.5. Τεκτονικό σκαρίφημα της Σερβομακεδονικής μάζας. 1 : μεταλικά ιζήματα της κοιλάδας του Στρυμόνα, 2 : σειρά του Βερτίσκου, 3 : σειρά των Κερδυλλίων, 4 : μάζα της Ροδόπης, 5 : Περιροδοπική ζώνη, 6 : ανατολικό όριο της Σερβομακεδονικής (Γραμμή Στρυμόνα), 7 : δυτικό όριο της Σερβομακεδονικής (Μουντράκης, 1985). Στο κόκκινο τετράγωνο φαίνεται η περιοχή μελέτης.



Σχήμα 2.5. Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών (Μουντράκης, 1985). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η Σερβομακεδονική μάζα.

2.6. Νεοτεκτονική

Στην περιοχή μελέτης έχουν δημιουργηθεί κατά το νεοτεκτονικό στάδιο (Νεογενές-Τεταρτογενές) τεκτονικά βυθίσματα και λεκάνες. Τα βυθίσματα αυτά πιστεύεται ότι δημιουργήθηκαν από τη δράση ενός έντονου και συνεχούς εφελκυστικού πεδίου, από το Μειόκαινο μέχρι σήμερα, που είχε ως αποτέλεσμα το σχηματισμό κατά κανόνα κανονικών ρηγμάτων με μικρή συνήθως συνιστώσα οριζόντιας μετατόπισης (διεύθυνσης ολίσθησης). Τα ρήγματα έχουν κύριες διευθύνσεις Α-Δ μέχρι ΑΒΑ-ΔΝΔ και ΒΔ-ΝΑ, ενώ παρατηρούνται και ορισμένα στη διεύθυνση Β-Ν. Τα περισσότερα από τα ρήγματα λειτούργησαν από το Μειόκαινο, ενώ ορισμένα εξακολουθούν αποδεδειγμένα να βρίσκονται σε ενεργό κατάσταση μέχρι σήμερα, προκαλώντας μεγάλους και μικρούς σεισμούς, και για κάποια άλλα υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι λειτούργησαν στο Τεταρτογενές. Τα ενεργά και πιθανά ενεργά ρήγματα της περιοχής (Σχήμα 2.6) είναι τα εξής (Μουντράκης κ.ά., 1996):

- **Σεισμικό ρήγμα Γερακαρούς-Νικομηδινού-Στίβου-Περιστερώνα.** Η γενική διεύθυνση του σεισμικού ρήγματος είναι Α-Δ, ενώ κατά θέσεις εμφανίζεται από ΔΒΔ-ΑΝΑ μέχρι ΑΒΑ-ΔΝΔ, αφού παρουσιάζει τοξοειδή ανάπτυξη, με μετάπτωση προς βορρά. Επιφανειακά εμφανίζεται με μεγάλη γωνία κλίσης (75°-85°) προς βορρά, η οποία μειώνεται συνεχώς με το βάθος (φτάνει μέχρι 35°). Το ρήγμα είναι ευδιάκριτο στις δορυφορικές εικόνες και τις αεροφωτογραφίες. Στο ύπαιθρο εντοπίζεται από τις τεκτονικές αναβαθμίδες που δημιουργεί, και αντιστοιχούν είτε στο γεωλογικό όριο μεταξύ υποβάθρου και νεότερων ιζημάτων της λεκάνης (Νεογενών και Τεταρτογενών), είτε στο γεωλογικό όριο των Κάτω Πλειστοκαινικών αποθέσεων (Σχηματισμός Γερακαρούς) και των Μέσο-Ανω Πλειστοκαινικών ιζημάτων, όπου στα τελευταία παρατηρούνται δύο επιπλέον κλάδοι ρηγμάτων παρόμοιας γενικής γεωμετρίας με το κύριο ρήγμα. Το συνολικό άλμα του ρήγματος, σε όλη τη διάρκεια του Τεταρτογενούς, με βάση τις ιζηματολογικές ενδείξεις είναι 250m.
- **Ενεργό ρήγμα Λουτρών Βόλβης-Απολλωνίας.** Αποτελεί τη συνέχεια, προς τα ανατολικά, του ρήγματος Γερακαρούς-Νικομηδινού-Στίβου-Περιστερώνα, από τον Περιστερώνα προς την Απολλωνία δια μέσου των Λουτρών Βόλβης. Διαπιστώνεται και στα πετρώματα του υποβάθρου και στα νέα ιζήματα (Τεταρτογενή), όπου αναγνωρίζεται είτε με μικρές ρηξιγενείς επιφάνειες, είτε με τεκτονικές αναβαθμίδες, είτε από τη γραμμική εμφάνιση χημικών ιζημάτων (τραβερτινών), κυρίως στην περιοχή βόρεια της Ν. Απολλωνίας. Το ρήγμα έχει μήκος περίπου 10km, γενική διεύθυνση Α-Δ μέχρι ΔΒΔ-ΑΝΑ και μετάπτωση προς βορρά. Η σύνδεσή του με τις θερμές πηγές της Βόλβης διαπιστώνεται από το γεγονός ότι κατά μήκος του ρήγματος, και συγκεκριμένα εκεί που διασταυρώνεται με δύο μικρότερα ρήγματα ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης, εκδηλώνονται θερμές πηγές. Το συνολικό άλμα του ρήγματος στο Τεταρτογενές θεωρείται ότι είναι ανάλογο του ρήγματος Γερακαρούς-Νικομηδινού-Στίβου-Περιστερώνα, του οποίου αποτελεί και συνέχεια.
- **Σεισμικό ρήγμα μεταξύ των λιμνών Βόλβης-Κορώνειας.** Πρόκειται για ένα κανονικό ρήγμα με μετάπτωση προς τα ΒΒΑ και κόβει τις πρόσφατες αλλουβιακές προσχώσεις του βυθίσματος στο χώρο μεταξύ των λιμνών.
- **Σεισμικό ρήγμα Σχολαρίου.** Είναι τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης Σχολαρίου-Ανάληψης-Ασσήρου, η οποία οριοθετεί τη βορειοανατολική πλευρά του

βυθίσματος Λαγκαδά, από το χωριό Σχολάρι μέχρι την Άσσηρο. Πρόκειται για κανονικό ρήγμα γενικής διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ με μετάπτωση προς τα ΝΔ και σημαντική αριστερόστροφη συνιστώσα, και έχει μήκος 8km. Είναι ορατό στις αεροφωτογραφίες και στο ύπαιθρο, ως ευθύγραμμη τεκτονική αναβαθμίδα κατά μήκος της λεκάνης του Λαγκαδά. Αντίθετα, το τμήμα του ρήγματος που διασχίζει το βύθισμα της Μυγδονίας δεν είναι ορατό, εκτός από μια τεκτονική αναβαθμίδα στο χωριό Σχολάρι.

- **Ενεργά και πιθανά ενεργά ρήγματα Νυμφόπετρας-Μεγάλης Βόλβης.** Αποτελείται από μία ομάδα ασυνεχών ρηγμάτων, μήκους 2-4km το καθένα, διεύθυνσης Α-Δ και κλίση προς το νότο, στη βόρεια πλευρά του βυθίσματος της Βόλβης. Συνεχείς ρηξιγενείς επιφάνειες δεν είναι ορατές και η ύπαρξη της ρηξιγενούς αυτής γραμμής τεκμηριώνεται από σειρά γεωμορφολογικών φαινομένων (αναβαθμίδες, απότομα πρηνή, απότομη αλλαγή υδρογραφικού δικτύου, κ.ά), σε μία περιοχή που το μορφοανάγλυφο είναι γενικά ομαλό. Επίσης, στην περιοχή αυτή εκδηλώνεται πλήθος μικροσεισμών.
- **Ενεργό ρήγμα Ν. Απολλωνίας.** Αποτελεί συνεχή ρηξιγενή γραμμή, γενικής διεύθυνσης Α-Δ, που διέρχεται σε απόσταση 1km νότια του χωριού Ν. Απολλωνίας. Το δυτικότερο τμήμα του ρήγματος εντοπίζεται στα πετρώματα του υποβάθρου με διεύθυνση που κυμαίνεται από ΒΔ-ΝΑ μέχρι Α-Δ και είναι σχεδόν παράλληλο με το περιθωριακό ρήγμα Απολλωνίας, ενώ το υπόλοιπο τμήμα διασχίζει εγκάρσια, με διεύθυνση Α-Δ την υπολεκάνη Ν. Απολλωνίας-Μαραθούσας. Από τη συνέχεια των Νεογενών ιζημάτων της υπολεκάνης στην περιοχή ΝΔ της Ν. Απολλωνίας, υπολογίζεται ότι το άλμα του ρήγματος στο Τεταρτογενές είναι 5m, ενώ στο ανατολικό του άκρο, όπου οριοθετεί τα νέα ιζήματα από το υπόβαθρο, το άλμα εκτιμάται λίγο μεγαλύτερο.
- **Πιθανό ενεργό ρήγμα στο υπόβαθρο Νότια της Βόλβης.** Είναι κανονικό και σχεδόν κατακόρυφο ρήγμα με διεύθυνση Β-Ν και μετάπτωση προς τα ανατολικά, μήκους περίπου 6km και αναπτύσσεται στα μεταμορφωμένα πετρώματα της Σερβομακεδονικής και στο γρανίτη της Αρναίας, που συνιστούν το υπόβαθρο στα υψώματα νότια της λίμνης και δυτικά του χωριού Ν. Απολλωνία.
- **Πιθανό ενεργό ρήγμα Μαραθούσας.** Πρόκειται για ένα κανονικό ρήγμα, ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης και μετάπτωσης προς τα νοτιοδυτικά. Ο εντοπισμός του έγινε

από αεροφωτογραφίες, την ανάπτυξη του ρέματος σε ευθεία γραμμή, τη μονόπλευρη ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου και την παρατηρούμενη κατακόρυφη μετατόπιση οριζόντιων στρωμάτων. Το ρήγμα αναπτύσσεται αποκλειστικά μέσα στα Κάτω Πλειστοκαινικά ιζήματα.

- **Πιθανά ενεργά ρήγματα λεκάνης Ζαγκλιβερίου.** Μία σειρά ρηγμάτων με γενική διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ οριοθετούν τη λεκάνη Ζαγκλιβερίου και εκτείνονται μέχρι τη λεκάνη της Μαραθούσας. Είναι παράλληλα προς τα ενεργά ρήγματα της περιοχής, έχουν άμεση σχέση με το σημερινό μορφοανάγλυφο, οριοθετούν πολλές φορές τα πετρώματα του υποβάθρου με τα νέα ιζήματα, συνδέονται με μεταλλικές πηγές (Δουμπιά) και σε μία περίπτωση (χωριό Σανά) επηρεάζουν τα Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα.
- **Ενεργό ρήγμα Σοχού.** Αποτελεί μία μεγάλου μήκους συνεχή ρηξιγενή γραμμή γενικής διεύθυνσης Α-Δ, που διέρχεται από τα χωριά Σοχός-Αυγή-Κρυονέρι-Πέντε Βρύσες, και είναι πιθανή η συνέχειά του προς τα ανατολικά στο χωριό Μαυρούδα στη βόρεια πλευρά της Βρωμολίμνης. Το συνολικό μήκος, μαζί με την πιθανή προέκταση προς τη Μαυρούδα, φτάνει τα 40km. Η ρηξιγενής γραμμή διακρίνεται πολύ καλά στις δορυφορικές εικόνες και τις αεροφωτογραφίες, και στο ύπαιθρο. Πρόκειται για τυπικό κανονικό ρήγμα με μετάπτωση προς τα νότια. Σε όλο το μήκος του επηρεάζει τα μεταμορφωμένα και γρανιτικά πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας, καθώς και σε ορισμένες θέσεις τα ιζήματα της Προμυγδονιακής ομάδας (Άνω Μειόκαινο-Κάτω Πλειστόκαινο). Υπάρχουν γεωμορφολογικά κριτήρια για την τεκμηρίωση της ενεργού δράσης του ρήματος, όπως η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου κατά μήκος του ρήματος. Επίσης, ένα πρόσφατο τεκτονικό βύθισμα μεταξύ των χωριών Σοχός και Κρυονέρι είναι το αποτέλεσμα της γεωλογικά πρόσφατης επαναδραστηριοποίησης του ρήματος. Άλλες ενδείξεις για την ενεργό δράση του αποτελούν η απότομη μεταβολή της κλίσης των κλιτύων κατά μήκος του ρήματος, η ανάπτυξη σύγχρονων πλευρικών κορημάτων.

Παρά το γεγονός ότι το νεοτεκτονικό στάδιο δε σχετίζεται με τη διαίρεση του Ελληνικού χώρου σε γεωτεκτονικές ζώνες, θα πρέπει να σημειωθεί η ιδιαίτερη σεισμοτεκτονική συμπεριφορά της Σερβομακεδονικής μάζας, η οποία είναι η περισσότερο ενεργή σεισμική ζώνη του Βορειοελλαδικού χώρου και των γύρω περιοχών.

Ο ρόλος της Σερβομακεδονικής έχει διερευνηθεί σημαντικά, και έχει εξεταστεί η ιδιαίτερη τεκτονική συμπεριφορά της, τόσο σε σχέση με τις συνεχείς παράλληλες Νεογενείς-Τεταρτογενείς τάφρους που έχουν σχηματιστεί στο χώρο της Σερβομακεδονικής κατά διεύθυνση Α-Δ, όσο και σε σχέση με τα δύο της όρια, το ανατολικό όριο με τη μάζα της Ροδόπης που αποτελεί τη γνωστή *‘τεκτονική γραμμή Στρυμόνα’*, και το δυτικό όριο με την Περιροδοπική ζώνη που εκτείνεται από τα Ελληνογιουγκοσλαβικά σύνορα μέχρι τη Μυγδονία λεκάνη και το Βόρειο Αιγαίο. Τα δύο αυτά όρια αποτελούν ίσως τις κύριες γραμμές ευαισθησίας του φλοιού στην περιοχή, και καθιστούν τη Σερβομακεδονική μάζα την πλέον ενεργή σεισμοτεκτονικά ζώνη (Μουντράκης κ.ά., 1996).

2.7. Γεωθερμία

Στη νότια πλευρά της λίμνης Βόλβης εντοπίζεται ένα αξιόλογο γεωθερμικό πεδίο. Η ανάβλυση θερμών πηγών, θερμοκρασίας 38-50°C σε μερικές παραλίμνιες θέσεις, τόσο μετωπικά όσο και σημειακά, αποτελεί επιφανειακή εκδήλωση της ύπαρξης γεωθερμικού πεδίου στην περιοχή (ιαματική πηγή Ν. Απολλωνίας, Λουτρά Βόλβης).

Η ενεργός τεκτονική είναι η αιτία της δημιουργίας του γεωθερμικού πεδίου Ν. Απολλωνίας. Σημαντικό ρόλο στη νεοτεκτονική δομή της περιοχής των Λουτρών Βόλβης παίζει η παρουσία μεγάλων ρηξιγενών δομών γενικής διεύθυνσης Α-Δ, που αποτελούν τα επιφανειακά ίχνη του μεγάλου περιθωριακού ρήγματος της Βόλβης, στη νότια πλευρά της λίμνης. Το ρήγμα αυτό, εκτός από τη σύγχρονη σεισμική του δράση (Papazachos et al, 1979, από Κουτσίνο κ.ά., 2006), είχε επανειλημμένες δραστηριοποιήσεις στο πρόσφατο παρελθόν, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κλιμακωτών επιφανειακών εκδηλώσεων, που αναγνωρίζονται είτε ως ορατές ρηξιγενείς επιφάνειες, είτε ως μορφοτεκτονικές αναβαθμίδες, είτε από την εμφάνιση των τραβερτινών. Πρόκειται για κανονικό ρήγμα διεύθυνσης Α-Δ πολλών km με κλίση και μετάπτωση προς βορρά. Εκτός από το ρήγμα αυτό με τα παράλληλά του,

υπάρχουν και συστήματα ρηγμάτων BA-NΔ και ΒΔ-NA διεύθυνσης, τα οποία έχουν πρόσφατη δράση και παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία των θερμών πηγών, αλλά και στην υπόγεια κυκλοφορία του νερού της περιοχής.

Η κύρια ζώνη γεωθερμικού ενδιαφέροντος που εντοπίστηκε στην περιοχή της Ν. Απολλωνίας, προσδιορίστηκε σε μία έκταση 2km², εκτεινόμενη 1,5km ανατολικά των Λουτρών της Ν. Απολλωνίας και φθάνοντας μέχρι 500m δυτικά των Λουτρών. Τα γεωθερμικά ρευστά εμφανίζονται σε μικρά βάθη, 50-110m, και έχουν θερμοκρασία 34-50°C (Κουτσίνος κ.ά., 2006).

2.8. Κλίμα

Κατά Koerppen (Ζεϊμπέκη, 2004, από Μπάλλα, 2007) η περιοχή υπάγεται στον τύπο κλίματος Csa, τα χαρακτηριστικά του οποίου είναι μεσόθερμο κλίμα (μεταβατικό μεταξύ μεσογειακού και ηπειρωτικού τύπου) με ξηρή περίοδο το καλοκαίρι, ενώ στα ανώτερα υψόμετρα επικρατούν δριμύτερες κλιματικές καταστάσεις. Ο μέσος όρος των θερμοκρασιών είναι περίπου 15°C. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η λίμνη Βόλβη αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα για το κλίμα της περιοχής, αφού ο υδάτινος όγκος αποτελεί 'αποθήκη' θερμότητας, επηρεάζοντας τη θερμοκρασία και την υγρασία (Μυλόπουλος και Τολίκας, 2002, από Μπάλλα, 2007).

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1. Υλικά

Για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής ειδίκευσης χρησιμοποιήθηκαν :

Χαρτογραφικά δεδομένα

- ✓ Τοπογραφικοί χάρτες κλίμακας 1:50.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.) (Φύλλα : Αρναία (1983), Βασιλικά (1982), Ζαγκλιβέριον (1982), Θέρμη (1970), Πολύγυρος (1982), Σιτοχώριον (1969), Σοχός (1980), Σταυρός (1970)).
- ✓ Γεωλογικοί χάρτες κλίμακας 1:50.000 του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) (Φύλλα : Αρναία (1978), Βασιλικά (1978), Ζαγκλιβέριον (1978), Θέρμη (1978), Πολύγυρος (1978), Σιτοχώριον (1970), Σοχός (1979), Σταυρός (1978)).

Δορυφορικές εικόνες

- ✓ Εικόνα Landsat-7/ETM+, με χαρακτηριστικά :
 - ❖ Path : 183.
 - ❖ Row : 032.
 - ❖ Raw Columns : 6920 (multispectral)/13840 (panchromatic).
 - ❖ Raw Rows : 5960 (multispectral)/11920 (panchromatic).
 - ❖ Raw Pixel Size : 30 (multispectral)/15 (panchromatic).

Η ημερομηνία λήψης της εικόνας είναι 11-01-2001.

- ✓ Εικόνες του Google Earth, υψηλής χωρικής ανάλυσης.

Τοπογραφικά δεδομένα SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) v2, με μέγεθος ψηφίδας 3arcsec (90m x 90m, για το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής μελέτης), τα οποία διατίθενται δωρεάν μέσω του διαδικτύου.

Εξοπλισμός

Προσωπικός φορητός Η/Υ με λειτουργικό σύστημα Windows 7 Ultimate, επεξεργαστή στα 2.00GHz, 2,00GB μνήμης RAM και 150GB αποθηκευτικό χώρο.

Λογισμικά

- ✓ Το λογισμικό ArcGIS v9.3 (έκδοση ArcInfo), με τα υποπρογράμμάτα του (ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox) και τις επιμέρους λειτουργίες και επεκτάσεις (extensions) τους.

- ✓ Το λογισμικό MapInfo Professional 8.0 SCP.
- ✓ Το λογισμικό Global Mapper (v12.00).
- ✓ Το λογισμικό ENVI 4.8.
- ✓ Το λογισμικό MatLab v13.
- ✓ Το λογισμικό Google Earth.
- ✓ Το λογισμικό Goord_gr.
- ✓ Εφαρμογές του Microsoft Office (Word, Excel, Powerpoint).
- ✓ Εφαρμογή Picture Manager.

3.2. Μέθοδοι

Για την πραγματοποίηση της μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν τοπογραφικοί χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.) και γεωλογικοί χάρτες του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), κλίμακας 1:50.000. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα εξής φύλλα :

- ✓ Αρναία.
- ✓ Βασιλικά.
- ✓ Ζαγκλιβέριον.
- ✓ Θέρμη.
- ✓ Πολύγυρος.
- ✓ Σιτοχώριον.
- ✓ Σοχός.
- ✓ Σταυρός.

Το Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε, είναι το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ87), το οποίο βασίζεται στο Ελληνικό Datum και υλοποιήθηκε το 1987. Χρησιμοποιεί το ελλειψοειδές GRS80, με αρχή το κεντρικό βάθρο του Διονύσου. Η Ελλάδα είναι χωρισμένη σε μία ζώνη, με κεντρικό μεσημβρινό $\lambda_0=24^0$ και συντελεστή κλίμακας 0,9996. Ο κεντρικός μεσημβρινός απεικονίζεται στο επίπεδο σαν άξονας των Y, ενώ ο ισημερινός σαν άξονας των X. Για να μην υπάρχουν αρνητικές συντεταγμένες στον άξονα των X, θεωρήθηκε ότι ο κεντρικός μεσημβρινός έχει τιμή $X_0=500.000\text{m}$. Η προβολή είναι εγκάρσια μερκατορική (Κουτσόπουλος & Ανδρουλακάκης, 2005).

Αρχικά, κρίθηκε απαραίτητη η γεωαναφορά (εργαλειοθήκη Georeferencing) των χαρτών που προαναφέρθηκαν, στο περιβάλλον του ArcGIS. Η γεωαναφορά έγινε

με την προσθήκη σημείων ελέγχου (Add control points). Τα σημεία αυτά ήταν τα τέσσερα ακραία σημεία των χαρτών, τα οποία έχουν συγκεκριμένες συντεταγμένες. Επειδή, όμως, το προβολικό σύστημα αναφοράς των χαρτών (σύστημα UTM) είναι διαφορετικό από το σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διατριβή (σύστημα ΕΓΣΑ87), έγινε μετατροπή των συντεταγμένων με τη βοήθεια του προγράμματος Goord_gr. Τέλος, έπρεπε να ελεγχθεί το σφάλμα της γεωαναφοράς (View link table), το οποίο πρέπει να είναι <10 , και να αποθηκευτούν οι αλλαγές (Update Georeferencing).

Στο ArcCatalog του ArcGIS δημιουργήθηκαν τα απαραίτητα σχηματικά αρχεία (shapefiles) :

1. Υδρογραφικό δίκτυο.
2. Λιθολογία.
3. Ρήγματα.

και στη συνέχεια στο ArcMap του ArcGIS έγινε η ψηφιοποίηση των οντοτήτων με τη χρήση της εργαλειοθήκης του Editor. Παράλληλα με την παραγωγή των παραπάνω επιπέδων πληροφοριών, έγινε και η συγκρότηση της βάσης δεδομένων, με την προσθήκη πεδίων στους πίνακες περιεχομένων (attributes tables).

Το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου που χρησιμοποιήθηκε είναι το SRTM DEM, το οποίο έχει χωρική ανάλυση 90m και ενδείκνυται για περιοχές με χαμηλό ανάγλυφο. Από το SRTM DEM έγινε αυτόματη εξαγωγή των ισοϋψών καμπυλών, μέσω της επέκτασης του Spatial Analyst→Surface Analysis→Contours. Οι ισοϋψείς καμπύλες σε συνδυασμό με το υδρογραφικό δίκτυο, που είχε ψηφιοποιηθεί από τους τοπογραφικούς χάρτες, βοήθησαν στην οριοθέτηση και ψηφιοποίηση της υδρολογικής λεκάνης της λίμνης Βόλβης. Επίσης, από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, έγινε εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου (ArcToolbox→Spatial Analyst Tools→Hydrology), για να συγκριθεί με το υδρογραφικό δίκτυο των τοπογραφικών χαρτών.

Το όριο της λίμνης ψηφιοποιήθηκε στο Google Earth ως πολύγωνο και εισήχθη στο ArcGIS. Απαραίτητη ήταν η μετατροπή του προβολικού συστήματος αναφοράς (ArcToolbox→Data Management Tools→Projections and Transformations→Features→Project), από WGS84 (που είναι το προβολικό σύστημα του Google Earth) σε ΕΓΣΑ87. Συμφωνά με το όριο αυτό έγινε αφαίρεση (ArcToolbox→Analysis Tools→Overlay→Erase) της έκτασης της λίμνης, για να γίνει η χωρική ανάλυση, χωρίς να επηρεάζεται από την επιφάνεια αυτή.

Προϊόντα του Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου αποτελούν το σκιασμένο ανάγλυφο (hillshade), η κλίση (slope) και ο προσανατολισμός (aspect) των κλιτύων. Προκύπτουν από το Spatial Analyst→Surface Analysis, και εν συνεχεία γίνεται ομαδοποίηση σε κλάσεις (Spatial Analyst→Reclassify) τόσο της κλίσης, όσο και του προσανατολισμού. Τέλος, εφαρμόζοντας το Reclassify απευθείας στο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, γίνεται η ταξινόμηση του υψομέτρου.

Οι μετρήσεις μήκους και εμβαδού έγιναν απευθείας από τους πίνακες περιεχομένων με την εντολή calculate geometry. Σε ορισμένα αρχεία για να μπορέσει να γίνει ο παραπάνω υπολογισμός, κρίθηκε απαραίτητη η μετατροπή τους (από ψηφιδωτά αρχεία σε σχηματικά αρχεία) μέσω του Spatial Analyst→Convert.

Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε υπολεκάνες, για να μπορέσει να μελετηθεί από μορφολογική άποψη. Αφού ψηφιοποιήθηκαν τα όρια των υπολεκανών, κόπηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (Spatial Analyst Tools→Extraction→Extract by Mask), σε μικρότερα τμήματα, με βάση τα όρια αυτά, και για κάθε λεκάνη υπολογίστηκαν τρεις μορφοτεκτονικοί δείκτες (υψομετρική καμπύλη, υψομετρικό ολοκλήρωμα και δείκτης SL).

Για τη δημιουργία της υψομετρικής καμπύλης, αρχικά μετατράπηκαν τα αρχεία των κομμένων Ψηφιακών Μοντέλων Αναγλύφου, με τη βοήθεια του προγράμματος Global Mapper, ώστε να γίνει η επεξεργασία τους στο περιβάλλον του MapInfo. Αφού έγινε η μετατροπή, δημιουργήθηκαν ιστογράμματα υψομέτρου, (Vertical Mapper→Show/Hide Grid Manager). Από τα ιστογράμματα έγινε εξαγωγή των τιμών, οι οποίες εισήχθησαν σε ένα φύλλο excel, όπου με βάση αυτό το excel σχηματίστηκαν απευθείας οι υψομετρικές καμπύλες.

Το υψομετρικό ολοκλήρωμα δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{\text{μέσο υψόμετρο} - \text{ελάχιστο υψόμετρο}}{\text{μέγιστο υψόμετρο} - \text{ελάχιστο υψόμετρο}}$$

Οι παράμετροι της σχέσης υπολογίστηκαν αυτόματα από το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου κάθε υπολεκάνης στο ArcGIS (Properties→Source).

Το σχήμα της υψομετρικής καμπύλης και η τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος δείχνουν το στάδιο εξέλιξης του αναγλύφου που βρίσκεται η υπολεκάνη.

Ο δείκτης SL δίνεται από τη σχέση :

$$SL = \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right) \cdot L$$

και χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει πρόσφατη τεκτονική δραστηριότητα. Αρχικά, βρέθηκε ο κλάδος μέγιστου μήκους της κάθε υπολεκάνης και χωρίστηκε σε τμήματα. Για κάθε τμήμα υπολογίστηκε η τιμή του δείκτη SL, στο ArcGIS. Οι παράμετροι της σχέσης υπολογίστηκαν από τους πίνακες περιεχομένων (attribute table→calculate geometry). Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν τομές κατά μήκος του κλάδου με το μέγιστο μήκος, μέσω της επέκτασης του 3d Analyst (Interpolate line→Create profile graph). Από το γράφημα που προέκυψε έγινε εξαγωγή των X και Y, τα οποία επεξεργάστηκαν στο περιβάλλον του MatLab και κατασκευάστηκαν τα μορφολογικά προφίλ των υπολεκανών, όπου φαίνεται πώς μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη SL.

Η υδρογραφική πυκνότητα είναι ο λόγος του συνολικού μήκους του υδρογραφικού δικτύου προς τη συνολική έκταση του λιθολογικού σχηματισμού. Για τον υπολογισμό της, στο περιβάλλον του ArcGIS, έγινε συνδυασμός των ψηφιοποιημένων αρχείων της λιθολογίας και του υδρογραφικού δικτύου, που είχαν δημιουργηθεί με υπόβαθρο τους γεωλογικούς και τοπογραφικούς χάρτες, αντίστοιχα. Με βάση το αρχείο της λιθολογίας, έγινε :

1. επιλογή ενός σχηματισμού (δεξί κλικ στο επίπεδο της λιθολογίας→Properties→Definition Query→Query Builder), και
2. σύμφωνα με το όριο αυτό κόσμιο του υδρογραφικού δικτύου (ArcToolbox→Analysis Tools→Extract→Clip).

Εν συνεχεία, έγινε ένωση του υδρογραφικού δικτύου (Editor→Merge) σε μία οντότητα και υπολογίστηκε από τους πίνακες περιεχομένων το μήκος του και η έκταση του λιθολογικού σχηματισμού. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλους τους σχηματισμούς.

Η δορυφορική εικόνα Landsat-7/ETM+ επεξεργάστηκε στο περιβάλλον του ENVI, ώστε να γίνει διάκριση των λιθολογικών σχηματισμών και εντοπισμός των γραμμώσεων.

Αρχικά, έγινε συγχώνευση (Transform→Image Sharpening→PC Spectral Sharpening) των φασματικών ζωνών 1, 2, 3, 4, 5 και 7 με την παγχρωματική ζώνη, με σκοπό την επίτευξη καλύτερης διακριτικής ικανότητας (15m αντί 30m). Συγχώνευση δεν έγινε στη φασματική ζώνη 6, λόγω της χαμηλής διακριτικής ικανότητάς της (60m).

Στη συνέχεια, έγινε η παραγωγή του δείκτη βλάστησης (Transform→NDVI), ώστε να εντοπιστούν οι περιοχές με πολύ πυκνή βλάστηση, στις οποίες δε μπορεί να γίνει διάκριση της λιθολογίας.

Οι τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν για να γίνει η εξαγωγή των συμπερασμάτων είναι :

1. Ανάλυση κύριων συνιστωσών (Transform→Principal Components→ Forward PC Rotation→Compute New Statistics and Rotate).
2. Λόγοι ζωνών (Transform→Band Ratios).
3. Μετασχηματισμός χρώματος HSV (Transform→Color Transforms→RGB to HSV, και το αντίστροφο, Transform→Color Transforms→ HSV to RGB).
4. Ψευδοχρωματικά σύνθετα, τα οποία δημιουργούνται φορτώνοντας τις επιθυμητές ζώνες ή οποιοδήποτε αποτέλεσμα από τις παραπάνω τεχνικές, στο RGB του παραθύρου Available bands list.
5. Ενίσχυση εικόνων (Enhance).

Οι επεξεργασμένες εικόνες εισήχθησαν στο ArcGIS, σε μορφή tiff-geotiff. Δημιουργήθηκαν νέα σχηματικά αρχεία, μέσω του ArcCatalog, και ψηφιοποιήθηκαν, στο ArcMap, οι λιθολογικοί σχηματισμοί και οι γραμμώσεις. Τα νέα αυτά αρχεία συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αρχεία, που είχαν δημιουργηθεί από ψηφιοποίηση των γεωλογικών και τοπογραφικών χαρτών.

Τέλος, στα σχηματικά αρχεία των ρηγμάτων και των γραμμώσεων, εκτός από τη μέτρηση του μήκους, που έγινε απευθείας από τους πίνακες περιεχομένων (calculate geometry), έγινε και ο υπολογισμός των αζιμουθίων. Αυτό επιτεύχθηκε με τη βοήθεια ενός ειδικού εργαλείου που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του ArcGIS. Οι πίνακες περιεχομένων με τα μήκη και τα αζιμούθια εξήχθησαν (ArcToolbox→Data Interoperability Tools→Quick Export), επεξεργάστηκαν στο

excel και κατασκευάστηκαν ροδοδιαγράμματα (αζιμούθιο/συνολικό μήκος ρηγμάτων, αζιμούθιο/συνολικό μήκος γραμμώσεων).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Υδρολογική λεκάνη της λίμνης Βόλβης

Υδρολογική λεκάνη (ή λεκάνη απορροής) είναι το τμήμα εκείνο της επιφάνειας του εδάφους, πάνω στο οποίο τα νερά που ρέουν επιφανειακά, φέρονται με το υδρογραφικό σύστημα στην κοίτη ποταμού, ο οποίος τα οδηγεί στη θάλασσα ή σε λίμνη (Σούλιος, 1996).

Στην περίπτωση της λίμνης Βόλβης, η υδρολογική λεκάνη περιλαμβάνει τη χερσαία έκταση που περιβάλλει τη λίμνη και από την οποία συγκεντρώνεται όλη η επιφανειακή απορροή που υδροδοτεί τη λίμνη. Οριοθετείται από την κορυφογραμμή (υδροκρίτη) της περιβάλλουσας ορεινής έκτασης και περιέχει τα εδάφη που η κλίση τους, επιτρέπει στο νερό των κατακρημνισμάτων να διοχετεύεται στη λίμνη μέσω ποταμών, χειμάρρων ή ρεμάτων (url2).

Υδροκρίτης είναι η οριακή περιφερειακή γραμμή μιας υδρολογικής λεκάνης, εκατέρωθεν της οποίας τα επιφανειακά νερά κατευθύνονται προς διαφορετικές υδρολογικές λεκάνες (Σούλιος, 1996).

Για να οριοθετηθεί η περιοχή μελέτης (υδρολογική λεκάνη της λίμνης Βόλβης) έγινε η χάραξη του υδροκρίτη, μέσω του προγράμματος ArcGIS, με τη δημιουργία αρχικά ενός πολυγωνικού αρχείου. Στη συνέχεια έγινε η ψηφιοποίηση της υδροκριτικής γραμμής, ενώνοντας τα σημεία με τα μεγαλύτερα υψόμετρα σύμφωνα με την πορεία του αναγλύφου, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο τοπογραφικούς χάρτες της Γ.Υ.Σ.. Η έκτασή της υπολογίστηκε με το ArcGIS, και ανέρχεται στα 1.280,11km², εκ των οποίων τα 70,27km² καταλαμβάνει η λίμνη Βόλβη (Σχήμα 2.2).

4.2. Υδρογραφία

4.2.1. Γενικά

Υδρογραφικό δίκτυο μίας περιοχής θεωρείται το σύνολο των ρυακιών, χειμάρρων, παραποτάμων και ποταμών, τα οποία συλλέκουν και αποστραγγίζουν την περιοχή αυτή (Σωτηριάδης & Ψιλοβίκος, 1984).

Τα υδρογραφικά δίκτυα εμφανίζονται με διάφορες μορφές, οι οποίες εξαρτώνται από τα γεωλογικά και κλιματικά στοιχεία της κάθε περιοχής (Σωτηριάδης & Ψιλοβίκος, 1984).

Η μελέτη του υδρογραφικού δικτύου περιλαμβάνεται την ποιοτική και την ποσοτική ανάλυσή του. Η ποσοτική ανάλυση, συντελείται με τον καθορισμό ορισμένων μορφοτεκτονικών παραμέτρων του υδρογραφικού δικτύου, που μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για την υδρολογική συμπεριφορά του. Η ποιοτική ανάλυση πραγματοποιείται με τον καθορισμό της μορφής του δικτύου, η οποία ελέγχεται από διάφορους παράγοντες κυρίως όμως από την γεωλογική και την τεκτονική δομή της περιοχής καθώς και από τις κλιματικές συνθήκες.

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης ψηφιοποιήθηκε με βάση τα τοπογραφικά φύλλα χάρτη : Αρναία, Βασιλικά, Ζαγκλιβέριον, Θέρμη, Πολύγυρος, Σιτοχώριον, Σοχός και Σταυρός, κλίμακας 1:50.000, της Γ.Υ.Σ.. Οι γραμμικές οντότητες που δημιουργήθηκαν, ταξινομήθηκαν με βάση το σύστημα ταξινόμησης κατά Strahler (1952).

Σύμφωνα με τον Strahler (1952) (από Σωτηριάδη & Ψιλοβίκο, 1984) τα ρεύματα, τα οποία δεν δέχονται τα ύδατα μικρότερων κλάδων ρευμάτων, ονομάζονται 1^{ης} τάξεως. Η ένωση δύο κλάδων 1^{ης} τάξης δημιουργούν έναν κλάδο 2^{ης} τάξεως. Σύνδεση δύο κλάδων 2^{ης} τάξεως δημιουργεί έναν κλάδο 3^{ης} τάξης κ.ο.κ. Σε περίπτωση σύνδεσης δύο κλάδων διαφορετικής τάξης, ο νέος κλάδος που προκύπτει φέρει την τάξη του κλάδου μεγαλύτερης τάξης από τους δύο που συνδέονται.

4.2.2. Ποσοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου-Αρίθμηση

υδρογραφικού δικτύου

Η ταξινόμηση των κλάδων με τη μέθοδο του Strahler έδειξε πως το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης (Σχήμα 4.1, Πίνακας 4.1) αποτελείται 7.163 κλάδους και πιο συγκεκριμένα από :

- 5.482 κλάδους 1^{ης} τάξης.
- 1.308 κλάδους 2^{ης} τάξης.
- 289 κλάδους 3^{ης} τάξης.
- 66 κλάδους 4^{ης} τάξης.
- 11 κλάδους 5^{ης} τάξης.

- 4 κλάδους 6^{ης} τάξης.
- 1 κλάδο 7^{ης} τάξης.
- 2 κανάλια. Το ένα βρίσκεται στο ΝΔ τμήμα της περιοχής μελέτης, ανατολικά του χωριού Αδάμ, και το άλλο στο ΒΑ τμήμα της περιοχής μελέτης, μέσω του οποίου τα νερά των Βρωμολιμνών (λίμνες Λάντζα και Μαυρούδα) μεταφέρονται στο ρέμα Βαμβακιάς και καταλήγουν στη λίμνη Βόλβη.

Πίνακας 4.1. Αριθμός κλάδων του υδρογραφικού δικτύου ανά τάξη κλάδων.

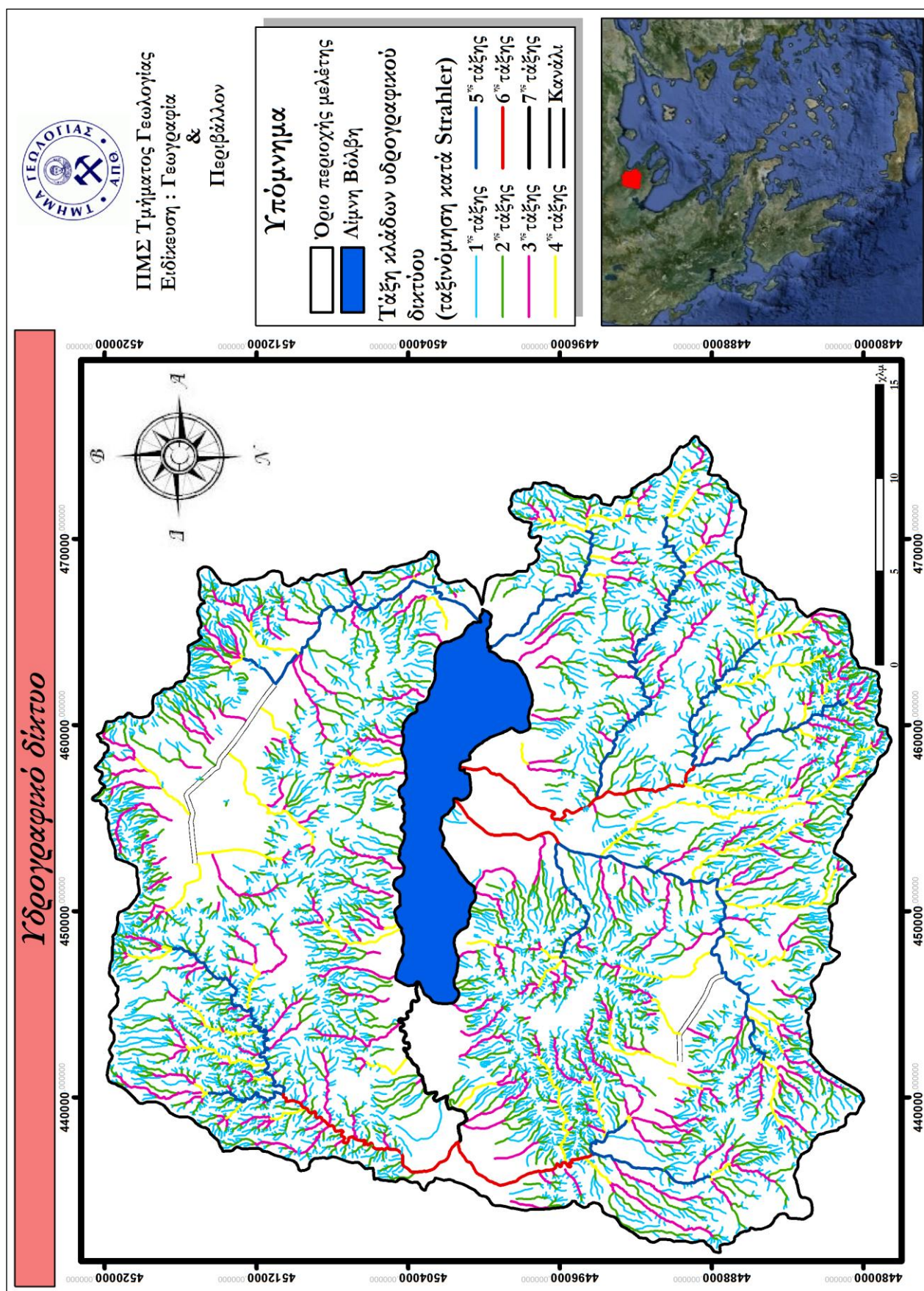
Τάξη κλάδων	7 ^{ης}	6 ^{ης}	5 ^{ης}	4 ^{ης}	3 ^{ης}	2 ^{ης}	1 ^{ης}	κανάλια
Αριθμός κλάδων	1	4	11	66	289	1.308	5.482	2

4.2.3. Ποιοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου-Μορφή υδρογραφικού δικτύου

Το υδρογραφικό δίκτυο της υπό μελέτη λεκάνης απορροής (Σχήμα 4.1) αποτελείται από αυτόνομες μονάδες που αποστραγγίζουν τμήματα της επιφάνειας, δημιουργώντας υπολεκάνες που καταλήγουν στη λίμνη Βόλβη. Η ανάπτυξή του είναι ανομοιόμορφη. Παρατηρείται πολύ πυκνό υδρογραφικό δίκτυο στα ΝΔ της λίμνης, στα ΒΔ της λεκάνης απορροής, καθώς επίσης και στα όρια της λεκάνης. Στην υπόλοιπη περιοχή το υδρογραφικό δίκτυο είναι πυκνό, με εξαίρεση τις περιοχές όπου βρίσκονται ιζηματογενείς σχηματισμοί.

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης παρουσιάζει διάφορες μορφές. Αυτό οφείλεται στη λιθολογία, αλλά και στην τεκτονική, η οποία επηρεάζει έντονα τη μορφολογία. Η μορφή του υδρογραφικού δικτύου, σύμφωνα με τον Howard (1967) (από Βουβαλίδη, 2004-2005), είναι παράλληλη στα ορεινά τμήματα της περιοχής μελέτης και συνδέεται με την ύπαρξη πετρωμάτων με απότομες κλίσεις. Στις περιοχές, όπου το υδρογραφικό δίκτυο είναι πολύ πυκνό, η μορφή του είναι πετροειδής, γεγονός που οφείλεται στην έντονη διάβρωση των πετρωμάτων. Στην υπόλοιπη περιοχή το δίκτυο αναπτύσσεται με μορφή ορθογώνια γωνιώδης, λόγω της ύπαρξης ρηγμάτων, τα οποία, ως ασθενέστερα σημεία, διαβρώνονται ευκολότερα από τα ρέοντα ύδατα και το δίκτυο σχηματίζεται κατά μήκος αυτών.

Το υδρογραφικό δίκτυο παρουσιάζει περιοδική ροή στο σύνολό του, με εξαίρεση τα κύρια ρέματα που εκβάλλουν στη λίμνη.

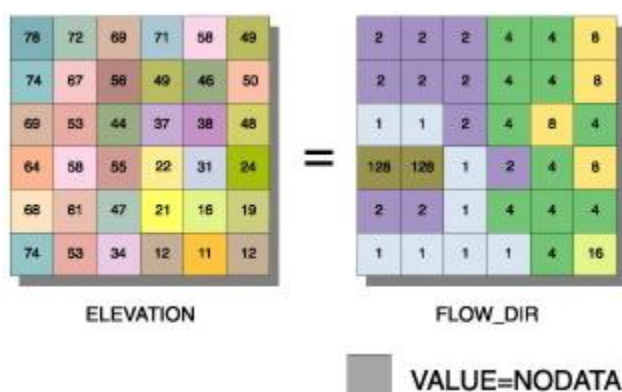


Σχήμα 4.1. Χάρτης στον οποίο απεικονίζεται το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής, μετά από ψηφιοποίηση με βάση τους τοπογραφικούς χάρτες της Γ.Υ.Σ, κλίμακας 1:50.000.

4.2.4. Αυτόματη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου

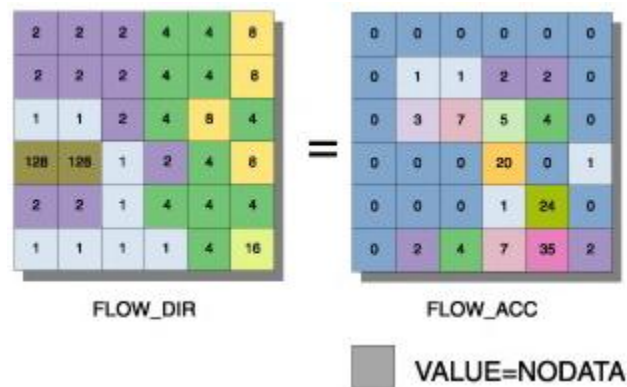
Η αυτόματη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου στο περιβάλλον εργασίας του ArcGIS, γίνεται μέσω της εργαλειοθήκης Hydrology του υποπρογράμματος ArcToolbox. Απαραίτητη προεργασία αποτελεί η δημιουργία ενός υδρολογικά διορθωμένου ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου, γεγονός που επιτυγχάνεται μέσω της εντολής *Fill* με την συμπλήρωση ενδεχόμενων σφαλμάτων ή κενών που έχουν προκύψει από την ψηφιοποίηση ή εξαγωγή με κάθε τρόπο των υψομετρικών δεδομένων.

Αφού γίνει η υδρολογική διόρθωση του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου, ακολουθεί η δημιουργία ενός ψηφιδωτού αρχείου κατεύθυνσης ροής (εντολή *Flow Direction*), από κάθε εικονοστοιχείο προς κάθε γειτονικό εικονοστοιχείο, το οποίο παρουσιάζει απότομη υψομετρική διαφορά. Οι κατευθύνσεις είναι οκτώ (A, NA, N, NΔ, Δ, ΒΔ, Β, BA) και κωδικοποιούνται στο ArcGIS ως αριθμοί (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, αντίστοιχα) (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2. Διάγραμμα μετατροπής του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου σε αρχείο κατεύθυνσης ροής (ESRI, 2007, από Αλεξάκη, 2009).

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός αρχείου συσσώρευσης ροής (εντολή *Flow Accumulation*), το οποίο προκύπτει από το αρχείο κατεύθυνσης ροής με άθροιση όλων των ενδεχόμενων γειτονικών τιμών του κεντρικού εικονοστοιχείου (Σχήμα 4.3). Η συσσώρευση ροής εκφράζει το ποσό του νερού που θα κινηθεί προς το εικονοστοιχείο από τα γειτονικά του και τελικά θα συσσωρευτεί σε αυτό.



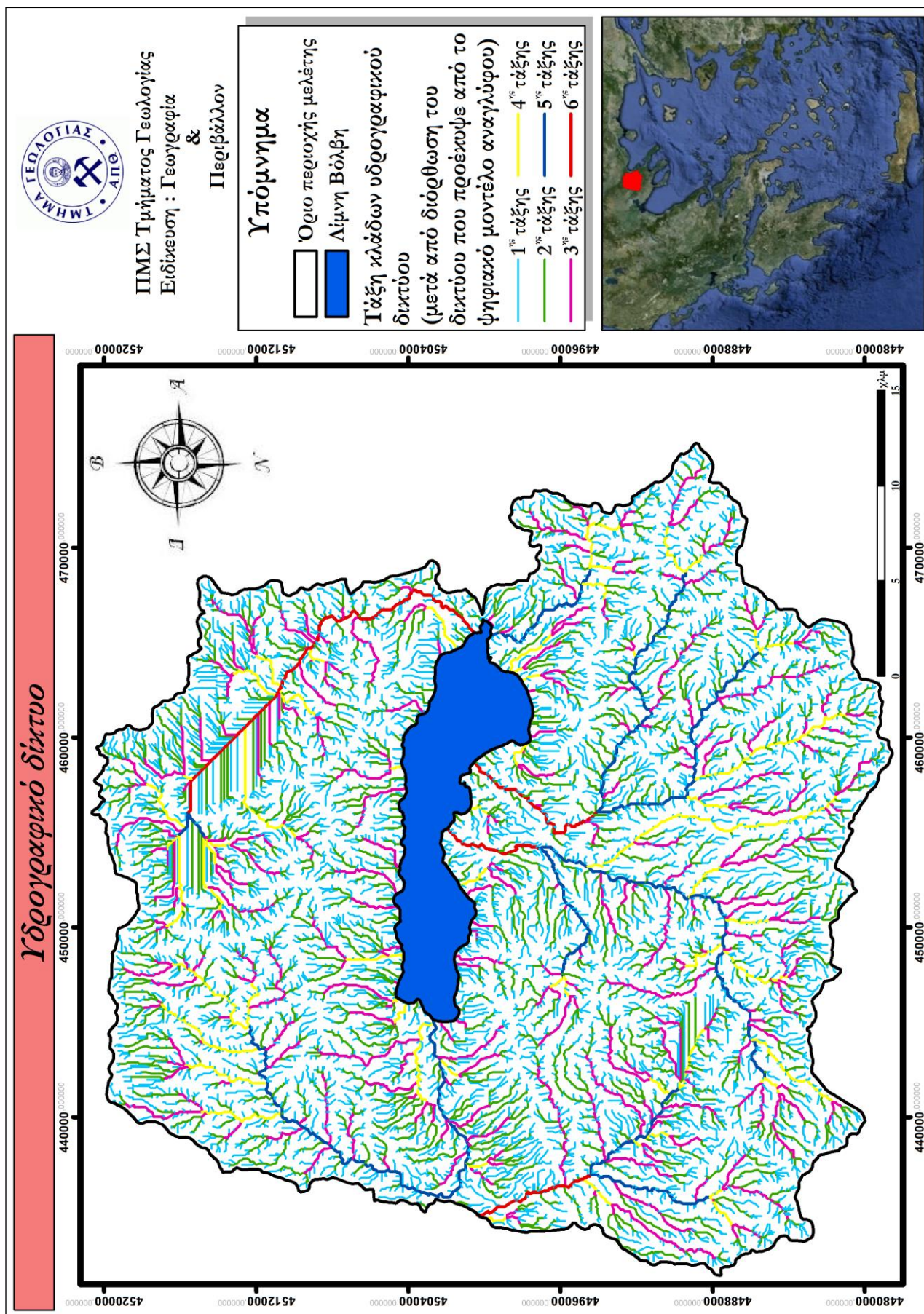
Σχήμα 4.3. Διάγραμμα μετατροπής του αρχείου κατεύθυνσης ροής σε αρχείο συσσώρευσης ροής (ESRI, 2007, από Αλεξάκη, 2009) Στον πρώτο πίνακα φαίνεται κωδικοποιημένη η κατεύθυνση ροής κάθε εικονοστοιχείου του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου. Στον δεύτερο πίνακα, ο αριθμός κάθε εικονοστοιχείου δηλώνει το πλήθος των εικονοστοιχείων που προσφέρουν τη ροή τους στο συγκεκριμένο εικονοστοιχείο (ο αριθμός «20» δηλώνει πως είκοσι εικονοστοιχεία προσφέρουν τη ροή τους στο συγκεκριμένο εικονοστοιχείο) (από Νικολαΐδου, 2009).

Στη συνέχεια γίνεται χρήση των εντολών *Watershed* και *Stream Order*, με τις οποίες δημιουργείται το υδρογραφικό δίκτυο, με τη μορφή ψηφιδωτού αρχείου.

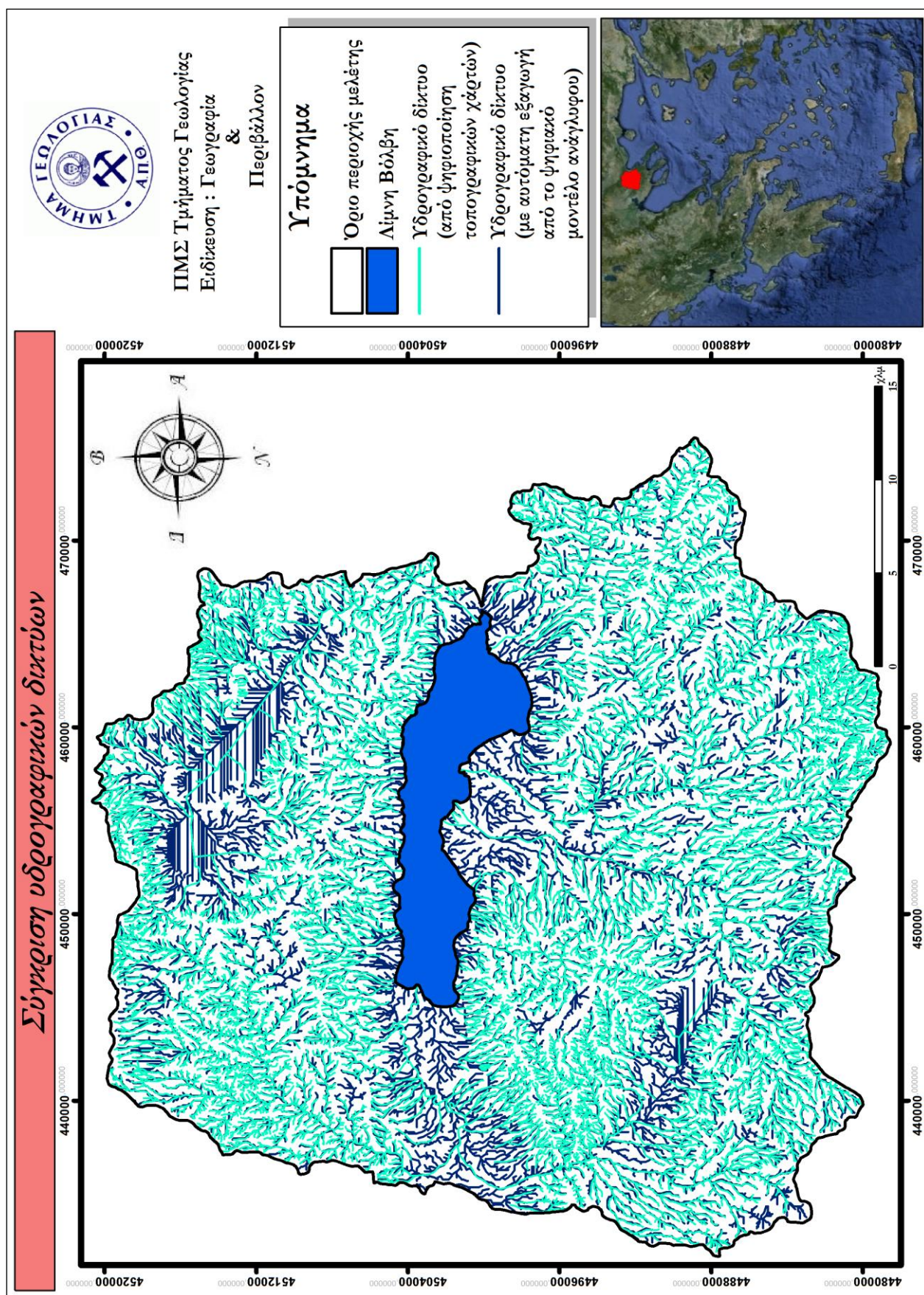
Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας πραγματοποιείται η εξαγωγή του σχηματικού γραμμικού αρχείου (εντολή *Stream to Feature*) από το ψηφιδωτό.

Το τελικό αυτό αρχείο αναπαριστά το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης (Σχήμα 4.4) και μπορεί πλέον να υποστεί κάθε είδους επεξεργασία. Η αρίθμηση των κλάδων κατά Strahler γίνεται απευθείας μέσω του προγράμματος. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4, το υδρογραφικό δίκτυο, που εξάγεται αυτόματα από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, είναι πολύ πυκνό, γεγονός που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Αυτό οφείλεται στο ότι το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται ως κλάδο 1^{ης} τάξης οποιοδήποτε κοίλωμα της περιοχής. Για το λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητο να διαγραφεί ο κλάδος 1^{ης} τάξης και να θεωρηθεί ο κλάδος 2^{ης} τάξης ως 1^{ης} τάξης (ο 3^{ης} τάξης ως 2^{ης} τάξης, κ.ο.κ.). Επίσης, οι ευθείες γραμμές που παρατηρούνται αντιπροσωπεύουν επίπεδες επιφάνειες και για το λόγο αυτό δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (Σχήμα 4.5).

Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται το υδρογραφικό δίκτυο που προέκυψε από ψηφιοποίηση των τοπογραφικών χαρτών της Γ.Υ.Σ. σε σχέση με αυτό που προέκυψε από αυτόματη εξαγωγή από το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου SRTM και στον Πίνακα 4.2 συγκρίνονται τα μήκη των κλάδων κάθε τάξης.



Σχήμα 4.5. Υδρογραφικό δίκτυο, μετά από διόρθωση του δικτύου που προέκυψε από το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου.



Σχήμα 4.6. Απεικονίζεται το υδρογραφικό δίκτυο που προέκυψε από ψηφιοποίηση των τοπογραφικών χαρτών της Γ.Υ.Σ. σε σχέση με αυτό που προέκυψε από αυτόματη εξαγωγή από το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου SRTM.

Πίνακας 4.2. Σύγκριση του μήκους των κλάδων των υδρογραφικών δικτύων ανά τάξη κλάδων.

Τάξη κλάδου	Μήκος κλάδου (υδρογραφικού δικτύου που προέκυψε από ψηφιοποίηση των τοπογραφικών χαρτών της Γ.Υ.Σ.) (σε km)	Μήκος κλάδου (υδρογραφικού δικτύου που προέκυψε από αυτόματη εξαγωγή από το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου SRTM) (σε km)
1 ^{ης} τάξης	1.781,08	1.954,44
2 ^{ης} τάξης	858,05	1.019,90
3 ^{ης} τάξης	426,70	498,27
4 ^{ης} τάξης	196,38	172,11
5 ^{ης} τάξης	133,29	121,90
6 ^{ης} τάξης	45,84	45,96
7 ^{ης} τάξης	13,32	
κανάλια	17,06	

4.3. Χωρική ανάλυση

4.3.1. Γενικά

Η Χωρική Ανάλυση του αναγλύφου πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του ArcGIS, με τη βοήθεια της επέκτασης Spatial Analyst, και περιλαμβάνει την ταξινόμηση του αναγλύφου, τον προσδιορισμό της κλίσεως και του προσανατολισμού των κλιτύων, καθώς και τη δημιουργία χάρτη σκιασμένου αναγλύφου.

4.3.2. Ταξινόμηση υψομέτρου

Για τον χαρακτηρισμό του αναγλύφου της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ταξινόμησης των υψομέτρων που προτάθηκε από τον Dikau το 1989 (από Παράσχου, 2005). Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή, μία περιοχή χαρακτηρίζεται ανάλογα με το υψόμετρο που έχει σε σχέση με το επίπεδο της θάλασσας. Έτσι, περιοχές με υψόμετρο :

- ✓ <150m χαρακτηρίζονται πεδινές.
- ✓ 150m-600m χαρακτηρίζονται λοφώδεις.

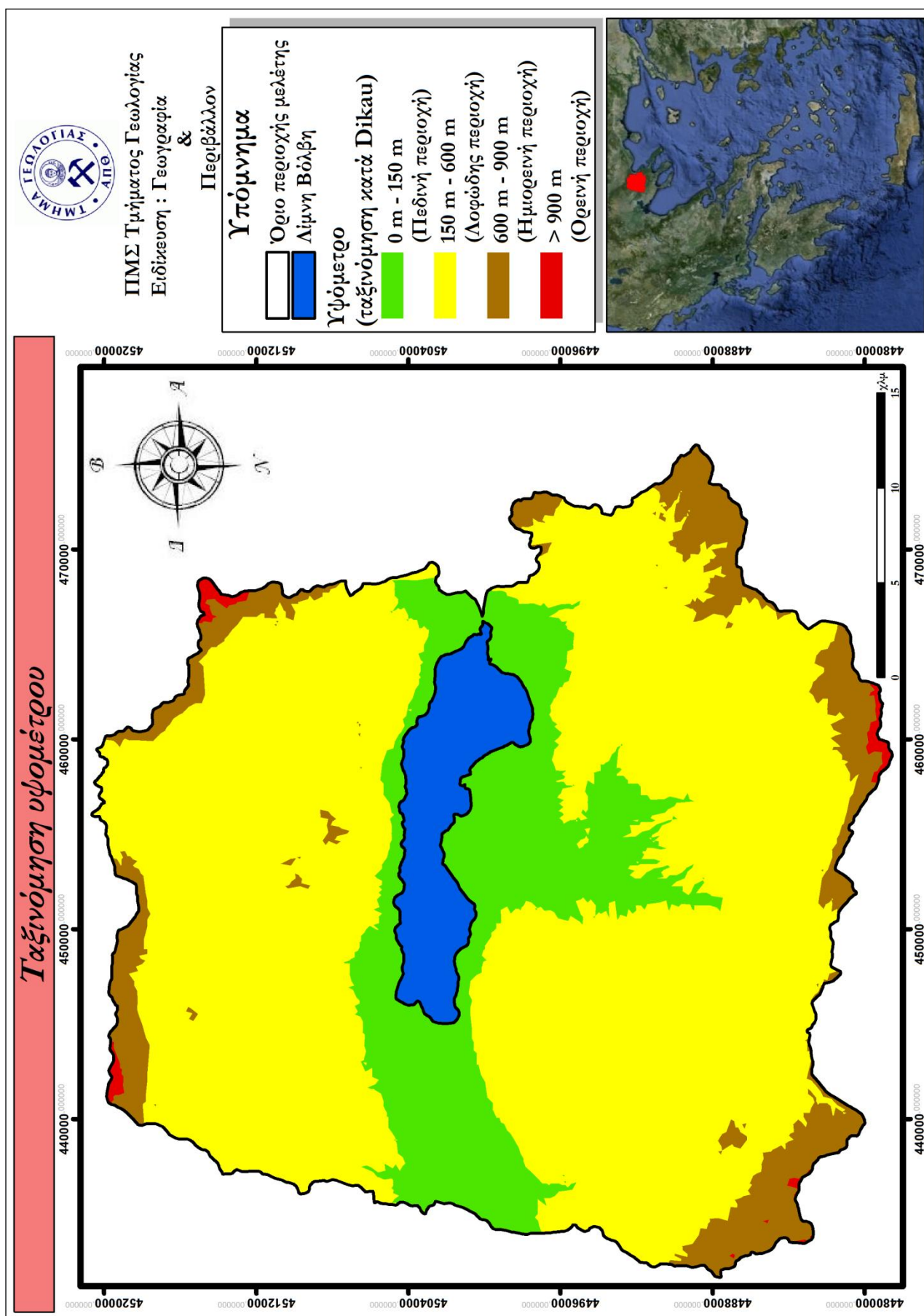
- ✓ 600m-900m χαρακτηρίζονται ημιορεινές.
- ✓ >900m χαρακτηρίζονται ορεινές.

Χρησιμοποιώντας το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (Σχήμα 2.2) δημιουργήθηκε ο ταξινομημένος χάρτης υψομέτρων (Σχήμα 4.7) και στη συνέχεια υπολογίστηκε η έκταση σε km² και το ποσοστό της έκτασης (%) που καταλαμβάνει κάθε περιοχή, ανάλογα με την κατηγορία που ανήκει (Πίνακας 4.3).

Πίνακας 4.3. Κατανομή των υψομέτρων στη λεκάνη απορροής της λίμνης Βόλβης σύμφωνα με την ταξινόμηση του Dikau, 1989.

Εύρος υψομέτρων σε m	Χαρακτηρισμός περιοχής	Έκταση σε km ²	Ποσοστό έκτασης %
<150	Πεδινή	211,31	17,49
150-600	Λοφώδης	876,98	72,58
600-900	Ημιορεινή	112,98	9,36
>900	Ορεινή	6,90	0,57

Από την κατανομή των υψομέτρων διαπιστώνεται ότι το ανάγλυφο της περιοχής, στη μεγαλύτερή του έκταση (72,58%), χαρακτηρίζεται ως λοφώδες. Οι πεδινές περιοχές καταλαμβάνουν το 17,49% και εντοπίζονται περιμετρικά της λίμνης Βόλβης, εκεί όπου βρίσκονται οι εκβολές των ρεμάτων που την τροφοδοτούν, με αποτέλεσμα το σχηματισμό αλλουβιακών ριπιδίων. Οι ημιορεινές (9,36%) και οι ορεινές περιοχές (0,57%) εντοπίζονται μόνο σε κάποια μικρά τμήματα στο βόρειο και το νότιο όριο της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4.7. Χάρτης υψομέτρων της περιοχής μελέτης σύμφωνα με την ταξινόμηση του Dikau, 1989.

4.3.3. Κλίση κλιτύων

Μία άλλη παράμετρος που μπορεί να υπολογιστεί από την ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου είναι η κλίση, η οποία υπολογίζεται είτε σε μοίρες είτε σε ποσοστό %.

Κλίση (Slope) είναι η μέτρηση των απότομων επιφανειών από την επιφάνεια του εδάφους. Όσο πιο απότομη η επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη η κλίση. Μετράται υπολογίζοντας την εφαπτομένη της επιφάνειας και παρέχει σημαντικές πληροφορίες σε σχέση με τη φύση των γεωλογικών και γεωδυναμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μία περιοχή (Avtar et al, 2010).

Ο Demek το 1972, πρότεινε μία ταξινόμηση της κλίσεως των κλιτύων σε έξι κατηγορίες, η οποία υιοθετήθηκε στη συνέχεια από την Επιτροπή Γεωμορφολογικής Έρευνας και Χαρτογράφησης (Commision on Geomorphological Survey and Mapping) της Διεθνούς Γεωγραφικής Ένωσης (IGU – International Geographical Union). Οι έξι κατηγορίες είναι (από Νικολαΐδου, 2009) :

- ✓ **Κλίση 0°-2° (0%-3,5%):** Επίπεδο έως ελαφρώς κεκλιμένο ανάγλυφο (πλημμυρικά πεδία, επιφάνειες επιπέδωσης, αναβαθμίδες).

Έναρξη διάβρωσης τύπου καλύμματος.

Απουσία προβλημάτων στις ανθρώπινες δραστηριότητες (μεταφορές, οικοδόμηση, γεωργία, υλοτομία).

- ✓ **Κλίση 2°-5° (3,5%-8,7%):** Ελαφρώς κεκλιμένο ανάγλυφο (πρόποδες κοιλάδων, περιοχές τελικών μοραίνων, κλιτύες θινών).

Διάβρωση καλύμματος και έναρξη αυλακωτής διάβρωσης. Σε περιοχές φυτοκάλυψης παρατηρείται έναρξη ερπυσμού εδαφών. Μέτρα προστασίας του εδάφους στις καλλιεργούμενες περιοχές.

Ελαφριά δυσκολία στη μετακίνηση των οχημάτων , δυνατότητα εποικισμού και λειτουργίας βιομηχανιών. Καλλιέργεια δυνατή με τη χρήση μηχανημάτων. Προτεινόμενη η καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς.

- ✓ **Κλίση 5°-15° (8,7%-26,8%):** Ισχυρώς κεκλιμένο ανάγλυφο (κλιτύες κοιλάδων, τεκτονικές αναβαθμίδες.).

Κινήσεις μαζών, ισχυρή διάβρωση τύπου καλύμματος και αυλακωτή, έντονες διαβρωτικές διεργασίες σε περιοχές μειωμένης φυτοκάλυψης αλλά έναρξη τους και σε περιοχές έντονης φυτοκάλυψης. Πιθανές ολισθήσεις εδάφους και

ερπυσμός. Στις 15° (26,8%) βρίσκεται η κρίσιμη γωνία για το σχηματισμό πλήρους εδαφικού ορίζοντα.

Σημαντικές δυσκολίες στην κατασκευή δρόμων και στη μετακίνηση οχημάτων. Αδύνατη η καλλιέργεια δίχως τη χρήση αναβαθμίδων. Δυσκολίες στη χρήση γεωργικών μηχανημάτων.

- ✓ **Κλίση 15°-35° (26,8%-70%):** Απότομο (15°-25°) έως εξαιρετικά απότομο (25°-35°) ανάγλυφο (κλιτύες κοιλάδων μεσαίων ορέων).

Έντονες διεργασίες απογύμνωσης πάσης φύσεως, ερπυσμοί εδαφών, λασποροές, πολύ έντονη αυλακωτή και γραμμική διάβρωση τόσο σε γυμνές όσο και σε καλυμμένες (δάση) περιοχές.

Δυνατή η μετακίνηση μόνο με ερπυστριοφόρα μηχανήματα. Αδύνατη η καλλιέργεια, δυσχερής η υλοτομία. Περιοχή δασών και βοσκοτόπων.

- ✓ **Κλίση 35°-55° (70%-135%):** Απόκρημνο ανάγλυφο (απότομες κλιτύες κοιλάδων υψηλών ορέων, κλιτύες σχηματισμών hogbacks, κλιτύες ασβεστολιθικών φαραγγιών).

Πολύ λεπτό, ασυνεχές στρώμα εδάφους, έντονη απογύμνωση του μητρικού πετρώματος, ισχυρότατη έκθεση στους παράγοντες της διάβρωσης και της βαρύτητας.

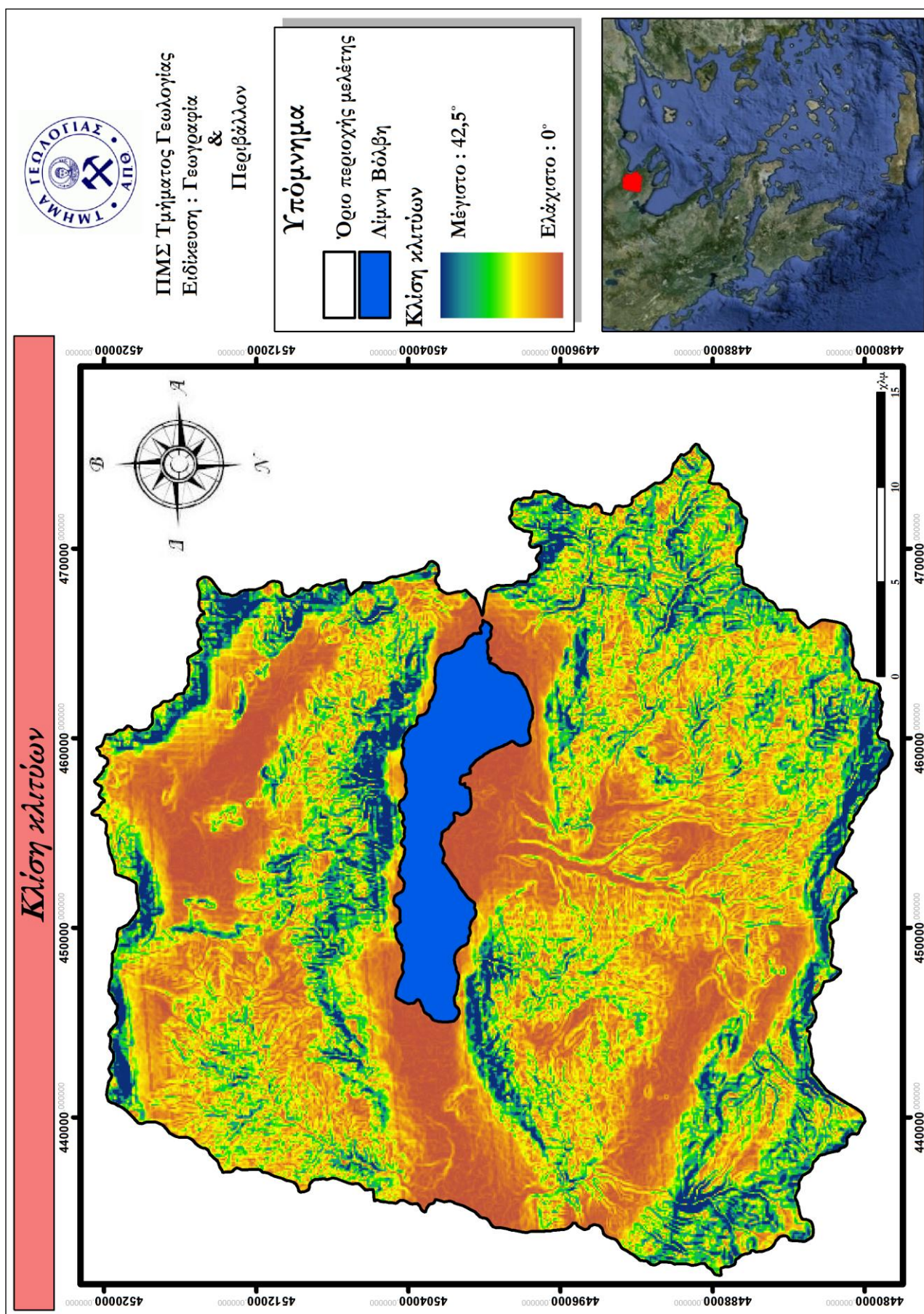
Αδύνατη η προσπέλαση. Περιοχή δασών, όριο εκμετάλλευσης της υλοτομίας.

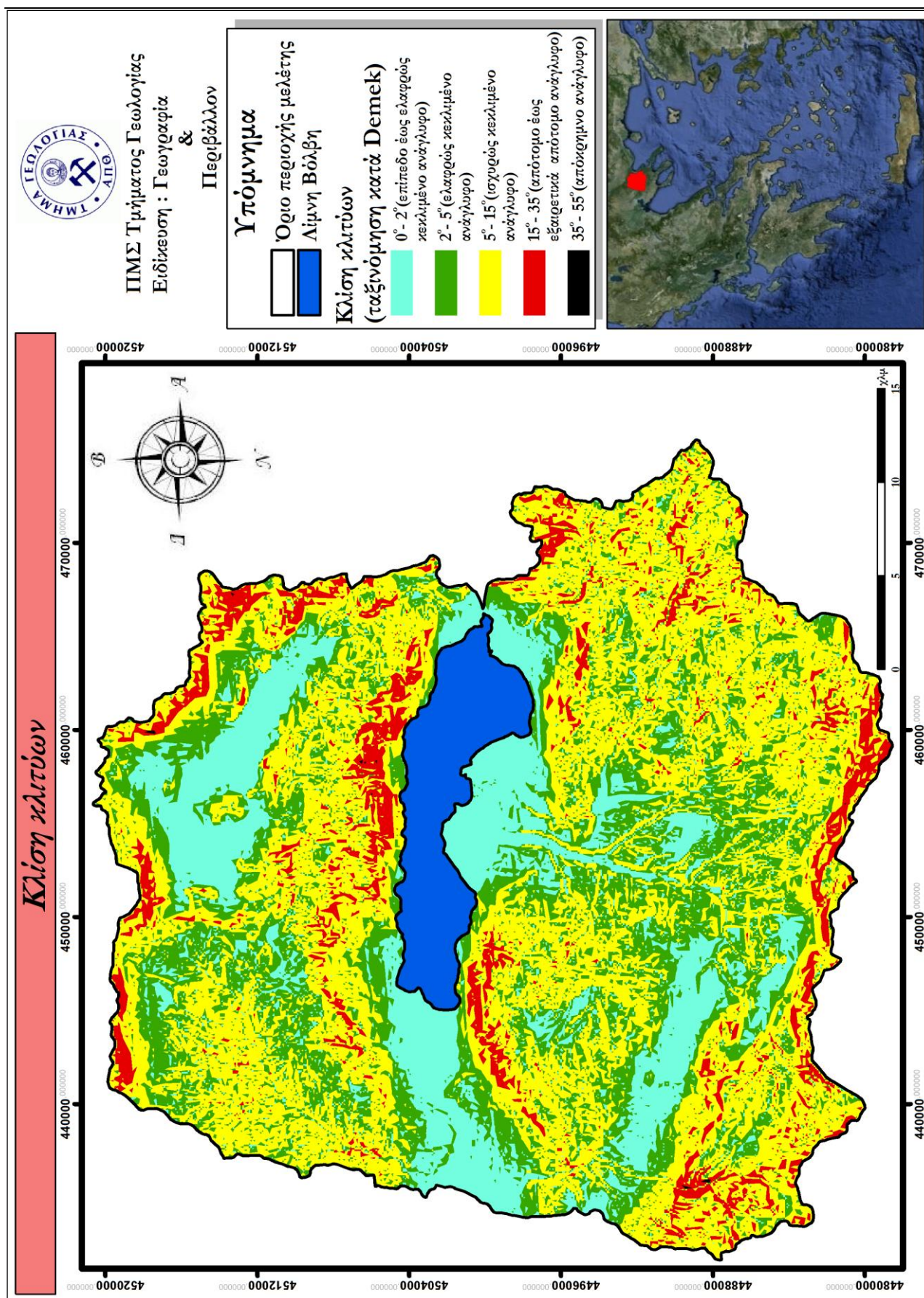
- ✓ **Κλίση >55° (>135%):** Κάθετο ανάγλυφο (κάθετες κλιτύες σε περιοχές ψαμμιτικών και ασβεστολιθικών ορέων).

Απουσία εδάφους. Απογύμνωση των εκτεθειμένων πετρωμάτων, κατάρρευση βράχων.

Αδύνατη η οικονομική εκμετάλλευση. Αναρρίχηση. Κίνδυνος πτώσης βράχων στα κατάντη.

Βάση του παραπάνω συστήματος ταξινόμησης δημιουργήθηκε ο χάρτης κλίσεων (Σχήμα 4.8, Σχήμα 4.9) και υπολογίστηκε η έκταση σε km² και το ποσοστό της έκτασης (%) που καταλαμβάνει κάθε ομάδα κλίσεων (Πίνακας 4.4).





Σχήμα 4.9. Ταξινομημένος χάρτης κλίσεως κλιτύων της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με τον Demek, 1972.

Πίνακας 4.4. Κατανομή των κλίσεων στη λεκάνη απορροής της λίμνης Βόλβης σύμφωνα με την ταξινόμηση του Demek, 1972.

Εύρος κλίσεων σε μοίρες	Έκταση σε km ²	Ποσοστό έκτασης %
0°-2°	227,75	18,85
2°-5°	320,05	26,50
5°-15°	564,04	46,70
15°-35°	95,88	7,93
35°-55°	0,24	0,02

Συγκρίνοντας τον Πίνακα και το χάρτη κλίσεων του Σχήματος, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα :

- Οι κλίσεις στην υδρολογική λεκάνη της λίμνης Βόλβης κυμαίνονται από 0° έως 42,5°.
- Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης (46,70%) χαρακτηρίζεται από κλίσεις κλιτύων που κυμαίνονται μεταξύ 5° έως 15°, γεγονός που υποδηλώνει τις έντονες διαβρωτικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο ισχυρώς κεκλιμένο ανάγλυφο. Όπως προκύπτει από τη σύγκριση του χάρτη κλίσεων και του χάρτη υψομέτρων, οι τιμές αυτές των κλίσεων παρατηρούνται σε όλη τη λεκάνη, ανεξαρτήτως υψομέτρου.
- Οι χαμηλές τιμές των κλίσεων των κλιτύων, από 0°-2° (18,85%), και από 2°-5° (26,50%), δείχνουν ένα επίπεδο έως ελαφρώς κεκλιμένο ανάγλυφο και αντιστοιχούν σε πλημμυρικά πεδία, αναβαθμίδες, επιφάνειες επιπέδωσης και πρόποδες κοιλάδων. Εντοπίζονται κυρίως περιμετρικά της λίμνης, καθώς επίσης και στο ΒΑ και ΝΔ τμήμα της λεκάνης.
- Ένα εξίσου σημαντικό ποσοστό της περιοχής (7,93%) χαρακτηρίζεται από κλίσεις μεταξύ 15°-35°. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν ένα απότομο έως εξαιρετικά απότομο ανάγλυφο, με έντονες διεργασίες απογύμνωσης και αυλακωτή και γραμμική διάβρωση. Κατανέμονται σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, κυρίως όμως εντοπίζονται στα όρια της λεκάνης και βόρεια της λίμνης Βόλβης.
- Υψηλές τιμές κλίσεων, από 35°-55°, παρατηρούνται σε ελάχιστο ποσοστό (0,02%).

Οι κλίσεις των κλιτύων που παρατηρούνται στην περιοχή μελέτης, παρουσιάζουν ιδιαίτερη γεωγραφική κατανομή, γεγονός που αποδίδεται σε ένα βαθμό

στην επίδραση της λιθολογίας. Στις περιοχές όπου επικρατούν τα πιο επιδεκτικά στη διάβρωση πετρώματα (νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα) συναντώνται οι μικρότερες κλίσεις, ενώ στην υπόλοιπη περιοχή όπου αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα οι κλίσεις είναι ενδιάμεσες.

4.3.4. Προσανατολισμός κλιτύων

Μία άλλη παράμετρος που εξάγεται από την ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου είναι ο προσανατολισμός των κλιτύων.

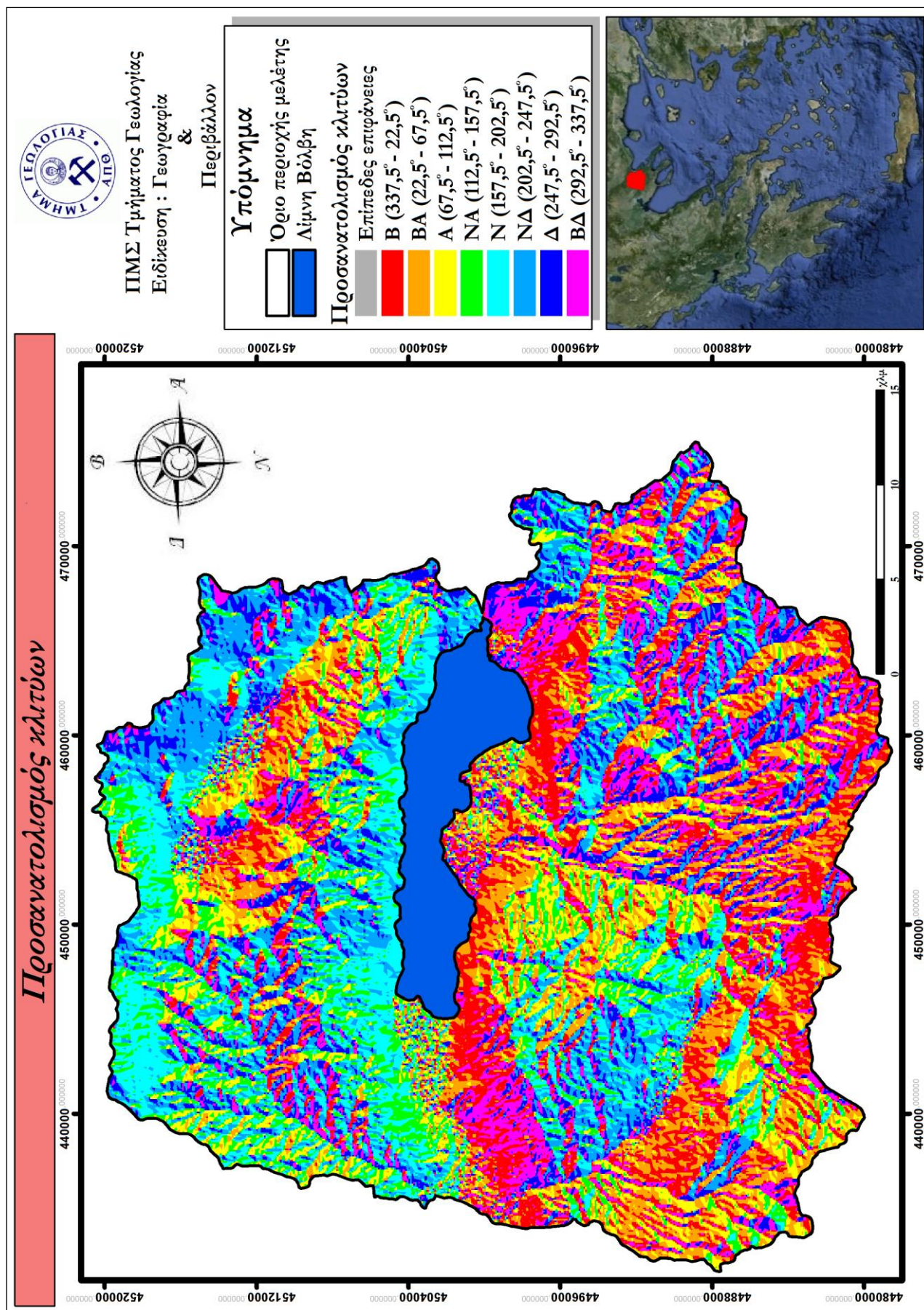
Ο Προσανατολισμός (Aspect) μπορεί να θεωρηθεί ως η διεύθυνση κλίσης ή η κατεύθυνση προς την οποία «κοιτάζει» μία πλαγιά. Μετριέται σε μοίρες από 0 έως 360 δεξιόστροφα (μία πλήρης περιστροφή με αφετηρία τον βορρά). Οι επίπεδες περιοχές που δεν έχουν διεύθυνση κλίσης παίρνουν την τιμή -1 (Νικολαΐδου, 2009).

Ο χάρτης προσανατολισμού κλιτύων έχει συνήθως εννέα κλάσεις, μία για κάθε μία από τις κύριες διευθύνσεις της πυξίδας, δηλαδή Β, ΒΑ, Α, ΝΑ, Ν, ΝΔ, Δ, ΒΔ και μια για επίπεδο ανάγλυφο (Burrough, 1996, από Αλεξάκη, 2009).

Με βάση τις εννέα κλάσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο δημιουργήθηκε ο χάρτης προσανατολισμού κλιτύων (Σχήμα 4.10) και υπολογίστηκε η έκταση σε km² και το ποσοστό της έκτασης (%) που καταλαμβάνει κάθε κλάση (Πίνακας 4.5).

Πίνακας 4.5. Κατανομή του προσανατολισμού των κλιτύων στη λεκάνη απορροής της λίμνης Βόλβης.

Εύρος προσανατολισμού σε μοίρες	Προσανατολισμός	Έκταση σε km ²	Ποσοστό έκτασης %
337,5°-22,5°	Β	190,17	15,74
22,5°-67,5°	ΒΑ	164,68	13,64
67,5°-112,5°	Α	126,40	10,46
112,5°-157,5°	ΝΑ	121,52	10,07
157,5°-202,5°	Ν	169,11	14,00
202,5°-247,5°	ΝΔ	157,62	13,05
247,5°-292,5°	Δ	136,66	11,31
292,5°-337,6°	ΒΔ	140,71	11,65
-1	Επίπεδη περιοχή	0,97	0,08



Σχήμα 4.10. Χάρτης προσανατολισμού κλιτύων της περιοχής μελέτης.

Παρατηρείται ότι όλες οι κλάσεις προσανατολισμού κυμαίνονται από 10%-15%, χωρίς όμως να μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα συγκεκριμένο συμπέρασμα.

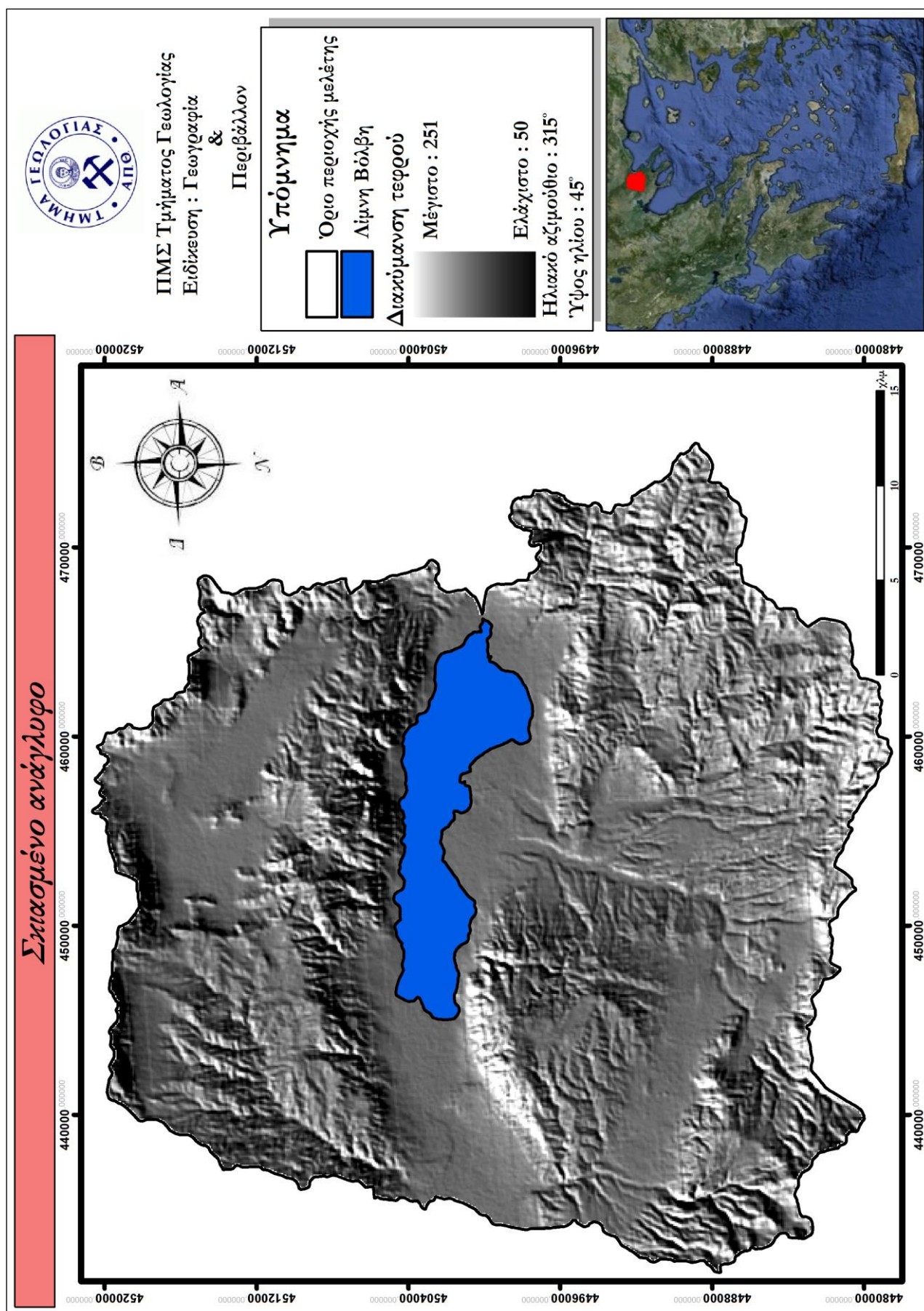
4.3.5. Χάρτης Σκιασμένου Αναγλύφου

Σύμφωνα με τους Burrough & McDonnell (2000), η αρχή της αυτόματης χαρτογράφησης του *σκιασμένου αναγλύφου* (hillshade) βασίζεται σε ένα μοντέλο το οποίο δείχνει πώς θα φαινόταν το έδαφος εάν ήταν φτιαγμένο από ιδανικό υλικό, φωτισμένο από μία συγκεκριμένη θέση. Το τελικό αποτέλεσμα μοιάζει με αεροφωτογραφία, εξαιτίας της χρήσης γκρι κλίμακας και διαβαθμισμένων τεχνικών αποτύπωσης του τόνου απεικόνισης του αναγλύφου, αλλά στην πραγματικότητα ο χάρτης σκιασμένου αναγλύφου που προέρχεται από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου διαφέρει σε σημαντικό βαθμό από τις αεροφωτογραφίες. Ο χάρτης σκιασμένου αναγλύφου δεν απεικονίζει την εδαφική κάλυψη, αλλά μόνο την ψηφιοποιημένη γήινη επιφάνεια. Επίσης το εδαφικό μοντέλο είναι συνήθως αποστρογγυλεμένο εξαιτίας της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων και δεν απεικονίζει εξαιρετικές λεπτομέρειες του αναγλύφου όπως συμβαίνει στις αεροφωτογραφίες (Νικολαΐδου, 2009).

Ο χάρτης σκιασμένου αναγλύφου δίνει την εικόνα της εκάστοτε περιοχής, θεωρώντας ότι αυτή φωτίζεται από μία υποθετική πηγή φωτός, η οποία βρίσκεται στο άπειρο και υπολογίζοντας τις σχετικές τιμές έντασης (φωτισμού) μεταξύ των εικονοστοιχείων (Μουρατίδης, 2010).

Ο τρόπος με τον οποίο τα στοιχεία της επιφάνειας θα ανακλούν το φως εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τους (κλίση, προσανατολισμός) και από τη θέση της φωτεινής πηγής, η οποία καθορίζεται από τον αναλυτή, με τη βοήθεια δύο παραμέτρων (Μουρατίδης, 2010) :

1. Του ηλιακού αζιμουθίου, που είναι η γωνιακή διεύθυνση (0° - 360°) του ηλίου, μετρούμενη από το βορρά, κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού.
2. Του ύψους ηλίου, το οποίο ταυτίζεται με τη γωνία που σχηματίζει η φωτεινή πηγή με τον ορίζοντα.



Σχήμα 4.11. Χάρτης σκιασμένου αναγλύφου, με εφαρμογή ύψους ηλίου 45° και αζιμουθίου 315° (πηγή φωτισμού από ΒΔ).

Οι χάρτες σκιασμένου αναγλύφου χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη απεικόνιση του αναγλύφου, συχνά σε συνδυασμό με άλλα δεδομένα (π.χ. δορυφορικές εικόνες), βελτιώνοντας το οπτικό αποτέλεσμα. Πέρα όμως από αυτή τους τη χρήση, βρίσκουν εφαρμογή στην ποσοτική ανάλυση γεωμορφών (Νικολαΐδου, 2009, Μουρατίδης, 2010).

Στην περίπτωση της λεκάνης απορροής που μελετάται, δημιουργήθηκε χάρτης σκιασμένου αναγλύφου με αζιμούθιο ηλίου στις 315° (φωτισμός από ΒΔ) και με ύψος ηλίου στις 45° (Σχήμα 4.11).

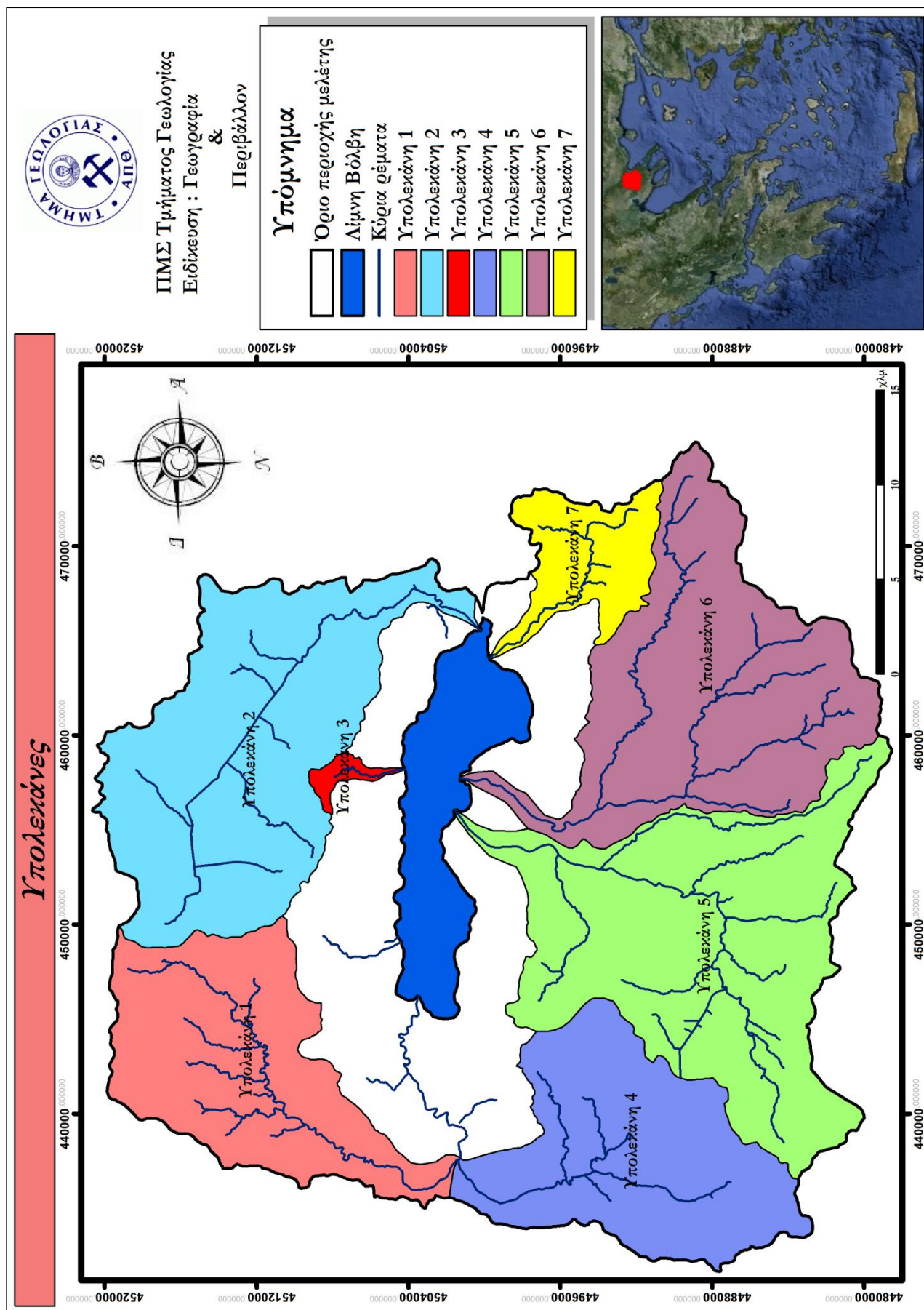
4.4. Μορφοτεκτονική ανάλυση

4.4.1. Γενικά

Η *Μορφοτεκτονική* είναι ο κλάδος που μελετά την επίδραση των τεκτονικών διεργασιών στο γήινο ανάγλυφο (Παυλίδης, 2003).

Η *Μορφοτεκτονική* αποτελεί τον συνδυασμό της τεκτονικής και της γεωμορφολογίας, προσπαθώντας να εξηγήσει τον τρόπο επίδρασης της πρώτης στη δεύτερη. Η μορφή που έχει το ανάγλυφο είναι αποτέλεσμα της επίδρασης εξωγενών δυνάμεων (διάβρωση) και ενδογενών δυνάμεων (τεκτονική). Ο ρυθμός και ο τρόπος της διάβρωσης είναι συνάρτηση των κλιματολογικών συνθηκών, των γεωλογικών σχηματισμών και των τεκτονικών δομών που χαρακτηρίζουν μία περιοχή. Η διάβρωση αποτελεί τη γενεσιουργό αιτία του υδρογραφικού δικτύου, συμβάλλει όμως και την εξέλιξή του. Η διάβρωση είναι μία συνεχής διεργασία σε αντίθεση με την τεκτονική δραστηριότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διαρκή ταπείνωση και εξομάλυνση του αναγλύφου, αφού η μόνη δύναμη που επιδρά είναι η διάβρωση. Στις ενεργά τεκτονικές περιοχές, η μορφολογία γίνεται πιο απότομη και σύνθετη. Μετατοπίσεις κατά μήκος των ρηγμάτων είναι ικανές να προκαλέσουν ανυψώσεις ή ταπεινώσεις του εδάφους και να επηρεάσουν το υδρογραφικό δίκτυο. Η μορφοτεκτονική ανάλυση είναι ένα βασικό εργαλείο για την κατανόηση της νεοτεκτονικής δομής και εξέλιξης μίας περιοχής. Επιτυγχάνεται με τη χρήση των μορφοτεκτονικών δεικτών (Keller & Pinter, 2002, από Τσίλιος, 2008).

Στην παρούσα μελέτη, η λεκάνη απορροής χωρίστηκε σε υπολεκάνες (Σχήμα 4.12), ώστε να μπορέσουν να υπολογιστούν οι μορφοτεκτονικοί δείκτες.



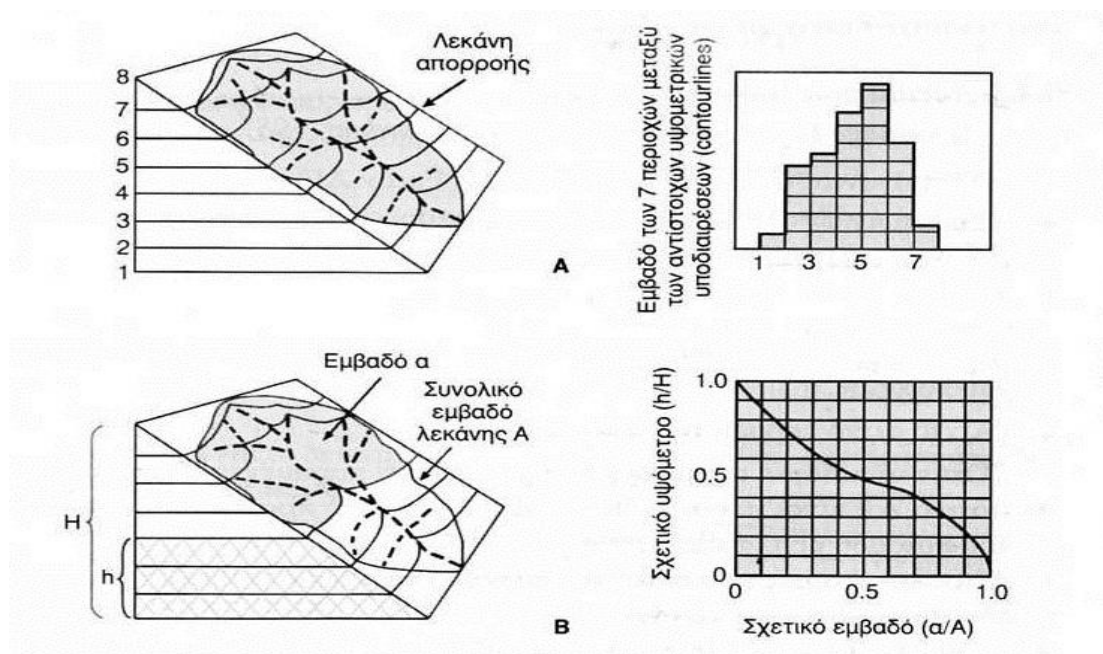
Σχήμα 4.12. Στον χάρτη απεικονίζονται οι υπολεκάνες στις οποίες χωρίζεται η υδρολογική λεκάνη της λίμνης Βόλβης.

Οι μορφοτεκτονικοί δείκτες που υπολογίστηκαν είναι οι :

1. Υψομετρική καμπύλη και Υψομετρικό ολοκλήρωμα.
2. Μήκος ρέματος (κλάδος υδρογραφικού δικτύου-Δείκτης κλίσης του (SL)).

4.4.2. Υψομετρική καμπύλη και Υψομετρικό ολοκλήρωμα

Η *Υψομετρική καμπύλη* (Hypsometric curve) εκφράζει την κατανομή των υψομέτρων σε μία περιοχή. Η καμπύλη (Σχήμα 4.13) δημιουργείται με τον υπολογισμό των λόγων υψόμετρου (h/H = σχετικό υψόμετρο) και των λόγων εμβαδού (a/A = σχετικό εμβαδόν) της δεδομένης λεκάνης. Το ολικό υψόμετρο (H) αποτελεί το τοπικό ανάγλυφο της λεκάνης (διαφορά υψηλότερου σημείου της λεκάνης από το χαμηλότερο σημείο). Η συνολική επιφάνεια της λεκάνης (A) είναι το άθροισμα των τμημάτων μεταξύ κάθε ζεύγους συνεχόμενων ισοϋψών καμπυλών. Η έκταση (a) είναι το εμβαδόν της επιφάνειας που βρίσκεται πάνω από το υψόμετρο h , μέχρι το ανώτατο σημείο της λεκάνης. Οι τιμές του σχετικού εμβαδού (a/A) κυμαίνονται από 1.0 στο χαμηλότερο σημείο της λεκάνης (όπου $h/H = 0.0$) έως 0.0 στο υψηλότερο σημείο της λεκάνης (όπου $h/H = 1.0$).



Σχήμα 4.13. Υψομετρική καμπύλη (Τροποποιημένο σχήμα από Keller & Printer, 2002) (Παυλίδης, 2003).

Μία χρησιμότητα της καμπύλης είναι ότι ενδείκνυται για τη σύγκριση λεκανών διαφορετικού μεγέθους, εφόσον το υψόμετρο και το εμβαδόν είναι ανάλογα

προς το ολικό ποσό τους. Συνεπώς, η υψομετρική καμπύλη είναι ανεξάρτητη του μεγέθους των λεκανών, του υψομέτρου και της κλίμακας του χάρτη.

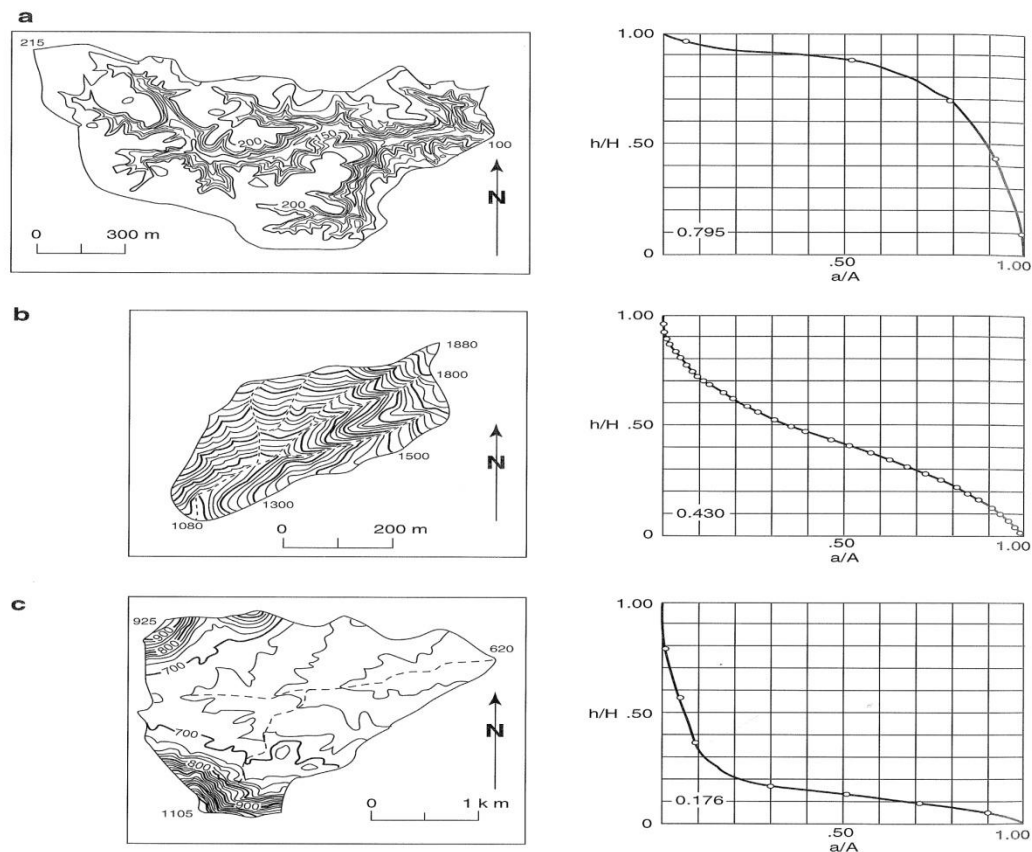
Ένας απλός τρόπος για να χαρακτηριστεί το σχήμα της υψομετρικής καμπύλης για μία δεδομένη λεκάνη απορροής είναι να υπολογιστεί το *Υψομετρικό ολοκληρώμα* (Hypsometric integral/Hi) του, το οποίο δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{\text{μέσο υψόμετρο} - \text{ελάχιστο υψόμετρο}}{\text{μέγιστο υψόμετρο} - \text{ελάχιστο υψόμετρο}}$$

Οι τιμές του μέγιστου και ελάχιστου υψομέτρου μπορούν εύκολα να υπολογιστούν από τους τοπογραφικούς χάρτες ή από ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου. Το μέσο υψόμετρο μπορεί να υπολογιστεί είτε κατασκευάζοντας ένα δίκτυο 50 περίπου σημείων στην περιοχή και εκτιμώντας έτσι την τιμή του, είτε μέσω ψηφιοποιημένων χαρτών και ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου. Στην παρούσα εργασία, οι τιμές (μέγιστη, ελάχιστη, μέση) του υψομέτρου υπολογίστηκε από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου.

Υψηλές τιμές υψομετρικού ολοκληρώματος δείχνουν ότι η τοπογραφία είναι υψηλή σε σχέση με τη μέση τιμή υψομέτρου της περιοχής. Μέσες και χαμηλές τιμές σχετίζονται με περισσότερο ομαλές τιμές. Η τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του σταδίου του *Κύκλου Απογύμνωσης* της περιοχής. Η *Υψομετρική Ανάλυση* αποτελεί έναν ισχυρό δείκτη για το διαχωρισμό τεκτονικά ενεργών και μη ενεργών περιοχών (Keller & Pinter, 2002, Παυλίδης, 2003).

Με βάση τον Strahler (1952, 1957, 1964, από Πεχλιβανίδου, 2007) υψηλή τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος υποδεικνύει μία περιοχή που βρίσκεται στο στάδιο νεότητας, όπου το ανάγλυφο είναι τραχύ και κυριαρχούν οι απότομες και βαθιές κοιλάδες σχήματος V. Μία ενδιάμεση τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος, καθώς επίσης και μία σιγμοειδή μορφή της υψομετρικής καμπύλης, υποδεικνύει μία περιοχή που βρίσκεται στο στάδιο ωριμότητας, όπου οι γεωμορφολογικές διεργασίες βρίσκονται σε μία σχετική ισορροπία. Τέλος, η παρουσία πλατώματος και η χαμηλή τιμή του ολοκληρώματος υποδεικνύει μία περιοχή στο στάδιο γήρατος, όπου κυριαρχούν οι πεπλατυσμένες κοιλάδες, καθώς και ότι η περιοχή χαρακτηρίζεται από τεκτονική αδράνεια, αφού οι διεργασίες διάβρωσης υπερισχύουν για μεγάλο χρονικό διάστημα των διαδικασιών ανύψωσης (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14. Τα τρία εξελικτικά στάδια αναγλύφου και οι υψομετρικές καμπύλες που τα χαρακτηρίζουν. α) Στάδιο νεότητας, β) Στάδιο ωριμότητας, γ) Στάδιο γήρατος (κατά Strahler, από Keller & Pinter, 2002).

Ο Κύκλος Απογύμνωσης περιγράφει τα στάδια εξέλιξης του μορφολογικού αναγλύφου, τα οποία είναι (Βουβαλίδης, 2004-2005):

- ✓ **Στάδιο Νεότητας.** Επικρατεί ένα ορεινό και τραχύ τοπίο. Η περιοχή αποστραγγίζεται από ένα υδρογραφικό δίκτυο το οποίο εξαιτίας της σημαντικής υψομετρικής διαφοράς, έχει μεγάλες κλίσεις με αποτέλεσμα μεγάλες ταχύτητες τρεχόμενων νερών. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μεγάλη μεταφορική ικανότητα των ρεμάτων, η οποία απομακρύνει το σύνολο των υλικών της ποτάμιας διάβρωσης. Η ποτάμια διάβρωση συμβαίνει κυρίως στη βάση της κοίτης των ρεμάτων με αποτέλεσμα τους μεγάλους ρυθμούς εκβάθυνσης των κοιτών. Επίσης, οι αυξημένες κλίσεις επιτρέπουν την μετακίνηση των προϊόντων της αποσάθρωσης και με άλλους τρόπους (π.χ. βαρύτητα). Κυριότερο χαρακτηριστικό του σταδίου νεότητας είναι η γρήγορη μεταβολή του αναγλύφου.

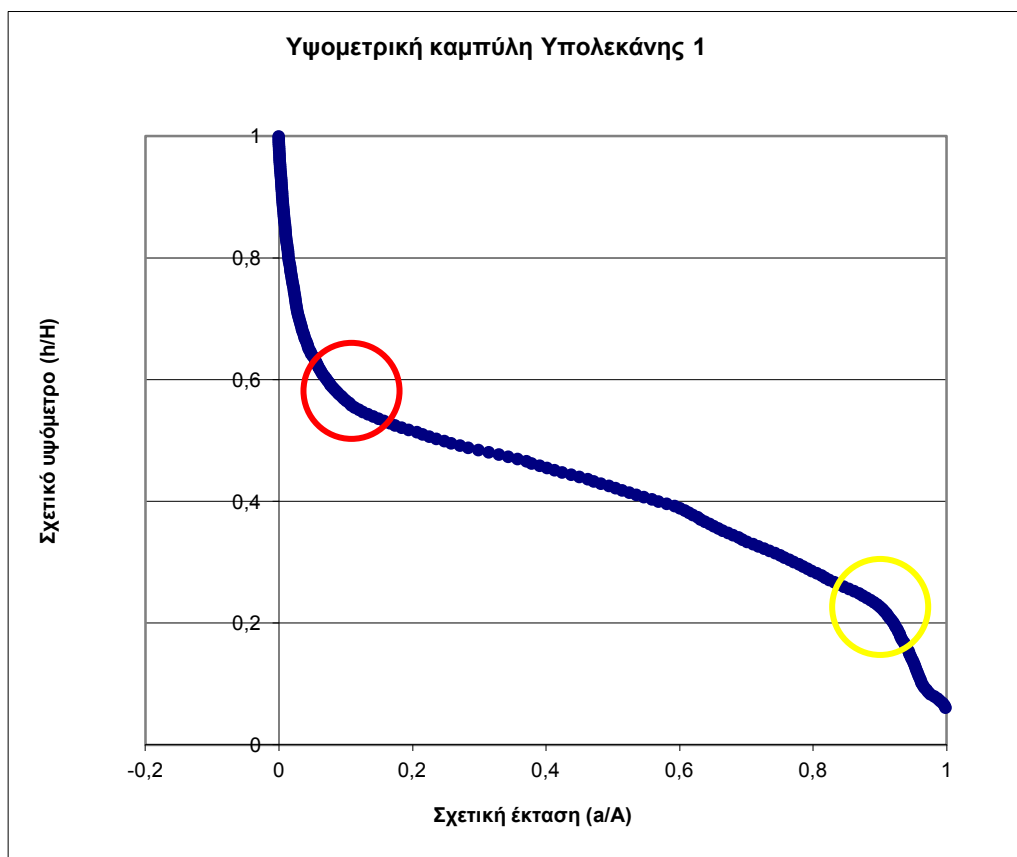
- ✓ **Στάδιο ωριμότητας.** Στο στάδιο αυτό η μεταβολή του αναγλύφου συνοδεύεται από μείωση των κλίσεων των κοιτών των ρεμάτων και του αναγλύφου. Οι διεργασίες συνεχίζονται με μειωμένη ένταση.
- ✓ **Στάδιο γήρατος.** Η περιοχή έχει χάσει την αρχική της τραχύτητα και έχει εξομαλυνθεί. Οι κορυφές παίρνουν αποστρογγυλεμένη μορφή και οι κοιλάδες είναι λιγότερο απότομες στις κλιτύες τους. Η κατά βάθος διάβρωση των ρεμάτων βρίσκεται πολύ κοντά στο βασικό επίπεδο, δίνοντας τη δυνατότητα στο τρεχούμενο νερό να διαβρώνει πλευρικά. Η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου είναι πλήρης. Οι κλίσεις των ποταμών και των κλιτύων των κοιλάδων μειώνονται ακόμη περισσότερο. Η διάβρωση σταματά εξαιτίας των πολύ μικρών κλίσεων της κοίτης, που δεν επιτρέπουν μεταφορά υλικών από τα ρέοντα ύδατα.

Η μετάβαση από το στάδιο της νεότητας στο στάδιο της ωριμότητας ανταποκρίνεται, κατά προσέγγιση, σε τιμές του υψομετρικού ολοκληρώματος που αγγίζουν το 60% (τιμή 0,6), ενώ αντίθετα η μετάβαση από το στάδιο της ωριμότητας σε αυτό του γήρατος ανταποκρίνεται σε τιμές του υψομετρικού ολοκληρώματος κοντά στο 35% (τιμή 0,35) (Strahler 1952, 1957, 1964 από Αστάρα, 1980).

Σύμφωνα με αυτά που προαναφέρθηκαν, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή των υψομετρικών καμπυλών, καθώς και ο υπολογισμός των υψομετρικών ολοκληρωμάτων για τις επτά υπολεκάνες της υδρολογικής λεκάνης της λίμνης Βόλβης. Για την κατασκευή των υψομετρικών καμπυλών, χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου SRTM, το οποίο επεξεργάστηκε στο περιβάλλον του MapInfo, με σκοπό τη δημιουργία ιστογραμμάτων αναγλύφου. Στη συνέχεια έγινε εξαγωγή των δεδομένων από τα ιστογράμματα και εισαγωγή αυτών σε ένα φύλλο excel (δημιουργήθηκε από Βουβαλίδη, 2005), το οποίο δίνει απευθείας τη μορφή της καμπύλης. Οι παράγοντες του υψομετρικού ολοκληρώματος (μέγιστο, ελάχιστο και μέσο υψόμετρο) υπολογίστηκαν απευθείας από το SRTM, μέσω του προγράμματος ArcGIS.

Τα αποτελέσματα της υψομετρικής ανάλυσης είναι :

Υπολεκάνη 1



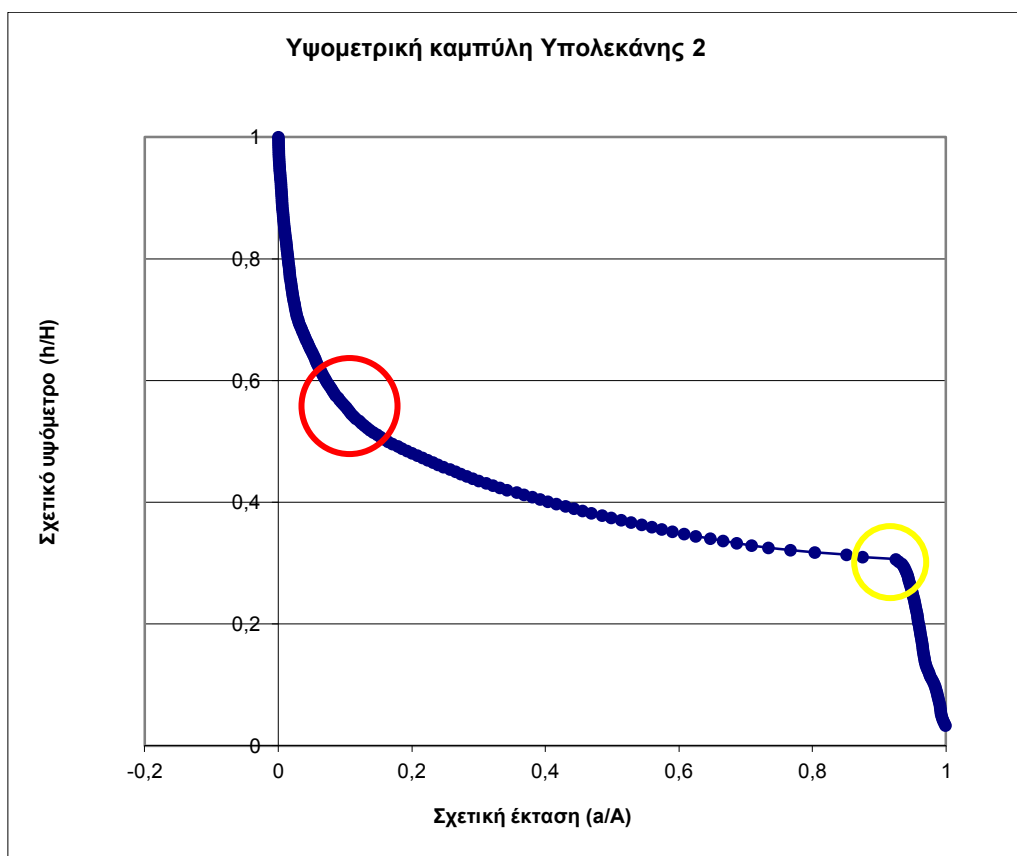
Σχήμα 4.15. Υψομετρική καμπύλη υπολεκάνης 1.

Στο Σχήμα 4.15 παρατηρούνται απότομες μεταβολές της κλίσης της υψομετρικής καμπύλης. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στην έντονη τεκτονική δραστηριότητα, που προκαλεί την ανύψωση των περιοχών αριστερά από τον κόκκινο κύκλο και δεξιά από τον κίτρινο κύκλο, με αποτέλεσμα τον διαφορετικό βαθμό διάβρωσης. Από τον υπολογισμό του υψομετρικού ολοκληρώματος προκύπτει ότι η υπολεκάνη 1 βρίσκεται στο στάδιο ωριμότητας (Πίνακας 4.6).

Πίνακας 4.6. Τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος (H_i) της υπολεκάνης 1.

Υπολεκάνη	h_{mean} (m)	h_{min} (m)	h_{max} (m)	H_i	$H_i\%$
1	436,9	65	1059	0,374	37,4

Υπολεκάνη 2



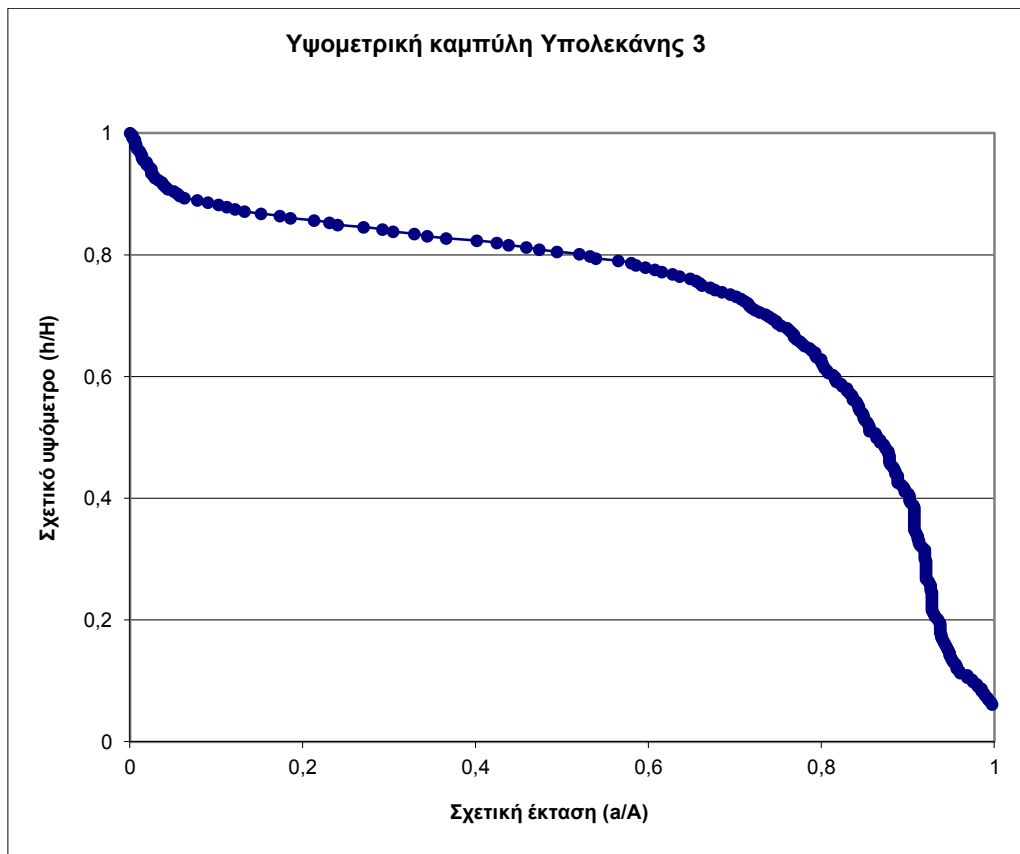
Σχήμα 4.16. Υψομετρική καμπύλη υπολεκάνης 2.

Στο Σχήμα 4.16 παρατηρούνται απότομες μεταβολές της κλίσης της υψομετρικής καμπύλης, οι οποίες επηρεάζουν το βαθμό διάβρωσης. Οφείλονται στην έντονη τεκτονική δραστηριότητα, προκαλώντας ανύψωση των περιοχών αριστερά από τον κόκκινο κύκλο και δεξιά από τον κίτρινο κύκλο, καθώς επίσης και στη διαφορετική λιθολογική σύσταση, αφού από τα ιζήματα μεταβαίνουμε σε γνευσίους, αμφιβολίτες και σχιστόλιθους. Από τον υπολογισμό του υψομετρικού ολοκληρώματος προκύπτει ότι η υπολεκάνη 2 βρίσκεται στο στάδιο ωριμότητας (Πίνακας 4.7).

Πίνακας 4.7. Τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος (H_i) της υπολεκάνης 2.

Υπολεκάνη	h_{mean} (m)	h_{min} (m)	h_{max} (m)	H_i	$H_i\%$
2	436,68	36	1085	0,382	38,2

Υπολεκάνη 3



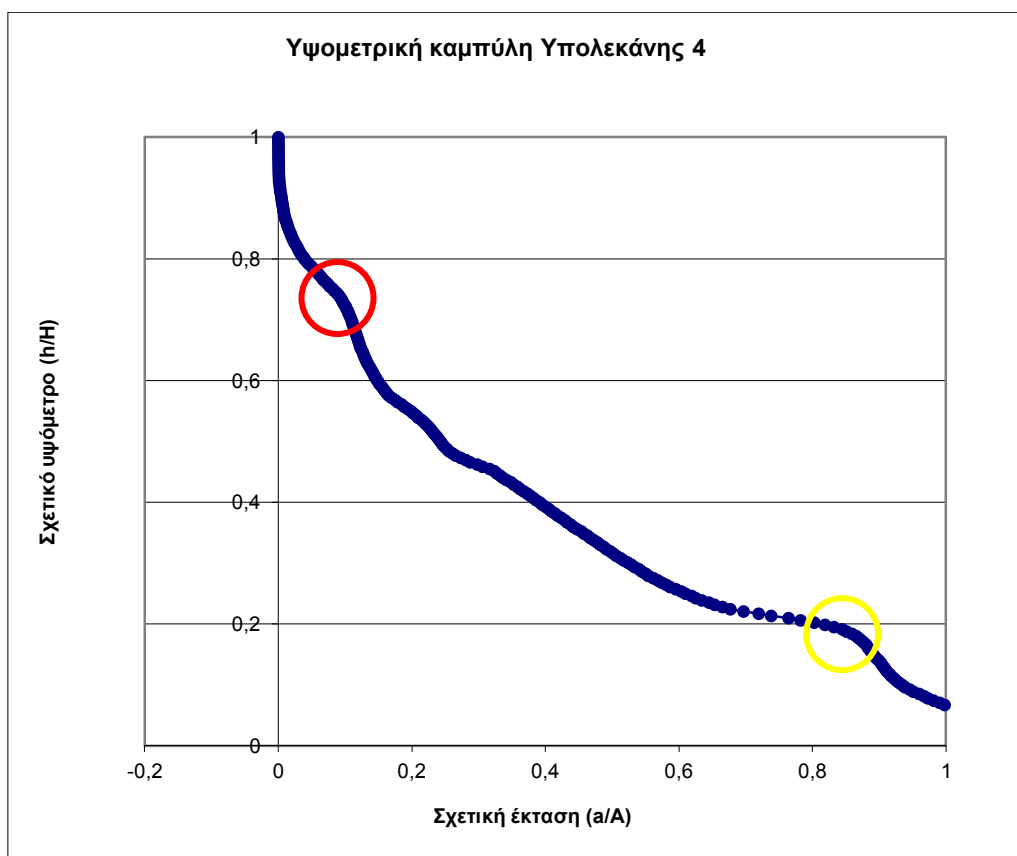
Σχήμα 4.17. Υψομετρική καμπύλη υπολεκάνης 3.

Η καμπύλη του Σχήματος 4.17 είναι η τυπική καμπύλη αναγλύφου, το οποίο βρίσκεται στο στάδιο νεότητας, σύμφωνα με το Σχήμα 4.14 Από τον υπολογισμό του υψομετρικού ολοκληρώματος προκύπτει το ίδιο συμπέρασμα (Πίνακας 4.8).

Πίνακας 4.8. Τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος (H_i) της υπολεκάνης 3.

Υπολεκάνη	h_{mean} (m)	h_{min} (m)	h_{max} (m)	H_i	$H_i\%$
3	460,26	39	637	0,704	70,4

Υπολεκάνη 4



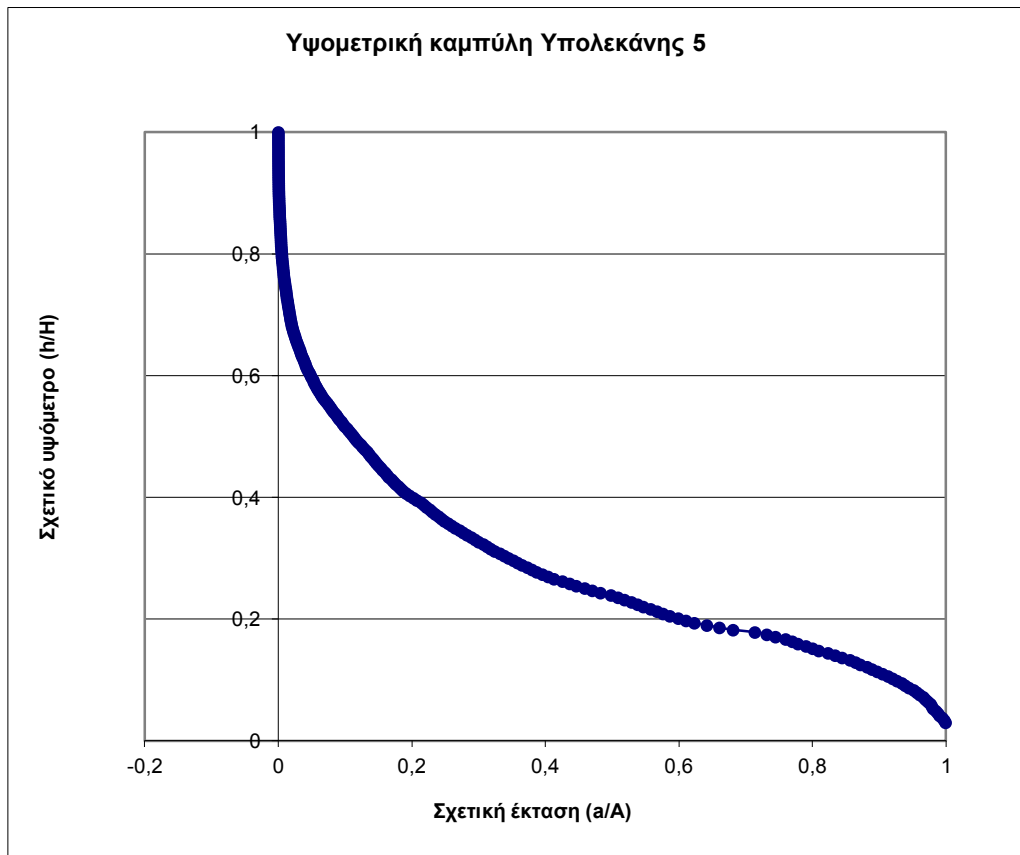
Σχήμα 4.18. Υψομετρική καμπύλη υπολεκάνης 4.

Στο Σχήμα 4.18 παρατηρούνται απότομες μεταβολές της κλίσης της υψομετρικής καμπύλης, επηρεάζοντας το βαθμό διάβρωσης. Οφείλονται στην έντονη τεκτονική δραστηριότητα (κόκκινος κύκλος), καθώς επίσης και στη διαφορετική λιθολογική σύσταση, αφού από τα ιζήματα μεταβαίνουμε σε φυλλίτες (κίτρινος κύκλος). Από τον υπολογισμό του υψομετρικού ολοκληρώματος προκύπτει ότι η υπολεκάνη 4 βρίσκεται στο στάδιο γήρατος (Πίνακας 4.9).

Πίνακας 4.9. Τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος (H_i) της υπολεκάνης 4.

Υπολεκάνη	h_{mean} (m)	h_{min} (m)	h_{max} (m)	H_i	$H_i\%$
4	366,9	66	986	0,327	32,7

Υπολεκάνη 5



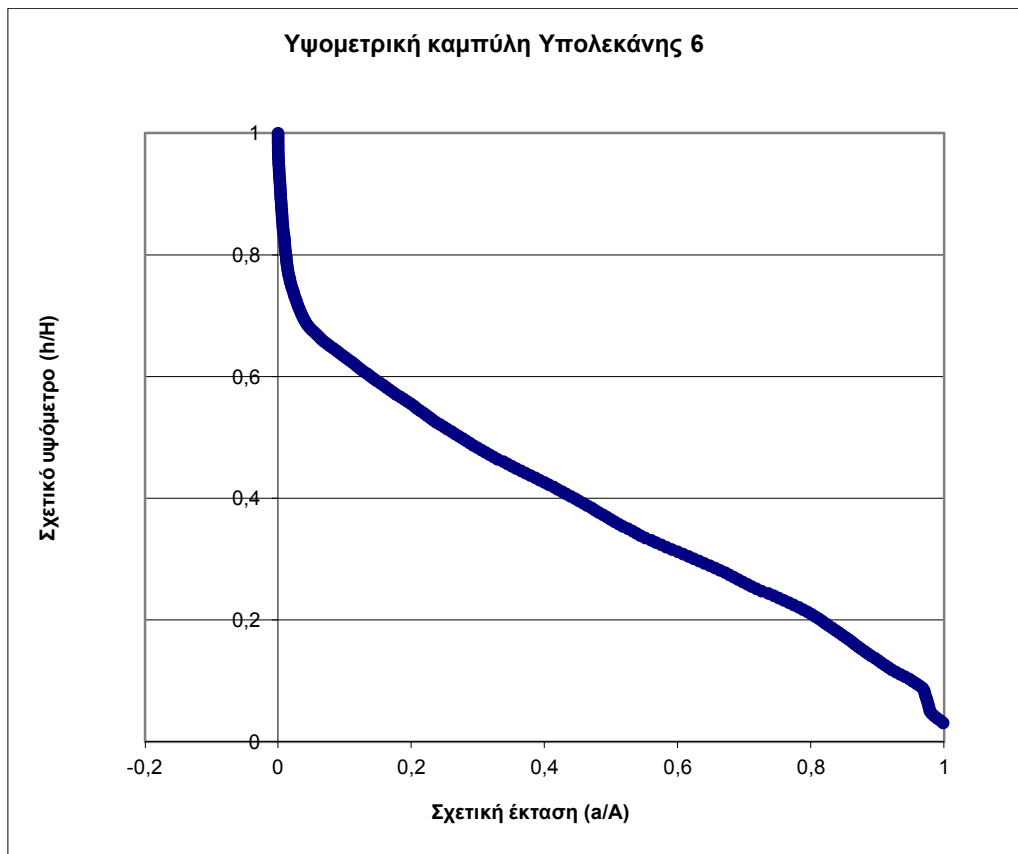
Σχήμα 4.19. Υψομετρική καμπύλη υπολεκάνης 5.

Η καμπύλη του Σχήματος 4.19 είναι η τυπική καμπύλη αναγλύφου, το οποίο βρίσκεται στο στάδιο γήρατος, σύμφωνα με το Σχήμα 4.14. Από τον υπολογισμό του υψομετρικού ολοκληρώματος προκύπτει το ίδιο συμπέρασμα (Πίνακας 4.10).

Πίνακας 4.10. Τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος (H_i) της υπολεκάνης 5.

Υπολεκάνη	h_{mean} (m)	h_{min} (m)	h_{max} (m)	H_i	$H_i\%$
5	319,7	34	1140	0,258	25,8

Υπολεκάνη 6



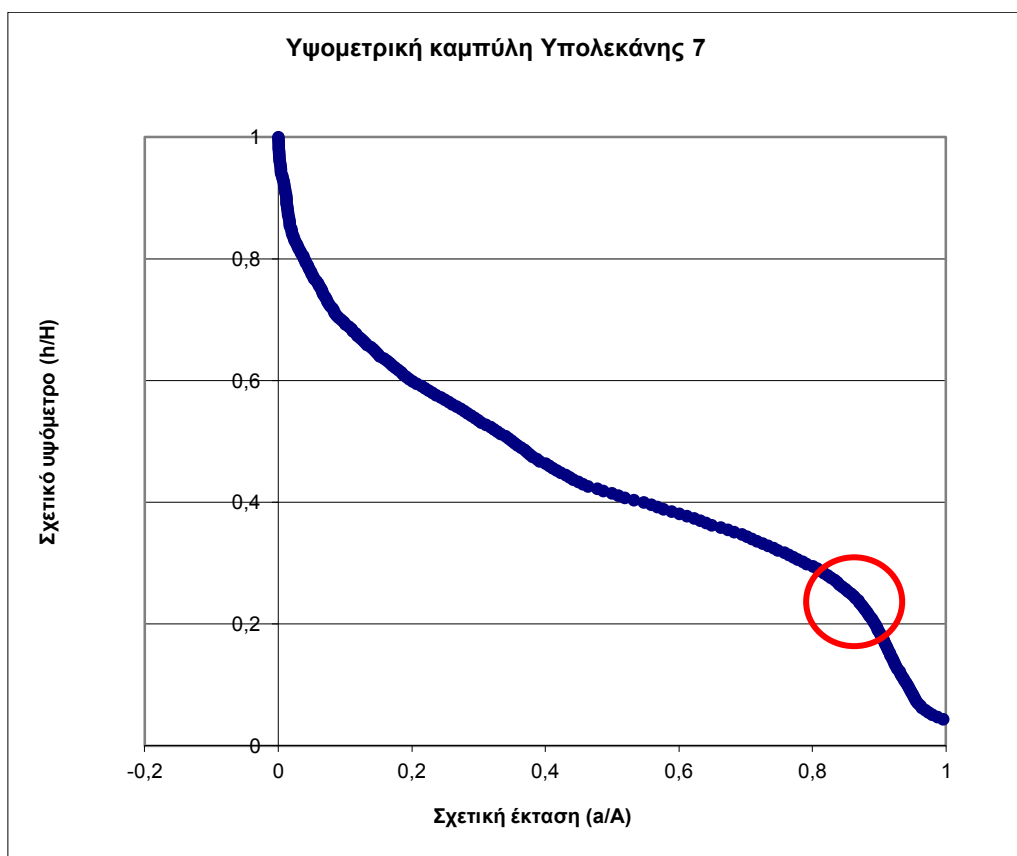
Σχήμα 4.20. Υψομετρική καμπύλη υπολεκάνης 6.

Η καμπύλη του Σχήματος 4.20 είναι η τυπική καμπύλη αναγλύφου, το οποίο βρίσκεται στο στάδιο ωριμότητας, σύμφωνα με το Σχήμα 4.14. Από τον υπολογισμό του υψομετρικού ολοκληρώματος προκύπτει το ίδιο συμπέρασμα (Πίνακας 4.11).

Πίνακας 4.11. Τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος (H_i) της υπολεκάνης 6.

Υπολεκάνη	h_{mean} (m)	h_{min} (m)	h_{max} (m)	H_i	$H_i\%$
6	406,7	33	1066	0,361	36,1

Υπολεκάνη 7



Σχήμα 4.21. Υψομετρική καμπύλη υπολεκάνης 6.

Η καμπύλη του Σχήματος 4.21 είναι η τυπική καμπύλη αναγλύφου, το οποίο βρίσκεται στο στάδιο ωριμότητας, σύμφωνα με το Σχήμα 4.14. Από τον υπολογισμό του υψομετρικού ολοκληρώματος προκύπτει το ίδιο συμπέρασμα (Πίνακας 4.12). Ωστόσο, παρατηρείται μία απότομη μεταβολή της κλίσης της υψομετρικής καμπύλης (κόκκινος κύκλος), η οποία οφείλεται στην τεκτονική δραστηριότητα και στη διαφορετική λιθολογική σύσταση (γνεύσιοι-μάρμαρα) και επηρεάζει το βαθμό διάβρωσης.

Πίνακας 4.12. Τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος (H_i) της υπολεκάνης 7.

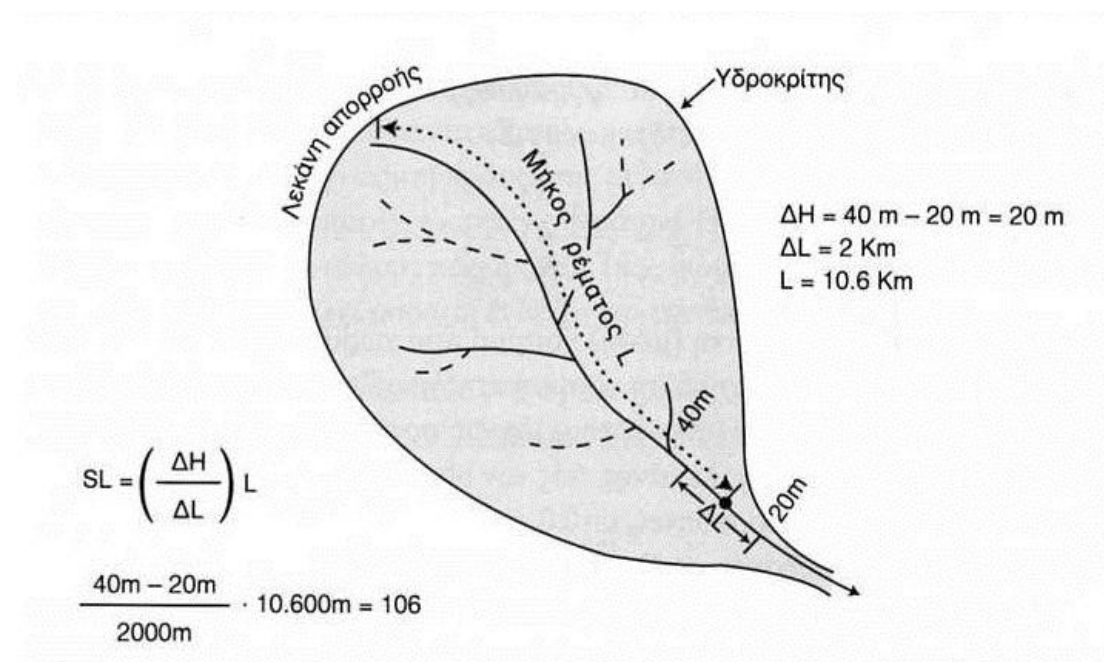
Υπολεκάνη	h_{mean} (m)	h_{min} (m)	h_{max} (m)	H_i	$H_i\%$
7	372,9	37	850	0,413	41,3

4.4.3. Μήκος ρέματος (κλάδος υδρογραφικού δικτύου-Δείκτης κλίσης του (SL))

Ο δείκτης SL (Stream Length/Μήκος ρέματος) υπολογίζεται για μία συγκεκριμένη απόσταση από τον τύπο :

$$SL = \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right) \cdot L$$

όπου $\Delta H/\Delta L$ είναι η κλίση του ρέματος (ΔH είναι η υψομετρική διαφορά και ΔL είναι το αντίστοιχο μήκος του), και το L είναι το συνολικό μήκος του ρέματος, από το μέσο του τμήματος που μας ενδιαφέρει, προς τα ανάντη, και εκφράζει το λόγο του μήκους ενός υδρογραφικού κλάδου ως προς το μήκος του (Σχήμα 4.22).



Σχήμα 4.22. Παράδειγμα κλίσης (SL) υδρογραφικού κλάδου (Τροποποιημένο σχήμα από Keller & Pinter, 2002) (Παυλίδης, 2003).

Η κλίση της επιφάνειας του νερού γενικά συσχετίζεται με την κλίση της κοίτης ενός ρέματος και υπάρχει συσχετισμός της εκφόρτωσης με το μήκος του ρέματος. Άρα, εφόσον η ολική δύναμη διάβρωσης του ρέματος είναι ανάλογη της κλίσης της επιφάνειας του νερού και της εκφόρτωσης, τότε και ο SL θα συσχετίζεται με τη δύναμη του ρέματος να διαβρώνει το υπόβαθρο και να μεταφέρει τα ιζήματα.

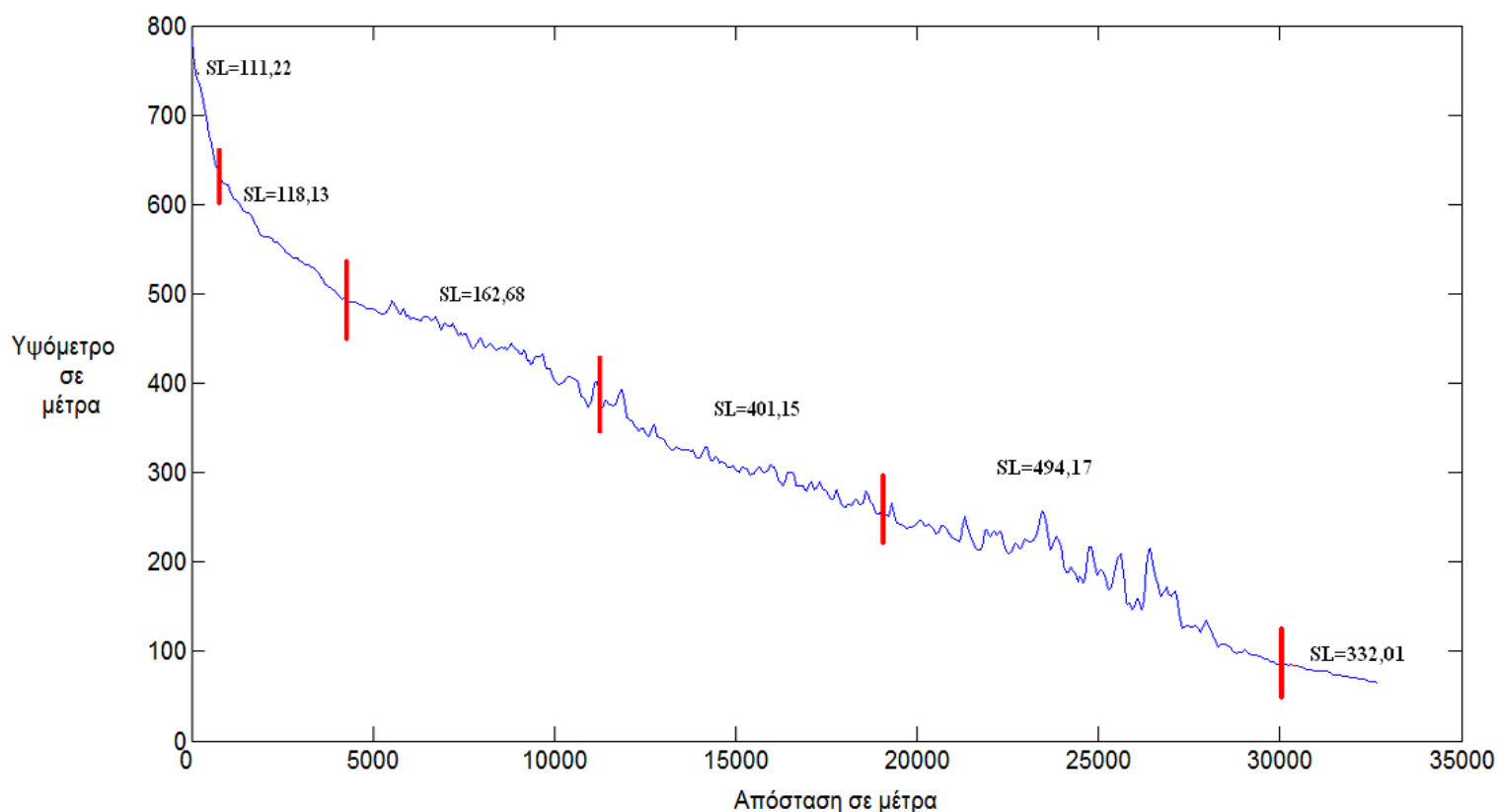
Έτσι, ο SL είναι ευαίσθητος στις αλλαγές της κλίσης της κοίτης και αυτό επιτρέπει την εκτίμηση για πιθανή τεκτονική δράση (ανυψώσεις-καταβυθίσεις), π.χ. ύπαρξη νέου ρήγματος που επηρεάζει τοπικά την κλίση της κοίτης. Επίσης, επιτρέπει τον προσδιορισμό της σύστασης των πετρωμάτων (αυξάνεται η τιμή του δείκτη σε σκληρά πετρώματα και μειώνεται σε μαλακά πετρώματα) και της τοπογραφίας.

Ο SL χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει πρόσφατη τεκτονική δραστηριότητα ανιχνεύοντας ανώμαλα υψηλές ή και χαμηλές τιμές (π.χ κατά μήκος γραμμικής κοιλάδας, λόγω ύπαρξης οριζόντιας μετατόπισης ρήγματος) σε ένα συγκεκριμένο τύπο πετρώματος.

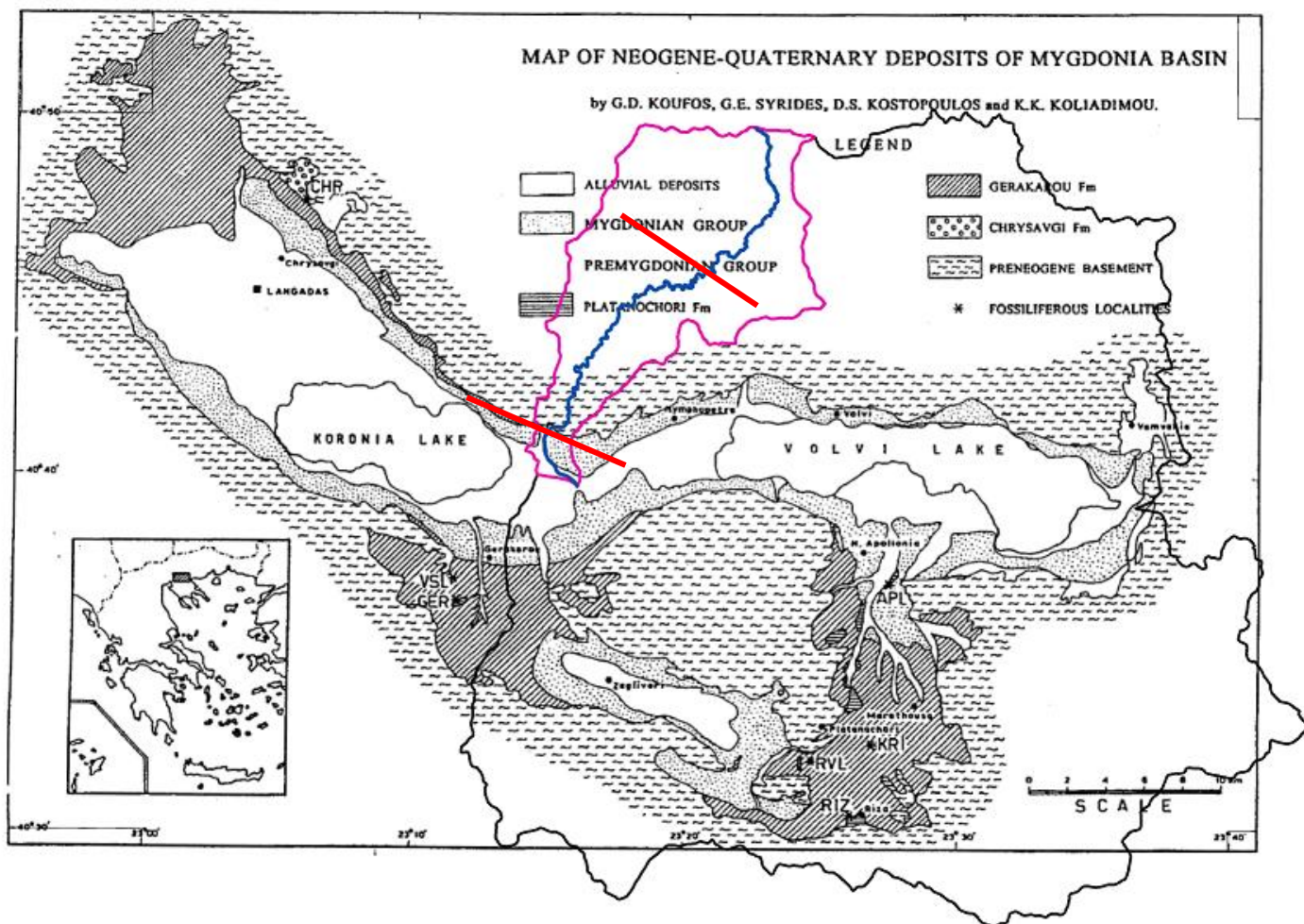
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παράμετρος L, αναφέρεται στον κλάδο με το μεγαλύτερο μήκος, ο οποίος σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Horton (1945) (Βουβαλίδης, 2004-2005) είναι ο κλάδος μέγιστης τάξης.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον υπολογισμό του δείκτη SL είναι :

Υπολεκάνη 1

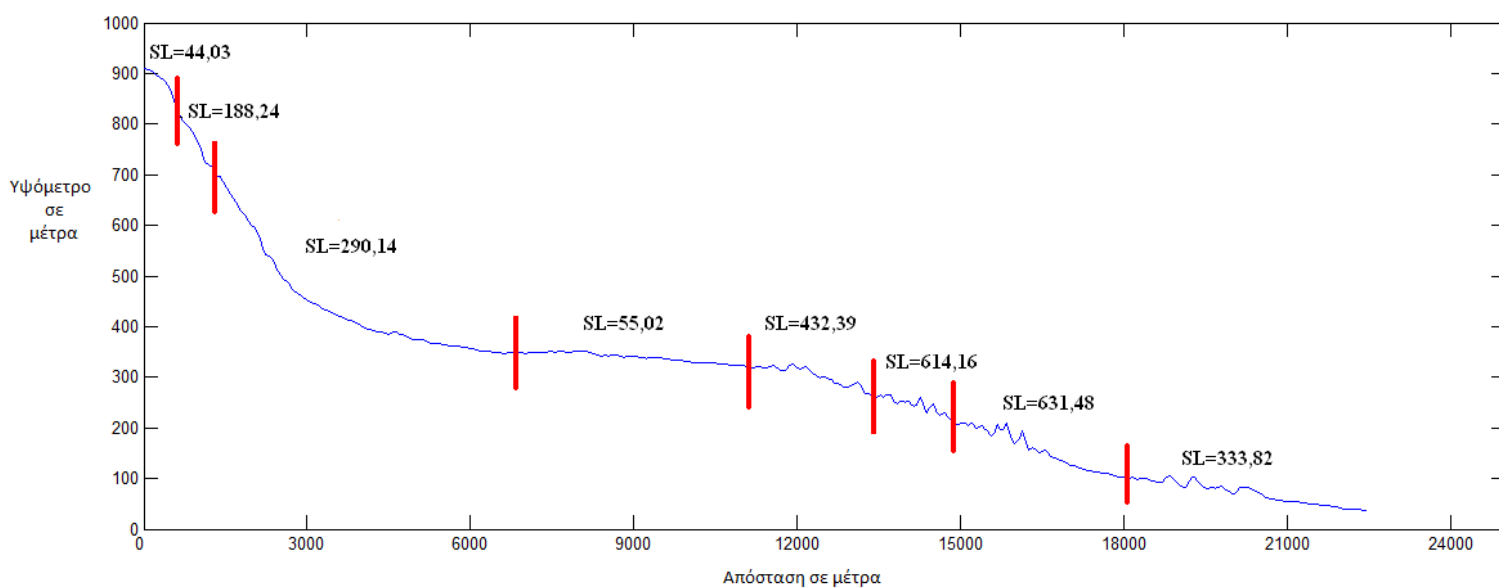


Σχήμα 4.23. Μορφολογικό προφίλ υπολεκάνης 1, στο οποίο φαίνεται πώς μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη SL.

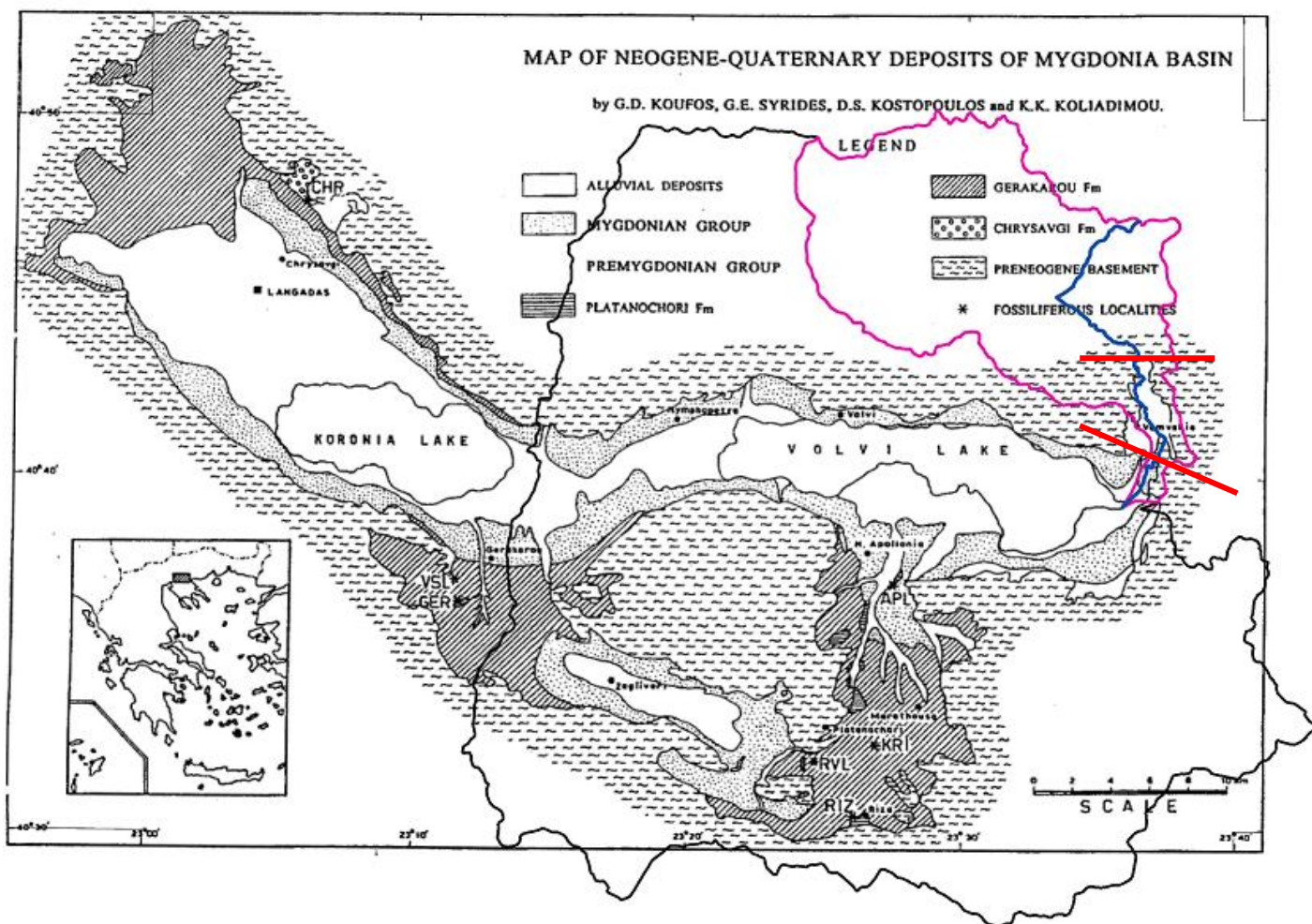


Σχήμα 4.24. Στο χάρτη απεικονίζεται το Μυγδονιακό-Προμυγδονιακό σύστημα. Η περιοχή μεταξύ των γραμμών με κόκκινο χρώμα παρουσιάζει υψηλή τιμή δείκτη SL.-

Υπολεκάνη 2

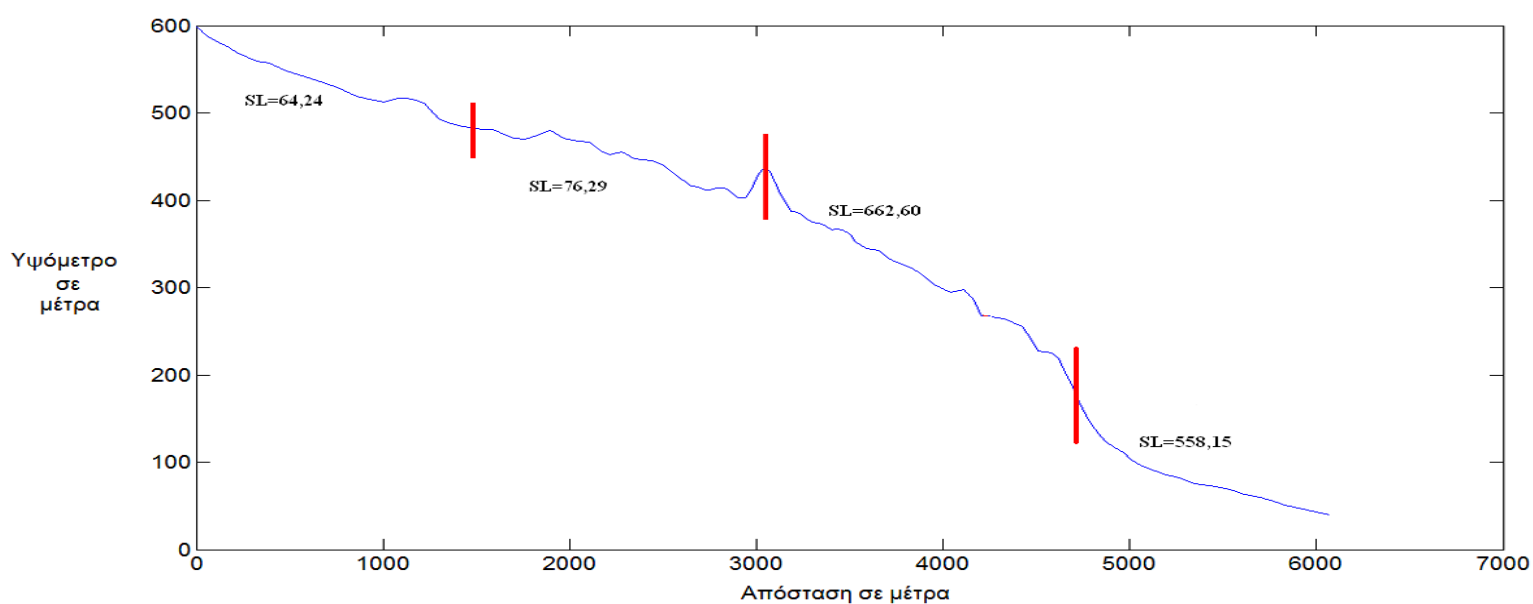


Σχήμα 4.25. Μορφολογικό προφίλ υπολεκάνης 2, στο οποίο φαίνεται πώς μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη SL.

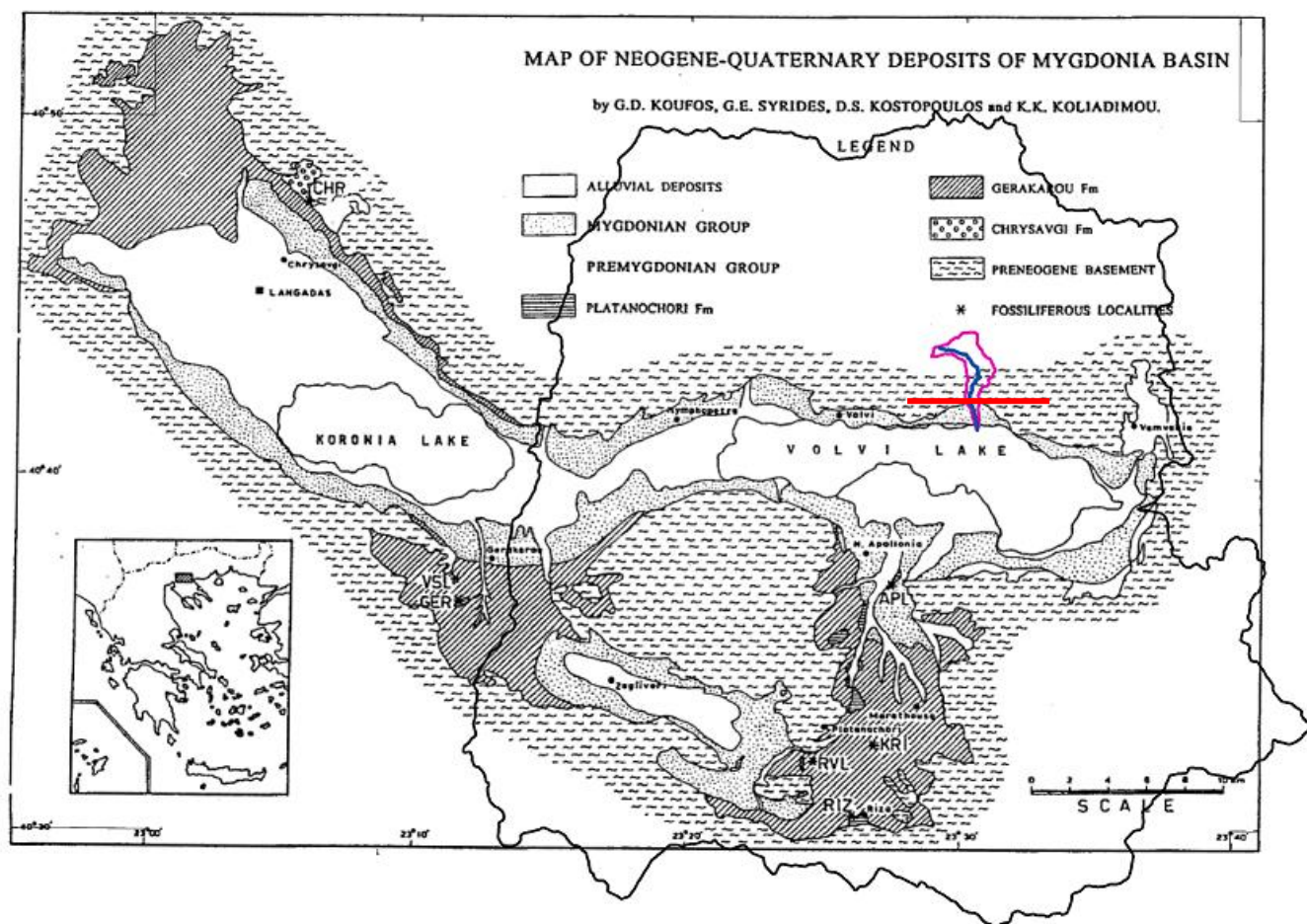


Σχήμα 4.26. Στο χάρτη απεικονίζεται το Μυγδονιακό-Προμυγδονιακό σύστημα. Η περιοχή μεταξύ των γραμμών με κόκκινο χρώμα παρουσιάζει υψηλή τιμή δείκτη SL.

Υπολεκάνη 3

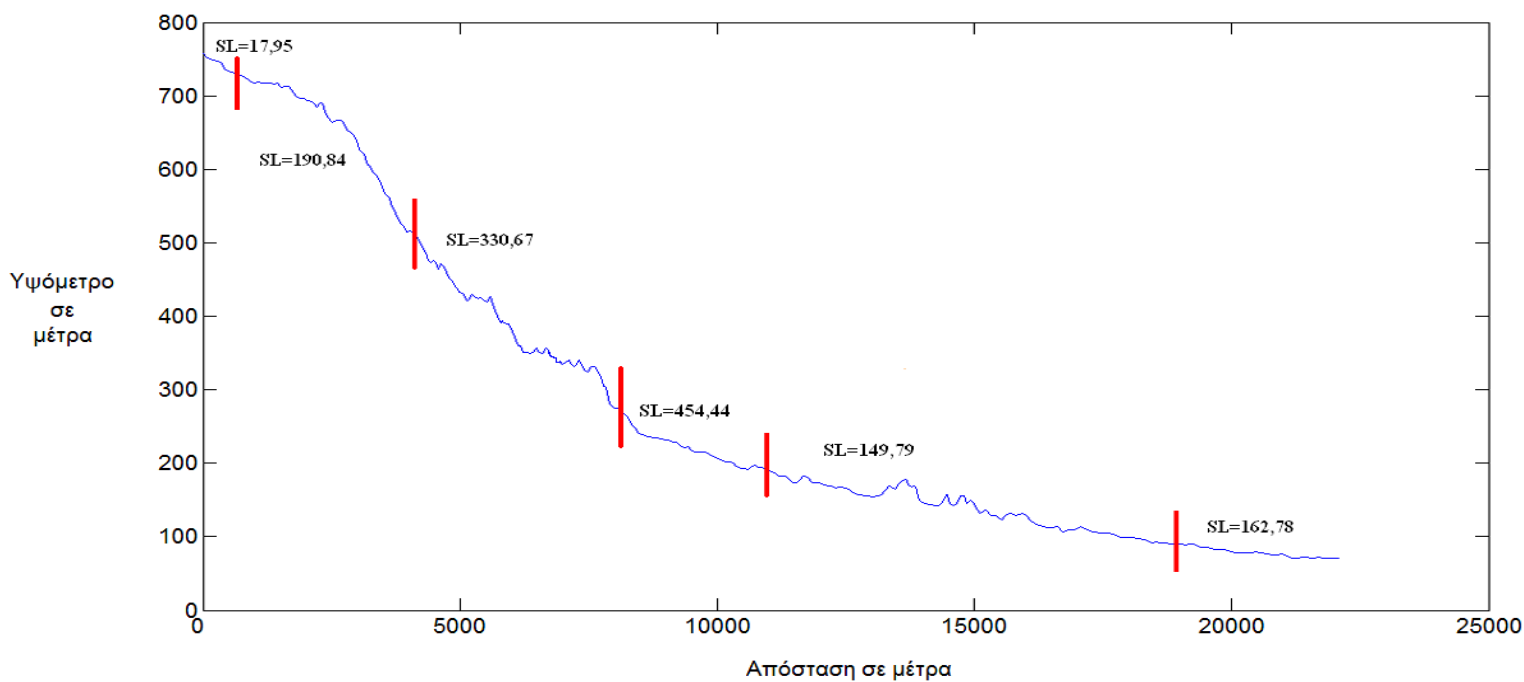


Σχήμα 4.27. Μορφολογικό προφίλ υπολεκάνης 3, στο οποίο φαίνεται πώς μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη SL.

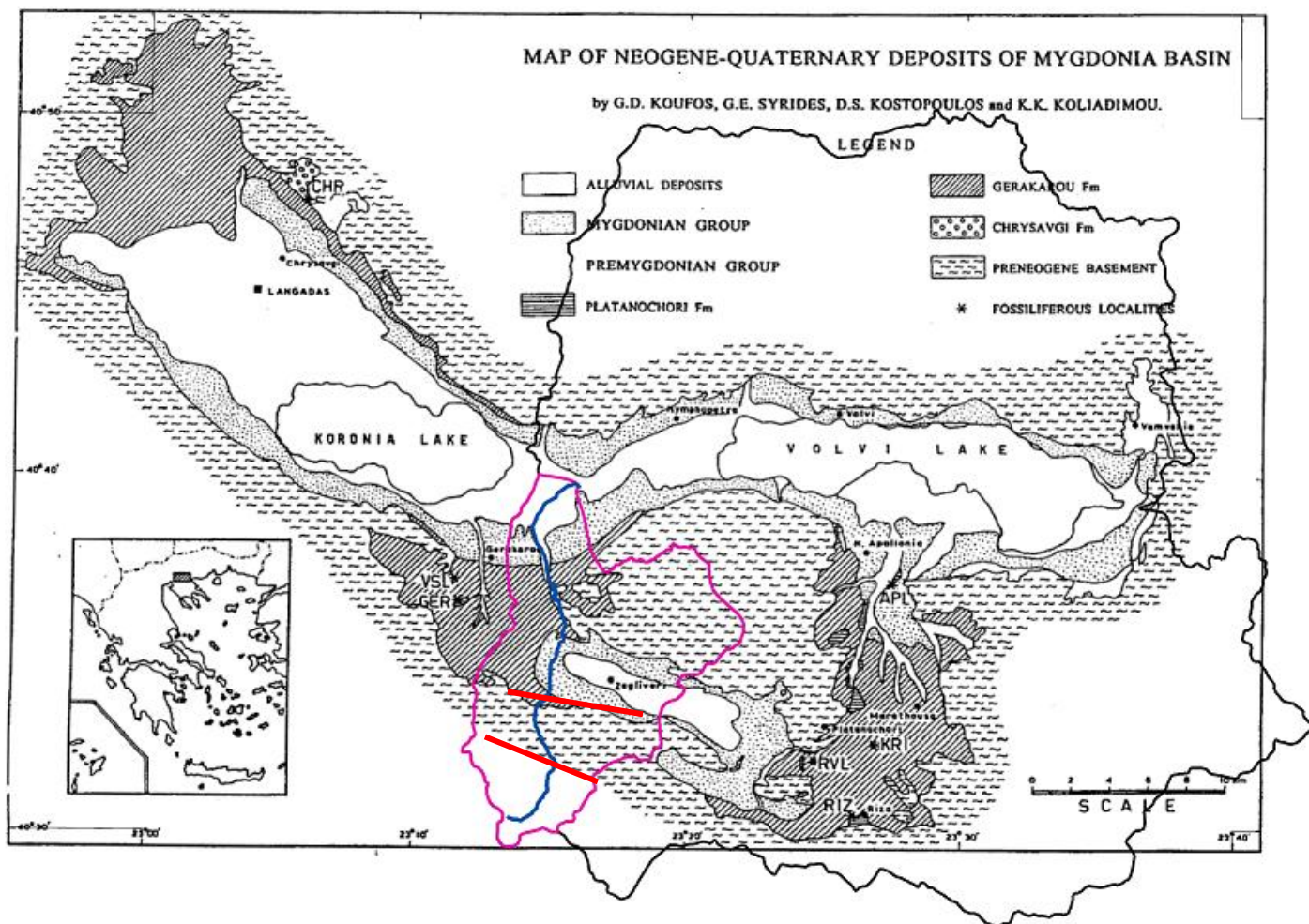


Σχήμα 4.28. Στο χάρτη απεικονίζεται το Μυγδονιακό-Προμυγδονιακό σύστημα. Η τιμή του δείκτη SL μειώνεται από την κόκκινη γραμμή και πάνω.

Υπολεκάνη 4

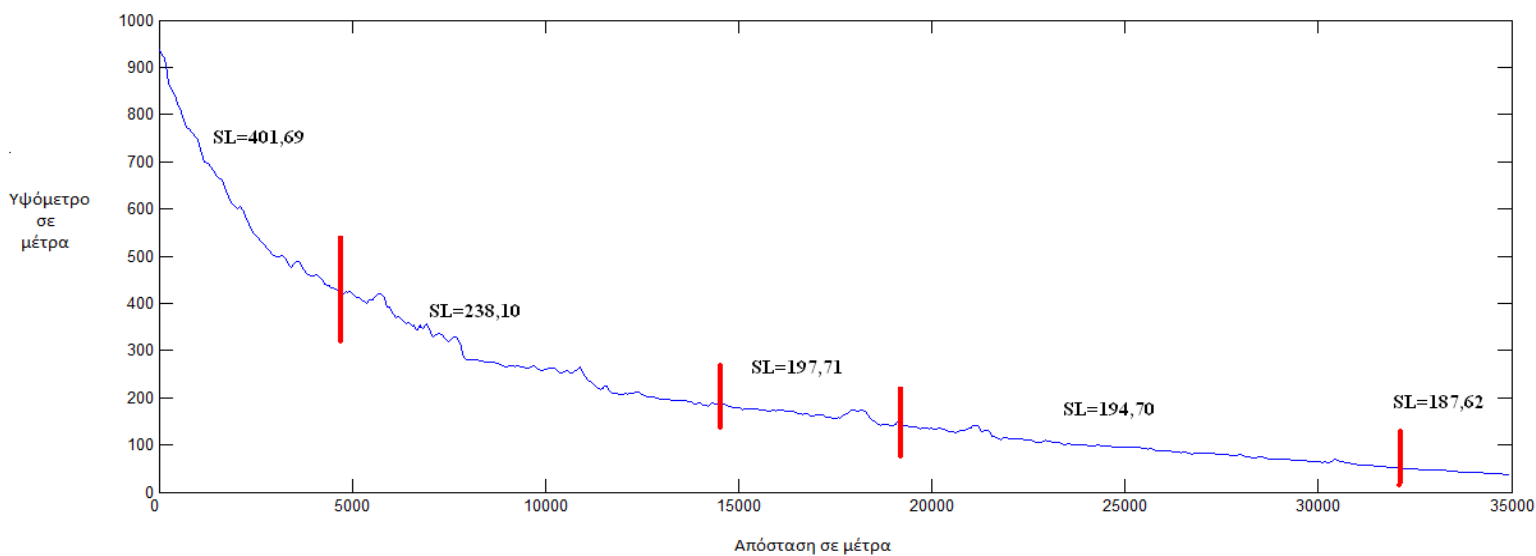


Σχήμα 4.29. Μορφολογικό προφίλ υπολεκάνης 4, στο οποίο φαίνεται πώς μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη SL.

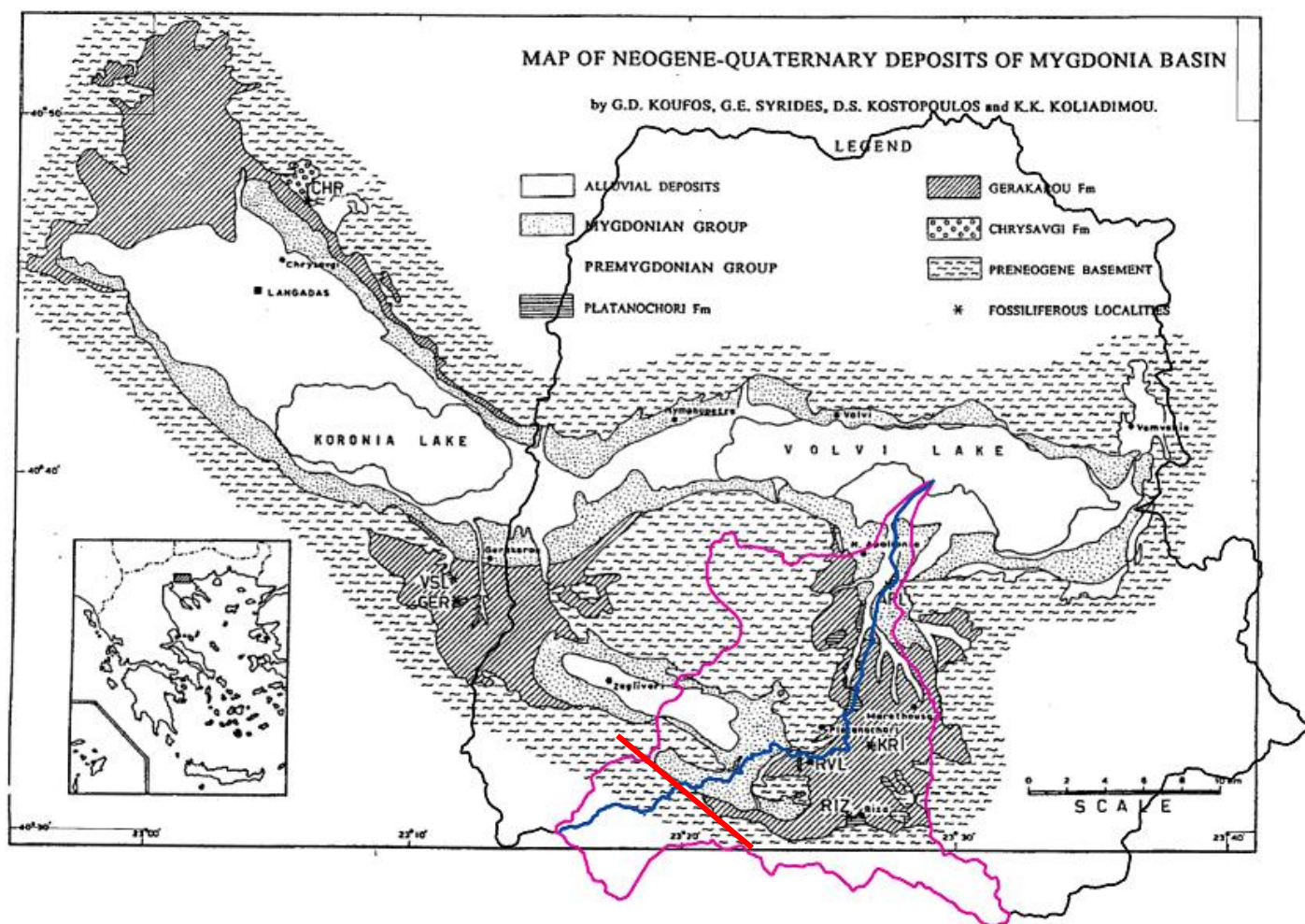


Σχήμα 4.30. Στο χάρτη απεικονίζεται το Μυγδονιακό-Προμυγδονιακό σύστημα. Η περιοχή μεταξύ των γραμμών με κόκκινο χρώμα παρουσιάζει υψηλή τιμή δείκτη SL.

Υπολεκάνη 5

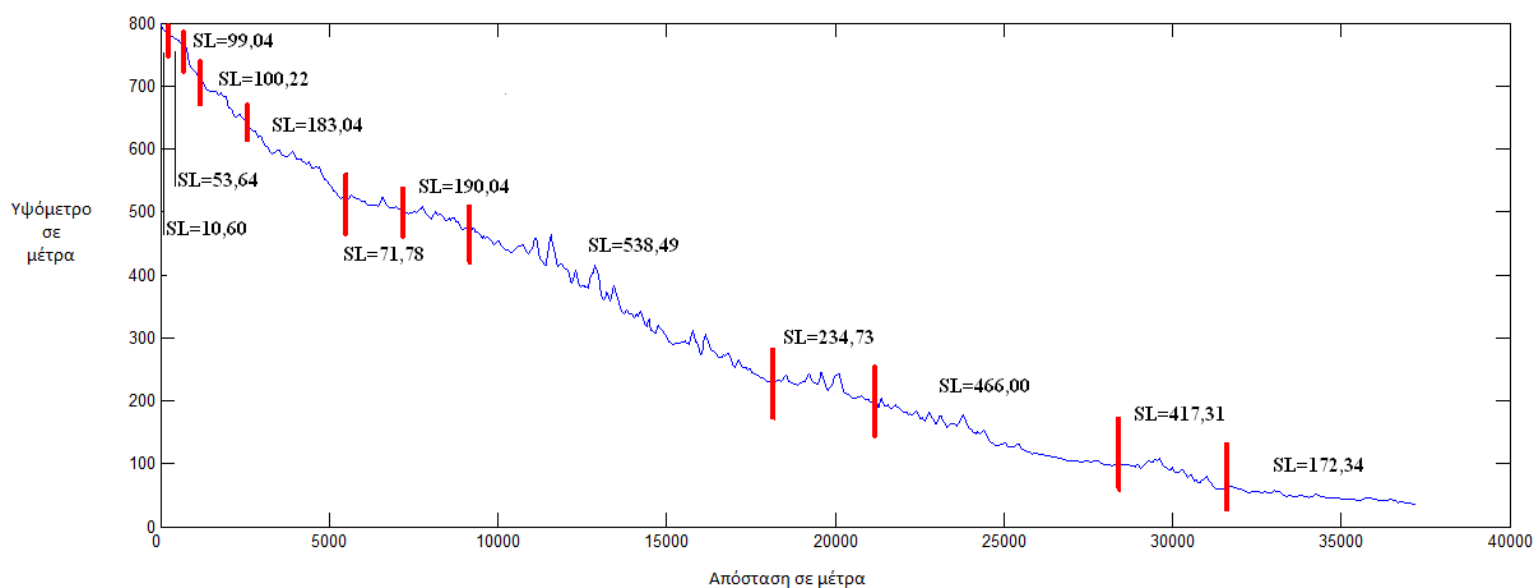


Σχήμα 4.31. Μορφολογικό προφίλ υπολεκάνης 5, στο οποίο φαίνεται πώς μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη SL.

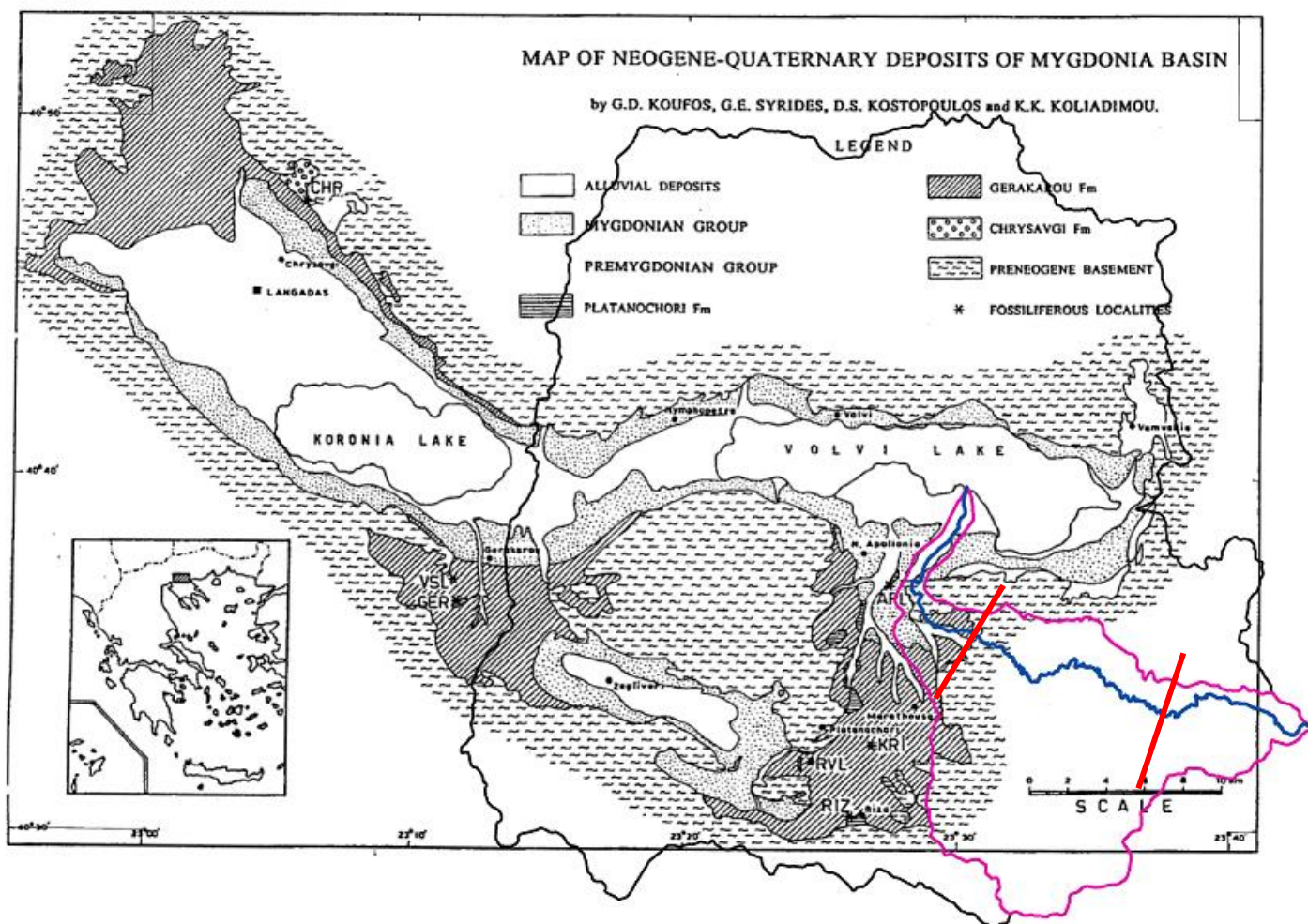


Σχήμα 4.32. Στο χάρτη απεικονίζεται το Μυγδονιακό-Προμυγδονιακό σύστημα. Η τιμή του δείκτη SL αυξάνεται από την κόκκινη γραμμή και κάτω.

Υπολεκάνη 6

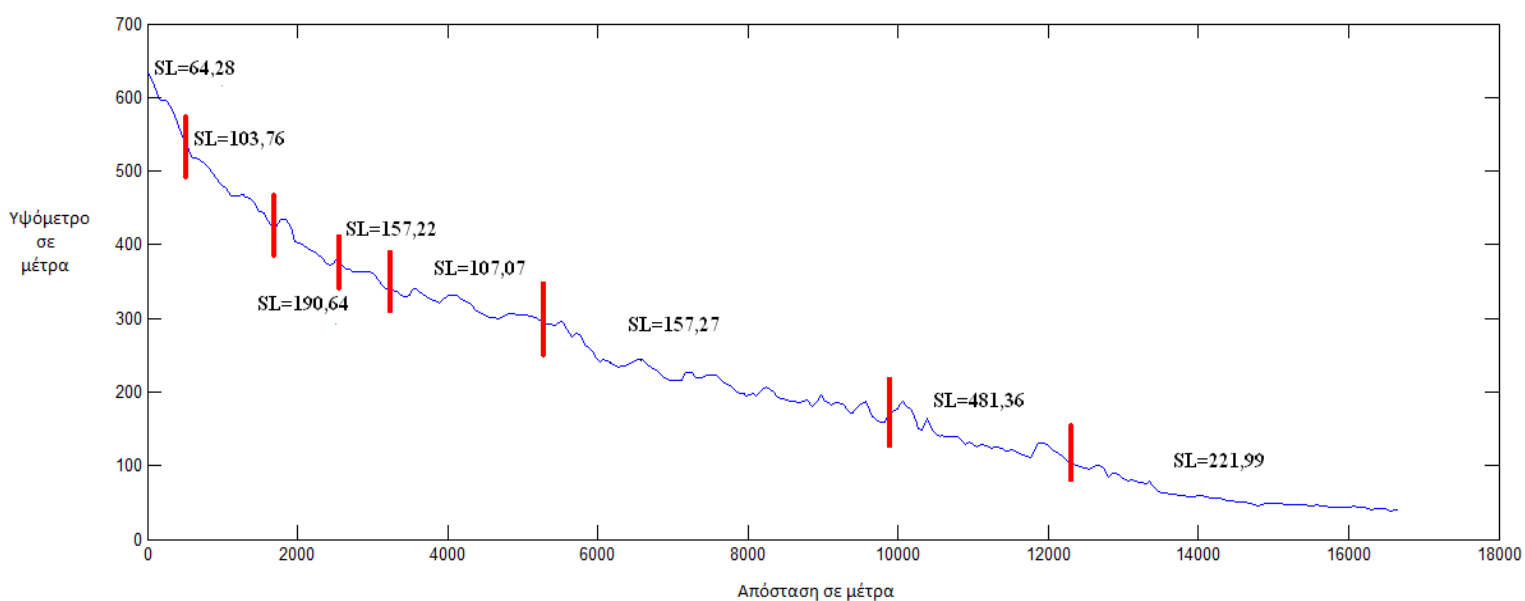


Σχήμα 4.33. Μορφολογικό προφίλ υπολεκάνης 6, στο οποίο φαίνεται πώς μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη SL.

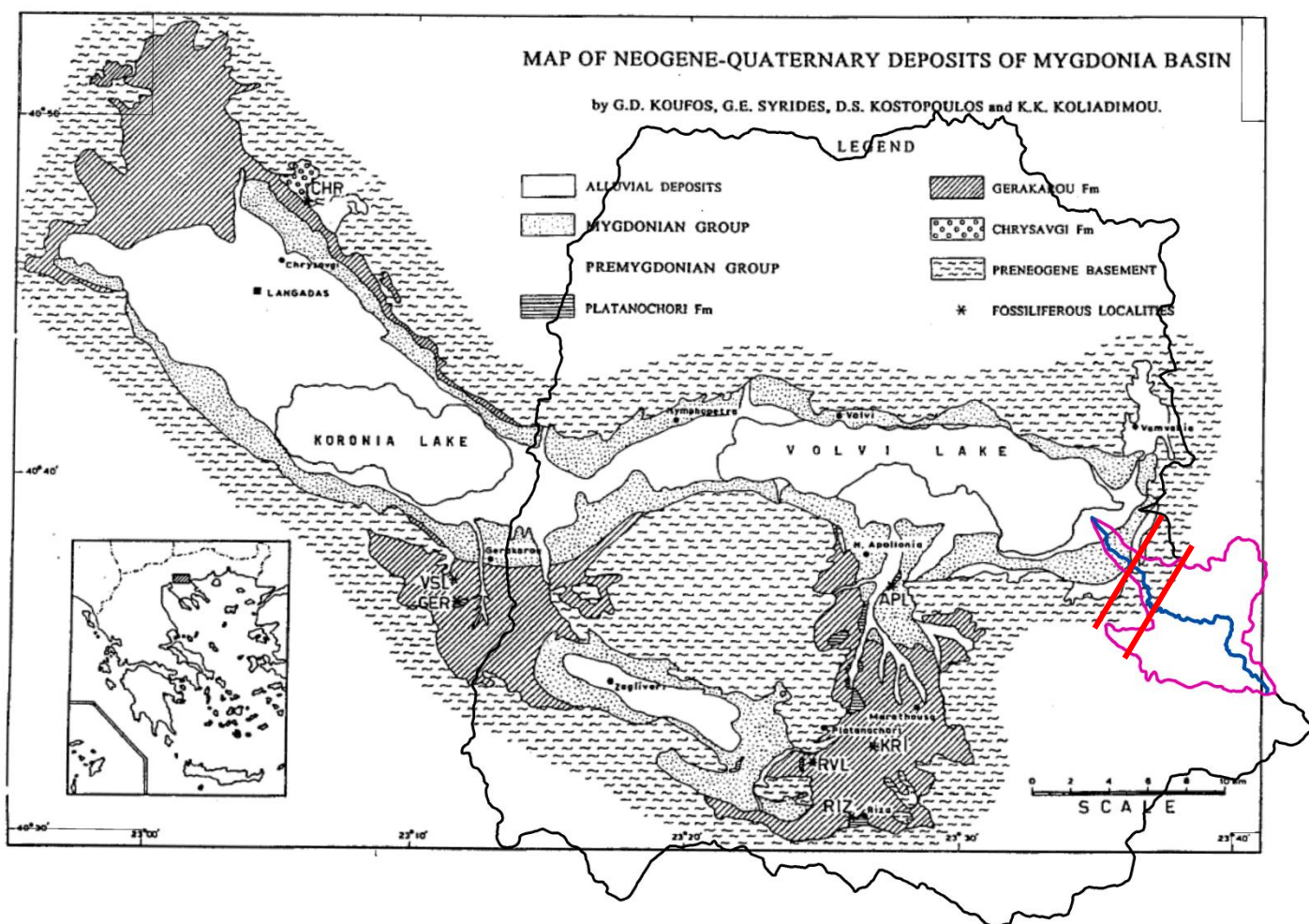


Σχήμα 4.34. Στο χάρτη απεικονίζεται το Μυγδονιακό-Προμυγδονιακό σύστημα. Η περιοχή μεταξύ των γραμμών με κόκκινο χρώμα παρουσιάζει υψηλή τιμή δείκτη SL.

Υπολεκάνη 7



Σχήμα 4.35. Μορφολογικό προφίλ υπολεκάνης 7, στο οποίο φαίνεται πώς μεταβάλλεται η τιμή του δείκτη SL.



Σχήμα 4.36. Στο χάρτη απεικονίζεται το Μυγδονιακό-Προμυγδονιακό σύστημα. Η περιοχή μεταξύ των γραμμών με κόκκινο χρώμα παρουσιάζει υψηλή τιμή δείκτη SL.

Στα Σχήματα 4.24 έως 4.36 παρουσιάζονται οι μεταβολές της τιμής του δείκτη SL και τα σημεία στα οποία εντοπίζονται οι μεταβολές αυτές. Παρατηρείται ότι, κατά θέσεις, αυξάνεται υπερβολικά, γεγονός που δείχνει την επίδραση της τεκτονικής δραστηριότητας στην εξέλιξη του υδρογραφικού δικτύου. Εντοπίζονται στην επαφή Μυγδονιακού-Προμυγδονιακού συστήματος και σχετίζονται με την παλαιότερη τεκτονική δράση και όχι την πρόσφατη.

4.5. Λιθολογία

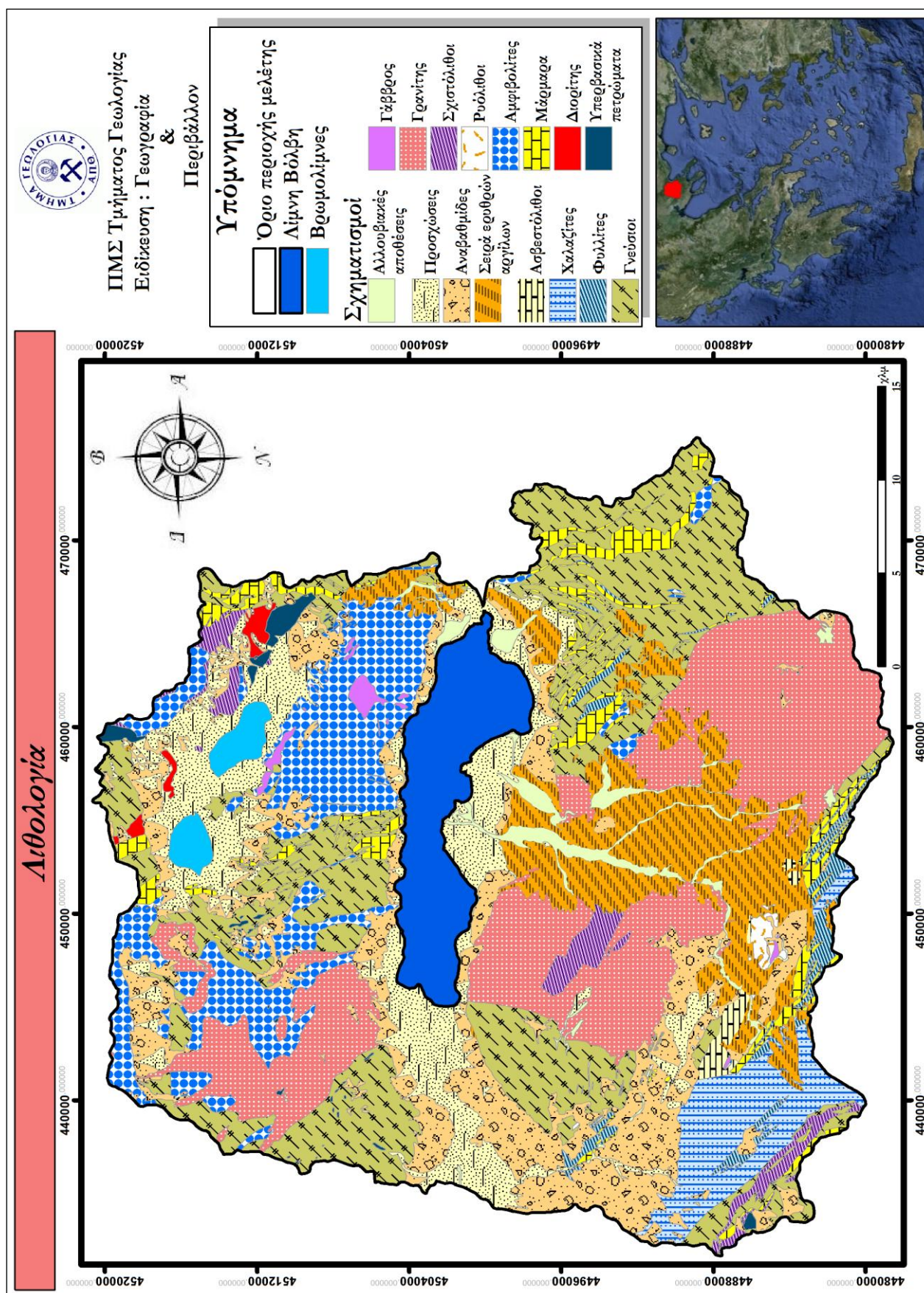
4.5.1. Χαρτογράφηση λιθολογικών σχηματισμών

Οι λιθολογικοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης ψηφιοποιήθηκαν ως πολυγωνικές οντότητες στο περιβάλλον του ArcGIS, με υπόβαθρο τα γεωλογικά

φύλλα χάρτη : Αρναία, Βασιλικά, Ζαγκλιβέριον, Θέρμη, Πολύγυρος, Σιτοχώριον, Σοχός και Σταυρός, κλίμακας 1:50.000, του Ι.Γ.Μ.Ε.. Παράλληλα με την ψηφιοποίηση, έγινε η συγκρότηση της βάσης δεδομένων. Λόγω του μεγάλου αριθμού των ψηφιοποιημένων πολυγώνων, κρίθηκε απαραίτητη η ομαδοποίησή τους, με βάση ορυκτολογικά-πετρολογικά χαρακτηριστικά (Σχήμα 4.37). Στον Πίνακα 4.13 δίνεται η έκταση που καταλαμβάνουν οι σχηματισμοί σε km² και %

Πίνακας 4.13. Έκταση των λιθολογικών σχηματισμών .

Σχηματισμός	Έκταση σε km²	Ποσοστό έκτασης %
Αλλουβιακές αποθέσεις	24,28	2,01
Προσχώσεις	130,12	10,75
Αναβαθμίδες	170,15	14,06
Σειρά ερυθρών αργίλων	125,50	10,37
Ασβεστόλιθοι	6,09	0,50
Χαλαζίτες	46,76	3,86
Φυλλίτες	16,37	1,35
Γνεύσιοι,	250,25	20,68
Γάββρος	4,76	0,39
Γρανίτης	218,72	18,07
Σχιστόλιθοι	21,33	1,76
Ρυόλιθοι	3,60	0,30
Αμφιβολίτες	119,46	9,87
Μάρμαρα	49,08	4,06
Διορίτης	4,27	0,35
Υπερβασικά πετρώματα	7,08	0,58
Βρωμολίμνες	11,30	1,01



Σχήμα 4.37. Στο χάρτη απεικονίζονται οι λιθολογικοί σχηματισμοί ομαδοποιημένοι, μετά από ψηφιοποίηση, με υπόβαθρο τους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε., κλίμακας 1:50.000.

4.5.2. Υδρογραφική πυκνότητα λιθολογικών σχηματισμών

Η Υδρογραφική πυκνότητα χαρακτηρίζεται ως ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό του αναγλύφου. Η ανάπτυξη και η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου αντανακλούν τη λιθολογία, την τοπογραφία, την εδαφολογία, την επικρατούσα βλάστηση και τις κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής αποτελώντας έναν πολύτιμο δείκτη (Gregory και Walling 1973, από Αστάρα, 1980).

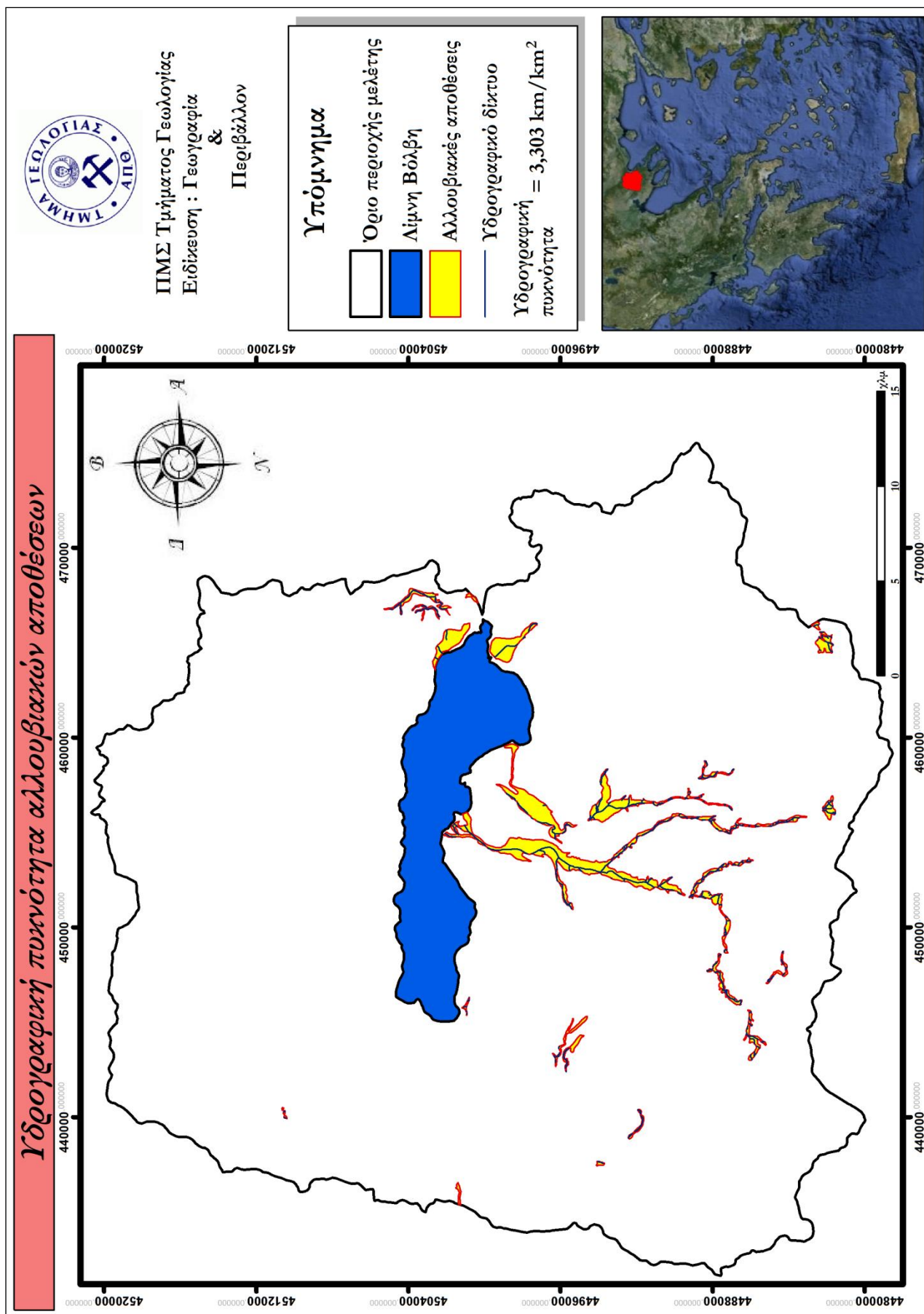
Σύμφωνα με τον Horton (1945), η υδρογραφική πυκνότητα ορίζεται ως το μήκος των ρεμάτων ανά μονάδα επιφάνειας της λεκάνης απορροής και παραμένει ανεξάρτητη της συνολικής τάξης του υδρογραφικού δικτύου.

Η υδρογραφική πυκνότητα χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό την περιοχή για την οποία υπολογίζεται. Έχει παρατηρηθεί πως περιοχές υδατοπερατών πετρωμάτων, ήπιου αναγλύφου, έντονης φυτοκάλυψης και χαμηλής έντασης βροχοπτώσεων χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές υδρογραφικής πυκνότητας (μέχρι 5 km/km^2). Αντίθετα, σε περιοχές αδιαπέρατων πετρωμάτων, απότομου αναγλύφου και μεγάλης έντασης βροχοπτώσεων, υπολογίζονται μεγάλες τιμές υδρογραφικής πυκνότητας (πάνω από 20 km/km^2). Τέλος, εξαιρετικά μεγάλες τιμές υδρογραφικής πυκνότητας παρατηρούνται σε περιοχές που παρουσιάζουν έντονη χαραδρωτική διάβρωση τύπου Badlands (έως και 800 km/km^2), όπου βέβαια υπάρχουν τέτοιες περιοχές. (Φουρνιάδης, 2002)

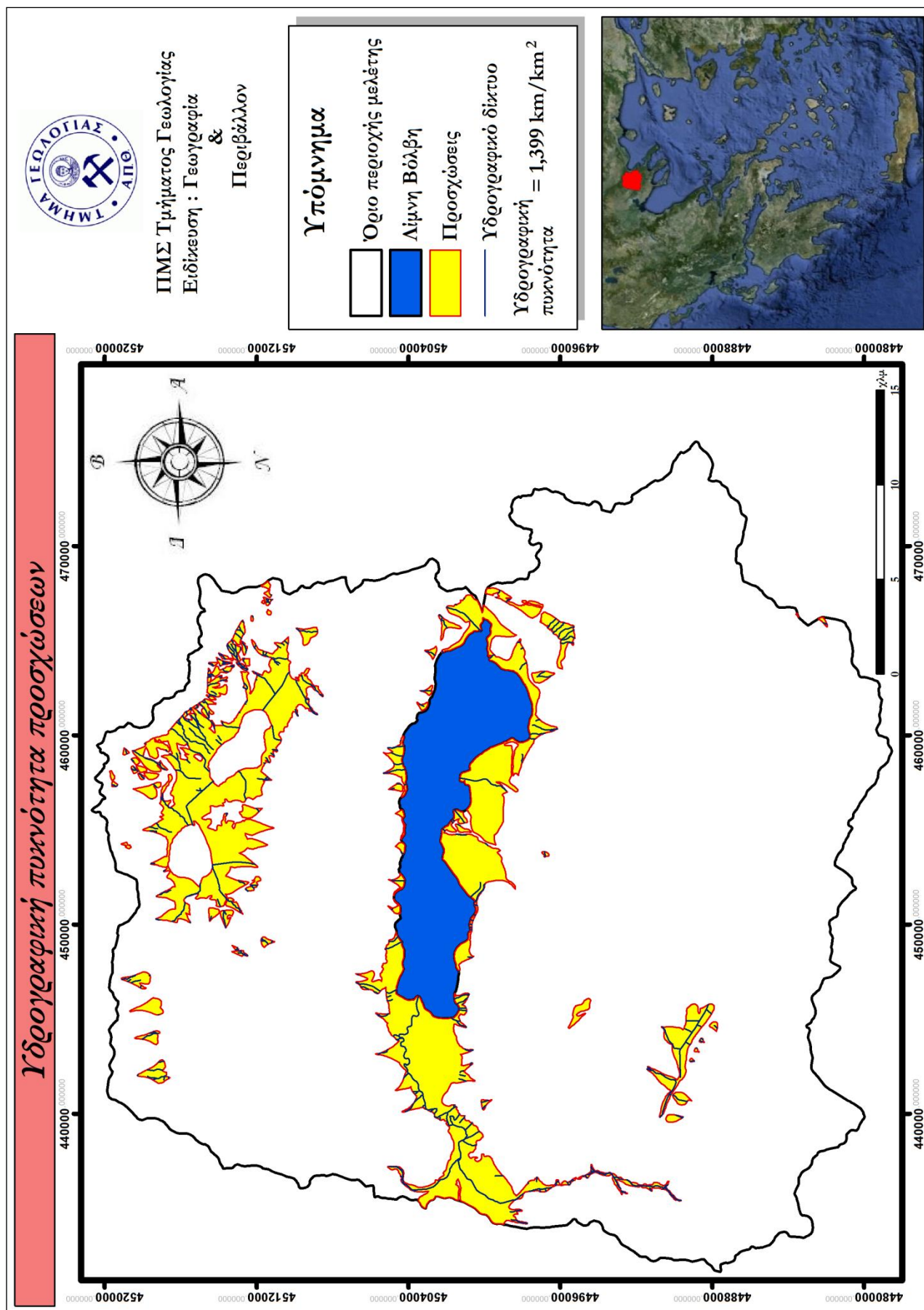
Για να βρεθεί η υδρογραφική πυκνότητα κάθε λιθολογικού σχηματισμού υπολογίστηκε η έκτασή του (σε km^2) και το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου που ρέει στο συγκεκριμένο σχηματισμό (σε km) (Σχήματα 4.38 έως 4.53). Ο Πίνακας 4.14 δείχνει την υδρογραφική πυκνότητα του κάθε σχηματισμού, αλλά και τη συνολική υδρογραφική πυκνότητα της λεκάνης απορροής.

Πίνακας 4.14. Υδρογραφική πυκνότητα των λιθολογικών σχηματισμών.

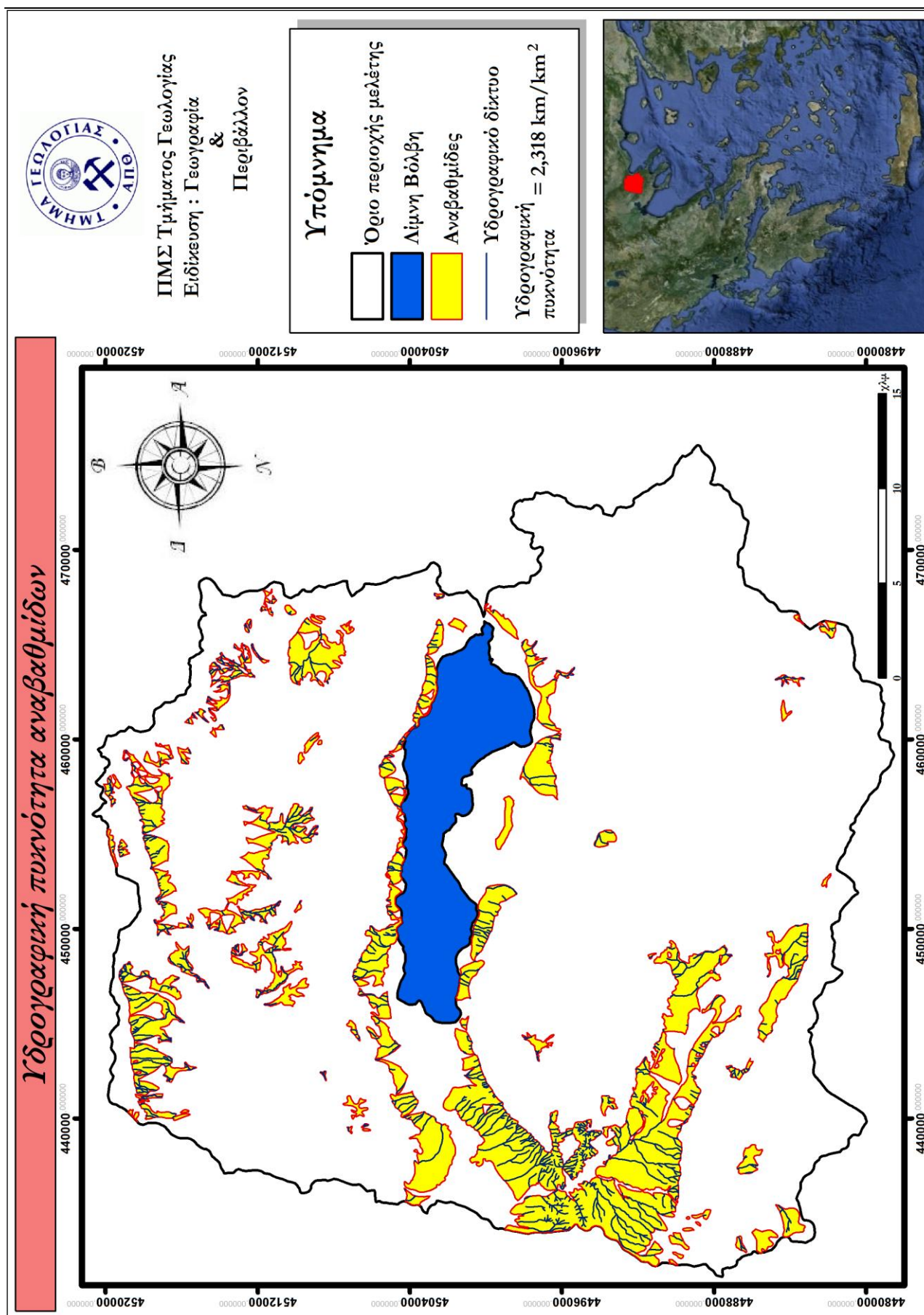
Λιθολογικός σχηματισμός	Μήκος υδρογραφικού δικτύου (km)	Έκταση λιθολογικού σχηματισμού (km²)	Υδρογραφική πυκνότητα (km/km²)
Αλλουβιακές αποθέσεις	80,21	24,27	3,303
Προσχώσεις	182,03	130,11	1,399
Αναβαθμίδες	394,43	170,15	2,318
Σειρά ερυθρών αργίλων	294,72	125,50	2,348
Ασβεστόλιθοι	15,86	6,08	2,605
Χαλαζίτες	177,56	46,75	3,797
Φυλλίτες	61,61	16,37	3,762
Γνεύσιοι	845,14	250,25	3,377
Γάββρος	14,42	4,75	3,032
Γρανίτης	770,43	218,72	3,522
Σχιστόλιθοι	76,97	21,33	3,608
Ρυόλιθοι	9,51	3,60	2,643
Αμφιβολίτες	387,04	119,46	3,239
Μάρμαρα	123,30	49,08	2,512
Διορίτης	14,58	4,27	3,412
Υπερβασικά πετρώματα	18,73	7,07	2,645

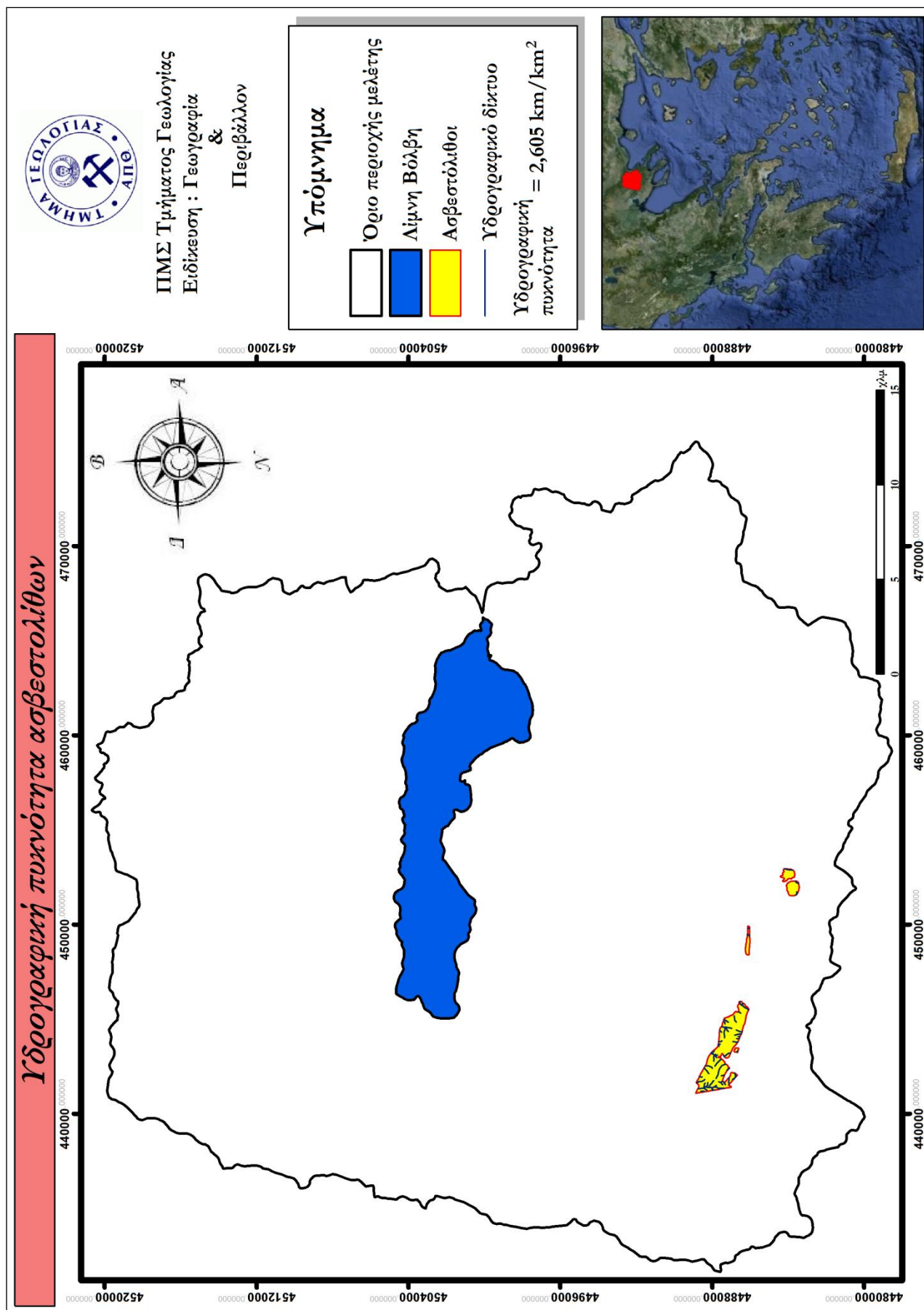


Σχήμα 4.38. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στις αλλουβιακές αποθέσεις.

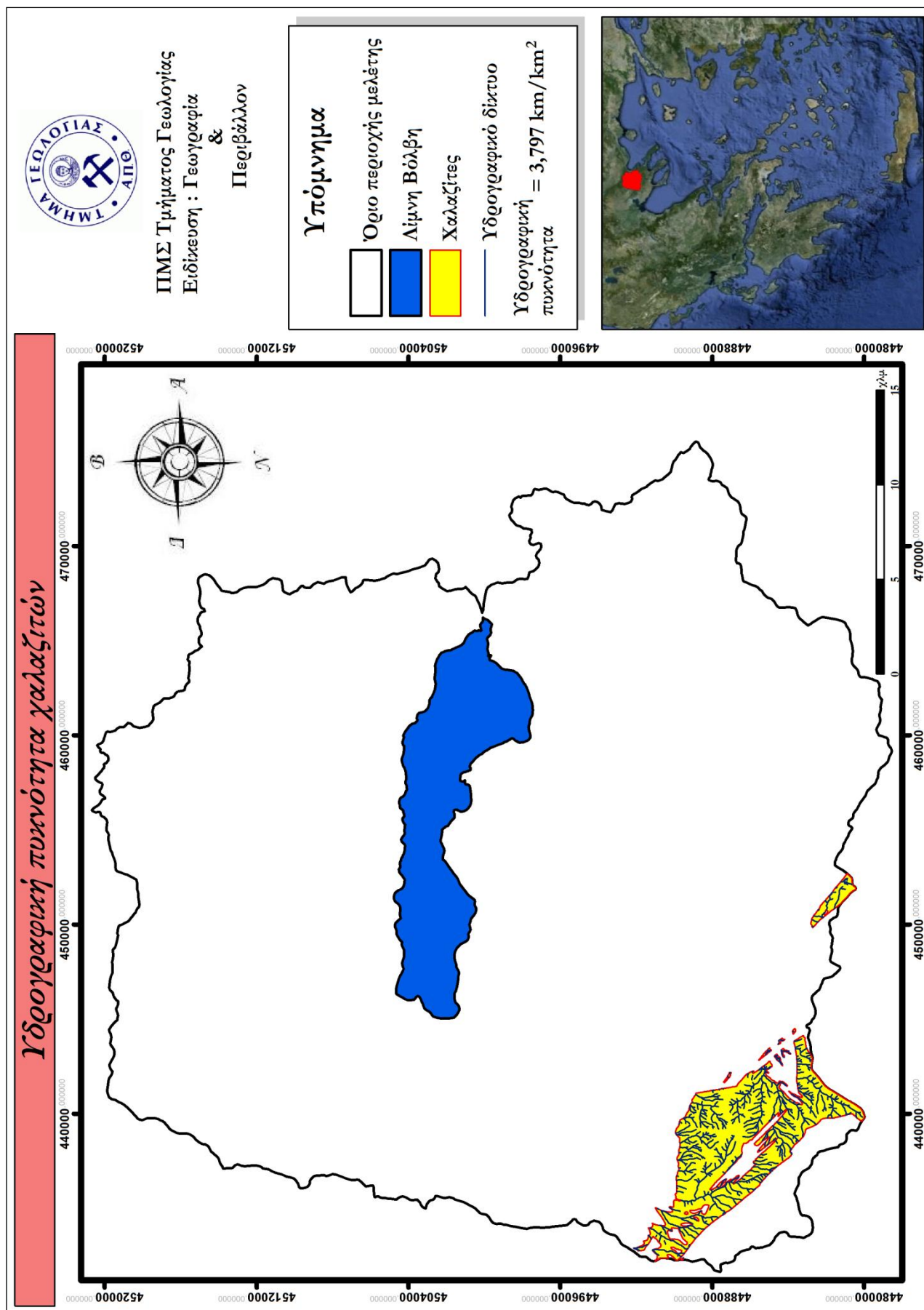


Σχήμα 4.39. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στις προσχώσεις.

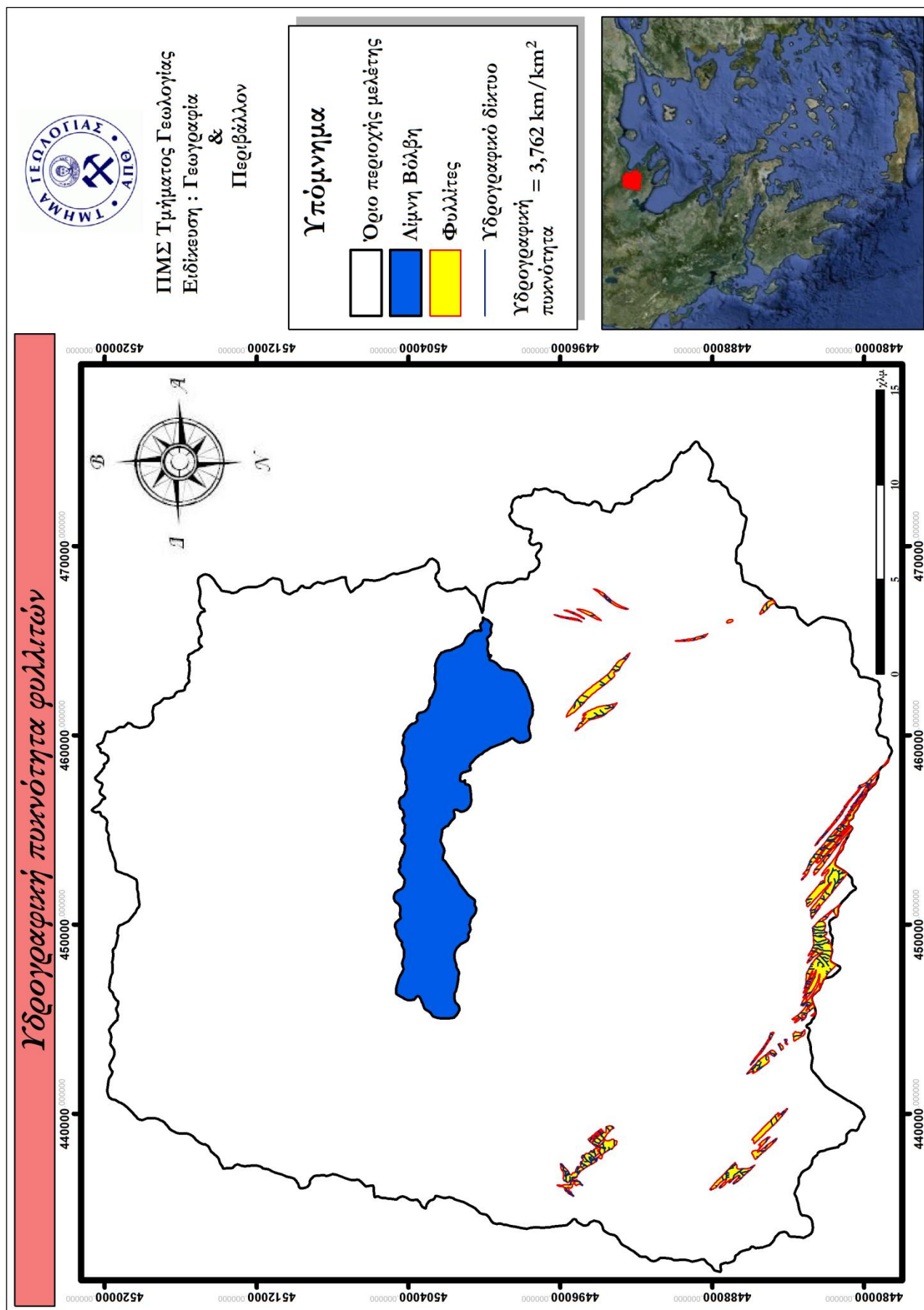




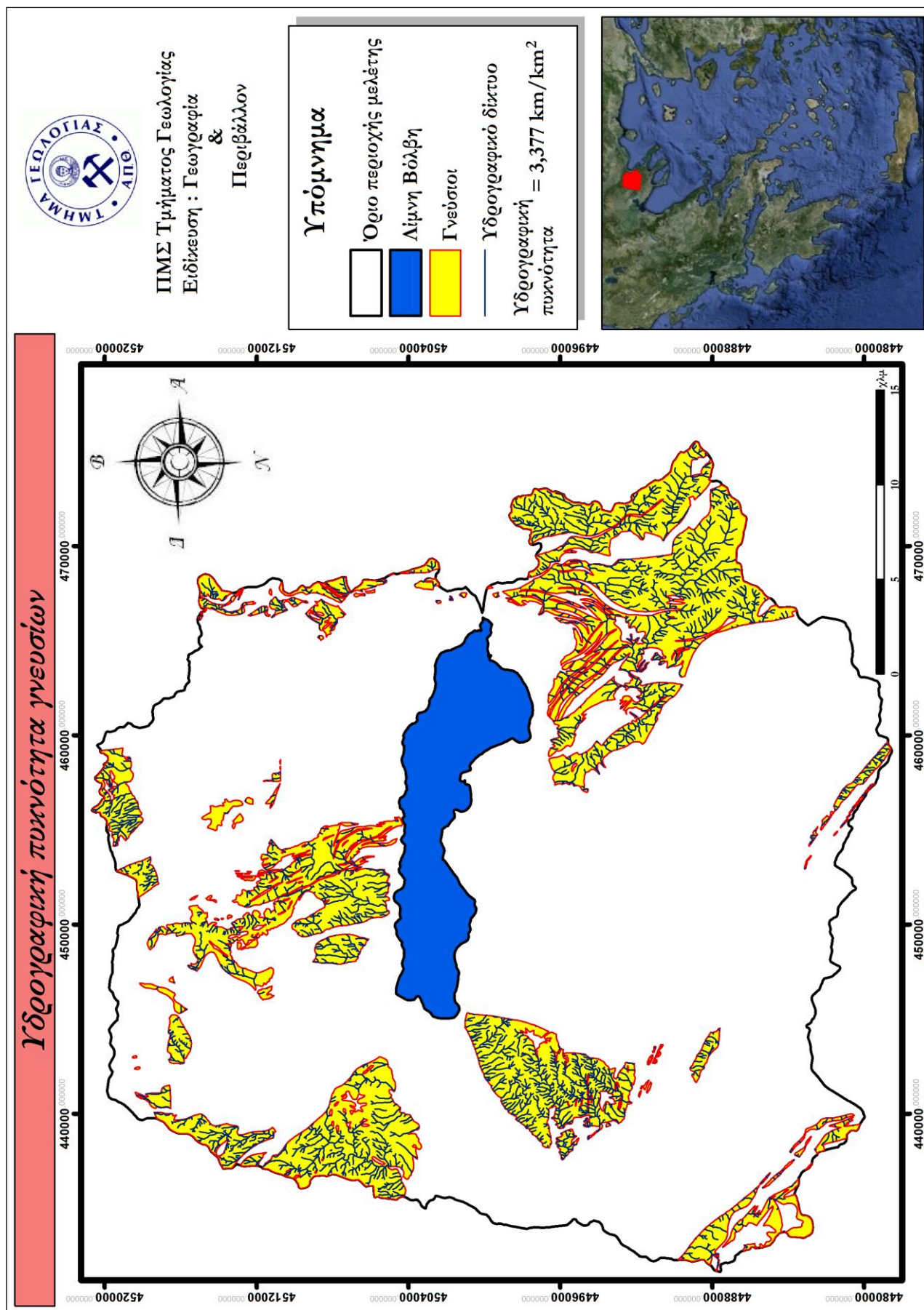
Σχήμα 4.42. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στους ασβεστολίθους.



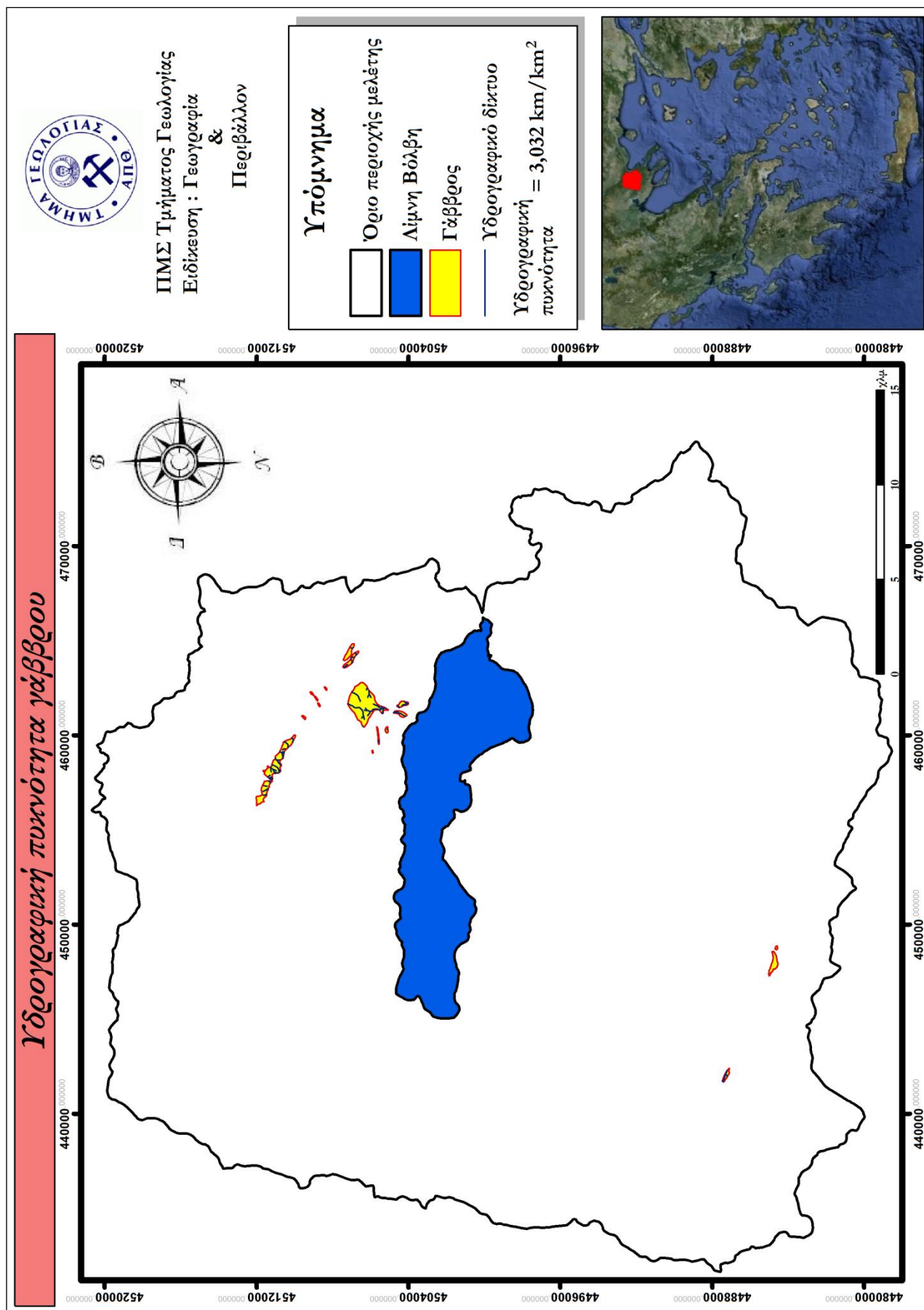
Σχήμα 4.43. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στους χαλαζίτες.



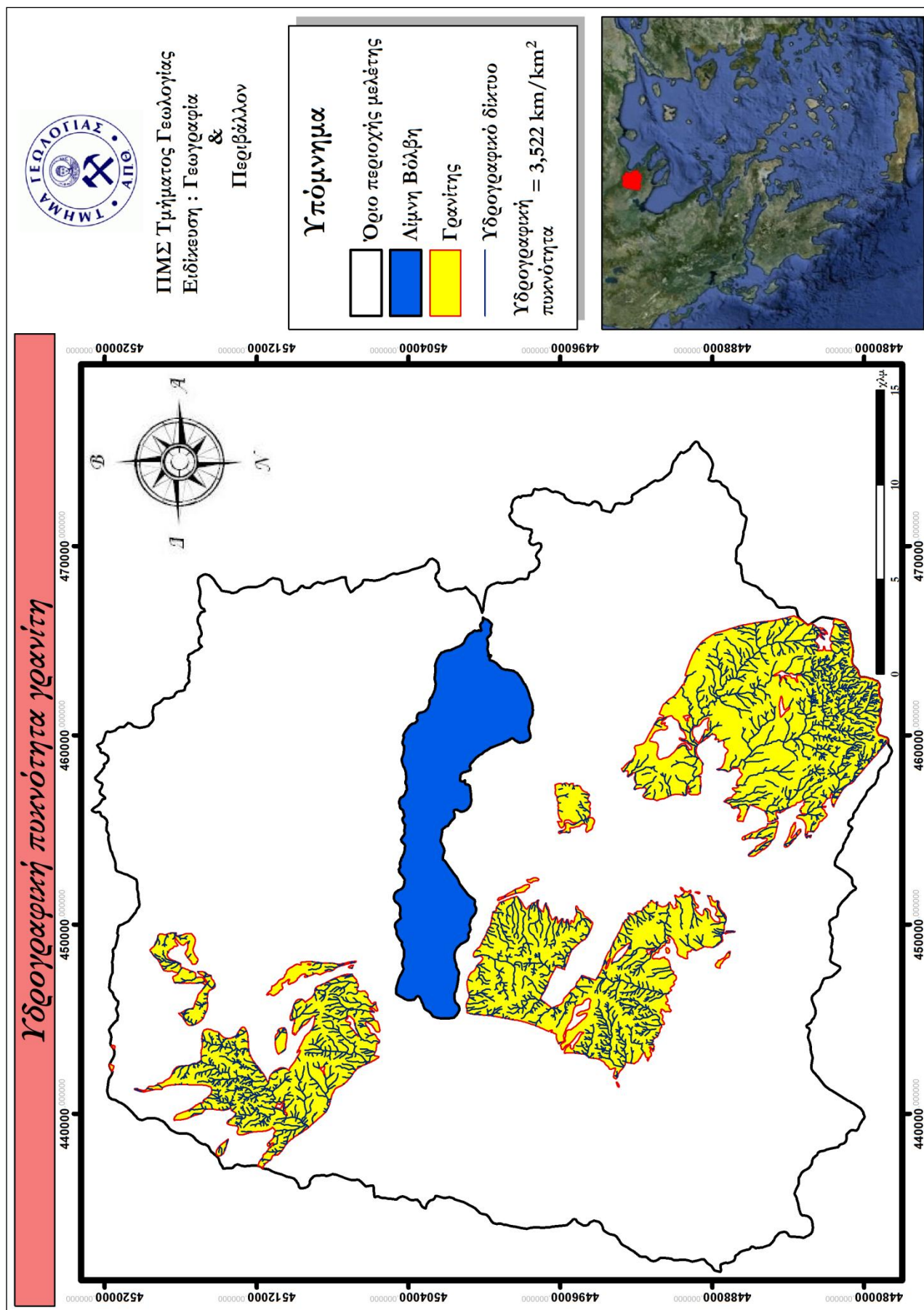
Σχήμα 4.44. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στους φυλλίτες.

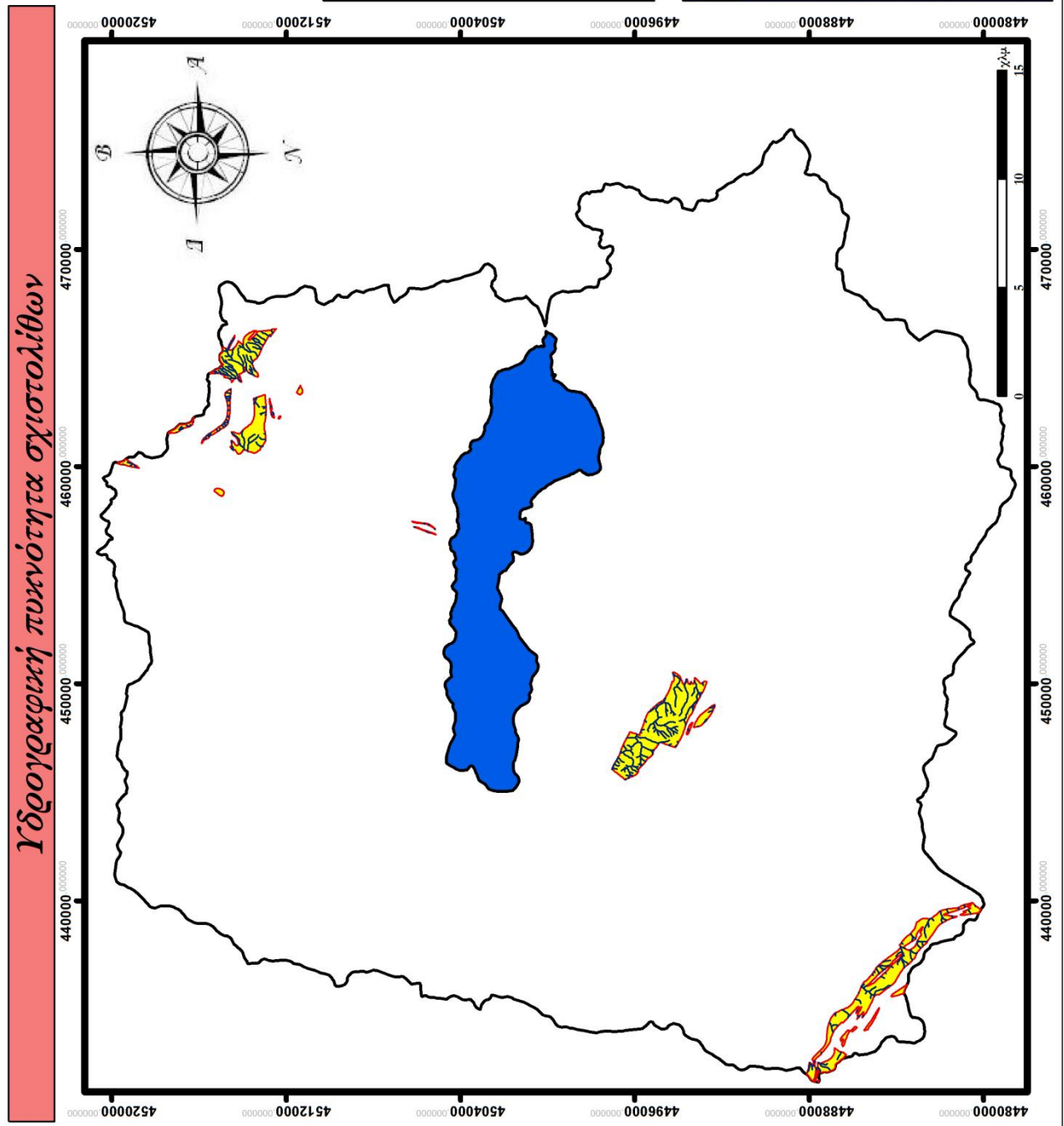
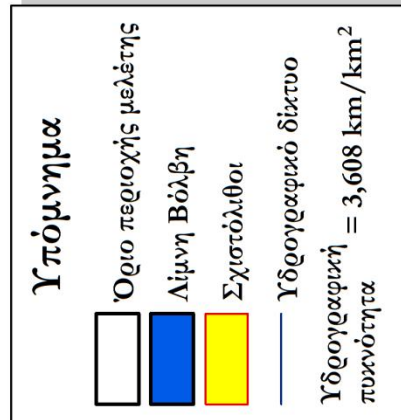


Σχήμα 4.45. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στους γνευσίους.

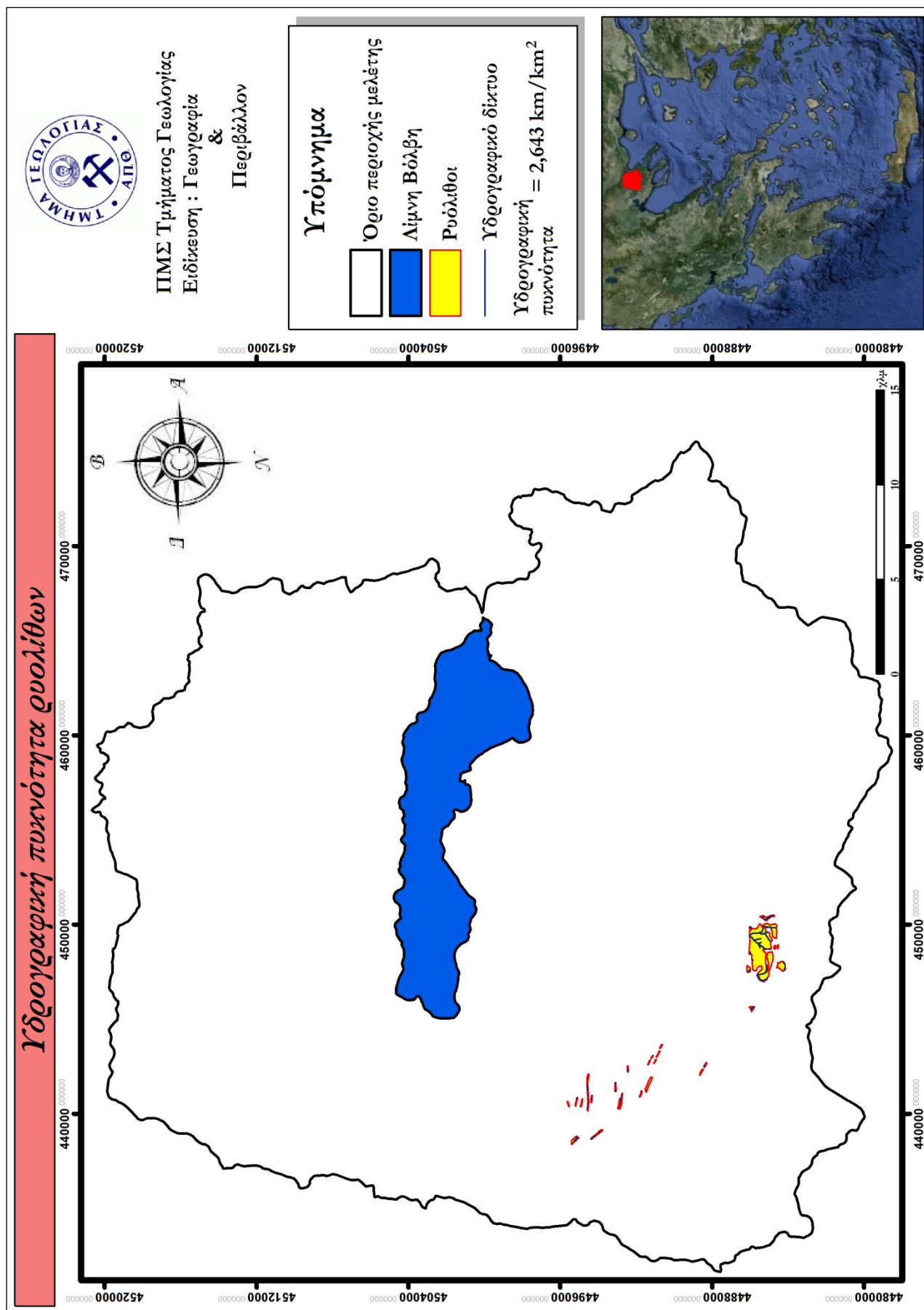


Σχήμα 4.46. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στο γάββρο.

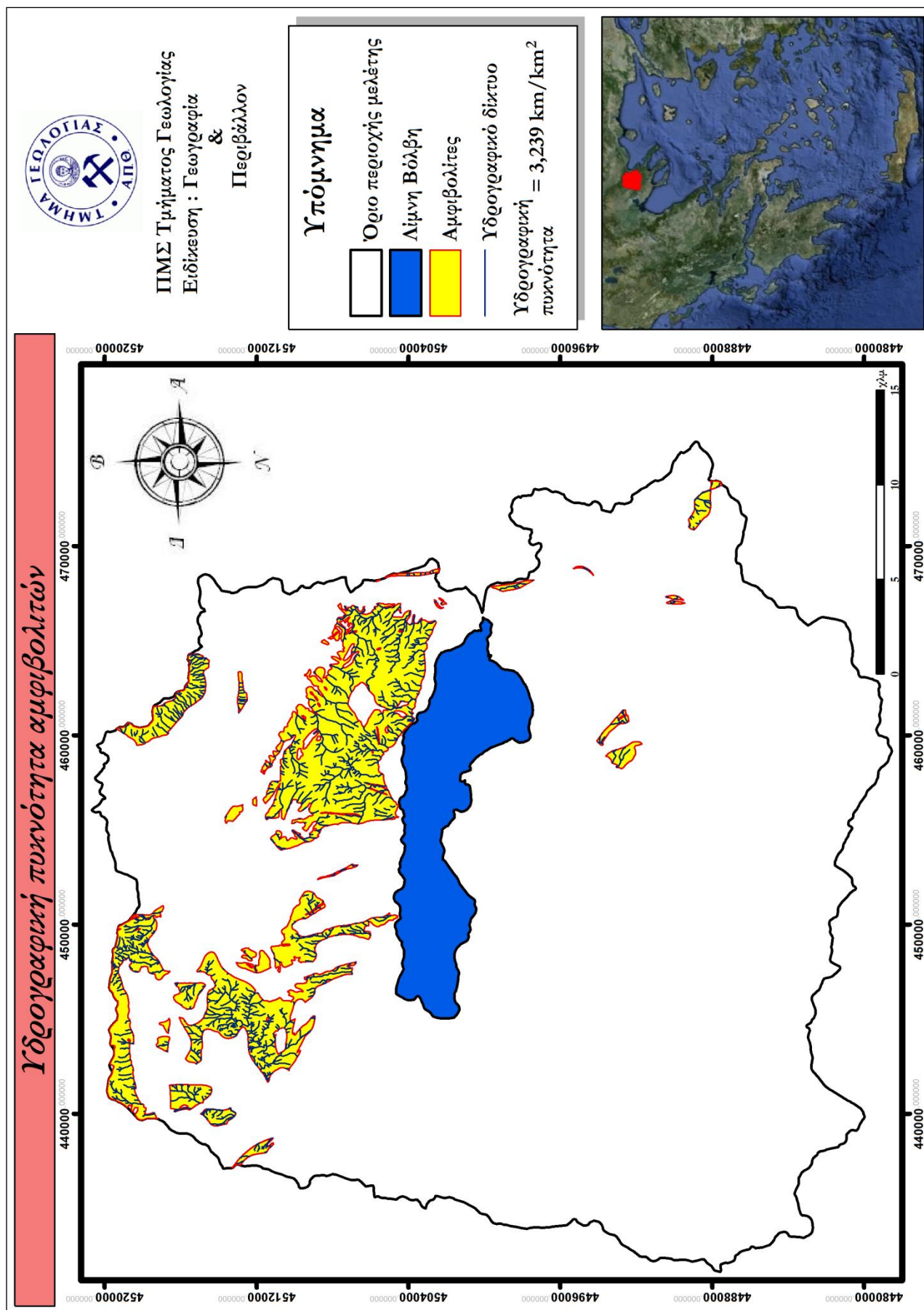




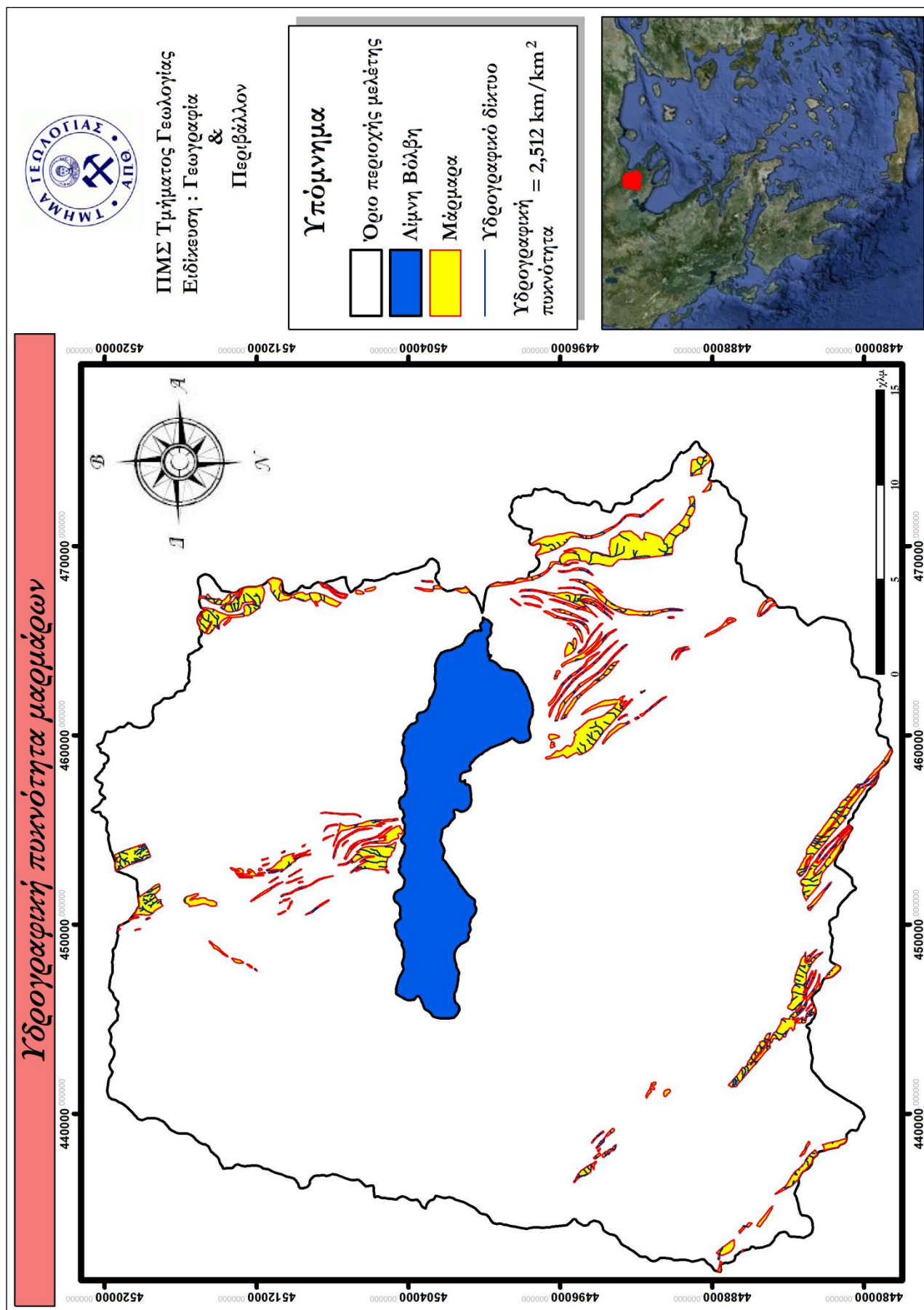
Σχήμα 4.48. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στους σχιστολίθους.



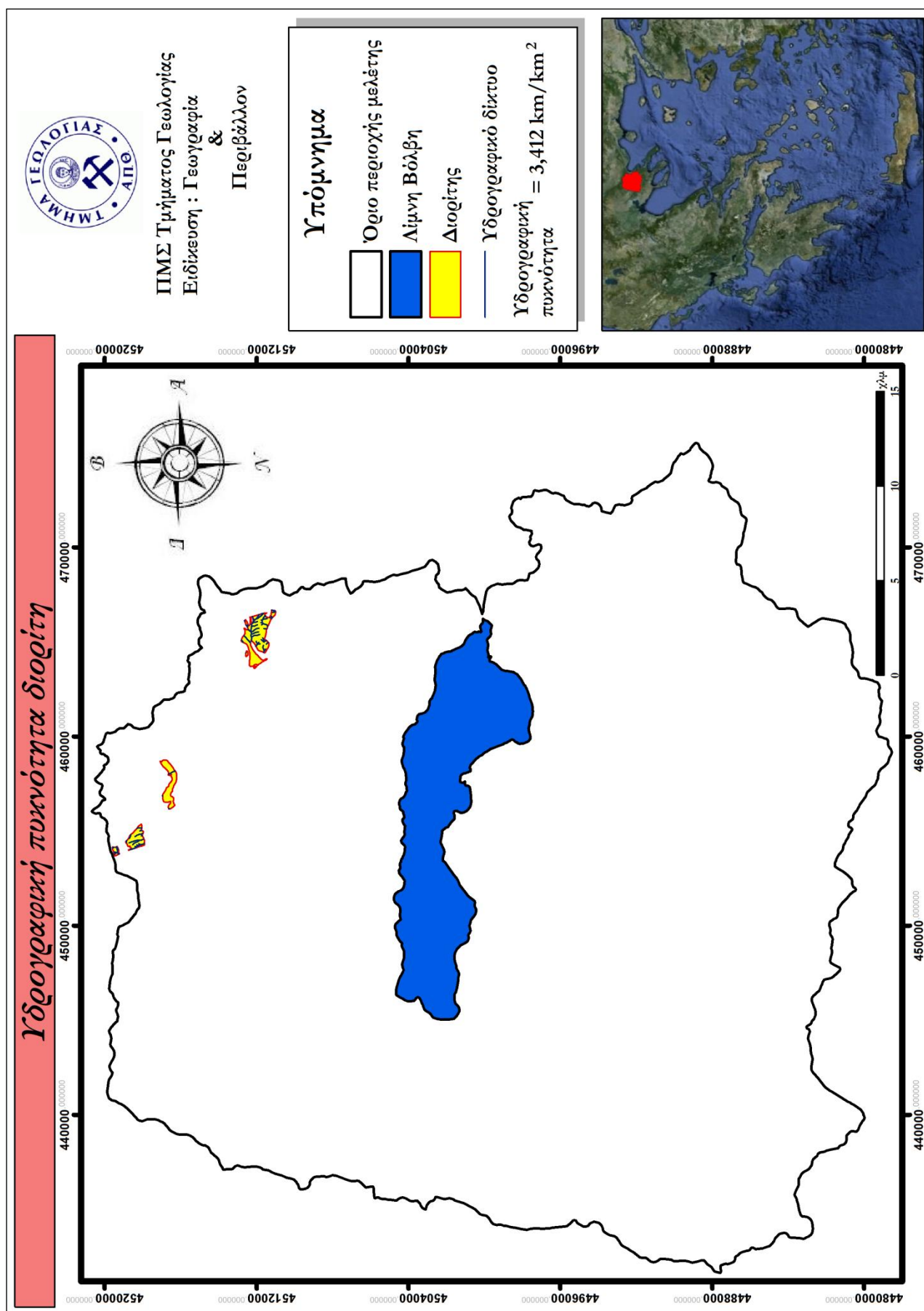
Σχήμα 4.49. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στους ρυόλιθους.

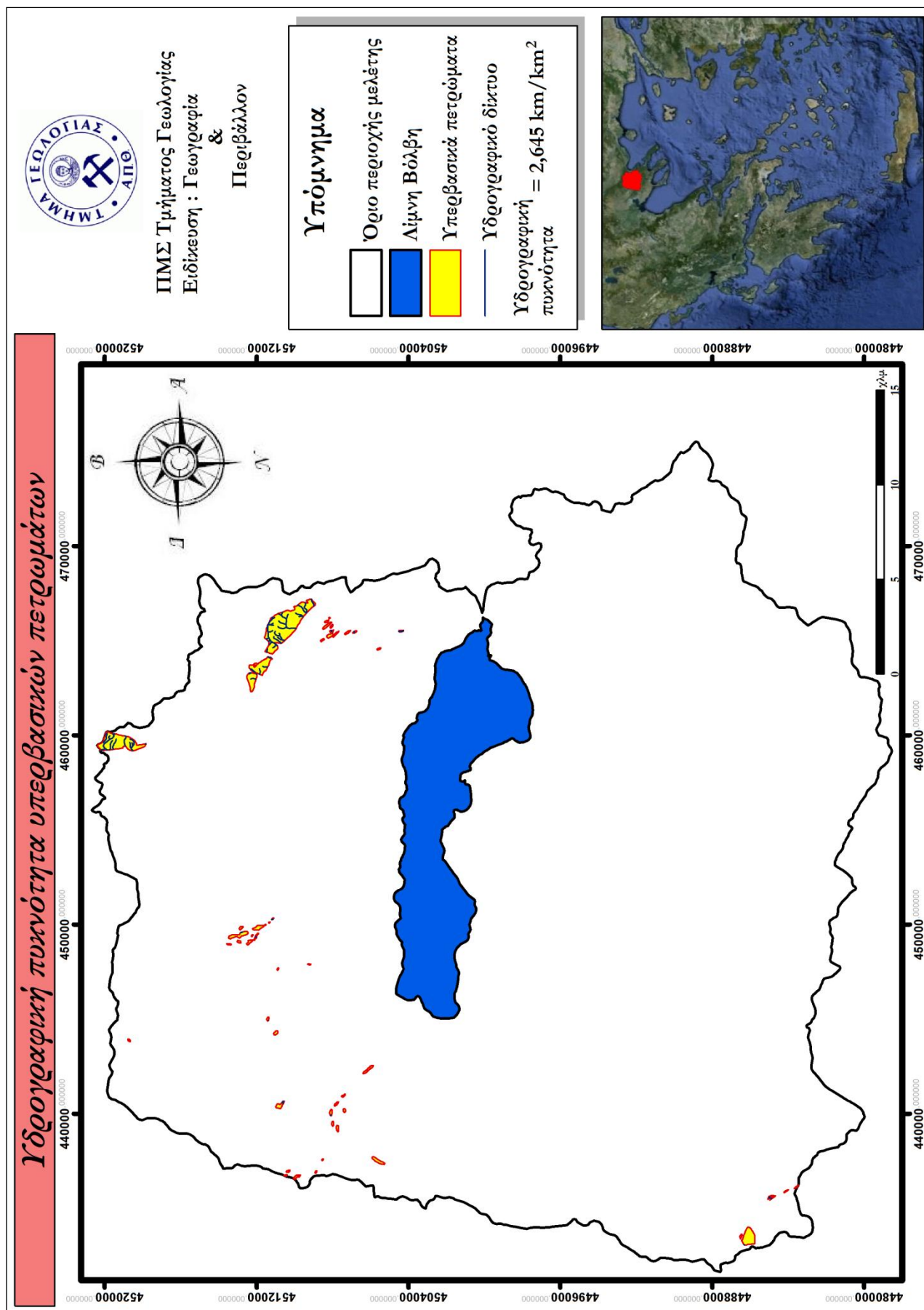


Σχήμα 4.50. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στους αμφιβολίτες.



Σχήμα 4.51. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στα μάρμαρα.





Σχήμα 4.53. Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας στα υπερβασικά πετρώματα.

4.5.3. Διάκριση της λιθολογίας με τη βοήθεια της Τηλεπισκόπησης

4.5.3.1. Γενικά

Η επεξεργασία των τηλεπισκοπικών δεδομένων έχει ως σκοπό την εξαγωγή της περισσότερης ποιοτικής και ποσοτικής πληροφορίας.

Για να μπορέσει να γίνει η διάκριση της λιθολογίας με τη βοήθεια της Τηλεπισκόπησης, έγινε επεξεργασία της δορυφορικής εικόνας Landsat-7/ETM+, στο περιβάλλον του προγράμματος ENVI.

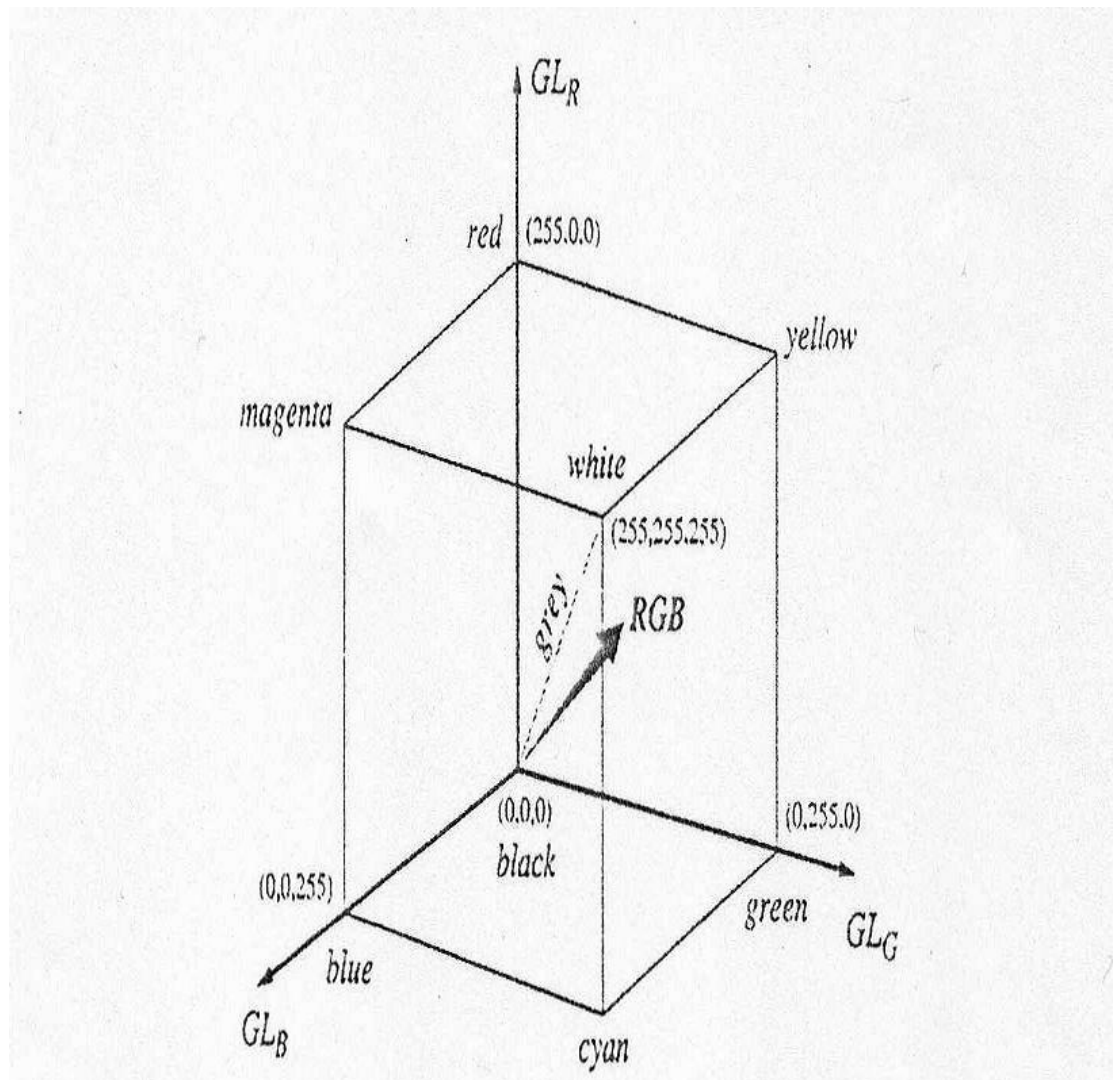
Αρχικά, έγινε Συγχώνευση (Merge/Fusion). Πρόκειται για μία συγκεκριμένη ψηφιακή επεξεργασία που συνδυάζει πληροφορίες που προέρχονται από δύο διαφορετικές εικόνες, με γεωμετρική ακρίβεια. Συνήθως, στο συνδυασμό αυτό χρησιμοποιείται μία ψευδοχρωματική πολυφασματική εικόνα που παρουσιάζει την καλύτερη διαύγεια/οξύτητα με μία παγχρωματική εικόνα καλύτερης χωρικής ανάλυσης. Η βελτιωμένη εικόνα που προκύπτει έχει την καλύτερη χωρική ανάλυση της παγχρωματικής εικόνας και τη φασματική διακριτική ικανότητα της πολυφασματικής εικόνας (Ασάρας, 2011). Στην περίπτωση της παρούσας διατριβής έγινε συγχώνευση μεταξύ των φασματικών ζωνών 1, 2, 3, 4, 5 και 7 με την παγχρωματική ζώνη, με σκοπό την επίτευξη καλύτερης διακριτικής ικανότητας (15m αντί 30m).

Χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τεχνικές, ώστε να μπορέσουν να εξαχθούν τα συμπεράσματα.

1. Ψευδοχρωματικές σύνθετες εικόνες (False Colour Composites/FCC)

Ο συνδυασμός διαφόρων φασματικών ζωνών (καναλιών) οδηγούν στη δημιουργία πολυφασματικών εικόνων με βελτιωμένη ευαισθησία στη φασματική ανάκλαση ή/και χρωματική διαφοροποίηση μεταξύ επιφανειακών αντικειμένων που συχνά είναι δύσκολο να ανιχνευτούν στις μονοφασματικές εικόνες.

Η πολυφασματική εικόνα (σύνθετη ψευδοχρωματική εικόνα) δημιουργείται από το συνδυασμό τριών μονοφασματικών (ασπρόμαυρων) εικόνων (καναλιών) που τοποθετούνται σε ένα χρωματικό συνδυασμό, χρησιμοποιώντας τα τρία βασικά χρώματα, κόκκινο, πράσινο και μπλε, σύμφωνα με τον κύβο του RGB (Schowengerdt, 1997, από Βαϊόπουλο κ.ά., 2004) (Σχήμα 4.54).



Σχήμα 4.54. Κύβος του RGB.

Η επιλογή των φασματικών ζωνών γίνεται με βάση το σκοπό για τον οποίο απαιτούνται πληροφορίες. Η αύξηση δε της ευκρίνειας λαμβάνει χώρα για δύο βασικούς λόγους :

- ❖ Διότι η φασματική πληροφορία λαμβάνεται από τρεις διαφορετικές φασματικές εικόνες.
- ❖ Διότι καθίσταται πιο εύκολη η ανάλυση, καθώς το ανθρώπινο μάτι είναι πιο ευαίσθητο στις χρωματικές αλλαγές.

2. Λόγοι ζωνών (Band Ratios)

Ο λόγος είναι μία από τις πιο χρήσιμες αριθμητικές πράξεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε ψηφιακές εικόνες. Δημιουργεί εικόνες, οι οποίες είναι ανεξάρτητες από τις συνθήκες φωτισμού των γήινων αντικειμένων (σκιερές ή μη σκιερές επιφάνειες αντικειμένων). Δηλαδή, ο λόγος φασματικών ζωνών μειώνει σε ένα βαθμό

την επίδραση του αναγλύφου και των σκιάσεων (ατμοσφαιρική διάχυση) στις προσπίπτουσες εικόνες. Επιπλέον αν επιλεγούν κατάλληλες φασματικές ζώνες τότε ο λόγος ενισχύει την αντίθεση των επιφανειακών υλικών των οποίων οι φασματικές καμπύλες παρουσιάζουν αντίθετη συμπεριφορά στις συγκεκριμένες φασματικές ζώνες (Ασάρας, 2011).

3. Ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis/PCA)

Η μέθοδος αυτή οδηγεί στη μείωση του αριθμού των δεδομένων, στην περίπτωση των πολυφασματικών δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα, διατηρείται το σύνολο σχεδόν της πληροφορίας που υπάρχει στα αρχικά δεδομένα. Σε μία πολυφασματική εικόνα, γειτονικές φασματικές ζώνες έχουν υψηλό ποσοστό συσχέτισης.

Οι συνιστώσες, ο αριθμός των οποίων είναι ίδιος με αυτόν των καναλιών της αρχικής απεικόνισης, χρησιμοποιούνται ως καινούργια κανάλια στην περαιτέρω επεξεργασία ή αποτελούν μία καινούργια πολυφασματική απεικόνιση. Η πληροφορία που περιέχουν αυτά τα κανάλια είναι διατεταγμένη με κάποια συγκεκριμένη σειρά, τέτοια ώστε η πρώτη να έχει την περισσότερη (περίπου το 90% της πληροφορίας που περιέχουν όλα τα κανάλια), ενώ η τελευταία τη λιγότερη. Το πλεονέκτημα αυτών των καναλιών είναι ότι η περισσότερη και πιο αξιοποιήσιμη πληροφορία βρίσκεται στα πρώτα δύο ή τρία κανάλια (συνιστώσες), ενώ τα τελευταία έχουν από ελάχιστη έως μηδενική. Αυτή η συμπίεση της πληροφορίας έχει σαν αποτέλεσμα τη δραστική μείωση του αριθμού των καναλιών από 7 σε 2 ή 3, και άρα τη μείωση του χρόνου επεξεργασίας και του απαιτούμενου χώρου αποθήκευσης των δεδομένων.

Επίσης, η δυνατότητα ανάκτησης της πληροφορίας από τα δεδομένα των καναλιών των κύριων συνιστωσών είναι ίδια με αυτή της ανάκτησης πληροφορίας από τα αρχικά δεδομένα της εικόνας (Jensen, 1996, από Βαϊόπουλο κ.ά., 2004).

Η ανάλυση των κύριων συνιστωσών είναι χρήσιμη διότι (Βαϊόπουλος κ.ά., 2004):

- ❖ Δεν απαιτείται εκ των προτέρων πληροφορία σχετικά με το περιεχόμενο της εικόνας.
- ❖ Η πληροφορία ενός συνόλου εικόνων (καναλιών) μπορεί να αναπαρασταθεί με τις πρώτες κύριες συνιστώσες, γι' αυτό ακριβώς η τεχνική μειώνει τον αριθμό των καναλιών με τα οποία πρέπει να εργαστούμε.
- ❖ Η υψηλή συσχέτιση ανάμεσα στα κανάλια μειώνεται.

4. Ενίσχυση εικόνων (Image Enhancement)

Αναφέρεται σε διάφορες μεθόδους επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων που βελτιώνουν την οπτική παρουσίαση και επακόλουθη ερμηνεία τους, με την εφαρμογή διαφόρων αλγορίθμων, οι οποίοι αλλάζουν τη διαβάθμιση του τόνου της εικόνας, τη φωτεινότητα, τη διαύγεια ή οξύτητα και τη χρωματική απόδοση των χαρακτηριστικών στην εικόνα. Έτσι, αναγνωρίζονται και ερμηνεύονται πιο εύκολα τα διάφορα αυτά χαρακτηριστικά (Αστάρας, 2001).

5. Μετασχηματισμός χρώματος HSV (Hue, Saturation Value)

Η μέθοδος χρησιμοποιεί τρία κανάλια από την εικόνα με τη χαμηλότερη χωρική διακριτική ικανότητα, τα οποία μετασχηματίζει από μορφή RGB σε μορφή HSV. Η εικόνα υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας υφίσταται αύξηση της φωτεινότητας με σκοπό να αποκτήσει σχεδόν την ίδια μέση τιμή και την ίδια τυπική απόκλιση με το κανάλι που αποτελεί την ένταση στην εικόνα HSV. Η εικόνα υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας αντικαθιστά το κανάλι της έντασης στην εικόνα HSV και, στη συνέχεια, η νέα εικόνα μετασχηματίζεται σε μορφή RGB (Βαϊόπουλος κ.ά., 2004).

4.5.3.2. Δείκτης βλάστησης

Βιβλιογραφικά υπάρχουν αρκετοί δείκτες βλάστησης και πολλές εργασίες σχετικά με τη χρήση τους, όμως το βασικό σκεπτικό είναι, πως ο λόγος του κοντινού υπερύθρου προς το ερυθρό είναι συνήθως υψηλός στην περίπτωση της υγιούς βλάστησης. Αυτό σημαίνει, ότι σε περίπτωση ασθένειας ή έλλειψης βλάστησης, παρατηρείται μείωση της ανάκλασης στο κοντινό υπέρυθρο και αύξηση της ανάκλασης στο ερυθρό (Συλλαίος, 2000, από Νικολαΐδου, 2009).

Στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης χρησιμοποιήθηκε ο Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (Normalized Difference Vegetation Index/NDVI), ο οποίος ορίζεται ως εξής (Συλλαίος, 2000, Φουρνιάδης κ.ά., 2002, Gupta, 2003, από Νικολαΐδου, 2009):

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

όπου NIR (Near Infrared) είναι η φασματική ζώνη του κοντινού υπερύθρου και R (Red) η φασματική ζώνη του ερυθρού.

Στην περίπτωση του Landsat-7/ETM+, ο παραπάνω τύπος διαμορφώνεται ως εξής (Συλλαίος, 2000, Φουρνιάδης κ.α., 2002, από Νικολαΐδου, 2009) :

$$NDVI = 4 - 3/4 + 3$$

όπου 4 είναι η φασματική ζώνη της κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας και 3 η φασματική ζώνη της ερυθρής ακτινοβολίας.

Ο δείκτης βλάστησης NDVI, παίρνει τιμές από -1 έως +1 (οι οποίες ανάγονται στις ραδιομετρικές τιμές 0-255). Η τιμή -1 αντιπροσωπεύει πλήρη απουσία βλάστησης, ενώ η τιμή +1 πλήρη κάλυψη από βλάστηση. Έτσι, οι περιοχές της εικόνας με υψηλές τιμές NDVI (ανοιχτό τεφρό χρώμα), είναι αυτές που καλύπτονται από βλάστηση, λόγω της υψηλής ανακλαστικότητας της βλάστησης στο κοντινό υπέρυθρο και της χαμηλής στο ερυθρό. Αντίθετα, οι περιοχές της εικόνας με χαμηλές τιμές NDVI (σκούρο τεφρό χρώμα), είναι αυτές που παρατηρείται απουσία βλάστησης.

Ενδεικτικές τιμές για διάφορες μορφές κάλυψης εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.15 (Δαλέζιος, 2002, από Τσίρο, 2006).

Πίνακας 4.15. Ενδεικτικές τιμές του δείκτη NDVI σε διάφορες μορφές κάλυψης εδάφους (Δαλέζιος, 2002).

ΤΥΠΟΣ ΕΔΑΦΟΚΑΛΥΨΗΣ	NDVI (σε κλίμακα -1εώς 1)	NDVI (σε κλίμακα 0-255)
Πυκνή βλάστηση	$0.500 \leq NDVI \leq 1$	$210 \leq NDVI \leq 255$
Μέτρια πράσινη βλάστηση	$0.140 \leq NDVI < 0.500$	$118 \leq NDVI < 210$
Αραιή βλάστηση	$0.090 \leq NDVI < 0.140$	$105 \leq NDVI < 118$
Γυμνό έδαφος (οργωμένο ή βραχώδες)	$0.025 \leq NDVI < 0.090$	$88 \leq NDVI < 105$
Νέφη	$0.002 \leq NDVI < 0.025$	$83 \leq NDVI < 88$
Χιόνι και πάγος	$-0.046 \leq NDVI < 0.002$	$70 \leq NDVI < 83$
Νερό	$-1 \leq NDVI < -0.046$	$0 \leq NDVI < 70$

Η παραγωγή του Δείκτη Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς έγινε στο περιβάλλον του ENVI και το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 4.55. Στη συνέχεια έγινε ταξινόμηση στο περιβάλλον του ArcGIS, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.16, και το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.56.

Πίνακας 4.16. Εύρος διακύμανσης τεφρού, σύμφωνα με το οποίο έγινε η ταξινόμηση της κατανομής της βλάστησης.

Εύρος διακύμανσης τεφρού	Κατανομή βλάστησης
0-100	Απουσία
101-160	Αραιή
161-210	Μέτρια
211-255	Πυκνή

4.5.3.3. Εντοπισμός και χαρτογράφηση λιθολογικών σχηματισμών

Διάφορες ψευδοχρωματικές σύνθετες εικόνες δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του λογισμικού ENVI, ώστε να βρεθούν οι πιο κατάλληλες για τον εντοπισμό των λιθολογικών σχηματισμών.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις και οι προσχώσεις της περιοχής μελέτης εντοπίστηκαν ως ένας σχηματισμός, με την ψευδοχρωματική σύνθεση των ζωνών 7, 4 και 2 (7,4,2,:R,G,B), με ανοιχτό γαλάζιο χρώμα. Για τη βελτίωση της εικόνας που προέκυψε από το συνδυασμό αυτό, εφαρμόστηκε γραμμική ενίσχυση 2% (Pena & Abdelsalam, 2006, Raharimahefa & Kusky, 2009, Oikonomidis et al, 2010, Kusky et al, 2011) (Σχήμα 4.57).

Το ίδιο συνέβη και με τη σειρά ερυθρών αργίλων και τις αναβαθμίδες, που εντοπίστηκαν την ψευδοχρωματική σύνθεση PC1₁₂₃,PC1₄₇,PC1₅₇:R,G,B με κόκκινο και πράσινο χρώμα. Ο συνδυασμός προέκυψε εφαρμόζοντας την τεχνική της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών πρώτα στις ζώνες 1, 2, 3 και στη συνέχεια στις ζώνες 4, 7 και στις ζώνες 5, 7, και χρησιμοποιώντας την 1^η συνιστώσα από την κάθε ομάδα ζωνών στο RGB. Επίσης, έγινε και ισοστάθμιση ιστογράμματος (Amri et al, 2011) (Σχήμα 4.58).

Ο ψευδοχρωματικός συνδυασμός των λόγων 5/1, 7/1 και 4/1 (5/1,7/1,4/1:R,G,B) και η ισοστάθμιση ιστογράμματος, βοηθούν στη διάκριση των γρανιτών, οι οποίοι απεικονίζονται με πράσινο-κίτρινο χρώμα (Raharimahefa & Kusky, 2009) (Σχήμα 4.59).

Οι γενέσιοι εντοπίστηκαν με την ψευδοχρωματική σύνθεση των ζωνών 4, 2 και 3 (4,2,3:R,G,B), με πορτοκαλί χρώμα. Για τη βελτίωση της εικόνας που προέκυψε από το συνδυασμό αυτό, εφαρμόστηκε γραμμική ενίσχυση 2% (Raharimahefa & Kusky, 2009) (Σχήμα 4.60).

Οι αμφιβολίες εντοπίστηκαν με την ψευδοχρωματική σύνθεση των ζωνών 4, 7 και 5 (4,7,5:R,G,B) και με ενίσχυση equalization, με σκούρο πράσινο χρώμα (Chica-Olmo et al, 2002) (Σχήμα 4.61).

Ο καλύτερος συνδυασμός για τον εντοπισμό χαλαζιτών και φυλλιτών είναι το 7,4,2:R,G,B, το οποίο υπέστη μετασχηματισμό χρώματος σε HSV και μετά πάλι σε RGB. Η ενίσχυση που εφαρμόστηκε είναι η γραμμική ενίσχυση 2%. Οι χαλαζίτες απεικονίζονται με ανοιχτό πράσινο χρώμα, ενώ οι φυλλίτες με ροζ-μωβ έως μπλε χρώμα (Oikonomidis et al, 2010) (Σχήμα 4.62, Σχήμα 4.63).

Τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι της περιοχής εντοπίστηκαν ως ένας σχηματισμός, με τον συνδυασμό των ζωνών 3, 2 και 1 (3,2,1:R,G,B), με χρώμα μπλε. Για τη βελτίωση της εικόνας έγινε ισοστάθμιση ιστογράμματος (Amri et al, 2011) (Σχήμα 4.64).

Ο συνδυασμός 7,4,2:R,G,B, ο οποίος υπέστη μετασχηματισμό χρώματος σε HSV και μετά πάλι σε RGB και εφαρμόστηκε γραμμική ενίσχυση 2%, ήταν ο κατάλληλος για τον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση των Βρωμολιμνών (Oikonomidis et al, 2010) (Σχήμα 4.65).

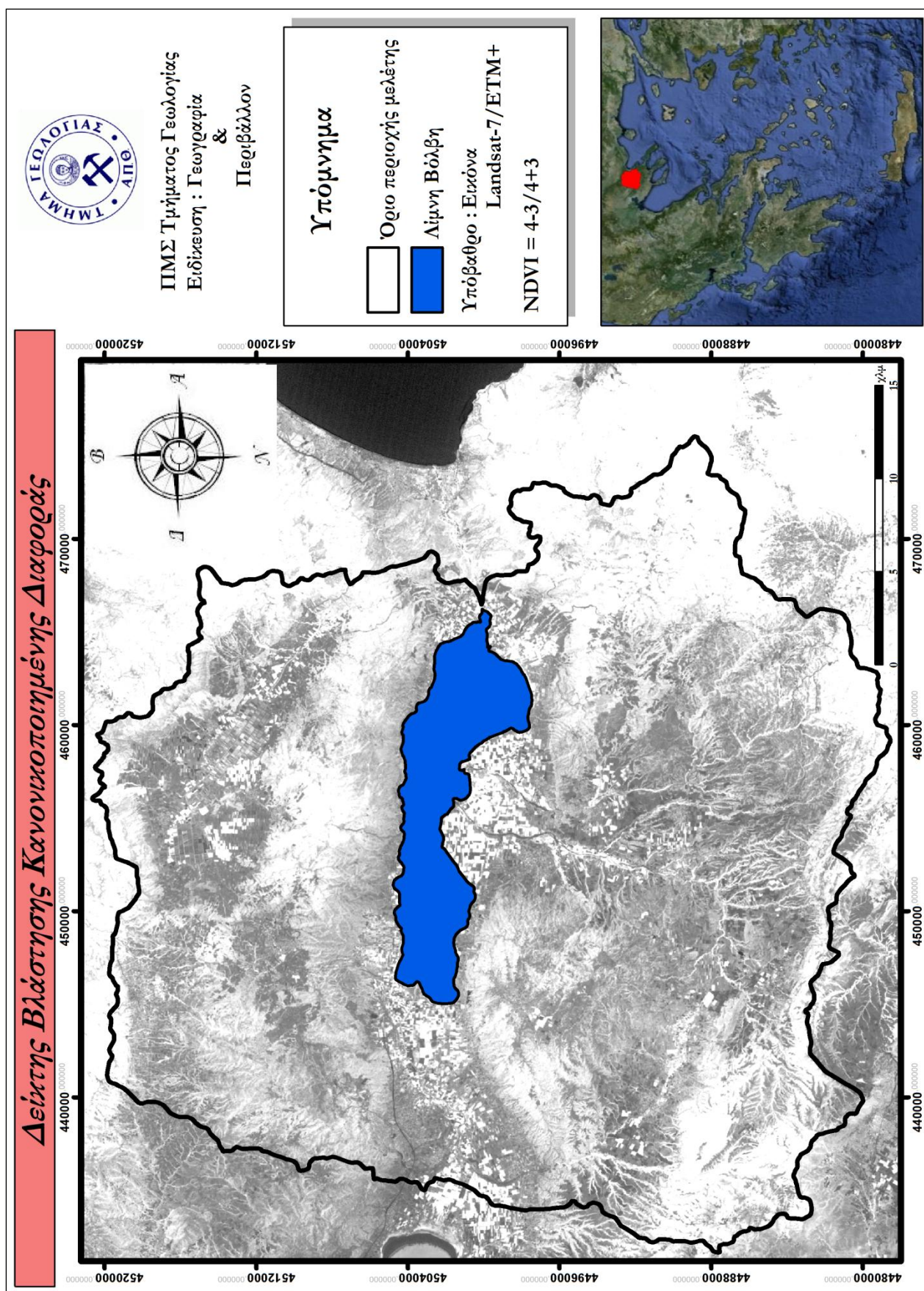
Οι γάββροι, οι διορίτες, οι ρυόλιθοι, οι σχιστόλιθοι και τα υπερβασικά πετρώματα δεν μπόρεσαν να εντοπιστούν και να χαρτογραφηθούν.

Ο προσδιορισμός των ορίων των σχηματισμών έγινε οπτικά και στη συνέχεια ψηφιοποιήθηκαν ως πολυγωνικές οντότητες στο περιβάλλον του ArcGIS. Στο Σχήμα 4.66 απεικονίζεται ο τελικός χάρτης των σχηματισμών όπως προκύπτει από την επεξεργασμένη εικόνα και στον Πίνακα 4.17 δίνεται η έκταση που καταλαμβάνουν οι σχηματισμοί σε km² και %.

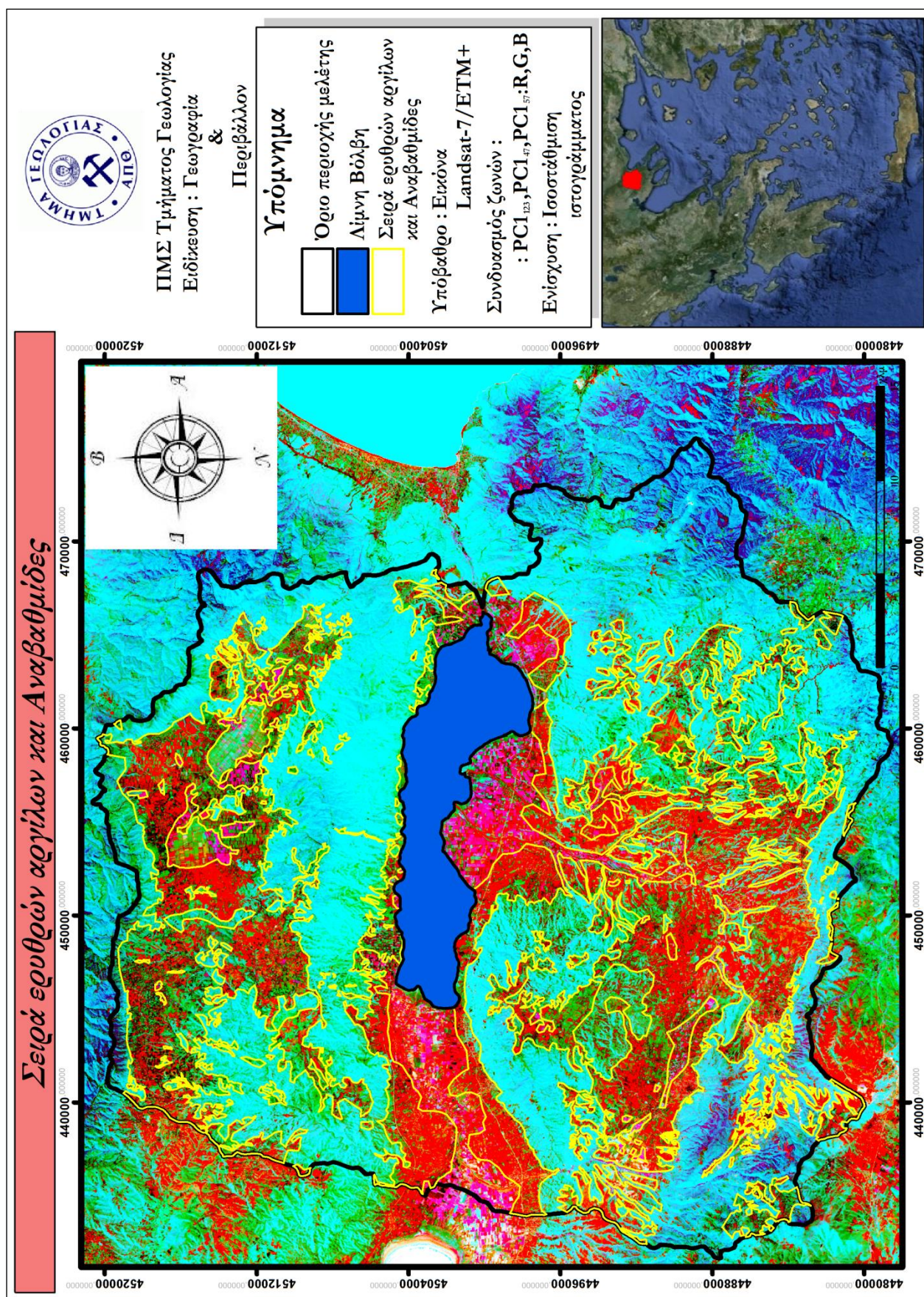
Πίνακα 4.17. Έκταση των λιθολογικών σχηματισμών.

Σχηματισμός	Έκταση σε km ²	Ποσοστό έκτασης %	Σχηματισμός	Έκταση σε km ²	Ποσοστό έκτασης %
Αλλουβιακές αποθέσεις & Προσχώσεις	112,85	9,32	Σειρά ερυθρών αργίλων & Αναβαθμίδες	470,08	38.84
Ασβεστόλιθοι & Μάρμαρα	3,72	0,31	Γρανίτης	89,36	7,38
Χαλαζίτες	13,04	1,08	Αμφιβολίες	88,81	7,34
Φυλλίτες	8,43	0,70			

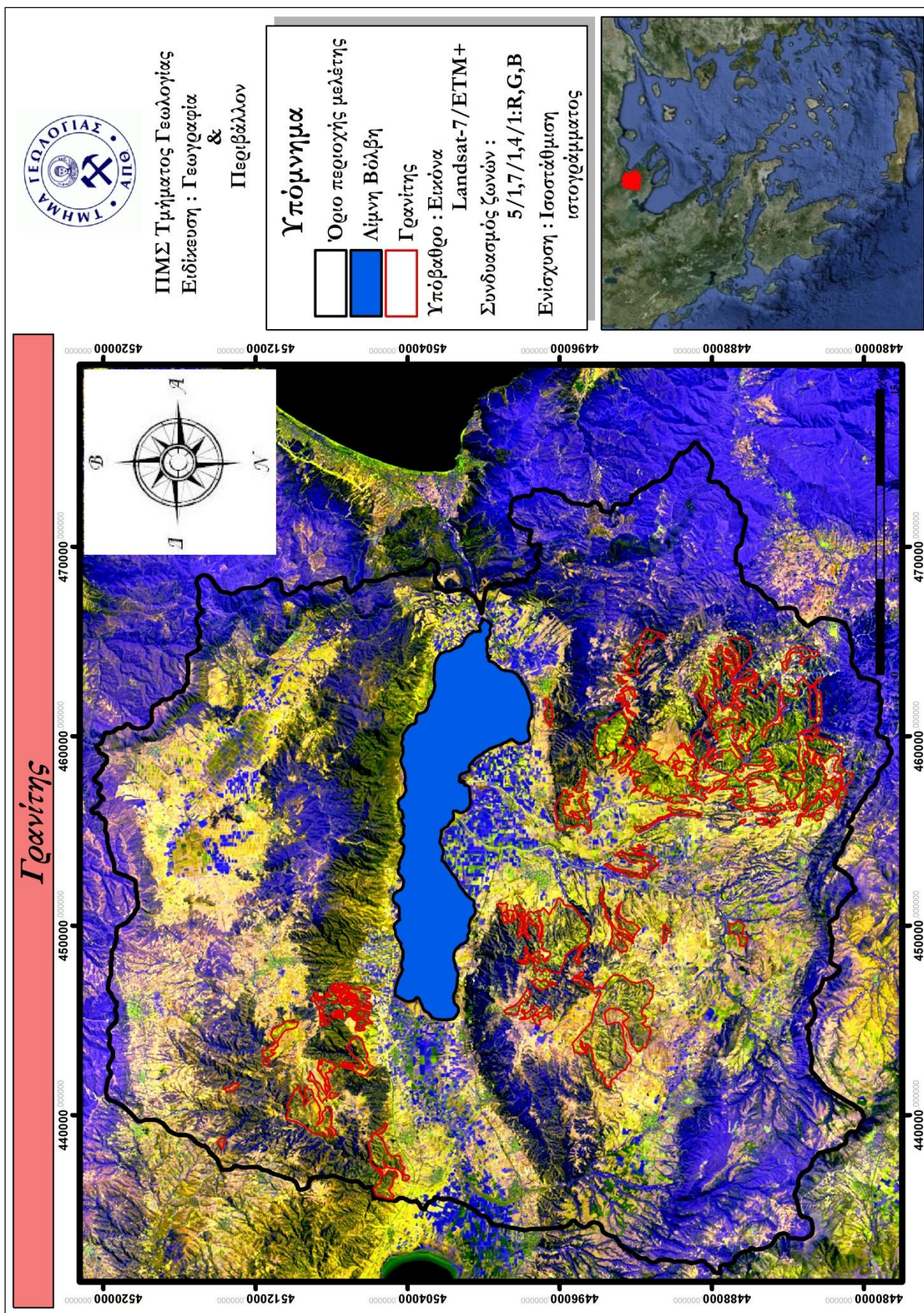
Επίσης το 0,85% (10,29km²) καταλαμβάνουν οι Βρωμολίμνες, ενώ το 21,27% (257,37km²) καλύπτεται από πυκνή βλάστηση.



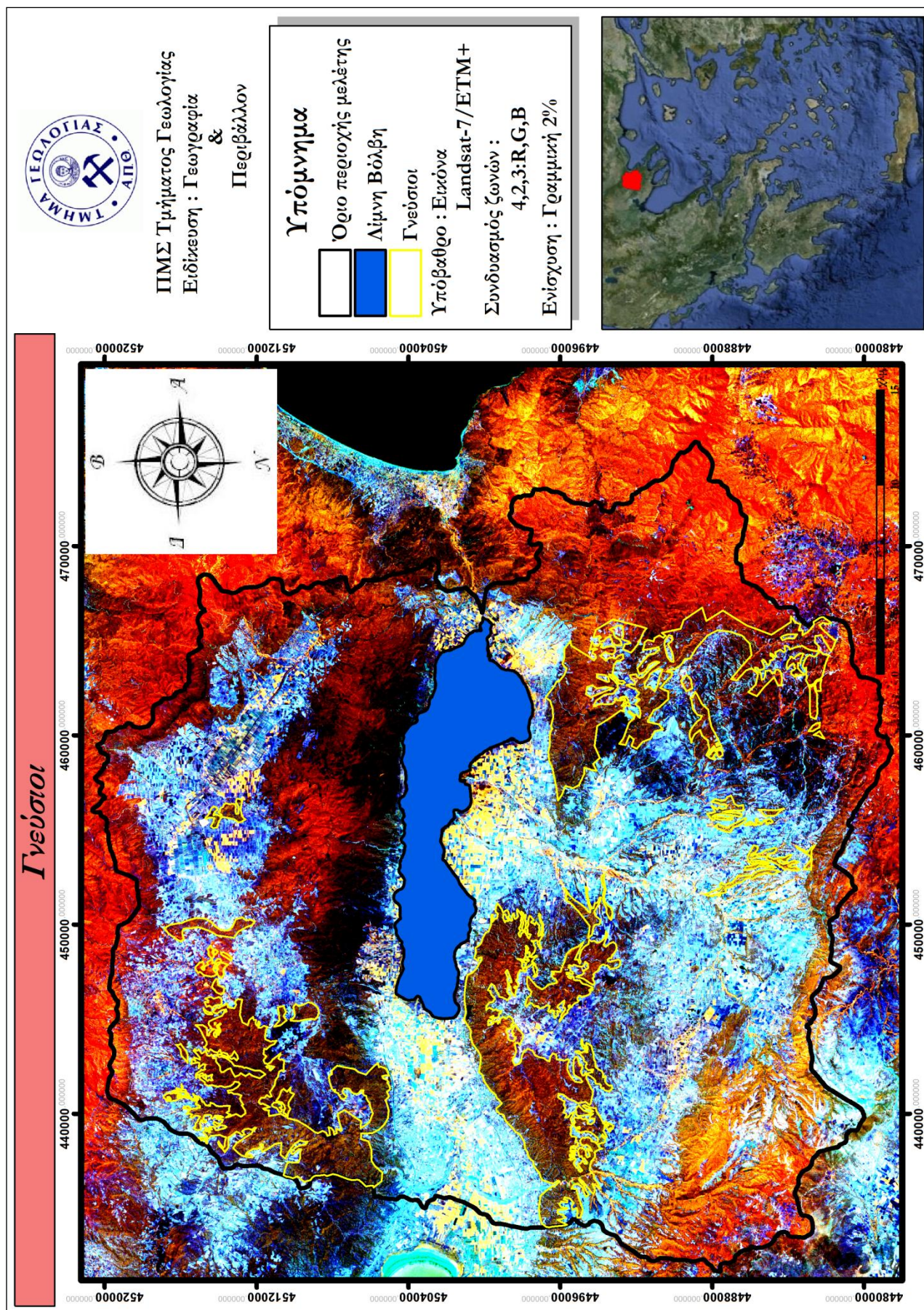
Σχήμα 4.55. Εικόνα που προέκυψε από την εφαρμογή του Δείκτη Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς, με τη βοήθεια του λογισμικού ENVI.



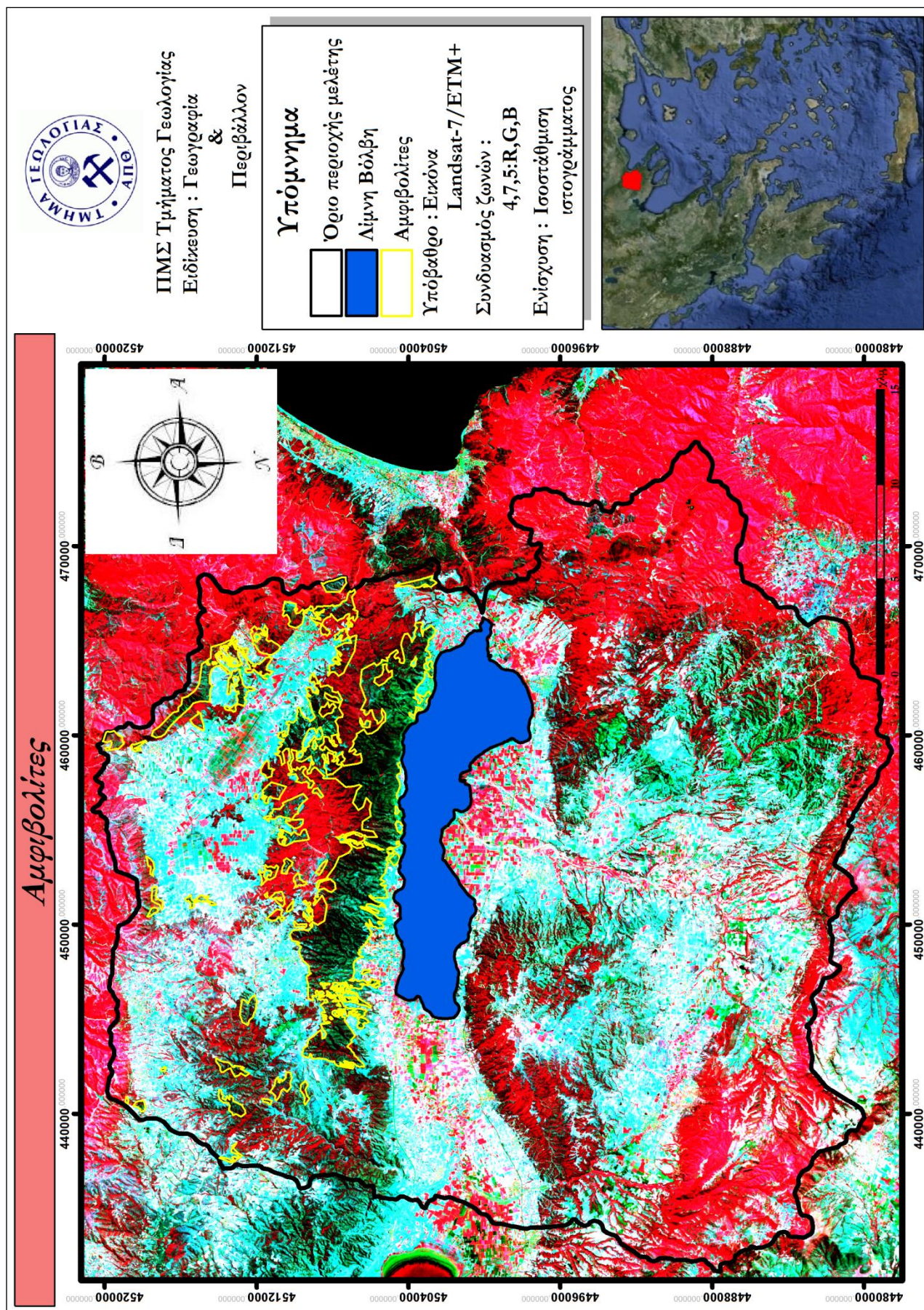
Σχήμα 4.58. Η σειρά ερυθρών αργίλων και οι αναβαθμίδες της περιοχής μελέτης που εντοπίστηκαν στην επεξεργασμένη εικόνα Landsat-7/ETM+.



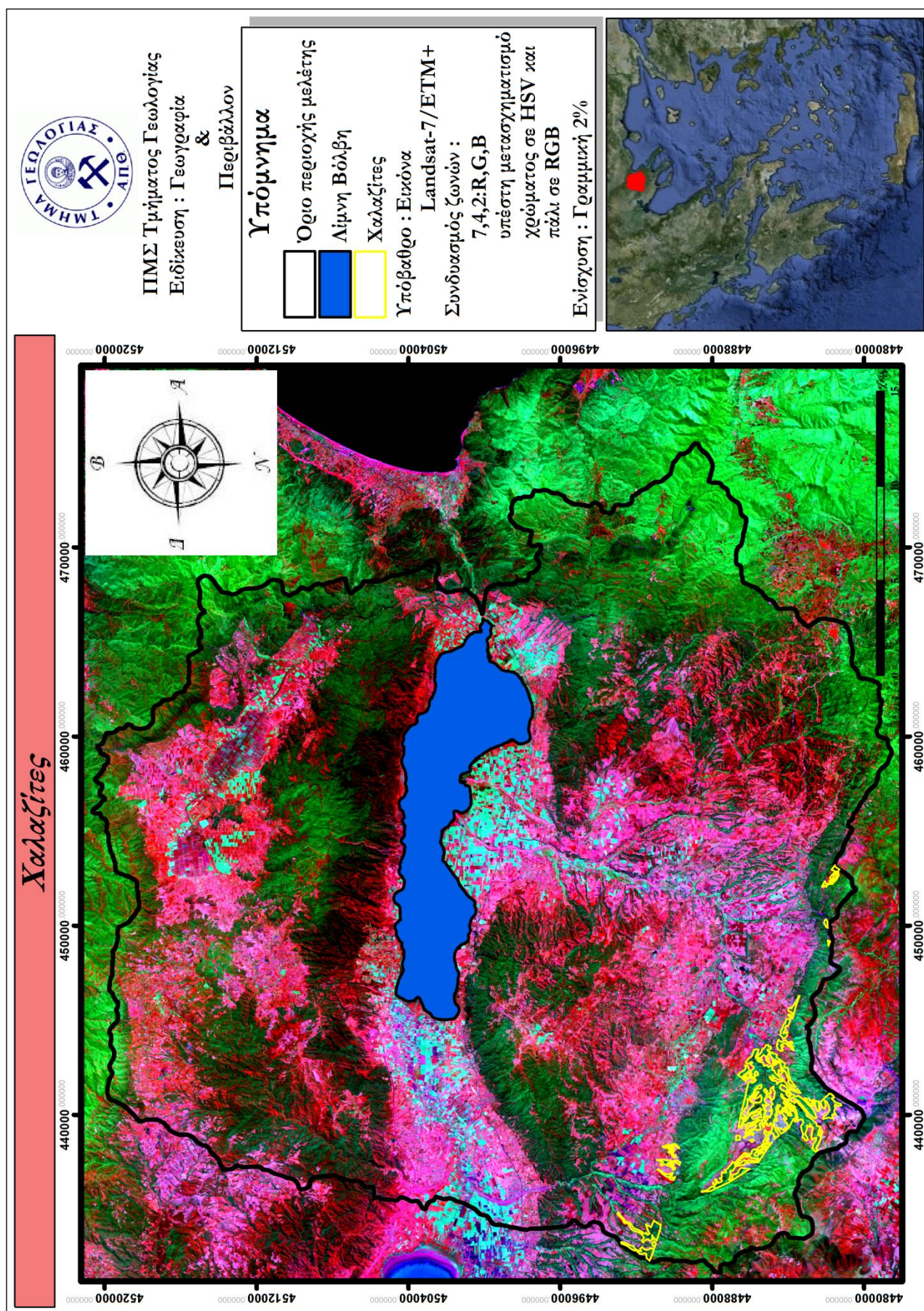
Σχήμα 4.59. Οι γρανίτες της περιοχής μελέτης που εντοπίστηκαν στην επεξεργασμένη εικόνα Landsat-7/ETM+.



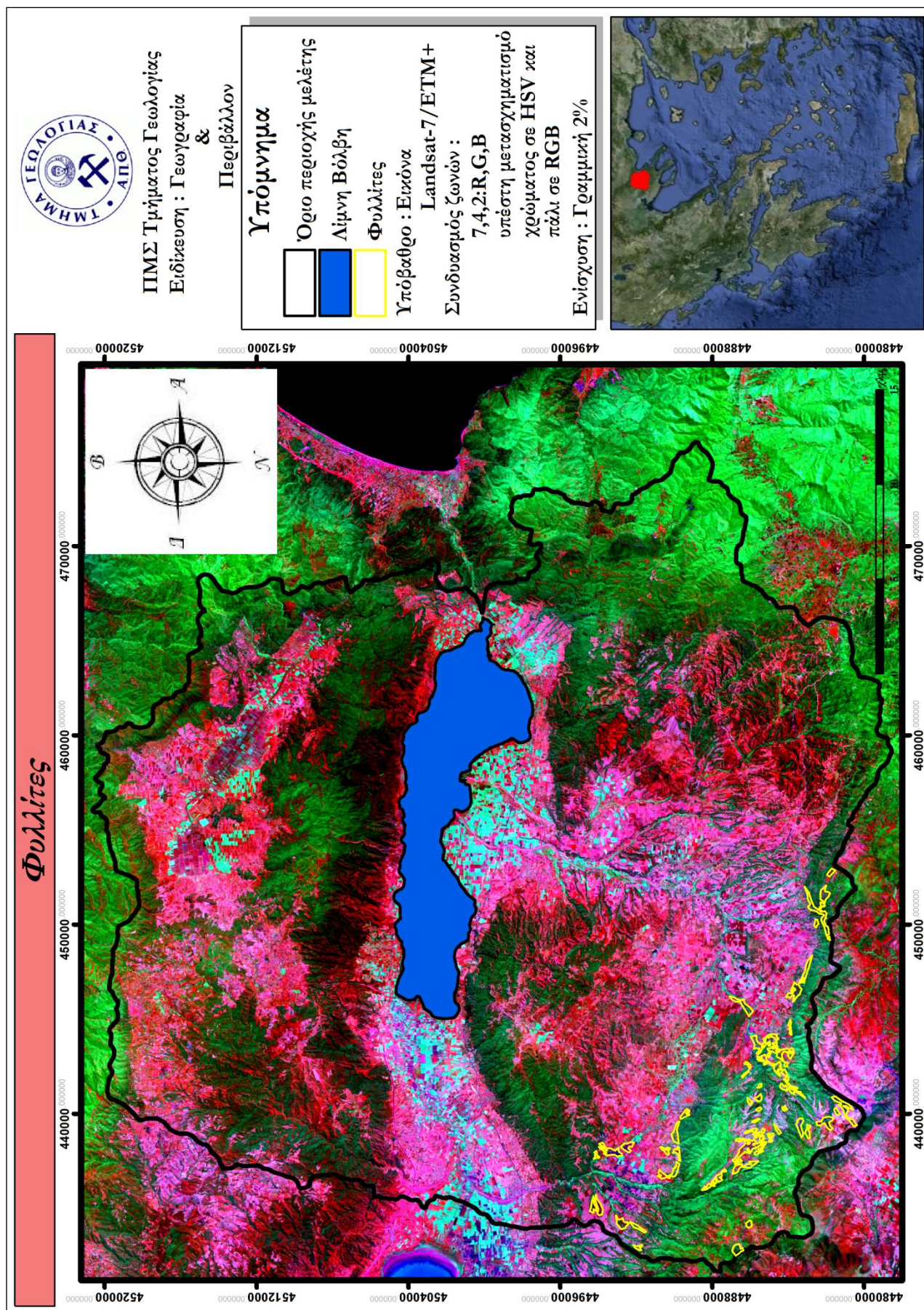
Σχήμα 4.60. Οι γνεύσιοι της περιοχής μελέτης που εντοπίστηκαν στην επεξεργασμένη εικόνα Landsat-7/ETM+.



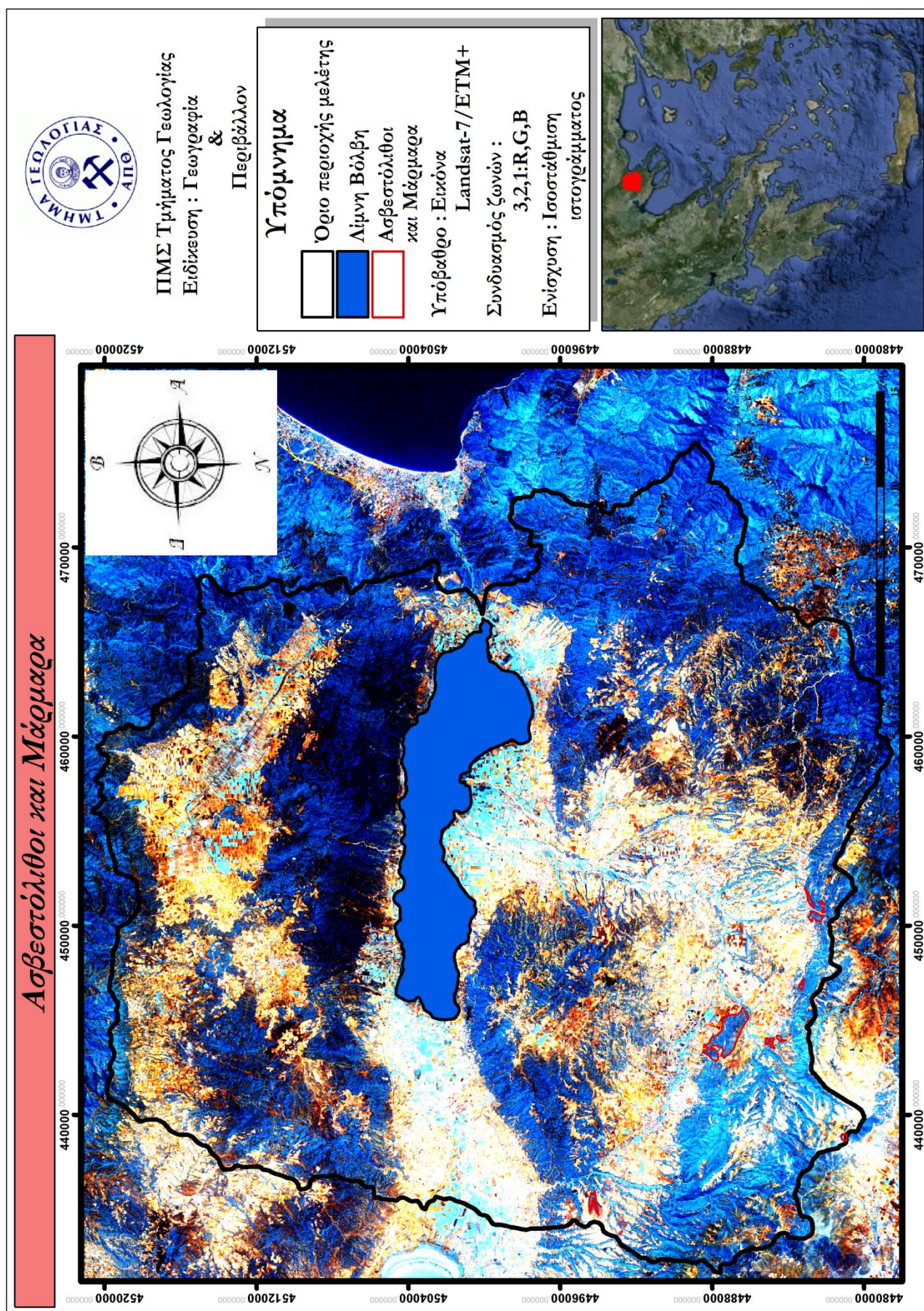
Σχήμα 4.61. Οι αμφιβολίτες της περιοχής μελέτης που εντοπίστηκαν στην επεξεργασμένη εικόνα Landsat-7/ETM+.



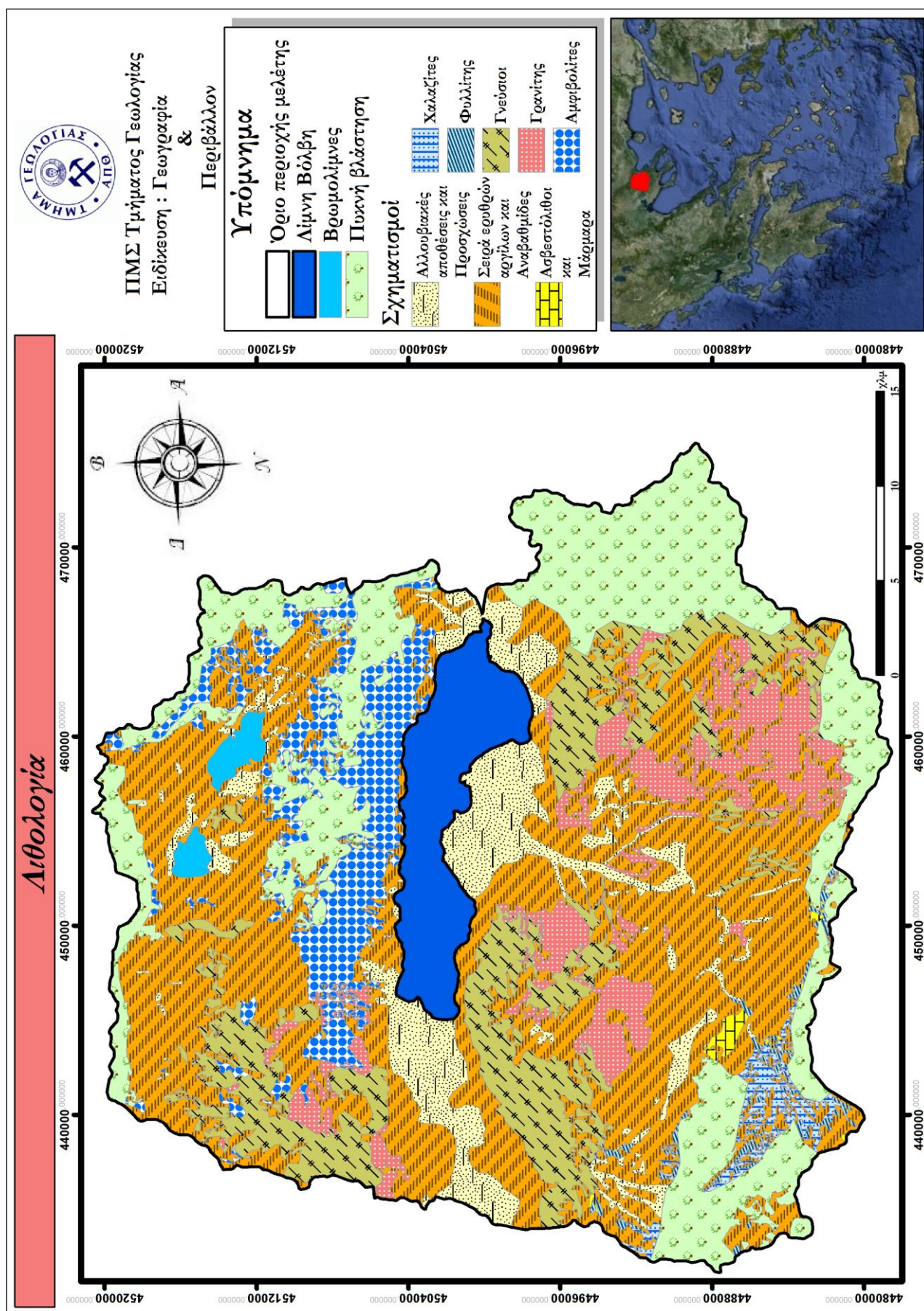
Σχήμα 4.62. Οι χαλαζίτες της περιοχής μελέτης που εντοπίστηκαν στην επεξεργασμένη εικόνα Landsat-7/ETM+.



Σχήμα 4.63. Οι φυλλίτες της περιοχής μελέτης που εντοπίστηκαν στην επεξεργασμένη εικόνα Landsat-7/ETM+.



Σχήμα 4.64. Οι ασβεστόλιθοι και τα μάρμαρα της περιοχής μελέτης που εντοπίστηκαν στην επεξεργασμένη εικόνα Landsat-7/ETM+.



Σχήμα 4.66. Λιθολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης, ο οποίος προέκυψε από την επεξεργασμένη εικόνα Landsat-7/ETM+.

4.6. Τεκτονική

4.6.1. Γενικά

Στο κομμάτι αυτό της διατριβής, γίνεται η χαρτογράφηση των ρηγμάτων, καθώς επίσης και ο εντοπισμός φωτογραμμώσεων, οι οποίες μπορεί να αποτελούν ρήγματα, και παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της περιοχής μελέτης.

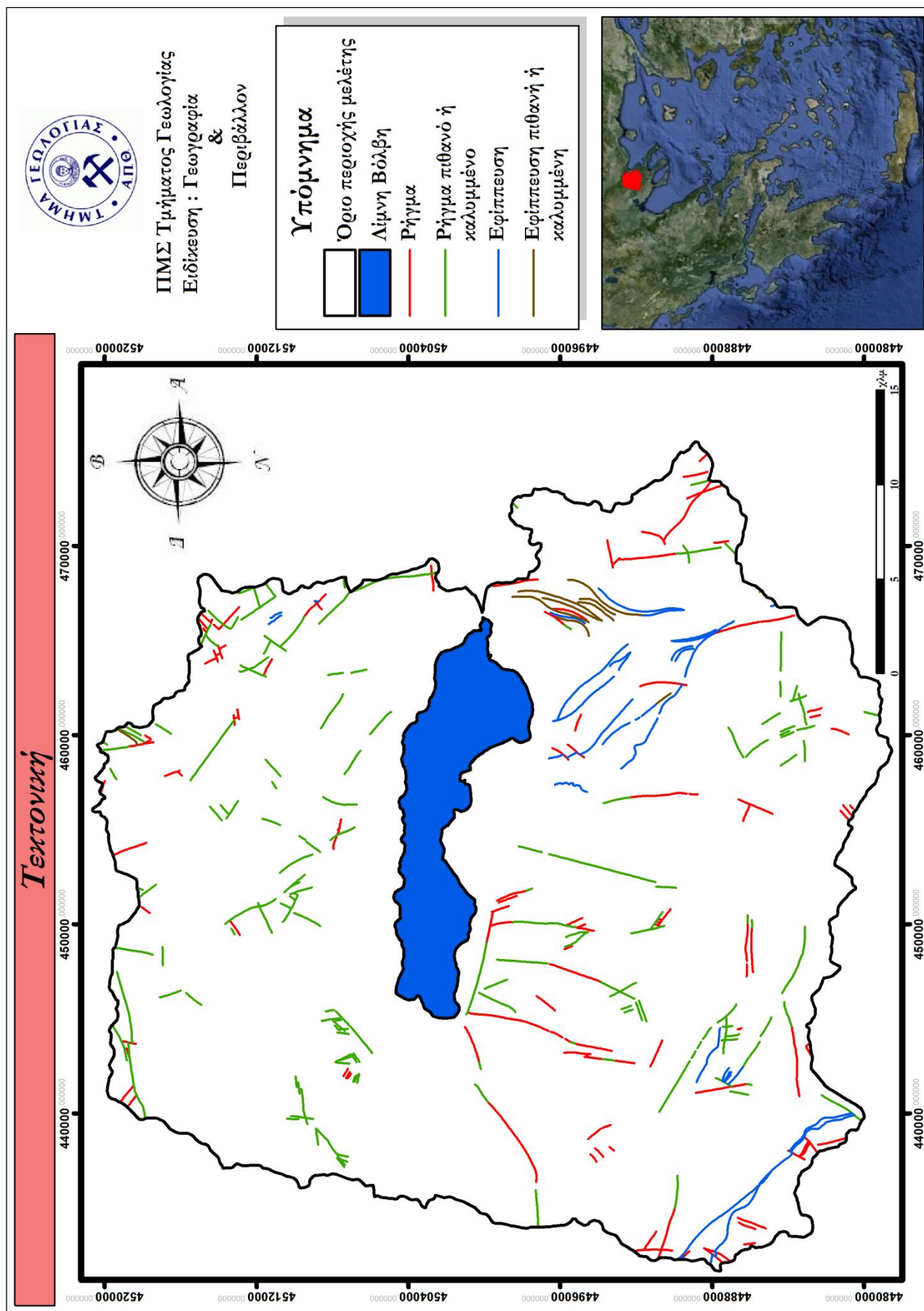
Ρήγμα στην τεκτονική ονομάζεται κάθε ρηξιγενή δομή εκατέρωθεν της οποίας παρατηρούνται μετακινήσεις των επί μέρους τμημάτων του γεωλογικού σχηματισμού που παραμορφώνεται. Οι μετατοπίσεις αυτές μπορεί να είναι της τάξης μεγέθους από 1cm μέχρι και πάνω από 1000m, πολλές φορές. Η επιφανειακή εξ' άλλου εξάπλωση ενός ρήγματος είναι δυνατόν να φθάνει σε μήκος πολλών χιλιομέτρων (Κίλιας, 1997).

4.6.2. Χαρτογράφηση ρηγμάτων

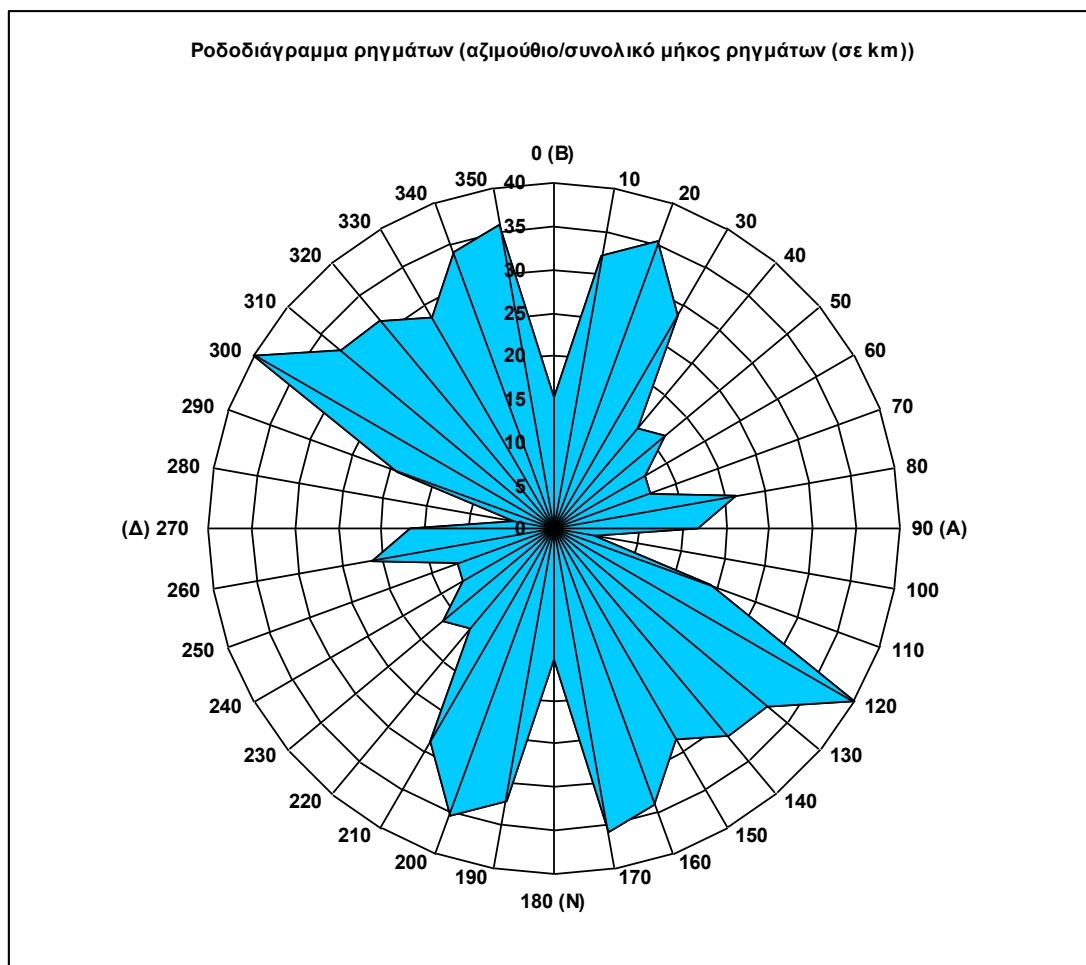
Το ρήγματα της περιοχής μελέτης ψηφιοποιήθηκαν ως γραμμικές οντότητες στο περιβάλλον του ArcGIS (Σχήμα 4.67), με βάση τα γεωλογικά φύλλα χάρτη : Αρναία, Βασιλικά, Ζαγκλιβέριον, Θέρμη, Πολύγυρος, Σιτοχώριον, Σοχός και Σταυρός, κλίμακας 1:50.000, του Ι.Γ.Μ.Ε.. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν το μήκος και το αζιμουθίο των ρηγμάτων, με σκοπό τη δημιουργία ροδοδιαγράμματος αζιμουθίου-συνολικού μήκους (Σχήμα 4.68, Πίνακας 4.19). Η ομαδοποίηση των αζιμουθίων των ρηγμάτων, για την παραγωγή των ροδοδιαγραμμάτων έγινε με βάση τον Πίνακα 4.18.

Πίνακας 4.18. Πίνακας κλάσεων αζιμουθίων των ρηγμάτων.

Κλάσεις αζιμουθίων	Κλάσεις αζιμουθίων
0ο – 5° και 176° – 179°	86° – 95°
6° – 15°	96° – 105°
16° – 25°	106° – 115°
26° – 35°	116° – 125°
36° – 45°	126° – 135°
46° – 55°	136° – 145°
56° - 65°	146° – 155°
66° - 75°	156° – 165°
76° – 85°	166° – 175°



Σχήμα 4.67. Χάρτης όπου φαίνονται τα ρήγματα της περιοχής μελέτης, μετά από ψηφιοποίηση με βάση τους γεωλογικούς χάρτες.



Σχήμα 4.68. Ροδοδιάγραμμα ρηγμάτων (αζιμούθιο/συνολικό μήκος (σε km)), με βάση τους γεωλογικούς χάρτες.

Πίνακας 4.19. Στον Πίνακα δίνονται οι κλάσεις των αζιμουθίων των ρηγμάτων και τα μήκη των ρηγμάτων για κάθε κλάση.

Κλάσεις αζιμουθίων	Συνολικό μήκος ρηγμάτων (km)	Κλάσεις αζιμουθίων	Συνολικό μήκος ρηγμάτων (km)
0° – 5° και 176° – 179°	15,107	86° – 95°	16,613
6° – 15°	31,931	96° – 105°	4,623
16° – 25°	35,405	106° – 115°	19,350
26° – 35°	28,515	116° – 125°	39,962
36° – 45°	15,087	126° – 135°	32,315
46° – 55°	16,594	136° – 145°	31,275
56° – 65°	12,236	146° – 155°	28,262
66° – 75°	11,887	156° – 165°	34,132
76° – 85°	21,551	166° – 175°	35,785

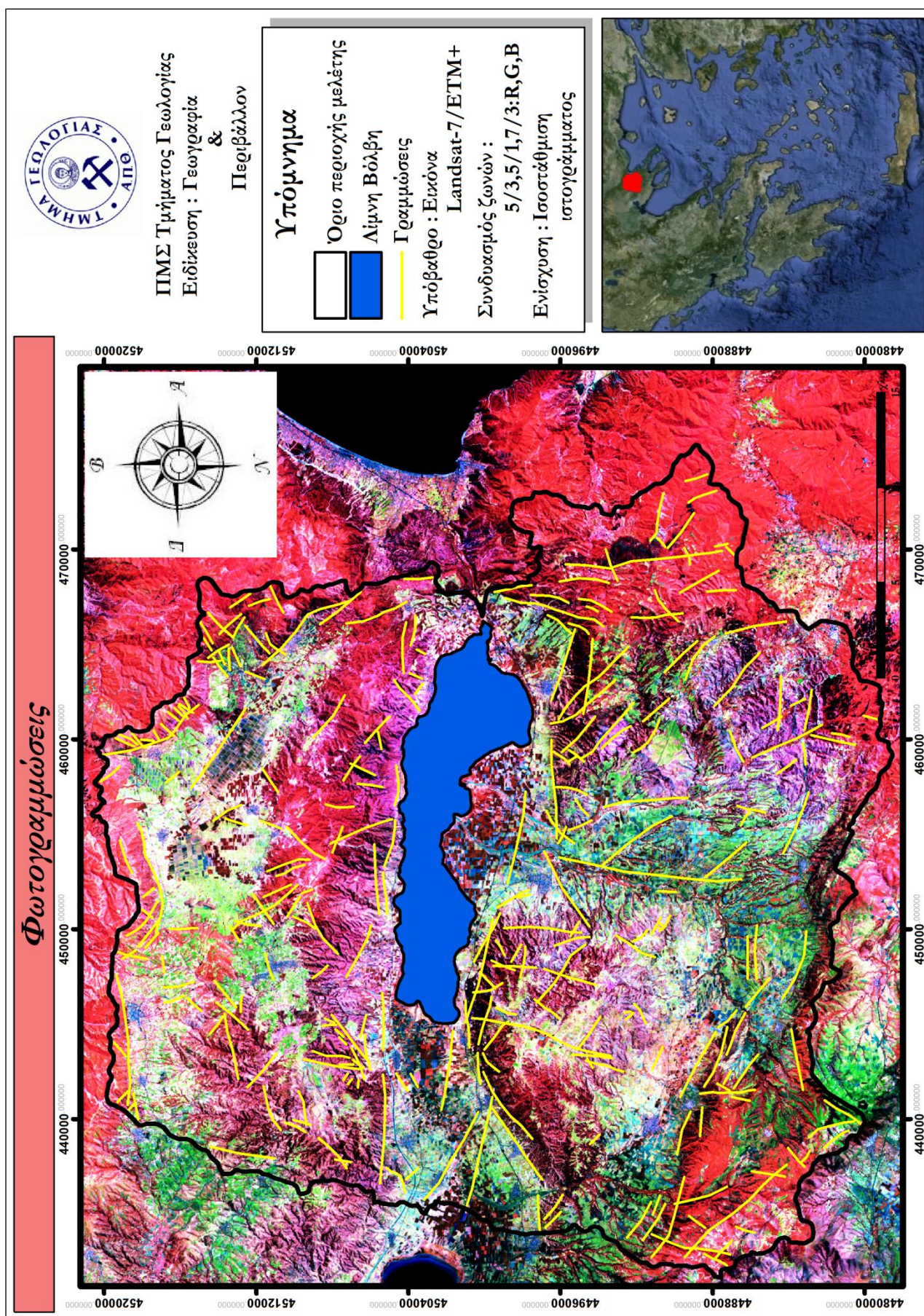
Σύμφωνα με το ροδοδιάγραμμα του Σχήματος 4.61, τα ρήγματα που ψηφιοποιήθηκαν με βάση τους γεωλογικούς χάρτες, μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες ομάδες. Η πρώτη περιλαμβάνει ρήγματα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης, ενώ η δεύτερη ρήγματα ΒΒΑ-ΝΝΔ διεύθυνσης. Επίσης, παρατηρείται και μία μικρότερη ομάδα ρηγμάτων με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ.

4.6.3. Εντοπισμός και χαρτογράφηση φωτογραμμώσεων

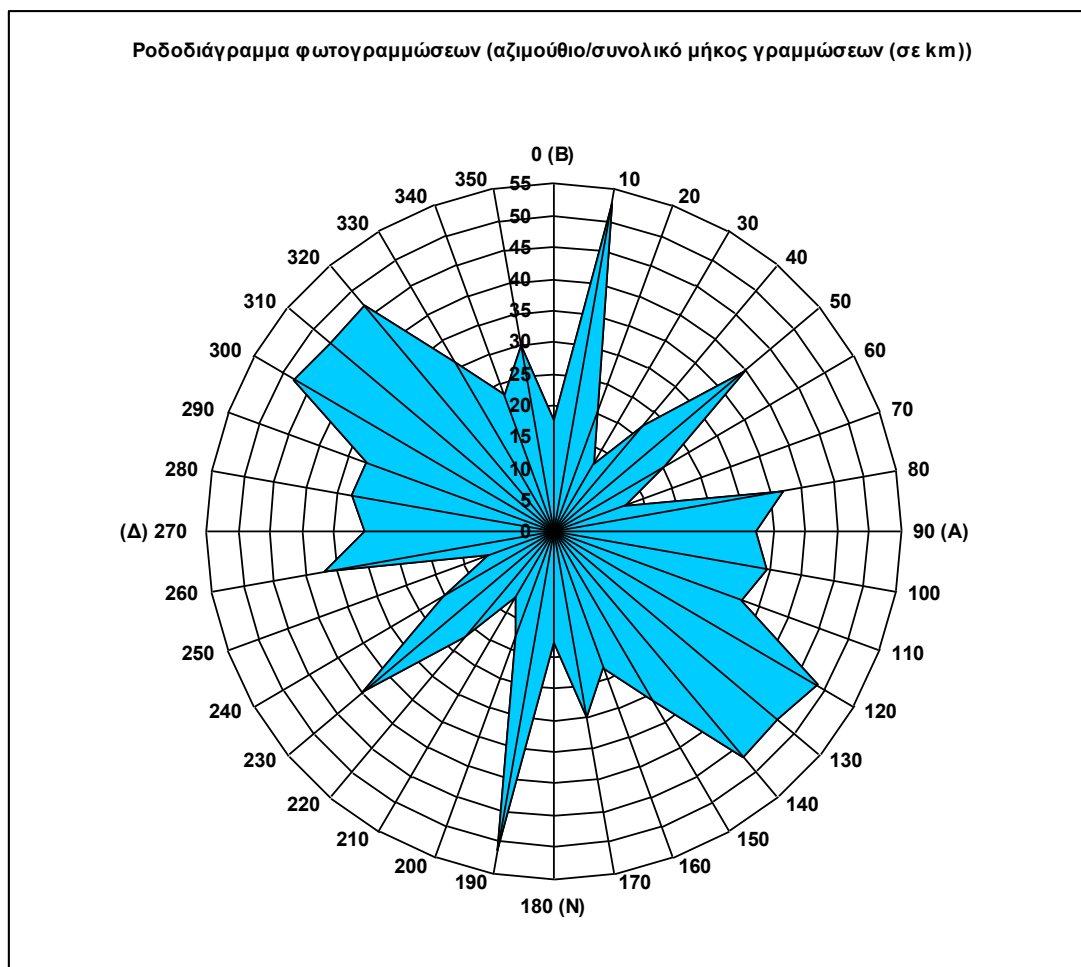
Οι φωτογραμμώσεις που εντοπίζονται, ύστερα από την επεξεργασία μίας δορυφορικής εικόνας, αντιπροσωπεύουν τεκτονικές δομές, και πρέπει να μελετηθούν στο ύπαιθρο, για να εξακριβωθεί αν αποτελούν ρήγματα ή όχι. Είναι καλύτερα ορατές σε ψευδοχρωματικές εικόνες.

Δημιουργήθηκαν αλληπάλληλα ψευδοχρωματικά σύνθετα, στο περιβάλλον του λογισμικού ENVI, και πιο κατάλληλο για τον εντοπισμό των γραμμώσεων αποδείχθηκε η ψευδοχρωματική σύνθεση των λόγων 5/3, 5/1 και 7/3 (5/3,5/1,7/3:R,G,B) (Raharimahefa & Kusky, 2009, Oikonomidis et al, 2010). Επίσης, έγινε ισοστάθμιση ιστογράμματος, για τη βελτίωση της εικόνας. Ο προσδιορισμός των γραμμώσεων έγινε οπτικά και στη συνέχεια ψηφιοποιήθηκαν ως γραμμικές οντότητες στο περιβάλλον του ArcGIS (Σχήμα 4.69) και υπολογίστηκαν το μήκος και το αξιμούθιο των ρηγμάτων, με σκοπό τη δημιουργία ροδοδιαγραμμάτων αξιμουθίου-συνολικού μήκους (Σχήμα 4.70, Πίνακας 4.20).

Σύμφωνα με τα ροδοδιαγράμματα του Σχήματος 4.63, τα οποία προέκυψαν από το σύνολο των γραμμώσεων της επεξεργασμένης εικόνας Landsat-7/ETM+, παρατηρείται ότι κυριαρχούν οι γραμμώσεις διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ, υπάρχουν όμως και γραμμώσεις διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ.



Σχήμα 4.69. Οι γραμμώσεις της περιοχής μελέτης, οι οποίες εντοπίστηκαν στην επεξεργασμένη εικόνα Landsat-7/ETM+.



Σχήμα 4.70. Ροδοδιάγραμμα ρηγμάτων (αζιμούθιο/συνολικό μήκος (σε km)), με βάση την επεξεργασμένη εικόνα Landsat-7/ETM+.

Πίνακας 4.20. Στον Πίνακα δίνονται οι κλάσεις των αζιμουθίων των ρηγμάτων και τα μήκη των ρηγμάτων για κάθε κλάση.

Κλάσεις αζιμουθίων	Συνολικό μήκος ρηγμάτων (km)	Κλάσεις αζιμουθίων	Συνολικό μήκος ρηγμάτων (km)
0° – 5° και 176° – 179°	17,591	86° – 95°	16,613
6° – 15°	52,642	96° – 105°	32,042
16° – 25°	19,842	106° – 115°	34,208
26° – 35°	12,519	116° – 125°	31,808
36° – 45°	21,750	126° – 135°	48,233
46° – 55°	39,561	136° – 145°	46,023
56° – 65°	20,545	146° – 155°	30,412
66° – 75°	11,876	156° – 165°	23,004
76° – 85°	36,801	166° – 175°	30,038

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται ανατολικά από τη Θεσσαλονίκη και έχει έκταση 1.280km^2 , εκ των οποίων τα 70km^2 καταλαμβάνει η λίμνη Βόλβη. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες υπό των οποίων ορίζεται η περιοχή είναι :

$$\varphi = 40^{\circ} 27' \text{ έως } 40^{\circ} 50' \text{ Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος}$$

$$\lambda = 22^{\circ} 53' \text{ έως } 23^{\circ} 40' \text{ Ανατολικό Γεωγραφικό Μήκος}$$

Γεωλογικά αποτελείται από Ολοκαινικά, Πλειστοκαινικά και Νεογενή ιζήματα (Α. Μειόκαινο-Κ. Πλειόκαινο). Τα Ολοκαινικά και Πλειστοκαινικά ιζήματα διακρίνονται σε αλλουβιακές αποθέσεις και προσχώσεις, ενώ τα Νεογενή σε ερυθρές αργίλους και αναβαθμίδες. Επίσης, η περιοχή μελέτης αποτελείται και από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα.

Η επικρατέστερη διεύθυνση των ρηγμάτων είναι ΒΔ-ΝΑ.

Η ενεργός τεκτονική είναι η αιτία της δημιουργίας γεωθερμικού πεδίου νότια της λίμνης Βόλβης.

Από την ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου, με υπόβαθρο τοπογραφικούς χάρτες της Γ.Υ.Σ., προκύπτει ότι :

1. Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης είναι 7^{ης} τάξης, με βάση την αρίθμηση κατά Strahler.
2. Η ανάπτυξή του είναι ανομοιόμορφη.
3. Η μορφή του είναι παράλληλη, γεγονός που δηλώνει την ύπαρξη πετρωμάτων με απότομες κλίσεις, ενώ κατά περιοχές εμφανίζεται με ρηξιγενή κλιμακωτή μορφή, η οποία αναπτύσσεται σε περιοχές ρηγμάτων ή ομάδες ρηγμάτων που τέμνονται κάθετα.

Το υδρογραφικό δίκτυο που εξάγεται αυτόματα από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου SRTM, είναι πολύ πυκνό, γεγονός που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Οφείλεται στο ότι το πρόγραμμα με το οποίο γίνεται η επεξεργασία, αντιλαμβάνεται ως κλάδο 1^{ης} τάξης οποιοδήποτε κοίλωμα της περιοχής. Για το λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητο να διαγραφεί ο κλάδος 1^{ης} τάξης και να θεωρηθεί ο κλάδος 2^{ης} τάξης ως 1^{ης} τάξης (ο 3^{ης} τάξης ως 2^{ης} τάξης, κ.ο.κ.). Επίσης, οι ευθείες γραμμές που παρατηρούνται αντιπροσωπεύουν επίπεδες επιφάνειες και για το λόγο αυτό δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

✚ Σύγκριση του υδρογραφικού δικτύου που προκύπτει από την ψηφιοποίηση τοπογραφικών χαρτών και αυτού που προκύπτει από την αυτόματη εξαγωγή από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου SRTM, μας δείχνει ότι συμπίπτουν σε πολύ μεγάλο βαθμό. Επομένως, τα δεδομένα SRTM, αποτελούν μία αξιόπιστη επιλογή υψομετρικής πληροφορίας και είναι κατάλληλα για μία πληθώρα εφαρμογών.

✚ Από τη χωρική ανάλυση του αναγλύφου, προκύπτει ότι :

1. Η περιοχή μελέτης είναι λοφώδης-πεδινή, ενώ ένα μικρό κομμάτι της (9,93%) είναι ημιορεινό-ορεινό. Η πεδινή περιοχή βρίσκεται περιμετρικά της λίμνης Βόλβης, εκεί όπου βρίσκονται οι εκβολές των ρεμάτων που την τροφοδοτούν, με αποτέλεσμα το σχηματισμό αλλουβιακών ριπιδίων.
2. Οι κλίσεις των κλιτύων κυμαίνονται από 0^0 έως $42,5^0$. Το μεγαλύτερο μέρος (46,70%) χαρακτηρίζεται από κλίσεις που κυμαίνονται μεταξύ 5^0 έως 15^0 , γεγονός που υποδηλώνει τις έντονες διαβρωτικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο ισχυρώς κεκλιμένο ανάγλυφο. Χαμηλές τιμές κλίσεων (0^0 - 2^0 και 2^0 - 5^0 με ποσοστά 18,85% και 26,50%, αντίστοιχα) εντοπίζονται κυρίως περιμετρικά της λίμνης, καθώς επίσης και στο ΒΑ και ΝΔ τμήμα της λεκάνης, όπου επικρατούν τα πιο επιδεκτικά στη διάβρωση πετρώματα (νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα). Δείχνουν ένα επίπεδο έως ελαφρώς κεκλιμένο ανάγλυφο και αντιστοιχούν σε πλημμυρικά πεδία, αναβαθμίδες, επιφάνειες επιπέδωσης και πρόποδες κοιλάδων. Σημαντικό ποσοστό της περιοχής (7,93%) χαρακτηρίζεται από κλίσεις μεταξύ 15^0 - 35^0 . Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν ένα απότομο έως εξαιρετικά απότομο ανάγλυφο, με έντονες διεργασίες απογύμνωσης και αυλακωτή και γραμμική διάβρωση. Κατανέμονται σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, κυρίως όμως εντοπίζονται στα όρια της λεκάνης και βόρεια της λίμνης Βόλβης.
3. Όλες οι κλάσεις προσανατολισμού των κλιτύων κυμαίνονται από 10%-15%, χωρίς όμως να μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα συγκεκριμένο συμπέρασμα.
4. Το σκιασμένο ανάγλυφο της περιοχής μελέτης βοηθά στον εντοπισμό τεκτονικών δομών.

✚ Η υδρολογική λεκάνη μελέτης χωρίστηκε σε υπολεκάνες, ώστε να μελετηθούν οι μορφοτεκτονικοί δείκτες κάθε μίας. Τα αποτελέσματα της μορφοτεκτονικής ανάλυσης είναι τα εξής :

1. Από το σχήμα των υψομετρικών καμπυλών και την τιμή των υψομετρικών ολοκληρωμάτων των υπολεκανών, σε συνδυασμό με το χάρτη σκιασμένου

αναγλύφου και το υδρογραφικό δίκτυο, προκύπτει ότι η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο στάδιο ωριμότητας, με μέσες τιμές κλίσεων των κοιτών των ρεμάτων και του αναγλύφου. Εξαίρεση αποτελεί το νοτιοδυτικό τμήμα, το οποίο βρίσκεται στο στάδιο γήρατος. Η περιοχή έχει εξομαλυνθεί, οι κορυφές παίρνουν αποστρογγυλεμένη μορφή και οι κοιλάδες είναι λιγότερο απότομες στις κλιτύες τους. Η κατά βάθος διάβρωση των ρεμάτων βρίσκεται πολύ κοντά στο βασικό επίπεδο, με αποτέλεσμα το τρεχούμενο νερό να διαβρώνει πλευρικά. Η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου είναι πλήρης. Οι κλίσεις των ποταμών και των κλιτύων των κοιλάδων μειώνονται ακόμη περισσότερο. Η διάβρωση σταματά εξαιτίας των πολύ μικρών κλίσεων της κοίτης, που δεν επιτρέπουν μεταφορά υλικών από τα ρέοντα ύδατα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή βόρεια της λίμνης Βόλβης, που βρίσκεται στο στάδιο νεότητας. Δημιουργήθηκε μεταγενέστερα, εξαιτίας ανυψωτικών κινήσεων, δημιουργώντας μία νέα τεκτονική δομή. Επικρατεί ένα ορεινό και τραχύ ανάγλυφο. Η περιοχή αποστραγγίζεται από ένα υδρογραφικό δίκτυο, το οποίο εξαιτίας της σημαντικής υψομετρικής διαφοράς, έχει μεγάλες κλίσεις με αποτέλεσμα μεγάλες ταχύτητες τρεχούμενων νερών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη μεταφορική ικανότητα των ρεμάτων, η οποία απομακρύνει το σύνολο των υλικών της ποτάμιας διάβρωσης, που συμβαίνει κυρίως στη βάση της κοίτης των ρεμάτων με αποτέλεσμα τους μεγάλους ρυθμούς εκβάθυνσης των κοιτών. Επίσης, οι αυξημένες κλίσεις επιτρέπουν την μετακίνηση των προϊόντων της αποσάθρωσης και με άλλους τρόπους (π.χ. βαρύτητα).

2. Από τα μορφολογικά προφίλ των υπολεκανών και τα Σχήματα που απεικονίζουν το Μυγδονιακό-Προμυγδονιακό σύστημα, παρατηρούμε ότι οι τιμές του δείκτη SL αυξάνονται κατά θέσεις υπερβολικά (>400), που δείχνει την επίδραση της τεκτονικής στην εξέλιξη του υδρογραφικού δικτύου των μεγάλων λεκανών της λεκάνης απορροής της λίμνης Βόλβης, τόσο στο νότιο όσο και στο βόρειο τμήμα της λεκάνης. Οι αλλαγές στην τιμή του SL δεν σχετίζονται με την πρόσφατη τεκτονική δραστηριότητα, αλλά με την παλαιότερη. Σαφείς μεταβολές παρατηρούνται στην επαφή Μυγδονιακού-Προμυγδονιακού συστήματος. Η αποτύπωση της τεκτονικής δραστηριότητας συμβαίνει στο Προμυγδονιακό σύστημα και όχι στο Μυγδονιακό, και σχετίζεται με τις τεκτονικές φάσεις εξέλιξης της λεκάνης της Μυγδονίας.

✚ Από την ψηφιοποίηση των λιθολογικών σχηματισμών, με υπόβαθρο γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε., και σε συνδυασμό με το υδρογραφικό δίκτυο, έγινε ο υπολογισμός της υδρογραφικής πυκνότητας. Σχηματισμοί με μικρή τιμή υδρογραφικής πυκνότητας επιτρέπουν τη διήθηση των υδάτων. Σχηματισμοί με μεγαλύτερες τιμές δεν επιτρέπουν τη διήθηση, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η επιφανειακή ροή.

✚ Από την επεξεργασία της δορυφορικής εικόνας και τη σύγκρισή της με το λιθολογικό χάρτη που προέκυψε με ψηφιοποίηση, προκύπτει ότι :

1. Οι αλλουβιακές αποθέσεις και οι προσχώσεις, παρόλο που δεν μπόρεσαν να διακριθούν μεταξύ τους εξαιτίας της παρόμοιας σύστασής τους, εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν με μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με τους υπόλοιπους σχηματισμούς.
2. Οι ερυθρές άργιλοι και οι αναβαθμίδες, παρόλο που δεν μπόρεσαν να διακριθούν μεταξύ τους εξαιτίας της παρόμοιας σύστασής τους, εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν με μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με τους υπόλοιπους σχηματισμούς.
3. Οι ασβεστόλιθοι και τα μάρμαρα, παρόλο που δεν μπόρεσαν να διακριθούν μεταξύ τους εξαιτίας της παρόμοιας σύστασής τους, εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν με μέτρια ακρίβεια.
4. Οι χαλαζίτες και οι φυλλίτες εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν μερικώς, εξαιτίας της πυκνής βλάστησης.
5. Οι γνεύσιοι εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια, εκτός από τις περιοχές με πυκνή βλάστηση.
6. Οι αμφιβολίτες εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν με μεγάλη ακρίβεια.
7. Οι γρανίτες εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια.
8. Οι ρυόλιθοι, οι σχιστόλιθοι, οι διορίτες, οι γάββροι και τα υπερβασικά πετρώματα δεν μπόρεσαν να εντοπιστούν και να χαρτογραφηθούν, είτε επειδή καλύπτουν μικρή έκταση, είτε επειδή βρίσκονται σε περιοχές με πυκνή βλάστηση.

✚ Από την επεξεργασία της δορυφορικής εικόνας και τη σύγκρισή της με το χάρτη ρηγμάτων που προέκυψε με ψηφιοποίηση, από τους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε., προκύπτει ότι :

1. Το συνολικό μήκος των ρηγμάτων από τους γεωλογικούς χάρτες (430,63km) είναι μικρότερο από εκείνο των γραμμώσεων (555,51km) που εντοπίστηκαν στην επεξεργασμένη δορυφορική εικόνα.
2. Η μελέτη των ροδοδιαγραμμάτων μας δείχνει ότι η κυρίαρχη διεύθυνση, τόσο των ρηγμάτων όσο και των γραμμώσεων, είναι η ΒΔ-ΝΑ. Τα υπόλοιπα ρήγματα είναι διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΔ και ΔΒΔ-ΑΝΑ, ενώ οι υπόλοιπες γραμμώσεις έχουν διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ.

 Συγκρίνοντας τους γεωλογικούς χάρτες που προέκυψαν, τόσο από τους υπάρχοντες γεωλογικούς χάρτες όσο και από τις επεξεργασμένες δορυφορικές εικόνες, προκύπτει ότι η Τηλεπισκόπηση μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη διάκριση των λιθολογικών σχηματισμών, εκτός αν υπάρχουν περιοχές με πυκνή βλάστηση. Για τις διαφορές που εντοπίζονται στα όρια των σχηματισμών ανάμεσα στους χάρτες ή τα πετρώματα τα οποία δε μπορούν να προσδιοριστούν, απαιτείται έρευνα πεδίου και ίσως και διόρθωση των υπάρχοντων χαρτών.

 Στην ανίχνευση των ρηγμάτων, μεγάλες ομοιότητες βρέθηκαν μεταξύ του χάρτη των ρηγμάτων από τους υπάρχοντες γεωλογικούς χάρτες και του χάρτη που προέκυψε από την επεξεργασμένη δορυφορική εικόνα, όσον αφορά τη διεύθυνση. Το συνολικό μήκος των γραμμώσεων είναι μεγαλύτερο από αυτό των ρηγμάτων, γεγονός που οφείλεται στο ότι όλες οι γραμμώσεις δεν είναι ρήγματα, για το λόγο αυτό απαιτείται έρευνα πεδίου και ίσως και διόρθωση των υπάρχοντων χαρτών.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

6.1. Ελληνική Βιβλιογραφία

- ❖ Αλεξάκης, Δ., 2009. «Η συμβολή της γεωμορφολογίας με τη βοήθεια της Τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στη χαρτογράφηση αρχαιολογικών θέσεων», Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 101, 106.
- ❖ Αστάρας, Θ., 2011. «Τηλεπισκόπηση-Φωτοερμηνεία στις Γεωεπιστήμες», Εκδόσεις Αϊβάζη, Θεσσαλονίκη, σελ. 386, 399, 405.
- ❖ Αστάρας, Θ., 2007. «Ψηφιακή Χαρτογραφία και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 10, 17-18, 21.
- ❖ Αστάρας, Θ., 2006. «Τηλεπισκόπηση-Φωτοερμηνεία στις Γεωεπιστήμες», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 9, 175.
- ❖ Αστάρας, Θ., 1980. «Ποσοτική γεωμορφολογική μελέτη τμήματος των Δ. Πλευρών του όρους Βερτίσκον (Κ. Μακεδονία)», Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 49-54, 70.
- ❖ Βαϊόπουλος, Δ., Σκιάνης, Γ., Νικολακόπουλος, Κ., 2004. «Εργαστηριακές ασκήσεις ψηφιακής επεξεργασίας δεδομένων τηλεανίχνευσης σε συνδυασμό με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών», Αθήνα, σελ. 39, 46-47, 97-98, 141.
- ❖ Βεράνης, Ν., 2010. «Υδρογεωλογική μελέτη υδροφόρων συστημάτων του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας (Ανατολικό τμήμα)», Αδ. μελέτη Ι.Γ.Μ.Ε., Θεσσαλονίκη, σελ. 18-21.
- ❖ Βουβαλίδης, Κ., 2004-2005. «Μαθήματα Φυσικής Γεωγραφίας», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 55, 69-70.
- ❖ Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.) (1983). Τοπογραφικός χάρτης 1:50.000 (φύλλο : Αρναία), Αθήνα.
- ❖ Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.) (1982). Τοπογραφικοί χάρτες 1:50.000 (φύλλα : Βασιλικά, Ζαγκλιβέριον, Πολύγυρος), Αθήνα.
- ❖ Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.) (1980). Τοπογραφικός χάρτης 1:50.000 (φύλλο : Σοχός), Αθήνα.

- ❖ Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.) (1970). Τοπογραφικοί χάρτες 1:50.000 (φύλλα : Θέρμη, Σταυρός), Αθήνα.
- ❖ Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.) (1969). Τοπογραφικός χάρτης 1:50.000 (φύλλο : Σιτοχώριον), Αθήνα.
- ❖ Δαλέζιος, Ν. Ρ., 2002. «Περιβαλλοντική Τηλεπισκόπηση», Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- ❖ Ζεϊμπέκη, Αθ., 2004. «Διαχείριση των υδατικών πόρων της υπολεκάνης Βόλβης», Διατριβή Ειδίκευσης Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- ❖ Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) (1979). Γεωλογικός χάρτης 1:50.000 (φύλλο : Σοχός) (Υπεύθυνος έκδοσης : Δρ. Ν. Αποστολίδης), Αθήνα.
- ❖ Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) (1978). Γεωλογικοί χάρτες 1:50.000 (φύλλα : Αρναία, Βασιλικά, Ζαγκλιβέριον, Θέρμη, Πολύγυρος, Σταυρός) (Υπεύθυνος έκδοσης : Δρ. Γ. Μαχαίρας), Αθήνα.
- ❖ Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) (1970). Γεωλογικός χάρτης 1:50.000 (φύλλο : Σιτοχώριον) (Υπεύθυνος έκδοσης : Ι. Ν. Ζαρνίκος), Αθήνα.
- ❖ Κανελλοπούλου, Δ., 2003. «Τηλεπισκόπηση και Περιβαλλοντική παρακολούθηση μέσω Στρατοσφαιρικών πλατφόρμων», Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., Αθήνα, σελ. 3-4.
- ❖ Κίλιας, Α., 1997. «Εισαγωγή στην Τεκτονική Γεωλογία», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 117-118.
- ❖ Κουτσίνος, Σ., Κολιός, Ν., Αρβανίτης, Α., Κουγκούλης, Χ., 2006. «Ερευνα και εντοπισμός γεωθερμικών πεδίων περιοχής Βόλβης Ν. Θεσσαλονίκης», Ι.Γ.Μ.Ε., Θεσσαλονίκη, σελ. 17, 205.
- ❖ Κουτσόπουλος, Κ., Ανδρουλακάκης, Ν., 2005. «Εφαρμογές του λογισμικού ArcGIS 9x με απλά λόγια», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, σελ. 253.
- ❖ Marathon Data Systems, 2004. «Εισαγωγή στο ArcGIS I», Αθήνα, κεφ. 1, σελ. 1-5.
- ❖ Μουντράκης, Δ., Κίλιας, Α., Παυλίδης, Σ., Σωτηριάδης, Λ., Ψιλοβίκος, Α., Αστάρας, Θ., Βαβλιάκης, Ε., Κουφός, Γ., Δημόπουλος, Γ., Σούλιος, Γ., Χρηστάρας, Β., Σκορδύλης, Μ., Τρανός, Μ., Σπυρόπουλος, Μ., Πάτρας, Δ., Συρίδης, Γ., Λαμπρινός, Ν., Λαγγάλη, Θ., (1996). «Νεοτεκτονικός Χάρτης της

- Ελλάδας κλίμακας 1:100.000 (Φύλλο : Λαγκαδάς)», Ο.Α.Σ.Π., σελ. 31-40, 42-48, 51-56.
- ❖ Μουντράκης, Δ., 1985. «Γεωλογία της Ελλάδας», University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 19, 36-37, 50, 52.
 - ❖ Μουρατίδης, Α., 2010. «Συμβολή της υποστηριζόμενης από GPS και GIS Διαστημικής Τηλεπισκόπησης στη μορφοτεκτονική έρευνα της Κεντρικής Μακεδονίας», Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 55, 64-65, 82-84, 86, 92-94, 101-102, 193-194.
 - ❖ Μπάλλας, Λ., 2007. «Χρήση των ασαφών κανόνων στη διαχείριση υδατικών πόρων-Εφαρμογή στην υδρολογική λεκάνη Βόλβης», Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 174.
 - ❖ Μυλόπουλος, Γ., Τολίκας, Δ., 2002. «Εμπλουτισμός της λίμνης Κορώνειας από τον βαθύ υδροφορέα», Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Θεσσαλονίκης Διεύθυνση Υδάτινων Πόρων & Εγγείων Βελτιώσεων.
 - ❖ Νικολαΐδου, Μ., 2009. «Χρήση της Τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στην καταγραφή των πλημμυρών της ορεινής περιοχής νοτίως της λίμνης Βόλβης. Μία περιβαλλοντική προσέγγιση», Διατριβή Ειδίκευσης Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 48, 51, 54, 56-57, 59, 71.
 - ❖ Παρασχάκης, Ι., Παπαδοπούλου, Μ., Πατίας, Π., 1990. «Αυτοματοποιημένη Χαρτογραφία», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 271.
 - ❖ Παράσχου, Θ., 2005. «Η γεωμορφολογική εξέλιξη της κοιλάδας του Ιναχού ποταμού της Φθιώτιδας, παραπόταμου του Σπερχειού ποταμού», Διατριβή Ειδίκευσης Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 46.
 - ❖ Παυλίδης, Σ., 2003. «Γεωλογία των Σεισμών : Εισαγωγή στη Νεοτεκτονική, Μορφοτεκτονική και Παλαιοσεισμολογία», University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 20, 93-94, 96-97.
 - ❖ Πεχλιβανίδου, Σ., 2007. «Η γεωμορφολογία της νήσου Σκύρου και η επίδρασή της στις χρήσεις γης», Διατριβή Ειδίκευσης Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 55.
 - ❖ Σούλιος, Γ., 1996. «Γενική Υδρογεωλογία», University Studio Press, Θεσσαλονίκη, Τόμος Ι, σελ. 23.
 - ❖ Συλλαίος, Ν., 2000. «Εισαγωγή στην Τηλεπισκόπηση και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών», Τόμος Α, Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, σελ. 205.

- ❖ Σωτηριάδης, Λ. Θ., Ψιλοβίκος, Α. Α., 1984. «Ασκήσεις Γεωμορφολογίας», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 8-10, 22-23.
- ❖ Τσίλιος, Σ., 2008. «Οι τραβερτινικές εμφανίσεις στην κοιλάδα του Αχλαδίτη ποταμού και οι συνθήκες απόθεσής τους (η περίπτωση της τραβερτινικής γέφυρας των 'Ζεστών Νερών' Σιδηροκάστρου)», Διατριβή Ειδίκευσης Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 76-77.
- ❖ Τσίρος, Ε., 2006. «Ο Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI) και οι άλλοι δείκτες στην παρακολούθηση της υδρολογικής ξηρασίας», Διατριβή Ειδίκευσης Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.
- ❖ Φουρνιάδης, Ι., 2002. «Γεωμορφολογική και περιβαλλοντική εξέλιξη της κοιλάδας του Ανθεμούντα, με τη χρήση μεθόδων GIS και Τηλεπισκόπησης» Διατριβή Ειδίκευσης Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 63.
- ❖ Φουρνιάδης Ι., Οικονομίδης, Δ., Αστάρας, Θ., 2002. «Εντοπισμός περιοχών επιδεκτικών σε διάβρωση, με τη βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και της Τηλεπισκόπησης. Ένα παράδειγμα από την υδρογραφική λεκάνη του Ανθεμούντα, Πρακτικά 6^{ου} Πανελλήνιου Γεωγραφικού Συνεδρίου την Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρίας, Θεσσαλονίκη 3-6 Οκτωβρίου 2002, Τόμος II.
- ❖ Ψιλοβίκος, Α., 1977. «Παλαιογεωγραφική εξέλιξις της λεκάνης και της λίμνης της Μυγδονίας (Λαγκαδά-Βόλβης)», Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 1-2, 12-13, 16-17, 20-23, 31, 33-34, 40, 45, 54-55, 63, 72-74, 134, 136.

6.2. Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- ❖ Amri, K., Mahdjoub, Y., Guergour, L., 2011. «Use of Landsat 7 ETM+ for lithological and structural mapping of Wadi Afara Heouine area (Tahifet-Central Hoggan, Alferia)», Arabian Journal of Geoscience, Vol. 4, No. 7-8, p. 1273-1287.
- ❖ Avtar, R., Singh, C. K., Shashtri, S., Singh, A., Mukherjee, S., 2010. «Identification and analysis of groundwater potential zones in Ken-Betwa river linking area using remote sensing and geographic information system», Geocarto International, Vol. 25, No. 5, p. 379-396.
- ❖ Burrough, P. A., 1996. «Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment», Oxford Science Publication, New York, p. 51-52.

- ❖ Burrough, P. A., 1992 «Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment», Clarendon Press, Oxford, p. 194.
- ❖ Burrough, P. A., McDonnell, A., 2000. «Principles of Geographical Information Systems», Oxford University Press, New York, p. 333.
- ❖ Chica-Olmo, M., Abarca, F., Rigol, J. P., 2002. «Development of a Decision Support System based on remote sensing and GIS techniques for gold-rich area identification in SE Spain», International Journal of Remote Sensing, Vol. 23, No. 22, p. 4801-4814.
- ❖ Demek, J., 1972. «Manual of detailed geomorphological mapping», Academia, Prague, p. 344.
- ❖ Dikau, R., 1989. «The application of a digital relief model to landform analysis», Taylor & Francis, London, p. 51-77.
- ❖ ESRI, 2007. ArcGIS User's Manual.
- ❖ Farr, T. G., Kobrick, M., 2000. «Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data», Amer. Geophys. Union Eos, 81, p. 583-585.
- ❖ Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, M. and Alsdorf, D., 2007. «The Shuttle Radar Topography Mission», Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183
- ❖ Gens, R., 1998. «Quality assessment of SAR interferometric data», Doctoral thesis, University of Hanover, Germany, p. 141.
- ❖ Goodchild, M. I., 1985. «Geographical Information Systems in Undergraduate Geography : A Contemporary Dilemma», The Operation Geographer, No. 8, p. 34-38.
- ❖ Gregory, K., Walling, D., 1973. «Drainage basin form and process (A geomorphological approach)», London.
- ❖ Gupta, R. P., 2003. «Remote Sensing Geology, second edition», Springer, Berlin, p. 655.
- ❖ Horton, R., 1945. «Erosional development of streams and their drainage basin : hydrophysical approach to quantitative morphology», Geol. Soc. Amer. Bull., 55, p. 275-370.
- ❖ Howard, A., 1967. «Drainage analysis in geologic interpretation : a summation», Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol. Vol. 51 (11), p. 2246-2259.

- ❖ Jensen, J. R., 1996. «Introductory Digital Image Processing : A Remote Sensing Perspective», Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- ❖ Keller, A. E., Pinter, N., 2002. «Active Tectonics, Earthquakes, Uplifts and Landscape. Second Edition», Prentice-Hall, Inc., New Jersey, p. 122-124, 126-130.
- ❖ Koufos, G., Syrides, G., Kostopoulos, D., Koliadimou, K., 1995. «Preliminary results about the stratigraphy an the palaeoenvironment of Mygdonia basin, Macedonia, Greece», *Geobios*, M. S. 18, p. 243-249.
- ❖ Kusky, M. T., Ramadan, M. T., Hassaan, M. M., Gabr, S., 2011. «Structural and Tectonic Evolution of El-Faiyum Depression, North Western Desert, Egypt based on Analysis of Landsat ETM+, and SRTM data», *Journal of Earth Science*, Vol. 22, No. 1, p. 75-100.
- ❖ Kramer, H. J., 2002. «Observation of the Earth and Its Environment : Syrvey of Missions and Sensors», Springer, Berlin, p. 1510.
- ❖ Massonnet, D., Elachi, C., 2006. «High-resolution land topography», *C. R. Geoscience* 338, (14-15), 1049-1062.
- ❖ Oikonomidis, D., Mouratidis, A., Astaras, T., Niarhos, M., 2010. «Geological Mapping by the Use of Multispectral and Multitemporal Satellite Images, Compared with GIS Geological Data. Case Studies from Macedonia Area, Northern Greece», IOS Press.
- ❖ Pena, A. S., Abdelsalam, G. M., 2006. «Orbital remote sensing for geological mapping in Southern Tunisia : Implication for oil and gas exploration», *Journal of African Earth Science* 44, p. 203-219.
- ❖ Papazachos, B. C., Mountrakis, D., Psilovikos, A., Leventakis, G., 1979. «Surface fault traces and fault plane solutions of the May-June 1978 major shocks in the Thessaloniki area, Greece», *Tectonophysics*, Vol. 53, p. 171-183.
- ❖ Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., Bamler, R., 2003. «The shuttle radar topography mission-a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar», *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57, p. 241-262.
- ❖ Raharimahefa, T., Kusky, M. T., 2009. «Structural and remote sensing analysis of the Betsimisarak Suture in northeastern Madagascar», *Gondwana Research* 15, p. 14-27.
- ❖ Schowengerdt, R. A., 1997. «Remote Sensing Models and Methods for Image Processing, Second Edition», Academic Press, San Diego.

- ❖ Strahler, A. N., 1964. «Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and channel Networks», In CHOW, V. T., (Ed) Handbook of Applied Hydrology, Section 14 : 54, New York.
- ❖ Strahler, A. N., 1957. «Quantitative analysis of watershed geomorphology», Trans. Am. Geo phys. Union, Vol. 38, p. 913-920.
- ❖ Strahler, A. N., 1952. «Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography», Bulletin Geolog. Societ. Americ., 63, p. 1117-1142.
- ❖ Werner, M., 2001. «Shuttle radar topography mission (SRTM), mission overview», Journal of Telecommunication (Frequenz), 55, p. 75-79.

6.3. Ιστολόγιο

- ❖ url1 : <http://geodata.gov.gr>
- ❖ url2 : http://ydronaftes.gr/cms/common/pdf.php?article_id=176