ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΡΑΝΕΣ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΞΑΝΘΗ-ΕΧΙΝΟΣ ΕΛΛΗΝΟΒΟΥΛΓΑΡΙΚΑ ΣΥΝΟΡΑ

ΕΥΣΤΑΘΙΑΔΟΥ ΔΕΣΠΟΙΝΑ

ΑΕΜ:4982

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α.Π.Θ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Π. ΜΑΡΙΝΟΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α.Π.Θ.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2016

5/12/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΡΑΝΕΣ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΞΑΝΘΗ-ΕΧΙΝΟΣ ΕΛΛΗΝΟΒΟΥΛΓΑΡΙΚΑ ΣΥΝΟΡΑ

ΕΥΣΤΑΘΙΑΔΟΥ ΔΕΣΠΟΙΝΑ

ΑΕΜ:4982

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α.Π.Θ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Π. ΜΑΡΙΝΟΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α.Π.Θ.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές της διπλωματικής αυτής εργασίας, τον κύριο Γεώργιο Βαργεμέζη, Αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και τον κύριο Βασίλειο Π. Μαρίνο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου για την ανάθεση του θέματος και τη βοήθεια τους για την ολοκλήρωση της εργασίας. Επίσης τον μεταπτυχιακό φοιτητή Αριστείδη Νιβορλή του μεταπτυχιακού προγράμματος Εφαρμοσμένη Γεωφυσική και Σεισμολογία για τη βοήθειά του στην πραγματοποίηση των μετρήσεων υπαίθρου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την Εγνατία Οδό Α.Ε. για τη διάθεση των στοιχείων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και της οριζοντιογραφίας της ευρύτερης περιοχής.

Περιεχόμενα

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ 6
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ 7
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ 8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 9
ABSTRACT 10
1. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 12
1.1 Γεωτεκτονική θέση 12
1.2 Λιθοστρωματογραφία 13
1.3 Μαγματισμός 14
1.4 Τεκτονική και τεκτοορογενετική εξέλιξη 14
1.4.1 Η μολασσική λεκάνη της Θράκης 16
1.5 Σεισμική επικινδυνότητα περιοχής μελέτης 18
2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ 19
2.1 Γενικά 19
2.2 Ταξινόμηση των κατολισθήσεων 19
2.3 Αίτια εκδήλωσης κατολισθήσεων 22
3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ – ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 25
3.1 Συνοπτική περιγραφή των γεωτρήσεων 27
4. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ 30
4.1 Συνοπτικοί πίνακες των χαρακτηριστικών και των επιτόπου δοκιμών των εδαφικών σχηματισμών 30
4.2 Συνοπτικοί πίνακες της αντοχής της βραχομάζας 31
4.3 Τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των ιγκνιμβριτών 36
5. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ 39
5.1 Γενικά 39
5.2 Επιλογή κατάλληλης γεωφυσικής μεθόδου 40
5.3 Γεωηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης 41
5.3.1 Εισαγωγή 41
5.3.2 Αρχές μεθόδου 42
5.3.3 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης 44
5.3.4 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση 45

5.3.5 Διάταξη ηλεκτροδίων 45
5.3.6. Μέθοδος διδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφία 47
5.4 Ερμηνεία γεωηλεκτρικής τομογραφίας 50
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ 51
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 55
Βιβλιογραφία 57

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Περιοχή μελέτης……. 14

Εικόνα 3.1 Το μέτωπο του υπό μελέτης πρανούς…… 25

Εικόνα 3.2 Υδρογεωλογικός χάρτης ορεινής περιοχής Ν. Ροδόπης, Κλίμακα 1:50.000(μαύρο ορθογώνιο περιοχή μελέτης) …… 26

Εικόνα 3.3 Εστιασμένη η περιοχή μελέτης από το χάρτη της Εικόνας 3.2. Όπου: Ig: Ρυόλιθοι-Ιγκνιμβρίτες και αντίστοιχοι τόφφοi, Ec-m: Μολασσική σειρά (Κοτύλης), cng: Κροκαλοπαγή Τριτογενούς, Ab mr1:Κατώτερη μαρμαροαμφιβολιτική σειρά,mgt:Σειρά γρανιτογνευσίων-μιγματιτών, γ2:μεταγρανοδιορίτης. ..... ….. 26

Εικόνα 3.4 Η περιοχή μελέτης και οι γεωτρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν……. 27

Εικόνα 4.1 Το βασικό διάγραμμα του δείκτη γεωλογικής αντοχής……... 38

Εικόνα 6.1 1ο Μοντέλο ανάλυσης (κόκκινο χρώμα: υλικά κατολίσθησης, πράσινο χρώμα: αποσαθρωμένος ιγκνιμβρίτης, κίτρινο χρώμα: ρυολιθικοί τόφφοι)…… 51

Εικόνα 6.2 2ο Μοντέλο κατολίσθησης όπου ο συντελεστής Ru της πίεσης πόρων ισούται με 0.15……. 53

Εικόνα 6.3 3ο Μοντέλο κατολίσθησης όπου ο συντελεστής Ru της πίεσης πόρων ισούται με 0.20…… 53

Εικόνα 6.4 4ο Μοντέλο κατολίσθησης όπου ο συντελεστής Ru της πίεσης πόρων ισούται με 0.25. Όπως φαίνεται εδώ, ο συντελεστής ασφαλείας είναι οριακός…. 54

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Ιστορικοί σεισμοί στη μάζα της Ροδόπης…….. 18

Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών…….. 20

Πίνακας 2.2 Οι σημαντικοί παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων……..... 23

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής……..... 30

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα δοκιμών πρότυπης διείσδυσης (SPT)……..... 31

Πίνακας 4.3 Ταξινόμηση πετρώματος με βάση το διορθωμένο δείκτη σημειακής φόρτισης $I_{S(50)}$ σε MPa…… 32

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα σημειακής φόρτισης…….. 32

Πίνακας 4.5 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για K=24…….... 34

Πίνακας 4.6 Ποιότητα βραχόμαζας ανάλογα με τις τιμές RQD……. 35

Πίνακας 4.7 Αποτελέσματα RQD…… 35

Πίνακας 5.1 Οι γεωφυσικές μέθοδοι, οι μετρούμενες φυσικές ποσότητες και οι φυσικές ιδιότητες τις οποίες μελετά η κάθε μία……..... 39

Πίνακας 6.1 Συντελεστές ασφαλείας ανά γεωτεχνική ανάλυση…… 52

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ. 1.1 Οι γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος. Με ροζ χρώμα είναι η μάζα της Ροδόπης……..……12

Σχ. 1.2 Τεκτονικό σκαρίφημα της μάζας της Ροδόπης με τις δύο ενότητες: 1. μεταλπικά ιζήματα, 2. ενότητα Παγγαίου, 3. ενότητα Σιδηρόνερου, 4. σχηματισμοί της Περιροδοπικής ζώνης, 5. γραμμή επώθησης…….. 13

Σχ. 1.3 Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της μάζας της Ροδόπης όπου φαίνεται και η μολασσική λεκάνη της Θράκης(Thrase basin)……. 15

Σχ. 1.4 Σχηματική στρωματογραφική στήλη της λεκάνης της Θράκης…….. 16

Σχ. 1.5 Τα τεκτονικά γεγονότα της μολασσικής λεκάνης της Θράκης από το Ηώκαινο μέχρι το Ολιγόκαινο…… 17

Σχ. 1.6 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας…… 18

Σχ. 2.1 Σχέδιο και ονοματολογία μιας περιστροφικής ολίσθησης…….. 21

Σχ. 2.2 Σχηματική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ διατμητικής τάσης(shear force) - διατμητικής αντοχής(shear strength)…… 22

Σχ. 4.1 Ανηγμένος δείκτης σημειακής φόρτισης – Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.. 33

Σχ. 4.2 Ανηγμένος δείκτης σημειακής φόρτισης – Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για ασβεστόλιθους, ψαμμίτες και σκληρές μάργες του Ελληνικού χώρου……. 34

Σχ. 5.1 Βασική διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων για τη λήψη των γεωηλεκτρικών μετρήσεων…… 44

Σχ. 5.2 Οι κυριότερες διατάξεις των ηλεκτροδίων……..... 46

Σχ. 5.3 Η διάταξη δίπολο – δίπολο…… 47

Σχ. 5.4 Ακολουθία μετρήσεων για τη δημιουργία δισδιάστατης τομής…….. 48

Σχ. 5.5 Η δισδιάστατη κατακόρυφη τομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος…….. 49

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση του φαινομένου της κατολίσθησης με τη χρήση γεωηλεκτρικών μεθόδων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου αποτέλεσε σε ένα πρανές οδοποιίας στο κάθετο άξονα Ξάνθη – Εχίνος – Ελληνοβουλγαρικά σύνορα της Εγνατίας Οδού Α.Ε. όπου έχουν εκδηλωθεί κατολισθητικά φαινόμενα.

Στον ευρύτερο χώρο της περιοχής έρευνας απαντούν δύο γεωλογικοί σχηματισμοί της μάζας της Ροδόπης, από κάτω προς τα πάνω είναι η ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά που περιλαμβάνει τους ρυολιθικούς τόφφους και τους ιγκνιμβρίτες και πάνω είναι η μολάσσα της λεκάνης της Θράκης. Προκειμένου να κατανοηθεί το μοντέλο της κατολίσθησης αρχικά αξιολογήθηκαν τα στοιχεία των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που έχουν εκτελεστεί στην ευρύτερη περιοχή. Έγινε ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων από τις επιτόπου και τις εργαστηριακές δοκιμές και με αυτό τον τρόπο καθορίστηκαν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που συμμετείχαν στην ολίσθηση έχοντας υπόψη και τη τεκτονική εξέλιξη της περιοχής. Στη συνέχεια επεξεργάστηκαν οι μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που έγιναν στο ύπαιθρο και δημιουργήθηκε ένα δισδιάστατο μοντέλο, μια γεωηλεκτρική τομή του υπεδάφους. Με βάση τα παραπάνω κατασκευάστηκαν τέσσερα (4) μοντέλα με στόχο την ερμηνεία της κατολίσθησης και την κατανόηση των συνθηκών εκδήλωσής της.

The use of geoelectrical method in engineering geological evaluation of landslides. An application in road cut along the vertical axis Xanthi – Echinos – Greek Bulgarian borders.

ABSTRACT

This thesis is about the engineering geological evaluation of the landslide phenomena using geoelectrical methods, in this case using the electrical resistivity method. The application of this methodology was implement in a road cut, occurred along the vertical axis Xanthi – Echinos – Greek Bulgarian border, where landslide problems have been encountered.

In the wider area of the landslide two geological formations of the Rhodope mass are present, the molasses of the Thrace basin that overly volcanosedimentary series including rhyolite´s tuffs and ignimbrite. Initially the data of boreholes that had been executed in the region was evaluated first in order to understand the model of this landslide. Results from the in situ and laboratory test and field work, were processed in order to determine the engineering geological units of the road cut. In addition, the data from the electrical resistivity method that were measured in situ, were processed and a two dimensional section of the terrain was created. Based on the above work four (4) geotechnical models were created for the evaluation of the engineering geological characteristics and interpretation of this landslide.

© Δέσποινα Ευσταθιάδου, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΡΑΝΕΣ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΞΑΝΘΗ – ΕΧΙΝΟΣ – ΕΛΛΗΝΟΒΟΥΛΓΑΡΙΚΑ ΣΥΝΟΡΑ

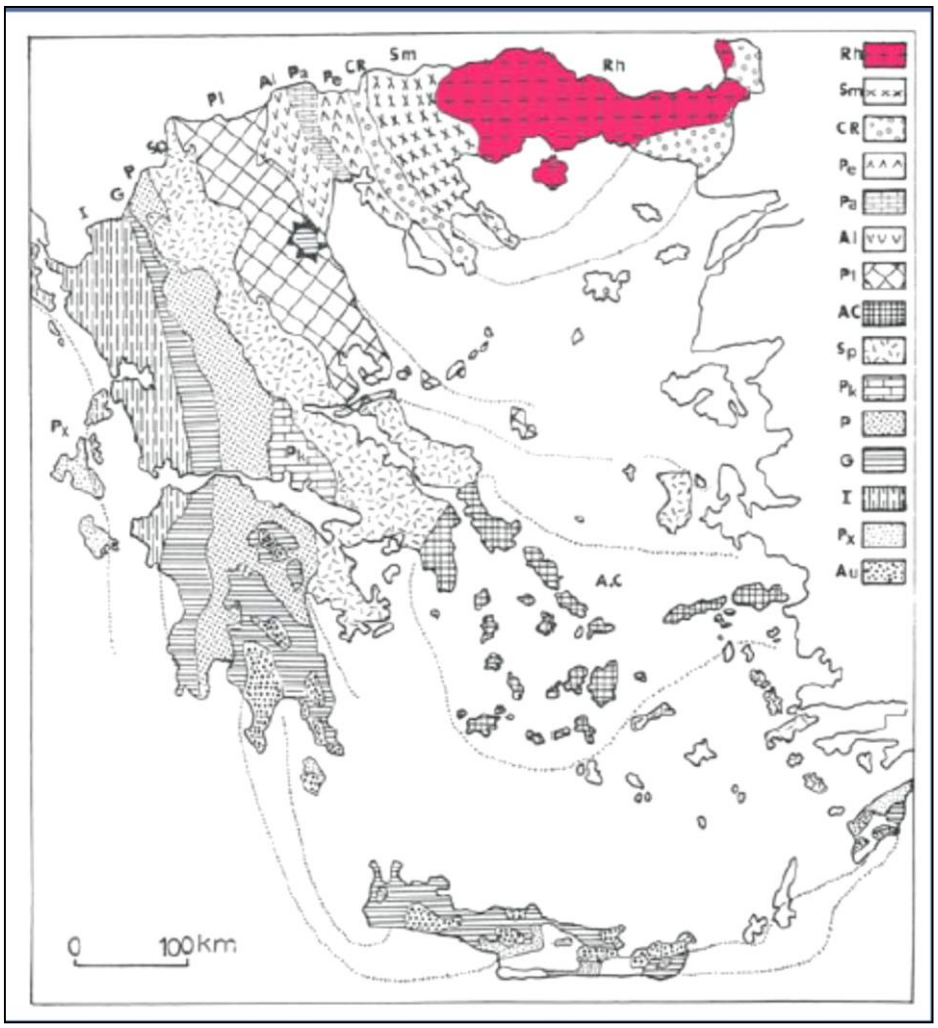
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ

1. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

1.1 Γεωτεκτονική θέση

Η μάζα της Ροδόπης περιλαμβάνει τον ορεινό όγκο της Ροδόπης, τη Θράκη και τη νότια Βουλγαρία, την ανατολική Μακεδονία με δυτικό όριο τη γραμμή του Στρυμόνα ποταμού, καθώς επίσης και τη Θάσο. Γεωτεκτονικά χαρακτηρίζεται ως ηπειρωτικός φλοιός και θεωρείται ότι η προέλευση της είναι είτε από την πλάκα της Ευρασίας είτε από τα Κιμμερικά ηπειρωτικά τεμάχη που αποσπάστηκαν από την Gondwana, κινήθηκαν βορειοανατολικά και ενσωματώθηκαν στην Ευρασία πριν το Άνω Ιουρασικό (Μ.Μουντράκης, 2010).



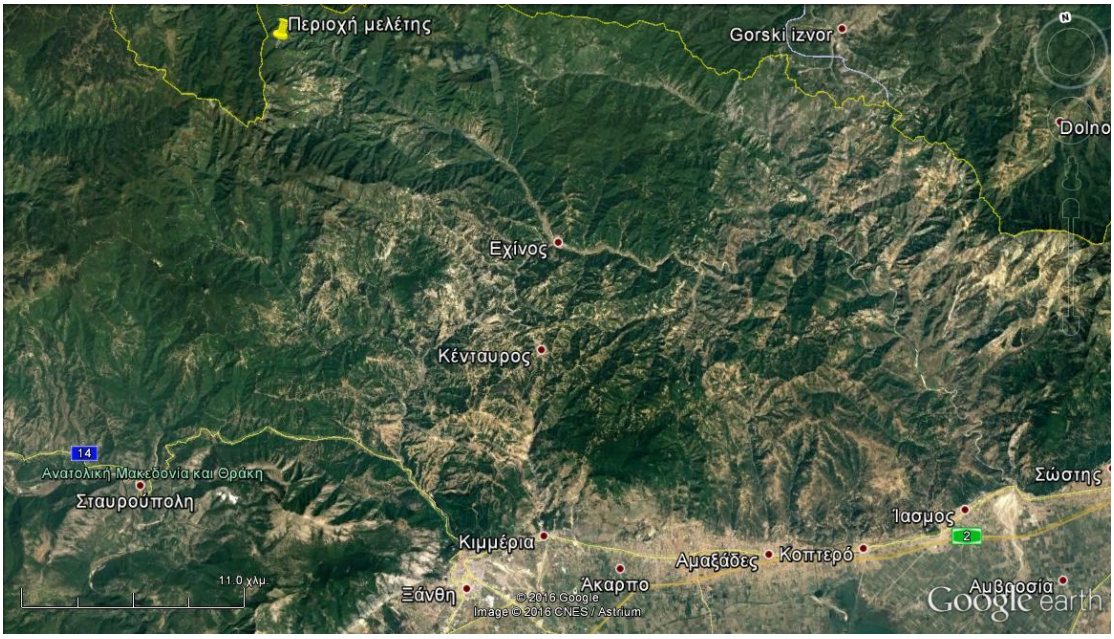
Σχ. 1.1 Οι γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος. Με ροζ χρώμα είναι η μάζα της Ροδόπης

(Μ.Μουντράκης, 2010)

1.2 Λιθοστρωματογραφία

Η μάζα της Ροδόπης αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα. Όσον αναφορά το Ελληνικό μέρος της Ροδόπης χωρίζεται σε δυο τεκτονικές μονάδες, την ανώτερη <<τεκτονική ενότητα του Σιδηρόνερου>> στα βόρεια κατά μήκος των ελληνοβουλγαρικών συνόρων και την κατώτερη <<τεκτονική ενότητα του Παγγαίου>> που καταλαμβάνει τη δυτική, νοτιοδυτική Ροδόπη (Papanikolaou & Panagopoulos 1981). Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη ενότητα του Σιδηρόνερου, η οποία αποτελείται κυρίως από ορθογνεύσιους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, αμφιβολίτες, λεπτές ενστρώσεις μαρμάρων και μιγματίτες. Η ενότητα του Σιδηρόνερου είναι η παλαιότερη ενότητα πετρωμάτων.

Σχ. 1.2 Τεκτονικό σκαρίφημα της μάζας της Ροδόπης με τις δύο ενότητες: 1. μεταλπικά ιζήματα, 2. ενότητα Παγγαίου, 3. ενότητα Σιδηρόνερου, 4. σχηματισμοί της Περιροδοπικής ζώνης, 5. γραμμή επώθησης (μέσα στο μαύρο κύκλο είναι η περιοχή μελέτης) (Δημοσθένης Μ. Μουντράκης 2010)



Εικόνα 1.1 Περιοχή μελέτης (www.google earth.gr)

1.3 Μαγματισμός

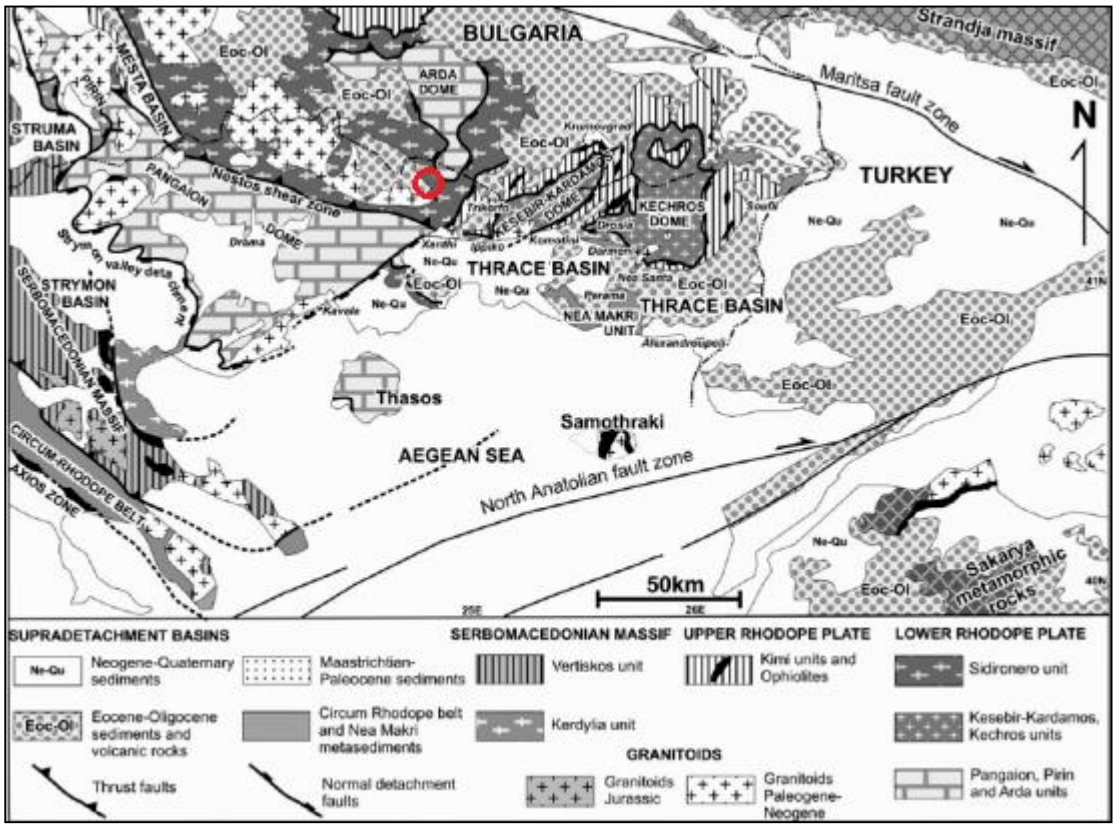
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μάζα της Ροδόπης αποτελείται και από πυριγενή πετρώματα τα οποία διεισδύουν στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο και για αυτό το λόγο σε κάποιες περιοχές εμφανίζονται φαινόμενα μεταμόρφωσης επαφής. Τα πετρώματα αυτά είναι πλουτωνικά και ηφαιστειακά. Όσο αναφορά τα πλουτωνικά είναι κυρίως γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες, χαλαζιακοί μονζονίτες, τοναλίτες και διορίτες. Είναι Τριτογενούς ηλικίας και συνδέονται με την εφελκυστική τεκτονική και συγκεκριμένα με την υποβύθιση της Νέο-Τηθύος κάτω από την Ελληνική ενδοχώρα. Στις παραπάνω συνθήκες δημιουργήθηκαν και τα ηφαιστειακά πετρώματα και έχουν ανάλογη ηλικία. Η σύστασή τους ποικίλλει από βασαλτική έως ρυολιθική.

1.4 Τεκτονική και τεκτοορογενετική εξέλιξη

Η ενότητα του Σιδηρόνερου εφιππεύει την ενότητα του Παγγαίου από την Ξάνθη έως τα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα κατά μήκος της μεγάλης τεκτονικής γραμμής του Νέστου γενικής διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ (περίπου 110^0). Η μάζα της Ροδόπης έχει επηρεαστεί από τις Αλπικές παραμορφώσεις και αυτό επιβεβαιώνεται

από την ύπαρξη πτυχώσεων. Οι πτυχώσεις αυτές κατατάσσονται σε τρεις φάσεις ανάλογα με το είδος της πτύχωσης.

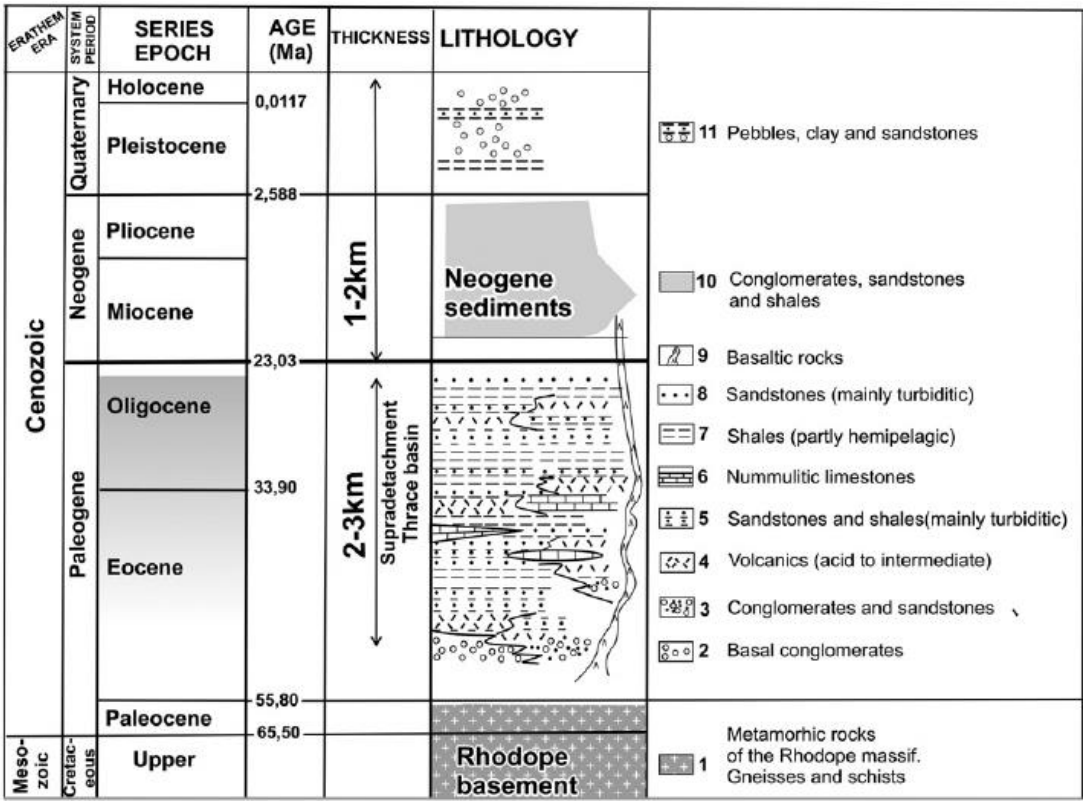
Κατά το Νεότερο Τριτογενές λόγω της δράσης εφελκυσμού σχηματίστηκαν ρήγματα αποκόλλησης μικρής γωνίας, συνοδευόμενα από ισχυρές διατμητικές κινήσεις προς τα κάτω που προκάλεσαν την κατάρρευση της διογκωμένης συμπιεσμένης μάζας των τεκτονικών καλυμμάτων και λεπιών. Σε αυτές τις κινήσεις κατάρρευσης οφείλεται και η μεγάλη προς τα ΝΔ κατάρρευση των βαθύτερων μεταμορφικών οριζόντων της ενότητας Σιδηρόνερου και η αποκάλυψη της ενότητας του Παγγαίου. Παράλληλα με την εκταφή του Παγγαίου στο Μειόκαινο διείσδυσαν γρανιτικά μάγματα που έδωσαν τους γρανίτες της Βροντούς, του Συμβόλου, του Παγγαίου κ.ά. και γενικά ευνοήθηκε η ηφαιστειότητα στην περιοχή. Επιπλέον, η δράση της εφελκυστικής τεκτονικής είχε σαν αποτέλεσμα και τη δημιουργία μεγάλων ρηξιγενών λεκανών στη μάζα της Ροδόπης και συγκεκριμένα δημιουργήθηκε η μολασσική λεκάνη της Θράκης.



Σχ. 1.3 Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της μάζας της Ροδόπης όπου φαίνεται και η μολασσική λεκάνη της Θράκης (Thrase basin) (μέσα στο κόκκινο κύκλο είναι η περιοχή μελέτης) (Kilias A., 2012)

1.4.1 Η μολασσική λεκάνη της Θράκης

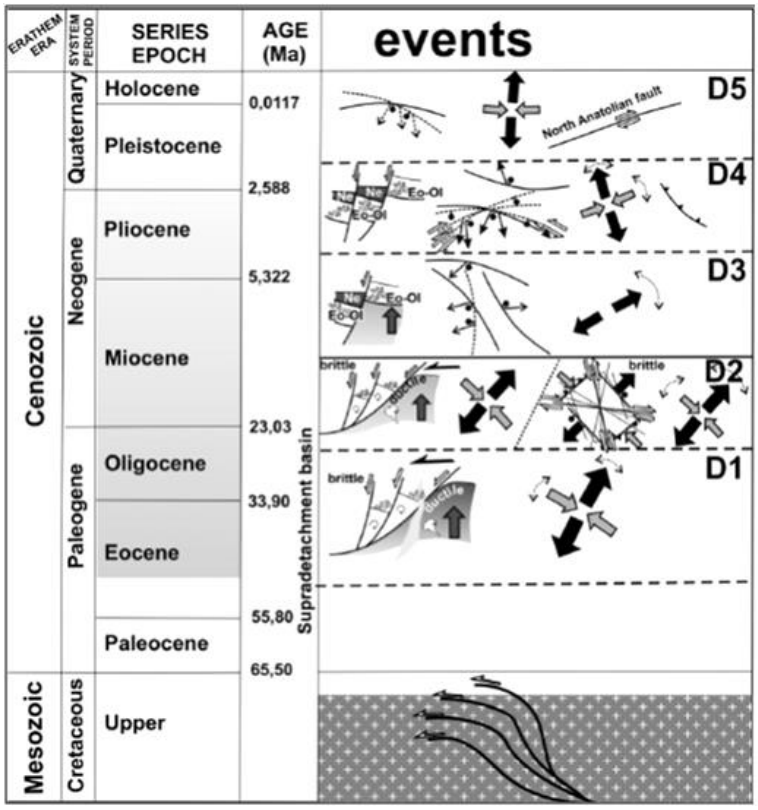
Γενικά, η μολασσική λεκάνη της Θράκης χαρακτηρίζεται από μία παχιά μολασσικού τύπου ιζηματογενή ακολουθία πάχους 3-5 χλμ. Τριτογενούς ηλικίας που καλύπτεται ασύμφωνα από Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα. Η ιζηματογένεση αυτή ξεκινάει στο Μέσο με Άνω Ηώκαινο και σταματάει στο Άνω Ολιγόκαινο (Kilias A., 2012). Τα ιζήματα του Παλαιογενούς συνοδεύονται από ένα ασβεσταλκαλικής και τοπικά σωσωνιτικής σύστασης μαγματισμό ο οποίος έχει ηλικία Μέσο με Άνω Ηώκαινο. Πρόκειται για μία πολύπλοκη στρωματογραφική ακολουθία η οποία αποτελείται από κροκαλοπαγή, λατυποπαγή, ψαμμίτες, νουμουλιτοφόρους ασβεστόλιθους, τουρβιδιτικά στρώματα και σχιστόλιθους. Πάνω από αυτά έχει αποτεθεί ασύμφωνα κατά το Νεογενές ένα λεπτό στρώμα που αποτελείται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτη και ιλυόλιθο. Τέλος, κατά το τεταρτογενές αποτέθηκαν χαλίκια, πηλός και άμμος.



Σχ. 1.4 Σχηματική στρωματογραφική στήλη της λεκάνης της Θράκης (Kilias A., 2012)

Όσο αναφορά την τεκτονική της εξέλιξη η μολασσική λεκάνη της Θράκης αναπτύχθηκε ως μία Παλαιογενής λεκάνη πάνω σε ρήγμα διαφυγής και στις

γεωλογικές ενότητες των εσωτερικών Ελληνίδων κατά τη διάρκεια της Ηωκαινικής-Ολιγοκαινικής έκτασης των εσωτερικών Ελληνίδων (Kilias A., 2012). Η επέκταση στη λεκάνη είχε διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και εξελίχθηκε κατά τη διάρκεια του Μέσου με Άνω Ηωκαίνου. Λόγω του ρήγματος διαφυγής (D1 τεκτονικό γεγονός) δημιουργήθηκε η λεκάνη αυτή (supradetchment λεκάνη). Η παραμόρφωση συνεχίστηκε κατά τη διάρκεια Ολιγοκαίνου - Μειοκαίνου με ταυτόχρονη δράση strike-slip και κανονικών ρηγμάτων και τη δημιουργία πτυχών (D2 τεκτονικό γεγονός). Η έκταση στη περιοχή είχε κυρίως διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ ενώ η συμπίεση ΒΔ-ΝΑ. Κατά το Μειόκαινο - Πλειόκαινο, μεγάλης γωνίας κανονικά ρήγματα έδρασαν στην περιοχή τα οποία συνδέονται με την ΒΑ-ΝΔ έκταση (D3 τεκτονικό γεγονός) και λόγω των ρηγμάτων αυτών δημιουργήθηκαν στην περιοχή διάφορες υπο-λεκάνες. Στο Πλειόκαινο έδρασαν κανονικά ρήγματα με τοπικά πλάγιες δομές διεύθυνσης επέκτασης ΒΒΔ-ΝΝΑ με ΒΒΑ-ΝΝΔ και συμπίεσης ΑΒΑ-ΔΝΔ (D4 τεκτονικό γεγονός). Μερικά από τα κανονικά αυτά ρήγματα παραμένουν ενεργά μέχρι σήμερα (D5 τεκτονικό γεγονός) και συμπίπτουν με τη γενικότερη ενεργή τεκτονική δυναμική της ευρύτερης μάζας της Ροδόπης.



Σχ. 1.5 Τα τεκτονικά γεγονότα της μολασσικής λεκάνης της Θράκης από το Ηώκαινο μέχρι το Ολιγόκαινο (Kilias A., 2012)

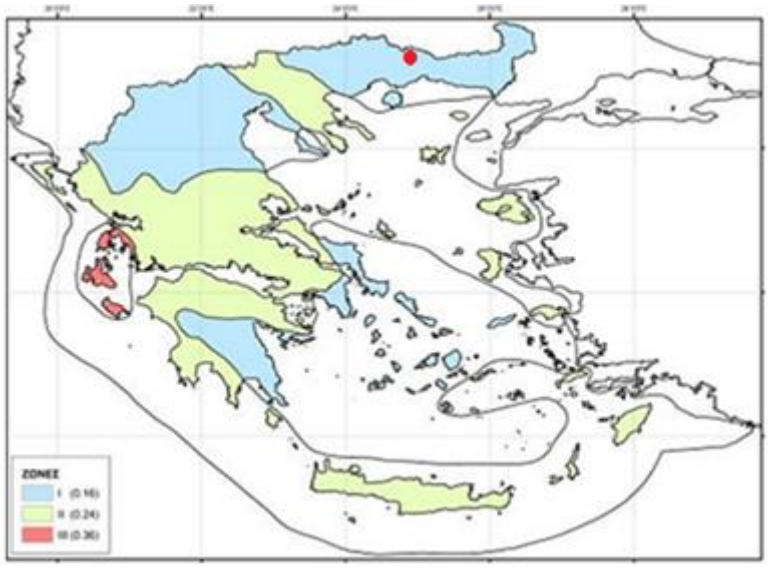
1.5 Σεισμική επικινδυνότητα περιοχής μελέτης

Γενικά, η πλειονότητα των σεισμών στη μάζα της Ροδόπης δε ξεπερνά το μέγεθος M=4, με εξαίρεση κάποιους ιστορικούς σεισμούς.

Πίνακας 1.1 Ιστορικοί σεισμοί στη μάζα της Ροδόπης (Παπαζάχος and Παπαζάχου, 2003)

Χρονολογία	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος	Τοποθεσία	Μέγεθος(M)
52	40.8° N	24.2°	Φίλιπποι	6
926	40.8° N	27.3°	Θράκη	6.6
1752	41.31° N	26.51°	Α. Θράκη	7.4
1784	41.1° N	25.5°	Κομοτηνή	6.7
1829	41.1° N	24.2°	Δράμα	7.3
1864	40.3° N	25.0°	Ξάνθη	7.3
1867	41.1° N	24.2°	Δράμα	6

Ο Ελληνικός χώρος υποδιαιρείται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας με αντίστοιχες τιμές ενεργών εδαφικών επιταχύνσεων σχεδιασμού 0.16g για την πρώτη ζώνη, 0.24g για τη δεύτερη ζώνη και 0.36g για τη τρίτη ζώνη. Με βάση το παρακάτω χάρτη η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη ζώνη Ι.



Σχ. 1.6 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (η κόκκινη βούλα είναι η περιοχή μελέτης) (www.oasp.gr)

2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

2.1 Γενικά

Ο Varnes (1978) ορίζει τις κατολισθήσεις ως μετακινήσεις μαζών στις οποίες περιλαμβάνεται κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση ,ανατροπή, ροή και ερπυσμό. Ο όρος μετακίνηση μαζών χρησιμοποιείται για να περιγράψει όλες τις βαρυτικές μετακινήσεις αποσαθρωμένων πετρωμάτων προς τα κατάντη ενός πρανούς. Επομένως οι καθιζήσεις, οι χιονοστιβάδες καθώς και οι μετακινήσεις πάγου δεν θεωρούνται κατολισθητικά φαινόμενα.

2.2 Ταξινόμηση των κατολισθήσεων

Ο Varnes(1978) πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης των κατολισθήσεων που περιλαμβάνει όλες τις εδαφικές μετακινήσεις πλην των καθιζήσεων. Η ταξινόμηση αυτή βασίζεται σε δύο κριτήρια:

- Τον τύπο μετακίνησης που διακρίνεται σε καταπτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές εξαπλώσεις και ροές καθώς και τη σύνθεση των παραπάνω τύπων.
- Το είδος του μετακινούμενου υλικού, γίνεται η διάκριση του βραχώδες υπόβαθρου και των εδαφικών σχηματισμών (κορήματα και γαίες).

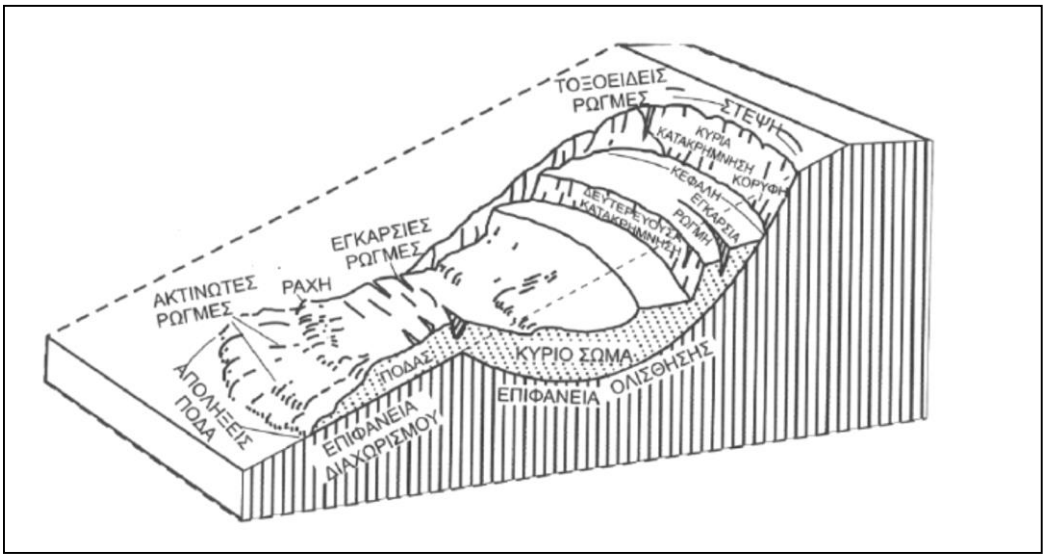
Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών (κατά Varnes 1978)

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">Τύπος κίνησης</td><td colspan="3">Τύπος μετακινούμενου υλικού</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Βραχώδες υπόβαθρο</td><td colspan="2">Μηχανικά εδάφη</td></tr>
<tr><td>Χονδρόκοκκα</td><td>Λεπτόκοκκα</td></tr>
<tr><td colspan="2">Κατάπτωση</td><td>Κατάπτωση βράχων</td><td>Κατάπτωση κορημάτων</td><td>Κατάπτωση γαιών</td></tr>
<tr><td colspan="2">Ανατροπή</td><td>Ανατροπή βράχων</td><td>Ανατροπή κορημάτων</td><td>Ανατροπή γαιών</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ολίσθηση</td><td>Περιστροφική</td><td>Περιστροφική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου</td><td>Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων</td><td>Περιστροφική ολίσθηση γαιών</td></tr>
<tr><td>Μεταθετική</td><td>Μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου</td><td>Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων</td><td>Μεταθετική ολίσθηση γαιών</td></tr>
<tr><td colspan="2">Πλευρική εξάπλωση</td><td>Πλευρική εξάπλωση βραχώδους υποβάθρου</td><td>Πλευρική εξάπλωση κορημάτων</td><td>Πλευρική εξάπλωση γαιών</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Ροή</td><td rowspan="2">Ροή βραχώδους υποβάθρου(ερπυσμός)</td><td>Ροή κορημάτων</td><td>Ροή γαιών</td></tr>
<tr><td colspan="2">(ερπυσμός εδάφους)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Σύνθετη</td><td colspan="3">Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων</td></tr>
</table>

Η κατολίσθηση που μελετάμε είναι μία περιστροφική ολίσθηση. Τα χαρακτηριστικά μιας περιστροφικής ολίσθησης είναι τα εξής (Κούκης and Σαμπατακάκης, 2007):

- Στέψη: Το ανώτερο σταθερό τμήμα του φυσικού εδάφους, το πλησιέστερο προς την κύρια κατακρήμνιση.
- Κύρια κατακρήμνιση: Απότομο βύθισμα της επιφάνειας του φυσικού εδάφους στο ανώτερο τμήμα της ολίσθησης(στέψη), που προκλήθηκε από την κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας.
- Κορυφή: Το υψηλότερο σημείο επαφής της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.

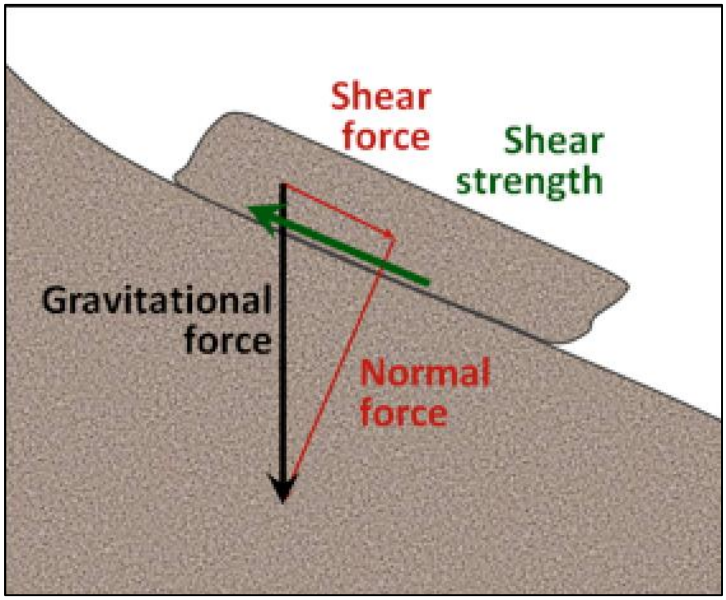
- Κεφαλή: Τα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης κατά μήκος της επαφής της μετακινούμενης μάζας και της κύριας κατακρήμνισης.
- Δευτερεύουσα κατακρήμνιση: Δευτερεύουσα επιφάνεια θραύσης της μετακινούμενης μάζας που έχει προέλθει από διαφορικές μετακινήσεις της μάζας αυτής.
- Κύριο σώμα: Το τμήμα της μετακινούμενης μάζας που υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης, μεταξύ της κύριας κατακρήμνισης και της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης.
- Πόδας: Το τμήμα της κατολίσθησης που έχει κινηθεί πέραν της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης και το οποίο υπέρκειται της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.
- Απόληξη: Το κατώτερο, συνήθως κυρτό όριο της μετακινούμενης μάζας. Απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση από την κορυφή της κατολίσθησης.
- Επιφάνεια ολίσθησης: Η επιφάνεια που αποτελεί επέκταση της κύριας κατακρήμνισης κάτω από τη μετακινούμενη μάζα της κατολίσθησης, πάνω στην οποία έγινε η ολίσθηση.
- Επιφάνεια διαχωρισμού: Το τμήμα της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους που καλύπτεται από τον πόδα της κατολίσθησης.



Σχ. 2.1 Σχέδιο και ονοματολογία μιας περιστροφικής ολίσθησης (Varnes 1978)

2.3 Αίτια εκδήλωσης κατολισθήσεων

Σε κάθε πρανές υπάρχουν δυνάμεις οι οποίες συγκρατούν την ολίσθηση και δυνάμεις αντίθετες οι οποίες ωθούν σε ολίσθηση. Η δύναμη που ωθεί την ολίσθηση είναι η διατμητική τάση και η δύναμη που συγκρατεί είναι η διατμητική αντοχή. Οι δυνάμεις αυτές είναι αντίρροπες μεταξύ τους και προέρχονται από την ανάλυση της δύναμης του βάρους, η μία είναι παράλληλη στο πρανές (διατμητική τάση) και η άλλη είναι κάθετη στο πρανές (ορθή τάση). Η ορθή τάση θα κινούσε το πρανές προς τα κάτω εάν δεν αντιστεκόταν αυτό με την εσωτερική αντοχή του, δηλαδή με την διατμητική αντοχή η οποία καθορίζεται από τη τριβή και τη συνεκτικότητα των επιμέρους τεμαχών του βράχου ή του αποσαθρωμένου μανδύα.



Σχ. 2.2 Σχηματική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ διατμητικής τάσης(shear force) - διατμητικής αντοχής(shear strength)

Τα αίτια λοιπόν των κατολισθήσεων με βάση τον Terzaghi (1950) μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες στα εξωγενή τα οποία προκαλούν αύξηση της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης στο πρανές και στα ενδογενή που προκαλούν μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού. Επίσης, ο Varnes (1978) τόνισε ότι υπάρχουν παράγοντες που συμβάλλουν στην αύξηση της διατμητικής τάσης, παράγοντες που συμβάλλουν στη πιθανή χαμηλή διατμητική αντοχή του υλικού και τέλος παράγοντες που βοηθούν στη μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού. Σαφώς υπάρχουν αιτίες οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν ταυτόχρονα και τη

διατμητική αντοχή και τη διατμητική τάση του πετρώματος. Μερικοί από τους παράγοντες επιδρούν για μεγάλο χρονικό διάστημα ενώ άλλοι περιοδικά. Οι τελευταίοι αποτελούν το έναυσμα της μετακίνησης. Για τη ταξινόμηση, λοιπόν, των παραγόντων η Ομάδα Εργασίας της UNESCO (Working Party on World Landslide Inventory WP/WLI 1994) πρότεινε μία γενικότερη ταξινόμηση των αιτιών εκδήλωσης των κατολισθήσεων. Η ταξινόμηση αυτή υποδιαιρεί τους παράγοντες με βάση την προέλευσή τους στους παράγοντες που αναφέρονται στις εδαφικές συνθήκες, στις γεωμορφολογικές διεργασίες, στις φυσικές διεργασίες και στις ανθρώπινες διεργασίες.

Πίνακας 2.2 Οι σημαντικοί παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων (WP/WLI 1994)

ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
1	Πλαστικό χαμηλής αντοχής υλικό
2	Ευαίσθητο υλικό
3	Υλικό επιρρεπές σε θραύση
4	Αποσαθρωμένο υλικό
5	Διατμημένο υλικό
6	Ρωγματωμένο ή διακλασμένο υλικό
7	Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών(στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις)
8	Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών(ρήγματα, επιφάνειες επαφής, ασυμφωνίες)
9	Διαφοροποιήσεις στην υδροπερατότητα
10	Διαφοροποιήσεις στη δυσκαμψία(στιφρό ή πυκνό υλικό υπερκείμενο πλαστικού υλικού)
ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Τεκτονική ανύψωση
2	Ανύψωση λόγω ηφαιστείων
3	Επίδραση παγετώνων
4	Ποτάμια διάβρωση της βάσης του πρανούς
5	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρανούς
6	Διάβρωση της βάσης του πρανούς από παγετώνα
7	Διάβρωση των πλευρών του πρανούς
8	Εσωτερική διάβρωση
9	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέψη του πρανούς
10	Απομάκρυνση φυτοκάλυψης(από πυρκαγιά, διάβρωση κλπ.)

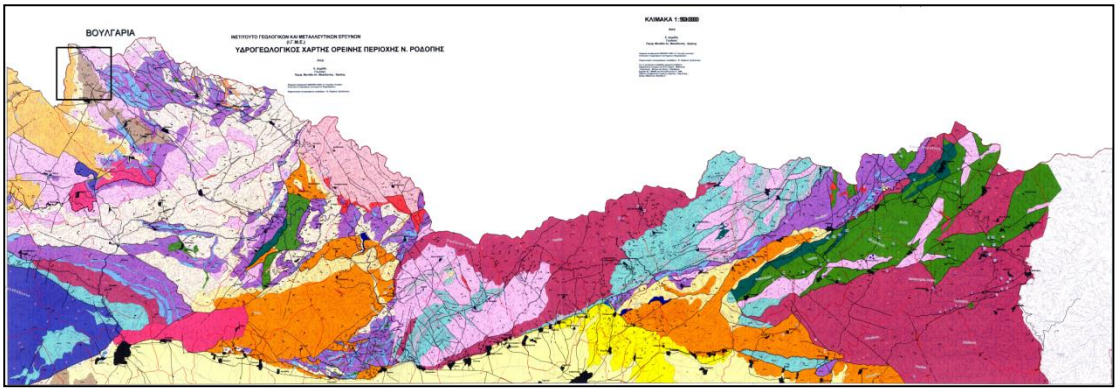
ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Έντονη, μικρής διάρκειας βροχόπτωση
2	Γρήγορο λιώσιμο χιονιού
3	Παρατεταμένη υψηλή βροχόπτωση
4	Γρήγορη πτώση στάθμης νερού μετά από πλημμύρες, παλίρροιες ή διάρρηξη φυσικών φραγμάτων
5	Σεισμοί
6	Εκρήξεις ηφαιστείων
7	Διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστείων
8	Λιώσιμο παγωμένου εδάφους
9	Αποσάθρωση λόγω παγετού
10	Αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών
ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
1	Εκσκαφές στη βάση (πόδι) του πρανούς
2	Φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω από τη στέψη του πρανούς
3	Υποβιβασμός της στάθμης σε ταμιευτήρες
4	Άρδευση
5	Κακή συντήρηση αποστραγγιστικών έργων
6	Διαρροή νερών από τεχνικά έργα (δίκτυα, δεξαμενές, κ.λπ.)
7	Αποψίλωση
8	Λατομεία και μεταλλεία
9	Δημιουργία χωματερών
10	Τεχνητές δονήσεις (κυκλοφορία οχημάτων, λειτουργία μηχανών, τοποθέτηση πασσάλων κ.λπ.)

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ – ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

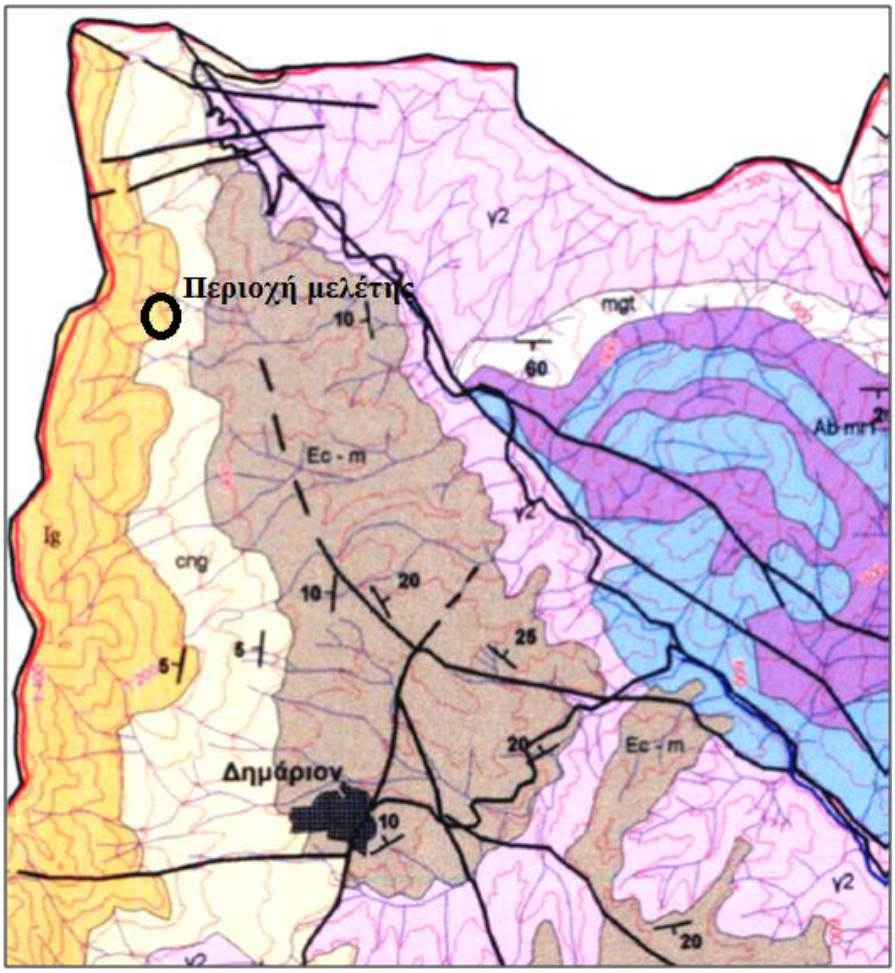
Με βάση τον υδρογεωλογικό χάρτη ορεινής περιοχής Ν. Ροδόπης του Ι.Γ.Μ.Ε. (Ε.Δημάκης 1986/89) καθώς και την υπαίθρια παρατήρηση εντοπίζεται ο παρακάτω σχηματισμός :

Ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά. Στα ανώτερα μέρη αποτελείται από ιγκνιμβρίτες-ρυόλιθους (Ig) στη ΒΔ περιοχή(Πάχνη) και ανδεσίτες-ιγκνιμβρίτες (Ad-Ig) στη ΒΑ(Καλότυχο). Στη περιοχή μελέτης εμφανίζεται μόνο ιγκνιμβρίτης σε κοντινές αποστάσεις όμως εντοπίζονται και φλέβες ρυόλιθου μέσα στον ιγκνιμβρίτη. Πρόκειται για ηφαιστειακούς σχηματισμούς με χαρακτηριστικό πορφυριτικό ιστό. Έχουν κυρίως κιτρινόλευκο χρώμα και τα υλικά που παρατηρήσαμε δεν είχαν κάποια συνεκτικότητα, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 3.1* πρόκειται για χαλαρά υλικά τα οποία περιέχουν τεμάχη ιγκνιμβρίτη.

Εικόνα 3.1 Το μέτωπο του υπό μελέτης πρανούς, πρόκειται για υλικά κατολίσθησης



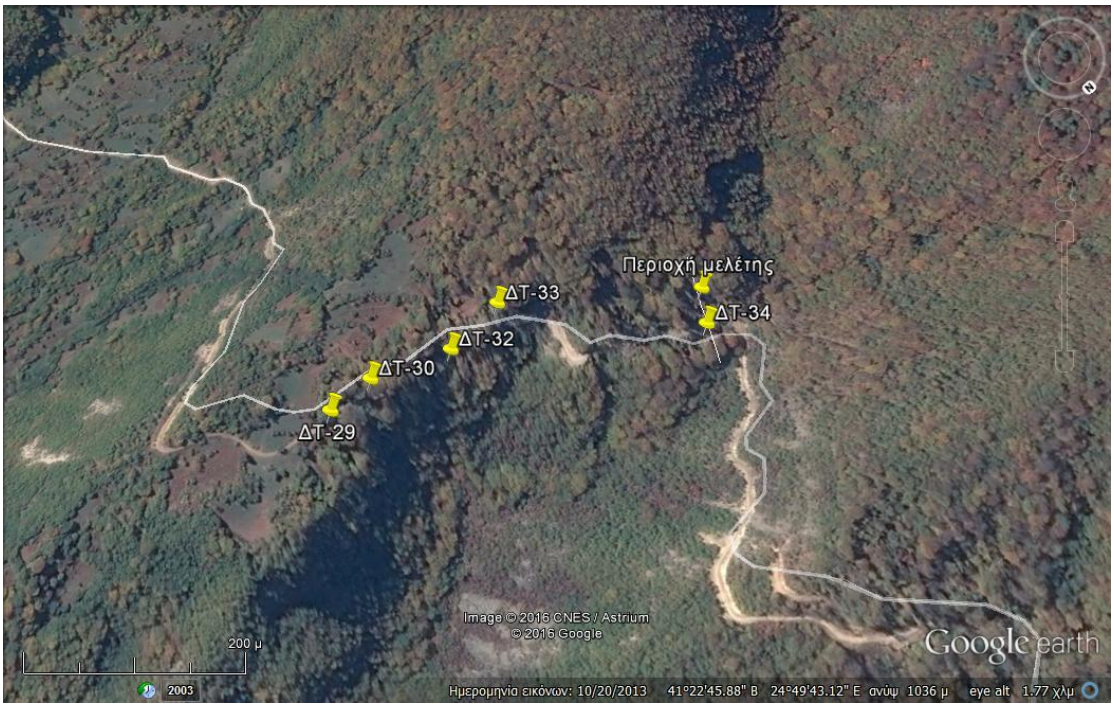
Εικόνα 3.2 Υδρογεωλογικός χάρτης ορεινής περιοχής Ν. Ροδόπης, Κλίμακα 1:50.000(μαύρο ορθογώνιο περιοχή μελέτης) (Ι.Γ.Μ.Ε., 1986/89)



Εικόνα 3.3 Εστιασμένη η περιοχή μελέτης από το χάρτη της Εικόνας 3.2. Όπου: Ig: Ρυόλιθοι-Ιγκνιμβρίτες και αντίστοιχοι τόφφοι, Ec-m: Μολασσική σειρά (Κοτύλης), cng: Κροκαλοπαγή Τριτογενούς, Ab mr1:Κατώτερη μαρμαροαμφιβολιτική σειρά,mgt:Σειρά γρανιτογνευσίων-μιγματιτών, γ2:μεταγρανοδιορίτης. (Ι.Γ.Μ.Ε., 1986/89)

3.1 Συνοπτική περιγραφή των γεωτρήσεων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά και συγκεντρωτικά κάποια δεδομένα από τα μητρώα των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή . Η περιοχή μελέτης έχει μελετηθεί από την Εγνατία Οδό Α.Ε. διότι θα αποτελέσει τμήμα του κάθετου άξονα 70 της Εγνατίας Οδού Α.Ε., Ξάνθη – Εχίνος – Ελληνοβουλγαρικά σύνορα. .Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από πέντε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις ΔΤ – 29, ΔΤ – 30, ΔΤ – 32, ΔΤ – 33 και ΔΤ – 34 (*Εικόνα 3.4*).



Εικόνα 3.4 Η περιοχή μελέτης και οι γεωτρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν (www.google earth.gr)

Στη γεώτρηση ΔΤ – 29 όπου φτάνει σε βάθος 23,30μ., από την επιφάνεια μέχρι το βάθος των 7,45μ. εντοπίζεται καστανού – υποκαστανού χρώματος αργιλώδης άμμος με χαλίκια, από τα 7,45μ. μέχρι τα 9,20μ. προϊόντα αποσάθρωσης του ιγκνιμβρίτη σκούρου γκρίζου χρώματος αργιλώδης άμμος με χαλίκια, από τα 9,20μ. μέχρι τα 13,30μ. καστανού χρώματος εντελώς αποσαθρωμένος ιγκνιμβρίτης, από τα 13,30μ. μέχρι τα 15,10μ. καστανού χρώματος αργιλώδης άμμος με χαλίκια

που αποτελεί προϊόν αποσάθρωσης, από τα 15,10μ. μέχρι τα 20,00μ. καστανού χρώματος υγιής ιγκνιμβρίτης και τέλος από τα 20,00μ. μέχρι τα 23,30μ. λευκού χρώματος υγιής ιγκνιμβρίτης.

Στη γεώτρηση ΔΤ – 30 όπου φτάνει σε βάθος 10,00μ., από την επιφάνεια μέχρι το βάθος των 2,05μ. εντοπίζεται σκούρου έως ανοιχτού καστανού χρώματος ιλυώδης άμμος με χαλίκια και από τα 2,05μ. μέχρι τα 10,00μ. υγιής ανοικτοκάστανου ιγκνιμβρίτης με φλέβες ρυόλιθου .

Στη γεώτρηση ΔΤ – 32 όπου φτάνει σε βάθος 10,00μ., από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τα 1,50μ. εντοπίζονται ηφαιστειακής σύστασης ανοικτοκάστανου χρώματος αργιλώδεις χάλικες με λίγη άμμο και από τα 1,50μ. μέχρι τα 10,00μ. υγιής ιγκνιμβρίτες καστανού έως γκρίζου χρώματος.

Στη γεώτρηση ΔΤ – 33 όπου φτάνει σε βάθος 10,00μ., από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τα 3,00μ. εντοπίζονται ανοικτοκάστανου χρώματος αργιλώδεις χάλικες με λίγη άμμο και από τα 3,00μ. μέχρι τα 10,00μ. υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος ιγκνιμβρίτης καστανού έως γκρίζου χρώματος.

Στη γεώτρηση ΔΤ – 34 όπου φτάνει σε βάθος 18,00μ., από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τα 3,50μ. εντοπίζεται ανοικτοκάστανου χρώματος αμμώδης άργιλος, από τα 3,50μ. μέχρι τα 5,30μ. ανοικτοκάστανου χρώματος χάλικες κακής διαβάθμισης καθώς και τέμαχος ιγκνιμβρίτη (3,50μ.-3,80μ), από τα 5,30μ. μέχρι τα 11,00μ. προϊόντα αποσάθρωσης του ιγκνιμβρίτη καστανού χρώματος αργιλώδης άμμος με χαλίκια και τέλος από τα 11,00μ. μέχρι τα 18,00μ. υγιής γκριζοκάστανος έως γκρίζου χρώματος ιγκνιμβρίτης.

Συνεπώς, οι γεωλογικοί σχηματισμοί με βάση τα δεδομένα των γεωτρήσεων χωρίζονται σε τρεις ενότητες:

ΕΝΟΤΗΤΑ 1

- Υλικά παλιών κατολισθήσεων

  Συνίσταται από ανοικτοκάστανου χρώματος αμμώδη άργιλο καθώς και παρόμοιου χρώματος χάλικες κακής διαβάθμισης. Προέρχονται αρχικά από την αποσάθρωση του ιγκνιμβρίτη και των ρυολιθικών τόφφων.

ΕΝΟΤΗΤΑ 2

- Κορήματα

  Τα υλικά αυτά προέρχονται κυρίως από την αποσάθρωση του ιγκνιμβρίτη. Αποτελούνται από αργιλώδη άμμο με χαλίκια, ενώ το χρώματος τους είναι ανοικτό κάστανο έως σκούρο γκρίζο.

ΕΝΟΤΗΤΑ 3

- Ρυολιθικοί τόφφοι – Ιγκνιμβρίτης

  Το χρώμα του σχηματισμού ποικίλλει.

4. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

4.1 Συνοπτικοί πίνακες των χαρακτηριστικών και των επιτόπου δοκιμών των εδαφικών σχηματισμών

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται σε συνοπτικούς πίνακες τα αποτελέσματα των επιτόπου και των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις για τους εδαφικούς σχηματισμούς.

Στο *Πίνακα 4.1* δίνονται τα αποτελέσματα όσο αναφορά την κοκκομετρική ανάλυση των εδαφικών σχηματισμών παρατηρείται ότι επικρατούν οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί (άργιλος και ιλύς) και είναι αναμενόμενο διότι οι άργιλος αποτελεί προϊόν αποσάθρωσης των αστρίων οι οποίοι αποτελούν βασικό συστατικό των ιγκνιμβριτών και των ρυολιθικών τόφφων.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ(m)	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ			ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑ U.S.C.S.
		Χάλικες(%)	Άμμος(%)	Λεπτόκοκκα(%)	
ΔΤ – 29	2 – 2,4	8	48	44	SC
	4,8 – 5	37	44	19	SC
	7,45 – 8	17	40	43	SC
	14 – 14,8	24	57	19	SC
ΔΤ – 30	0,8 – 1	16	42	42	SM
ΔΤ – 32	0,8 – 1	52	24	24	GC
ΔΤ – 33	2 – 2,5	48	32	20	GC
	2,7 – 3	46	31	23	GC
ΔΤ – 34	2 – 2,3	12	37	51	CL
	4 – 4,4	85	12	3	GP
	7 – 7,1	19	49	32	SC
	9 – 9,4	20	43	37	SC

Επεξήγηση των συμβολισμών του *Πίνακα 4.1* σύμφωνα με το σύστημα USCS/ASTM:

GP: Χαλίκι κακής διαβάθμισης με μίγμα άμμου χαλικιού. Λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.

GC: Ιλυώδης άργιλος, μίγμα χαλικιών, άμμου και αργίλου.

SM: Ιλυώδης άμμος.

SC: Αργιλώδης άμμος.

CL: Ανόργανη άργιλος μικρής ή μέσης πλαστικότητας, χαλικώδης άργιλος, αμμώδης άργιλος, ιλυώδης άργιλος, ισχνή άργιλος.

Η επιτόπου δοκιμή που πραγματοποιήθηκε είναι η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης SPT. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής (*Πίνακας 4.2*) οι εδαφικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως χαλαροί έως μέτρια πυκνοί στα υλικά των παλιών κατολισθήσεων. Ενώ εντοπίζονται και ζώνες πολύ πυκνές όσο πλησιάζουμε τον υγιή ιγκνιμβρίτη και τους τόφφους.

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα δοκιμών πρότυπης διείσδυσης (SPT)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ(m)	ΚΡΟΥΣΕΙΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΡΟΥΣΕΩΝ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
ΔΤ – 29	1,5	8 – 9 – 19	28	Μετρίως πυκνή
	4	4 – 4 – 3	7	Χαλαρή
	7	7 – 9 – 11	20	Μετρίως πυκνή
ΔΤ – 30	1,6	18 – 26 – 50/14	ΑΡΝΗΣΗ	
ΔΤ – 34	1,5	4 – 4 – 6	10	Στιφρή
	3	50/11	ΑΡΝΗΣΗ	
	7,8	36 – 12 – 14	26	Μετρίως πυκνή

4.2 Συνοπτικοί πίνακες της αντοχής της βραχομάζας

Στο κεφάλαιο αυτό χαρακτηρίζεται η αντοχή της βραχομάζας με βάση τα δεδομένα των γεωτρήσεων από τις εργαστηριακές δοκιμές της σημειακής φόρτισης

καθώς επίσης και ο κερματισμός της με βάση το δείκτη RQD (Rock Quality Designation). Στο *Πίνακα 4.3* δίνονται οι τιμές της σημειακής φόρτισης κατά Bieniawski και στο *Πίνακα 4.4* οι τιμές από τις δοκιμές στους πυρήνες των γεωτρήσεων.

Πίνακας 4.3 Ταξινόμηση πετρώματος με βάση το διορθωμένο δείκτη σημειακής φόρτισης $I_{S(50)}$ σε MPa (κατά Bieniawski,1975)

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ $I_{S(50)}$ (MPa)
Πολύ υψηλής αντοχής	>8
Υψηλής αντοχής	4-8
Μέσης αντοχής	2-4
Χαμηλής αντοχής	1-2
Πολύ χαμηλής αντοχής	Δεν συνίσταται η δοκιμή (<1)

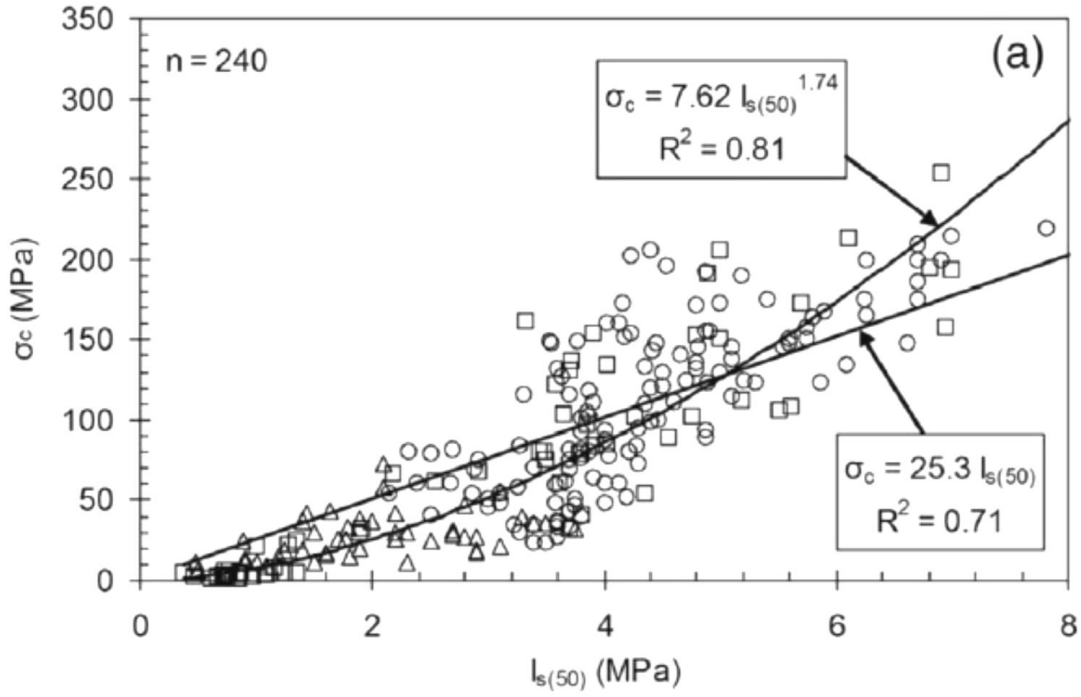
Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα σημειακής φόρτισης

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ(m)	ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ $I_{S(50)}$ (MPa)
ΔΤ – 29	9,20 – 10,00	0,07
	19,2 – 19,5	0,05
ΔΤ – 30	2,3 – 2,9	0,53
	5,4 – 6,0	1,05
	8,7 – 9,0	0,55
ΔΤ – 32	6,8 – 7,0	0,96
ΔΤ – 33	4,6 – 4,8	0,07

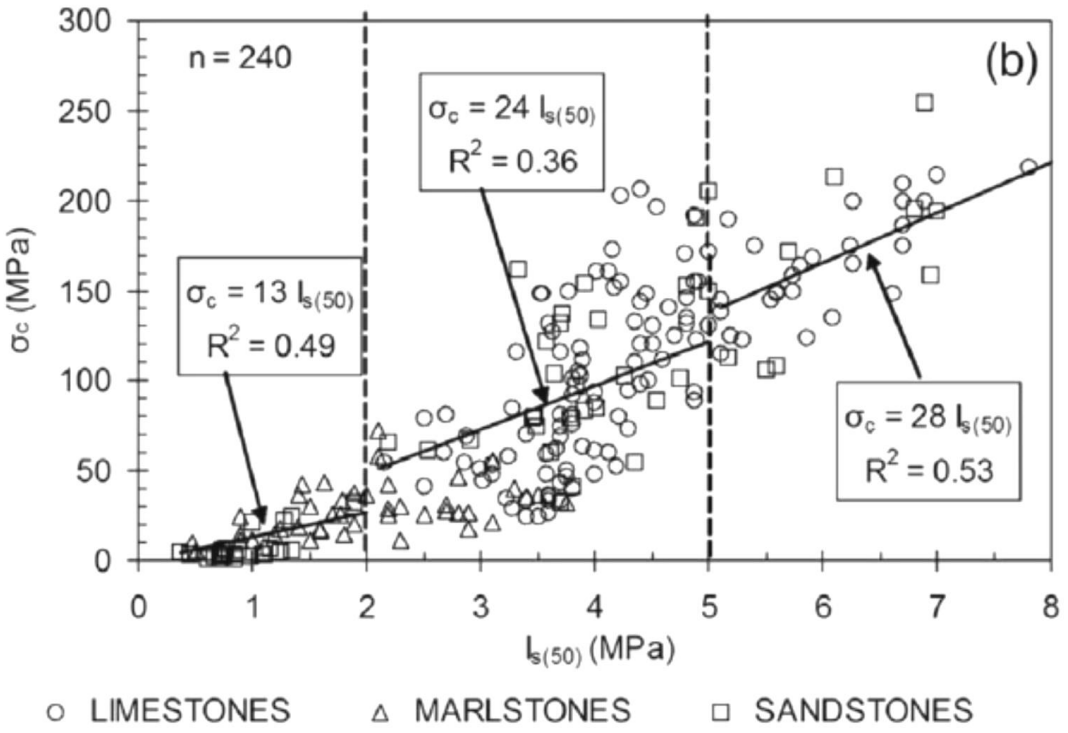
Ο ανηγμένος δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{S(50)}$ εκφράζεται σε MPa και συνδέεται με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη με τη σχέση:

$$\sigma_c = KI_{s(50)}$$

Όπου Κ συμβατικός 23 – 25 (Broch & Franklin,1972, Bieniawski,1975,ISRM,1985)



Σχ. 4.1 Ανηγμένος δείκτης σημειακής φόρτισης – Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Tsiambaos & Sabatakakis, 2004)



Σχ. 4.2 Ανηγμένος δείκτης σημειακής φόρτισης – Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για ασβεστόλιθους, ψαμμίτες και σκληρές μάργες του Ελληνικού χώρου (δοκιμές ΚΕΔΕ)

Συνεπώς με βάση τη παραπάνω μαθηματική σχέση οι τιμές της σημειακής φόρτισης για τα δοκίμια του *Πίνακα 4.4* μετατρέπονται σε αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (*Πίνακας 4.5*).

Πίνακας 4.5 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για Κ=24

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ(m)	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ σ_c (MPa)
ΔΤ – 29	9,20 – 10,00	1,68
	19,2 – 19,5	1,2
ΔΤ – 30	2,3 – 2,9	12,72
	5,4 – 6,0	25,2
	8,7 – 9,0	13,2
ΔΤ – 32	6,8 – 7,0	23,04
ΔΤ – 33	4,6 – 4,8	1.68

Με βάση τις δοκιμές σημειακής φόρτισης καθώς και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη η βραχόμαζα είναι πολύ χαμηλής έως χαμηλής αντοχής, συνεπώς οι δοκιμές λογικά θα πραγματοποιήθηκαν στον αποσαθρωμένο ιγκνιμβρίτη.

Όσο αναφορά το δείκτη κερματισμού της βραχόμαζας (Rock Quality Designation – RQD), στο *Πίνακα 4.6* παρουσιάζονται οι τιμές RQD κατά Bieniawski καθώς και η ποιότητα της βραχομάζας και στο *Πίνακα 4.7* οι τιμές RQD που προέκυψαν από τους πυρήνες των γεωτρήσεων. Συνεπώς η βραχόμαζα είναι μέτρια με καλή και όσο προχωράμε σε μεγαλύτερα βάθη χαρακτηρίζεται εξαιρετική.

Πίνακας 4.6 Ποιότητα βραχόμαζας ανάλογα με τις τιμές RQD(κατά Bieniawski)

RQD (%)	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ
<25	Πολύ φτωχή
25 – 50	Φτωχή
50 – 75	Μέτρια
75 – 90	Καλή
90 – 100	Εξαιρετική

Πίνακας 4.7 Αποτελέσματα RQD

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ (m)	RQD (%)
ΔΤ – 29	10,4 – 12,2	22
	16,8 – 18,5	12
	18,5 – 20,2	85
	20,2 – 22,6	70
	22,6 – 23,3	42
ΔΤ – 30	2,3 – 3,8	71
	3,8 – 5,4	52
	5,4 – 7,0	31
	7,0 – 8,6	43
	8,6 – 10,5	57

ΔΤ – 32	1,5 – 2,4	100
	2,4 – 4,3	95
	4,3 – 5,5	90
	5,5 – 7,8	95
	7,8 – 9,5	100
	9,5 – 10,1	100
	10,1- 10,5	80
ΔΤ – 33	2,6 – 3,2	16
	3,2 – 4,5	41
	4,5 – 5,5	47
	5,5 – 7,3	43
	7,3 – 8,7	11
	8,7 – 10,0	84
ΔΤ – 34	3,5 – 4,4	29
	5,3 – 6,4	27
	11,0 – 12,5	47
	12,5 – 14,1	69
	14,1 – 15,0	98
	15,0 – 16,6	68
	16,6 – 18,0	61

4.3 Τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των ιγκνιμβριτών

Οι ιγκνιμβρίτες ή πυρομβρίτες είναι αποθέσεις πυροκλαστικών ροών και αποτελούνται κυρίως από κίσσηρη και στάχτη. Προέρχονται από όξινης σύστασης μάγμα και η χημική σύσταση του μάγματος καθορίζει και την ορυκτολογία του ιγκνιμβρίτη. Οι φαινοκρύσταλλοι που μπορεί να περιέχουν είναι βιοτίτης, χαλαζίας, σανίδινο ή κάποιος άλλος καλιούχος άστριος, κεροστίλβη και πιο σπάνια πυρόξενους. Μπορεί να είναι είτε χαλαροί και να αποτελούνται από κομμάτια κίσσηρης μέσα σε μια πιο λεπτόκοκκη θεμελιώδη μάζα είτε να είναι συνεκτικοί διότι κατά το σχηματισμό τους λόγω της υψηλής θερμοκρασίας η κίσσηρη και η στάχτη είναι εύπλαστες και συμπαγοποιούνται λιώνοντας τα διάφορα θραύσματα

αποκτώντας μια συμπαγή μορφή. Μπορεί να παρουσιάζουν δομές ροής καθώς πρόκειται για έκχυτα πετρώματα και ασυνέχειες ψύξης λόγω της ταχείας ψύξης τους, οι ασυνέχειες αυτές μειώνουν την αντοχή των πετρωμάτων. Επιπλέον, οι συγκεκριμένοι ιγκνιμβρίτες εμφανίζουν διακλάσεις λόγω της τεκτονικής καταπόνησης που υπέστησαν από τη δράση των D3 έως D5 τεκτονικών γεγονότων.

Οι ιγκνιμβρίτες είναι ευαίσθητοι στη δράση του νερού και αποσαθρώνονται σχετικά εύκολα διότι η κίσσηρης αποτελείται κυρίως από αστρίους . Οι άστριοι έχουν καλά ανεπτυγμένα σχισμογενή πεδία, εμφανίζουν συνήθως διδυμίες και είναι μερικώς υδρολυόμενοι για τους λόγους αυτούς δεν έχουν μεγάλη φυσική αντοχή. Επομένως λόγω της δράσης του νερού μετατρέπονται σε άργιλο.

Με βάση τα δεδομένα των γεωτρήσεων ο ιγκνιμβρίτης έχει τουλάχιστον τρεις διακλάσεις και είναι αποσαθρωμένος συνεπώς με βάση το δείκτη GSI είναι γύρω στο 40 – 50 και όσο αυξάνεται το βάθος η αποσάθρωση μειώνεται συνεπώς το GSI αυξάνεται.

Εικόνα 4.1 Το βασικό διάγραμμα του δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI

(Hoek & Marinos, 2000)

5. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ

5.1 Γενικά

Γεωφυσική διασκόπηση είναι η μελέτη της δομής των απρόσιτων στην άμεση παρατήρηση επιφανειακών στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και την εφαρμογή θεμελιωδών νόμων της φυσικής.

Κάθε μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης εκμεταλλεύεται τη χωρική ή και χρονική μεταβολή μιας χαρακτηριστικής ιδιότητας του υπεδάφους με στόχο τον προσδιορισμό των υπεδαφικών "ανωμαλιών". Οι φυσικές ποσότητες που συνήθως μετρώνται είναι οι χρόνοι διαδρομής των τεχνητά παραγόμενων ελαστικών κυμάτων, η ένταση του πεδίου βαρύτητας, οι περίοδοι και τα πλάτη των σεισμικών κυμάτων, η ένταση του μαγνητικού πεδίου, το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου, η ροή θερμότητας από το εσωτερικό της Γης κλπ. Τα φυσικά μεγέθη που επιδιώκεται να προσδιοριστούν είναι η ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, η πυκνότητα των πετρωμάτων, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα κλπ. Τα μεγέθη αυτά είναι που δίνουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τη φυσική κατάσταση του υλικού και τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της Γης.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι καθώς επίσης οι μετρούμενες φυσικές ποσότητες και οι φυσικές ιδιότητες τις οποίες μελετά η κάθε μία παρουσιάζονται στο Πίνακα 1.

Πίνακας 5.2 Οι γεωφυσικές μέθοδοι, οι μετρούμενες φυσικές ποσότητες και οι φυσικές ιδιότητες τις οποίες μελετά η κάθε μία

Μέθοδος	**Μετρούμενη φυσική ποσότητα**	**Στόχος**
Βαρυτική μέθοδος	Ένταση πεδίου βαρύτητας	Προσδιορισμός της κατανομής της πυκνότητας στο υπέδαφος
Μαγνητική μέθοδος	Ένταση γεωμαγνητικού πεδίου	Εντοπισμός μαγνητισμένων πετρωμάτων, μέσω της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της παραμένουσας μαγνήτισης

Σεισμική μέθοδος	Χρόνοι διαδρομής σεισμικών κυμάτων	Καθορισμός της δομής των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους, μέσω των ελαστικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων
	Περίοδοι σεισμικών κυμάτων	
	Πλάτη σεισμικών κυμάτων	
Γεωηλεκτρική μέθοδος	Φαινόμενη ειδική αντίσταση της Γης	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης (ηλεκτρική αγωγιμότητα και ηλεκτροχωρητικότητα)
	Φυσικά ή τεχνητά ηλεκτρικά δυναμικά	
Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος	Ένταση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και επαγωγή)
Γεωραντάρ	Χρόνοι επιστροφής και πλάτη των ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	Προσδιορισμός των διεπιφανειών ασυνέχειας των επιφανειακών τμημάτων του υπεδάφους (ηλεκτρική αγωγιμότητα και διηλεκτρική σταθερά)
Ραδιομετρική μέθοδος	Φυσική ραδιενέργεια	Προσδιορισμός της φυσικής ραδιενέργειας των πετρωμάτων
Θερμική μέθοδος	Ροή θερμότητας από το εσωτερικό της Γης	Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των πετρωμάτων

5.2 Επιλογή κατάλληλης γεωφυσικής μεθόδου

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου γεωφυσικής έρευνας για την αντιμετώπιση ενός γεωφυσικού προβλήματος εξαρτάται από τη φύση των υλικών του υπεδάφους στην περιοχή μελέτης, από τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά του στόχου που τον διαφοροποιούν από τους περιβάλλοντες σχηματισμούς. Γενικά, επιλέγεται εκείνη

η μέθοδος που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διαφοροποίηση τιμών μεταξύ του στόχου και του περιβάλλοντος χώρου. Επιπροσθέτως, για την επιλογή της μεθόδου λαμβάνεται υπόψη το βάθος, οι διαστάσεις του στόχου, η πρόσβαση στην περιοχή, οικονομικά κριτήρια κτλ.

Η βαρυτική μέθοδος εντοπίζει τις δομές στο υπέδαφος από τις διαταραχές που δημιουργούν στο πεδίο βαρύτητας στην επιφάνεια της γης. Ενώ είναι απλή όσο αφορά τις θεωρητικές αρχές που την διέπουν, απαιτεί πολύπλοκες τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων καθώς και υψηλής διακριτικής ικανότητας όργανα λόγω του ότι οι "στόχοι" που βρίσκονται στο υπέδαφος δεν επηρεάζουν αισθητά το πεδίο βαρύτητας στην επιφάνεια της γης.

Η μαγνητική μέθοδος ερευνά τις δομές στο υπέδαφος μελετώντας τις ανωμαλίες στο μαγνητικό πεδίο της γης που οφείλονται στις διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες των γεωυλικών. Η μαγνητική μέθοδος, λοιπόν, δεν μπορούσε να εφαρμοστεί διότι τα γεωυλικά που μελετάμε δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες μαγνητικές ιδιότητες.

Η σεισμική μέθοδος βασίζεται στη χρήση τεχνητά δημιουργούμενων σεισμικών κυμάτων καθώς και κυμάτων προερχόμενων από σεισμούς για την αποτύπωση γεωλογικών δομών στο υπέδαφος. Λόγω του βάθους που αναμενόταν η επιφάνεια ολίσθησης η εφαρμογή των σεισμικών μεθόδων κρίθηκε αδύνατη διότι θα χρειαζόταν ισχυρή σεισμική πηγή (δυναμίτης ή σεισμικοί δονητές) για να εντοπιστεί και να καταγραφεί ο "στόχος".

Επιλέχθηκε η γεωηλεκτρική μέθοδος διότι είναι μία εύκολα εφαρμόσιμη, γρήγορη και οικονομική μέθοδος. Επιπλέον, η επιφάνεια ολίσθησης αντιπροσωπεύει συνήθως μια επιφάνεια ελαττωμένης ηλεκτρικής αντίστασης λόγω της συγκέντρωσης υγρασίας και η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως για υδρογεωλογικούς σκοπούς.

5.3 Γεωηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης

5.3.1 Εισαγωγή

Με τη γεωηλεκτρική μέθοδο διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.. Η μέθοδος αυτή άρχισε να εφαρμόζεται στην μελέτη του υπεδάφους στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Πρωτοπόροι στην έρευνα υπήρξαν ο Wenner και οι Schlumberger των οποίων οι μελέτες βοήθησαν στην διάδοση των ηλεκτρικών μεθόδων.

Η γεωηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης που χρησιμοποιήθηκε είναι η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η ποσότητα που μετρήθηκε είναι η ηλεκτρική τάση ή διαφορά δυναμικού V και η κύρια παράμετρος που υπολογίζεται είναι η ειδική αντίσταση, συγκεκριμένα η κατανομή της στο υπέδαφος.

5.3.2 Αρχές μεθόδου

Ο George S. Ohm (1827), όρισε μία εμπειρική σχέση που συνδέει την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει ένα συρμάτινο καλώδιο με τη διαφορά δυναμικού. Συγκεκριμένα, εάν εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού στα άκρα ενός αγώγιμου σώματος με ηλεκτρική αντίσταση τότε αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, η ένταση του οποίου υπολογίζεται με βάση το νόμο του Ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$

Όπου: I είναι η ένταση του ρεύματος

V είναι η διαφορά δυναμικού ή η τάση του ρεύματος

R είναι η ηλεκτρική ωμική αντίσταση του αγωγού

Η ηλεκτρική ωμική αντίσταση του αγωγού εξαρτάται από τη φύση και τη γεωμετρία του υλικού:

$$R = \frac{\rho * L}{A}$$

Όπου: R είναι η ηλεκτρική ωμική αντίσταση αγωγού

ρ είναι η ειδική αντίσταση του αγωγού

L είναι το μήκος του αγωγού

και A είναι η διατομή του αγωγού

Συνεπώς, η ειδική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{R * A}{L}$$

και μετράται σε Ohm*m.

Η ειδική αντίσταση ρ είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων του αγωγού, είναι χαρακτηριστική του υλικού του αγωγού και δίνει πληροφορίες όσο για την ευκολία με την οποία ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα. Εξαρτάται κυρίως από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, δηλαδή από παράγοντες που επηρεάζουν τη σύσταση και τη συγκέντρωση του νερού. Συνεπώς το πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες, ο κορεσμός του σε ρευστά και η χημική σύσταση και θερμοκρασία του νερού είναι παράγοντες που μεταβάλλουν την ειδική αντίσταση.

Η εξάρτηση της ειδικής αντίστασης ενός πετρώματος από τους παραπάνω παράγοντες δίνεται εμπειρικά μέσω του νόμου του Archie (Τσελέντης and Παρασκευόπουλος, 2013):

$$\rho = \rho_w \, \alpha\varphi^{-m}S^{-n}$$

Όπου: ρ είναι η ειδική αντίσταση του πετρώματος

ρ_w είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του ρευστού (συνήθως νερού) στο πορώδες του πετρώματος

α είναι ο συντελεστής που εξαρτάται από τη λιθολογία και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.6-2

φ είναι το πορώδες

m είναι ο συντελεστής στερεοποίησης, ο οποίος εξαρτάται από τη γεωμετρία του πορώδους, το πόσο συμπαγές είναι και έχει τιμές από1.3 για μη συμπαγοποιημένες άμμους έως 2.2 για συμπαγή ασβεστόλιθο

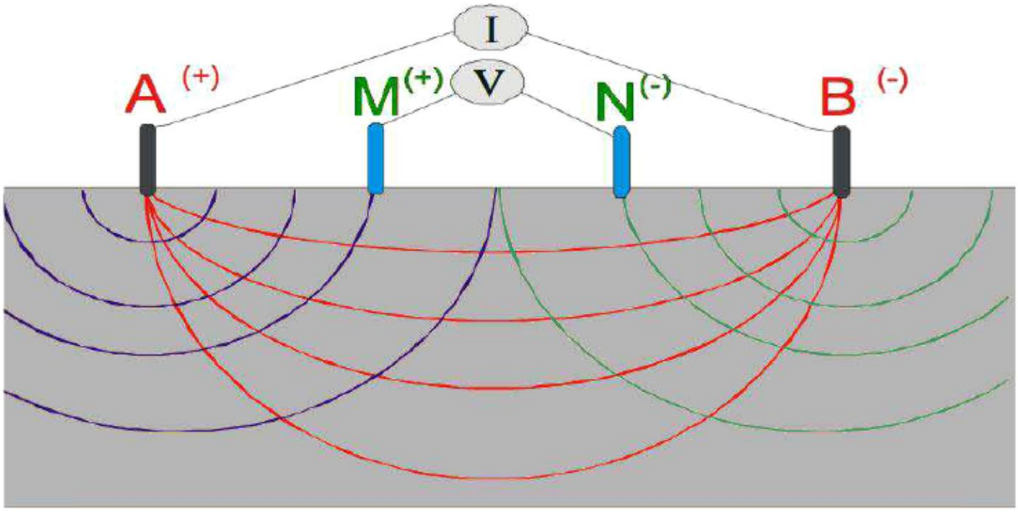
S είναι ο βαθμός κορεσμού με ρευστό

και n είναι ο συντελεστής που συνήθως έχει τη τιμή 2 για τα περισσότερα πετρώματα και για βαθμούς κορεσμού από 20% έως 100%.

Ο νόμος του Archie εφαρμόζεται κυρίως στην υδρογεωλογία και δείχνει ότι η ειδική αντίσταση αυξάνεται όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος. Ο νόμος αυτός διαφοροποιείται στην περίπτωση των αργιλικών πετρωμάτων.

5.3.3 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης

Κατά τη διαδικασία μέτρησης τοποθετούνται δύο σημειακές πηγές ρεύματος Α και Β (ηλεκτρόδια ρεύματος) και διαβιβάζεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I μέσα στη γη μέσω των ηλεκτροδίων αυτών. Ταυτόχρονα μετράται σε διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού V_{MN} μεταξύ δύο ηλεκτροδίων δυναμικού Μ και Ν.



Σχ. 5.1 Βασική διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων για τη λήψη των γεωηλεκτρικών μετρήσεων

Άρα:

$$V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)$$

$$\rho = \frac{V_{MN}}{I}\left(\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}\right)$$

Όπου: $G = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$ ορίζεται ως ο γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται από τις θέσεις των ηλεκτροδίων και $R = \frac{V_{MN}}{I}$.

5.3.4 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Η γη δεν αποτελεί ένα ισότροπο και ομογενές μέσο για αυτό το λόγο τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης είναι διαφοροποιημένα από θέση σε θέση. Συνεπώς, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση ονομάζεται φαινόμενη ειδική αντίσταση:

$$\rho_\alpha = \frac{2\pi\Delta V}{GI}$$

Όπου: ρ_α είναι η φαινόμενη ειδική αντίσταση

ΔV είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων μέτρησης

I είναι η ένταση του ρεύματος

και G είναι ο γεωμετρικός παράγοντας, ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε διάταξη ηλεκτροδίων.

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετράμε για κάθε θέση ή/και διεύθυνση της διάταξης ηλεκτροδίων, δεν είναι αντιπροσωπευτική ούτε της πραγματικής ειδικής αντίστασης μέρους του υπεδάφους, ούτε μίας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων μερών του υπεδάφους. Μεταβάλλεται όμως συστηματικά ανάλογα με τη γεωλογική τομή και κατανομή των στρωμάτων που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές και είναι αντιπροσωπευτική και των στρωμάτων του υπεδάφους και των αγώγιμων ή μη ανομοιογενειών (Αποστολόπουλος, 2013)

5.3.5 Διάταξη ηλεκτροδίων

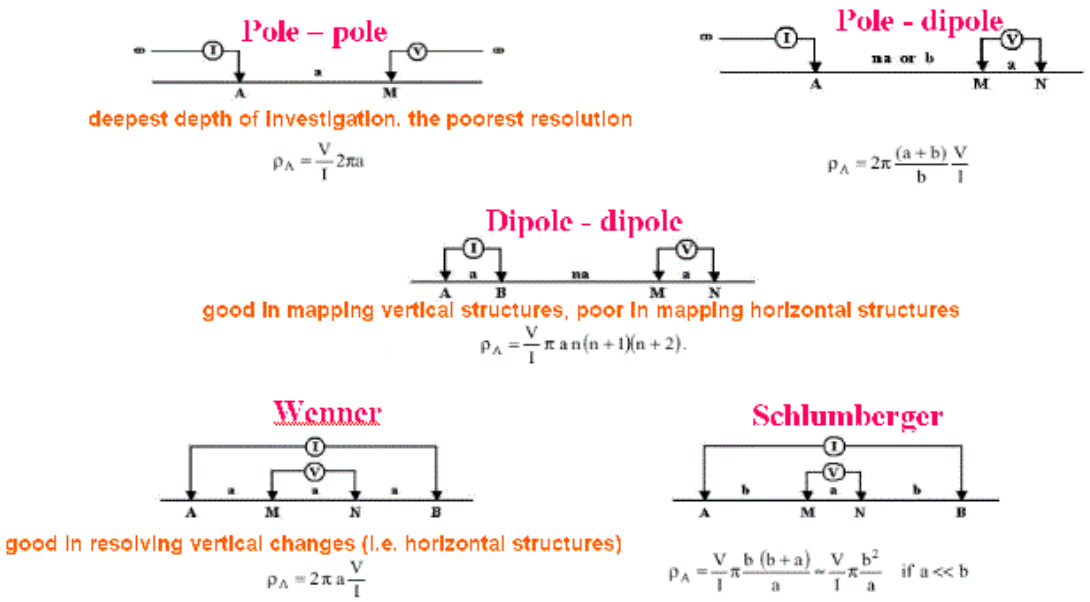
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού. Οι πέντε πιο διαδεδομένοι είναι οι εξής:

- Διάταξη πόλος - πόλος

- Διάταξη πόλος -δίπολο
- Διάταξη δίπολο - δίπολο
- Διάταξη Wenner
- Διάταξη Schlumberger

Κάθε διάταξη παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της καταλληλότερης διάταξης είναι το μέγιστο βάθος διασκόπησης και η διακριτική ικανότητα τους.

Στη συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκε η διάταξη δίπολο - δίπολο διότι παρουσιάζει ευκολία στο ύπαιθρο, αφού τα μήκη των απαιτούμενων καλωδίων είναι μικρά. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού είναι αμελητέα. Επιπλέον, είναι χρήσιμη στον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών της ειδικής αντίστασης και χρησιμοποιείται συχνά σε γεωτεχνικές εφαρμογές.



Σχ. 5.2 Οι κυριότερες διατάξεις των ηλεκτροδίων (www.hckgeo.com)

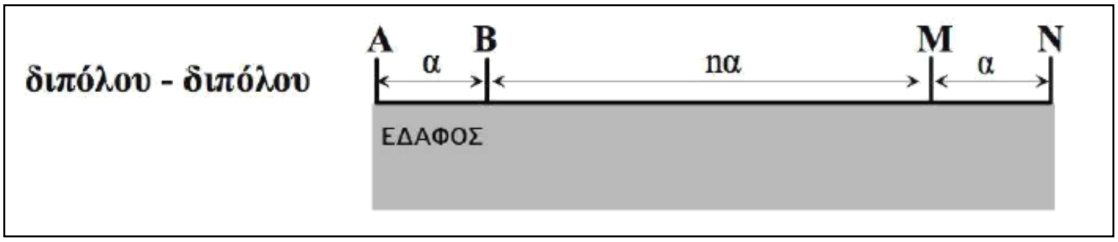
Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για δημιουργία ψευδοτομής. Το βάθος διερεύνησης αποτελεί συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των διπόλων, ενώ το σημείο μέτρησης εντοπίζεται στην ενδιάμεση απόσταση των δύο διπόλων. Τα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος και τα

δύο δίπολα έχουν σταθερή απόσταση ίση με α (AB= MN= α), ενώ η απόσταση μεταξύ τους είναι nα. Η φαινόμενη αντίσταση για αυτή τη διάταξη ισούται με:

$$\rho_\alpha = \pi\alpha n(n+1)(n+2)\frac{\Delta V}{I}$$

Διότι ο γεωμετρικός παράγοντας στη διάταξη αυτή ισούται με:

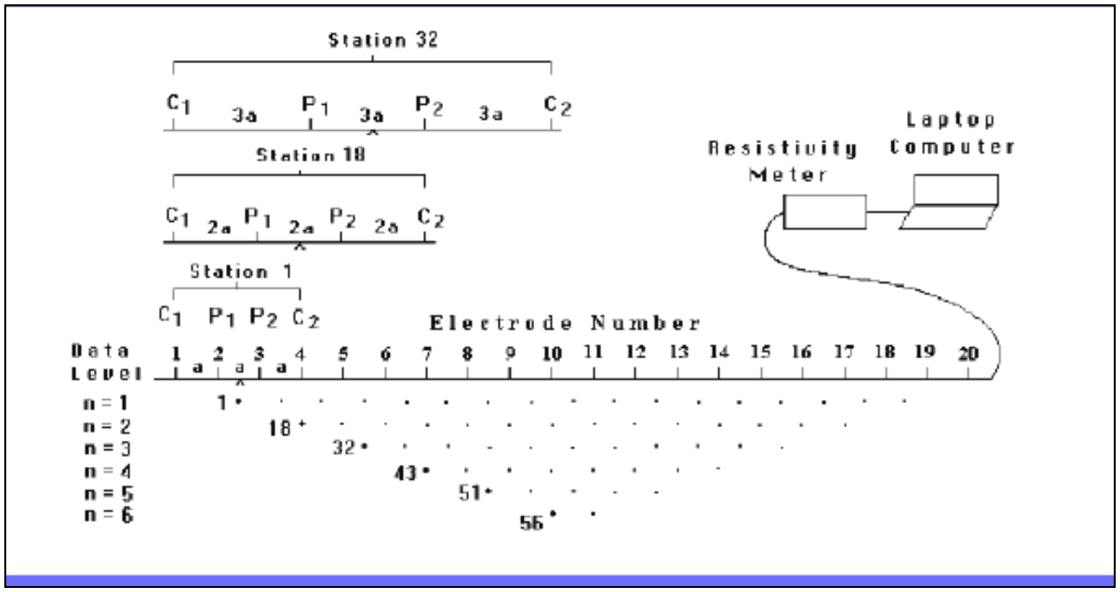
$$G = \pi n(n+1)(n+2)\alpha$$



Σχ. 5.3 Η διάταξη δίπολο – δίπολο (τροποποιήθηκε από Tsourlos,1995)

5.3.6. Μέθοδος δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφία

Η δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει πλευρική επικάλυψη των μετρήσεων έτσι ώστε να γίνει εφικτή η καταγραφεί πολύπλοκων γεωλογικών δομών. Αποτελεί ένα συνδυασμό βυθοσκόπησης και όδευσης με σκοπό την καταγραφή τόσο της πλευρικής όσο και της εις βάθος μεταβολής της γεωηλεκτρικής αντίστασης .



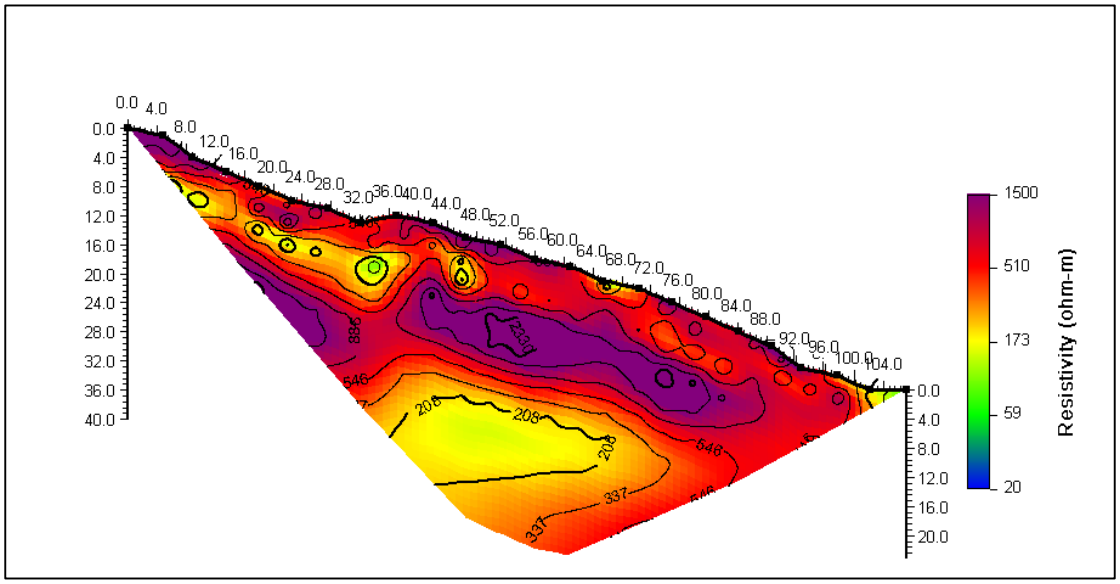
Σχ. 5.4 Ακολουθία μετρήσεων για τη δημιουργία δισδιάστατης τομής

Για τη λήψη των δεδομένων, τοποθετείται μεγάλος αριθμός ηλεκτροδίων κατά μήκος του προφίλ που θα πραγματοποιηθεί η μέτρηση, σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Στη περιοχή μελέτης τοποθετηθήκαν 24 ηλεκτρόδια με βήμα 5 μ. Τα ηλεκτρόδια συνδέονται χρησιμοποιώντας σειρά πολύκλωνων καλωδίων, τα οποία καταλήγουν στη μονάδα διακοπτών και τη μονάδα μέτρησης. Κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης των μετρήσεων, το σύστημα διακοπτών προγραμματίζεται ώστε να ελέγχει ποια ηλεκτρόδια θα λειτουργήσουν διαδοχικά ως ηλεκτρόδια ρεύματος και ποια ως ηλεκτρόδια δυναμικού αποσυνδέοντας τα υπόλοιπα. Η επιλογή γίνεται με βάση τη διάταξη ηλεκτροδίων που έχει επιλεγεί(διάταξη δίπολο –δίπολο επιλέχθηκε). Οι μετρήσεις συνεχίζονται έως ότου μετρηθούν όλοι οι επιθυμητοί συνδυασμοί ρεύματος δυναμικού (Τσελέντης and Παρασκευόπουλος, 2013)

Μετά το πέρας τον μετρήσεων, τα δεδομένα αποτυπώνονται σε μια ψευδοτομή φαινόμενης ειδικής αντίστασης μέσω αυτοποιημένου χειρισμού και επεξεργασίας δεδομένων. Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντιστροφής δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί. Με τις τεχνικές αυτές το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως, αυξάνει με το βάθος. Οι ειδικές αντιστάσεις προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και την απόκριση του μοντέλου. Όσον αφορά στη

τοπογραφία, αυτή είτε εισάγεται μετά την αντιστροφή είτε απευθείας στο πλέγμα (Αποστολόπουλος, 2013).

Στην παρούσα εργασία, ο υπολογισμός της πραγματικής ειδικής αντίστασης (αντιστροφή), πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου DC2dPRO (Kim, 2010). Το πρόγραμμα αυτό χωρίζει το υπέδαφος σε έναν αριθμό παραλληλόγραμμων και θεωρεί σταθερή την πραγματική ειδική αντίσταση σε κάθε ορθογώνιο. Ξεκινώντας από αρχικό μοντέλο το οποίο προκύπτει θέτοντας κάποια τιμή για την πραγματική ειδική αντίσταση, υπολογίζει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό και τις συγκρίνει με τις μετρημένες τιμές της φαινόμενης αντίστασης. Με διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα και στο τέλος επιλέγεται το μοντέλο εκείνο με το μικρότερο σφάλμα. Μετά την παραπάνω επεξεργασία το αποτέλεσμα είναι μία δισδιάστατη κατακόρυφη τομή του εδάφους στην οποία απεικονίζεται η κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος.



Σχ. 5.5 Η δισδιάστατη κατακόρυφη τομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος

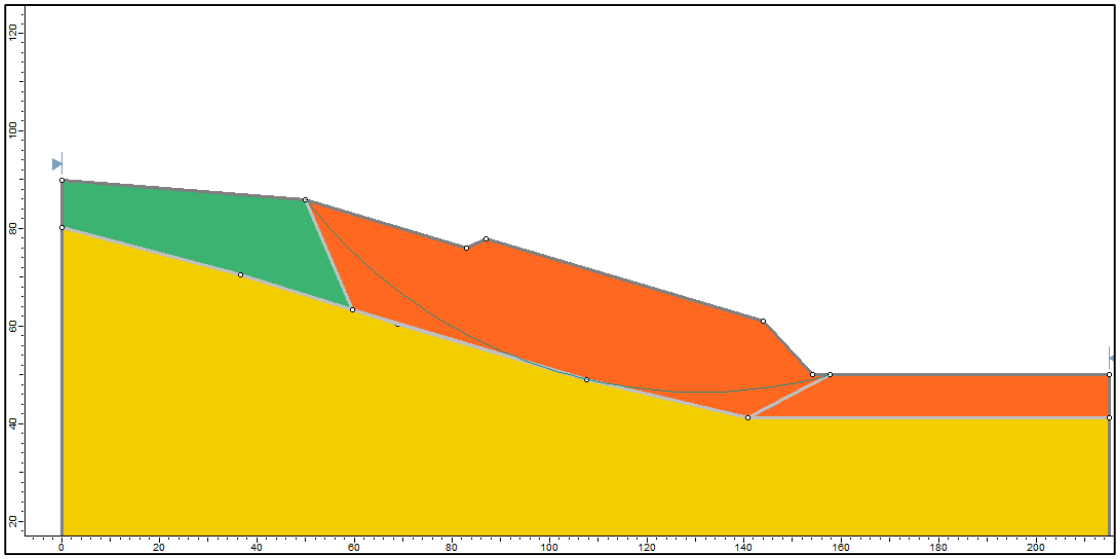
5.4 Ερμηνεία γεωηλεκτρικής τομογραφίας

Με βάση τη γεωλογία της περιοχής και τα δεδομένα από τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις οι περιοχές με τις υψηλές αντιστάσεις λογικά αντιστοιχούν σε κομμάτια ιγκνιμβρίτη που έχουν ολισθήσει από υψηλότερα σημεία. Οι περιοχές με τις χαμηλές αντιστάσεις που εντοπίζονται από το βάθος των 12μ. περίπου και μέχρι την επιφάνεια του εδάφους αντιστοιχούν στα υλικά της κατολίσθησης. Σύμφωνα με τη γεώτρηση ΔΤ – 34 η οποία βρίσκεται στο πόδα της κατολίσθησης έχουν εντοπιστεί αργιλικά υλικά τα οποία πρέπει να προέρχονται από την αποσάθρωση των αστρίων του ιγκνιμβρίτη, κακής διαβάθμισης χαλίκια καθώς και τέμαχος ιγκνιμβρίτη όλα τα παραπάνω γεωυλικά αντιπροσωπεύουν τα υλικά της κατολίσθησης.

Κάτω όμως από τις υψηλές αντιστάσεις παρατηρούνται χαμηλές αντιστάσεις οι οποίες πιθανώς να αντιπροσωπεύουν τους ρυολιθικούς τόφφους, οι οποίοι υπόκεινται των ιγκνιμβριτών. Επιπλέον στην περιοχή εντοπίζονται πηγές και οι ρυολιθικοί τόφφοι δεν αποτελούν συμπαγή σχηματισμούς οπότε οι χαμηλές αυτές αντιστάσεις πιθανώς να συνδέονται με την ύπαρξη υδροφορίας στην περιοχή. Συνεπώς η κατολίσθηση πιθανώς να πραγματοποιήθηκε στην αποσαθρωμένη ζώνη των ιγκνιμβριτών

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Slide 7.0 (Rocscience Inc.) και λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα από τις εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές των γεωτρήσεων, τα αποτελέσματα της γεωηλεκτρικής τομογραφίας καθώς και των επιτόπου παρατηρήσεων δημιουργήθηκαν τέσσερα μοντέλα με σκοπό την κατανόηση του φαινομένου της κατολίσθησης. Αρχικά κατασκευάστηκε το μοντέλο 1 (*Εικόνα 6.1*) στο οποίο αποτυπώνεται η επιφάνεια του εδάφους με βάση τη μορφολογία της γεωηλεκτρικής τομής, με κόκκινο χρώμα είναι τα υλικά της κατολίσθησης, με πράσινο χρώμα ο αποσαθρωμένος ιγκνιμβρίτης και με κίτρινο χρώμα οι ρυολιθικοί τόφφοι. Αποτυπώνεται επίσης με καμπύλη γραμμή η επιφάνεια της ολίσθησης λαμβάνοντας υπόψη τη γεωηλεκτρική τομή.



Εικόνα 6.1 1ο Μοντέλο ανάλυσης (κόκκινο χρώμα: υλικά κατολίσθησης, πράσινο χρώμα: αποσαθρωμένος ιγκνιμβρίτης, κίτρινο χρώμα: ρυολιθικοί τόφφοι)

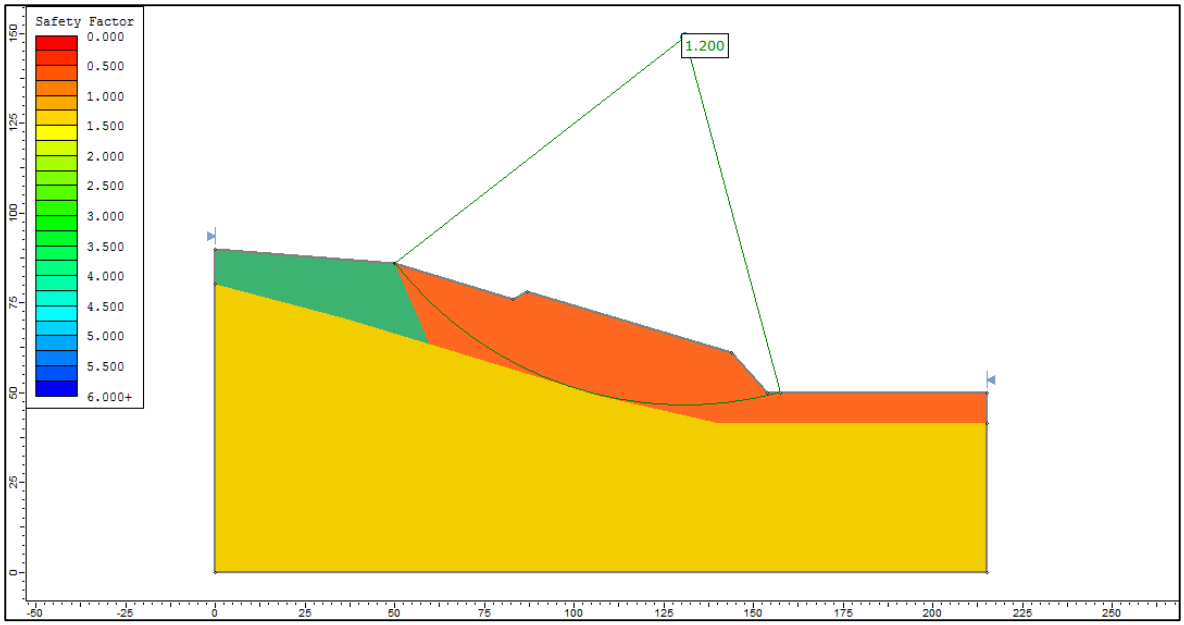
Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τρία μοντέλα στα οποία η συνοχή (c) και η γωνία τριβής (φ) των γεωυλικών διατηρείτο σταθερή και μεταβαλλόταν μόνο η πίεση πόρων (R_u). Οι τιμές που δόθηκαν στη συνοχή και στη γωνία τριβής για τον αποσαθρωμένο ιγκνιμβρίτη και τους τόφφους εκτιμήθηκαν μέσω του προγράμματος RocData 5.0 (Rocscience Inc.) και λαμβάνοντας υπόψη τη τεχνικογεωλογική αξιολόγηση, ενώ για τα υλικά της κατολίσθησης η συνοχή λαμβάνεται ίση με μηδέν

διότι έχει ήδη εκδηλωθεί η αστοχία και η γωνία τριβής ισούται με 20 μοίρες (*Πίνακας 6.1*).

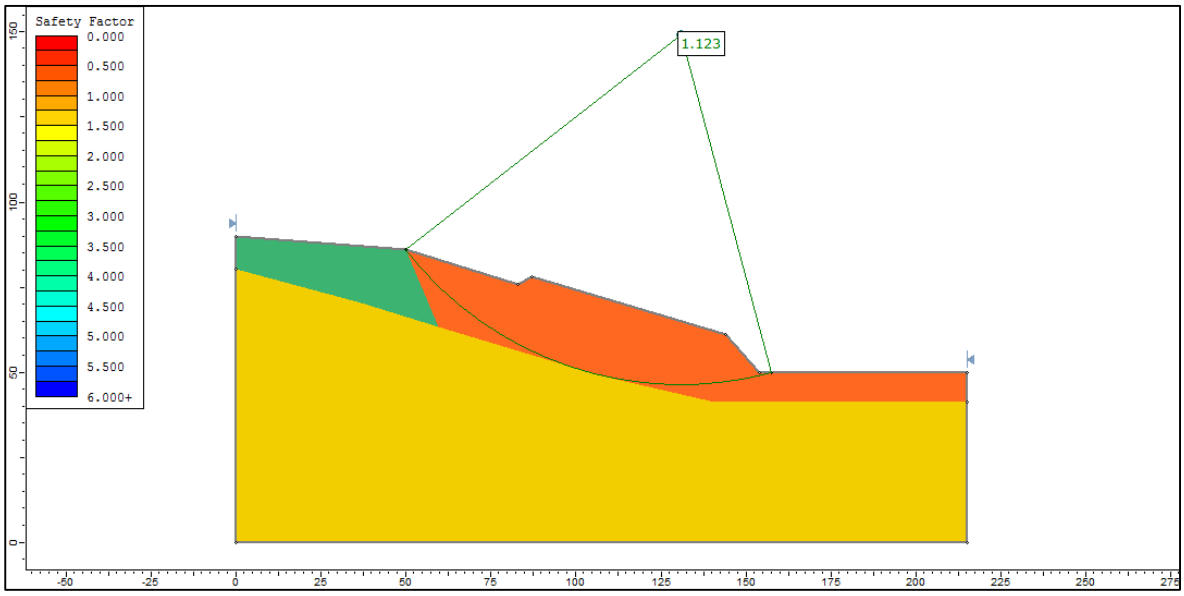
Πίνακας 6.1 Συντελεστές ασφαλείας ανά γεωτεχνική ανάλυση

	Γεωυλικά	**Συνοχή (c) (kPa)**	**Γωνία τριβής(φ) (degrees)**	**R_u (πίεση πόρων)**	**Συντελεστής ασφαλείας (F)**
Ανάλυση 1	Υλικά κατολίσθησης (Κόκκινο) (Ενότητα 1)	0	20	0.15	1.200
	Αποσαθρωμένος ιγκνιμβρίτης (Πράσινο) (Ενότητα 2)	151	30	0.12	
	Ρυολιθικοί τόφφοι (Κίτρινο) (Ενότητα 3)	456	48	0.10	
Ανάλυση 2	Υλικά κατολίσθησης (Κόκκινο) (Ενότητα 1)	0	20	0.20	1.123
	Αποσαθρωμένος ιγκνιμβρίτης (Πράσινο) (Ενότητα 2)	151	30	0.12	
	Ρυολιθικοί τόφφοι (Κίτρινο) (Ενότητα 3)	456	48	0.10	
Ανάλυση 3	Υλικά κατολίσθησης (Κόκκινο) (Ενότητα 1)	0	20	0.25	1.047
	Αποσαθρωμένος ιγκνιμβρίτης (Πράσινο) (Ενότητα 2)	151	30	0.12	
	Ρυολιθικοί τόφφοι (Κίτρινο) (Ενότητα 3)	456	48	0.10	

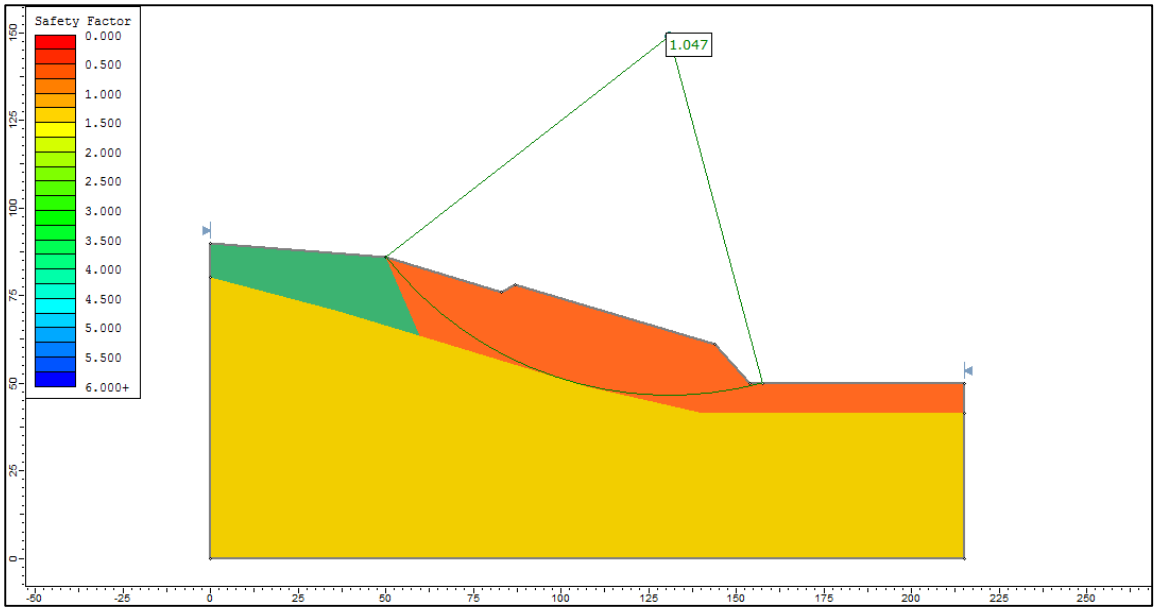
Η πίεση των πόρων μεταβάλλεται εδώ καθώς στην περιοχή μελέτης εντοπίστηκαν πηγές στον πόδα της κατολίσθησης και η δράση του νερού είναι καταλυτική για την εκδήλωση των κατολισθητικών φαινομένων.



Εικόνα 6.2 2ο Μοντέλο κατολίσθησης όπου ο συντελεστής R_u της πίεσης πόρων ισούται με 0.15



Εικόνα 6.3 3ο Μοντέλο κατολίσθησης όπου ο συντελεστής R_u της πίεσης πόρων ισούται με 0.20



Εικόνα 6.4 4ο Μοντέλο κατολίσθησης όπου ο συντελεστής R_u της πίεσης πόρων ισούται με 0.25. Όπως φαίνεται εδώ, ο συντελεστής ασφαλείας είναι οριακός.

Από τα παραπάνω μοντέλα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η πίεση πόρων ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται, διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές. Συνεπώς, ο λόγος που προκλήθηκε η αστοχία πρέπει να είναι η έντονη βροχόπτωση δηλαδή η αύξηση της πίεσης των πόρων στα ήδη χαλαρά υλικά που προέρχονταν από την αποσάθρωση του ιγκνιμβρίτη. Βέβαια, αν η γωνία τριβής είναι χαμηλότερη από 20° τότε η πίεση των πόρων που πρέπει να αναπτυχθεί για να εκδηλωθεί κατολίσθηση μπορεί να είναι χαμηλότερη από Ru 0.25 η οποία κρίνεται υψηλή, αλλά στην παρούσα ανάλυση σκοπός ήταν η παρουσίαση της επίδρασης του νερού στο συντελεστή ασφαλείας στην περιοχή έρευνας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των κατολισθητικών φαινομένων στο πρανές του κάθετου άξονα Ξάνθη – Εχίνος – Ελληνοβουγαρικά σύνορα της Εγνατίας Οδού Α.Ε. με τη χρήση της γεωφυσικής μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν αφορούν το είδος των υλικών που ολίσθησαν, τον μηχανισμό της κατολίσθησης, την επιφάνεια ολίσθησης και το κύριο αίτιο εκδήλωσής της.

Στη περιοχή έρευνας απαντώνται τρεις γεωλογικές ενότητες βάσει των δεδομένων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές). Η πρώτη ενότητα αποτελείται από υλικά παλιών κατολισθήσεων, προέρχονται αρχικά από την αποσάθρωση των ιγκνιμβριτών και των ρυολιθικών τόφφων, επίσης κατά τόπους συναντώνται και τεμάχη ιγκνιμβριτών. Η δεύτερη ενότητα αποτελείται από κορήματα τα οποία έχουν προέλθει από την αποσάθρωση του ιγκνιμβρίτη και των ρυολιθικών τόφφων. Η σύσταση των κορημάτων αυτών είναι κυρίως λεπτόκοκκη (άργιλος και ιλύς) και η συνεκτικότητά τους κυμαίνεται από χαλαρή σε μικρά βάθη μέχρι μέτρια πυκνή σε μεγαλύτερα βάθη. Τέλος, η τρίτη ενότητα αποτελείται από του ρυολιθικούς τόφφους - ιγκνιμβρίτες οι οποίοι σε μικρά βάθη λόγω της αποσάθρωσης παρουσιάζονται ελαφρώς κερματισμένοι και με πολύ χαμηλές έως χαμηλές αντοχές.

Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για να ερευνηθεί το υπέδαφος στη περιοχή έρευνας και κατασκευάστηκε μία διδιάστατη γεωηλεκτρική τομή. Για την ερμηνεία της τομής αυτής συνδυάστηκαν τα δεδομένα της υπαίθριας παρατήρησης και των γεωτρήσεων. Συνεπώς, τα υλικά που ολίσθησαν προέρχονται από την αποσάθρωση του ιγκνιμβρίτη και των ρυολιθικών τόφφων. Ο ιγκνιμβρίτης και οι ρυολιθικοί τόφφοι ανήκουν στα ηφαιστειακά πετρώματα και έχουν διακλάσεις ψύξης λόγω της ταχείας ψύξης του μάγματος. Οι διακλασεις αυτές σε συνδυασμό με την τεκτονική καταπόνηση που δέχθηκε η περιοχή κατά την εξέλιξη της μολασσικης λεκάνης της Θράκης ευνόησαν την εισροή ύδατος και αυτό είχε

σαν αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση της ποιότητας των υλικών και την αποσάθρωσή τους. Λόγω της έντονης βροχόπτωσης εκδηλώθηκε περιστροφική ολίσθηση πιθανώς στην διεπιφάνεια μεταξύ της αποσαθρωμένης και της υγιούς ζώνη των ιγκνιμβριτών και των ρυολιθικών τόφφων. Η επίδραση του νερού στην εκδήλωση της αστοχίας αυτής επιβεβαιώθηκε και από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Slide 7.0 (Rocscience Inc.) όπου κατασκευάστηκαν τρία μοντέλα και παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται και φτάνει στην οριακή του τιμή (F=1) όσο αυξάνεται ο συντελεστής R_u της πίεσης των πόρων και διατηρώντας τη συνοχή (c) και τη γωνία τριβής (φ) των γεωυλικών σταθερή.

Βιβλιογραφία

Kilias A., e.a. (2012) 'The Thrace basin in the Rhodope province of NE Greece - A tertiaty supradetachment basin and its geodynamic implications ', *Tectonophysics*.

Kilias, A., Vamvaka, A., Falalakis, G., Sfeikos, A., Papadimitriou, E. and al., e. (2015) 'The Mesohellenic Trough and the Paleogene Thrace Basin on the Rhodope Masif, their Structural Evolution and Geotectonic Significance in the Hellenides', *J Geol Geosci 4:198*.

Marinos, P. and Hoek, E. (n.d) *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proceedings of the GeoEng2000 at the international conference on geotechnical and geological engineering* , Melbourne.

McDowell P., W., Barker, R.D., Butcher, A.P., Culshaw, M.G., Jackson, P.D., McCann, D.M., Skipp, B.O., Matthews, S.L. and Arthur, J.C.R. (2002) *Geophysics in engineering investigations*, London 2002.

Mustafa, Z., Sanlioglu, I. and Ozdemir, A. (2015) 'Monitoring landslides with geophysical and geodetic observations', *Environ Earth Sci*, pp. 6247-6263.

R. Clement, S.M. (2016) 'How should an electrical resistivity tomography laboratory test cell be designed? Numerical investigation of error on electrical resistivity measurement', *Journal of Applied Geophysics*, no. 127, pp. 45-55.

Tsiambaos, G. and Sabatakakis, N. (2004) 'Considerations on strength of intact sedimentary rocks', *Engineering Geology, Elsevier*, pp. 261-273.

Varnes, D.J. (1978) 'Slope Movements And Types And Processes.', *Landslides Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report*, pp. 11-33.

Αποστολόπουλος, Γ. (2013) *Σημειώσεις εφαρμοσμένης γεωφυσικής*, Αθήνα.

Δημάκης, Ε. (1986/89) *Υδρογεωλογικός χάρτης ορεινης περιοχής Ν. Ροδόπης*, Ι.Γ.Μ.Ε.

Κ.Παπαζάχου, Β. (1996) *Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική*, Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ.

Κούκης, Γ.Χ. and Σαμπατακάκης, Ν.Σ. (2007) *Γεωλογία τεχνικών έργων*, Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Μ.Μουντράκης, Δ. (2010) *Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας*, Θεσσαλονίκη: University studio press.

Παπαζάχος, Β. and Παπαζάχου, Κ. (2003) *Οι σεισμοί της Ελλάδας*, ΖΗΤΗ.

Τσελέντης, Ά. and Παρασκευόπουλος, Π. (2013) *Εφαρμοσμένη γεωφυσική*, Αθήνα: Liberal Books.

Χρηστάρας, Β. and Χατζηαγγέλου, Μ. (2011) *Απλά βήματα στην εδαφομηχανική*, Θεσσαλονίκη: University studio press.