



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΦΑΣΟΥΛΑΣ Φ. ΙΩΑΝΝΗΣ
Πτυχιούχος Αγρονόμος – Τοπογράφος Μηχανικός

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
ΠΕΥΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ 'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ',
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: 'ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ'



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2022





ΦΑΣΟΥΛΑΣ Φ. ΙΩΑΝΝΗΣ
Πτυχιούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
ΠΕΥΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
‘Εφαρμοσμένη Γεωλογία’, Κατεύθυνση ‘Τεχνική Γεωλογία’

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 3/5/2022

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Βασίλειος Μαρίνος, Επιβλέπων
Καθηγητής Τσούρλος Παναγιώτης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Αναπληρωτής καθηγητής Βαργεμέζης Γεώργιος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής



© Φασούλας Φ. Ιωάννης, Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΠΕΥΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Ioannis F. Fasoulas, Rural and Surveyor Engineer, 2022

All rights reserved.

ENGINEERING GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL ASSESSMENT ALONG TUNNEL SECTION IN “PEFKA” AREA, THESSALONIKI, BY USE OF GEOPHYSICAL METHODS – *Master Thesis*

Citation:

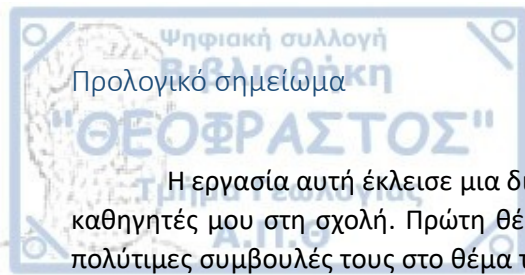
Φασούλας Ι. Φ., 2022. – Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση κατά μήκος της σήραγγας Πεύκων με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 85 σελ.

Fasoulas I. F., 2022. – Engineering geological and geotechnical assessment, along tunnel section in “Pefka” area, Thessaloniki, by use of geophysical methods. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 85 pp.

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.

Εικόνα Εξωφύλλου: Αεροφωτογραφία (2020) της περιοχής έρευνας και του άξονα εφαρμογής της γεωφυσικής μεθόδου, Πεύκα, Θεσσαλονίκη



Προλογικό σημείωμα

Η εργασία αυτή έκλεισε μια διετία στην οποία βοηθήθηκα ιδιαίτερα από συναδέλφους, φίλους και καθηγητές μου στη σχολή. Πρώτη θέση ανάμεσά τους είχαν δυο συναδέλφισσες που με στήριξαν με τις πολύτιμες συμβουλές τους στο θέμα της παρουσίασης της εργασίας αυτής: Η Άννα Κυριακίδου, μια θετική επιστήμονας παραδόξως αποτελούμενη σε μέγιστο βαθμό από απόφιο ανθρώπινο υλικό. Και η Μαρία “Mojo” Ταφτσόγλου, η οποία χάρη στις στοχευμένες οδηγίες της βήμα-βήμα “μεταμόρφωσε” τον αρχικά ασυναρμολόγητο όγκο πληροφοριών μου και με βοήθησε να τον οργανώσω σε μια δομημένη και ευπαρουσίαστη εργασία.

Δεν θα ξεχάσω, όμως, τον πιο σημαντικό συμπορευτή μου και το μεγαλύτερό μου “απόκτημα” από τη θητεία μου στο Τμήμα Γεωλογίας. Αυτό δεν ήταν άλλο από τη γνωριμία και φιλία με τον χαρισματικό και ανεξάντλητο συνάδελφο, Γιάννη Φαρμάκη. Η δική του υποστήριξη σε κάθε δυσκολία των απαιτητικών αυτών σπουδών μου με κράτησε πολλές φορές όρθιο.

Αν δεν τα παράτησα, είναι δικό του έργο.

Τέλος, τη μέγιστη συμβολή είχε ο επιβλέπων της εργασίας μου, κύριος Βασίλης Μαρίνος, ο οποίος μου έδειξε πολύ μεγάλη εμπιστοσύνη. Κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, και παρά το γεγονός ότι δεν διέθετα βασικό πτυχίο γεωλογίας, εκείνος εμπιστεύτηκε την κρίση μου και με όρισε υπεύθυνο παρουσίασης ομαδικών εργασιών. Παρά την υστέρησή μου σε θέματα θεωρίας σε σχέση με όλους τους συναδέλφους μου, εκείνος επένδυσε χρόνο και ενέργεια σεμένα.

Θα του είμαι πάντοτε ευγνώμων και θα τον θαυμάζω. Θα τον θαυμάζω για τον τρόπο που σκαρφάλωνε στα βράχια, παρά τα αμέτρητα πτυχία και τις δημοσιεύσεις του. Γιατί είναι επιστήμονας του “αλωνιού και του σαλονιού”. Για την ατέλειωτη ενέργειά του. Για τον τρόπο που έχει να βρίσκεται κοντά στα “παιδιά του”, ακόμη κι όταν εκείνα φύγουν από την σφαίρα επιρροής του. Για την σχεδόν πατρική του στάση απέναντί στους παλιούς φοιτητές του, με ενημερώσεις για ευκαιρίες μετεξέλιξης, εργασίας κλπ. Και κυρίως, για την παρανοϊκή αφοσίωσή του σε αυτό που κάνει, το απαραίτητο αυτό εφόδιο για οποιαδήποτε ανέλιξη.

Αν μπορούσα να του αφιερώσω μία ρήση διάσημου προσώπου, που πιστεύω ότι τον χαρακτηρίζει, θα ήταν η ακόλουθη:

*“I don't see many people with my dedication, my work, my ethic”
Cristiano Ronaldo*



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός-αντικείμενο

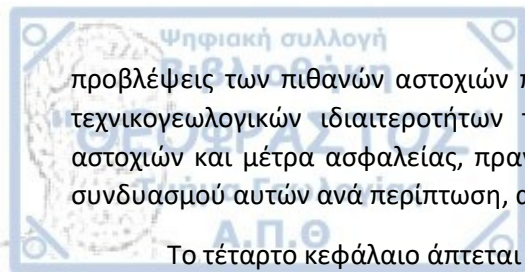
Ελληνική έκδοση

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια προσπάθεια διατομεακής σύμπραξης του τμήματος Γεωλογίας, ανάμεσα στον Τομέα της Εφαρμοσμένης Γεωλογίας (Τεχνικής Γεωλογίας) και τον Τομέα Γεωφυσικής. Το αντικείμενο είναι η προσπάθεια εξακρίβωσης των (τεχνικο)γεωλογικών συνθηκών σε τμήμα της σχεδιαζόμενης σήραγγας Ασβεστοχωρίου στην περιοχή Ρετζίκι (Πεύκα) Θεσσαλονίκης. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα περίπλοκης γεωλογίας περιοχή, εξαιρετικά σύνθετης από άποψη παραμέτρων τεχνικού σχεδιασμού, όπου η συμβατική μέθοδος “χαρτογράφησης” του τεχνικογεωλογικού προφίλ μιας περιοχής αδυνατεί να δώσει ασφαλείς απαντήσεις στα προβλήματα που ανακύπτουν. Το αρχικό γεωλογικό μοντέλο παρουσιάζει ερωτηματικά σε πολλά σημεία του, καθώς ούτε το χαρτογραφικό υπόβαθρο ούτε οι συνεπακόλουθες γεωτρήσεις μπορούν να δώσουν ασφαλείς απαντήσεις σε μια τόσο πολύπλοκης γεωλογίας περιοχή. Οι αρχικοί μας προβληματισμοί αφορούν την ύπαρξη καρστ ή ρηγμάτων, φαινομένων, δηλαδή, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα κατά την εκσκαφή, και τα οποία μπορεί να αλλάξουν ριζικά όλη τη μέθοδο διάνοιξης. Για όλους αυτούς τους λόγους κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η ανάγκη για εμπλουτισμό της έρευνάς μας με πορίσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Περισσότερα για το ζήτημα αυτό θα αναφερθούν στο κεφάλαιο 4 - Γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες σήραγγας.

Εκτός από τον έντονο τεκτονισμό, που δημιουργεί ένα αδιευκρίνιστο μοτίβο διαστρωμάτωσης των γεωλογικών σχηματισμών, εκτός από την πολυφασματικότητα της ποιότητας και κατάστασης βραχομαζών, που δημιουργούν μια ευρεία παλέτα ετερογένειας γεωτεχνικών χαρακτηριστικών, καθ’ όλα ανεπίδεκτη ασφαλούς παραμετροποίησης, η ένδειξη παρουσίας ιδιαιτεροτήτων κάθε είδους, όπως εγκοίλων και ρηγμάτων, και μάλιστα σε μικρή ακτίνα μεταξύ τους, καθιστά επιτακτικό τον συνδυασμό δυνάμεων της συμβατικής “ιχνηλάτησης” του τεχνικογεωλογικού προφίλ με μια κατά το δυνατόν αποδεκτής αξιοπιστίας γεωφυσική μέθοδο, που θα λειτουργήσει επικουρικά μεν, τελεσίδικα δε, σε ζητήματα που άπτονται ερωτημάτων όπως η υδροπερατότητα, οι συνεπαγόμενοι κίνδυνοι εισροών, η ρηγμάτωση και η επακόλουθη μεταβολή γεωλογικής σύστασης στην περιοχή μελέτης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα γίνει μια εισαγωγή στο αμιγώς επιστημονικό κομμάτι. Θα περιγραφεί η **σημασία των γεωφυσικών μεθόδων**, η φύση των γεωφυσικών και οι συναφείς με τον ηλεκτρομαγνητισμό εγγενείς ιδιότητές τους, που καθιστούν δυνατή την εφαρμογή των μεθόδων αυτών για σκοπούς γεωλογικής ερευνητικής εργασίας. Προχωρούμε στο κομμάτι της ηλεκτρομαγνητικής, δηλαδή σε μια απλουστευμένη περιγραφή των θεμελιωδών αρχών θεωρίας διάδοσης του ρεύματος και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το καθαρά επιστημονικό κεφάλαιο κλείνει με μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας σύνδεσης από μαθηματική άποψη των εγγενών αυτών, ηλεκτρομαγνητικής φύσεως παραμέτρων που αναφέρθηκαν, με τη γεωμηχανική. Δηλαδή, στον μαθηματικό μηχανισμό υπολογισμού γεωμετρίας και διαστασιολόγησης σχηματισμών, μέσα από φυσικές και ηλεκτροχημικές ιδιότητες. Στη συνέχεια θα περάσουμε στο στάδιο της **εφαρμογής της ηλεκτρομαγνητικής**. Εκεί θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των γεωφυσικών διασκοπήσεων γενικά και των ηλεκτρικών διασκοπήσεων λίγο πιο συγκεκριμένα. Θα αναλυθούν τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής τομογραφίας έναντι της τομογραφίας με γεωραντάρ, ώστε να γίνει σαφές το γιατί επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος. Επίσης, θα περιγραφούν συνοπτικά οι διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων κατά την εφαρμογή των γεωφυσικών διασκοπήσεων, ώστε να εξηγηθούν στο επόμενο κεφάλαιο οι λόγοι για τους οποίους προκρίθηκε η εκάστοτε επιλεγείσα διάταξη, ανάλογα με το έδαφος και τον σκοπό των μετρήσεων.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα περιγραφεί η **βασική θεωρία γύρω από τη σήραγγοποιία**. Γίνεται σύντομη παρουσίαση του δείκτη αντοχής βραχομάζας (GSI), των βασικών αρχών σήραγγοποιίας, και αναφέρονται οι



προβλέψεις των πιθανών αστοχιών που μπορεί να προκύψουν σε κάθε κομμάτι του έργου, βάσει των τεχνικογεωλογικών ιδιοτήτων του. Παρουσιάζονται συνοπτικά τα διαθέσιμα μέτρα πρόληψης αστοχιών και μέτρα ασφαλείας, πραγματοποιείται η θεωρητική επιλογή τους και η αντιστοίχιση ενός ή συνδυασμού αυτών ανά περίπτωση, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου.

Το τέταρτο κεφάλαιο άπτεται πλέον της ειδικής μας περίπτωσης. Στο πρώτο μισό, περιγράφεται το **πεδίο μελέτης** και η ευρύτερη γεωλογία της περιοχής, πριν γίνει μια πιο λεπτομερής ανάλυση της στοχευμένης μας περιοχής εφαρμογής της μεθόδου, σε μικρή κλίμακα. Εκτός από τη γεωγραφική περιοχή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας σύντομης αυτοψίας με κοντινές φωτογραφίες από το υλικό που αποτελεί τη γεωλογία της περιοχής. Γίνεται μια πρώτη εκτίμηση στις συνθήκες τεμαχισμού, αποσάθρωσης και λοιπών παραγόντων, που σε συνδυασμό με τη φύση του υλικού, συντελούν σε μια ορισμένη ποιότητα βράχου και εδάφους. Με δυο λόγια, γίνεται η πρώτη επαφή μας με το γεωλογικό μοντέλο της περιοχής μελέτης, και μάλιστα με τη συνοδεία ευρημάτων επί του πεδίου. Στο δεύτερο μισό, που είναι και το εκτενέστερο κομμάτι της εργασίας, γίνεται χωρισμός σε **τεχνικογεωλογικές ενότητες**, βάσει όλης της διαθέσιμης βιβλιογραφίας και των ευρημάτων των γεωτρήσεων. Ο χωρισμός αυτός θα τεθεί υπό ερώτηση στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο, οπότε και η ηλεκτρική διασκόπηση θα κληθεί να επιβεβαιώσει, τροποποιήσει ή διαψεύσει τις αρχικές μας προσδοκίες.

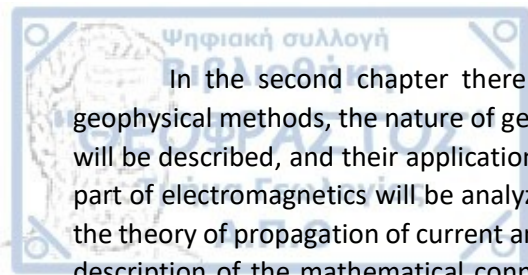
Στο πέμπτο κεφάλαιο θα περιγραφεί η **φάση των μετρήσεων** καθεαυτή. Θα γίνει εκτενής αναφορά στην προετοιμασία, στις ενέργειες που εκτελέστηκαν στο γραφείο, στα σχέδια που καταστρώθηκαν πριν την ημέρα μετρήσεων στις 4 Μαρτίου 2020. Θα παρουσιαστεί η γεωλογική τομή που καταρτίστηκε, με μέθοδο παρεμβολής, μετά από λεπτομερή ανάγνωση και αποτύπωση στο χαρτί των στοιχείων των γεωτρήσεων, της διαδρομής της σήραγγας και του υδροφόρου ορίζοντα. Επειτα, και με τη συνοδεία φωτογραφικού υλικού, θα μιλήσουμε λεπτομερώς για το πώς κύλησε η ημέρα εκείνη της συλλογής των πρωτογενών δεδομένων, για τις καιρικές συνθήκες, τα εμπόδια που εμφανίστηκαν στην πράξη.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο περνάμε στα **πορίσματα και τα συμπεράσματα**. Επιβεβαιώνεται ή τροποποιείται το γεωλογικό μας μοντέλο, προβλέπονται οι πιθανές αστοχίες για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα και προτείνονται τα κατά την κρίση μας κατάλληλα μέτρα υποστήριξης. Η εργασία κλείνει με συνοπτικούς πίνακες των συνοδευτικών εικόνων και λεπτομερή καταγραφή της χρησιμοποιηθείσας βιβλιογραφίας.

English version

The present thesis is a product of cross-sectoral partnership of the Faculty of Geology, between the Department of Applied Geology (Technical Geology) and the Department of Geophysics. The main object is the verification of the engineering geological conditions in a part of the planned tunnel section of Asvestochori in the area of Retziki (Pefka) of Thessaloniki. The targeted area is significantly complex from a geological point of view, as well as in terms of its technical design parameters, where the conventional method of "mapping" the engineering geological profile of an area fails to provide safe answers to the problems that arise. More on this issue will be covered in chapter 4.

In addition to the intense tectonic activity, which creates an unclear pattern of stratification of geological formations, we should also consider the variation of quality and condition of rock masses, which create a wide range of heterogeneity of geotechnical features. Indications of presence of cavities and faults in a close proximity to each other, makes it imperative to combine the conventional "tracking" of the engineering geological profile with a geophysical method of the highest possible reliability, which will work ancillary, for the solution of inquiries such as water permeability and the associated risks of inputs, existence of faults and the consequent modification of geological composition in the study area.



In the second chapter there will be an introduction to the scientific part. The importance of geophysical methods, the nature of geomaterials and their inherent properties related to electromagnetism will be described, and their application for geological research purposes will be highlighted. Further on, the part of electromagnetics will be analyzed – that is, a simplified description of the fundamental principles of the theory of propagation of current and electromagnetic waves. The scientific chapter proceeds with a brief description of the mathematical connection of the aforementioned inherent electromagnetic parameters with geomechanics – namely, the mathematical mechanism of calculating geometry and dimensioning of geoformations through their physical and electrochemical properties. The chapter closes with the various details of application of electromagnetism on the field. There will be a brief description of geophysical surveys in general and electrical surveys a little more specifically. The advantages of electromyography over georadar tomography will be analyzed to make it clear why this method was chosen. Also, the various electrode devices during the application of geophysical surveys will be briefly described, in order to explain in the following chapter the reasons for which the respective device has been chosen, depending on the terrain and the purpose of the measurements.

The third chapter will revolve around the basic theory aspects and basic principles of tunneling, such as the geological strength index (GSI), as well as a categorization of the possible failures that may occur in each part of the project, based on its technical-geological peculiarities. The available failure prevention measures and safety measures, the selection criteria and the assignment of one or a combination of them per case are briefly presented, depending on the requirements of each project.

The fourth chapter regards our special case. In the first half, the location and its wider geology are described, followed by a more detailed analysis of our targeted area of application of the method, on a small scale. In addition, the findings of a brief autopsy are presented, accompanied by close-up photos of the material that constitutes the geology of the area. A first assessment is made of the conditions of shredding, disintegration and other factors, which in combination with the nature of the material, contribute to a certain quality of rock and soil. In short, we make our first contact with the geological model of the study area, and in fact with the accompaniment of findings in the field. In the second half of the chapter – which is the most extensive part of the thesis – a distinction is made into technical-geological sections, based on all available findings through literature and drilling. This separation will be questioned in the very next chapter, at which point the electrical survey will be applied upon to confirm, modify or refute our initial expectations.

The fifth chapter will describe the phase of the measurements per se. Extensive reference will be made to the preparation, to the actions carried out in the office, to the plans drawn up before the day of measurements on March 4, 2020, through detailed decipherment of verdicts regarding drilling procedures, tunnel route, aquifer etc. Then, by means of ancillary photographic material, it will be discussed in detail the collection of primary data, the weather conditions and the obstacles that we have been forced to overcome.

In the sixth and last chapter we move on to the findings and conclusions. Our geological model is confirmed or modified, the possible failures for each technical-geological unit are predicted and the appropriate support measures at our discretion are proposed. The work closes with summary tables of the accompanying images and a detailed record of the bibliography used.

1.2 Μεθοδολογία – Διαθέσιμα στοιχεία και εργαλεία

Τα πρωτογενή δεδομένα, με τα οποία ξεκίνησε η σύνταξη της εργασίας, πριν ακόμη εκτελεστούν οποιεσδήποτε εργασίες πεδίου, περιλάμβαναν:

- ➔ Προηγούμενες εργασίες σχετικά με την περιοχή, οι οποίες αναλύουν από γεωλογικής και παλαιογεωλογικής άποψης την ευρύτερη περιοχή μελέτης (*Γεωλογία της περιρροδοπικής ζώνης στην περιοχή Ευκαρπία – Φίλυρο, Μαΐσουράτζε Λεβάν* (2016), Πτυχιακή εργασία, τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ, Εργαστήριο Τεκτονικής και Στρωματογραφίας)
- ➔ Προηγούμενες επιστημονικές μελέτες σχετικά με τα επίμαχα σημεία του άξονα του άξονα εκσκαφής της σήραγγας, εκεί δηλαδή όπου παρατηρείται ή εικάζεται η ύπαρξη των συνδυαστικών προβλημάτων για τα οποία έγινε λόγος στην προηγούμενη ενότητα (*Assessing Rock Mass Properties for Tunnelling in a Challenging Environment. The Case of Pefka Tunnel in Northern Greece*, Marinos Vassileios et al. (2015) in *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 6*).
- ➔ Τα πλήρη τεύχη γεωερευνητικών εργασιών για τη διάνοιξη των σηράγγων Φιλύρου, Λατομείων, Πεύκων (υπόγεια διάνοιξη) και των C&C Τριαδίου Α' και Τριαδίου Β', από τον Ανάδοχο του έργου, την εταιρεία ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε. Στα τεύχη αυτά συμπεριλαμβάνονται πλήρεις εργαστηριακές καταγραφές όλων τεχνικών και μηχανικών στοιχείων των υλικών που εξήχθησαν από τις γεωτρήσεις που έχουν διεξαχθεί σε μια ακτίνα 1600 μέτρων από την περιοχή. Επιπλέον, τα τεύχη συνοδεύονταν από φωτογραφικό υλικό των ίδιων αυτών εξηγμένων υλικών ("κασάκια"), αρκούντως χρήσιμα και βοηθητικά για την εκτίμηση του τεκτονισμού και της κατάστασης βραχομάζας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.
- ➔ Τοπογραφικά στοιχεία υπό μορφή χαρτών, και συγκεκριμένα μια γεωλογική οριζοντιογραφία της σήραγγας Πεύκων από τον ανάδοχο, ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε., σε κλίμακα 1:1000, καθώς και συνοδευτική εικόνα του άξονα οριζοντιογραφίας από την ψηφιακή χαρτογραφική πλατφόρμα "Google Earth".

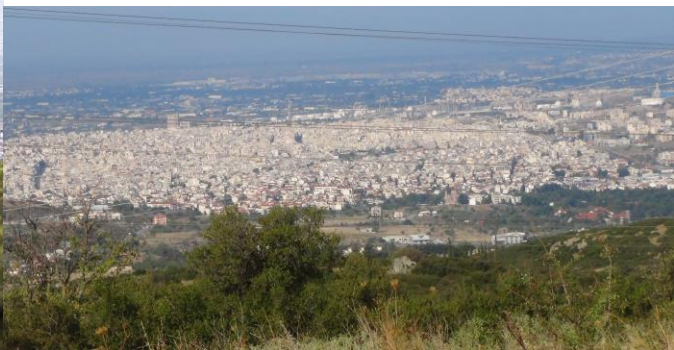
1.3 Η περιοχή έρευνας

Όπως διατυπώθηκε στο κεφάλαιο 1.1, το αντικείμενο της εργασίας είναι η διεξαγωγή μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας κατά μήκος τομής σήραγγας στην περιοχή Πεύκα Θεσσαλονίκης. Πρόκειται για μια ημιαστική περιοχή στα βορειοανατολικά του κυρίου πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης, που συνδυάζει την ύπαρξη δόμησης και ανθρωπογενούς παρουσίας, με φυσικό τοπίο και τις αντίστοιχες μορφές εδάφους.

Οι παρακάτω εικόνες βοηθούν τον αναγνώστη στην κατατόπιση και τον προσανατολισμό του στον χώρο:



Εικόνα 1.1: Η περιοχή έρευνας, σημεισμένη σε κόκκινο πλαίσιο στα ΒΑ του πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης, σε κλίμακα 1:50.000 (πάνω αριστερά), 1:20.000 (πάνω δεξιά) και 1:5.000 (κάτω, με την παράλληλη αποτύπωση του άξονα της σήραγγας και της θέσης των γεωτρήσεων)



Εικόνα 1.2: Η περιοχή έρευνας – άποψη από ΒΔ, Β-ΒΑ και ΒΑ αντίστοιχα.
Λήψεις εικόνων: 29/9/2019 και 5/10/2019

2. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ. ΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

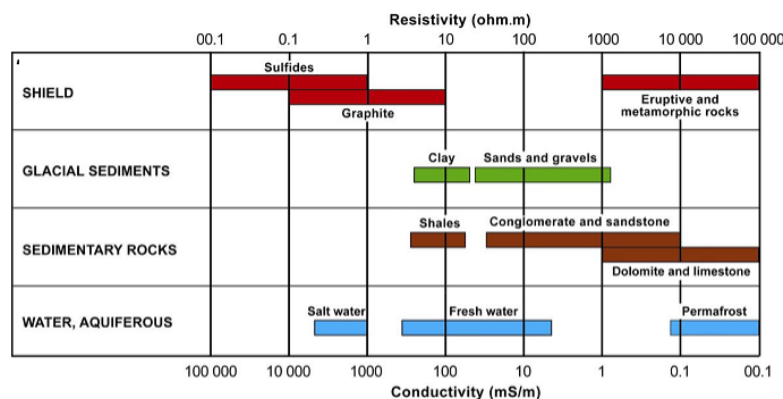
2.1 Εισαγωγή Γεωλογίας

Α.Π.Θ

Γεωφυσικός = γη + φυσική. Όπου γη, μπορούμε να εννοήσουμε τα υλικά της γήινης επιφάνειας. Όπου φυσική, μπορούμε να εννοήσουμε τις “κατασκευαστικές” ιδιότητες των υλικών αυτών, εκείνες που δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες. Τις “εγγενείς” ιδιότητες, ή όπως θα λέγαμε εκλαϊκευμένα, αυτές που τα υλικά “φέρουν από την φύση τους”, ανεξαρτήτως συγκέντρωσης, ποσότητας, συσσώρευσης κλπ. Ιδιότητες όπως οξύτητα, ολκιμότητα, σημείο τήξης και βρασμού, τοξικότητα, αντιδραστικότητα, όλα αυτά χαρακτηρίζουν ένα υλικό *per se*. Η επιστήμη της εφαρμοσμένης γεωφυσικής εκμεταλλεύεται και μετράει τις φυσικές αυτές ιδιότητες, ώστε να καταλήξει σε συμπεράσματα, να χαρακτηρίσει και να αποτυπώσει έναν ορισμένο (υπ)εδάφικό όγκο.

2.2 “Από την φύση τους”: Ειδική αγωγιμότητα και ειδική αντίσταση

Ένα από τα πιο γνωστά φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών είναι η **ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα**, και το ακριβώς αντίστροφο μέγεθος, η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση**. Φέρουν τον χαρακτηρισμό “ειδική”, ώστε να γίνεται εξαρχής σαφές ότι εξαρτώνται αποκλειστικά από τη φύση και τη χημική σύσταση του υλικού, χωρίς να υπεισέρχονται παράγοντες ποσότητας, συγκέντρωσης ή γεωμετρίας. Κάθε υλικό έχει χαρακτηριστικές τιμές των μεγεθών αυτών. Κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Εικόνα 2.1. Η ηλεκτρική αντίσταση (επάνω) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (κάτω), ως χαρακτηριστικό φυσικό μέγεθος ορισμένων υλικών. Στα πλέον αγωγίμα υλικά κατατάσσονται τα άλατα, τα θειικά και τα γραφιτικά, ενώ στα λιγότερο αγωγίμα τα ηφαιστιογενή, οι ασβεστόλιθοι και φυσικά ο πάγος.

(Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου, 5-6)

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ωm.m)
Επιφανειακές Προσχώσεις	80-250
Νεογενή Ιζήματα	
Άργιλοι	2-20
Μάργες	20-60
Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαίκοι Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
Συμπαγής δολομίτης	>104
Πορώδης δολομίτης	100-1000
Αλπικά Ιζήματα	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι - Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500
Πυριγενή και Μεταμορφώμενα Πετρώματα	10 ² -10 ⁶

Εικόνα 2.2. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση πετρωμάτων, εκπεφρασμένη σε εύρη τιμών (Βαφειδής και Αμολοχίτης, 1992)

Όπως παρατηρούμε, σε γενικές γραμμές τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης (άρα είναι τα λιγότερο αγωγίμα), ενώ τα ιζηματογενή τις χαμηλότερες. Τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με έντονες, όμως, τάσεις αλληλεπικάλυψης. Δεν είναι συνεπώς εύκολο να γίνουν ασφαλείς προβλέψεις για αυτά. Πάντως η γενική τάση κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι, από τη χαμηλότερη προς την υψηλότερη, ιζηματογενή-μεταμορφωσιγενή-πυριγενή (Αποστολόπουλος, 2013).

Ειδική αγωγιμότητα και ειδική αντίσταση, λοιπόν, είναι τα δυο πρώτα μεγέθη που πρέπει να κρατήσουμε στη μνήμη μας. Το φυσικό αυτό χαρακτηριστικό έχει "διπλό" πρόσωπο: όσο μεγαλώνει η αγωγιμότητα μικραίνει η αντίσταση, και το αντίστροφο. Στην πραγματικότητα πρόκειται για ένα και το αυτό μέγεθος. Το πρώτο "πρόσωπο" του ενός και του αυτού μεγέθους για το οποίο μιλάμε, εκφράζει τη δυνατότητα του υλικού να επιτρέπει στο ρεύμα να διέρχεται από μέσα του. Το δεύτερο, τη δυνατότητα του υλικού να απαγορεύει το ίδιο ακριβώς φαινόμενο. Η ειδική αγωγιμότητα και η ειδική αντίσταση, λοιπόν, είναι η πρώτη παράμετρος της δουλειάς μας.

2.3 Η εισαγωγή στην “εξίσωση” των πρώτων “μη εγγενών” χαρακτηριστικών: Πορώδες και αλατότητα

Ο λόγος για τον οποίο τα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα συνήθως παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με τα ιζηματογενή, είναι το υψηλό περιεχόμενο των τελευταίων σε νερό και άλλα ρευστά υλικά πλήρωσης. Υπεύθυνο για το φαινόμενο αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό των ιζηματογενών που λέγεται **πορώδες** και σημαίνει την ύπαρξη “κενού χώρου” εντός του πετρώματος, ο οποίος να μπορεί να καταληφθεί από νερό. Η ακόλουθη εμπειρική σχέση, γνωστή και ως νόμος του Archie, συνδέει την ειδική αντίσταση ρ των ιζηματογενών πετρωμάτων και το πορώδες ϕ (Βαφείδης, 2016):

$$\rho = \alpha \rho_w \phi^{-m}$$

όπου ρ_w : η ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος

ϕ : ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος (πορώδες)

α, m : σταθερές (με τιμές κατά προσέγγιση 0,5-2,5 για το α και 1,3-2,5 για το m).

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των ιζηματογενών κυρίως πετρωμάτων επηρεάζεται, λοιπόν, από το πορώδες, αλλά όχι μόνο. Η πλήρωση ενός πετρώματος με νερό δεν είναι αρκετή για την απομείωση της ειδικής του αντίστασης. Όπως παρατηρήσαμε στην εικόνα (1.1), δεν είναι όλοι οι τύποι νερού το ίδιο αγώγιμοι. Το γλυκό νερό (fresh water) έχει μικρότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχέση με το αλατούχο νερό, λόγω της ηλεκτρολυτικής δράσης των αλάτων. Θα πρέπει, συνεπώς, να συνυπολογιστεί και η **περιεκτικότητα του νερού σε διαλυμένα άλατα** (ηλεκτρολυτική αγωγή).

Με το πορώδες και την αλατότητα περνάμε από τα εγγενή χαρακτηριστικά στα “επίκτητα”, δηλαδή σε εκείνα που δεν αφορούν το υλικό καθεαυτό, και που όντως εξαρτώνται από τις συνθήκες και την περιοχή μελέτης. Και αυτό μας δίνει το ιδανικό βήμα για να κινηθούμε ένα στάδιο παραπέρα: Συγκεκριμένα, στη γεωμετρία του σχηματισμού.

2.4 Η εισαγωγή των υπόλοιπων “μη εγγενών” χαρακτηριστικών. Δευτερογενές πορώδες

Μετά το πορώδες και την αλατότητα, ένα τρίτο “επίκτητο” στοιχείο ταυτότητας ενός σχηματισμού αφορά τη γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων, που έχει άμεσο αντίκτυπο στη **συνοχή** τους. Με το πέρασμα του χρόνου, επέρχεται μια συσσώρευση υπερκείμενων στρωμάτων σε έναν σχηματισμό, με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης που ασκείται από τα στρώματα αυτά στα υποκείμενα πετρώματα. Κατά συνέπεια, τα μεγαλύτερης ηλικίας υποκείμενα στρώματα συμπιέζονται, τα “κενά” καλύπτονται, κι έτσι μειώνεται το λεγόμενο **δευτερογενές πορώδες** τους (δηλαδή αυτό που δεν είναι εγγενές στοιχείο ενός πετρώματος, αλλά αφορά την καταπόνηση, τη δομή, τον τεκτονισμό του ανάλογα με τις συνθήκες). Τα συμπίεσμένα αυτά πετρώματα παρουσιάζουν αυξημένη συνοχή, άρα μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Βαφείδης, 2016, Αποστολόπουλος, 2013).

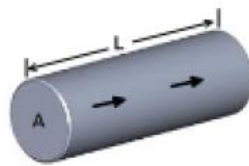
ΠΡΟΣΟΧΗ: Εξαίρεση στον γενικό αυτό κανόνα αποτελούν τα τριτογενή ιζήματα, τα οποία έχουν κατά κύριο λόγο σχηματιστεί σε γλυκό νερό. Αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από τα μεσοζωικά ιζήματα, τα οποία σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό (Βαφείδης, 2016).

Το τελευταίο στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η **θερμοκρασία**. Η υψηλή θερμοκρασία δημιουργεί άτακτη κίνηση ηλεκτρονίων, συνεπώς διευκολύνει τη διέλευση ρεύματος και απομειώνει την

ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Ωστόσο, η τάξη μεγέθους συνεισφοράς του παράγοντα αυτού είναι μικρή, γι' αυτό θεωρούμε σωστό να τον αναφέρουμε τελευταίο.

2.5 Συνδυασμοί υλικών. Μήκη και πάχη. Όταν η “εξίσωση” γίνεται πιο περίπλοκη.

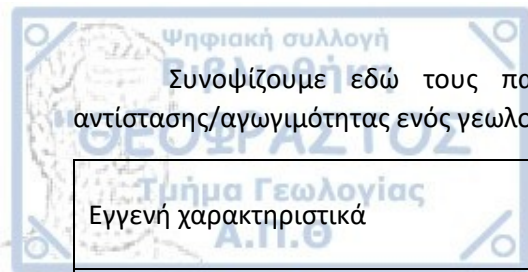
Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση / αγωγιμότητα μας δίνουν τη συνολική ηλεκτρική αντίσταση και ηλεκτρική αγωγιμότητα όταν εισέλθουν οι **παράμετροι γεωμετρίας**. Ένας περισσότερο ή λιγότερο αγωγίμος σχηματισμός που εκτείνεται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο εύρος θα επηρεάσει τη διάδοση του σήματος. Η αγωγιμότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του παρεμβαλλόμενου σχηματισμού (μεγαλύτερη διαδρομή ίσον μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση) και ανάλογη της διατομής του (πιο “φαρδύς” αγωγός σημαίνει μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση).



$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Εικόνα 2.3. Η ηλεκτρική αντίσταση ενός σχηματισμού (R), είναι συνάρτηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υλικού (ρ), αντιστρόφως ανάλογη της διατομής (A), ευθέως ανάλογη του μήκους (L).

Η πραγματικότητα, ωστόσο, κάνει το πρόβλημα αρκετά πιο σύνθετο. Αν οι εδαφικοί σχηματισμοί αποτελούνταν εξ ολοκλήρου από ένα και μοναδικό υλικό, ομοιογενές ως προς τη σύστασή του, και στην ίδια κατάσταση σε όλο το μήκος και το πάχος του, η δουλειά μας θα ήταν υπερβολικά απλή. Μόνο που αυτό δεν ισχύει. Οι σχηματισμοί είναι πολύπλοκοι, αποτελούνται από συνδυασμούς υλικών σε διάφορα, ακανόνιστα μήκη και πάχη, με μεταβαλλόμενη διατομή, κερματισμό, πλήρωση με νερό ή άλλα υλικά που αυξάνουν ή απομειώνουν την αγωγιμότητα. Τελικά η επίλυση της αποτύπωσης ενός εδαφικού σχηματισμού με γεωφυσικές μεθόδους αποτελεί ένα είδος “γρίφου”, αφού μια τιμή ηλεκτρικής αντίστασης σχηματισμού μπορεί να αντιστοιχεί σε πρακτικά άπειρους συνδυασμούς. Για τον λόγο αυτό, η ηλεκτρική διασκόπηση μπορεί να λειτουργήσει μόνο επικουρικά, και όχι αυτόνομα. Μπορεί να λειτουργήσει σε συνδυασμό με πρότερη γνώση του πεδίου, με μια προσεγγιστική εικόνα των υλικών και των σχηματισμών. Γι' αυτό θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και άλλα δεδομένα, όπως γεωτρήσεις, γεωλογικούς χάρτες κλπ. Γι' αυτό θα μιλήσουμε αργότερα.



Συνοψίζουμε εδώ τους παράγοντες που λαμβάνουμε υπόψη για τον υπολογισμό της αντίστασης/αγωγιμότητας ενός γεωλογικού σχηματισμού:

Εγγενή χαρακτηριστικά	Χαρακτηριστική αντίσταση/αγωγιμότητα υλικού
	Πρωτογενές πορώδες
Επίκτητα χαρακτηριστικά	Δευτερογενές πορώδες
	Αλατότητα
	Βαθμός συμπίεσης
	Θερμοκρασία
Γεωμετρία	Μήκος σχηματισμού
	Πάχος (διατομή) σχηματισμού
	Συνδυασμοί υλικών

2.6 Βασικές αρχές της ηλεκτρικής τομογραφίας

Η μέθοδος της **ηλεκτρικής τομογραφίας** εφαρμόζει τη δημιουργία τεχνητού ηλεκτρικού πεδίου για την ανίχνευση των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1. Η αρχή των ηλεκτρικών διασκοπήσεων είναι η διοχέτευση ρεύματος στο υπέδαφος, ώστε μέσα από τις ταχύτητες διέλευσης από τους εδαφικούς σχηματισμούς να προσδιοριστεί η σύσταση των τελευταίων. Το ρεύμα που χρησιμοποιείται πρακτικά είναι συνεχές. Το μετρήσιμο μέγεθος, λοιπόν, για να καταλήξουμε εκεί που θέλουμε, είναι η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση**. Υψηλή αγωγιμότητα σχηματισμού ίσον υψηλή ταχύτητα διέλευσης ρεύματος, και το αντίστροφο.

Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, όπως το γεωραντάρ, η ηλεκτρική διασκόπηση μπορεί να μην υπερτερεί στο σημείο της λεπτομερούς απεικόνισης του υπεδάφους, καθώς είναι μέθοδος σχετικά χαμηλής διακριτικής ικανότητας. Τα αποτελέσματά της είναι συγκρίσιμα ως προς την ακρίβεια ακόμα και με τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων.

ΠΡΟΣΟΧΗ: "Συγκρίσιμα" σημαίνει ικανοποιητικά, αν και βέβαια όχι απολύτως ισάξια. Οι γεωτρήσεις είναι η πλέον ακριβής και αντιπροσωπευτική μέθοδος, η οποία, όμως, έχει το μειονέκτημα ότι παρέχει δεδομένα "σημειακά", εντοπισμένα μόνο σε ένα ορισμένο σημείο του χάρτη. Οι ηλεκτρικές διασκοπήσεις παρέχουν τον καλύτερο συνδυασμό ακρίβειας και εύρους γεωγραφικής κάλυψης, χωρίς όμως να πιάνουν το "άριστα" σε κανένα από τα δυο ζητούμενα.

Η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στις τρεις διαστάσεις, εντοπίζοντας έτσι ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως **ρήγματα ή καρστ (έγκοιλα)**, η φύση των οποίων θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα. Λόγω της μεγάλης αγωγιμότητάς τους, οι σχηματισμοί με **υδάτινους όγκους** είναι οι πιο κατάλληλοι για την εφαρμογή της μεθόδου, ενώ για τον ακριβώς αντίστροφο λόγο, η μέθοδος των ηλεκτρικών διασκοπήσεων ενδείκνυται και για σχηματισμούς που είναι γεμάτοι με **αέρια και κενό**, αφού θα εμφανίσουν απότομα "ελάχιστα" στην αγωγιμότητα. Για τις πιθανές ιδιαιτερότητες της γεωλογίας μιας περιοχής και το τι μπορεί να σημαίνει γεωλογικά μια μεταβολή στη μέτρηση της αγωγιμότητας θα μιλήσουμε εκτενέστερα παρακάτω, όταν θα μπορούμε στο κομμάτι της εργασίας που άπτεται της καθαυτό γεωλογίας και όχι της ηλεκτρικής φυσικής.

Τέλος, λόγω της διεισδυτικής της ικανότητας, η ηλεκτρική τομογραφία ενδείκνυται για διασκοπήσεις σε μεγαλύτερα βάθη, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, όπως το γεωραντάρ, για την οποία επίσης θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε κατοπινότερη ενότητα, στα πλαίσια της διερεύνησης του γιατί προτιμήθηκε η ηλεκτρική διασκόπηση από άλλες μορφές γεωφυσικών διασκοπήσεων.

2.7 Σχεδιασμός

Το ζητούμενο είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Για να φτάσουμε εκεί, χρειαζόμαστε ταχύτητες διέλευσης ρεύματος, και για να φτάσουμε σε αυτές, με τη σειρά τους, χρειαζόμαστε τη **διαφορά δυναμικού (dV) του ρεύματος**. Πρόκειται για ένα βαθμωτό (μη διανυσματικό) μέγεθος, που σημαίνει ότι μια απλή ανάγνωση αριθμητικής τιμής μπορεί να κάνει τη διαδικασία μας να ξεκινήσει. Συνεπώς, το πρωτογενές μας δεδομένο στο πεδίο το λαμβάνουμε από ένα βολτόμετρο.

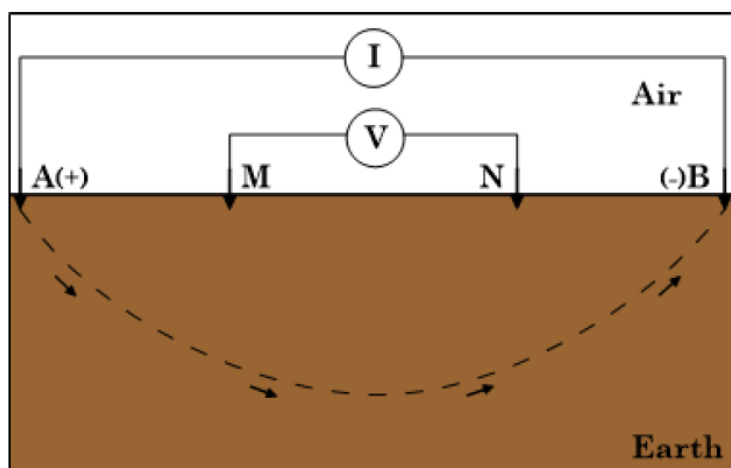
Η διαφορά δυναμικού σχετίζεται με όλα αυτά που μας ενδιαφέρουν μέσω της σχέσης:

$$E = dV/dr$$

όπου r η απόσταση σε κάθε σημείο του πεδίου από την πηγή του κύματος. Για ομογενή γη αποδεικνύεται ότι το δυναμικό σε απόσταση r , για ρεύμα μέσα στη γη είναι:

$$V = \rho * I / 2\pi r$$

Η σχέση αυτή μας καθιστά ικανούς να συσχετίσουμε άμεσα τις (μετρούμενες) αναγνώσεις του βολτομέτρου και την (γνωστή) απόσταση ενός υπεδάφικου σημείου από την πηγή με την (ζητούμενη) ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Με το V (τάση) να μετράται και το I (ένταση) να είναι γνωστό εξ αρχής (αφού εμείς δημιουργούμε το ηλεκτρικό πεδίο) προκύπτει μια συνάρτηση (ρ, r), μέσα από την οποία μπορούμε σε κάθε σημείο του υπεδάφους της περιοχής μελέτης να υπολογίσουμε την ειδική αντίσταση ρ .



Εικόνα 2.4. Απλουστευμένη απεικόνιση διαδρομής ηλεκτρικού ρεύματος στο πεδίο
(Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου)

Έστω δυο ζεύγη ηλεκτροδίων στο έδαφος, A και B, όπου A, B οι πηγές ρεύματος και M, N τα ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού σε σημεία του εδάφους που ενδιαφέρουν (π.χ. εκτιμώμενα όρια σχηματισμών). Με βάση την τελευταία σχέση, το δυναμικό στα σημεία M και N του εδάφους θα είναι το αλγεβρικό άθροισμα του δυναμικού που προκαλείται από τις πηγές ρεύματος A και B. Το μόνο στοιχείο που διαφοροποιείται είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων μέτρησης από τις πηγές.

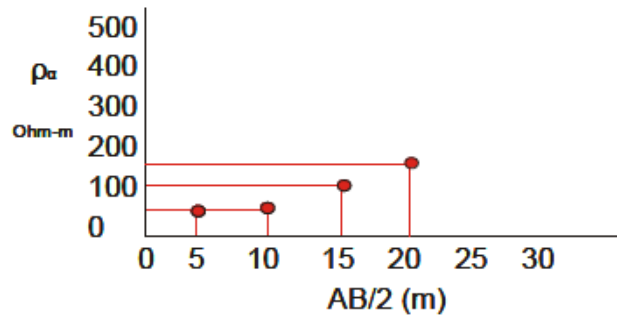
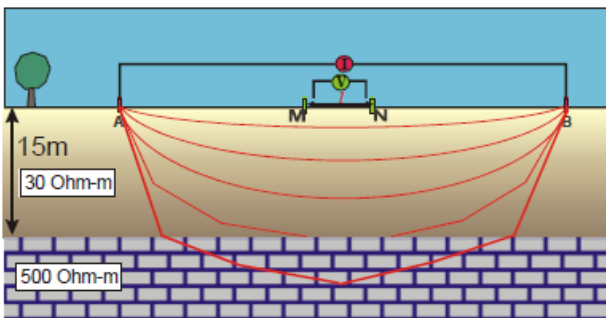
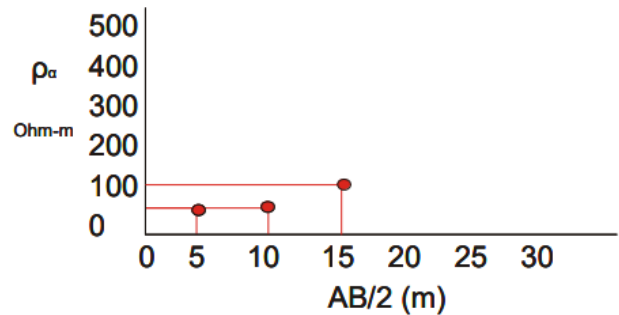
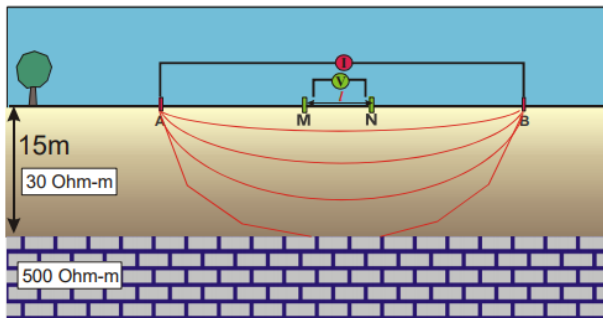
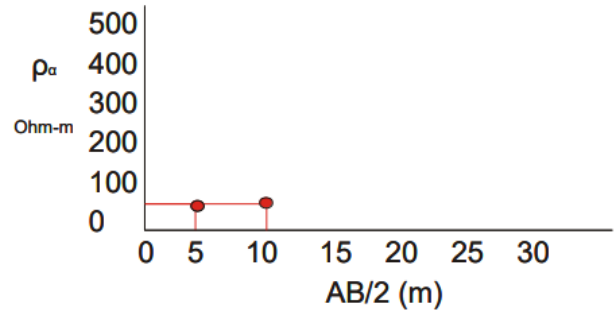
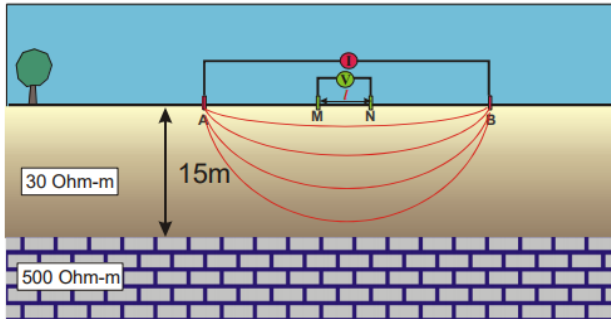
$$V_M = \left(\frac{\rho}{2\pi}\right)\left(\frac{I}{AM} - \frac{I}{BM}\right)$$

$$V_N = \left(\frac{\rho}{2\pi}\right)\left(\frac{I}{AN} - \frac{I}{BN}\right)$$

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδαφικού σχηματισμού που περικλείεται από τα Μ,Ν ισούται συνεπώς με:

$$\rho = \left(\frac{2\pi \Delta V}{I} \right) \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \right)$$

2.8 Η επεξεργασία

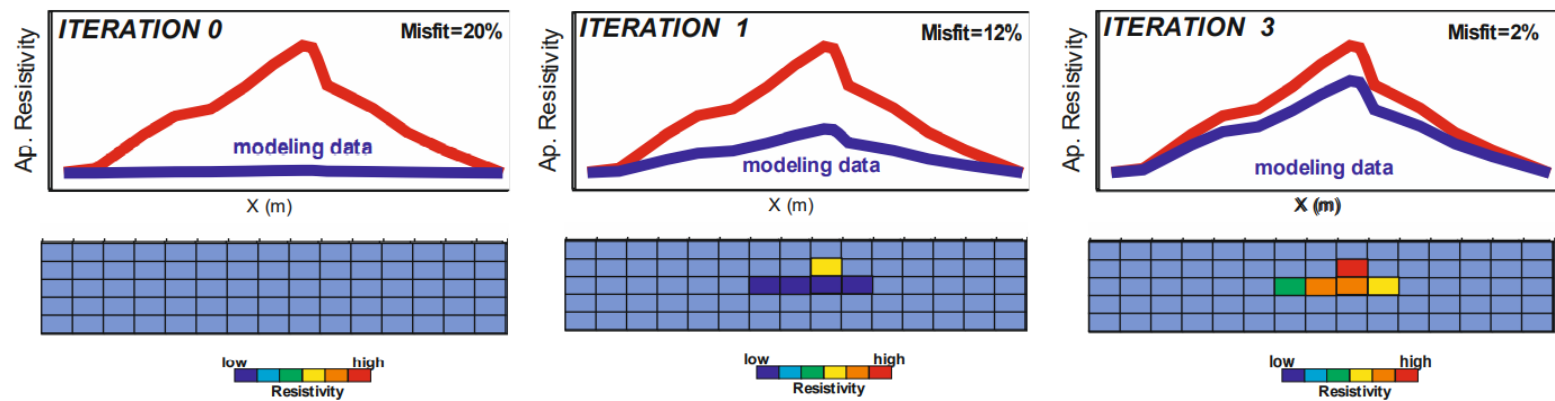


Εικόνα 2.5: Η πολλαπλότητα των οδών διέλευσης του ρεύματος και ο υπολογισμός του βάθους αλλαγής σχηματισμού (Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου, σ. 21)

Η πολλαπλότητα των οδών διέλευσης του ρεύματος είναι ακριβώς αυτή που μας δίνει τις επιθυμητές πληροφορίες διαμόρφωσης του γεωλογικού σχηματισμού. Μετά την εξαγωγή παρατηρήσεων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης **καταρτίζεται ένα σχετικό διάγραμμα απόστασης-αντίστασης**. Οι πιο κοντινές αποστάσεις, αφορούν πληροφορίες από μικρότερα βάθη, ενώ όσο αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων τόσο η πληροφορία προέρχεται από μεγαλύτερα βάθη. Όσο παρεμβάλλεται ένας ομοιογενής σχηματισμός, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση θα παραμένει σταθερή, συνεπώς το διάγραμμα (απόσταση / αντίσταση) θα παραμένει μια (σχετικά) ευθεία (σχετικά) παράλληλη προς τον άξονα x'x (εικ. 2.4α).

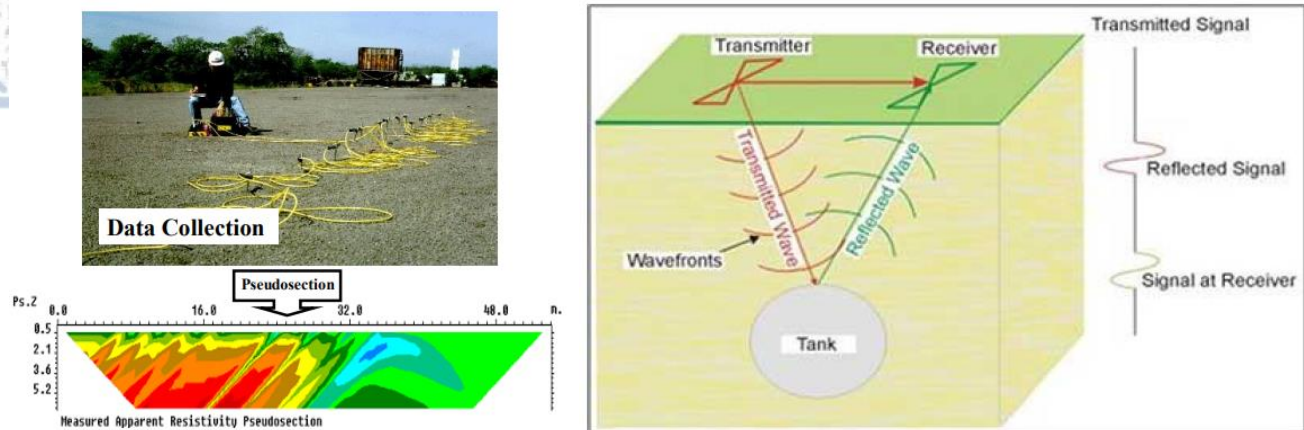
Μόλις παρεμβληθεί διαφορετικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων σχηματισμός, τότε η ειδική αντίσταση αλλάζει. Το σημείο αλλαγής κλίσης-καμπής υποδηλώνει το βάθος στο οποίο εντοπίζεται η αλλαγή σχηματισμού (εικ. 2.4β). Για όσο βάθος η νέα αυτή κλίση του διαγράμματος (απόσταση / αντίσταση) διατηρείται, ξέρουμε ότι παραμένουμε στον ίδιο (νέο) σχηματισμό, οπότε μπορούμε να προσδιορίσουμε έμμεσα και το βάθος και το πάχος του (εικ. 2.4γ).

Για την εξαγωγή του τελικού μοντέλου κατανομής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, το άμεσο ζητούμενο είναι, φυσικά, να προσεγγίζει κατά το βέλτιστο τις μετρηθείσες τιμές (κατά το βέλτιστο σημαίνει “με τις μικρότερες δυνατές αποκλίσεις ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ”). Η διαδικασία αυτή είναι επαναληπτική (iterative): Αυτό σημαίνει ότι από μια χονδροειδή, υπεραπλουστευμένη εκτίμηση (ομοιογενής γεωλογικός σχηματισμός), που φυσικά απέχει παρά σάγγας από την πραγματικότητα, πραγματοποιούμε σταδιακές διορθώσεις, βήμα-βήμα, ώσπου να καταλήξουμε στο μοντέλο εκείνο που να “ταιριάζει” καλύτερα με τις μετρήσεις (να ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, όπως λέμε στη γλώσσα της στατιστικής). Η επαναληπτική διαδικασία σταματά όταν το σφάλμα πέσει κάτω από ένα όριο, συνήθως ορισμένο αυθαίρετα από τον μελετητή (εμάς) ανάλογα με τις ανάγκες ακρίβειας της εκάστοτε εργασίας.



Εικόνα 2.6: Τα βήματα της επαναληπτικής διαδικασίας προσδιορισμού της υπεδαφικής μορφής από τις μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Από τη χονδρική, σαφώς υπεραπλουστευτική προσέγγιση, καταλήγουμε με προοδευτικές τροποποιήσεις στο μοντέλο εκείνο που “απέχει” ελάχιστα από την πραγματικότητα (Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου, σ. 40 εξ.)

2.9 Γιατί ERT; Η ηλεκτρική τομογραφία σε σύγκριση με τη μέθοδο γεωραντάρ

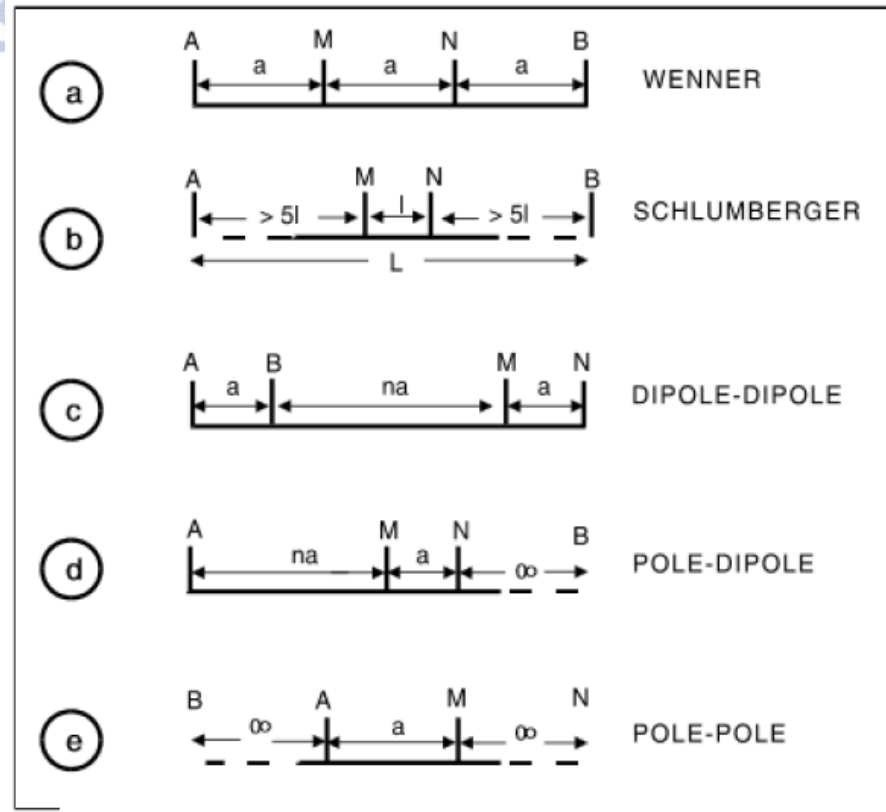


Εικόνα 2.7: Η επιλεγείσα μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας (αριστερά) σε σχέση με τη μέθοδο γεωραντάρ (δεξιά). (Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου)

Πριν προχωρήσουμε, κρίνουμε σκόπιμο να αναφέρουμε γιατί επελέγη η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας σε σχέση με άλλες γεωφυσικές διασκοπήσεις, και συγκεκριμένα τη μέθοδο του γεωραντάρ.

Η μέθοδος γεωραντάρ δεν λειτουργεί με ηλεκτρικά σήματα, αλλά με ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ανακλώνται ή περιθλώνται ανάλογα με τις ανομοιομορφίες του σχηματισμού. Μία κεραία λειτουργεί σαν πομπός, ο οποίος εκπέμπει έναν μικρής διάρκειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό που ανακλάται από εμπόδια κάτω από την εδαφική επιφάνεια και κατόπιν λαμβάνεται από κεραία δέκτη. Η μεγάλη διαφορά της μεθόδου γεωραντάρ με την ηλεκτρική τομογραφία, εξαιτίας της οποίας δεν προτιμάται η συγκεκριμένη μέθοδος, είναι η υψηλή συχνότητα των Η/Μ κυμάτων. **Υψηλή συχνότητα ίσον υψηλή διακριτική ικανότητα, αλλά χαμηλή διεισδυτικότητα.** Προτιμάται έναντι της ηλεκτρικής τομογραφίας όταν θέλουμε αποτυπώσεις μεγάλης ακρίβειας σε μικρά βάθη, το οποίο στην περίπτωση μας δεν συμβαίνει.

2.10 Οι διατάξεις των ηλεκτροδίων στη μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας



Εικόνα 2.8: Οι δημοφιλέστερες διατάξεις ηλεκτροδίων στην ηλεκτρική διασκόπηση (Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου)

α) Διάταξη Wenner: Διαιρούμε την απόσταση μεταξύ των δυο πηγών σε ισομήκη ευθύγραμμα τμήματα και τοποθετούμε μετρητές δυναμικού στα άκρα του καθενός από αυτά. Πρόκειται για μια απλή διάταξη, κατάλληλη για καλώς στρωματωμένους σχηματισμούς, χωρίς ιδιαίτερες περιπλοκές, με ομοιόμορφη κατανομή αντίστασης. Στην περίπτωση αυτή η φαινόμενη αντίσταση είναι:

$$\rho_a = 2\pi a \left(\frac{\Delta V}{I} \right)$$

β) Διάταξη Schlumberger: Η απόσταση των μετρητών από τις πηγές αυξάνει, ενώ η μεταξύ τους απόσταση μειώνεται σημαντικά. Είναι προφανώς η επιλέξιμη διάταξη στις περιπτώσεις όπου υποπτευόμαστε σημαντικές διαφορές αγωγιμότητας σε λεπτούς, μικρού πάχους σχηματισμούς. Η φαινόμενη αντίσταση ισούται με:

$$\rho_a = \left(\frac{\pi(L^2)}{2l} \right) \left(\frac{\Delta V}{I} \right)$$

γ) Διάταξη διπόλου-διπόλου: Οι πηγές βρίσκονται σε μια μικρή απόσταση (a) μεταξύ τους, στην ίδια απόσταση βρίσκονται και οι μετρητές, η δε απόσταση μεταξύ πηγών και μετρητών είναι κατά πολύ μεγαλύτερη, συνήθως κατά ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του a. Είναι εξαιρετικά χρήσιμη διάταξη στον υπολογισμό απότομων εγκάρσιων αλλαγών της αγωγιμότητας (π.χ. στην περίπτωση κάποιου ρήγματος),

αλλά θα πρέπει να χρησιμοποιείται με φειδώ, καθώς η μεγάλη απόσταση από τις πηγές προκαλεί χαμηλής ποιότητας ληφθέν σήμα (λόγω της αλλοίωσης που προκαλεί ο “θόρυβος”, το γνωστό Signal-To-Noise-Ratio).

$$\rho_a = \left(\frac{\Delta V}{I}\right) \pi a n(n+1)(n+2)$$

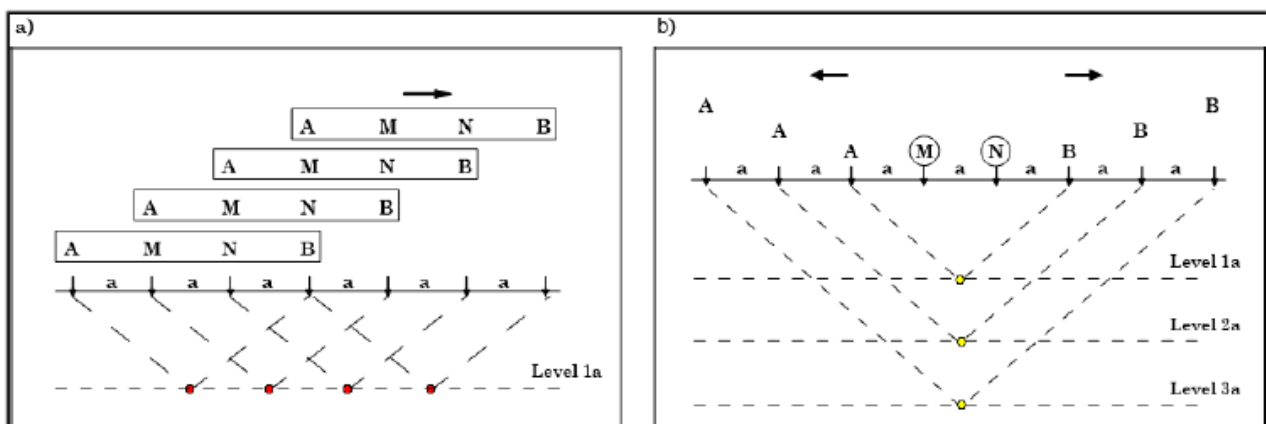
d) Διάταξη πόλου-διπόλου: Χαρακτηριστικών παρόμοιων με τη διάταξη Schlumberger, με τη διαφορά ότι η μια από τις δυο πηγές απέχει πολύ μεγάλη (πρακτικά “άπειρη”) απόσταση από το δίπολο, ώστε μόνο ο ένας πόλος επηρεάζει άμεσα (εξ ου και η ονομασία “πόλου-διπόλου”). Ο απομακρυσμένος πόλος απαιτεί βεβαίως κάποια πρόσθετη εργασία και ιδιαιτέρως κάποια απώλεια χρόνου και κάποιο ρίσκο ασφαλείας λόγω της μεγάλης απόστασης τοποθέτησής του, όμως το συγκριτικό του πλεονέκτημα είναι η υψηλή ανάλυση, καθώς με το μεγάλο εύρος τιμών που λαμβάνει το δυναμικό στην μεγάλη απόσταση μεταξύ πηγών, χαρτογραφείται η περιοχή που μας ενδιαφέρει πολύ ακριβέστερα και λεπτομερέστερα. Η φαινόμενη αντίσταση ισούται με:

$$\rho_a = \frac{\left(\frac{\Delta V}{I}\right) (2\pi ab)}{b - a}$$

e) Διάταξη πόλου-πόλου: Ένας μετρητής σε απόσταση a από μια πηγή, ο δεύτερος μετρητής καθώς και η δεύτερη πηγή σε πάρα πολύ μεγάλη, πρακτικά άπειρη, απόσταση. Η φαινόμενη αντίσταση ισούται με:

$$\rho_a = 2\pi a \left(\frac{\Delta V}{I}\right)$$

Για να χαρτογραφήσουμε ολόκληρη περιοχή θα πρέπει να εφαρμόσουμε μετακινήσεις των διατάξεων και διαδοχικές αναγνώσεις. Οι **πιθανοί μηχανισμοί κίνησης** των ηλεκτροδίων μπορεί να είναι είτε παράλληλοι με την εδαφική επιφάνεια, όπως στο σχήμα α, κάτι που διευκολύνει την οριζοντιογραφική αποτύπωση σε πεπερασμένο βάθος (οριζόντια συνιστώσα), είτε να περιλαμβάνουν σταδιακή απομάκρυνση των πηγών ρεύματος κατά ένα ορισμένο βήμα, κάτι που θα εξυπηρετήσει το μεγαλύτερο βάθος καταγραφής (κατακόρυφη συνιστώσα). Στην πράξη και για την εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) εφαρμόζεται συνδυαστική μέθοδος των δυο.



Εικόνα 2.9: Η διάταξη Wenner σε μια σχηματική περιγραφή.

Ο υπεδαφικός σχηματισμός σαρώνεται πάνω σε παράλληλο άξονα κίνησης και χαρτογραφείται σε διάφορα βάθη.

2.11 Τα υπέρ και τα κατά κάθε διάταξης ηλεκτροδίων

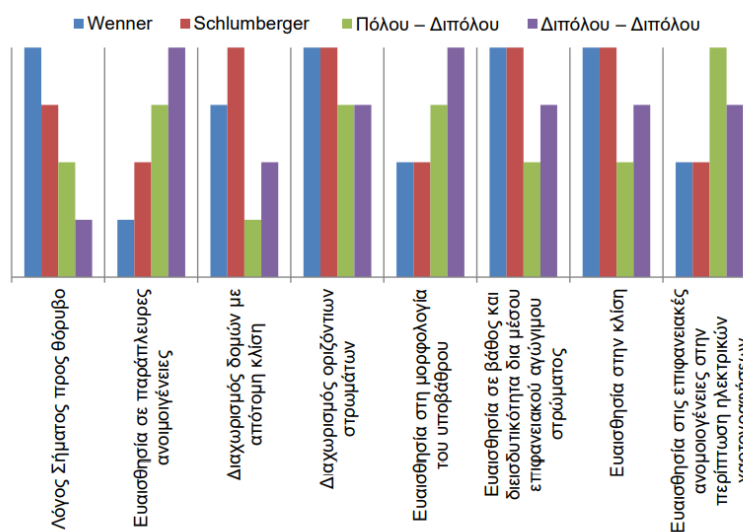
Οι παράγοντες και τα κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν για την επιλογή μιας διάταξης ηλεκτρικής διασκόπησης είναι:

1. Λόγος σήματος προς θόρυβο: Το λεγόμενο S/N (Signal-to-Noise ratio) είναι η “αναγνωσιμότητα” του σήματος, δηλαδή η ικανότητά του να παρέχει πληροφορία απομονωμένη από παρεμβολές και από “παράσιτα”. Χονδρικά, θα λέγαμε ότι είναι το μέτρο της αξιοπιστίας του. Αυτό εξασφαλίζεται με μια κοντινή σχετικά απόσταση των ηλεκτροδίων μεταξύ τους, μικρότερης τάξης μεγέθους σε σχέση με την απόσταση από τις πηγές, και άρα οι ενδεδειγμένες διατάξεις είναι: πόλου-διπόλου, Schlumberger, διπόλου-διπόλου.

2. Ευαισθησία σε οριζόντιες ανομοιογένειες. Πρόκειται για μια αυξημένη ικανότητα ανάγνωσης ανωμαλιών στον οριζόντιο άξονα, δηλαδή κατά πλάτος και όχι κατά βάθος της περιοχής μελέτης. Αρκετά σημαντική παράμετρος, όταν έχουμε να περιμένουμε ρήγματα στην περιοχή μελέτης (που, στην περίπτωσή μας, έχουμε). Οι πλέον ευαίσθητες στην παράμετρο αυτή είναι η διάταξη διπόλου-διπόλου, με αυτές των Wenner και Schlumberger να υστερούν.

3. Ευαισθησία σε βάθος: Εν αντιθέσει με την προηγούμενη παράμετρο, άλλες διατάξεις είναι πιο “διορατικές” σε ό,τι αφορά τις ανωμαλίες ανάλογα με το βάθος, όχι με το πλάτος του σχηματισμού, δηλαδή λειτουργούν πιο αποτελεσματικά σε ό,τι αφορά τον κατακόρυφο άξονα. Είναι εξαιρετικές όταν περιμένουμε υποκείμενο σχηματισμό σαφώς διαφορετικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, καθώς και καρστ ή πληρωμένους με νερό σχηματισμούς, που να εμφανίζουν μεγάλης τάξης μεγέθους διαφοροποίηση σε σχέση με τα υπερκείμενα. Όπως είδαμε στην εικόνα 2.9, η βυθοσκόπηση επιτυγχάνεται με προοδευτική απομάκρυνση των ηλεκτροδίων μεταξύ τους, κάτι που καθιστά ιδανικές για την τρίτη αυτή παράμετρο τις διατάξεις Schlumberger και Wenner, και λιγότερο ευνοϊκή την διάταξη διπόλου-διπόλου (το αντίστροφο ακριβώς, δηλαδή, με όσα ισχύουν για την ευαισθησία σε οριζόντιες ομοιογένειες).

4. Βάθος διασκόπησης: Προσοχή, να μη συγχέεται με το αμέσως προηγούμενο. Δεν πρόκειται για την ευαισθησία επί κατακόρυφου άξονα, αλλά για τη συνολική διεισδυτική ικανότητα της διάταξης. Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται κυρίως από την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, που σημαίνει ότι η διάταξη πόλου-διπόλου θα είχε ένα σαφές προβάδισμα έναντι των υπολοίπων.



Εικόνα 2.10: Τα υπέρ και τα κατά των διαφόρων διατάξεων σε συγκριτική συμπαράθεση (Αποστολόπουλος, 2013)

3. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Περνάμε στο κομμάτι του τεχνικού έργου. Πριν αναφερθούμε ειδικά στα σχετικά με τη σήραγγοποιία, θα χρειαστεί να κάνουμε μια εισαγωγή σε μια παράμετρο πολύ σημαντική για κάθε μελέτη τεχνικής γεωλογίας, τον δείκτη αντοχής βραχομάζας, το περίφημο GSI.

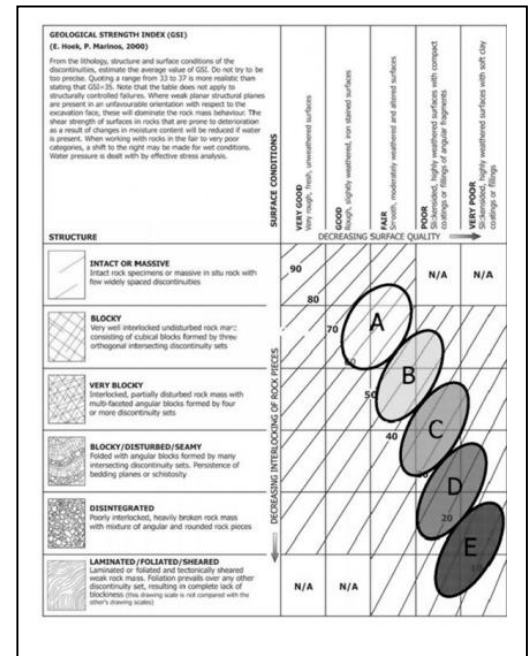
3.1 Ποιότητα βραχομάζας. Δείκτης GSI

Το GSI (Geological Strength Index) είναι ένας δείκτης αντοχής βραχομάζας, που αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο κατά τον σχεδιασμό τεχνικών έργων, και εν προκειμένω, σήραγγων. Η αντοχή, η ποιότητα, δηλαδή, της βραχομάζας αποτελεί συνάρτηση δυο παραμέτρων, **του βαθμού κερματισμού και της ποιότητας των ασυνεχειών**. Η μαζώδης δομή ανυψώνει το GSI, ενώ ο υψηλός κερματισμός το ταπεινώνει. Ασυνέχειες και ρωγμώσεις τραχείες και ανεπηρέαστες από αποσάθρωση και διάβρωση υψώνουν το GSI, ενώ λείες και αποσαθρωμένες επιφάνειες σχηματισμών το απομειώνουν.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		VERY GOOD Very rough, fresh, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coating or fillings of angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
		DECREASING SURFACE QUALITY				
	INTACT OR MASSIVE- Intact rock specimens or massive in-situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
	BLOCKY - Well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70			
	VERY BLOCKY - Interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60			
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity		50			
	DISINTEGRATED - Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces		40			
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of the weak schistosity or shear planes		30			
			20			
			10			
		N/A	N/A			

Εικόνα 3.1: Υπολογισμός του GSI (Marinos, 2011).

Ανάλογα με τον αριθμό GSI που θα αποδοθεί σε κάθε βραχομάζα, προκύπτουν πέντε ομάδες ποιότητων, που φαίνονται στο διπλανό σχεδιάγραμμα. Σε αυτές τις ομάδες ποιότητας κατατάσσουμε και εμείς τους δικούς μας σχηματισμούς. Για την κατάταξή τους απαιτείται λοιπόν η αναδρομή στις επίμαχες γεωτρήσεις και στα ευρήματα από τα λεγόμενα “κασάκια”. Αυτή η απαίτηση θα ικανοποιηθεί στην ενότητα 4, και συγκεκριμένα στην υποενότητα “Γεωτρήσεις” της ενότητας 4.2 (Στοχευμένη γεωλογία).



3.2 To TBC

Η σθηραγγοποιία είναι μια λεπτή και ευαίσθητη εφαρμογή. Εξαρτάται και αυτή με τη σειρά της από δυο μείζονες παράγοντες. Ο ένας είναι, ασφαλώς, η **ποιότητα της βραχομάζας** (βλ. ενότητα 3, ειδικά το κομμάτι “δείκτης GSI”). Ο άλλος, και το τονίζουμε πολύ προσεκτικά, είναι το **ύψος των υπερκειμένων**. Πράγματι, μπορούν να εμφανιστούν προβλήματα εντελώς διαφορετικής φύσεως (στην ίδια ποιότητα βραχομάζας), αν πάνω από τη μηχανή εκσκαφής βρίσκονται δέκα, εκατό ή χίλια μέτρα υλικού. Το παρακάτω διάγραμμα συμπεριφοράς σήραγγας (**Tunnel Behaviour Chart, TBC – Marinos, 2012**) που κατασκευάστηκε βασισμένο σε δεδομένα από την φάση κατασκευής 62 σηράγγων στην Εγνατία Οδό, θα μας δώσει μια πρώτη χονδρική εικόνα. Το όριο διαχωρισμού χαμηλού και υψηλότερου ύψους υπερκειμένων ορίζεται από το διάγραμμα.

TUNNEL BEHAVIOUR CHART (TBC) FOR ROCK MASSES (V. Marinos)*										
ROCK MASS STRUCTURE (As in GST, Hoek & Marinos, 2000)	OVERBURDEN (H) (Rock masses for up to several hundreds metres**)									
	Small overburden				Large overburden					
	INTACT ROCK STRENGTH (σ_c) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa Low σ_c		High σ_c		INTACT ROCK STRENGTH (σ_c) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa Low σ_c		High σ_c			
					OVERBURDEN (H) LIMIT: ~ 150 m					
	INTACT OR MASSIVE Intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities									
	BLOCKY Well interlocked undisturbed rock mass consisting of blocks formed by three orthogonal intersecting discontinuity sets									
	VERY BLOCKY Interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets									
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity. It is understood that the rock mass is disturbed and anisotropy can be developed									
	DISINTEGRATED Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces									
	LAMINATED/FOLIATED/SHEARED Laminated or foliated and tectonically sheared weak rock mass. Foliation prevails over any other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness (this drawing scale is not compared with the other's drawing scales)									

Εικόνα 3.2: To Tunnel Behaviour Chart – TBC (Marinos, 2012).

Στο κόκκινο πλαίσιο περικλείονται οι περιπτώσεις που μας ενδιαφέρουν στην παρούσα μελέτη, διότι το υπερκείμενο είναι πολύ μικρής τάξης μεγέθους.

Το TBC δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές με πολύ υψηλά υπερκείμενα, διότι οι σήραγγες, από τα δεδομένα της κατασκευής των οποίων προέκυψε, διανοίχθηκαν σε περιβάλλον με 300 m μέγιστο υπερκείμενο. Συνεπώς, περιγράφει τις καταστάσεις που σχετίζονται με χαμηλά και μέσης κλίμακας υπερκείμενα. Έχει εφαρμογή στην περίπτωση μας, διότι το υπερκείμενο δεν ξεπερνά πουθενά τα 60m (Marinos et al., 2015).

Ανάλογα με την ποιότητα της βραχομάζας και το υπερκείμενο, μπορούν να εμφανιστούν οι εξής χονδρικές περιπτώσεις αστοχίας:

Wg – “σφήνα”: Ολίσθηση ή πτώση τεμάχους. Παρατηρείται φυσικά σε περιπτώσεις μαζωδών, ογκωδών, συνεκτικών υπερκείμενων σχηματισμών.

Ch – “καμινάδα”: Ολίσθηση ή πτώση μικρότερων τεμαχών. Όσο κατεβαίνουμε στην πρώτη στήλη, και τα τεμάχη μικραίνουν σε όγκο, έχουμε ανάλογα φαινόμενα αστοχίας.

Rv – καταρροή: Ολίσθηση ή πτώση γαιών, όχι τεμαχών. Η τρίτη τη τάξει κατηγορία πτώσης υλικών στον χώρο της εκσκαφής, που φυσικά ενσκήπτει σε περιπτώσεις κατακερματισμένου, θρυμματισμένου βράχου.

Sh/Sq – μικρές/μεγάλες παραμορφώσεις αντίστοιχα. Οι μεγάλες δεν μας απασχολούν στην προκειμένη περίπτωση, διότι απαιτούν υψηλό υπερκείμενο, που εμείς δεν συναντούμε στην περιοχή μελέτης. Οι μικρές παραμορφώσεις μπορούν να εμφανιστούν, όμως μόνο αν ο βράχος έχει μεγάλη θλιπτική

αντοχή σκυ. Σε αυτή την περίπτωση, καθώς η ένταση δεν εκτονώνεται με κάποια θραύση και πτώση τεμαχών, δρα παραμορφωτικά στον άξονα της σήραγγας.

3.3 Τα μέτρα ασφαλείας

Τα διάφορα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν ανάλογα με το διάγραμμα TBC, απαιτούν αντίστοιχης αποτελεσματικότητας λύσεις, οι οποίες εδώ θα αναφερθούν συνοπτικά, και στην επόμενη ενότητα θα γίνει η επιλογή των κατάλληλων για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα.

α) Το εκτοξευμένο σκυρόδεμα



Πρόκειται για μίγμα τσιμέντου, νερού και λεπτόκοκκων αδρανών υλικών (π.χ. άμμος, σε κάθε περίπτωση διαμέτρου όχι μεγαλύτερης του 1cm). Το μίγμα παρασκευάζεται είτε ως ξηρό, είτε ως υγρό, ανάλογα σε ποιο στάδιο της ανάμιξης θα προστεθεί το νερό (αν προστεθεί απευθείας μέσα στον αναδευτήρα, έχουμε υγρό, ενώ αν μπει εκ των υστέρων στο στόμιο εκτόξευσης, έχουμε ξηρό). Το τελευταίο συστατικό είναι η ποζουλάνη, δηλαδή σκόνη πυριτίου, που μειώνει την ελαστικότητα του μίγματος, αυξάνει την πρόσφυση στη βραχομάζα, ενώ επίσης αυξάνει και το πάχος της τελικής στρώσης σκυροδέματος.

Το μίγμα εφαρμόζει με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα, κυρίως σε ρωγμές ανάμεσα σε βραχομάζες καλής ποιότητας και μηχανικής αντοχής, συνεπώς είναι πιο κατάλληλο για την πρόληψη αστοχιών τύπου σφήνας (Wg), και γενικά για πιο υψηλά GSI.

β) Αγκύρια βράχου



Παραμένουμε σε αστοχίες τύπου σφήνας (Wg), και γενικά σε καλής ποιότητας βραχομάζα, με ορισμένες ασυνέχειες, αραιές πάντως, συνεπώς μιλάμε για μεγάλου όγκου “ύποπτα αστοχίας” τεμάχη. Με τα αγκύρια, τα τεμάχη αυτά σταθεροποιούνται και “πακτώνονται”. Η τοποθέτηση των αγκυρίων γίνεται συνήθως σε κάρναβο. Όσο πιο έντονες και σε κοντινή μεταξύ τους απόσταση είναι οι ασυνέχειες της βραχομάζας, τόσο πιο πυκνός θα πρέπει να είναι ο κάρναβος (μικρότερες διαστάσεις τετραγωνιδίων). Τα αγκύρια έχουν επίσης διαβαθμισμένη αντοχή, οι απαιτήσεις στην οποία καθορίζονται από το είδος, τα χαρακτηριστικά και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Πρόκειται, επομένως, για μια μέθοδο προσαρμόσιμη από κάθε άποψη στην κατάσταση που θα βρούμε στο πεδίο της εκσκαφής.

Υψηλότερης αξιοπιστίας θεωρούνται τα **αγκύρια άμεσης ενέργειας**, διότι σε αντίθεση με άλλους τύπους αγκυρίων, όπως τα **αγκύρια πλήρους πάκτωσης με ένεμα**, έχουν το πλεονέκτημα της άμεσης παραλαβής φορτίων, άρα και της επιτυχούς αντιμετώπισης αιφνίδιας και απροειδοποίητης πτώσης τεμαχών.

Τα αγκύρια είναι το “έτερον ήμισυ” του βήματος (α), αφού συνδυάζονται ιδανικά με την εκτόξευση σκυροδέματος, και μάλιστα για τον ίδιο τύπο και το ίδιο μέγεθος αστοχίας. Όσο ο κερματισμός γίνεται πιο έντονος και πλησιάζουμε στην αστοχία καμινάδας (Ch), οι δυο μέθοδοι εφαρμόζονται μαζί και παρέχουν αλληλοκάλυψη και συνδυαστική προστασία.

Τα αγκύρια μπορούν να αποδειχθούν κατάλληλο μέτρο αποτροπής ακόμα και της πιο σοβαρής αστοχίας που μπορεί να σημειωθεί με μικρό υπερκείμενο, δηλαδή της εμφάνισης παραμορφώσεων (Sh). Η τοποθέτησή τους σε πυκνή διάταξη, όπως αυτή που φαίνεται παρακάτω, μπορεί αφ’ ενός να ενισχύσει τη διατμητική αντοχή της βραχομάζας, μέσα από την ορθή τάση που επιβάλλει, αφ’ ετέρου δε, εφ’ όσον πρόκειται για αγκύρια πλήρους πάκτωσης με ένεμα, μπορεί εμμέσως να βελτιώσει τις ιδιότητες της βραχομάζας.



ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Τα αγκύρια είναι μια εξαιρετική επιλογή για το σύνολο της περιοχής μελέτης μας, πριν και μετά το επίμαχο τμήμα των διότι ο άξονας της σήραγγας βρίσκεται ΚΑΤΩ από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα. Οι σχηματισμοί γύρω από τις ασβεστολιθικές ΤΕ έχουν μικρή αντοχή, μεγάλη περιεκτικότητα και αργιλικά, και σε συνδυασμό με την πλήρωση με νερό, αποκλείει το ενδεχόμενο της ψαθυρότητας, που είναι η νούμερο ένα συνθήκη ακαταλληλότητας των αγκυρίων (Μαρίνος, 2015, σημειώσεις παραδόσεων τεχνικών έργων σήραγγων).

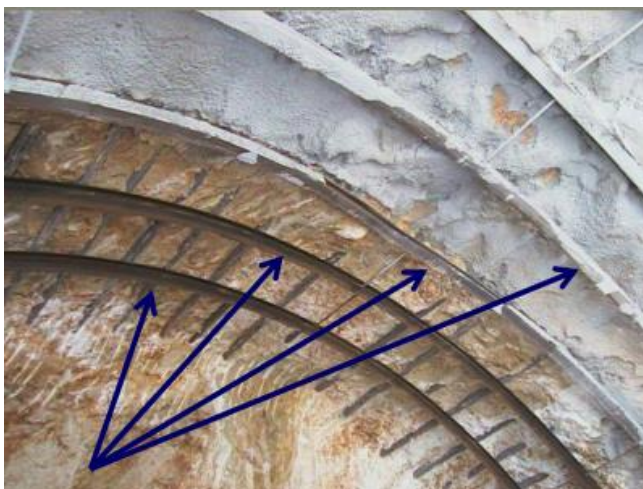
γ) Μεταλλικό πλέγμα και μεταλλικές ίνες οπλισμού



Το μεταλλικό πλέγμα αποτελεί απαραίτητη κίνηση όταν αυξάνει ο βαθμός δυσκολίας στα μέτρα ασφαλείας, δηλαδή όταν παρατηρείται αυξημένος κατακερματισμός και πιο φτωχή ποιότητα βραχομάζας. Κύρια λειτουργία του είναι η συγκράτηση των ασταθών τεμαχών που πιθανώς να πέσουν από τον θόλο της εκσκαφής, αλλά και η καλύτερη εποπτεία στην τοποθέτηση σκυροδέματος, που είδαμε στο βήμα (α). Το μεταλλικό πλέγμα συνδυάζεται συνήθως με την εφαρμογή σκυροδέματος, αυξάνει την εφελκυστική αντοχή, και επομένως ενισχύει την ικανότητα αντοχής στην κάμψη.

Επειδή ακριβώς το μεταλλικό πλέγμα χρησιμεύει στην πρόληψη εκτενών καταπτώσεων, και όχι μεμονωμένων τεμαχών, γι' αυτό και είναι προτιμητέο εκεί που υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης αστοχιών τύπου καμινάδας (Ch) ή / και καταρροής (Rv). Στις περιπτώσεις αυτές, το πλέγμα τοποθετείται σε όσο το δυνατόν πιο πυκνό κάναβο.

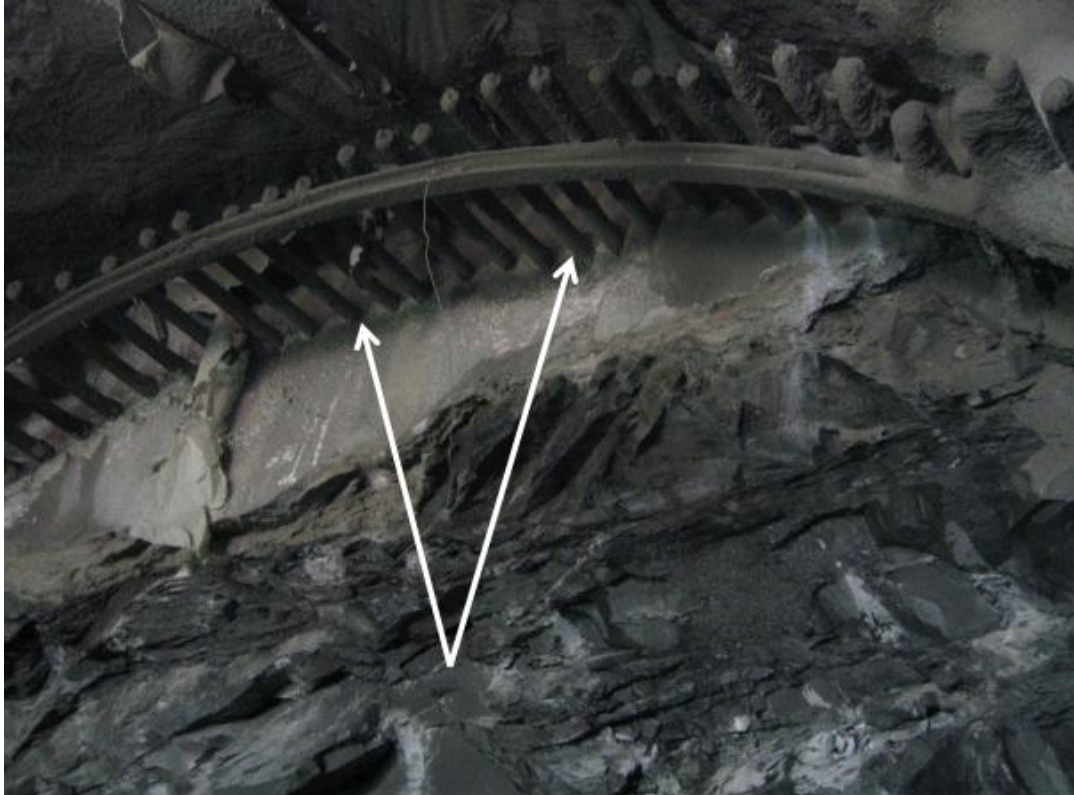
δ) Μεταλλικό πλαίσιο



Το μεταλλικό πλαίσιο τοποθετείται επίσης σε συνδυασμό με το εκτοξευμένο σκυρόδεμα, του οποίου και ενισχύει το κέλυφος. Εγκιβωτίζεται στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα, κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής, και βοηθά στην πρόληψη σημαντικών παραμορφώσεων. Χάρη στην ικανότητά του για άμεση παραλαβή φορτίων, προσφέρει στιγμιαία υποστήριξη σε περίπτωση υψηλών πιέσεων, ενώ αντίθετα το σκυρόδεμα απαιτεί κάποιο χρόνο πήξης. Για τον λόγο αυτό, το μεταλλικό πλαίσιο

χρησιμοποιείται κατά κόρον σε περιπτώσεις όπου αναμένονται παραμορφώσεις (Sh). Η σωστή διαστασιολόγηση και η γεωμετρικά άριστη εφαρμογή στο σχήμα της βραχομάζας είναι κομβικής σημασίας.

ε) Ελαφρά βλήτρα προπορείας (spiles)



Τα βλήτρα προπορείας χρησιμοποιούνται σε βραχομάζα κατακερματισμένη έως και πλήρως αποδιοργανωμένη, όπως φαίνεται στην ενδεικτική εικόνα. Είναι ένα σύνολο δοκών οπλισμού, μήκους λίγων μέτρων, και συγκεκριμένα από 3 έως 6 μέτρα, σε διάταξη κυκλικού τόξου εύρους περί τις 120 μοίρες, στον θόλο της διατομής εκσκαφής. Πακτώνονται με τη βοήθεια ενέματος τσιμέντου, ενώ συνδυάζονται ιδανικά με την εφαρμογή μεταλλικού πλαισίου, που είδαμε στο αμέσως προηγούμενο βήμα. Πρακτικά η εφαρμογή τους περιλαμβάνει όλα τα προηγούμενα μέτρα ασφαλείας, αφού στην θέση τοποθέτησης του βλήτρου προπορείας θα προηγηθεί τσιμεντέγχυση και τοποθέτηση αγκυρίου ασφαλείας. Η ιδιαιτερότητα των μέτρων ασφαλείας άλλωστε είναι η συνδυαστικότητά τους. Δεν πρόκειται απλώς για επιλογή ορισμένων, αλλά για ενίσχυση των πιο ελαφρών με τα πιο δραστικά, ανάλογα με τον βαθμό κατακερματισμού και αποσύνθεσης της βραχομάζας.

Οι ράβδοι είναι μικρής διαμέτρου, λίγων εκατοστών, κάτι που μειώνει την εφελκυστική αντοχή και την αντοχή στην κάμψη (το κύριο “ατού” της εφαρμογής μεταλλικού πλαισίου). Τοποθετούνται σε πυκνή κατά το δυνατόν διάταξη, για να συμβάλλουν στην αποτροπή της κατάπτωσης μικρών τεμαχίων. Δεν θα πρέπει να είναι, όμως, υπερβολικά πυκνή, ειδάλλως θα προκύψουν τεχνικά προβλήματα κατά την τοποθέτηση επιπλέον αγκυρίων στη βραχομάζα, η οποία θα εμποδιστεί από την έλλειψη χώρου για ελιγμούς κατά την τοποθέτηση.



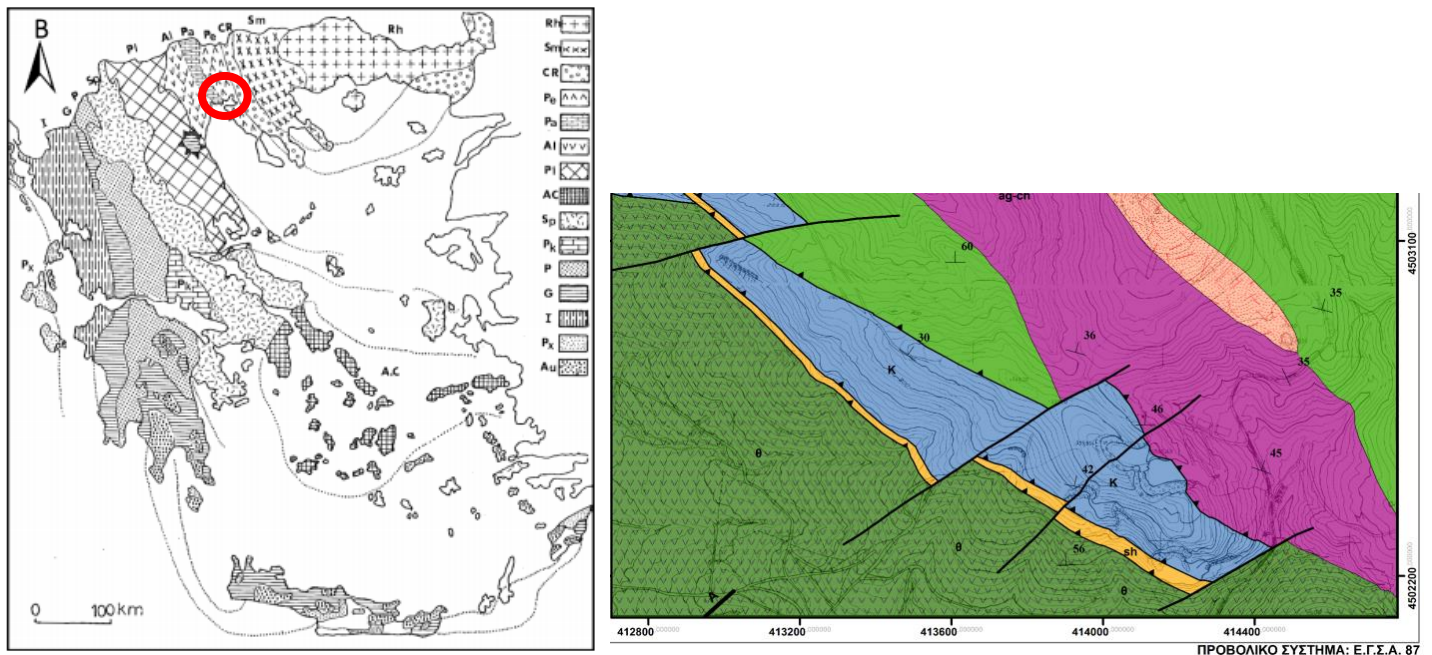
Η ομπρέλα είναι το πιο δραστικό και το τελευταίο στη σειρά μέτρο ασφαλείας και χρησιμοποιείται σε πλέον αποδομημένες βραχομάζες, όπως αυτή που θα συναντήσουμε στο βορειοδυτικό μέτωπο της σήραγγας Ασβεστοχωρίου. Χρησιμοποιείται κοντά στο στόμιο εκσκαφής, εκεί που οι βραχομάζες είναι όχι μόνο αποδυναμωμένες, αλλά κυρίως, εκεί όπου λόγω ιδιαίτέρως χαμηλού υπερκειμένου είναι χαλαρές, χωρίς δηλαδή συμπίεστικές τάσεις άνωθεν, και άρα είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς στην αποδόμηση. Το βορειοδυτικό στόμιο της σήραγγας είναι εξαιρετικό πεδίο εφαρμογής για ομπρέλα προπορείας.

Γύρω από το διάτρημα της ομπρέλας εφαρμόζεται εισπίεση με ένεμα τσιμέντου. Οι ράβδοι εφαρμόζονται σε διάταξη παρόμοιων προδιαγραφών με αυτή των βλήτρων, αλλά διαφέρουν τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους, αφού έχουν μεγαλύτερη διάμετρο, και άρα εφελκυστική αντοχή. Οι διαφορετικές επανατοποθετήσεις της ομπρέλας προς την κατεύθυνση εκσκαφής γίνονται με μια επικάλυψη της προηγούμενης με την επόμενη κατά περίπου $1/3$ του συνολικού μήκους των δοκών. Φυσικά όπως συμβαίνει με όλα τα προηγούμενα μέτρα ασφαλείας, έχει συνδυαστική λειτουργία, δηλαδή εφαρμόζεται μαζί με τα μεταλλικά πλαίσια.

Ο κύριος σκοπός της είναι η αποφυγή συγκλίσεων, παραμορφώσεων (Sh), που σε αποσυντεθειμένες βραχομάζες είναι μέγιστης επικινδυνότητας, και συνεπώς, η ασφάλεια των εργατών και του συνεργείου.

4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

4.1 Ευρύτερη γεωλογία περιοχής μελέτης



Εικόνα 4.1: Η ευρύτερη γεωλογία της περιοχής.

Η θέση της περιοχής μελέτης στη γεωλογία του ελλαδικού χώρου (αριστερά).

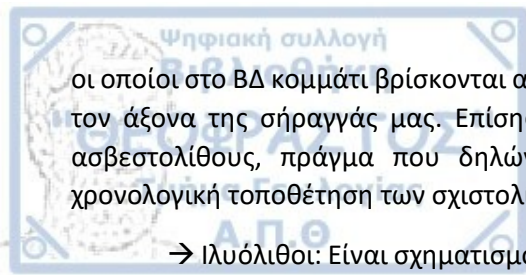
Τα πετρώματα από τα οποία αποτελείται η περιβάλλουσα περιοχή, σε κλίμακα 1:50.000 (δεξιά)
 Πρασινοσχιστόλιθοι και γραφιτικοί σχιστόλιθοι (με πράσινο), ασβεστόλιθοι (με μπλε) και γάββροι (με μοβ).

Ας μιλήσουμε λίγο για την ευρύτερη γεωλογία της περιοχής, ώστε να γνωρίζουμε τι περίπου έχουμε να περιμένουμε. Βρισκόμαστε στην Περιρροδοπική ζώνη (συμβολισμένη με "Pe" στην εικόνα 3.2α), την πλάτους 15 χιλιομέτρων περίπου στενή λωρίδα, στην οποία περιλαμβάνεται η ευρύτερη περιοχή Θεσσαλονίκης. Συγκεκριμένα, βρισκόμαστε στην ανατολικότερη από τις τρεις υποζώνες, δηλαδή στην υποζώνη Παιονίας, όπου εκτός από τα παραπάνω υπάρχουν και οφιόλιθοι, κυρίως από περιδοτίτες αποτελούμενοι. Πράγματι, βρίσκουμε στρώματα γάββρου στους υποκείμενους σχηματισμούς της στοχευμένης περιοχής μελέτης μας, και συγκεκριμένα στο νοτιοανατολικό τμήμα, όπως μπορούμε να δούμε στο **γεωλογικό μοντέλο της στοχευμένης περιοχής μελέτης**, που ακολουθεί στην επόμενη ενότητα (3.2 "Στοχευμένη γεωλογία"):

Στοιχεία της ευρύτερης γεωλογίας

Ας δούμε αρχικά τι πληροφορίες μπορούμε να εξαγάγουμε για τα υλικά των σχηματισμών μας από παλαιότερες μελέτες στην περιοχή (βλ. Μαϊσουράτζε et al., 2016 και Marinos et al. 2016).

→ Γραφιτικοί σχιστόλιθοι: Είναι πετρώματα λεπτόκοκκα, σκούρου καστανού ή και γκρι-μαύρου χρώματος, τα οποία έχουν υποστεί μια ορισμένη μεταμόρφωση, γι' αυτό και βρίσκονται σε πρασινοσχιστολιθική κατάσταση. Είναι λεπτός, επιμήκης σχηματισμός, με πάχος που δεν ξεπερνά σε κανένα σημείο του τα 30m, και διεύθυνση κίνησης από ΒΔ προς ΝΑ. Έχουν επαφή με τους υποκείμενους γάββρους,



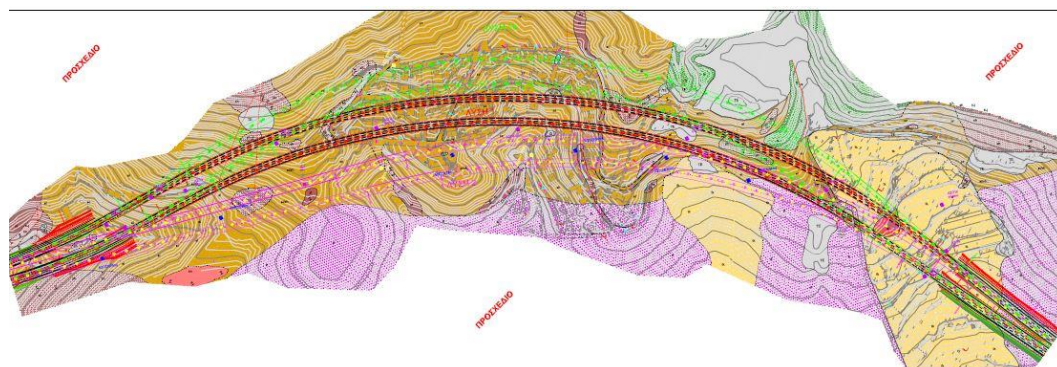
οι οποίοι στο ΒΔ κομμάτι βρίσκονται ακόμη σε πολύ χαμηλά βάθη, αλλά στο ΝΑ ανέρχονται και φτάνουν ως τον άξονα της σήραγγας μας. Επίσης, έχουν επαφή και αλληλοπεριέχονται μέσα στους περικείμενους ασβεστολίθους, πράγμα που δηλώνει μια αλληλεξάρτηση των δυο σχηματισμών, και βοηθά στη χρονολογική τοποθέτηση των σχιστολίθων στην μέση τριαδική περίοδο (Μαϊσουράτζε, 2016, σ. 14-15).

→ Ιλυόλιθοι: Είναι σχηματισμοί καστανού προς ερυθρωπού χρώματος λόγω της περιεκτικότητας σε άργιλο και λεπτόκοκκα υλικά. Έχουν υποστεί έντονο τεκτονισμό και περιέχουν τεμάχια άλλων σχηματισμών, κυρίως γραφιτικών σχιστολίθων και πρασινοσχιστολίθων.

→ Περιδοτίτης: Ένα πολύ χαρακτηριστικό “συστατικό” των οφιολίθων της Υποζώνης Παιονίας της Ζώνης Αξιού, με ηλικία στο άνω Ιουρασικό – κάτω Κρητιδικό (163-169 Myr). Πρόκειται για ανθεκτικό, μαζώδες υπόστρωμα, εξαρετικών μηχανικών ιδιοτήτων.

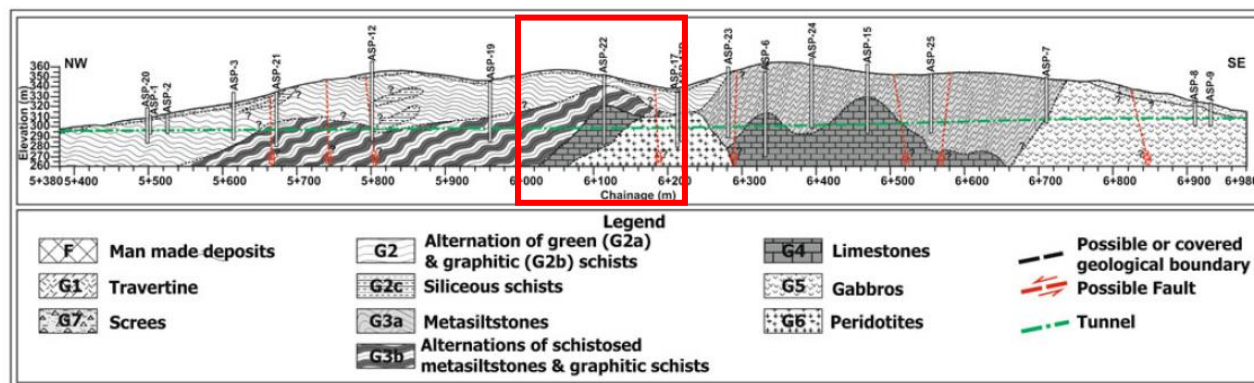
→ Ασβεστόλιθος: Είναι σχηματισμός με μεγάλα πάχη, γαλάζιου και γκρίζου χρώματος. Η πρασινοσχιστολιθική μεταμορφική φάση, που αναφέραμε πιο πάνω για τους σχιστολίθους, έχει επηρεάσει και τον ασβεστόλιθο. Ο έντονος τεκτονισμός που έχει υποστεί η περιοχή έχει μεταβάλει το πάχος του, το οποίο πάντως, παρά τις διακυμάνσεις, φτάνει τα 200m κατά τόπους, και δίνει την “ταυτότητα” του σχηματισμού πριν τον τεκτονισμό. Ο ίδιος τεκτονισμός έχει δημιουργήσει σημαντικές επιφάνειες διεπαφής του ασβεστολίθου με τους περικείμενους σχηματισμούς, πράγμα που οδηγεί σε αδύναμες ζώνες. Όπως κάθε ασβεστολιθικός σχηματισμός, είναι πιθανόν να έχει υποστεί καρστικοποίηση.

→ Γάββρος: Είναι σκουροπράσινα χονδρόκοκκα ή αδρόκοκκα, που συχνά όμως παίρνουν χρώμα καστανό λόγω της αποσάθρωσης. Η υφή τους είναι κοκκώδης, και πρόκειται για γενικά μαζώδεις σχηματισμούς, που αφθονούν κυρίως προς ΝΑ. Η ηλικία τους ποικίλει μεταξύ ανώτερου και μέσου Ιουρασικού, με τη βιβλιογραφία μας να προσδιορίζει την ακριβή χρονολόγησή τους στα 169 Myr, που σημαίνει ότι συμφωνεί περισσότερο με την εκδοχή του άνω Ιουρασικού, δηλαδή είναι περίπου της ίδιας ηλικίας με τον περιδοτίτη (Μαϊσουράτζε, 2016, σ. 14).



Μετα-ιζηματογενή πετρώματα			
el Ελιουβιακός μανδύας σχιστόλιθων	sh Αργιλικός σχιστόλιθος	sl Μεταμορφωμένοι λυόλιθοι	θ Γάββροι
sc Πλειοκαιικά κορήματα	st Μεταμορφωμένοι ψαμίτες	k Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι	br Τεκτονικό λατυποπαγές
tk Τραβερτίνης	hn Στρώματα μαύρων πυριτιολίθων	Q Διεσδύσεις χαλαζία	TE Τεχνητές επιχώσεις

Εικόνα 4.2: Οι σχηματισμοί της περιοχής σε οριζοντιογραφία (Μουντράκης 1985)



Εικόνα 4.3: Η στοχευμένη γεωλογία της περιοχής (Marinos et al., 2015). Τα υλικά που αποτελούν τη "στενή" περιοχή μελέτης – αυτή που εκτείνεται σε μήκος λίγων εκατοντάδων μέτρων, όχι δεκάδων χιλιομέτρων. Σε κόκκινο πλαίσιο, η περιοχή που καλύφθηκε τελικά από την ηλεκτρική μας διασκόπηση.

Με πράσινο χρώμα ο άξονας της σχεδιαζόμενης σήραγγας.

Με κόκκινες λεπτές γραμμές, τα πιθανά ρήγματα.

Η περιοχή που μας αφορά άμεσα εκτείνεται σε μήκος περί τα 1600 μέτρα, ενώ εκείνη στην οποία διεξήχθη τελικά η ηλεκτρική διασκόπηση δεν καταλαμβάνει περισσότερα από 240 μέτρα σε οριζοντιογραφία, και σημειώνεται με κόκκινο πλαίσιο. Η σήραγγα στο σημείο αυτό διαπερνά **μεταλυόλιθους, γραφιτικούς σχιστόλιθους, ασβεστόλιθους και περιδοτίτη.**

Η ηλεκτρική διασκόπηση θα μας δώσει τα ακριβή όρια μεταξύ των σχηματισμών υπό διερεύνηση, αλλά πρώτα θα πρέπει να έχουμε μια όσο το δυνατόν πιο ευκρινή εικόνα της ποιότητας και της γεωμηχανικής αντοχής των σχηματισμών αυτών. Απαραίτητο είναι, πριν εφαρμόσουμε την ηλεκτρική διασκόπηση, να προχωρήσουμε στην εξαγωγή **τεχνικογεωλογικών ενοτήτων.** Δηλαδή να κάνουμε μια εκτίμηση για την κατάσταση αντοχής, συνοχής, μηχανικών ιδιοτήτων, κερματισμού κλπ. των πετρωμάτων αυτών, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα εγγενή τους χαρακτηριστικά, όσο και τις συνθήκες περιβάλλοντος

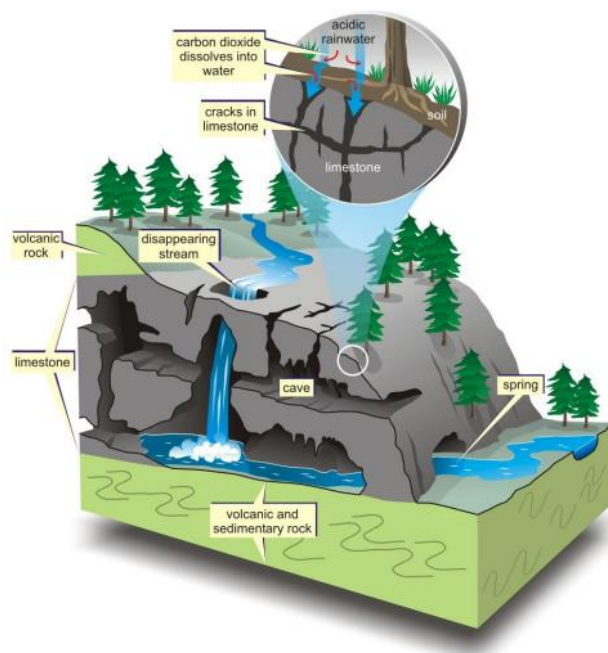
(τεκτονισμός, διάβρωση κλπ.). Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της βραχομάζας κατά την εκσκαφή της σήραγγας.

Πριν γίνει, όμως, αυτό, θα πρέπει να κάνουμε μια μικρή εισαγωγή σε μια έννοια που θα μας απασχολήσει στα πλαίσια της εξαγωγής ΤΕ: του φαινομένου του Καρστ.

Καρστ

Καρστ είναι ένα τοπίο με ιδιόμορφους γεωσχηματισμούς και χαρακτηρες διάλυσης, που αναπτύσσονται κυρίως σε ανθρακικά πετρώματα. Οι περιοχές που περιλαμβάνουν καρστ χαρακτηρίζονται από τη γενική **απουσία μόνιμης επιφανειακής ροής** και την παρουσία ρηχών οπών και κλειστών ταπεινώσεων, την κοινή εμφάνιση σπηλαίων και γενικότερα μεγάλων υπογείων περασμάτων και την ύπαρξη μεγάλων πηγών, συχνά ευρισκόμενων στη βάση της ανθρακικής ακολουθίας. Έτσι, το καρστ είναι ένα επιφανειακό τοπίο, αλλά επίσης και υπόγειο τοπίο, και υδροφόρος ορίζοντας (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, μέσω του COST action 65, 1995)

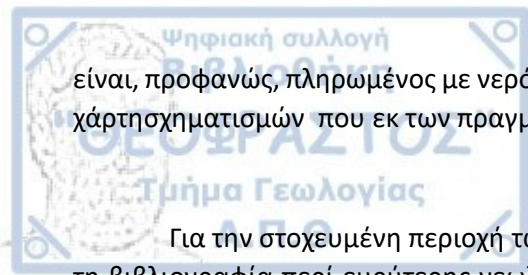
Η λέξη “καρστ” (ελληνικά: έγκοιλο) προέρχεται από την περιοχή της σημερινής Σλοβενίας, κοντά στα Ιταλικά σύνορα. Παράγωγο φαινόμενο είναι αυτό της καρστικοποίησης (karstification), που σημαίνει το σύνολο των γεωλογικών διεργασιών που καταστρέφουν ευδιάλυτα πετρώματα, όπως τα ανθρακικά, προεξάρχοντος, φυσικά, του ασβεστολιθού. Μέσα από την καρστικοποίηση δημιουργούνται εκτενείς, ογκώδεις υπόγειες “σπηλιές”, με όρους υδροχημείας, που προχωρούν τον μηχανισμό διάβρωσης πέρα από το μηχανικό του κομμάτι.



Εικόνα 4.4: Τα όξινα υγρά διαλύουν το ασβεστολιθικό πέτρωμα και δημιουργούν ρωγμές κατακόρυφης διαδρομής. Αυτές φαρδαινουν και σχηματίζουν υπόγεις πηγές, που τελικά συγκεντρώνονται στο εσωτερικό του ασβεστολιθού και δημιουργούν έγκοιλα, δηλαδή “σπηλιές” πληρώσιμες με νερό, όπου, φυσικά, η διαβρωτική δράση συνεχίζεται.

“Φρένο” στην όλη διαδικασία βάζουν ιζηματογενή ή ηφαιστιογενή πετρώματα, όπου η διάβρωση δεν είναι εφικτή.

Η επεξήγηση του Καρστ είναι πάρα πολύ σημαντική, γιατί η ύπαρξή του διαφοροποιεί θεαματικά το βασικό μέγεθος που προσδιορίζεται μέσα από μια διεξαγωγή ηλεκτρικής διασκόπησης: Την αγωγιμότητα. Ένας ασβεστόλιθος καρστικοποιημένος, που βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, θα

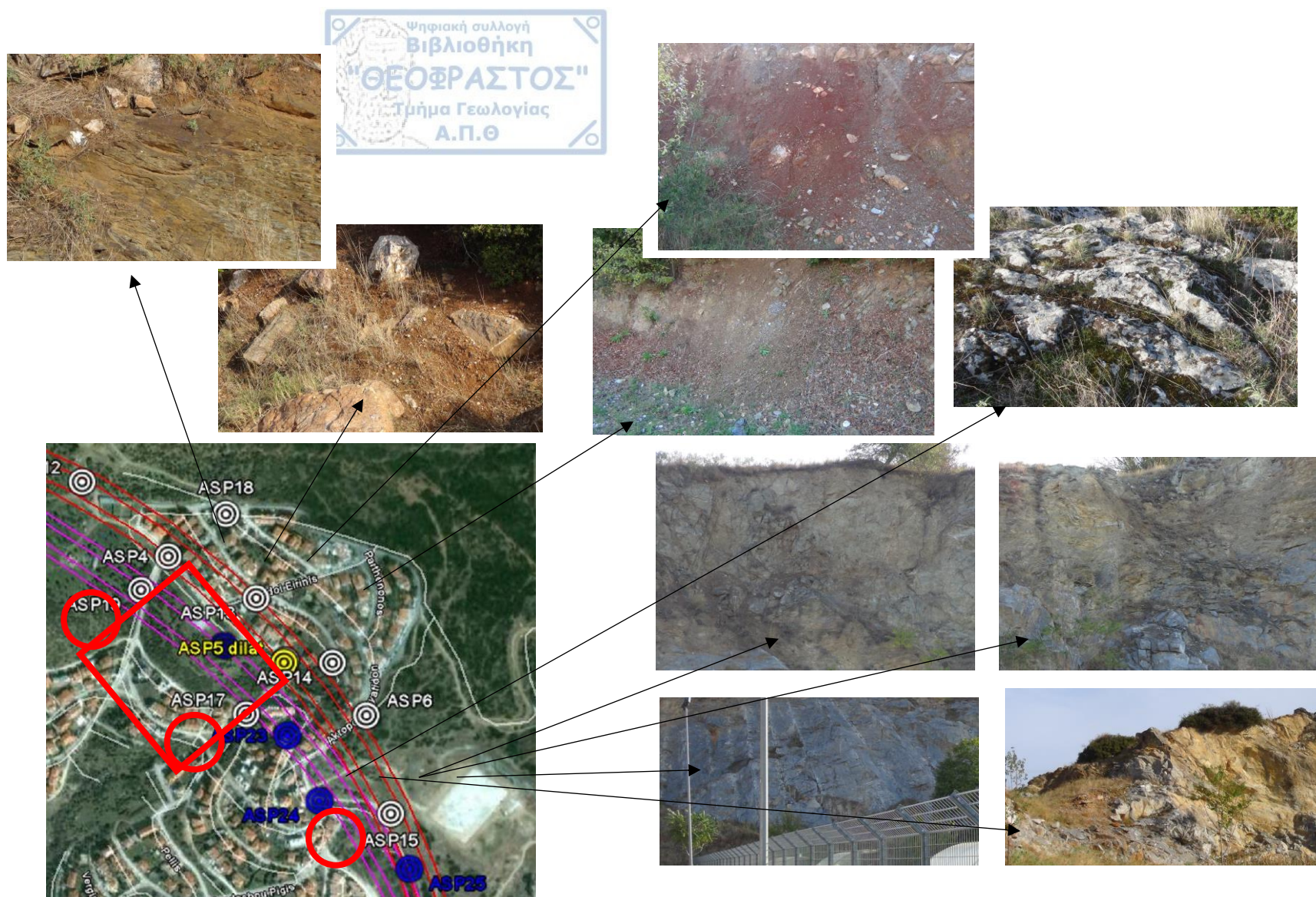


είναι, προφανώς, πληρωμένος με νερό. Αυτό θα μας δίνει μια “νησίδα” υψηλής αγωγιμότητας μέσα σε έναν χάρτη σχηματισμών που εκ των πραγμάτων θα είναι χαμηλής (σχιστόλιθοι, περιδοτίτης, ιλυόλιθοι).

Για την στοχευμένη περιοχή των 1600 μέτρων περίπου, έχουμε στα χέρια μας όσα γνωρίζουμε από τη βιβλιογραφία περί ευρύτερης γεωλογίας, που είδαμε στην ενότητα (3.1), και επιπλέον έχουμε τα εξής δεδομένα: α) **την αυτοψία μας στο πεδίο** και β) **τα στοιχεία των γεωτρήσεων**, που μπορούν να μας παρασχέσουν χρήσιμες πληροφορίες.

α) Αυτοψία στο πεδίο

Ας δούμε αρχικά μια επισκόπηση της συλλογής του φωτογραφικού μας υλικού:



Εικόνα 4.5: Φωτογραφίες της περιοχής μελέτης από διάφορα σημεία.
 Σε κόκκινο πλαίσιο στον χάρτη-οδηγό, η περιοχή που τελικά καλύφθηκε από την ηλεκτρική διασκόπηση.
 Με κόκκινο κύκλο, οι γεωτρήσεις που τελικώς αξιοποιήθηκαν.



Ανατολικό τμήμα (πλησίον γηπέδου):

Άποψη προς ΒΑ

Μέτρια, αλλά εμφανής τεκτονική δραστηριότητα, που διαταράσσει την επίσης εμφανή διαστρωμάτωση.
Ποιότητα βραχομάζας, μέτρια προς καλή.
Εκτίμηση GSI: 45-55



Ανατολικό τμήμα (πλησίον γηπέδου):

Άποψη προς ΒΔ

Συμπαγείς όγκοι βραχομάζας.
Ποιότητα βραχομάζας, καλή.
Εκτίμηση GSI: >60



Βορειοδυτικό τμήμα

(κατά μήκος της οδού Ακροπόλεως):

Στο τμήμα αυτό της σήραγγας κυριαρχούν οι μεταλυόλιθοι και οι πρασινοσχιστόλιθοι / γραφιτικοί σχιστόλιθοι.

Εκεί που κυριαρχεί ο μεταλυόλιθος (με χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα), η ποιότητα βραχομάζας είναι σαφώς χαμηλότερη, αφού εμφανίζεται εντονότερη διαταραχή. Το GSI μπορεί να πέσει και ως 10-15.

Αντίθετα, όπου επικρατεί ο πρασινοσχιστόλιθος και γραφτικός σχιστόλιθος, η βραχομάζα εμφανίζεται πιο συμπαγής και το GSI επανέρχεται σε τιμές 40-50.



Δυτικό τμήμα

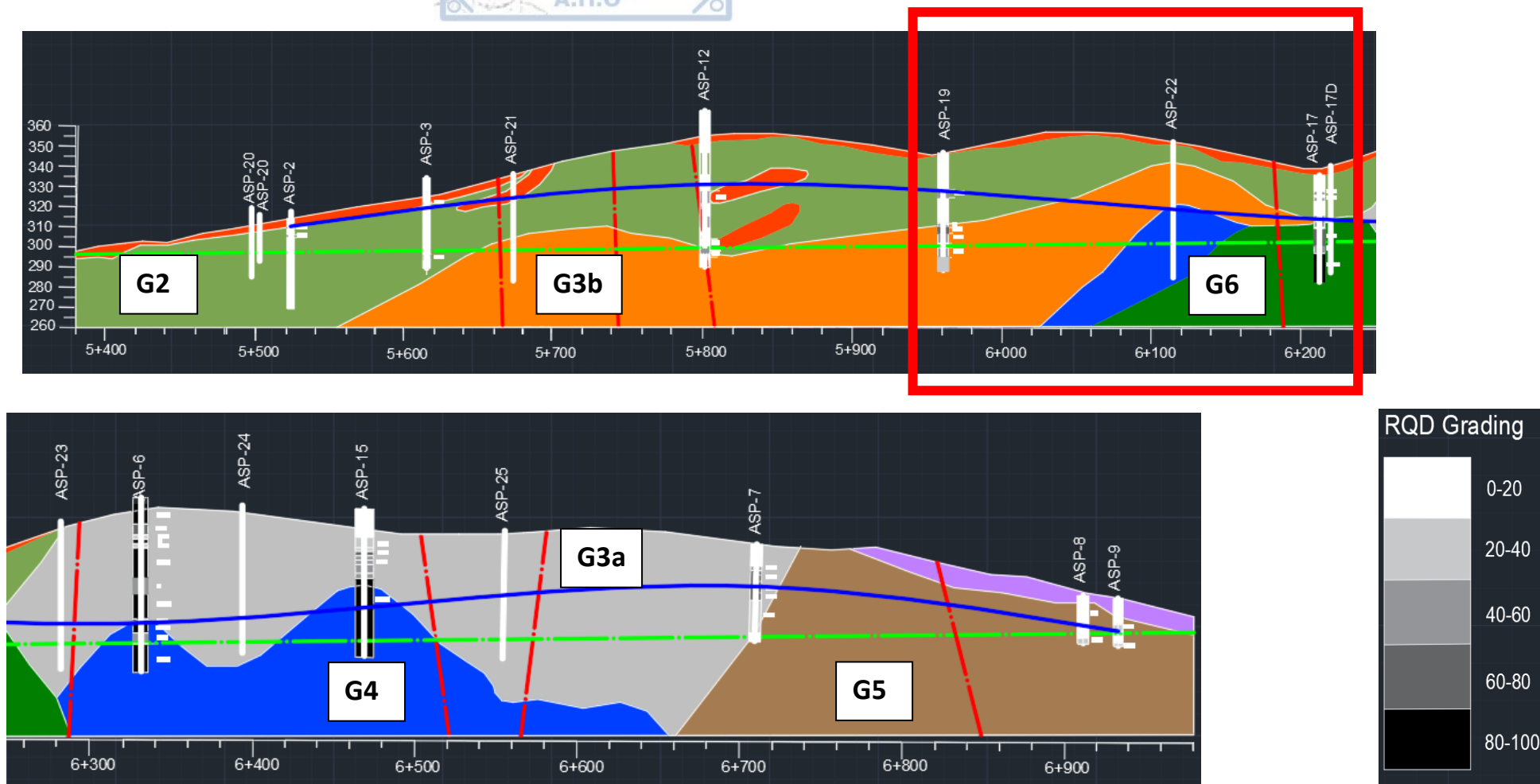
(κατά μήκος της οδού Ακροπόλεως):

Εξακολουθούν να κυριαρχούν οι μεταλυόλιθοι και οι σχιστόλιθοι, ωστόσο όσο προχωρούμε προς τα δυτικά παρατηρούμε όλο και μεγαλύτερα τεμάχια συμπαγούς βραχομάζας στον μεταλυόλιθο.

Εικόνα 4.6: Φωτογραφίες, εντοπισμός και περιγραφή των ευρημάτων

Οι φωτογραφίες επιβεβαιώνουν τις αρχικές μας εκτιμήσεις, τουλάχιστον σε ό,τι αφορά τα πετρώματα που είναι ορατά από την γήινη επιφάνεια: Οι μεταλυόλιθοι, κοκκινωποί, λεπτόκοκκοι, χαμηλής συνοχής, έχουν την πιο φτωχή ποιότητα βραχομάζας, η ανάμιξη με γραφιτικούς σχιστολίθους αυξάνει κάπως την ποιότητα, που όμως σε κανένα σημείο δεν ξεπερνάει ένα μέτριο επίπεδο αντοχής, ενώ τα μαζώδη πετρώματα στα ανατολικά είναι τα πιο αξιόπιστα από άποψη ποιότητας και αντοχής.

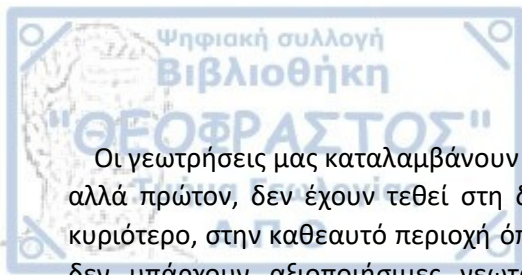
β) Οι γεωτρήσεις



Εικόνα 4.7: Η ανάλυση της πυρηνοληψίας (RQD) στα τρία τμήματα της σήραγγας, το δυτικό (πάνω) και το ανατολικό (κάτω), συνολικού μήκους περίπου 1600 μ.

Σε κόκκινο πλαίσιο, η περιοχή όπου διεξήχθη η ηλεκτρική διασκόπηση, συνολικού μήκους περί τα 240 μ.

Δεξιά, σε μορφή στήλης, η γραφική αξιολόγηση της πυρηνοληψίας (RQD). Υψηλότερες τιμές ίσον μεγαλύτερο GSI, ίσον πιο αξιόπιστος σχηματισμός.



Οι γεωτρήσεις μας καταλαμβάνουν το σύνολο της στοχευμένης περιοχής μελέτης, μήκους 1600 μέτρων, αλλά πρώτον, δεν έχουν τεθεί στη διάθεσή μας λεπτομερείς πληροφορίες για όλες, και δεύτερον και κυριότερο, στην καθεαυτή περιοχή όπου θα διεξαχθούν οι ηλεκτρικές διασκοπήσεις (σε κόκκινο πλαίσιο) δεν υπάρχουν αξιοποιήσιμες γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις που θα αξιοποιηθούν στα πλαίσια της συνεπακόλουθης εξαγωγής ΤΕ, είναι οι ακόλουθες:

→ η γεώτρηση 19 για να εξακριβώσουμε την ποιότητα του σχηματισμού G2, δηλαδή των εναλλαγών του γραφιτικού σχιστόλιθου με τον πρασινοσχιστόλιθο, αλλά και του υποκείμενου G3b, δηλαδή των εναλλαγών του γραφιτικού σχιστόλιθου με τον μεταιλυόλιθο. Εκτός του ότι ο συγκεκριμένος σχηματισμός καταλαμβάνει μεγάλη έκταση, άρα μια ευρεία τεχνικογεωλογική ενότητα, είναι και αρκετά σημαντικός γιατί οι ιδιότητές του διαφέρουν πάρα πολύ από τον γειτονικό ασβεστόλιθο, και η συμπεριφορά της βραχομάζας κατά την εκτέλεση της σήραγγας θα είναι επίσης πολύ διαφορετική μεταξύ των δυο σχηματισμών. Μια καλή γνώση, λοιπόν, του σχηματισμού G2 και G3b, θα μπορέσει να μας κάνει πιο ευκρινές το σημείο επαφής των δύο μέσα από την ηλεκτρική διασκόπηση που θα ακολουθήσει.

→ η γεώτρηση 17, που βρίσκεται εντός της περιοχής διεξαγωγής της ηλεκτρικής διασκόπησης, και μας δίνει κυρίως στοιχεία για τον σχηματισμό G6, τον περιδοτίτη, αλλά και μια δεύτερη εικόνα για τον σχηματισμό G2, δηλαδή των εναλλαγών του γραφιτικού σχιστόλιθου με τον πρασινοσχιστόλιθο.

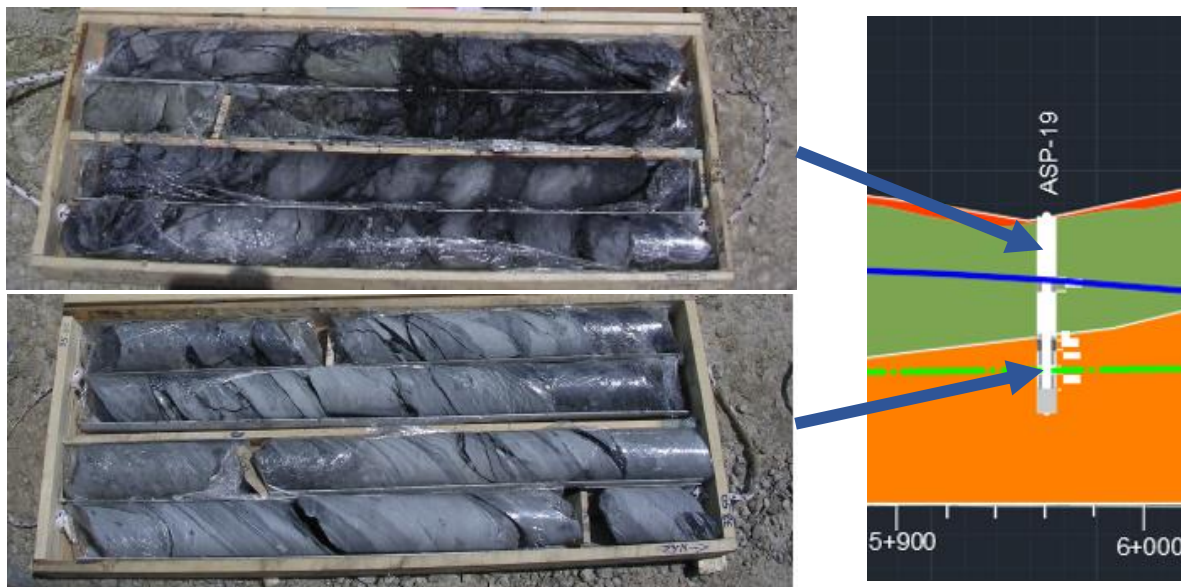
→ η γεώτρηση 15, που βρίσκεται εκτός της περιοχής εφαρμογής ηλεκτρικής διασκόπησης, αλλά δίνει δείγματα ποιότητας του σχηματισμού G3a, του μεταίλυόλιθου, αλλά κυρίως του σχηματισμού G4, του ασβεστόλιθου. Ο ασβεστόλιθος είναι το πιο σημαντικό από όλα τα περικείμενα πετρώματα, διότι αν υπάρχει καρστ ή ρήγμα, θα τον αφορά άμεσα. Βέβαια, η ασβεστολιθική μάζα στο δυτικό κομμάτι, μεταξύ μεταιλυόλιθου/γραφιτικού (G2) και περιδοτίτη (G6), θα διαφέρει ασφαλώς ως προς τον τεκτονισμό και πιθανότατα την καρστικοποίηση. Όμως τα πρωτογενή χαρακτηριστικά ασφαλώς μπορούν να προσεγγιστούν πολύ ικανοποιητικά και από τα δείγματα της γεώτρησης 15, στην κυρίως μάζα του ασβεστόλιθου, στα νοτιοανατολικά.

→ οι γεωτρήσεις 8 και 9, που δίνουν στοιχεία για τον σχηματισμό G5, τον γάββρο.

Σχηματισμός G2: Γραφιτικοί σχιστόλιθοι / πρασινοσχιστόλιθοι: Η ανομοιογένεια του σχηματισμού (άρα και η διακύμανση του GSI και της ποιότητας βραχομάζας) είναι μεγάλη και απρόσφορη για ακριβείς υπολογισμούς. Όπου ο γραφιτικός σχιστόλιθος εμφανίζεται απαλλαγμένος από ιλυόλιθο, δεν υπάρχουν σοβαροί λόγοι να υποθέσουμε εξαιρετικά μειωμένο GSI, το οποίο στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να κινείται περί το 35-40. Αυτό, όμως, συμβαίνει μόνο σποραδικά και κατά τόπους. Στο μεγαλύτερο μέρος του ο σχηματισμός G2 είναι διατμημένος (βλ. και Μαρίνος et al., 2016, σ. 2), πτυχωμένος και με έντονο τεκτονισμό, και κυρίως, παρεμβάλλονται πάρα πολλοί αργιλικοί σχηματισμοί, οπότε το GSI πέφτει μέχρι και το 10-15. Αν θέλουμε να εξαγάγουμε μια συνολική εκτίμηση ο γραφιτικός σχιστόλιθος και ο πρασινοσχιστόλιθος είναι **χαμηλής ποιότητας**, κάτι που πιστοποιούν και τα ευρήματα της πυρηνοληψίας (τα λεγόμενα "κασάκια" της γεώτρησης 19): Το RQD είναι σχεδόν παντού της τάξης 0-20%.

Η γεώτρηση ASP-19 είναι ενδεικτική. Αν κοιτάξουμε προσεκτικά στην εικόνα της πυρηνοληψίας, θα δούμε ότι το συγκεκριμένο χαμηλό RQD εμφανίζεται για τον σχηματισμό G2 σε όλες τις γεωτρήσεις, τουλάχιστον στο δυτικό κομμάτι. Θα λέγαμε ότι ο σχηματισμός G2 είναι ο "αδύναμος κρίκος" των σχηματισμών μας.

Σχηματισμός G3b: Γραφιτικοί σχιστόλιθοι αναμεμειγμένοι με ιλυόλιθο: Οι μηχανικές ιδιότητες είναι χαμηλές ούτως ή άλλως, η παρουσία αργιλικών είναι εκτενής, ο τεκτονισμός εμφανής, το RQD χαμηλό, όπως φαίνεται και από τα ευρήματα της πυρηνοληψίας, αν και όχι τόσο χαμηλό όσο του υπερκείμενου G2, σίγουρα πάντως όχι τέτοιο που να μας επιτρέπει να συμπεράνουμε μια μαζώδη, συνεκτική δομή.

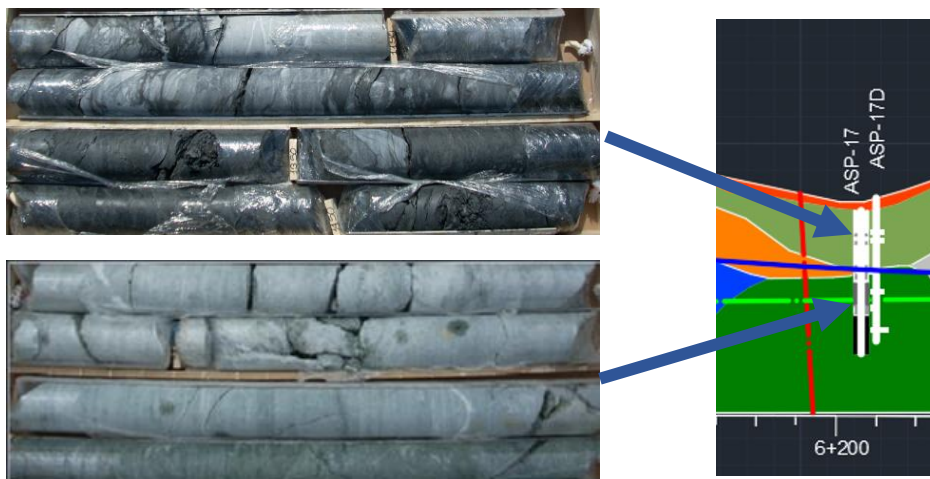


Γεώτρηση ASP-19. Συνοδευτικά ευρήματα από τον υπερκείμενο γραφιτικό σχιστόλιθο (ανοιχτό πράσινο) και τον υποκείμενο ιλυόλιθο (πορτοκαλί)

Σχηματισμός G2: Γραφιτικοί σχιστόλιθοι / πρασινοσχιστόλιθοι: Τα πράγματα είναι περίπου όπως τα περιμέναμε: Καλύτερες βραχομηχανικές ιδιότητες για τον υπερκείμενο σχηματισμό, αφού απομακρυνθήκαμε από τη ζώνη αλληλεπίδρασης με τον ιλυόλιθο. Βέβαια ακόμα δεν καθίσταται αξιόπιστος, αλλά είναι σίγουρα απαλλαγμένος από σοβαρά προβλήματα, οπότε μιλάμε για μια μέση ποιότητα. Το GSI κινείται γύρω στο 30-35. Υπάρχει μια μικρή υποβαθμισμένη ζώνη επαφής με τον υποκείμενο περιδοτίτη, που όμως και πάλι δεν δημιουργεί πάρα πολύ σοβαρά προβλήματα.

Σχηματισμός G6: Περιδοτίτης: Ο περιδοτίτης μάς απασχολεί περισσότερο από τον υπερκείμενο σχηματισμό, γιατί περιέχει το κομμάτι του άξονα της σήραγγας για το σημείο αυτό της μηκοτομής. Δεν παρέχονται σημαντικά στοιχεία για την ιδιαιτερότητα της κατάστασής του στην περιοχή. Είναι, όμως, οπωσδήποτε ένα ανθεκτικό πέτρωμα, η απομείωση του GSI του οποίου, ακόμα και σε επιφάνειες έντονης τριβής με άλλους σχηματισμούς ή/και αποσάθρωσης δύσκολα θα πέσει κάτω από 50.

Μια αναδρομή στα αρχεία εργαστηριακών δοκιμών της γεώτρησης θα μας επιβεβαιώσει ότι η ποιότητα βραχομάζας στην περιοχή εμφανίζει κάποιες αυξομειώσεις, αν και όχι πολύ έντονες. Ενώ ο υπερκείμενος σχηματισμός G2a έχει μια μονοαξονική θλιπτική αντοχή περί τα 7-10 MPa, (**Αρχείο ReportGeotriseis_T3 σελ. 218, 227**), με την είσοδο στον περιδοτίτη αυτή αυξάνεται στα 21 MPa (**Αρχείο ReportGeotriseis_T3 σελ. 232**) και στη συνέχεια, στο ύψος της σήραγγας πέφτει και πάλι στα 14.



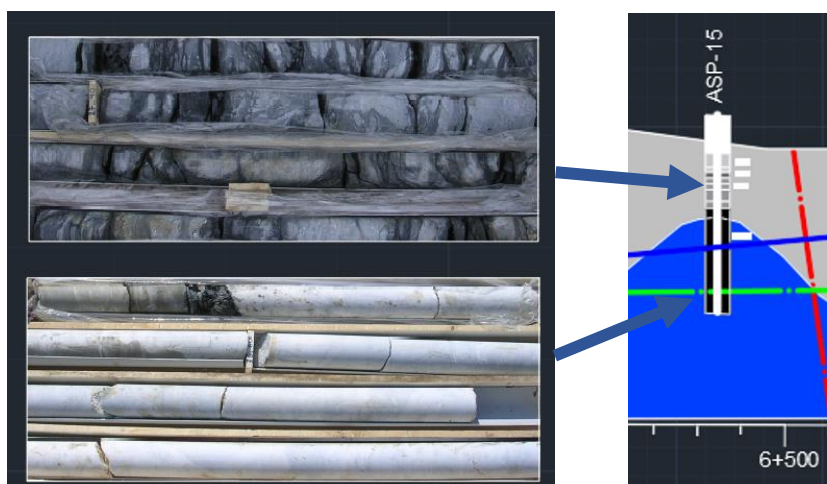
Γεώτρηση ASP-17. Συνοδευτικά ευρήματα από τον υπερκείμενο γραφιτικό σχιστόλιθο (ανοιχτό πράσινο) και τον υποκείμενο περιδοτίτη (σκούρο πράσινο)

Σχηματισμός G3a: Μεταϊλυόλιθοι: Ο σχηματισμός είναι πολύ ετερογενής. Το GSI ποικίλει από 10-15 έως και 60. Δεν παρέχονται ιδιαίτερες πληροφορίες τεκτονισμού και καταπόνησης, όμως το γεγονός ότι συνορεύει με άλλους σχηματισμούς, όπως ο ασβεστόλιθος, σημαίνει ύπαρξη είτε ρηγμάτων είτε διάβρωσης, και αυτό αποτελεί αιτία μεγάλης ταπείνωσης του GSI του ιλυολίθου. Σε ό,τι αφορά την πυρηνοληψία, η γεώτρηση ASP-15 δεν είναι απόλυτα αντιπροσωπευτική της ποιότητας του RQD, αφού σε άλλα σημεία της μηκοτομής το RQD είναι σημαντικά καλύτερο. Είναι, όμως, η ποιότητα που θα συναντήσουμε στην πορεία της σήραγγας μας.

Τα αρχεία της γεώτρησης ASP-15 (**Αρχείο ReportGeotriseis_T2 σελ. 181-190**) μας δείχνουν ότι μπορεί να ταξινομηθεί σε μια κατηγορία μέσης ποιότητας (για ιλυόλιθος, πάντα) όπου υπάρχει μεν διατάραξη, όχι όμως κατακερματισμός. Φυσικά η κατάταξη αυτή είναι επισφαλής, αφού υπάρχουν ευρήματα αντιπροσωπευτικά όλου του φάσματος ποιότητας βραχομάζας.

Σχηματισμός G4: Ασβεστόλιθος: Ο υποκείμενος ασβεστόλιθος βλέπουμε ότι είναι σε εξαιρετική κατάσταση, τουλάχιστον στο βάθος όπου συναντά τον άξονα της σήραγγας. Είναι σίγουρα το πιο αξιόπιστο πέτρωμα από τα περικείμενα, τουλάχιστον για κατασκευαστικούς σκοπούς. Έχει μαζώδη δομή, χωρίς ρωγμές (Μαρίνος et al., 2016, σ. 2) και δεν υπάρχουν σοβαροί λόγοι να μην υποθέσουμε GSI στα επίπεδα του 60-65 τουλάχιστον. Ωστόσο, αναμένεται έντονη καρστικοποίηση στο δυτικό του τέμαχος, αυτό που αποκόπτεται λόγω τεκτονισμού από το κυρίως σώμα ασβεστολίθου στα ανατολικά και εγκολπώνεται μεταξύ σχιστόλιθου/ιλυόλιθου και περιδοτίτη, (Μαϊσουράτζε, 2016, σ. 16), κι αυτός είναι κυρίως ο λόγος της εκτέλεσης ηλεκτρικών διασκοπήσεων κατά την παρούσα εργασία.

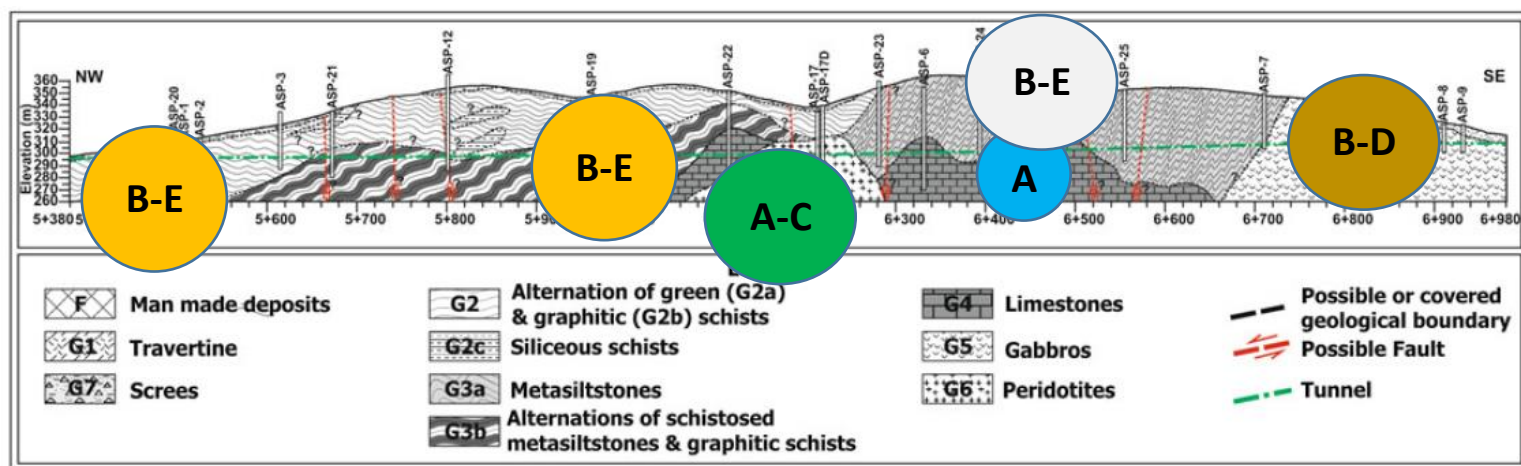
Το μεγάλο ερωτηματικό με τον ασβεστόλιθο είναι πάντα η υδατοπερατότητα. Τα δείγματα του υπερκείμενου σχηματισμού έχουν μια πληρότητα νερού κοντά στο 30% (**Αρχείο ReportGeotriseis_T2 σελ. 123**), ενώ αμέσως μετά ο ασβεστόλιθος έχει λιγότερο από 4%. Εδώ οι διαφορές στην ηλεκτρική τομογραφία θα πρέπει να είναι εμφανείς, καθώς ο αδιατάρακτος ασβεστόλιθος ασφαλώς θα είναι πολύ χειρότερος αγωγός των σημάτων σε σχέση με τον υπερκείμενο σχηματισμό, αν δεν υπάρχουν καρστ, και πολύ καλύτερος αγωγός, αν υπάρχουν. Πάντως θα σημειωθούν διαφοροποιήσεις στην καταγραφή της ηλεκτρικής αντίστασης, αρκεί βέβαια να διατηρείται η κατάσταση αυτή και στην περιοχή εφαρμογής της διασκόπησης.



Γεώτρηση ASP-15: Συνοδευτικά ευρήματα από τον υπερκείμενο μεταιλυόλιθο (γκρι) και τον υποκείμενο ασβεστόλιθο (μπλε)

Σχηματισμός G5: Γάββρος: Όπως είπαμε στην ενότητα (3.1), οι σχηματισμοί είναι μαζώδεις, αλλά κοκκώδεις. Οι φυσικές ιδιότητες του γάββρου ως πετρώματος καθαυτού είναι εξαιρετικές, και αν δεν υπήρχε τεκτονισμός ή κατακλαστική δραστηριότητα, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ένα εξαιρετικά υψηλό GSI, που όμως σύμφωνα με τα ευρήματα των γεωτρήσεων δεν μπορεί να ισχύει στην προκειμένη περίπτωση, διότι το RQD είναι εξαιρετικά χαμηλό στο βάθος του γάββρου, όπου συναντά τον άξονα της σήραγγας. Ο γάββρος είναι κατακερματισμένος, κάτι που σημαίνει πως το GSI σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να ξεπερνά το 50.

Ευρήματα πυρηνοληψίας από κασάκια δεν διατίθενται, δυστυχώς, στο φωτογραφικό μας υλικό.



Εικόνα 4.8: Η κατανομή των εδαφικών μας σχηματισμών σε ΟΜΑΔΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ, σύμφωνα με τον δείκτη GSI.

Η βιβλιογραφία που αφορά την στοχευμένη περιοχή μελέτης συμφωνεί με τις εκτιμήσεις μας. Τα εδάφη έχουν ταξινομηθεί ανάλογα με τον βαθμό διαταραχής τους και τους έχει αποδοθεί ένας αριθμός GSI, καθώς και μια κατηγοριοποίηση (A-E) σχετικά με την ποιότητα της βραχώμαζας, που είναι πολύ συναφής με τις δικές μας εκτιμήσεις.

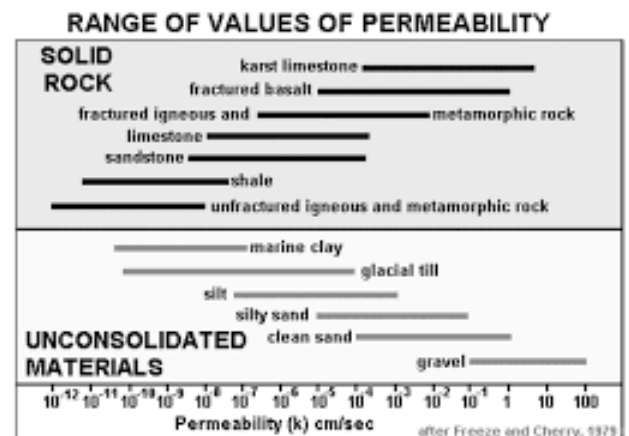
	Geotechnical unit	GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i	E_i (MPa)	γ (MN/m ³)	E_m (MPa)
Γραφ. σχιστ.	G2-B	40	15	6	5,000	0.027	1,200
	G2-E	15	6	6	2,500	0.025	140
Ιλυόλιθος	G3a-A	60	18	7	9,000	0.027	4,500
	G3a-E	15	12	7	6,000	0.025	250
Ιλυόλιθος με γραφ	G3b-E	15	10	7	5,000	0.025	220
Ασβεστόλιθος	G4-A	65	28	12	24,000	0.027	12,000
Γάββρος	G5-B	45	14	27	15,000	0.027	3,000

Εικόνα 4.9: Οι εκτιμήσεις GSI της πρώτης μελέτης στοχευμένης γεωλογίας (Marinos et al., 2016).

Με τη συμβουλευτική υποστήριξη των αντίστοιχων βιβλιογραφικών πηγών (Marinos et al., 2016), μπορούμε να διαπιστώσουμε την εργασία που έχει προηγηθεί για την εξαγωγή των μηχανικών παραμέτρων της βραχομάζας: Της αντοχής σε **μονοαξονική θλίψη (σ_{ci})** και του **μέτρου ελαστικότητας (E_i)**. Επιπρόσθετα στοιχεία που θα λάβουμε υπόψη είναι ο **τεκτονισμός**, όπως προκύπτει από τα ευρήματα πεδίου (ή από τις περιγραφές προηγούμενων εργασιών στην ίδια περιοχή), ο **δείκτης πυρηνοληψίας (RQD)**, όπως προκύπτει από τις γεωτρήσεις και τα λεγόμενα “κασάκια”, δηλαδή το από τη γεώτρηση εξαχθέν πέτρωμα κυλινδρικής διατομής, που δείχνει τον βαθμό κερματισμού του βράχου, και τέλος την **υδροπερατότητα**.

Τιμές ανεμπόδιστης θλίψης σ_{ci} (UCS)

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	σ_c (MPa)	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ
Πολύ υψηλή αντοχή	>200	Χαλαζίτης, δολερίτης, γάββρος, βασάλτης
Υψηλή αντοχή	100-200	Μάρμαρο, γρανίτης, γνεύσιος, ασβεστόλιθος
Μέση αντοχή	60-100	Ψαμμίτης, μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος, μαργαϊκός ασβεστόλιθος
Χαμηλή αντοχή	20-60	Ψαμμίτης μέτρια συνεκτικός, τόφος, ιλυόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος
Πολύ χαμηλή αντοχή	<20	Ιλυόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος, κρητίς, ορυκτό αλάτι, αποσαθρωμένα πετρώματα
	<20	Μαλακοί βράχοι
	<1	Έδαφος



Εικόνα 4.10: (α) Η κατάταξη της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, σ_{ci} (Hoek και Μαρίνος, 2000)
(β) Το εύρος τιμών υδροπερατότητας για διάφορους σχηματισμούς, σε cm/sec (Freeze and Cherry, 1979)

*ΤΕ.1: Εναλλαγές πρασινοσχιστόλιθου και γραφιτικού (5+300 ως 5+650)
και εναλλαγές μεταλυολίθου και γραφιτικού (5+650 ως 6+080)*

Η πρώτη τεχνικογεωλογική ενότητα αποτελείται από δυο ζεύγη συνδυασμών: Σε εύρος από τη θέση 5+300 ως τη θέση 5+650 της μηκοτομής, αντιστοιχεί στον συνδυασμό πρασινοσχιστόλιθου με γραφιτικό σχιστόλιθο, δηλαδή σε συνδυασμό μικτής ποιότητας. Από τη θέση 5+650 ως τη θέση 6+080 της μηκοτομής, αντιστοιχεί στον συνδυασμό εναλλαγών μεταλυολίθου με γραφιτικό σχιστόλιθο. Παρά τη διαφορετική γεωλογική σύσταση, αντιμετωπίζουμε όλη την ενότητα 5+300 ως 6+080 ως μια ενότητα, λόγω των παρόμοιων γεωμηχανικών ιδιοτήτων, που επιφέρουν και αντίστοιχους μηχανισμούς αστοχίας σήραγγας. Ξεκινάμε από το GSI. Από προηγούμενες μελέτες στην ίδια περιοχή (Marinos et al., 2016) μπορούμε να αντλήσουμε τα εξής δεδομένα: Το GSI στις περιοχές που διαπερνά η μηκοτομή της σήραγγας κυμαίνεται στο 10-15, είναι δηλαδή αρκετά χαμηλό. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι επίσης πολύ χαμηλή (5-10 MPa), ενώ το μέτρο ελαστικότητας ανέρχεται στα 2,5 έως 5 GPa, που είναι επίσης αρκετά χαμηλό και δηλώνει μια μεγάλη παραμορφωσιμότητα του βράχου. **Η βραχομάζα είναι σε όλη αυτή την έκταση τεκτονισμένη και διαταραγμένη.** Η γεώτρηση ASP-19 μας δίνει ένα RQD σχετικά χαμηλό, περί το 20-40%. Η υδροπερατότητα, τέλος είναι αρκετά χαμηλή, λόγω της πλήρωσης με αργιλικό υλικό, που υποδεικνύεται και από τα πορίσματα της γεώτρησης ASP-19, δηλαδή τη σχεδόν μηδενική περιεκτικότητα σε νερό και την ανυπαρξία πορώδους. Θα πρέπει να την θεωρήσουμε της τάξης του $< 10^{-7}$.



ΤΕ.2: Ασβεστόλιθος, πιθανώς καρστικοποιημένος (6+080 ως 6+140)

Η δεύτερη τεχνικογεωλογική ενότητα καταλαμβάνει εύρος από τη θέση 6+080 ως τη θέση 6+140 της μηκοτομής. Η σήραγγα διαπερνά ασβεστόλιθο. Από προηγούμενες μελέτες στην ίδια περιοχή (Marinos et al., 2016) μπορούμε να αντλήσουμε τα εξής δεδομένα: Το GSI στις περιοχές που διαπερνά η μηκοτομή της σήραγγας ανέρχεται έως και το 65, είναι δηλαδή πολύ υψηλό. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι σαφώς καλύτερη από αυτή του μεταλλυολίθου (28 MPa), ενώ το μέτρο ελαστικότητας ανέρχεται στα 24 GPa, που είναι επίσης σχετικά υψηλό και δηλώνει ψαθυρή συμπεριφορά, χωρίς επιρρέπεια σε ελαστικές παραμορφώσεις. Τα προβλήματα ξεκινούν με την έλλειψη των δεδομένων της γεώτρησης ASP-22. Κι αυτό, διότι σε περίπτωση καρστικοποίησης, τα δεδομένα της γεώτρησης ASP-19 για το ανατολικό τμήμα του ασβεστόλιθου της ευρύτερης περιοχής μελέτης δεν μπορούν να αξιοποιηθούν επαγωγικά για το συγκεκριμένο τμήμα της στοχευμένης περιοχής μελέτης. **Ο βασικός λόγος για τον οποίο το μικρό αυτό κομμάτι αποτελεί χωριστή τεχνικογεωλογική ενότητα, είναι η βάσιμη υποψία υψηλής υδροπερατότητας.** Ο ανατολικός σηματοδότης στις θέσεις 6+300 έως 6+650 είναι πράγματι συμπαγής, με ακέραια δείγματα πυρηνοληψίας. Αυτό όμως δεν αποτελεί εγγύηση για παρόμοιες συνθήκες και στη θέση 6+080 ως 6+140, που εξετάζουμε.

ΤΕ.3: Περιδοτίτης (6+140 ως 6+260)

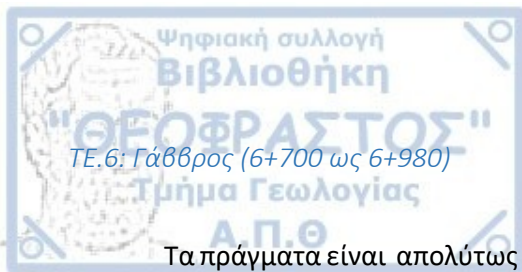
Για τον περιδοτίτη, από τη θέση 6+140 ως 6+260, δεν έχουμε καθόλου πληροφορίες από προηγούμενες μελέτες, έχουμε, όμως, κάποια σημαντικά στοιχεία από τη γεώτρηση ASP-17. Βρίσκεται σε αρκετά καλή κατάσταση, όχι τόσο καλή όσο του περικείμενου ασβεστόλιθου, πάντως σε μαζώδη δομή και σχετικά αδιατάρακτος. Το σσί κυμαίνεται γενικά κοντά στα 20 MPa, αλλά ειδικά στην περιοχή της σήραγγας πέφτει στο 14-15, ενώ το Εί του περιδοτίτη συνήθως κυμαίνεται γύρω στα 20 GPa, κάτι που επίσης δηλώνει ψαθυρή και όχι ελαστική συμπεριφορά. **Το RQD είναι αρκετά υψηλό, κοντά στο 80.** Το ερωτηματικό παραμένει η υδροπερατότητα. Στο ψηλότερο τμήμα του, δηλαδή σε αυτό όπου συναντά τη μηκοτομή της σήραγγας, **εμφανίζεται με ρωγμώσεις, οι οποίες αυξάνουν την υδροπερατότητα**, πιθανώς ακόμα και σε επίπεδα του $10^{-7} - 10^{-5}$, αν λάβουμε υπόψη τα δεδομένα του πίνακα 4.12 (β).

ΤΕ.4: Ασβεστόλιθος, συμπαγής (6+260 ως 6+520)

Η γεώτρηση ASP-19 είναι κατηγορηματική. Η τέταρτη τεχνικογεωλογική ενότητα, από τη θέση 6+260 ως την 6+520, **είναι η πιο “ασφαλής” από μηχανικής άποψης.** Συνδυάζει όλα τα πλεονεκτήματα υψηλής αντοχής του ασβεστόλιθου, με την πρόσθετη δυνατότητα, όμως, να αποκλείσουμε καρστ και ο,τιδήποτε μπορεί να αποβεί επιδεινωτικός παράγοντας για την υδροπερατότητα.

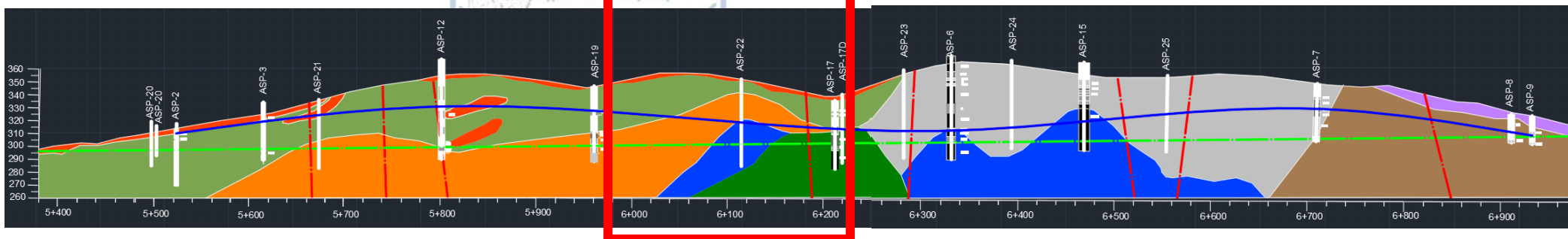
ΤΕ.5: Ιλυόλιθος (6+520 ως 6+700)

Χωρίς να σημαίνει τίποτα για την ποιότητα όλου του σχηματισμού G3a, στο σημείο διάτρησης ο ιλυόλιθος δεν είναι της καλύτερης δυνατής ποιότητας. Εμφανίζεται με ρωγμώσεις, που προφανώς **θα αυξήσουν κάπως την υδροπερατότητα, ενώ και η αντοχή του δείχνει προβληματική.** Το GSI έχει δεχθεί απομειώσεις λόγω του τεκτονισμού, αλλά και της διεπαφής με τον ασβεστόλιθο. Τα τεμάχια που αναμένονται, δύσκολα θα είναι μαζώδη. **Η συμπεριφορά θα πλησιάζει την ελαστική.**



Τα πράγματα είναι απολύτως σαφή. Ο γάββρος είναι πλήρως κατακερματισμένος. Το GSI θα κινηθεί οπωσδήποτε κάτω από το 50, θα υπάρχει κοκκώδης δομή ευρημάτων κατά τη σηραγγοποιία, και ασφαλώς εισροές υδάτων.

ΣΥΝΟΠΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ

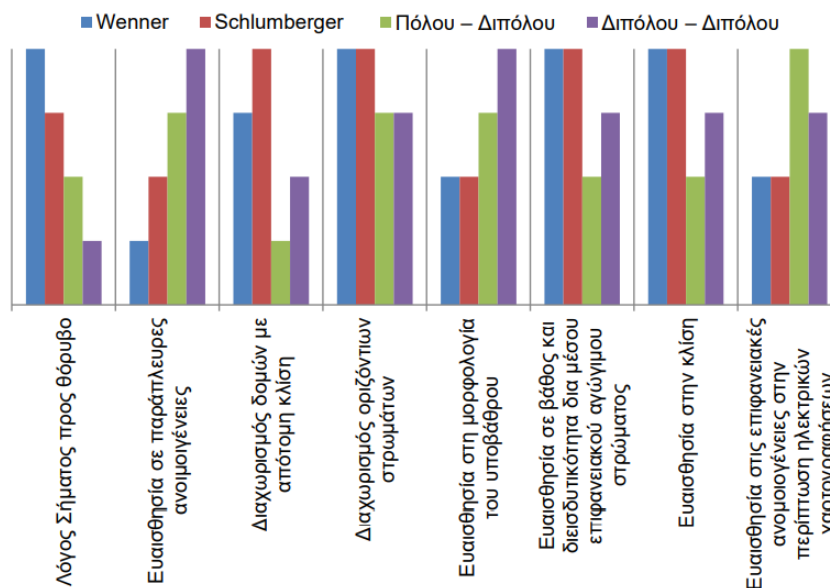


	TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6
	5+300 ως 6+080	6+080 ως 6+140	6+140 ως 6+260	6+260 ως 6+520	6+520 ως 6+700	6+700 ως 6+980
Περιγραφή	Εναλλαγές ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΥ με ΓΡΑΦΙΤΙΚΟ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟ, τεκτονισμένη, διαταραγμένη δομή, αδύναμη	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, μαζώδης δομή, πιθανώς καρστικοποιημένος, ισχυρός σχηματισμός	ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗΣ, μαζώδης δομή με ρωγμώσεις, μέτρια αποδυναμωμένος	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, μαζώδης δομή, αδιατάρακτος, χωρίς καρστ, ισχυρός σχηματισμός	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, αδύναμος αλλά χωρίς εξωτερικές ρωγμώσεις	ΓΑΒΒΡΟΣ, κατακερματισμένος, κοκκώδης
GSI	10-15	60-65	40-45	60-65	20-30 μ.ο.	30-40 μ.ο.
RQD (%)	20-40	?	60-80	100	20-40	0-20
σci (MPa)	10	28	15	28	12	14
Ei (GPa)	5	24	20	24	6	15
υδροπερατότητα (cm/sec)	μικρή < 10 ⁻⁷	? (πιθανώς μεγάλη)	μικρή/μέση < 10 ⁻⁵	μικρή < 10 ⁻⁷	μικρή/μέση < 10 ⁻⁵	μέση < 10 ⁻⁴

Πρέπει να σημειωθεί, ασφαλώς, ότι η διεξαγωγή ηλεκτρικής τομογραφίας γίνεται γιατί τα ευρήματα των γεωτρήσεων δεν καλύπτουν με απόλυτη αξιοπιστία όλο το φάσμα των ζητούμενων μας. Υπάρχουν ασαφή σημεία, εκτός από τα καρστ και τα ρήγματα, π.χ. λεπτές εναλλαγές γραφιτικών με ασβεστόλιθους κλπ., που διαφοροποιούν σημαντικά την ποιότητα βραχομάζας. Αυτά εντοπίζονται μόνο σε πολύ στοχευμένα σημεία, και είναι ασφαλώς ουτοπικό να θεωρήσουμε ότι μια σημειακή γεώτρηση δίνει την ακριβή εικόνα για όλο το μήκος του σχηματισμού στο βάθος της σήραγγας. Στόχος της εφαρμογής των ηλεκτρικών τομογραφιών είναι η πρόσθετη πληροφορία οριοθέτησης των σχηματισμών, που θα μας επιτρέψει να οριστικοποιήσουμε ή να διορθώσουμε το αρχικό γεωλογικό μας μοντέλο.

5.1 Επιλογή μεθόδου

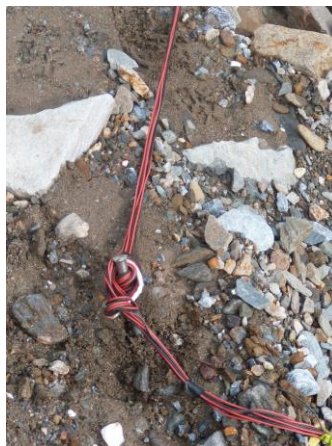
Είπαμε και προηγουμένως ότι εφόσον οι υπό μελέτη περιοχές βρίσκονται σε βάθος αρκετά μεγαλύτερο των 10 μέτρων, τα πλεονεκτήματα της υψηλής διακριτικής ικανότητας του γεωραντάρ αίρονται, και η ηλεκτρική τομογραφία είναι η μόνη λύση. Οσον αφορά τη διάταξη των ηλεκτροδίων που θα πρέπει να επιλέξουμε, αυτή, θα μας διαφωτίσει η εικόνα 2.19 της σελίδας 19:



Η διάταξη διπόλου – διπόλου παρουσιάζει δυο πλεονεκτήματα που μας είναι ζωτικής σημασίας: Αφ' ενός έχει μεγάλη ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες, από τις οποίες αναμένονται αρκετές, τόσο λόγω του έντονου τεκτονισμού στο δυτικό τμήμα, όσο και λόγω των αναμενόμενων ρηγμάτων εκατέρωθεν της περιοχής μελέτης. Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι η ευαισθησία στη μορφολογία του υποβάθρου, δηλαδή των κάθε είδους γεωλογικών ανωμαλιών. Ο λόγος σήματος/θορύβου είναι κάπως πιο χαμηλός σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις, αλλά λόγω των σχετικά περιορισμένων αποστάσεων μεταξύ των ηλεκτροδίων, δεν θα αποτελέσει πρόβλημα, αφού οι γεωμετρικοί παράγοντες σε συνδυασμό με το εύρος των ηλεκτρικών αντιστάσεων υλικών αναμένεται να συντελούν σε έναν ικανοποιητικό σήμα. Επιλέγουμε λοιπόν τη διάταξη διπόλου – διπόλου ως την πλέον ευνοϊκή για την έρευνά μας, δεδομένης της αναμενόμενης ανομοιογένειας των γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης.

5.2 Εργασίες πεδίου

Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στις 4/3/2020.



Εικόνα 5.1: Φωτογραφίες από τις μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας: το όργανο μέτρησης (αριστερά), συνδεδεμένο ηλεκτρόδιο (κέντρο) και άπλωμα καλωδίου τυλιγμένου σε στροφέιο (δεξιά)

Η έρευνα, όπως διευκρινίσαμε και σχηματικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, περιορίστηκε σε μήκος περίπου 243 μέτρων στο κέντρο της περιοχής μελέτης, με γεωμετρία που επέτρεψε τη διασκόπηση σε βάθος περίπου 60 μέτρων από την επιφάνεια της γης. Όπως είπαμε επίσης στο κεφάλαιο 2, αποφασίστηκε η μέθοδος διπόλου-διπόλου. Σε μια ευθεία γραμμή κατά μήκος του κύριου άξονα της διατομής μας, τα 24 ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις 10 μέτρων μεταξύ τους.



Εικόνα 5.2: Η περιοχή εφαρμογής της ηλεκτρικής διασκόπησης.

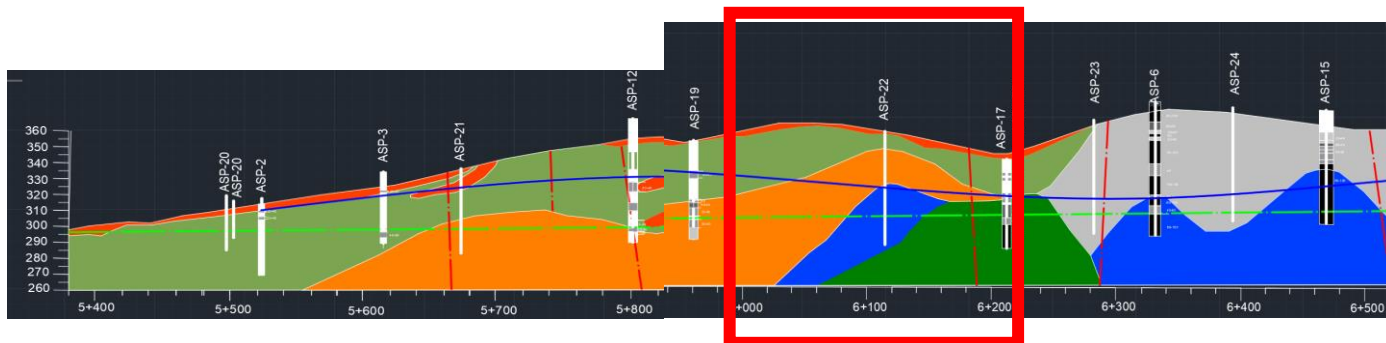
Τα σημεία θάλασης της κόκκινης γραμμής αντιστοιχούν στα σημεία τοποθέτησης των ηλεκτροδίων και της πηγής κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων πεδίου (4-3-2020).

ΣΗΜΕΙΟ	X	Y	H
l1_01	415602,332	4501279,602	350,94
l1_02	415594,155	4501285,461	348,947
l1_03	415586,706	4501291,786	352,118
l1_04	415579,183	4501297,543	352,701
l1_05	415571,629	4501303,466	353,536
l1_06	415562,075	4501307,525	353,806
l1_07	415552,395	4501310,968	353,967
l1_08	415545,274	4501316,924	353,785
l1_09	415537,615	4501324,219	354,47
l1_10	415530,541	4501330,85	355,127
l1_11	415522,462	4501336,975	356,441

l1_12	415515,654	4501343,488	359,185
l1_13	415512,159	4501352,337	359,001
l1_14	415508,645	4501361,956	359,729
l1_15	415505,339	4501371,408	359,858
l1_16	415501,549	4501380,765	359,65
l1_17	415497,461	4501389,542	359,445
l1_18	415493,775	4501399,033	359,263
l1_19	415490,257	4501408,397	359,105
l1_20	415486,739	4501417,909	358,441
l1_21	415483,165	4501427,369	357,775
l1_22	415479,901	4501436,749	356,979
l1_23	415476,312	4501445,907	355,901
l1_24	415472,852	4501455,312	354,43

Ο πίνακας συντεταγμένων των σημείων εφαρμογής των ηλεκτροδίων, κατά την εφαρμογή της μεθόδου ηλεκτρικής διασκόπησης διπόλου-διπόλου. Παρουσιάζονται οι συντεταγμένες (X,Y) στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87) και τα ορθοκανονικά υψόμετρα (H), από την επιφάνεια της θάλασσας.

Που αντιστοιχεί στο απόσπασμα της περιοχής μελέτης, που καλύπτει ένα εύρος από περίπου τη Χ.Θ. 5+980 ως την 6+220:



Σε σχέση με τις παραμέτρους των ηλεκτρικών μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικός παλμός 0.5 sec με κατ' ελάχιστο 4 κύκλους επανάληψης οι οποίοι έφτασαν του 6 σε περίπτωση που η τυπική απόκλιση των τριών αρχικών μετρήσεων ήταν μεγαλύτερη του 1%.

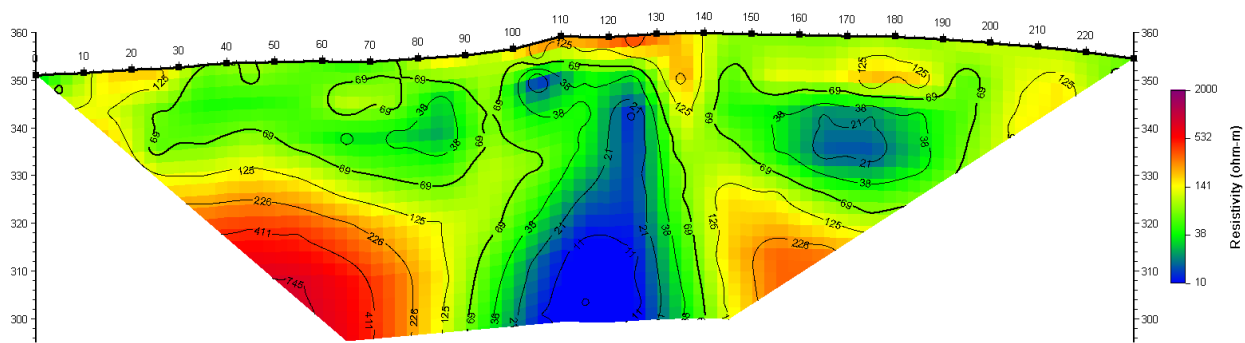
Γενικά η ποιότητα των μετρήσεων κρίνεται σχετικά καλή καθώς λίγες μετρήσεις (<10%) παρουσίασαν σφάλμα επανάληψης μεγαλύτερο του 10%.

Τα δεδομένα κάθε τομής ξεχωριστά υποβλήθηκαν σε διόρθωση και φιλτράρισμα. Με βάση την ακριβή τοπογραφική θέση κάθε ηλεκτροδίου έγινε υπολογισμός του του πραγματικού γεωμετρικού παράγοντα με βάση τις αποστάσεις ώστε να υπολογιστούν οι διορθωμένες τιμές φαινόμενης αντίστασης. Τα δεδομένα, των φαινόμενων αντιστάσεων αποθηκεύονται με την εισαγωγή του πραγματικού υψομέτρου του κάθε ηλεκτροδίου ώστε να ληφθεί υπόψη το τοπογραφικό ανάγλυφο.

Τα δεδομένα, στη συνέχεια, υποβλήθηκαν σε διδιάστατη αντιστροφή με το λογισμικό DC-2DPro (Kim, 2010). Πρόκειται για αλγόριθμο που εκτελεί μη γραμμική διδιάστατη αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων με την μέθοδο αντιστροφής του Occam (Constable, 1987). Ο αλγόριθμος είναι επαναληπτικός και σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να επιλύσει το ευθύ πρόβλημα.

Αρχικά ορίζεται η δομή των παραμέτρων και η διαδικασία της αντιστροφής επαναλαμβάνεται αρκετές φορές με το να απομακρύνεται ένα μικρό πλήθος μετρήσεων κάθε φορά με βάση το % σφάλμα μεταξύ των πραγματικών και συνθετικών δεδομένων. Η αντιστροφή επαναλήφθηκε αρκετές φορές με διαφορετικές παραμέτρους. Τα τελικά αποτελέσματα της αντιστροφής χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα αξιόπιστα καθώς το % λάθος (RMS) μετά από 6 επαναλήψεις ήταν σχετικά χαμηλό 8%.

Το αποτέλεσμα ήταν η παρακάτω ηλεκτρική τομή:



Εικόνα 5.3: Το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής διασκόπησης

Στην ηλεκτρική τομή που παρουσιάζεται (Εικόνα 5.3) αποτυπώνονται τα πραγματικά βάθη σε απόλυτα υψόμετρα και οι πραγματικές υπεδάφινες αντιστάσεις οι οποίες και παρουσιάζονται με ενιαία χρωματική κλίμακα «ουράνιου τόξου» με τα ψυχρά χρώματα (μπλε) να αντιστοιχούν σε χαμηλές αντιστάσεις (π.χ. διαρρηγμένο πέτρωμα) και θερμά χρώματα (κόκκινα) να αντιστοιχούν σε υψηλές αντιστάσεις (π.χ. ασβεστόλιθος).

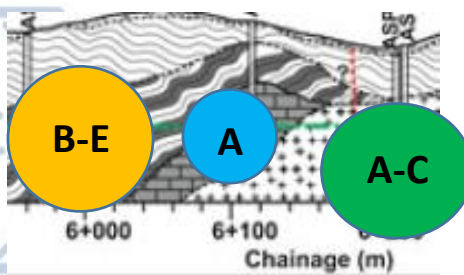
Η εικόνα της ηλεκτρικής τομής επιβεβαιώνει την αρχική υπόθεση για το γεωλογικό μοντέλο. Οι πολύ επιφανειακοί σχηματισμοί έχουν γενικά μέσες αντιστάσεις, με εξαίρεση μια νησίδα υψηλής αντίστασης πάχους περίπου 5 μέτρων (100-130μ της τομής) που πιθανά αποτελείται από ανθρωπογενή υλικά. Γενικά τα πρώτα 20 μέτρα της τομής εμφανίζουν μέσες με χαμηλές αντιστάσεις και φαίνεται να αντιστοιχούν, με βάση και τις γεωτρητικές πληροφορίες, σε μεταιλυόλιθους και γραφιτικούς σχιστόλιθους. Κατά τόπους υπάρχουν φακοί με πιο λεπτόκοκκο (χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης) υλικό (π.χ. 160-180μ της τομής σε υψόμετρο βάθους από 340-330μ).

Σε μεγαλύτερο βάθος (απόλυτο υψόμετρο 330μ περίπου) στο δυτικό τμήμα της τομής εμφανίζεται σχηματισμός με αρκετά υψηλές αντιστάσεις που βάσει των γεωλογικών δεδομένων φαίνεται να αντιστοιχεί σε ασβεστόλιθο. Οι μεγάλες ηλεκτρικές αντιστάσεις (500-2000 Ohm) δείχνουν ότι είναι καλής ποιότητας και βραχομηχανικών ιδιοτήτων υλικό, χωρίς ιδιαίτερο πορώδες.

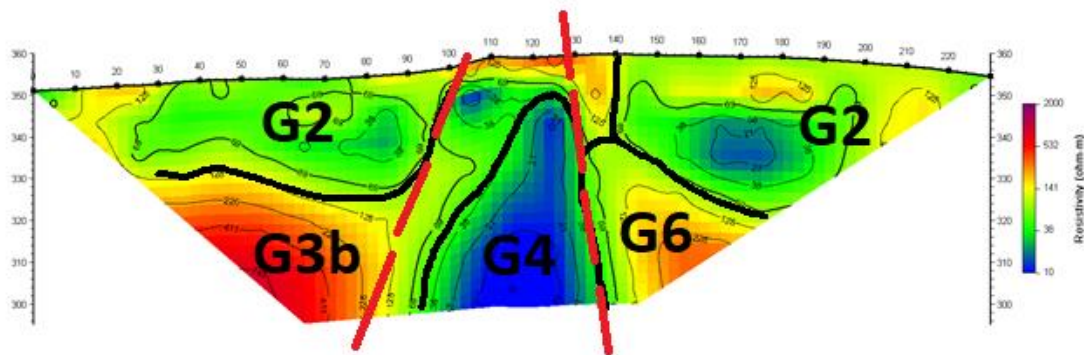
Ο σχηματισμός αυτός διακόπτεται στο κεντρικό τμήμα της τομής (100-135 μέτρα) από μια αγωγίμη ζώνη, με αντιστάσεις 10-20 Ωμ. Η ζώνη αυτή σχετίζεται πολύ πιθανά με την παρουσία ρηγμάτων, τεκτονικών επαφών και η χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση οφείλεται στην παρουσία του κατακερματισμένου υλικού που λόγω του δευτερογενούς πορώδους έχει πληρωθεί με λεπτόκοκκο υλικό η/και υγρασία.

Στο ανατολικό τμήμα της τομής και μετά την παρεμβολή της ζώνης χαμηλής αντίστασης, εμφανίζεται σχηματισμός με υψηλές αντιστάσεις που συσχετίζονται με τον υποκείμενο περιδοτή.

Η ζώνη πολύ χαμηλής αντίστασης ταιριάζει με την παρουσία μια τεκτονισμένης ζώνης από ένα ή περισσότερα ρήγματα (σύστημα ρηγμάτων) στην επαφή του ασβεστόλιθου με τον περιδοτή. Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία της λιθολογικής/τεκτονικής ερμηνείας με τις διαχωριστικές γραμμές ανάμεσα στους σχηματισμούς (μαύρη γραμμή) και τα πιθανά ρήγματα (κόκκινες στικτές γραμμές). Γενικά οι τιμές ηλεκτρικής αντίστασης των σχηματισμών βρίσκονται σε συμφωνία με το εύρος των αναμενόμενων αντιστάσεων με βάση τους βιβλιογραφικούς πίνακες.

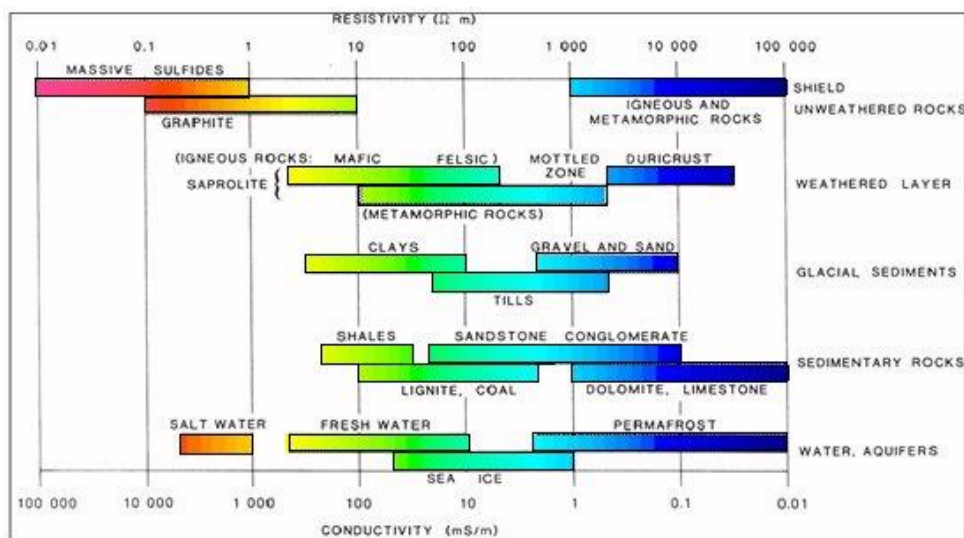


Εικόνα 5.4: Το απόσπασμα από το γεωλογικό μοντέλο που αντιστοιχεί στην περιοχή εφαρμογής της ηλεκτρικής διασκόπησης.



Εικόνα 5.5: Γεωλογική ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Οι τιμές ηλεκτρικής αντίστασης του ασβεστολίθου ταιριάζουν με το διάγραμμα ηλεκτρικής αγωγιμότητας υλικών. Πράγματι, το καθαρό νερό έχει αντιστάσεις της τάξης των $> 10 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$, ενώ σε περίπτωση πλήρωσης με αργιλικά, η αντίσταση θα έπεφτε ακόμα χαμηλότερα.



Εικόνα 5.6: Resistivity Characteristics of Geological Targets – Palacky, G. (1987)

6. ΠΟΡΙΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

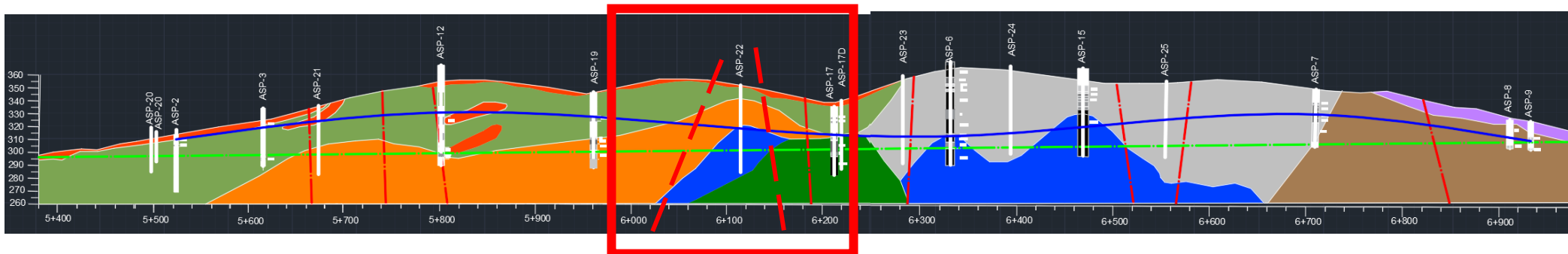


Πριν παραθέσουμε τα συμπεράσματα της εργασίας μας, κρίνουμε σκόπιμο να επαναλάβουμε τα βασικά σημεία της, και να συνοψίσουμε τους βασικούς άξονες ενδιαφέροντος.

Το αντικείμενο μας ήταν η προσπάθεια εξακρίβωσης με γεωφυσικές μεθόδους των (τεχνητο)γεωλογικών συνθηκών σε τμήμα της σχεδιαζόμενης σήραγγας Ασβεστοχωρίου στην περιοχή Ρετζικί (Πεύκα) Θεσσαλονίκης. Και λέμε “εξακρίβωσης”, διότι το γεωλογικό μοντέλο της περιοχής προϋπήρχε της έρευνάς μας, χάρη σε συμβατικές μεθόδους γεωτρήσεων και χαρτογράφησης. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της περιοχής άφηνε τα προϋπάρχοντα πορίσματα αρκετά επισφαλή, κυρίως λόγω των έντονων υποψιών ύπαρξης φαινομένων όπως καρστ και ρήγματα, που εξ ορισμού τους και από τη φύση τους είναι ιδανικό πεδίο εφαρμογής γεωφυσικών μεθόδων. Το γεγονός ότι ο άξονας της σήραγγας βρίσκεται σταθερά κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα, εγγυάται την πλήρωση των ενδεχόμενων καρστ και ρηγμάτων με νερό. Συνεπώς, μια μέθοδος ηλεκτρικής διασκόπησης, που βασίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, είναι αναμενόμενο ότι θα δώσει σαφείς και οριστικές απαντήσεις. Οι απαντήσεις αυτές θα οριστικοποιήσουν την επιλεγόμενη μέθοδο διάνοιξης.

6.1 Προτεινόμενο πρόγραμμα των έργων σήραγγοποιίας

Επανερχόμαστε στον συνοπτικό πίνακα, ώστε να θυμηθούμε την γενική ειοπτεία της περιοχής μελέτης. Στην υπάρχουσα συγκεντρωτική αυτή εικόνα, οριστική πλέον, αφού επιβεβαιώθηκε κατά το μάλλον από την ηλεκτρική διασκόπηση, προστίθενται τώρα τα επιβεβαιωμένα ρήγματα (με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και θα ακολουθήσει στην επόμενη σελίδα η καταγραφή με τις πιθανές αστοχίες σήραγγας, όπως και τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης.



	TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6
	TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6
	TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6
Χ.Θ.	5+300 ως 6+080	6+080 ως 6+140	6+140 ως 6+260	6+260 ως 6+520	6+520 ως 6+700	6+700 ως 6+980
Περιγραφή	Εναλλαγές ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΥ με ΓΡΑΦΙΤΙΚΟ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟ, τεκτονισμένη, διαταραγμένη δομή, αδύναμη	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, μαζώδης δομή, πιθανώς καρστικοποιημένος, ισχυρός σχηματισμός	ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗΣ, μαζώδης δομή με ρωγμώσεις, μέτρια αποδυναμωμένος	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, μαζώδης δομή, αδιατάρακτος, χωρίς καρστ, ισχυρός σχηματισμός	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, αδύναμος αλλά χωρίς εξωτερικές ρωγμώσεις	ΓΑΒΒΡΟΣ, κατακερματισμένος, κοκκώδης
GSI	10-15	60-65	40-45	60-65	20-30 μ.ο.	30-40 μ.ο.
RQD (%)	20-40	?	60-80	100	20-40	0-20
σ_{ci} (MPa)	10	28	15	28	12	14
Ei (GPa)	5	24	20	24	6	15
υδροπερατότητα (cm/sec)	μικρή $< 10^{-7}$	? (πιθανώς μεγάλη)	μικρή/μέση $< 10^{-5}$	μικρή $< 10^{-7}$	μικρή/μέση $< 10^{-5}$	μέση $< 10^{-4}$

Αξιολόγηση TE στο πλαίσιο της σηραγοποιίας.

TE1: Η αδυναμία της δομής της εκτενούς αυτής ενότητας και ο κατακερματισμός που την διακρίνει είναι ένδειξη ότι τα προβλήματα που θα αντιμετωπίσει η εκσκαφή αφορούν **μικροκαταπτώσεις και μικρές παραμορφώσεις στα πιο αδύναμα σημεία**. Η ανυπαρξία μεγάλων βραχωδών τεμαχών, μάλλον αποκλείει τα προβλήματα τύπου σφήνας, ενώ η πλήρωση με αργιλικά ταπεινώνει το δευτερογενές πορώδες και εκτός εντοπισμένων ανωμαλιών, θα πρέπει να **αποκλείει τις εισροές** κατά μήκος του άξονα εκσκαφής. Τα μέτρα που προτείνονται είναι φυσικά η εφαρμογή αγκυρίων και εκτοξευμένου σκυροδέματος, αλλά επιπλέον, εξαιτίας και της μικρής διαμέτρου των καταπιπτόντων υλικών, και κάποιας ομπρέλας προπορείας.

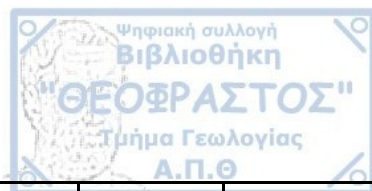
TE2: Η προβληματική ασβεστολιθική ενότητα, για την οποία διεξήχθη η διασκόπηση, αναμένεται να αποτελέσει μια δύσκολη ενότητα, όχι στην εκσκαφή της, αλλά στην **αντιμετώπιση του μεγάλου όγκου εισρέοντος νερού**. Τα όποια προβλήματα παρουσιαστούν, κυρίως στην είσοδο και την έξοδο από την επίμαχη ζώνη, θα αφορούν την πτώση κάποιου ασβεστολιθικού τεμάχους καλής ποιότητας, άρα θα πρέπει να είμαστε **προετοιμασμένοι για κάποια αστοχία τύπου σφήνας**. Στην περίπτωση αυτή, τα μέτρα ασφαλείας δεν θα πρέπει να είναι κάτι το ιδιαίτερα απαιτητικό, εκτός φυσικά από την συνήθη εφαρμογή αγκυρίων και εκτοξευμένου σκυροδέματος.

TE3: Η ενότητα του περιδοτίτη είναι αρκετά ασφαλής από άποψη αντοχής. Η συνέχεια και η έκταση των ρωγματώσεων θα πρέπει να μας υποψιάσουν για κάποιες πιθανές, **τοπικά στοχευμένες εισροές**, όχι σπουδαίου όγκου, ενώ η τμήση του βράχου εξαιτίας των ίδιων αυτών ρωγματώσεων, πιθανώς να δημιουργήσει κάποιο χονδροειδή τεμαχισμό της άρρηκτης βραχομάζας, **ο οποίος τεμαχισμός εγκυμονεί προβλήματα τύπου σφήνας**. Τα μέτρα ασφαλείας δεν είναι διαφορετικά από αυτά της TE2.

ΤΕ4: Η επιστροφή στον ασβεστόλιθο θα είναι πιο “ανώδυνη” στην καινούρια τεχνικογεωλογική ενότητα. Η ποιότητα είναι εξαιρετική, οι εισροές εδώ δεν έχουν λόγο να είναι σημαντικές, ενώ τα όποια προβλήματα παρουσιαστούν περιορίζονται σε ενδεχόμενα καταπτώσεων τύπου σφήνας. Ισχύουν τα προαναφερόμενα μέτρα ασφαλείας για τις ΤΕ 2 και 3.

ΤΕ5: Ο μεταϊλύολιθος αποτελεί ένα “αίνιγμα”. Το εξαιρετικά ευρέος φάσματος GSI και η μεγάλη πιθανότητα αυξομειώσεων στην ποιότητα και τον κερματισμό, παρά τα αρχικά ενθαρρυντικά σημεία από το RQD της γεώτρησης 15, μας αναγκάζουν να είμαστε προσεκτικοί και να εφαρμόσουμε πολλές και ποικίλες μεθόδους μέτρων ασφαλείας. Περιμένουμε από **καταπτώσεις τύπου σφήνας, έως “καμινάδας”, αλλά ακόμη και μικρών παραμορφώσεων στα πιο αδύναμα σημεία**. Αυτό σημαίνει πως θα αναγκαστούμε να λάβουμε υπόψη την εφαρμογή βλήτρων προπορείας, αλλά και κάποιων πλαισίων, ελαφρών, όσο ο κερματισμός δεν είναι τόσο έντονος και δεν τείνει σε βαθμό πλήρους αποσάθρωσης.

ΤΕ6: Ο γάββρος θεωρητικά δεν θα έπρεπε να αποτελεί υλικό που θα δημιουργεί σοβαρά προβλήματα, όμως ο έντονος κερματισμός και η αποσάθρωση, καθώς και η παρουσία του στην περιοχή του στομίου της εξόδου της σήραγγας, δημιουργούν προβληματισμούς. Αυτοί περιλαμβάνουν τόσο **καταπτώσεις υλικών πολύ μικρής διαμέτρου (π.χ. καταρροή), όσο και την πιθανότητα κάποιων υπολογίσιμων εισροών**. Στην περίπτωση που το απευκταίο αυτό ενδεχόμενο γίνει πραγματικότητα, θα πρέπει να εφαρμόσουμε βαριά πλαίσια εκτός από σύστημα δοκών προπορείας, χωρίς να παραλείψουμε, φυσικά, και την εφαρμογή εκτοξευμένου σκυροδέματος. Καλό θα ήταν να λάβουμε υπόψη και την εφαρμογή ομπρέλας προπορείας κοντά στο στόμιο της σήραγγας.



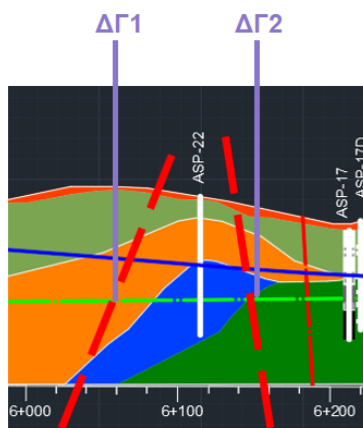
ΤΕ	Λιθολογία	Χ.Θ (m)	GSI	σ_{ci} (MPa)	Αστοχία	Θέση υδροφόρου ορίζοντα σε σχέση με άξονα σήραγγας	Εισροές	Μέτρα προστασίας
1	Πρασινοσχιστόλιθος – Γραφικός σχιστόλιθος - Ιλυόλιθος	5+300 ως 6+080	10-15	10	Sh- Ch - Rv	+ 15-25 m	Όχι	Ομπρέλα δοκών προπορείας, εκτοξευμένο σκυρόδεμα, αγκύρια, εφαρμογή πλαισίων
2	Ασβεστόλιθος (πιθανώς καρστικοποιημένος)	6+080 ως 6+140	60-65	28	Wg	+ 10-15 m	Μεγάλες	Εφαρμογή αγκυρίων και εκτοξευμένου σκυροδέματος. Ανάγκη αποστραγγιστικών μέτρων.
3	Περιδοτίτης	6+140 ως 6+260	40-45	15	Wg	+ 10 m	Μεσαίες	Εφαρμογή αγκυρίων και εκτοξευμένου σκυροδέματος
4	Ασβεστόλιθος	6+260 ως 6+520	60-65	28	Wg	+ 10-15 m	Μικρές	Εφαρμογή αγκυρίων και εκτοξευμένου σκυροδέματος
5	Μεταίλυόλιθος	6+520 ως 6+700	20-30	12	Wg- Ch- Sh	+ 15-25 m	Μικρές	Βλήτρα προπορείας και εφαρμογή αγκυρίων, εκτοξευμένου σκυροδέματος και πιθανώς ελαφρών πλαισίων
6	Γάββρος	6+700 ως 6+980	30-40	14	Sh - Rv	+ 0-20 m	Εισροές	Γρήγορη εφαρμογή βαριών πλαισίων, εφαρμογή αγκυρίων, εκτοξευμένο σκυρόδεμα και ομπρέλα δοκών προπορείας

6.2 Ανακεφαλαίωση - προτάσεις

→ Οι **αστοχίες καταπτώσεων είναι ελεγχόμενες** και αντιμετωπίζονται επίσης συντηρητικά, με μια σειρά από τα συνήθη μέτρα πρόληψης. Δεν έχουμε ιδιαίτερες επικίνδυνες περιοχές, και εκείνες που πράγματι αποτελούν προβληματικά κομμάτια, ειδικά στο βορειοδυτικό τμήμα, είναι προβλέψιμες και σχετικά ομοιογενείς από τεχνικογεωλογικής απόψεως, αν και όχι εξίσου ομοιογενείς γεωλογικά / στρωματογραφικά.

Ωστόσο, στην περιοχή των ρηγμάτων δημιουργούνται ζώνες έντονου κερματισμού, και αναμένονται καταπτώσεις τύπου καμινάδας, ή ακόμα και καταρροής στο δυτικό ρήγμα, εκεί, δηλαδή, όπου εμφανίζονται οι εναλλαγές του μεταλυόλιθου με τον γραφιτικό σχιστόλιθο (Τ.Ε. 1), καθώς πρόκειται για υλικά μαλακά και εύθρυπτα.

→ Τα **προβλήματα εισροών** αναμένονται έντονα στο αποκομμένο τέμαχος ασβεστολίθου στο δυτικό κομμάτι, που εγκλωβίζεται μεταξύ ιλυόλιθου και περιδοτίτη. Η ηλεκτρική τομογραφία έδωσε έντονες ενδείξεις καρστικοποίησης στην Τ.Ε. 2, κατά πάσα πιθανότητα καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο, με παρουσία ρηγμάτων εκατέρωθεν. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να προβλεφθούν τα αντίστοιχα **αποστραγγιστικά έργα**, καθώς η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται πάνω από τον άξονα της σήραγγας σε όλο το πλάτος της επίμαχης ενότητας. Ωστόσο, καθώς υπάρχει και η πιθανότητα της πλήρωσης με κορεσμένο αργιλικό υλικό, το οποίο επίσης απομειώνει σημαντικά την ηλεκτρική αντίσταση, κρίνεται σκοπιμότητα η **διεξαγωγή μιας δειγματοληπτικής γεώτρησης στη θέση 6+100**, δηλαδή στην κορυφή του ασβεστολίθου, είτε η ανάκτηση των δεδομένων της ASP-22, και σε ιδανική περίπτωση, **κάποιες επιπλέον στις θέσεις 6+060 και 6+150**, δηλαδή στις τομές των ενδεχόμενων ρηγμάτων με τον άξονα της σήραγγας, ώστε να επιβεβαιωθεί η ριζική αλλαγή γεωλογικής σύστασης.



Εικόνα 6.1: Προτεινόμενες θέσεις δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (ΔΓ)

→ Παρόμοια προβλήματα με την Τ.Ε.2, μικρότερης έκτασης όμως, αναμένονται τόσο στο κομμάτι των ρωγματομένου περιδοτίτη αμέσως μετά, όσο και του γάββρου, στο ανατολικό κομμάτι της σήραγγας.

Προλογικό σημείωμα.....	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1 Σκοπός-αντικείμενο.....	6
1.2 Μεθοδολογία – Διαθέσιμα στοιχεία και εργαλεία	9
1.3 Η περιοχή έρευνας.....	10
2. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ. ΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	12
2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2 “Από την φύση τους”: Ειδική αγωγιμότητα και ειδική αντίσταση	12
2.3 Η εισαγωγή στην “εξίσωση” των πρώτων “μη εγγενών” χαρακτηριστικών: Πορώδες και αλατότητα	14
2.4 Η εισαγωγή των υπόλοιπων “μη εγγενών” χαρακτηριστικών. Δευτερογενές πορώδες	14
2.5 Συνδυασμοί υλικών. Μήκη και πάχη. Όταν η “εξίσωση” γίνεται πιο περίπλοκη.	15
2.6 Βασικές αρχές της ηλεκτρικής τομογραφίας	17
2.7 Σχεδιασμός.....	18
2.8 Η επεξεργασία	19
2.9 Γιατί ERT; Η ηλεκτρική τομογραφία σε σύγκριση με τη μέθοδο γεωραντάρ	21
2.10 Οι διατάξεις των ηλεκτροδίων στη μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας.....	22
2.11 Τα υπέρ και τα κατά κάθε διάταξης ηλεκτροδίων	24
3. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	25
3.1 Ποιότητα βραχομάζας. Δείκτης GSI	25
3.2 Το TBC	26
3.3 Τα μέτρα ασφαλείας	28
4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	33
4.1 Ευρύτερη γεωλογία περιοχής μελέτης	33
4.2 Στοχευμένη γεωλογία	35
4.3 Τεχνικογεωλογικές ενότητες.....	46
5. Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ	50
5.1 Επιλογή μεθόδου	50
5.2 Εργασίες πεδίου.....	51
6. ΠΟΡΙΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	55
6.1 Προτεινόμενο πρόγραμμα των έργων σήραγγοποιίας	55
6.2 Ανακεφαλαίωση - προτάσεις.....	59
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	61
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	63

Εικόνα 1.1: Η περιοχή έρευνας, σημασμένη σε κόκκινο πλαίσιο στα ΒΑ του πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης, σε κλίμακα 1:50.000, 1:20.000 και 1:5.000	10
Εικόνα 1.2: Η περιοχή μελέτης – άποψη από ΒΔ, Β-ΒΑ και ΒΑ αντίστοιχα. Λήψεις εικόνων: 29/9/2019 και 5/10/2019.....	11
Εικόνα 2.1. Η ηλεκτρική αντίσταση και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, ως χαρακτηριστικό φυσικό μέγεθος ορισμένων υλικών. Στα πλέον αγώγιμα υλικά κατατάσσονται τα άλατα, τα θειικά και τα γραφίτικά, ενώ στα λιγότερο αγώγιμα τα ηφαιστιογενή, οι ασβεστόλιθοι και φυσικά ο πάγος.	12
(Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου, 5-6)	
Εικόνα 2.2. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση πετρωμάτων, εκπεφρασμένη σε εύρη τιμών (Βαφειδής και Αμολοχίτης, 1992).....	13
Εικόνα 2.3. Η ηλεκτρική αντίσταση ενός σχηματισμού (R), είναι συνάρτηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υλικού (ρ), αντιστρόφως ανάλογη της διατομής (A), ευθέως ανάλογη του μήκους (L).....	15
Εικόνα 2.4. Απλουστευμένη απεικόνιση διαδρομής ηλεκτρικού ρεύματος στο πεδίο (Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου).....	18
Εικόνα 2.5: Η πολλαπλότητα των οδών διέλευσης του ρεύματος και ο υπολογισμός του βάθους αλλαγής σχηματισμού (Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου, σ. 21)	19
Εικόνα 2.6: Τα βήματα της επαναληπτικής διαδικασίας προσδιορισμού της υπεδαφικής μορφής από τις μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Από τη χονδρική, σαφώς υπεραπλουστευτική προσέγγιση, καταλήγουμε με προοδευτικές τροποποιήσεις στο μοντέλο εκείνο που “απέχει” ελάχιστα από την πραγματικότητα (Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου, σ. 40 εξ.).....	20
Εικόνα 2.7: Η επιλεγείσα μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας (αριστερά) σε σχέση με τη μέθοδο γεωραντάρ (δεξιά). (Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου)	21
Εικόνα 2.8: Οι πέντε καθιερωμένοι σχηματισμοί πομπών (A,B) και ηλεκτροδίων (M,N) σε μια ηλεκτρική διασκόπηση (Τσούρλος, διαφάνειες σεμιναρίου)	22
Εικόνα 2.9: Η διάταξη Wenner σε μια σχηματική περιγραφή. Ο υπεδαφικός σχηματισμός σαρώνεται πάνω σε παράλληλο άξονα κίνησης και χαρτογραφείται σε διάφορα βάθη.....	23
Εικόνα 2.10: Τα υπέρ και τα κατά των διαφόρων διατάξεων σε συγκριτική συμπαράθεση (Αποστολόπουλος, 2013)	24
Εικόνα 3.1: Υπολογισμός του GSI (Marinos, 2011).	25
Εικόνα 3.2: Το Tunnel Behaviour Chart – TBC (Marinos, 2012). Στο κόκκινο πλαίσιο περικλείονται οι περιπτώσεις που μας ενδιαφέρουν, διότι το υπερκείμενο είναι πολύ μικρής τάξης μεγέθους.....	27
Εικόνα 4.1: Η ευρύτερη γεωλογία της περιοχής. Η θέση της περιοχής μελέτης στη γεωλογία του ελλαδικού χώρου (αριστερά). Τα πετρώματα από τα οποία αποτελείται η περιβάλλουσα περιοχή, σε κλίμακα 1:50.000 (δεξιά). Πρασινοσχιστόλιθοι και γραφίτικοι σχιστόλιθοι (με πράσινο), ασβεστόλιθοι (με μπλε) και γάββροι (με μοβ).	33
Εικόνα 4.2: Οι σχηματισμοί της περιοχής σε οριζοντιογραφία (Μουντράκης, 1985).....	35
Εικόνα 4.3: Η στοχευμένη γεωλογία της περιοχής (Marinos et al., 2015). Τα υλικά που αποτελούν τη “στενή” περιοχή μελέτης – αυτή που εκτείνεται σε μήκος λίγων εκατοντάδων μέτρων, όχι δεκάδων χιλιομέτρων. Σε κόκκινο πλαίσιο, η περιοχή που καλύφθηκε τελικά από την ηλεκτρική μας διασκόπηση. Με πράσινο χρώμα ο άξονας της σχεδιαζόμενης σήραγγας. Με κόκκινες λεπτές γραμμές, τα πιθανά ρήγματα.....	35

Εικόνα 4.4: Τα όξινα υγρά διαλύουν το ασβεστολιθικό πέτρωμα και δημιουργούν ρωγμές κατακόρυφης διαδρομής. Αυτές φαρδαίνουν και σχηματίζουν υπόγειες πηγές, που τελικά συγκεντρώνονται στο εσωτερικό του ασβεστολίθου και δημιουργούν έγκοιλα, δηλαδή “σπηλιές” πληρώσιμες με νερό, όπου, φυσικά, η διαβρωτική δράση συνεχίζεται “Φρένο” στην όλη διαδικασία βάζουν ιζηματογενή ή ηφαιστιογενή πετρώματα, όπου η διάβρωση δεν είναι εφικτή.....	36
Εικόνα 4.5: Φωτογραφίες της περιοχής μελέτης από διάφορα σημεία. Σε κόκκινο πλαίσιο στον χάρτη-οδηγό, η περιοχή που τελικά καλύφθηκε από την ηλεκτρική διασκόπηση. Με κόκκινο κύκλο, οι γεωτρήσεις που τελικώς αξιοποιήθηκαν.	38
Εικόνα 4.6: Φωτογραφίες, εντοπισμός και περιγραφή των ευρημάτων.....	39
Εικόνα 4.7: Η ανάλυση της πυρηνοληψίας (RQD) στα τρία τμήματα της σήραγγας, το δυτικό, το μεσαίο και το ανατολικό. Κάτω δεξιά, σε μορφή στήλης, η γραφική αξιολόγηση της πυρηνοληψίας (RQD). Υψηλότερες τιμές ίσον μεγαλύτερο GSI, ίσον πιο αξιόπιστος σχηματισμός.	40
Εικόνα 4.8: Η κατανομή των εδαφικών μας σχηματισμών σε ομάδες ποιότητας, σύμφωνα με τον δείκτη GSI.	41
Εικόνα 4.9: Οι εκτιμήσεις GSI της πρώτης μελέτης στοχευμένης γεωλογίας (Marinos et al., 2016).....	45
Εικόνα 4.10: (α) Η κατάταξη της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, σ _{ci} (Hoek και Μαρίνος, 2000) (β) Το εύρος τιμών υδροπερατότητας για διάφορους σχηματισμούς, σε cm/sec (Freeze and Cherry, 1979).....	46
Εικόνα 5.1: Φωτογραφίες από τις μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας: το όργανο μέτρησης (αριστερά), συνδεδεμένο ηλεκτρόδιο (κέντρο) και άπλωμα καλωδίου τυλιγμένου σε στροφείο (δεξιά).	51
Εικόνα 5.2: Η περιοχή εφαρμογής της ηλεκτρικής διασκόπησης. Τα σημεία θάλασης της κόκκινης γραμμής αντιστοιχούν στα σημεία τοποθέτησης των ηλεκτροδίων και της πηγής κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων πεδίου (4-3-2020).	51
Εικόνα 5.3: Το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής διασκόπησης.....	53
Εικόνα 5.4: Το απόσπασμα από το γεωλογικό μοντέλο που αντιστοιχεί στην περιοχή εφαρμογής της ηλεκτρικής διασκόπησης.	54
Εικόνα 5.5: Πρόβλεψη κατανομής σχηματισμών επί του αποτελέσματος της ηλεκτρικής τομογραφίας.....	54
Εικόνα 5.6: Resistivity Characteristics of Geological Targets – Palacky, G. (1987).....	54
Εικόνα 6.1: Προτεινόμενες θέσεις δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (ΔΓ).....	59

Γεωηλεκτρική διασκόπηση στο λιγνιτωρυχείο Μαυροπηγής Ν. Κοζάνης. Προσομοίωση του πειράματος ηλεκτρικής τομογραφίας για τον σχεδιασμό της γεωφυσικής διασκόπησης και την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων, Αναστασιάδης, Ανδρέας (2014), Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πορών, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Γεωλογία της Ελλάδας, Μουντράκης, Δημοσθένης (1985) University Studio Press.

Γεωλογία της περιρροδοπικής ζώνης στην περιοχή Ευκαρπία – Φίλυρο, Μαϊσουράτζε, Λεβάν (2015), Πτυχιακή εργασία, τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ, Εργαστήριο Τεκτονικής και Στρωματογραφίας

Γεωλογικές μελέτες τεχνικών έργων – Σήραγγες – Διαφάνειες παραδόσεων, Μαρίνος, Β. (2011)

Διαφάνειες παραδόσεων ηλεκτρικής τομογραφίας, Τσούρλος, Π. (2018)

Εισαγωγή στις μεθόδους ανάλυσης και ερμηνείας γεωλογικών παρατηρήσεων, Τσόκας, Γ.Ν., Παν. Θεσ/νίκης, 1990

Εφαρμοσμένη Γεωφυσική 1: Σεισμικές Μέθοδοι, Σημειώσεις, Βαφείδης Α., (1993), Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πορών, Χανιά.

Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Αποστολόπουλος Γ. (2013), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

An integral equation and its solution for some two-and three-dimensional problems in resistivity and induced polarization, Lee, T. (1975) in *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 42(1), 81-95.

Assessing Rock Mass Properties for Tunnelling in a Challenging Environment. The Case of Pefka Tunnel in Northern Greece, Marinos Vassileios et al. (2015) in *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 6*

Conductivity survey: a survival manual. An Explicitly North American Perspective, Clay, R. B. (2006) edited by J. K. Johnson. University of Alabama Press, Tuscaloosa."

Cross-hole electrical resistivity tomography: application of different electrode configurations within boreholes, Αλμπάνης Άγγελος (2018), μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ, τομέας Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας

Electrical Conductivity of Soils and rocks, McNeill, J.D. (1980), Technical Note TN-5, Geonics Limited, Mississauga, Ontario.

Groundwater, Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979). Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs

Modelling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data, Tsourlos, P. (1995). University of York

Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses, Hoek, E., and Marinos, P., 2000. Tunnels and Tunnelling International.

Resistivity characteristics of geologic targets, GJ Palacky (1988) in *Electromagnetic methods in applied geophysics* 1, 53-129