



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΚΟΥΦΑΣ ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΩΓΜΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΛΑΓΥΝΩΝ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2022



[λευκή σελίδα]



ΚΟΥΦΑΣ ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5433

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΩΓΜΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΛΑΓΥΝΩΝ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής,
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Επιβλέπων

ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Δημοσθένης Κούφας, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.



ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΩΓΜΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΛΑΓΥΝΩΝ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ – *Διπλωματική Εργασία*

© Dimosthenis Koufas, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2021

All rights reserved.

Investigation of surface crevasses at the region of Lagyna, using geophysical methods.

– *Bachelor Thesis*

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: Θεσεις ρωγμών στην περιοχή Λαγυνών



1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
3	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	13
	3.1. Γεωλογία περιοχής.....	13
	3.2. Τεκτονικά και σεισμολογικά στοιχεία.....	17
	3.2.1. Πρόσφατη σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή.....	21
	3.2.2. Το ρήγμα των Λαγυνών.....	24
	3.2.3. Το ρήγμα του Αγίου Βασιλείου.....	27
4	ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ	
	ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ.....	28
	4.1. Εισαγωγικά για την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης.....	28
	4.2. Εφαρμογή της μεθόδου.....	35
	4.2.1. Διατάξεις γεωφώνων, εξοπλισμός, σχεδιασμός και λήψη	
	μετρήσεων.....	35
	4.2.2. Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σεισμικής διάθλασης...39	
	4.2.3. Αποτελέσματα και ερμηνεία των τομών της σεισμικής	
	διάθλασης.....	44
5	ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ	
	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	48
	5.1. Εισαγωγικά για τις ηλεκτρικές μεθόδους διασκόπησης.....	48
	5.1.1. Ειδική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών.....	49
	5.1.2. Η μεθοδολογία της μεθόδου ειδικής αντίστασης.....	54
	5.1.3. Οι διάφορες διατάξεις που χρησιμοποιούνται.....	58
	5.2. Η εφαρμογή της μεθόδου.....	62
	5.3. Ανάλυση, επεξεργασία δεδομένων και αποτελέσματα των	
	μετρήσεων.....	64



6	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	67
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	69



1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ο συνδυασμός εφαρμογής σεισμικών και ηλεκτρικών γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης, που πραγματοποιήθηκαν τον Μάιο του 2019, στην περιοχή των Λαγυνών Θεσσαλονίκης, με αφορμή την εμφάνιση επιφανειακών ρωγμών στην περιοχή και με σκοπό την ερμηνεία της γεωλογικής και τεκτονικής δομής του υπεδάφους, για την εύρεση του αιτίου που προκάλεσε αυτές τις ρωγμές σε κτίρια στον οικισμό της περιοχής. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στα ΒΑ της Θεσσαλονίκης και ανήκει στο ΝΔ τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης. Στην ευρύτερη περιοχή είναι έντονη η γεωργική και βιομηχανική δραστηριότητα με αντίκτυπο την ανεξέλεγκτη υπεράντληση.

Για την έρευνα, εφαρμόστηκαν οι γεωφυσικές μέθοδοι της σεισμικής διάθλασης και της ηλεκτρικής αντίστασης. Η επεξεργασία των σεισμικών έγινε σε περιβάλλον SeisImager/2D, ενώ η τομή ηλεκτρικής τομογραφίας σε περιβάλλον DC_2DPRO. Με την ερμηνεία, συμπεραίνονται κάποιες κάθετες μετατοπίσεις επιφανειακών σχηματισμών, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν με την δράση σεισμικών κινήσεων ρηγμάτων της περιοχής, τα οποία έχουν μελετηθεί και χαρτογραφηθεί σε παλαιότερες έρευνες στην περιοχή. Οι διαρρήξεις, λοιπόν, πιθανώς οφείλουν την ύπαρξή τους στην δράση των ενεργών ρηγμάτων της λεκάνης, ενώ σημαντικό ρόλο στην καθίζηση των επιφανειακών στρωμάτων, κατέχει η υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων στην περιοχή, λόγω εκτεταμένης γεωργικής και βιομηχανικής δραστηριότητας.

Γεωφυσική διασκόπηση είναι η μελέτη της δομής των απρόσιτων, στην άμεση παρατήρηση επιφανειακών στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις των γεωφυσικών μεγεθών και με την εφαρμογή θεμελιωδών νόμων της Φυσικής. Σκοπός της γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο εντοπισμός γεωλογικών συνθηκών οικονομικής και γεωλογικής σημασίας. Γεωλογικές συνθήκες οικονομικής σημασίας είναι, βασικά, εκείνες οι συνθήκες, που ευνοούν το σχηματισμό υγρών, αερίων ή στερεών κοιτασμάτων, όπως τα κοιτάσματα πετρελαίου, φυσικών αερίων, μεταλλευμάτων, ορυκτών ανθράκων, κλπ., ενώ, γεωλογικής σημασίας στόχοι μπορούν να είναι όλες οι δομές που βοηθούν στην κατανόηση της γεωλογίας μίας περιοχής, είτε για καταπόνηση έργων τεχνικών, για βελτίωση και προστασία από φυσικά φαινόμενα μίας κατοικημένης περιοχής, για καλύτερη κατανόηση της σεισμικής δραστηριότητας μίας περιοχής, εύρεση υδροφόρων οριζόντων, κλπ. Τέτοιοι στόχοι μπορούν να είναι επιφανειακά ρήγματα ή ρηξιγενείς δομές του ανώτερου φλοιού, δόμοι (σπήλαια, δόμοι άλατος κλπ.), στρώματα με ιδιαίτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, ζώνες κορεσμού κλπ.

Μετρούμενες φυσικές ποσότητες είναι οι χρόνοι διαδρομής των τεχνητά παραγόμενων ελαστικών κυμάτων, η ένταση του πεδίου βαρύτητας, η ένταση του μαγνητικού πεδίου, το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου, κλπ. Οι μετρήσεις των μεγεθών αυτών, γίνονται σε ορισμένη απόσταση από τη δομή που θέλουμε να καθορίσουμε, με διάφορα όργανα, όπως τα σεισμόμετρα, τα βαρυτόμετρα, τα μαγνητόμετρα, τα βολτόμετρα, κλπ. Οι μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό άλλων μεγεθών που αμέσως περιγράφουν τις φυσικές ιδιότητες των γήινων πετρωμάτων. Τα μεγέθη αυτά είναι η ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, η πυκνότητα των πετρωμάτων, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, κλπ. Οι υπολογισμοί αυτοί βασίζονται σε θεμελιώδεις αρχές, όπως είναι οι νόμοι της διάθλασης και της ανάκλασης των κυμάτων, ο νόμος της παγκόσμιας έλξης, οι βασικοί νόμοι του μαγνητισμού και του ηλεκτρισμού, κλπ. Πρέπει να τονισθεί ότι, κατά την πραγματοποίηση της Γεωφυσικής Διασκόπησης, δεν ενδιαφερόμαστε για αυτές τις ίδιες τιμές των διαφόρων φυσικών μεγεθών, αλλά για τις μεταβολές τους, οι οποίες οφείλονται σε εκείνες από τις ανωμαλίες της δομής του φλοιού που συνυπάρχουν με τον εκάστοτε στόχο που θέλουμε να οριοθετήσουμε (κοιτάσματα, ρηξιγενείς ζώνες, ζώνες κορεσμού, κλπ.).

Οι βασικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες. Αυτές είναι οι *σεισμικές*, που διακρίνονται στις μεθόδους διάθλασης και ανάκλασης, οι *βαρυ-*

τομετρικές, οι μαγνητικές, οι ηλεκτρικές και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι. Εκτός από τις βασικές αυτές μεθόδους εφαρμόζονται, σε ειδικές περιπτώσεις, και ορισμένες άλλες μέθοδοι, όπως είναι η ραδιομετρική μέθοδος και η θερμική μέθοδος.

Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι διάθλασης σεισμικών κυμάτων και ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, στην περιοχή των Λαγυνών με στόχο ενδιαφέροντος επιφανειακές διαρρήξεις στην περιοχή, οι οποίες πιθανώς ταυτίζονται με την σεισμική κίνηση του ρήγματος των Λαγυνών (με γενική παράταξη ΑΒΑ-ΔΝΔ). Παρατηρήθηκαν, λοιπόν, επιφανειακές διαρρήξεις και ρωγμώσεις σε κτίρια, εντός της κατοικημένης περιοχής του οικισμού των Λαγυνών Θεσσαλονίκης, οι οποίες παρατηρήθηκαν κοντά στην ζώνη του ήδη χαρτογραφημένου ρήγματος των Λαγυνών (Τσάπανος κ.α., 2006).

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από καταστροφές σε διάφορα σημεία της οικιστικής περιοχής, που συσχετίζονται με τις επιφανειακές διαρρήξεις και ρωγμώσεις που προαναφέρθηκαν:



Εικόνα 1. Η διάρρηξη στον προθάλαμο του καταστήματος "ΕΓΝΑΤΙΑ". Διακρίνεται η μετατόπισή της και η προσπάθεια επιδιόρθωσής της.



Εικόνα 2. Οι δύο παράλληλες ζώνες διαρρήξεων στην ασφαλτο στη ΒΔ πλευρά του καταστήματος "ΕΓΝΑΤΙΑ".



Εικόνα 3. Ζώνη παραμόρφωσης σε δρόμο εγκάρσιο της εθνικής οδού.



Εικόνα 4. Άποψη κτιρίου στη θέση 4, από τα Α. Διακρίνονται οι μεγάλες παραμορφώσεις της ΒΑ πλευράς του κτιρίου, καθώς και το χαμηλό πρανές κατά μήκος της Β πλευράς.



Εικόνα 5. Αποκόλληση κολώνας σε εξωτερικό φράχτη.



Εικόνα 6. Γενική άποψη της παραμόρφωσης σε αποθήκη στη θέση 3.

3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1. Γεωλογία περιοχής

Το τεκτονικό βύθισμα της Μυγδονίας λεκάνης βρίσκεται στα όρια της Σερβομακεδονικής μάζας με την Περιοδοπική ζώνη. Έτσι, και η περιοχή μελέτης, τα Λαγυνά, βρίσκεται επάνω σε αυτό το όριο. Συγκεκριμένα:

Α) Σερβομακεδονική μάζα

Τα πετρώματα της Σερβομακεδονικής αποτελούνται από μεταμορφωμένο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο, το οποίο έχει διαχωρισθεί σε δύο σειρές (Kockel & Walther 1968), την κατώτερη σειρά Κερδυλίων και την ανώτερη σειρά Βερτίσκου.

- Η σειρά Κερδυλίων είναι η κατώτερη σειρά της Σερβομακεδονικής και παρουσιάζει μία γενική διεύθυνση BBD-NNA. Συναντάται σε πολύ μικρό μέρος της λεκάνης Μυγδονίας στο ανατολικό της όριο, οπότε και δεν θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στην θέση που πραγματοποιείται η συγκεκριμένη έρευνα. Η λιθοστρωματογραφία της σειράς αποτελείται από τους εξής ορίζοντες (από βαθύτερους προς ανώτερους): βιοτιτικοί γενεύσιοι, κατώτερος ορίζοντας μαρμάρου, βιοτιτικός γενεύσιος, ενδιάμεσος ορίζοντας μαρμάρου, βιοτιτικός γενεύσιος, ανώτερος ορίζοντας μαρμάρου.
- Η σειρά του Βερτίσκου είναι η ανώτερη σειρά της Σερβομακεδονικής μάζας και έχει διεύθυνση επίσης BBD-NNA, φτάνει μέχρι τα σύνορα της Ελλάδας με τη Βουλγαρία και των Σκοπίων και εκτείνεται και στο έδαφος των δύο αυτών χωρών. Αποτελεί την κυριότερη σειρά πετρωμάτων, μαζί με τους σχηματισμούς της Περιοδοπικής ζώνης, πάνω στην οποία αναπτύσσεται η Μυγδονία λεκάνη. Η λιθοστρωματογραφική στήλη της σειράς αποτελείται από τους σχηματισμούς (βαθύτεροι προς ανώτεροι): διμαρμαρυγικοί γενεύσιοι, διμαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι-γρανατούχοι, μάρμαρα, βιοτιτικοί γενεύσιοι, αμφιβολίτες και άλλα μεταβασικά πετρώματα.



Β) Περιοδοπική ζώνη

Η Περιοδοπική ζώνη καταλαμβάνει γεωγραφικά το δυτικό τμήμα της λεκάνης της Μυγδονίας. Πρόκειται για μία ακολουθία πετρωμάτων που εκτείνεται από το ΝΔ άκρο της Σιθωνίας χερσονήσου, μέχρι την λεκάνη του Αξιού, με γενική διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Με βάση τις νεότερες απόψεις, τρεις ενότητες δομούν την Περιοδοπική ζώνη από τα ανατολικά προς τα δυτικά: ενότητα Ντεβέ Κοράν - Δουμπιά, ενότητα Μελισσοχωρίου Χολομώντα και ενότητα Άσπρης Βρύσης – Χορτιάτη.

- Η ενότητα Ντεβέ Κοράν αποτελείται από: το Σχηματισμό Εξαμιλίου, την ηφαιστειοϊζηματογενή σειρά και την ανθρακική σειρά.
- Η ενότητα Μελισσοχωρίου – Χολομώντα περιλαμβάνει ανθρακικά πετρώματα και το «φλύσχη της Σούβλας».
- Η ενότητα Άσπρης Βρύσης – Χορτιάτη αποτελείται από μετακλαστικά και ανθρακικά ιζήματα, καθώς και ιζήματα βαθιάς θάλασσας.

Γ) Μεταλπικά ιζήματα

Μετά την Αλπική ορογένεση και ειδικότερα από το Α. Μειόκαινο, η λεκάνη Μυγδονίας πληρώθηκε με νεότερα ιζήματα, που αντιπροσωπεύουν τα μεταλπικά ιζήματα της λεκάνης. Τα ιζήματα αυτά αποτελούν τις αποθέσεις του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς. Η στρωματογραφία και η λιθολογία τους διακρίνεται σε δύο ομάδες: την Προμυγδονιακή και τη Μυγδονιακή ομάδα (Ψιλοβίκος 1977). Συγκεκριμένα για αυτές τις δύο ομάδες:

1. Προμυγδονιακή ομάδα

Η Προμυγδονιακή ομάδα αποτέθηκε στα όρια της Προμυγδονίας λεκάνης, κατά το Νεογενές. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των αποθέσεων δίνονται παρακάτω (Ψιλοβίκος 1977; Psilovikos & Sotiriadis 1983):

- **Κροκαλοπαγή:** το κατώτερο μέλος της Προμυγδονίας ομάδας, αποτελείται από συνεκτικά κροκαλοπαγή βάσης, τα οποία επικάθονται ασύμφωνα επάνω στο υπόβαθρο. Το πάχος τους ποικίλει από 2m έως 10m. Αποτελούνται από απόστρογγυλεμένες κροκάλες με σημαντική παρουσία αδρόκοκκης άμμου. Έχουν πιθανή ποταμοχειμάρρεια προέλευση.
- **Ψαμμίτες:** αποτέθηκαν σε συμφωνία με τα κροκαλοπαγή. Έχουν διασταυρωτή στρώση και αποτελούνται από μεσόκοκκη έως αδρόκοκκη άμμο, με ανθρακικό συνδετικό υλικό, ή από πολύ αδρόκοκκη άμμο με πυριτικό συνδετικό υλικό. Περιλαμβάνουν επίσης, αργιλικούς φακούς και τεμάχια του υποβάθρου. Τα ψαμμιτικά σώματα που διαχωρίζονται από τις διασταυρωτές στρώσεις μπορεί να φτάσουν και τα 80 σε πάχος. Αποτέθηκαν από παλαιορέματα, με τη μορφή κυρίως



αλλουβιακών ρυπιδίων στις εξόδους τους προς τη λίμνη της Προμυγδονίας λεκάνης.

- **Αργιλοψαμμιτικά ιζήματα:** αποτέθηκαν κατά το Πόντιο, σύμφωνα επάνω από τους ψαμμίτες και αποτελούνται από ρυθμίτες μικρού πάχους (έως 1 m). Η δομή των ρυθμιτών αυτών περιλαμβάνει τα εξής στρώματα, από το κατώτερο προς το ανώτερο: ένα μαζώδες στρώμα γκρίζας αργίλου και ιλύος, λεπτές εναλλαγές αμμώδους αργίλων και άμμων, ένα στρώμα άμμου και χαλίκων. Στα όρια των ρυθμιτών αυτών, παρατηρούνται επιφάνειες ασυμφωνίας που δείχνουν την έν-αρξη ενός νέου κύκλου απόθεσης. Το πάχος των ιλυοαμμωδών ιζημάτων υπερ-βαίνει τα 100m. Είναι ποταμολιμναία – λιμναία ιζήματα με έντονη επίδραση των κλιματικών συνθηκών.
- **Ερυθροστρώματα:** αποτελούνται από κροκαλοπαγή, άμμο και άργιλο με χαρακτηριστικό ερυθρό χρώμα και διασταυρωτή στρώση. Το πάχος της ενότητας μεταβαίνει από τα 45m στα περιθώρια, σε περισσότερο από 100m στο κέντρο της λεκάνης. Η απόθεση των ερυθροστρωμάτων ξεκίνησε κατά το Ανώτερο Πλειόκαινο και συνεχίστηκε μέχρι το τέλος του Βιλλαφράγκιου. Οι αποθέσεις αυτές είναι γνωστές και ως «Σχηματισμός Γερακαρούς» (Koufos et al. 1987).
- **Σχηματισμός Πλατανοχωρίου:** επάνω από το σχηματισμό Γερακαρούς διαχωρίστηκε ο «Σχηματισμός Πλατανοχωρίου». Βρίσκεται υπολειμματικά σε κορυφές λόφων στην περιοχή Πλατανοχωρίου (υπολεκάνη Μαραθούσας). Αποτελείται από λιμναία αργιλικά ιζήματα και ασβαστολίθους. Η απόθεσή τους οφείλεται στη δημιουργία μικρών λιμνών με ήρεμο περιβάλλον. Η παλαιοντολογική μελέτη του σχηματισμού, προσδιορίζει μία ηλικία Ανώτατου Βιλλαφράγκιου – Κατώτερου Μπιχάριου (Koufos et al. 1992).

2. Μυγδονιακή ομάδα

Η Μυγδονιακή ομάδα αποτελείται από υλικά που αποτέθηκαν επάνω από τα ερυθροστρώματα κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς. Συναντάται σε όλες τις υπολεκάνες της Προμυγδονίας. Στην περιοχή της Μυγδονίας υπολεκάνης, συναντάται στους εξής δύο τύπους:

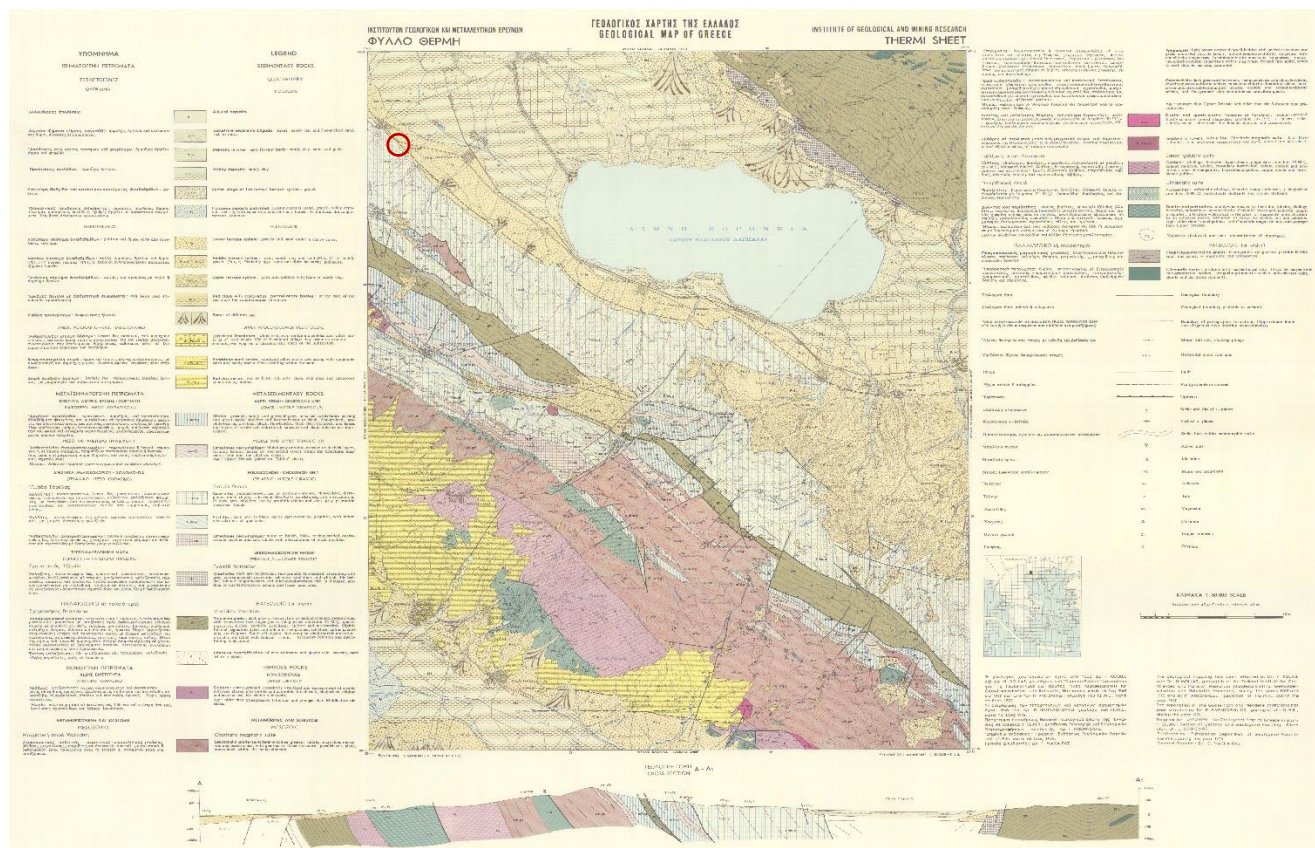
- **Ποταμολιμναία και δελταϊκά ιζήματα:** βρίσκονται στα περιθώρια της λεκάνης και αποτελούνται από κροκαλοπαγή, χαλίκια, άμμο και άργιλο. Αποτέθηκαν από ρέματα και χειμάρρους στις όχθες της Μυγδονίας λίμνης.

- **Λιμναία ιζήματα:** βρίσκονται στο κέντρο της λεκάνης και αποτελούνται από λεπτοστρωματώδεις αποθέσεις λεπτόκοκκης άμμου, αργίλου και ιλύος. Είναι ενδεικτικά ήρεμου λιμναίου περιβάλλοντος.

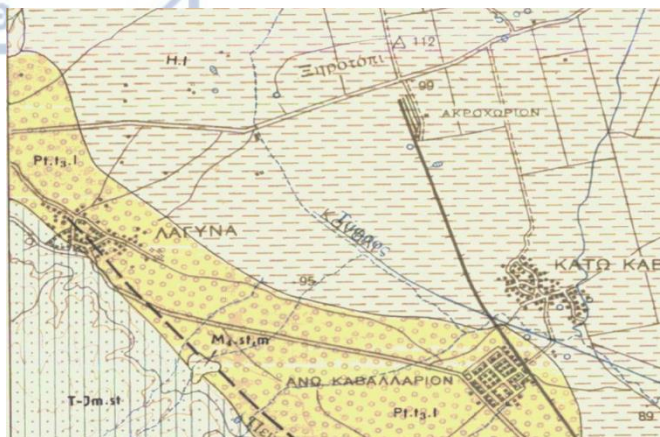
Κατά θέσεις τα ανώτερα μέλη της Μυγδονιακής ομάδας καλύπτονται από τραβερτίνες οι οποίοι σήμερα σώζονται υπολειμματικά σε διάφορα σημεία της λεκάνης (Λουτρά Βόλβης, Απολλωνία, Νυμφόπετρα κ.α.). Η προέλευσή τους αποδίδεται στη δράση των θερμών πηγών στην περιοχή κατά τη διάρκεια του Ανώτερου Πλειστοκαίνου – Ολοκαίνου.

3. Ολοκαινικές αποθέσεις

Οι νεότερες αποθέσεις στη λεκάνη της Μυγδονίας αποτελούνται από ποταμοχειμάρρια, στα περιθώρια, και λιμναία στο κέντρο της λεκάνης, ιζήματα. Η σύστασή τους είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε για τις αντίστοιχες αποθέσεις της Μυγδονιακής ομάδας, των οποίων είναι τα υλικά διάβρωσης. Συναντώνται, επίσης, αλλουβιακά ριπίδια και πλευρικά κορήματα στα περιθώρια της λεκάνης.



Σχήμα 1: Γεωλογικός χάρτης κλίμακας 1:50.000 του Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλο Θέρμης, περιοχή λίμνης Κορώνειας. Με κόκκινο κύκλο σημειώνεται η περιοχή των Λαγυνών.



Σχήμα 2: Απόσπασμα από τον παραπάνω γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε., για καλύτερη εικόνα της περιοχής μελέτης (Λαγυνά)

3.2. ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η τεκτονική δομή του Βορείου Αιγαίου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, καθώς επηρεάζεται τόσο από την προς τα δυτικά προέκταση του μεγάλου δεξιόστροφου ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας που ελέγχει την κίνηση της Τουρκίας, όσο και από τον εφελκυσμό που οφείλεται στη χαλάρωση των τάσεων πίσω από το Ελληνικό τόξο, όπου η Αφρικανική πλάκα βυθίζεται κάτω από την Ευρασιατική. Τα κύρια ρήγματα στην περιοχή (Μυγδονία λεκάνη) είναι διακριτά στο υπαιθρο από την γεωμορφολογική τους εικόνα. Το σύστημα ρηγμάτων της Μυγδονίας φαίνεται ότι συνδέεται με το αντίστοιχο της Ανατολικής Χαλκιδικής (ρήγματα Στρατωνίου και Γοματίου), μέσω «τυφλών» ρηξιγενών ζωνών, ρηγμάτων δηλαδή που δεν εκδηλώνονται στην επιφάνεια (Pavlides & Kiliass, 1987). Η εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής του Βορείου Αιγαίου, σύμφωνα με νεοτεκτονικές παρατηρήσεις σε ολόκληρη την περιοχή, μπορεί να διαχωρισθεί σε τρεις περιόδους:

- **Μέσο(;-)Άνω Μειόκαινο:** Κατά την περίοδο αυτή ο χώρος της λεκάνης της Μυγδονίας δεν εδχόταν την επίδραση του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας (Dewey et al. 1986). Για την περίοδο αυτή έχει διαπιστωθεί ότι ο μέσος εφελκυσμός είχε διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ (Mercier et al. 1987), ενώ τα ΒΑ-ΝΔ ρήγματα στην περιοχή ήταν κυρίως κανονικά με μικρή αριστερόστροφη συνιστώσα (Lyberis 1984).
- **Πλειόκαινο – Κατώτερο Πλειστόκαινο:** Η επίδραση του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας, το οποίο άρχισε να επηρεάζει την περιοχή, διαμόρφωσε τον εφελ-

κυστικό άξονα σ3 σε μία ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κανονικών ρηγμάτων ΒΔ-ΝΑ παράταξης, καθώς και την επαναδραστηριοποίηση παλαιότερων (Mrcier *et al.* 1987; Mercier & Carey-Gailhardis 1989).

- **Μέσο Πλειστόκαινο – Σήμερα:** Το ενεργό τεκτονικό πεδίο στην ευρύτερη περιοχή μελέτης είναι Β-Ν με μικρές αποκλίσεις από ΒΒΑ-ΝΝΔ έως ΒΒΔ-ΝΝΑ (Voidomatis *et al.* 1987). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κανονικών ρηγμάτων Α-Δ παράταξης που είναι αυτά τα οποία είναι κυρίως ενεργά σήμερα. Ενεργά είναι επίσης και ρήγματα άλλων παρατάξεων, που ευρισκόμενα υπό την επήρεια αυτού του πεδίου παρουσιάζουν συνιστώσα οριζόντιας μετατόπισης. Το εφελκυστικό αυτό πεδίο στην περιοχή της λεκάνης της Μυγδονίας επιβεβαιώθηκε και κατά τη διάρκεια του σεισμού του 1978, όπου στις επιφανειακές διαρρήξεις το διάνυσμα της ολίσθησης (slip vector) έδειξε διεύθυνση εφελκυσμού Β-Ν (Mercier *et al.* 1983).

Η δράση των τριών αυτών παραμορφωτικών φάσεων είχε ως αποτέλεσμα μία πολύπλοκη τεκτονική δομή, με αρκετά μεγάλα ρήγματα, τα οποία χαρακτηρίζονται ως ενεργά ή πιθανά ενεργά, με βάση διάφορα κριτήρια, όπως η γεωμετρία τους, η πρόσφατη σεισμικότητα, η γεωλογία και η γεωμορφολογία.



Σχήμα 3: Συνθετική ψευδοέγχρωμη δορυφορική εικόνα Landsat της κεντρικής Μακεδονίας, με σημειωμένα τα κυριότερα ρήγματα. Με κόκκινο σημειώνονται τα ενεργά ρήγματα που είναι δυνατόν να δώσουν ισχυρούς σεισμούς, ενώ με μαύρο είναι τα πιθανώς ενεργά ρήγματα.



Από τη μορφοτεκτονική ανάλυση της περιοχής (Χατζηπέτρος 1998) προκύπτουν τα εξής μορφοτεκτονικά χαρακτηριστικά των ενεργών ρηγμάτων της περιοχής της Μυγδονίας λεκάνης:

- **Ρηξιγενή πρηνή:** τα ρηξιγενή πρηνή του νότιου περιθωρίου της Μυγδονίας λεκάνης μελετήθηκαν με τη βοήθεια λεπτομερών τοπογραφικών μηκοτομών εγκάρσια στην παράταξή τους. Παρατηρήθηκαν πρηνή όλων των κατηγοριών, δηλαδή: **απλά, πολλαπλά και σύνθετα πρηνή**. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν πρηνή μικρού ύψους, τα οποία είναι δυνατό να δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος. Κάτι τέτοιο, ωστόσο, δεν είναι δυνατό να υποστηριχτεί με βεβαιότητα, καθώς δεν υπάρχουν προς σύγκριση, άλλα παραδείγματα σεισμών στην περιοχή μελέτης. Τα πολλαπλά πρηνή αποτελούσαν την πλειοψηφία των μετρηθέντων πρηνών. Η προβολή των παραπάνω δεδομένων σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα ύψους – γωνίας κλίσης δίνει συγκεντρώσεις σε τρεις ομάδες, οι οποίες αντιστοιχούν σε πρηνή που σχηματίστηκαν σε διαφορετικά υλικά και είναι διαφορετικής ηλικίας (Chatzipetros & Pavlides, 1994). Συνοπτικά οι τρεις ομάδες:
 - i. Ομάδα Α: Πρηνή που σχηματίστηκαν στο υπόβαθρο, με μεγάλη γωνία κλίσης και μεγάλο ύψος. Είναι φανερό ότι αποτελούν τα παλαιότερα ρήγματα, που αποτέλεσαν στο σχηματισμό της Προμυγδονίας λεκάνης. Υπάρχουν ενδείξεις, κυρίως από το σεισμό του 1978, ότι τα ρήγματα αυτά είναι ακόμα ενεργά.
 - ii. Ομάδα Β: Πρηνή νεότερων περιθωριακών ρηγμάτων που δημιούργησαν την Μυγδονία λεκάνη. Η ηλικία τους, είναι νεότερη του Μέσου Πλειστόκαινου, και όπως αποδείχθηκε κατά τον σεισμό του 1978, είναι ακόμα ενεργά.
 - iii. Ομάδα Γ: Πρηνή μικρού ύψους, που επηρεάζουν τα ιζήματα τόσο της Προμυγδονίας, όσο και της Μυγδονίας ομάδας. Παρά το γεγονός ότι παραμορφώνουν υλικό με τις ίδιες φυσικές ιδιότητες με το υλικό της προηγούμενης ομάδας, παρουσιάζονται με σημαντικά μεγαλύτερες γωνίες κλίσης, ενώ το ύψος τους δείχνει ότι τα πρηνή αυτής της ομάδας, δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια λίγων σεισμικών γεγονότων.
- **Μορφοτεκτονικές δομές:** Η περιοχή του νότιου περιθωρίου της Μυγδονίας λεκάνης παρουσιάζει έντονα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που συνδέονται με την δραστηριότητα των ενεργών ρηγμάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνοπτικά:
 - i. **Έντονη κατά βάθος διάβρωση:** βαθιές κοιλάδες ρεμάτων και χειμάρρων, σχήματος V στις περιοχές πίσω από τα νεότερα περιθωριακά ρήγματα, ενώ στη συνέχειά τους προς το βασικό επίπεδο, η κοίτη εξομαλύνεται. Η έντονη κατά βάθος διάβρωση, υποδηλώνει πρόσφατη πτώση του βασικού επιπέδου,

που σε αυτήν την περίπτωση, θα πρέπει να συνδεθεί με την πλέον πρόσφατη δραστηριότητα των ενεργών περιθωριακών ρηγμάτων.

- ii. *Χαμηλός βαθμός δαντέλωσης:* Στα ρήγματα που οριοθετούν το νότιο περιθώριο της Μυγδονίας λεκάνης και στο κομάτι μεταξύ των χωριών Βασιλούδι και Στίβος, η δαντέλωση ήταν της τάξης του 1,3-1,5, ενδεικτική ενεργών ρηγμάτων.
- iii. *Απότομες αλλαγές στη γωνία κλίσης των ρεμάτων:* Πάλι, αποτέλεσμα της αλλαγής του βασικού επιπέδου ή από τη δημιουργία ρήγματος κατά μήκος της κοίτης του ρέματος, λόγω δραστηριότητας των ενεργών ρηγμάτων.

Η μορφοτεκτονική ανάλυση των ρηξιγενών πρυνών του νοτίου περιθωρίου της Μυγδονίας λεκάνης έδειξε ότι υπάρχει γενικά καλή συσχέτιση μεταξύ του ύψους τους και της μέγιστης γωνίας κλίσης τους, επιβεβαιώνοντας έτσι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για τη διάβρωση των ρηξιγενών πρυνών βασισμένα σε στοιχεία από άλλες περιοχές του κόσμου. Άλλα γεωμορφολογικά στοιχεία επίσης που επίσης παρατηρήθηκαν και συνδέθηκαν με τη δράση των ρηγμάτων, συμφωνούν με τις γεωλογικές και σεισμολογικές περί ενεργών ρηγμάτων. Με βάση τα παραπάνω φαίνεται ότι η Μυγδονία λεκάνη αποτελεί μία ιδιαίτερα πολύπλοκη περιοχή όσον αφορά την τεκτονική της δομή και τη συμπεριφορά των ρηγμάτων αυτών στο πρόσφατο γεωλογικό παρελθόν. Ο ρυθμός ολίσθησης που υπολογίστηκε από παλαιοσεισμολογικά δεδομένα ποικίλλει σημαντικά σε διάφορες θέσεις της λεκάνης. Αυτό οφείλεται στο χαρακτήρα της λεκάνης που είναι πολυρηγματωμένου (multifractured) τύπου όπως έχει δείξει η γεωλογική παρατήρηση. Για μία ενδεχόμενη εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου στην περιοχή, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο μεγαλύτερος ρυθμός ολίσθησης που έχει υπολογιστεί (0,7 mm/yr).

3.2.1. Πρόσφατη σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή

Την περιοχή μελέτης έπληξαν δύο μεγάλοι σεισμοί στον 20ο αιώνα: ο σεισμός της Ασσήρου (1902) και ο σεισμός του Στίβου (1978). Και οι δύο αυτοί καταστρεπτικοί σεισμοί συνοδεύτηκαν από εκτεταμένα επιφανειακά φαινόμενα, όπως διαρρήξεις, φαινόμενα ρευστοποίησης, πτώσεις βράχων κλπ.

Ο σεισμός της Ασσήρου (1902)

Ο σεισμός της Ασσήρου έγινε στις 5 Ιουλίου 1902, και είχε ένταση $MM = IX$ και μέγεθος $M = 6,6$. Όπως και σε πολλούς από τους σεισμούς που προαναφέρθηκαν, παρατηρήθηκε μακρά προσεισμική περίοδος που κράτησε τρεις μήνες, ενώ η μετασεισμική δραστηριότητα διήρκεσε έως τον επόμενο χειμώνα. Τα μακροσεισμικά αποτελέσματα του σεισμού παρατηρήθηκαν σε πολλούς οικισμούς της περιοχής, και συγκεκριμένα (Παπαζάχος & Παπαζάχου, 1989). Στην Άσσηρο, λόγω της κακής κατασκευής των οικιών υπήρξε ολική καταστροφή, κατέρευσαν 100 κτίσματα (46% του συνολικού αριθμού κτισμάτων, ενώ τα υπόλοιπα 118 σπίτια κατέστησαν ακατοίκητα. Παρατηρήθηκαν επιφανειακές διαρρήξεις και φαινόμενα ρευστοποίησης. Στον Λαγκαδά παρατηρήθηκαν πολλές ζημιές σε πολλά κτίρια, αλλά και φαινόμενα ρευστοποίησης στη θέση των θερμών λουτρών. Στον Άγιο Βασίλειο δημιουργήθηκαν σημαντικές ζημιές και καταρρεύσεις κτισμάτων. Στη Θεσσαλονίκη υπήρξαν επίσης ζημιές σε πολλά κτίσματα, ενώ οι κάτοικοι αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τα καταλύματά τους και να διανυκτερεύσουν στο ύπαιθρο για αρκετό διάστημα, για να προστατευτούν από πιθανές καταρρεύσεις κτιρίων. Υπήρξαν και αναφορές υπόκωφου θορύβου πριν από την σεισμική δόνηση. Όπως φαίνεται από την κατανομή των ζημιών και των μακροσεισμικών εντάσεων (Hoernes 1902; Critikos 1932), η δόνηση έγινε περισσότερο αισθητή σε μία περιοχή με διεύθυνση ΒΔ - ΝΑ. Η διεύθυνση αυτή συμπίπτει με τη γενική τοποθέτηση της Σερβομακεδονικής γεωτεκτονικής ζώνης, και της αντίστοιχης υπολεκάνης Λαγκαδά. Οι αναφορές για επιφανειακές διαρρήξεις καθώς και η θέση του επικέντρου οδηγούν στην υπόθεση ότι ο σεισμός πιθανόν να οφείλεται στη δράση του ρήγματος του Σοχού, παράταξης Α-Δ, η δυτική προέκταση του οποίου τοποθετείται νότια της Ασσήρου. Η άποψη αυτή όμως φαίνεται ότι δεν ισχύει γιατί (Χατζηπέτρος 1998):

- i. Το μεγάλο μέγεθος του σεισμού (6,6) δε συμφωνεί με μία τέτοια τοποθέτηση, αφού σεισμοί τέτοιας τάξης μεγέθους δεν είναι δυνατό να δημιουργηθούν στα άκρα ρηγμάτων (segments) όπως στην προκειμένη περίπτωση, αλλά στην κεντρική τους περιοχή, σύμφωνα με τα διάφορα μοντέλα ρηξιγενούς δραστηριότητας που έχουν μέχρι τώρα προταθεί.

- ii. Η διάταξη της πλειόσειστης περιοχής με βάση το χάρτη ισόσειστων καμπυλών (Papazachos et al. 1982) δεν είναι σε συμφωνία με τη γενική παρατήρηση σε άλλους σεισμούς ότι αυτή ακολουθεί την παράταξη του σεισμογόνου ρήγματος.
- iii. Η προς τα δυτικά προέκταση του ρήγματος του Σοχού δεν είναι ορατή, σύμφωνα με στοιχεία υπαίθρου, ήδη υπαρχόντων γεωλογικών χαρτών, καθώς και με αεροφωτογραφιών της περιοχής. Οι εξηγήσεις για αυτό μπορεί να είναι: η προέκταση προς τα δυτικά του ρήγματος αυτού δεν υπάρχει, η προέκταση υπάρχει, αλλά δεν είναι ορατή στις συγκεκριμένες διαθέσιμες θέσεις παρατήρησης, η προέκταση του ρήγματος υπάρχει, αλλά καλύπτεται από νεότερα ιζήματα και έτσι δε φτάνει στην επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή όμως δεν μπορεί να υποστηριχθεί ότι το ρήγμα είχε πρόσφατη δραστηριότητα.

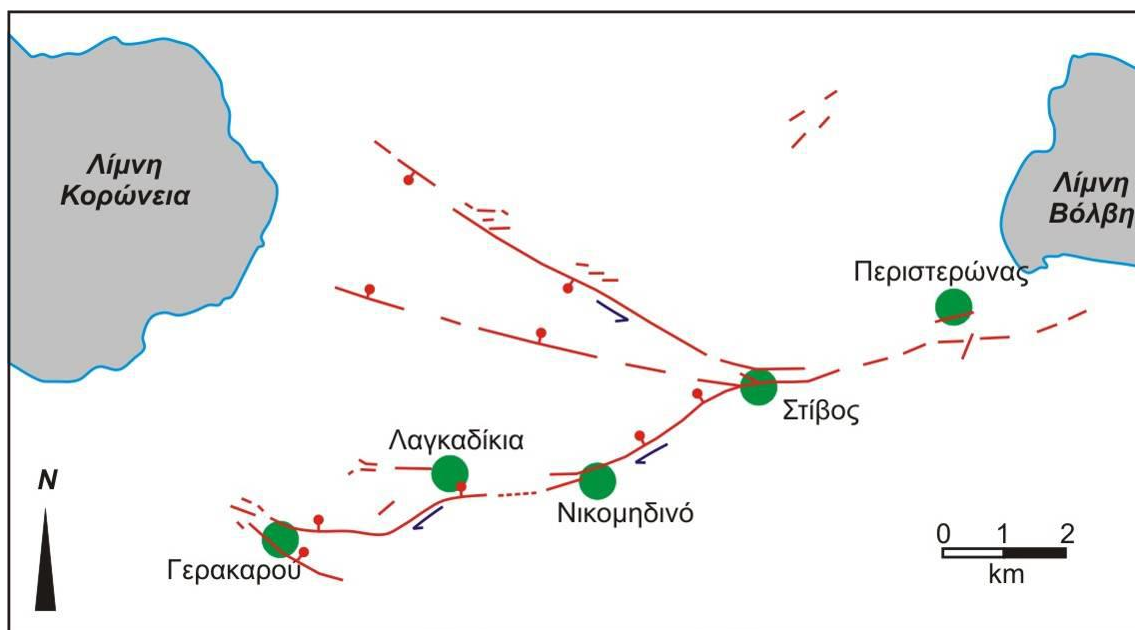
Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις ως σεισμογόνο ρήγμα της συγκεκριμένης ακολουθίας θα πρέπει να θεωρείται το ΒΔ - ΝΑ παράταξης ρήγμα που οριοθετεί τις παρυφές τις λεκάνης στην περιοχή Α και ΒΑ του Λαγκαδά. Η σεισμική δράση εξάλλου ρηγμάτων τέτοιας παράταξης διαπιστώθηκε και στο σεισμό του 1978. Η δράση του συγκεκριμένου ρήγματος, ή κάποιου άλλου με παράταξη παράλληλη με αυτό, δικαιολογεί την κατανομή των ζημιών, καθώς και τις περιοχές όπου εμφανίστηκαν επιφανειακές εκδηλώσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού (Ασσηρος και Λαγκαδάς). Ο σεισμός της Ασσήρου έχει μεγάλη σημασία για τη σεισμική ιστορία της περιοχής, καθώς πρόκειται για τον πρώτο σεισμό στον παρόντα αιώνα στη Μυγδονία λεκάνη, και τον έναν από τους δύο σεισμούς στο ίδιο χρονικό διάστημα για τους οποίους αναφέρονται επιφανειακές διαρρήξεις.

Ο σεισμός του Στίβου (1978)

Η σεισμική ακολουθία του 1978 αποτελεί ένα πολύ σημαντικό γεγονός όχι μόνο για την περιοχή, αλλά και εν γένει για την εξέλιξη των σχετικών επιστημών στον Ελληνικό χώρο, αφού για πρώτη φορά στη σύγχρονη μεταπολεμική ιστορία της χώρας ένα μεγάλο σεισμικό γεγονός έπληξε άμεσα μία μεγάλη σύγχρονη Ελληνική πόλη, όπως η Θεσσαλονίκη. Οι επιπτώσεις του σεισμού αυτού ήταν πολύ μεγάλες, τόσο από οικονομική, όσο και από την κοινωνική πλευρά του προβλήματος. Χρησιμοποιώντας ως βάση την πολύπλευρη μελέτη αυτού του σεισμού από πολλούς ερευνητές διαφορετικών ειδικοτήτων, μελετήθηκαν αργότερα και οι άλλοι μεγάλοι σεισμοί στην Ελλάδα. Οι τρεις μεγαλύτερες δονήσεις έγιναν στις 23 Μαΐου, 20 Ιουνίου και 4 Ιουλίου. Η σεισμική ακολουθία αποτελούταν από δύο κύριες διακριτές ακολουθίες. Οι μηχανισμοί γένεσης της σεισμικής ακολουθίας δείχνουν ότι το ρήγμα που δραστηριοποιήθηκε είχε Α - Δ έως ΑΒΑ - ΔΝΔ παράταξη με μετάπτωση του βορείου τεμάχους ως

προς το νότιο (Papazachos et al. 1980; Barker & Langston 1981; Carver & Bollinger 1981), ενώ το μέσο εστιακό βάθος των γεγονότων της σεισμικής ακολουθίας ήταν από 7 έως 11 km. Ο σεισμός αυτός προκάλεσε τη δημιουργία ενός συστήματος επιφανειακών διαρρήξεων με τρεις κύριους κλάδους οι οποίοι ήταν:

- i. Η κύρια ρηξιγενής γραμμή, η οποία ακολουθούσε το γεωλογικό ρήγμα στο νότιο περιθώριο της λεκάνης. Είχε παράταξη ΒΑ-ΝΔ, κίνηση κανονική με δεξιόστροφη συνιστώσα και μετάπτωση προς τα ΒΔ. Διερχόταν από τους οικισμούς Στίβος, Νικομηδινό και Γερακαρού.
- ii. Η γραμμή Στίβος – Σχολάρι με παράταξη ΒΔ-ΝΑ, κίνηση κανονική με αριστερόστροφη συνιστώσα και μετάπτωση προς τα ΝΔ.
- iii. Η γραμμή Στίβος – Λίμνη Κορώνεια με παράταξη ΒΔ-ΝΑ, κίνηση κανονική και μετάπτωση προς τα ΒΑ.



Σχήμα 1 Χάρτης των επιφανειακών διαρρήξεων που δημιουργήθηκαν από τον σεισμό του 1978 (Τροποποιημένο από Papazachos et al., 1980).



3.2.2. Το ρήγμα των Λαγυνών

Στην περιοχή των Λαγυνών παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του 2005 μία επιφανειακή διάρρηξη η οποία προκάλεσε ζημιές σε αρκετές θέσεις στις βόρειες παρυφές του οικισμού, κοντά στην εθνική οδό Θεσσαλονίκης-Καβάλας. Στα πλαίσια της μελέτης του φαινομένου, πραγματοποιήθηκε η χαρτογράφησης της και η καταγραφή των ζημιών σε όσες θέσεις παρατηρήθηκαν.

Περιγραφή της επιφανειακής διάρρηξης

Η γενική διεύθυνση της επιφανειακής διάρρηξης είναι ΒΔ-ΝΑ (120ο) και εκτείνεται από το κατάστημα «Εγνατία» στα ΒΔ μέχρι την εθνική οδό στα ΝΑ με συνολικό μήκος περί τα 2,2 km. Επισημαίνεται ότι αυτό είναι το ορατό της μήκος, καθώς υπάρχει η πιθανότητα, όπως περιγράφεται σε επόμενες παραγράφους, να εκτείνεται τόσο προς τα ΒΔ, όσο και προς τα ΝΔ σε μη κατοικήσιμες περιοχές. Η επιφανειακή διάρρηξη είναι ορατή μόνο σε θέσεις όπου διέρχεται από κατασκευές (δρόμοι και κτίρια) και όχι στο έδαφος, καθώς η καλλιέργεια του εδάφους και η χαμηλή του συνεκτικότητα εξαφανίζουν τα ίχνη της.

Παρακάτω περιγράφονται οι επιφανειακές εκδηλώσεις, κατά θέσεις, που παρατηρήθηκαν στην περιοχή μελέτης, από τον Χατζηπέτρο το 2006:



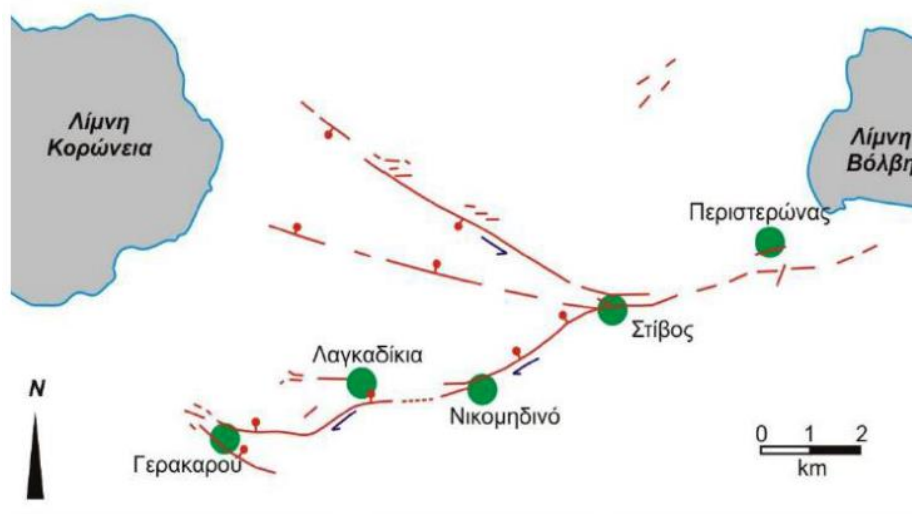
Σχήμα 2 Ο χάρτης επιφανειακής διάρρηξης, όπως χαρτογραφήθηκε τον Μάρτιο του 2006 από τον Χατζηπέτρο. Σε όλο της το μήκος, η επιφανειακή διάρρηξη διέρχεται από εδαφικό μανδύα, ο οποίος προέρχεται από την εδαφογένεση των υποκείμενων ποταμοχειμάρρειων ιζημάτων (κροκάλες, άμμοι και άργιλοι). Με κόκκινο χρώμα οι θέσεις που παρατηρούνται ζημιές σε κατασκευές από την δράση του ρήγματος, ενώ με μαύρη γραμμή απεικονίζεται η πιθανή θέση του ρήγματος στις ενδιάμεσες περιοχές.

1. **Θέση 1:** Η θέση αυτή βρίσκεται στο κατάστημα «ΕΓΝΑΤΙΑ». Εκεί παρατηρούνται παράλληλες διαρρήξεις και ρωγμές με διευθύνσεις που κυμαίνονται μεταξύ 110 και 130 μοιρών. Αυτές προκάλεσαν ζημιές στον χώρο υποδοχής, στο εσωτερικό του καταστήματος, στην ασφαλτο ΒΔ του καταστήματος και σε διάφορα σημεία στην ένωση της τοιχοποιίας με τον σκελετό του κτιρίου στο ΒΔ τοίχο του κτιρίου.
2. **Θέση 2:** Σε έναν εγκάρσιο δρόμο στην εθνική οδό. Η ασφαλτος παρατηρείται παραμορφωμένη σε μία ζώνη παράταξης 125 μοιρών και πλάτους 2.5m, ενώ δεν διακρίνεται κατακόρυφη μετατόπιση. Παρατηρήθηκε, επίσης, μία δευτερεύουσα διάρρηξη παράταξης 120 μοιρών στην πλακόστρωση του πεζοδρομίου, ενώ δεν παρατηρούνται ζημιές στα παρακείμενα κτίσματα.

3. **Θέση 3:** Στη θέση αυτή παρατηρούνται οι μεγαλύτερες και πιο εμφανείς ζημιές στην περιοχή μελέτης. Η ζώνη διάρρηξης παραμορφώνει διάφορες κατασκευές σε ένα δρόμο εγκάρσιο στην εθνική οδό. Ζημιές παρατηρούνται στην εξωτερική περίφραξη μίας οικίας, στο αντίστοιχο κρηπίδωμα του δρόμου, σε μία ζώνη πλάτους 1.5m στην ασφαλτόστρωση του δρόμου και σε μία αποθήκη. Στην συγκεκριμένη εργασία, θα αναπτυχθεί και η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων σεισμικής διάθλασης και μέθοδος ειδικής αντίστασης στα ~100m NA της «θέσης 3», φυσικά ακολουθώντας την χαρτογραφημένη καμπύλη του ρήγματος. Οπότε, και τα δεδομένα για το μοντέλο που θα προκύψει λήφθηκαν από τη συγκεκριμένη θέση.
4. **Θέση 4:** Στη θέση αυτή δεν παρατηρούνται επιφανειακές διαρρήξεις, αλλά υπάρχουν εκτεταμένες ζημιές σε ένα αποθηκευτικό κτίσμα. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται αποκολλήσεις στη γωνιακή τοιχοποιία του κτιρίου στη ΝΔ και τη ΒΑ του γωνία, ενώ το ίδιο το κτίριο παρουσιάζει περιστροφή τόσο ως προς τον οριζόντιο, όσο και ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Στη βάση της βόρειας πλευράς του κτιρίου παρατηρείται ένα χαμηλό πρανές, η προέλευση του οποίου (τεκτονικό, μορφολογικό, ανθρωπογενές, κλπ) δεν είναι δυνατό να διακριβωθεί.
5. **Θέση 5 (εκτός χάρτη):** Η θέση αυτή βρίσκεται σε ένα δρόμο εγκάρσιο στην εθνική οδό και παρατηρούνται ζημιές τόσο στο δρόμο, όσο και σε γειτονικές περιφράξεις. Στη θέση αυτή παρατηρούνται οι παρακάτω παραμορφώσεις: α) αποκόλληση ενός τοιχίου σε μία περίφραξη. Το ανώτερο τμήμα του τοιχίου έχει μεγαλύτερη παραμόρφωση από ότι το κατώτερο. Έχει γίνει προσπάθεια επιδιόρθωσης με τη χρήση σιδερένιων υποστηριγμάτων, και β) επιφανειακές διαρρήξεις στο δρόμο με παράταξη 120 μοίρες. Στο ασφαλικό κάλυμμα που χρησιμοποιήθηκε για την επιδιόρθωσή του παρατηρείται μία νεώτερη διάρρηξη, που σημαίνει ότι η διάρρηξη συνεχίζει τη λειτουργία της και προκαλεί νέες παραμορφώσεις.
6. **Θέση 6 (εκτός χάρτη):** Η θέση 6 βρίσκεται στην εθνική οδό Θεσσαλονίκης-Καβάλας, όπου η επιφανειακή διάρρηξη διασχίζει το οδόστρωμα και σχηματίζει μία χαμηλή αναβαθμίδα με παράταξη ΒΔ-ΝΑ και μετάπτωση προς τα ΒΑ. Αυτή είναι η τελευταία θέση στην οποία παρατηρούνται επιφανειακές εκδηλώσεις του συγκεκριμένου ρήγματος και εικάζεται ότι η συνέχειά του προς τα ΝΑ συνεχίζεται μέσα από μη δομημένες περιοχές, όπου δεν είναι δυνατή η παρατήρηση επί του παρόντος.

3.2.3. Το ρήγμα του Αγίου Βασιλείου

Το ρήγμα του Αγίου Βασιλείου αποτελεί δυτική προέκταση του ρήγματος Γερακαρούς-Στίβου-Περιστερώννα. Απέχει από την πόλη της Θεσσαλονίκης 11km, ενώ διέρχεται από τους οικισμούς Λαγυνά και Άγιος Βασίλειος. Έχει μήκος που ξεπερνάει τα 20km, με ΒΔ-ΝΑ παράταξη. Η κίνησή του χαρακτηρίζεται κανονική με μετάπτωση προς τα Β-ΒΑ. Φαίνεται ως το όριο μεταξύ του υποβάθρου (T-Jm.st) και των Τεταρτογενών αποθέσεων (Pt.t3.1) και έχει εμφανίσεις σε σημεία κατά μήκος του αλλουβιακών ριπιδίων (Q.cs1). Θεωρείται ενεργό ρήγμα, ενώ το συνολικό του άλμα κατά το Τεταρτογενές, βάσει ιζηματολογικών ενδείξεων, υπολογίζεται στα 220m (Mountrakis et al., 1996). Η ενεργότητα του ρήγματος φαίνεται από τα μορφολογικά του στοιχεία και από άλλους παράγοντες, όπως: α) αποτελεί προέκταση ενός σεισμικά ενεργού ρήγματος, β) συνδέεται με εκδήλωση σεισμών με επικεντρικά βάθη στα 10km (Mountrakis et al., 1996), γ) επηρεάζει Ολοκαινικές αποθέσεις.



Εικόνα 7 Χάρτης του συστήματος των επιφανειακών διαρρήξεων που δημιουργήθηκαν από το σεισμό του 1978 (Parazachos et al., 1980). Το ρήγμα του Αγίου Βασιλείου ανήκει σε αυτό το σύστημα, ως δυτική προέκταση του ρήγματος Γερακαρούς-Στίβου-Περιστερώννα.

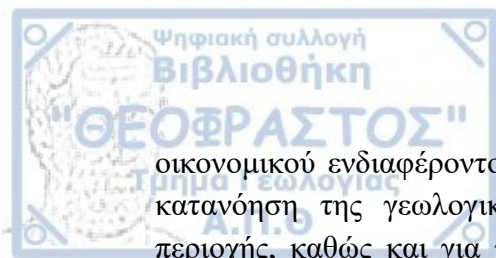
4. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

4.1. Εισαγωγικά για την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης

Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης είναι από τις πρώτες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό και οριοθέτηση γεωλογικών δομών στο υπέδαφος (ανώτερος φλοιός), όπου ευδοκμούν κοιτάσματα υδρογοναθράκων κάθε μορφής και άλλα στερεά ή αέρια κοιτάσματα. Ωστόσο, αρχικά αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε από τους σεισμολόγους για τη μελέτη της δομής του εσωτερικού της Γης, πολύ πριν τη χρήση της στην Γεωφυσική Διασκόπηση. Στην Γεωφυσική Διασκόπηση χρησιμοποιείται, με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, για τον προσδιορισμό ελαστικών παραμέτρων των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών που συναντώνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, τον εντοπισμό ζωνών ρηγμάτωσης, για την χαρτογράφηση και τοπογραφία των υδροφόρων οριζόντων μίας περιοχής, καθώς και τον εντοπισμό και οριοθέτηση υπόγειων εγκοίλων και άλλων χρήσιμων δομών. Επίσης, στην τεχνική και εφαρμοσμένη γεωλογία, χρησιμεύει να συλλεχθούν πληροφορίες για τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τη συνεκτικότητα των στρωμάτων του υπεδάφους, για θεμελιώσεις έργων ή υπογείων έργων, για να χαρακτηριστεί ως κατάλληλη ή όχι μια θέση ενδιαφέροντος, αλλά και για να παρθούν τα κατάλληλα μέτρα για την εκπόνηση του έργου.

Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, απαιτείται η μέτρηση των χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων, που παράγονται τεχνητά σε ορισμένο σημείο στην επιφάνεια της Γης και γράφονται πρώτα από τα σεισμόμετρα, τα οποία έχουν τοποθετηθεί σε ορισμένες αποστάσεις από την εστία των κυμάτων. Τα κύματα αυτά υφίστανται κατά τη διαδρομή τους διάφορες διαθλάσεις, για αυτό και οι τροχιές τους δεν είναι ευθείες, αλλά τεθλασμένες γραμμές ή ακόμα και καμπύλες. Σε κάποιες απλές δομές, οι σεισμικές ακτίνες θεωρούνται κατά τμήματα ευθείες γραμμές, ενώ γενικά η μορφή των σεισμικών ακτινών εξαρτάται από το μέσο διάδοσης και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των απ' ευθείας επιμήκων κυμάτων και επιμήκων κυμάτων διάθλασης και στη χρησιμοποίηση των καμπυλών των χρόνων διαδρομής των κυμάτων αυτών, για τον καθορισμό των ταχυτήτων των επιμήκων κυμάτων στο πάνω μέρος του φλοιού.

Αυτό που επιδιώκεται είναι ο καθορισμός των μεταβολών των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στα διάφορα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης. Η γνώση της μεταβολής της ταχύτητας θα οδηγήσει στον εντοπισμό γεωλογικών δομών



οικονομικού ενδιαφέροντος, αλλά και θα δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην κατανόηση της γεωλογικής δομής του υπεδάφους, της στρωματογραφίας της περιοχής, καθώς και για την διάκριση των γεωλογικών σχηματισμών και για τον εντοπισμό του υποβάθρου. Ο προσδιορισμός των μεταβολών των ταχυτήτων διάδοσης σε συνάρτηση με το βάθος επιτυγχάνεται με την μέτρηση των χρόνων διαδρομής των τεχνητά παραγόμενων ελαστικών κυμάτων, τα οποία διαδίδονται υπακούοντας στον νόμο του Snell. Σύμφωνα με αυτό το νόμο, όταν η σεισμική ακτίνα προσπέσει σε μία διαχωριστική επιφάνεια, η οποία αναπαριστά την επαφή δύο στρωμάτων με διαφορετικές ταχύτητες ελαστικών κυμάτων (διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά), αν το βαθύτερο στρώμα έχει μεγαλύτερη ταχύτητα από το υπερκείμενο, ισχύει ότι η γωνία της διαθλώμενης ακτίνας, θα είναι μεγαλύτερη από τη γωνία της προσπίπτουσας ακτίνας. Με το βάθος, η ακτίνα φτάνει σε μία γωνία κλίσης παράλληλη με την επιφάνεια που διαπερνά, δηλαδή φτάνει στην ορική διάθλαση. Έπειτα, αφού διαδοθούν στα επιφανειακά στρώματα της Γης, τα κύματα θα καταγραφούν στην επιφάνεια από σεισμόμετρα κατασκευασμένα ειδικά για αυτό το σκοπό, τα γεώφωνα. Με βάση τις αναγραφές αυτές κατασκευάζονται οι καμπύλες χρόνων διαδρομής, δηλαδή γραφικές παραστάσεις των χρόνων διαδρομής των κυμάτων, σε συνάρτηση με την απόσταση. Αυτά τα διαγράμματα τα παίρνουμε σε ηλεκτρονική μορφή από τα όργανα καταγραφής και τα επεξεργαζόμαστε, αφού έχει προηγηθεί ο εντοπισμός των πρώτων αφίξεων των διαθλώμενων κυμάτων. Τελικά, αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό των ταχυτήτων διάδοσης σε συνάρτηση με το βάθος.

Οι μέθοδοι σεισμικής διασκόπησης, καθώς και η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης, βασίζονται στις απλές βασικές αρχές που διέπουν την διάδοση των ελαστικών κυμάτων. Αυτές οι αρχές είναι η αρχή Huygens και η αρχή Fermat. Σύμφωνα με την αρχή Huygens: κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί πηγή ενός νέου (δευτερογενούς) κύματος. Σύμφωνα με την αρχή του Fermat, ορίζεται ότι: το κύμα το οποίο φθάνει σε ορισμένο σημείο από ορισμένη πηγή ακολουθεί το συντομότερο δρόμο από όλους τους δρόμους που είναι δυνατόν να ακολουθήσει, δηλαδή αυτόν που απαιτεί τον ελάχιστο χρόνο.

Διάδοση των κυμάτων χώρου στο φλοιό

Πρόσπτωση σεισμικής ακτίνας στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων

Κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης ισχύουν οι αρχές του Fermat και του Huygens καθώς και ο νόμος του Snell όπως φαίνεται στο σχήμα.

Αρχή του Fermat

Όταν ένα κύμα διαδίδεται σε υλικό μέσο, ακολουθεί τη διαδρομή του ελάχιστου χρόνου

Αρχή του Huygens

Κάθε υλικό σημείο που ταλαντώνεται κατά τη διέλευση κύματος, γίνεται με τη σειρά του πηγή δευτερογενούς ακτινοβολίας

Νόμος του Snell

$$\frac{\eta \mu i_1}{\eta \mu i_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Όταν όμως η προσπίπτουσα ακτίνα αποκτά τιμή $i_1 = i_c$, τέτοια που η i_2 να γίνει ίση με 90° , δηλαδή θα ισχύει $\eta \mu i_c = v_1/v_2$, τότε:

η διαθλώμενη ακτίνα ακολουθεί τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων και τα κύματα αυτά ονομάζονται μετωπικά κύματα (head waves). Η γωνία i_c καλείται **ορική γωνία**.

13

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ Μάθημα 5ο: Σεισμικά Κύματα και Διάδοσή τους στο Εσωτερικό της Γης ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ - Α.Π.Θ.

Εικόνα 8: Νόμος Snell, αρχή Huygens και αρχή Fermat. Πηγή: Εισαγωγή στη Σεισμολογία (5ο μάθημα, παρουσιάσεις), Τομέας Γεωφυσικής - Α.Π.Θ.

Παρότι δεν είναι τόσο ακριβής, όσο η μέθοδος της ανάκλασης, είναι χρήσιμη σε περιοχές όπου η μορφολογία έχει ανωμαλίες και δεν μπορούν να εφαρμοστούν άλλες μέθοδοι εύκολα, αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Υπάρχει επίσης μεγαλύτερη δυσκολία στη λήψη των μετρήσεων, σε σχέση με την μέθοδο ανάκλασης, λόγω της μεγαλύτερης απόστασης κατανομής των γεωφώνων. Η απόσταση μεταξύ του πιο απομακρυσμένου γεωφώνου και του σημείου έκρηξης, είναι πολλές φορές μεγαλύτερη του βάθους της ασυνέχειας που πρόκειται να καθορίσουμε (6-20m).

Για την εφαρμογή της μεθόδου στην ξηρά, η διαδικασία αρχίζει με την έρευνα γραφείου, όπου σχεδιάζεται το πλάνο της μεθοδολογίας που θα εφαρμοστεί, με όλες του τις παραμέτρους. Συγκεκριμένα καθορίζονται οι πιθανοί παράμετροι του εκάστοτε στόχου, ενώ αποφασίζεται η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ποικίλει, ανάλογα με τον στόχο. Επιλέγεται η διάταξη γεωφώνων που θα εφαρμοσθεί, καθώς και ο αριθμός και τύπος γεωφώνων, ανάλογα με την ιδιοσυχνότητα του πηνίου τους και την ηλεκτρομαγνητική απόσβεση της ιδιοταλάντωσής του, η οποία συμβάλει στην λήψη καθαρότερου και πιο ευκρινούς σήματος και την μέτρηση των πρώτων αφίξεων. Η δύναμη απόσβεσης είναι ανάλογη της ταχύτητας της σχετικής κίνησης πηνίου-εδάφους και ο συντελεστής αναλογίας c καλείται συντελεστής απόσβεσης. Με την αύξηση της συχνότητας παρατηρείται και



μια αύξηση της τιμής του συντελεστή απόσβεσης, δηλαδή ο συντελεστής c μπορεί να θεωρηθεί ανάλογος της συχνότητας και αυτή η αναλογία εξηγεί το λόγο που τα σεισμικά κύματα υψηλής συχνότητας αποσβένονται έντονα με την απόσταση. Με βάση, λοιπόν, το βάθος του στόχου που επιθυμούμε να ερευνήσουμε επιλέγονται και τα κατάλληλα γεώφωνα, καθώς όπως αναφέρθηκε σε μεγαλύτερα βάθη απορροφώνται υψηλές συχνότητες. Συγκεκριμένα, για μεγάλα βάθη χρησιμοποιούνται γεώφωνα με ιδιοσυχνότητα 14Hz, για ένα μέσο βάθος διασκόπησης που χαρακτηρίζεται από υψηλή ευκρίνεια χρησιμοποιούνται γεώφωνα ιδιοσυχνότητας >30Hz, ενώ για πολύ ρηχούς στόχους και έρευνες πολύ υψηλής ευκρίνειας χρησιμοποιούνται γεώφωνα ιδιοσυχνότητας 100Hz (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013). Η τιμή του συντελεστή απόσβεσης για την οποία το πηνίο φτάνει σε κατάσταση ηρεμίας όσο πιο γρήγορα γίνεται λέγεται συντελεστής κρίσιμης απόσβεσης και συμβολίζεται με c_0 , ενώ γενικά η συνηθισμένη απόσβεση στο σύστημα είναι 70% της κρίσιμης. Ο λόγος c/c_0 καλείται παράγοντας απόσβεσης ζ και παίρνει τιμές $\zeta > 1$, $\zeta = 1$ και $\zeta < 1$ που αντιστοιχούν σε ισχυρή, κρίσιμη και ασθενή απόσβεση. Στην περίπτωση που η απόσβεση είναι μικρή τότε το πηνίο ταλαντώνεται με την ιδιοσυχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος.

Ανάλογα, με το επιδιωκόμενο βάθος διασκόπησης, χρησιμοποιούνται και διαφορετικοί τρόποι τεχνητής παραγωγής ελαστικών κυμάτων. Η κατάλληλη φορητή και εύχρηστη σεισμική πηγή πρέπει να έχει επαρκή ισχύ και υψηλή συχνότητα έτσι ώστε το σεισμικό κύμα να φτάσει τον στόχο. Ενδεικτικά, για σχετικά ρηχά βάθη που δεν απαιτείται πολύ ισχυρή πηγή, χρησιμοποιείται σφυρί το οποίο χειροκίνητα χτυπά σε μεταλλική πλάκα. Σε μεγαλύτερα βάθη που απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς επιλέγονται για την παραγωγή ελαστικών κυμάτων όργανα όπως το «buffalo gun», σεισμικοί δονητές («Vibroiseis» με παραγωγή σήματος μεγάλης διάρκειας), αλλά και όργανα που συνδέονται με πτώση βάρους («Thumper»), εκτόνωση αερίου («Dinoseis») που χρησιμοποιούνται κυρίως σε ερημικές και ανοιχτές περιοχές. Σε περίπτωση που χρειάζεται μεγαλύτερη ενέργεια χρησιμοποιούνται δυναμίτες και άλλες εκρηκτικές ύλες που δίνουν κύματα μεγάλου φάσματος συχνοτήτων και η διάρκεια σήματος είναι μικρή, αλλά είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα σε μεταφορά και αποθήκευση, χρονοβόρα η διαδικασία καθώς απαιτείται να γίνουν τρύπες στο έδαφος και απαραίτητες είναι ειδικές άδειες.

Η μέθοδος δίνει γενικά ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιοχές με μορφολογικές ανωμαλίες και χαρτογραφεί με καλή ακρίβεια πολύ ρηχές επιφάνειες. Ωστόσο, έχει μικρότερη διακριτική ικανότητα και σε μικρότερα βάθη διερεύνησης, σε σχέση με άλλες σεισμικές μεθόδους, στις οποίες χρησιμοποιούνται οι ίδιες πηγές ελαστικών κυμάτων. Το βάθος διερεύνησης εξαρτάται από την ισχύ της πηγής, αλλά και από την γεωμετρία της διάταξης γεωφώνων-πηγής. Εφόσον η μέθοδος αξιοποιεί καθαρά και μόνο τις πρώτες αφίξεις, πρέπει να έχουν προέλθει σήματα πρώτων αφίξεων από

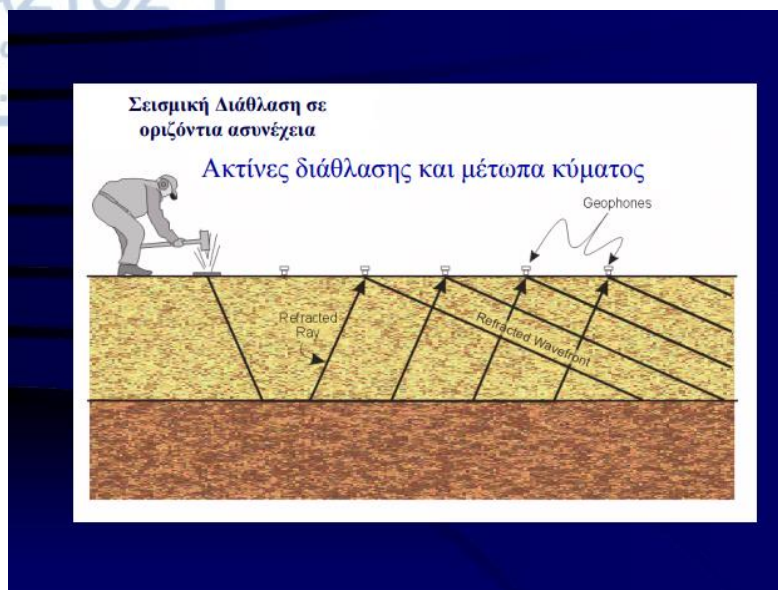


όλες τις επιφάνειες που συνάντησε το σεισμικό κύμα καθ' όλη την πορεία του, ώστε και να αποτυπωθούν όλα τα στρώματα που μεσολαβούν.

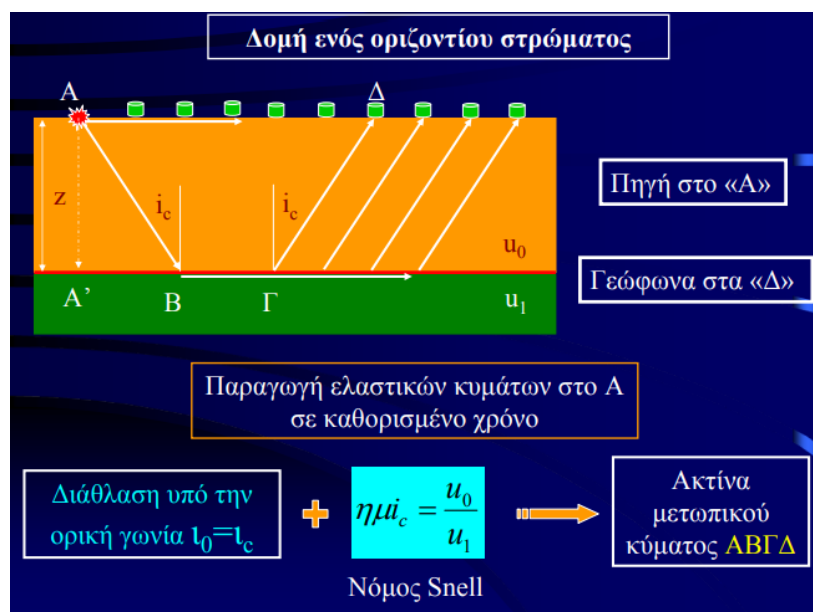
Για αυτό είναι αναγκαία η αύξηση της ταχύτητας των ελαστικών κυμάτων με βάθος, ενώ τα στρώματα πρέπει να έχουν ένα επαρκές πάχος, ώστε να εντοπιστούν. Σε κάποιες περιπτώσεις κάποια στρώματα δεν καταγράφονται ή δεν ξεχωρίζουν από τα υπερκείμενά τους, κάτι που οφείλεται στο ότι το κατώτερο στρώμα μίας διεπιφάνειας, δύναται να έχει χαμηλότερη ταχύτητα από ότι το υπερκείμενό του, υπάρχει, δηλαδή, αναστροφή ταχυτήτων των στρωμάτων με το βάθος. Το στρώμα αυτό καλείται «τυφλό στρώμα» και δεν εντοπίζεται. Πιθανό, επίσης, είναι και να μην εντοπίζονται κάποια «κρυμμένα στρώματα», όπως αποκαλούνται, που λόγω του μικρού τους πάχους ή λόγω της μικρής μεταβολής της ταχύτητας στην οροφή τους, σε σχέση με τις μεταβολές στα βαθύτερα στρώματα, δεν καταγράφονται. Έτσι, συμπεραίνονται οι τρεις βασικές προϋποθέσεις για την εφαρμογή της σεισμικής διάθλασης ως μέθοδο διασκόπησης σε μία έρευνα:

- ✓ Η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων να αυξάνεται όσο αυτά διαδίδονται σε βαθύτερα στρώματα.
- ✓ Ο λόγος ταχύτητας/πάχος να παραμείνει μικρότερος μίας κρίσιμης τιμής σε σχέση με τα γειτονικά στρώματα, ώστε ο κλάδος στην καμπύλη χρόνων διαδρομής που αντιστοιχεί σε κάθε στρώμα, να είναι ευδιάκριτος.
- ✓ Οι ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων να παραμένουν σταθερές μέσα στα διάφορα στρώματα, τουλάχιστον στο μήκος του αναπτύγματος των γεωφώνων.

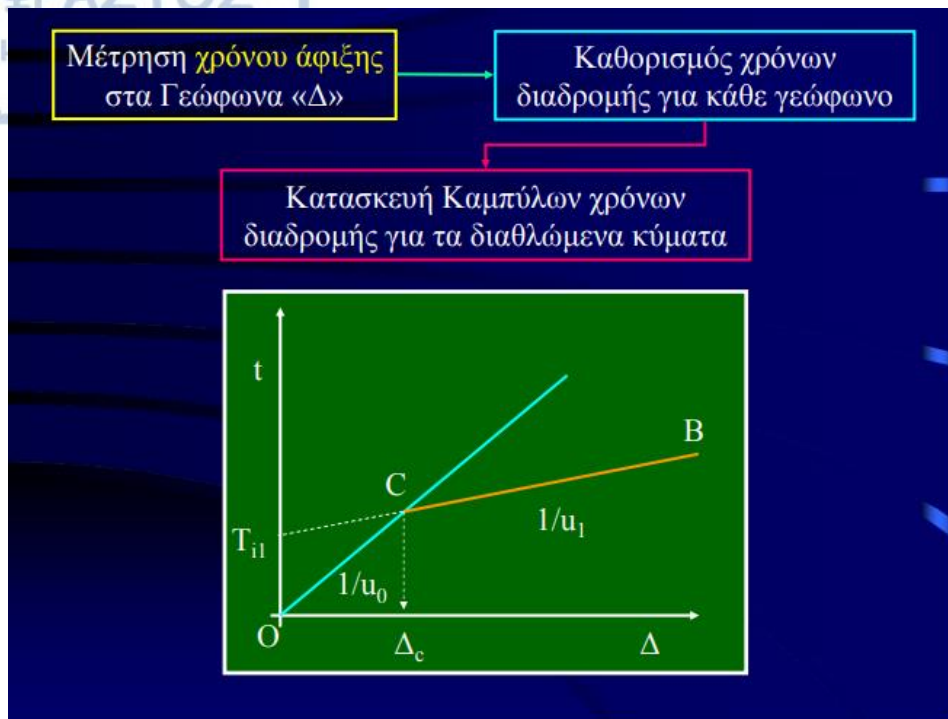
Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως η πλευρική διακριτική ικανότητα μίας σεισμικής γραμμής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των γεωφώνων, ενώ η κατακόρυφη διακριτική ικανότητα εξαρτάται από το πάχος των γεωλογικών στρωμάτων, το οποίο θα πρέπει να είναι επαρκές.



Εικόνα 9: απεικόνιση διάταξης γεωφώνων για εφαρμογή σεισμικής διάθλασης για εύρεση οριζόντιας ασυνέχειας. Από τις παρουσιάσεις του μαθήματος "Σεισμικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης", του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.



Εικόνα 10: Διάθλαση σεισμικού κύματος υπο την ορική γωνία. Από τις παρουσιάσεις του μαθήματος "Σεισμικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης", του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.



Εικόνα 11: Η διαδικασία καταγραφής των χρόνων άφιξης και απεικόνισης των χρόνων διαδρομής σε καμπύλες χρόνων διαδρομής για επεξεργασία τους, ως το πρώτο βήμα στην διαδικασία δημιουργίας μοντέλου του υπεδάφους. Από το μάθημα «Σεισμικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης», του τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.

4.2. Εφαρμογή της μεθόδου

4.2.1. Διατάξεις γεωφώνων, εξοπλισμός, σχεδιασμός και λήψη μετρήσεων

Στην ιστορία της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης εφαρμόστηκαν διάφορες διατάξεις γεωφώνων, οι περισσότερες από τις οποίες δεν χρησιμοποιούνται πια. Σήμερα χρησιμοποιείται αποκλειστικά σχεδόν η «διάταξη τομής», με τρεις υποκατηγορίες και η «διάταξη βεντάλιας», που έχει παίξει μέχρι και σήμερα σημαντικό ρόλο στην εύρεση πετρελαίου, αλατούχων δόμων, εγκοίλων κλπ.

- 1) *Διάταξη τομής*: Στη διάταξη αυτή, τα γεώφωνα και οι πηγές των ελαστικών κυμάτων, τοποθετούνται στην ίδια οριζόντια γραμμή (τομή). Αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται κυρίως σήμερα και για αυτό όλη η θεωρία της σεισμικής διάθλασης έχει αναπτυχθεί με την υπόθεση ότι οι μετρήσεις διάθλασης πραγματοποιούνται με αυτή τη διάταξη γεωφώνων και πηγών. Υπάρχουν διάφορα είδη της διάταξης τομής, αλλά τα τρία παρακάτω χρησιμοποιούνται περισσότερο:

α) Η πρώτη είναι η «αντιστρεπτή διάταξη», που βασίζεται στη γένεση ελαστικών κυμάτων στα άκρα της και καταγραφή από γεώφωνα που βρίσκονται μεταξύ των δύο πηγών ελαστικών κυμάτων.

β) Η δεύτερη διάταξη τομής, η οποία ονομάζεται «διπλή διάταξη» ή «διχασμένη διάταξη», αποτελείται από δύο σειρές γεωφώνων και πηγή που βρίσκεται στο μέσο μεταξύ αυτών.

γ) Η τρίτη είναι η «απλή συνεχής διάταξη». Σε αυτήν πραγματοποιείται σειρά διαδοχικών πηγών ελαστικών κυμάτων, των οποίων τα σημεία μετακινούνται διαδοχικά προς ορισμένη κατεύθυνση και τα γεώφωνα που καταγράφουν τοποθετούνται στην ίδια γραμμή και προς την κατεύθυνση μετακίνησης των πηγών.

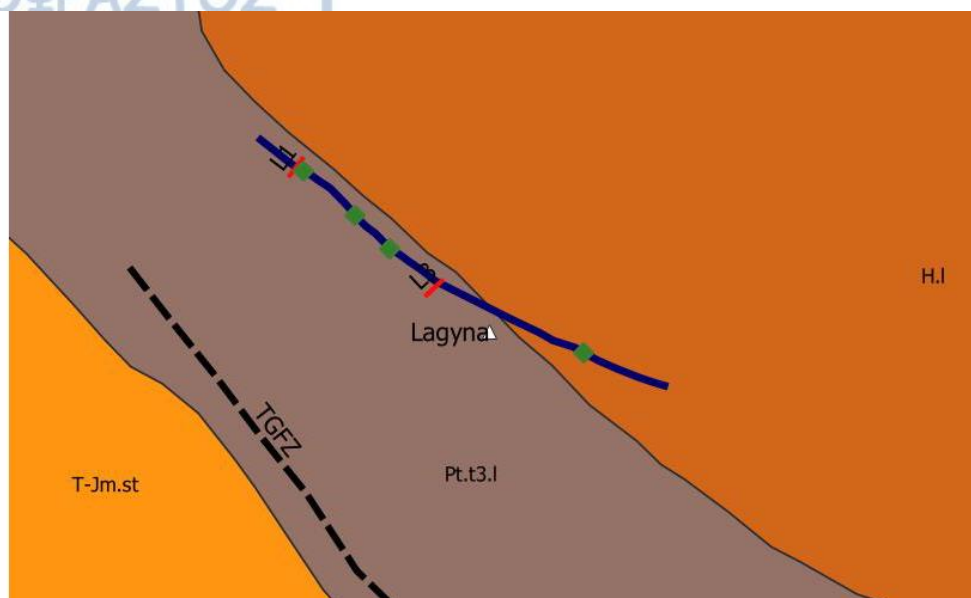
Κατασκευάζεται, έτσι, σειρά από καμπύλες χρόνων διαδρομής και γίνεται συνεχής χαρτογράφηση της επιφάνειας διάθλασης. Με τη διάταξη αυτή, μπορεί να καθοριστεί η δομή και στις περιπτώσεις που υπάρχουν στρώματα με κεκλιμένες επιφάνειες.

- 2) *Διάταξη βεντάλιας*: Αυτή χρησιμοποιήθηκε, κυρίως, κατά τα πρώτα χρόνια της σεισμικής διασκόπησης (1926-1930), για τον κατά προσέγγιση εντοπισμό επιφανειακών αλατούχων δόμων στο Τέξας και στις ακτές της Λουιζιάνας. Οι δόμοι αυτοί αποτελούνται από αλάτι, μέσα στο οποίο η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ταχύτητα μέσα στα ιζήματα, που περιβάλλουν τους δόμους. Συνεπώς, οι χρόνοι διαδρομής των κυμάτων που περνάν από τον δόμο θα είναι μικρότεροι από τους χρόνους διαδρομής των κυμάτων που δεν περνούν από τον δόμο



και αντιστοιχούν στην ίδια απόσταση πηγής-γεωφώνου. Για τον λόγο αυτό, παρατηρούνται *προαφίξεις* των κυμάτων που περνάν από τον δόμο. Οι προαφίξεις αυτές μπορούν να προσδιοριστούν με χαρτογράφηση των χρόνων διαδρομής των κυμάτων, σε συνάρτηση με τις αποστάσεις, πάνω στο ίδιο σχέδιο, στο οποίο έχει χαρτογραφηθεί η κανονική καμπύλη χρόνων διαδρομής, δηλαδή, η καμπύλη που κατασκευάστηκε με βάση τις μετρήσεις που έγιναν σε γειτονική περιοχή, όπου δεν υπάρχουν αλατούχοι δόμοι. Η κανονική αυτή καμπύλη λέγεται και *καμπύλη βαθμολογίας*. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, υπάρχει πηγή σε ορισμένο σημείο Α, της οποίας τα παραγόμενα ελαστικά κύματα καταγράφονται από γεώφωνα, που βρίσκονται σε θέσεις, που ισαπέχουν από την πηγή Α. οπότε η διάταξη πηγής-γεωφώνων έχει την μορφή βεντάλιας. Με σύγκριση των χρόνων διαδρομής, που αντιστοιχούν στις αποστάσεις της πηγής και κάθε γεωφώνου, προς τους αντίστοιχους κανονικούς χρόνους διαδρομής, που βρίσκονται από την καμπύλη βαθμολογίας, προσδιορίζονται οι προαφίξεις. Έπειτα πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία με μία νέα πηγή Β, της οποίας σχετική διάταξη με τα γεώφωνα, είναι κάθετη στην αρχική διάταξη με πηγή Α. Έτσι, η τομή των διαδρομών με τις μέγιστες τιμές προαφίξεων της διάταξης Α και Β, ορίζει το κέντρο του αναζητούμενου δόμου, ενώ είναι δυνατή η εύρεση των διαστάσεων του δόμου, μέσω των άλλων διευθύνσεων των ευθειών που ορίζονται από τις υπόλοιπες προαφίξεις.

Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας με σκοπό την συσχέτιση επιφανειακών ρωγμών και διαρρήξεων με το ρήγμα των Λαγυνών, χρησιμοποιήθηκε διάταξη τομής σε κάθετη διεύθυνση με την διεύθυνση του ρήγματος, που χαρτογραφήθηκε από τον Χατζηπέτρο το 2006 και αναλύεται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε η **απλή συνεχής διάταξη** 24 γεωφώνων, στην θέση 3 (κατά Χατζηπέτρος, 2006) που αναφέρθηκε και αναλύθηκε παραπάνω και αναφέρεται ως **L3**.

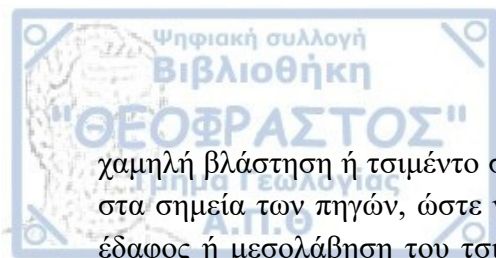


Σχήμα 3: Χάρτης επεξεργασμένος σε λογισμικό QuantumGIS, από την προπτυχιακή φοιτήτρια που συμμετείχε στις μετρήσεις και ανέλαβε την επεξεργασία και παρουσίαση της τομής L1 στη θέση 1, Κοκκαλίδου Μάρθα. Φαίνονται με κόκκινο χρώμα οι τομές σεισμικής διάθλασης και ηλεκτρικής τομογραφίας που πραγματοποιήθηκαν, ενώ τα πράσινα σημάδια είναι οι θέσεις που παρατηρούνται ζημιές σε κατασκευές από την δράση του ρήγματος. Με μπλε γραμμή σημειώνεται η πιθανή θέση του ρήγματος στις ενδιάμεσες περιοχές. TGFZ: Thessaloniki-Gerakou Fault Zone, H.I: αμμούχες άργιλοι Ολοκαίνου, Pt.t3.l: Τεταρτογενής σχηματισμός χαλικιών και άμμου, T-Jm.st: εναλλαγές χαλαζιτών και χαλαζιτικών ψαμμιτών με φυλλιτικές ενστρώσεις της Περιοδοπικής ζώνης, ηλικίας Τριαδικού-Μέσου Ιουρασικού, L1: σεισμική γραμμή κοντά στο κατάστημα «ΕΓΝΑΤΙΑ», L3: σεισμική γραμμή στη θέση 3 κατά Χατζηπέτρος, 2006.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 04/06/2019, πάνω σε εκτεθειμένους Τεταρτογενείς σχηματισμούς (Σχήμα 6). Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση στην διάταξη της τομής περιλάμβανε 24 γεώφωνα και έναν σειсмоγράφο Geometrics StrataView 48 καναλιών. Τα γεώφωνα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ιδιοσυχνότητα 40Hz, με σκοπό τη διερεύνηση μέχρι περίπου σε βάθος 20 m (σχετικά μικρό βάθος).

Για την παραγωγή σεισμικών κυμάτων (πηγή), χρησιμοποιήθηκε μεταλλικό σφυρί-βαριούλα με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, που σηματοδοτεί την έναρξη του σήματος, βάρους 3-5kg. Ο χειριστής κρούει το σφυρί πάνω σε μεταλλική πλάκα, η οποία βρίσκεται σε πλήρη επαφή με το έδαφος. Το σφυρί είναι συνδεδεμένο με το σύστημα καταγραφής με καλώδιο, ώστε με τον κτύπο πάνω στην μεταλλική πλάκα, ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος χαλαζία στέλνει σήμα για να αρχίσει να καταγράφεται η εδαφική κίνηση στις θέσεις των γεωφώνων (μηδενικός χρόνος).

Η γραμμή της διάταξης είχε συνολικό μήκος 46m και η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών γεωφώνων ήταν στα 2m, ώστε η διασκόπηση να φτάσει τελικά περίπου στα 15-17m βάθος (~1/3 του μήκους της τομής). Κατά την πραγματοποίηση της μέτρησης, καθαρίστηκε η



χαμηλή βλάστηση ή τσιμέντο στα σημεία επαφής των γεωφώνων με το έδαφος, αλλά και στα σημεία των πηγών, ώστε να αποφευχθούν σφάλματα λόγω αδύναμης επαφής με το έδαφος ή μεσολάβηση του τσιμέντου στις μετρήσεις. Η παραγωγή σεισμικών κυμάτων (πηγές) πραγματοποιήθηκε σε 25 θέσεις, ξεκινώντας στη θέση -1m από το πρώτο γεώφωνο, έως 1m μετά το 24^ο γεώφωνο (+47m από το πρώτο γεώφωνο). Σε κάθε σημείο σεισμικής πηγής πραγματοποιήθηκαν 3-4 κρούσεις ανά περίπτωση, οι οποίες αθροίστηκαν με σκοπό την ενίσχυση του τελικού σήματος και την ελαχιστοποίηση πιθανού θορύβου.

Ο σειсмоγράφος Geometrics StrataView 48 καναλιών, που χρησιμοποιήθηκε έχει ενσωματωμένο υπολογιστή, οπότε δεν υπάρχει η ανάγκη να συνδέεται με έξτρα φορητό υπολογιστή, ενώ διαθέτει λογισμικό που είναι εύκολο στην χρήση και η καταγραφή-ανταπόκριση από τα γεώφωνα γίνεται πολύ άμεσα και παρουσιάζεται κατευθείαν στην οθόνη του οργάνου. Το StrataView μπορεί να λειτουργεί όλη μέρα στο πεδίο με μία μπαταρία 12Volt, ενώ επιτυγχάνεται η δημιουργία ρεύματος με ένταση 5Amps στα μικρά συστήματα, αλλά με την αύξηση των συνδεδεμένων καναλιών η ένταση φτάνει μέχρι και τα 10Amps στις μεγάλες σεισμικές γραμμές. Η αρχιτεκτονική του StrataView και το λογισμικό της Geometrics δίνει τη δυνατότητα για σεισμικά συστήματα καταγραφής με έως πάνω από 600 κανάλια πολλαπλών σειρών, ενώ προσφέρει ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων από 3.0 έως 14.0 kHz , για έρευνες υψηλής ευκρίνειας. Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής διάφορων φίλτρων ανάλογα με την περίπτωση σεισμικού θορύβου.

Αφού ολοκληρωθεί η συνδεσμολογία των οργάνων μέτρησης και καταγραφής, λαμβάνονται μετρήσεις από κάθε θέση σεισμικής διαταραχής, οι οποίες αποθηκεύονται και μεταφέρονται αργότερα από τον σκληρό δίσκο του σειсмоγράφου, σε δισκέτα και έπειτα σε φορητό υπολογιστή για να επεξεργαστούν μέσω του λογισμικού Geometrics SeisImager/2D.



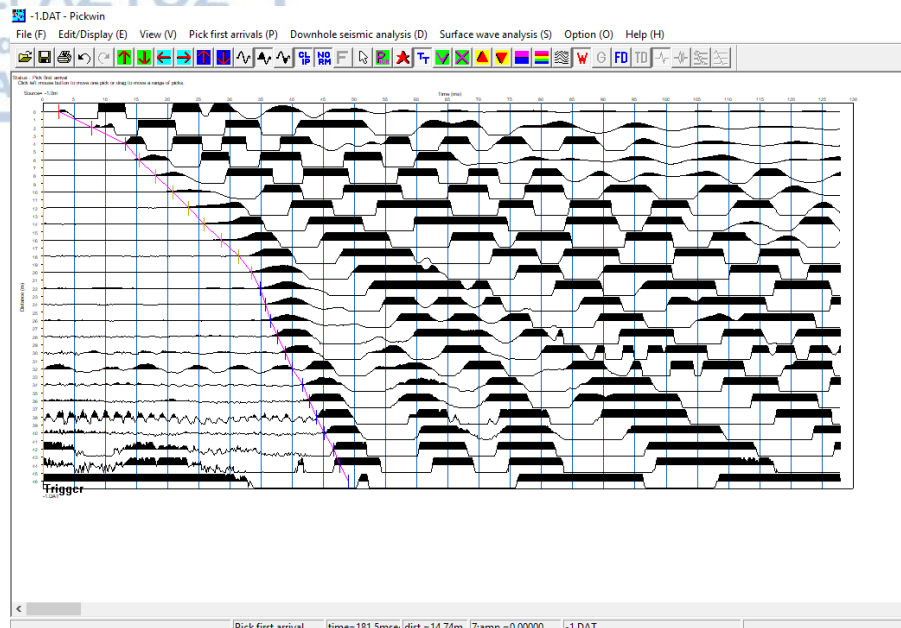
4.2.2. Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σεισμικής διάθλασης

Τα δεδομένα που λήφθηκαν από τις μετρήσεις στο ύπαιθρο, αποθηκεύονται στον σκληρό δίσκο του σειсмоγράφου. Έπειτα, τα μεταφέρουμε στο γραφείο μέσω μιας φορητής δισκέτας αποθήκευσης με συγκεκριμένη χωρητικότητα, ώστε να μεταφερθούν όλες οι μετρήσεις απευθείας στον υπολογιστή μας για να αρχίσει η επεξεργασία σε περιβάλλον Geometrics SeisImager/2D. Τα αρχεία των μετρήσεων έχουν την μορφή «.dat», π.χ. «01.DAT», όπου 01 ο αριθμός της μέτρησης, που αλλάζει ανάλογα με την θέση της πηγής που δημιουργεί την σεισμική διαταραχή, με μετατόπιση 2m, όπως προαναφέρθηκε.

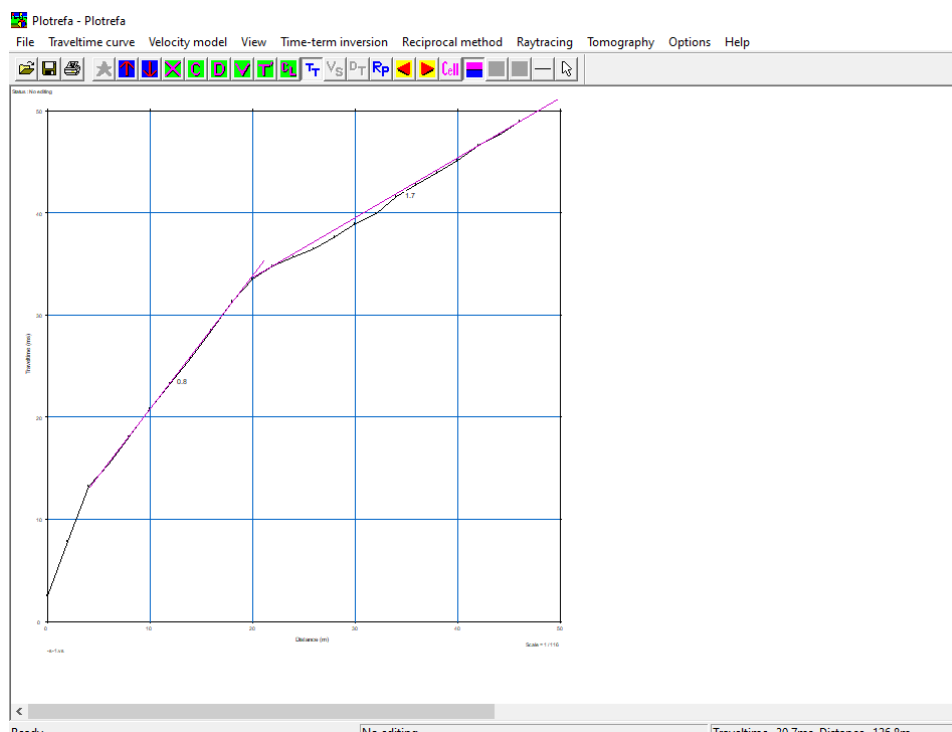
Μετά την ολοκλήρωση της αποθήκευσης και μεταφοράς στον υπολογιστή, ξεκινάει η επεξεργασία τους μέσω του λογισμικού SeisImager/2D, της εταιρείας Geometrics. Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης αξιοποιεί μόνο τις πρώτες αφίξεις από μία σεισμική καταγραφή, ώστε να αποτυπώσει την ζητούμενη γεωλογική δομή του υπεδάφους και να εντοπίσει τις διεπιφάνειες, στις οποίες παρατηρείται αλλαγή στην ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων που παράγονται από την πηγή μας. Οπότε, σκοπός της επεξεργασίας με το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ο προσδιορισμός των πρώτων αφίξεων (first breaks) των καταγραφών σε κάθε ένα από τα 24 γεώφωνα ξεχωριστά, για κάθε αρχείο «DAT» (για κάθε σεισμική διαταραχή δηλαδή), σε περιβάλλον Pickwin του SeisImager.

Μετά την ολοκλήρωση του προσδιορισμού των πρώτων αφίξεων, κατασκευάζονται οι καμπύλες χρόνων διαδρομής, δηλαδή γραφικές παραστάσεις των χρόνων διαδρομής των κυμάτων σε συνάρτηση με την οριζόντια απόσταση. Οι καμπύλες αυτές αποθηκεύονται ως αρχεία τύπου «.vs», τα οποία ανοίγονται σε περιβάλλον Plotrefa του λογισμικού SeisImager, για περεταίρω επεξεργασία, που θα οδηγήσει στον υπολογισμό της μεταβολής των ταχυτήτων διάδοσης με το βάθος και συνεπώς στην δημιουργία μοντέλου σεισμικής τομογραφίας, αναπαριστώντας την γεωλογική δομή. Η επεξεργασία σε αυτό το στάδιο, περιλαμβάνει την επιλογή σημείων όπου υπάρχει εμφανής αλλαγή της κλίσης και σηματοδοτεί την αλλαγή του γεωλογικού στρώματος. Το τελικό μοντέλο που προκύπτει είναι ένα μοντέλο που παρουσιάζει τις ταχύτητες με χρωματική διαφοροποίηση, άρα και τα πάχη των γεωλογικών στρωμάτων, ενδεχομένως και του υποβάθρου. Επίσης, εμφανίζεται και η πορεία των διαθλώμενων σεισμικών ακτινών σε κάθε διεπιφάνεια.

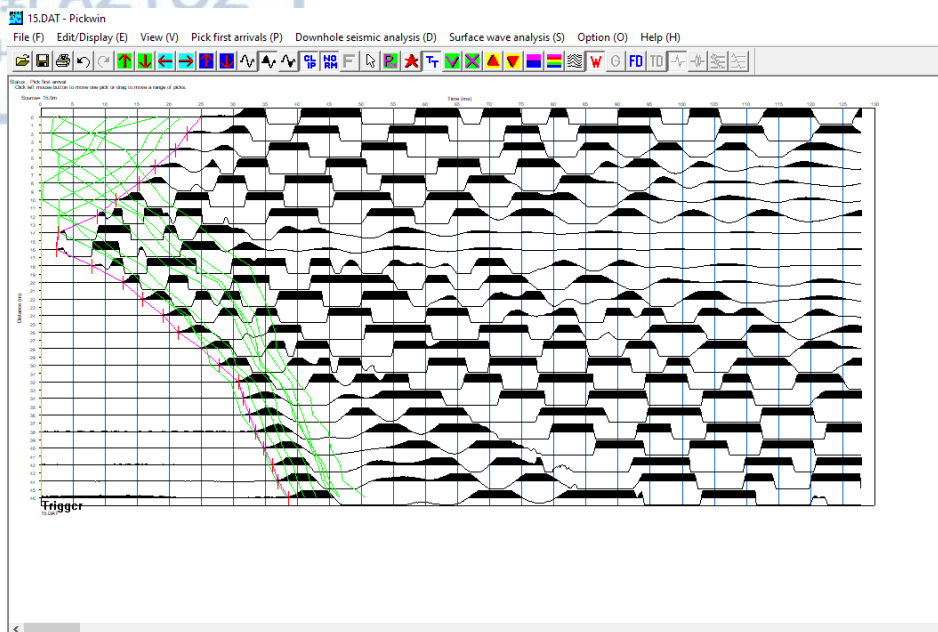
Παρακάτω εμφανίζονται εικόνες από τις καταγραφές σε διάφορες θέσεις πρόκλησης σεισμικής διαταραχής, κατά μήκος της τοποθέτησης των γεωφώνων, μαζί με τις πρώτες αφίξεις, όπως αυτές επιλέχθηκαν. Επίσης, απεικονίζονται οι καμπύλες χρόνων διαδρομής που προέκυψαν από πρόκληση σεισμικής διαταραχής σε διάφορες θέσεις της διάταξης L3, που μελετάται.



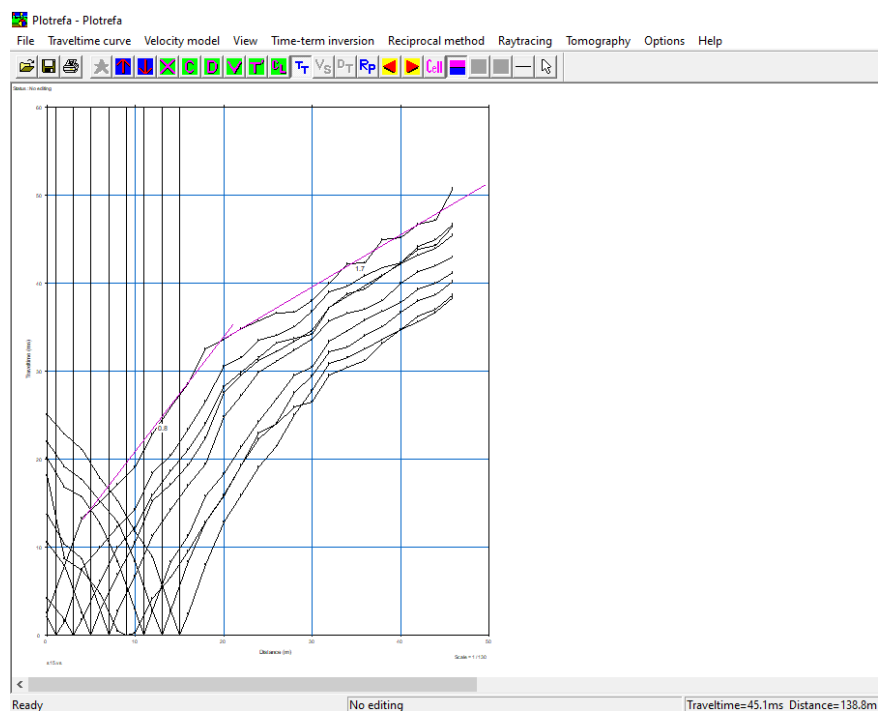
Εικόνα 12: Καταγραφή και σημειωμένες οι πρώτες αφίξεις για την πρώτη μέτρηση με την πηγή σε θέση -1m από το πρώτο γεώφωνο, στην διάταξη L3.



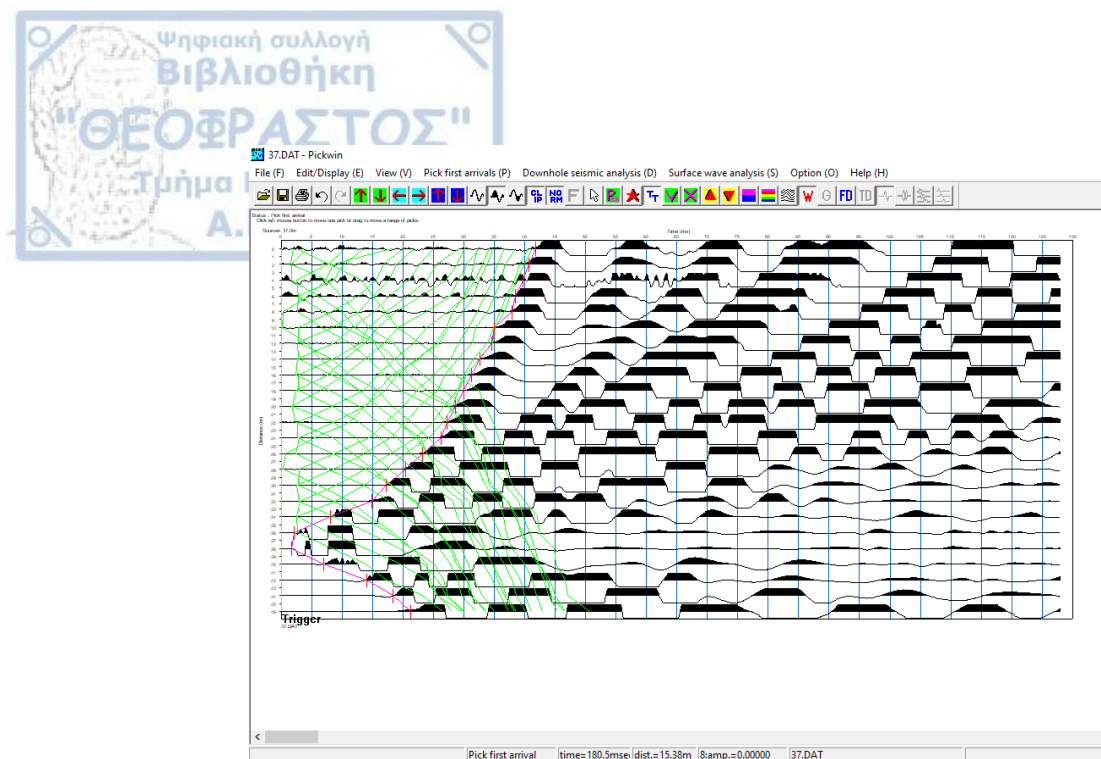
Εικόνα 13: Καμπύλη χρόνων διαδρομής, όπως προέκυψε από τις πρώτες αφίξεις που μετρήθηκαν, για την θέση -1m από το πρώτο γεώφωνο της L3 διάταξης.



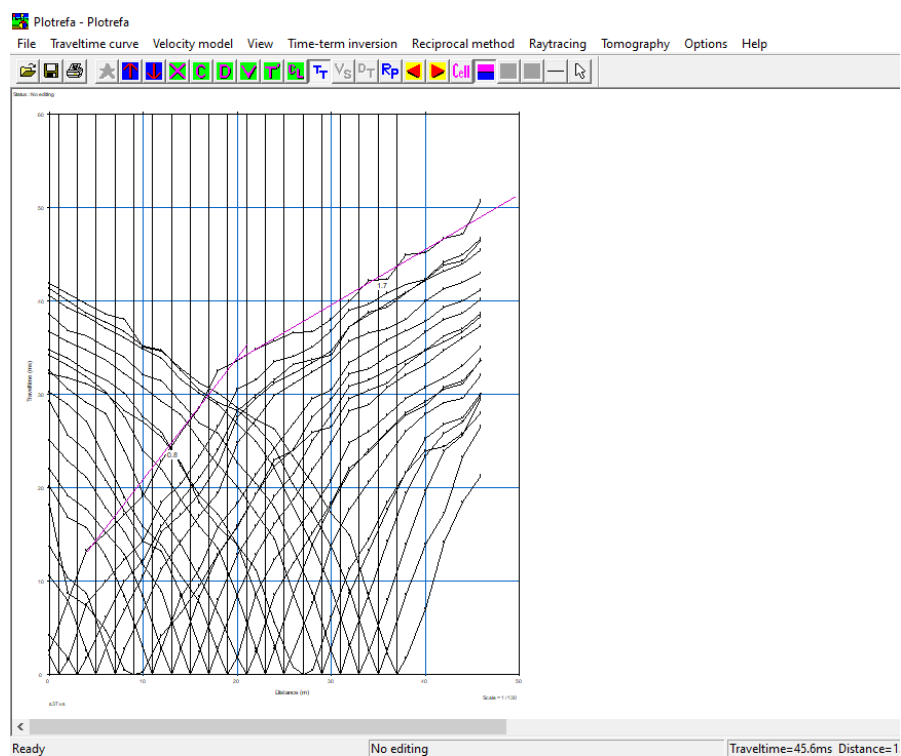
Εικόνα 14: Καταγραφή και σημειωμένες οι πρώτες αφίξεις για την μέτρηση με την πηγή σε θέση 15m από το πρώτο γεώφωνο, στην διάταξη L3.



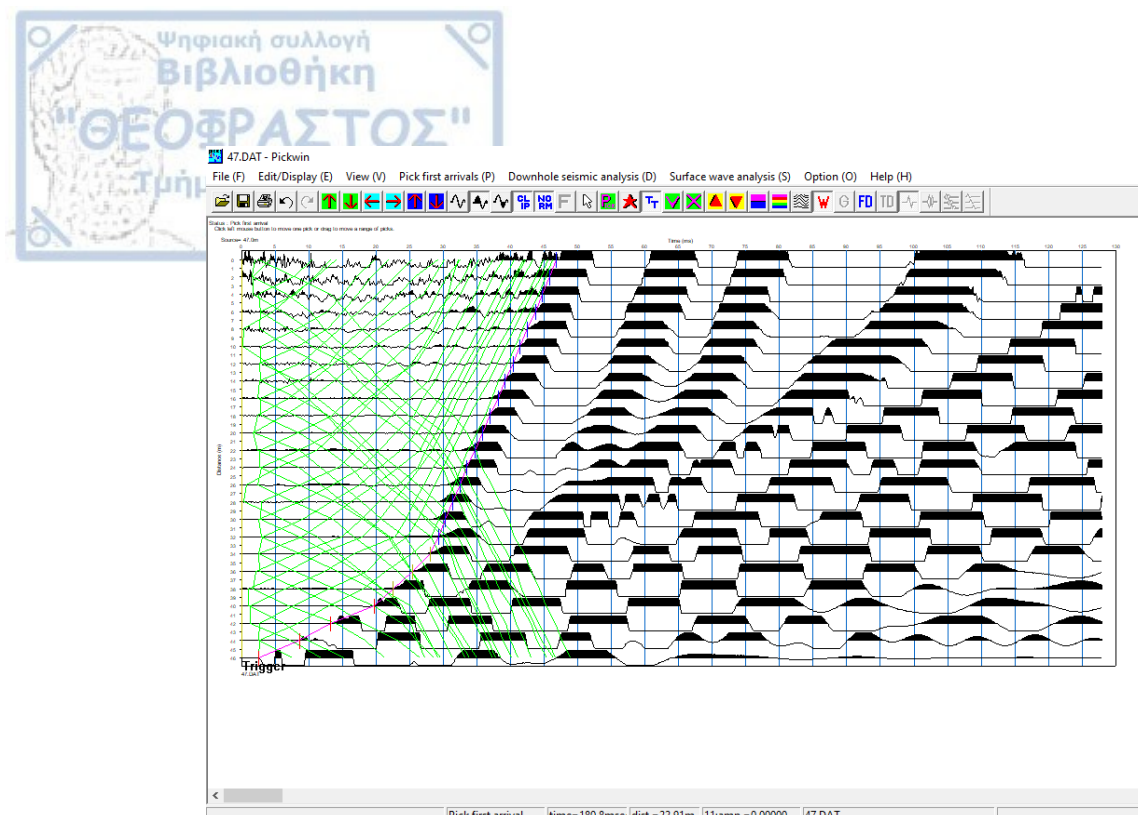
Εικόνα 15: Καμπύλη χρόνων διαδρομής, όπως προέκυψε από τις πρώτες αφίξεις που μετρήθηκαν, για την θέση 15m από το πρώτο γεώφωνο της L3 διάταξης.



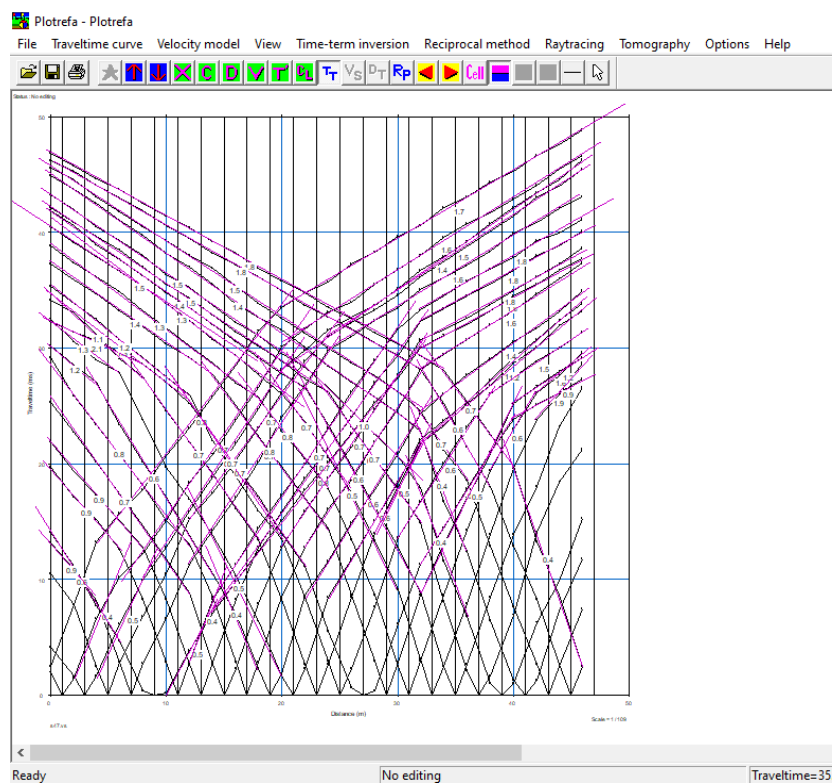
Εικόνα 16: Καταγραφή και σημειωμένες οι πρώτες αφίξεις για την μέτρηση με την πηγή σε θέση 37m από το πρώτο γεώφωνο, στην διάταξη L3.



Εικόνα 17: Καμπύλη χρόνων διαδρομής, όπως προέκυψε από τις πρώτες αφίξεις που μετρήθηκαν, για την θέση 37m από το πρώτο γεώφωνο της L3 διάταξης.



Εικόνα 18: Καταγραφή και σημειωμένες οι πρώτες αφίξεις για την τελευταία μέτρηση με την πηγή σε θέση 47m από το πρώτο γεώφωνο, στην διάταξη L3.

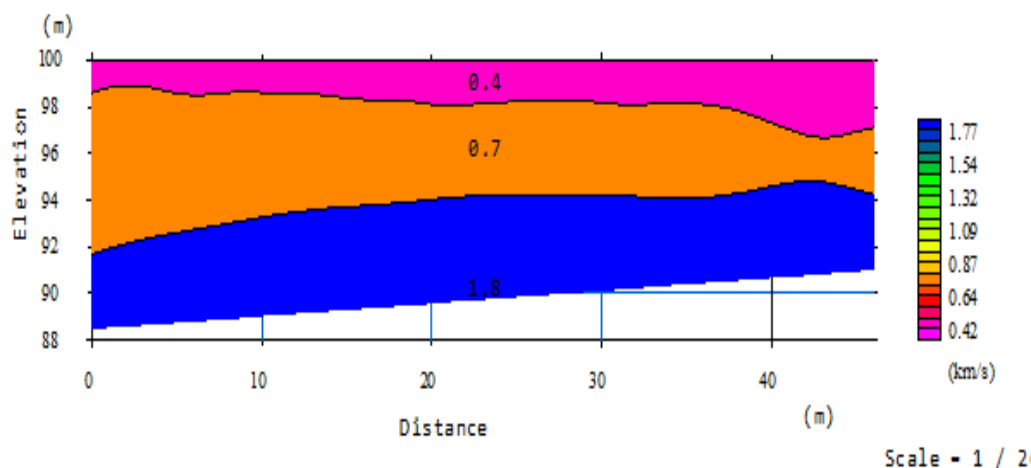


Εικόνα 19: Καμπύλη χρόνων διαδρομής, όπως προέκυψε από τις πρώτες αφίξεις που μετρήθηκαν, για την θέση 47m από το πρώτο γεώφωνο της L3 διάταξης.

4.2.3. Αποτελέσματα και ερμηνεία των τομών της σεισμικής διάθλασης

Το τελικό στάδιο της παραπάνω διαδικασίας, όπως αυτή αναλύθηκε, είναι η αντιστροφή της καμπύλης χρόνων διαδρομής (time inversion), εντός του προγράμματος Plotrefa του λογισμικού SeisImager/2D, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μίας τομής, με χωρισμένες «περιοχές» (στρώματα), ανάλογα με τις ταχύτητες διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, όπως αυτές αποτυπώθηκαν στις πρώτες αφίξεις των καταγραφών μας. Σημαντικό είναι κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των αρχείων .DAT και των αρχείων .VS, να γίνεται σωστή αποθήκευση και άθροιση κάθε αρχείου με τα προηγούμενα, μέσω της επιλογής «append», ώστε η τελική τομή που θα προκύψει μέσω της αντιστροφής, να συμπεριλάβει όλες τις καταγραφές για την δημιουργία όσο πιο ακριβούς μοντέλου είναι εφικτό.

Έτσι, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα της τομής που παράχθηκε, παρατηρούνται μέχρι σε βάθος ~12m δύο βασικές διεπιφάνειες, οι οποίες χωρίζουν τρεις περιοχές-στρώματα με διαφορετικές ταχύτητες.



Εικόνα 16: Τομή της διάταξης L3, όπως προέκυψε από την επεξεργασία των καταγραφών που συλλέχθηκαν στο ύπαιθρο.

Το ανώτερο και επιφανειακό στρώμα έχει ταχύτητες 0.4km/s, το ακριβώς υποκείμενό του 0.7km/s, ενώ το κατώτερο που εμφανίζεται στην τομή, έχει ταχύτητες στα 1.8km/s. Στην τομή εμφανίζεται βάθος διασκόπησης τα 12m περίπου, καθώς και από τη μεθοδολογία αναφέρθηκε, πως το βάθος διασκόπησης φτάνει περίπου στο 1/3 του μήκους της διάταξης. Το επιφανειακό στρώμα (ροζ) έχει πάχος από 1.5m περίπου στα ΝΔ της τομής, έως και περίπου 4m στα ΒΑ της τομής. Το υποκείμενο στρώμα (πορτοκαλί), ξεκινάει από τα 7m

περίπου πάχος στα ΝΔ της τομής φτάνοντας στα 3m στο ΒΑ άκρο της τομής. Σε αυτό το στρώμα παρατηρείται έντονα μία λέπτυνση που φτάνει τα 1.5m, στα ΒΑ της τομής, στη θέση ~40m του μήκους της τομής. Στο τρίτο και κατώτερο στρώμα (μπλε) με την μεγαλύτερη σεισμική ταχύτητα (~1.8km/s), δεν μπορούμε να ξέρουμε το πάχος, καθώς ξεπερνά το βάθος της διασκόπησης (~12m).

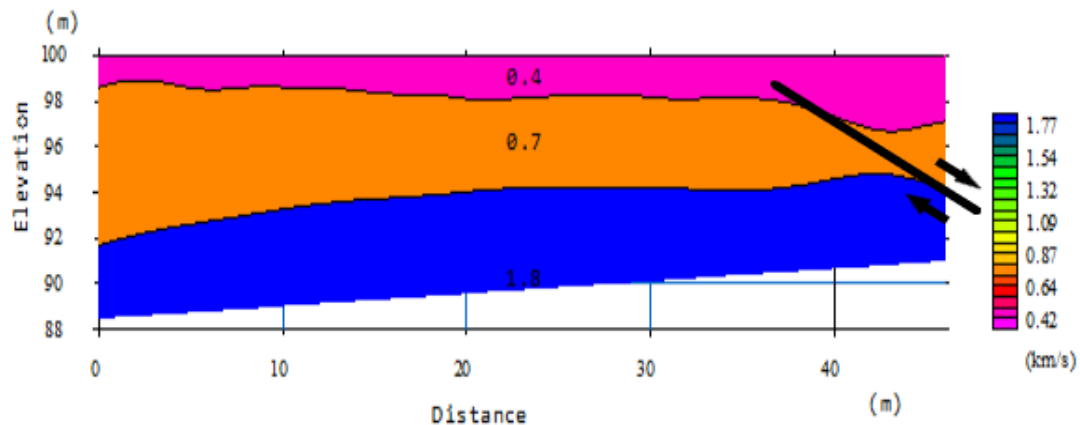
Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται ενδεικτικές τιμές ταχυτήτων σε διάφορα υλικά, όπως προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις (Παπαζάχος, 1996, Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013).

Υλικό	Ταχύτητα διάδοσης ελαστικών κυμάτων (m/s)
Αέρας	330
Νερό	1450-1530
Πετρέλαιο	1300-1400
Έδαφος	100-500
Χιόνι	350-3000
Άμμος (χαλαρή)	200-2000
Άμμος (ξηρή, χαλαρή)	200-2000
Άμμος (κορεσμένη σε νερό, χαλαρή)	1500-2000
Άμμος και χάλικες (επιφανειακά)	400-2300
Άμμος και χάλικες (βάθος 2km)	3000-3500
Άργιλος	1000-2500
Ποτάμια ιλύς/άργιλος	300-1800
Αλλούβια	1800-2200
Ψαμμίτης (Τριτογενής)	2000-2500
Ψαμμίτης (Λιθανθρακοφόρου)	4000-4500
Ασβεστόλιθος (μαλακός)	1700-4200
Ασβεστόλιθος (σκληρός)	2800-7000
Δολομίτης	2500-6500
Ανυδρίτης	3500-5500
Ορυκτό αλάτι	4000-5500
Γύψος	2000-3500
Γρανίτης	4600-6200
Βασάλτης	5500-6500
Γάββρος	6500-7000
Περιδοτίτης	7800-8400
Γνεύσιος	3500-7600
Μάρμαρο	3780-7000
Επιχωματώσεις (χαλίκια κ.ο.κ.)	160-600
Χωματερές	400-750
Τσιμέντο	3000-3500
Σερπεντίνης	5500-6500
Υπερβασικά	7500-8500

Από τον πίνακα τα στρώματα μας ταιριάζουν σε διάφορες κατηγορίες υλικών. Όμως για να τα κατηγοριοποιήσουμε και να βγάλουμε σαφή συμπεράσματα για την σύσταση των υλικών, για τον κορεσμό σε νερό και για ζώνες πιθανώς ρηξιγενείς, θα εμπιστευτούμε τις πληροφορίες που έχουμε για την γεωλογία της περιοχής, η οποία αναλύεται σε προηγούμενα κεφάλαια. Έτσι, μετά από διασταύρωση με τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα για την στρωματογραφική διαδοχή των στρωμάτων:

- I. Ένα επιφανειακό στρώμα, πάχους 2m-4m αποτελούμενο από εδαφικό υλικό, πιθανώς σε ανάμειξη με άμμο και κροκάλες, το οποίο μπορεί να αντιστοιχεί στον Τεταρτογενή σχηματισμό χαλικιών και άμμου (Pt.t3.1), σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε., που παρατέθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Φυσικά, το επιφανειακό στρώμα έχει αναμειχθεί με αργιλικό υλικό και οργανικό υλικό (λιπάσματα κ.λπ.) για τουλάχιστον 0.5m βάθος, αφού το σημείο των μετρήσεων ήταν εντός ενός χωραφιού.
- II. Ένα ενδιάμεσο στρώμα με πορώδες, που υποδηλώνει ύπαρξη υδροφόρου, αποτελούμενο από αργιλικό-αμμώδες υλικό. Οπότε παραπέμπει στις αμμούχες αργίλους του Ολοκαίνου (H.1), σύμφωνα πάλι με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε.
- III. Ένα υποκείμενο στρώμα που από ό,τι φαίνεται αποτελείται από αρκετά πιο συμπαγή υλικά. Ενδεχομένως αυτά τα υλικά να είναι συμπαγής άργιλος/ιλύς ή ακόμα και εναλλαγές χαλαζιτών και χαλαζιτικών ψαμμιτών, με φυλλιτικές ενστρώσεις, ηλικίας Τριαδικού-Μέσου Ιουρασικού (T-Jm.st), από την Περιοδοπική ζώνη, σύμφωνα με τον χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε.

Από την εικόνα που δίνουν τα στρώματα στην τομή μας και με βάση τις διακυμάνσεις των παχών τους κατά μήκος της τομής, θα μπορούσαμε να ταυτίσουμε μία περιοχή που πιθανώς υποδεικνύει μία ζώνη μετακίνησης, πιθανώς μία τεκτονική ασυνέχεια, ενώ οι κοιλότητες μπορεί να είναι αποτέλεσμα της δράσης των ρηγμάτων που παρασύρουν τα μη συνεκτικά υλικά λόγω λιθολογικής διαφοροποίησης. Αυτή η περιοχή βρίσκεται μεταξύ 40-45m της τομής και είναι εμφανής μία κίνηση του επιφανειακού στρώματος προς τα κάτω, μία λέπτυνση του ενδιάμεσου στρώματος και μία αναθόλωση μικρής κλίμακας (0.5-1m) του κατώτερου στρώματος. Υπάρχει μία ακόμα περιοχή που έχει παρόμοια χαρακτηριστικά στα ~5m του μήκους της τομής, όπου η κίνηση των στρωμάτων διαφαίνεται στα δύο κατώτερα στρώματα, με την πλάτυνση αυτή τη φορά του μεσαίου στρώματος και πιθανή του βύθιση προς το κατώτερο. Όμως αυτή η πιθανή ζώνη δεν φτάνει μέχρι την επιφάνεια, ούτε καν τη διεπιφάνεια μεταξύ ανώτερου και μεσαίου στρώματος. Παρατίθεται τομή επεξεργασμένη με σκοπό την υπόδειξη των ζωνών αυτών πιθανούς ρηγμάτων.



Scale = 1 / 2

Σχήμα 4: Η πιθανή ζώνη ρήγματος στην τομή I3. Στα BA (40-45m) φαίνεται η ζώνη και η κατεύθυνση της κίνησης όπως ερμηνεύεται από τις μεταβολές των παχών των στρωμάτων. Αυτή είναι πιθανώς η αναζητούμενη ζώνη του ρήγματος των Λαγυνών, το οποίο χαρτογραφήθηκε από τους Τσάπανος & Παυλίδης & Χατζηπέτρος, και πιθανώς έχει προκαλέσει τις διάφορες επιφανειακές ζημιές στην περιοχή του οικισμού Λαγυνών.

5. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

5.1. Εισαγωγικά για τις ηλεκτρικές μεθόδους διασκόπησης

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης, με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης. Η ποσότητα που μετράμε είναι, συνήθως, **η ηλεκτρική τάση**, ενώ η ποσότητα η οποία παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον και της οποίας επιδιώκεται ο καθορισμός της και η μελέτη της κατανομής των τιμών της με το βάθος, στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης, είναι η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση**.

Υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης, όμως οι σπουδαιότερες από αυτές είναι η **μέθοδος της ειδικής αντίστασης**, η **μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών**, η **μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας**, η **μέθοδος του φυσικού δυναμικού** και η **μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων**.

Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να κατανεμηθούν σε δύο γενικές κατηγορίες: σε εκείνες που βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών **φυσικών** ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων, και σε εκείνες που βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών, τα οποία εξαρτώνται από παραγόμενα **τεχνητά** ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία. Για αυτό, οι μέθοδοι της πρώτης κατηγορίας μοιάζουν με τις βαρυτικές και μαγνητικές μεθόδους διασκόπησης, ενώ της δεύτερης κατηγορίας μοιάζουν με τις σεισμικές μεθόδους. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και των τελλουρικών ρευμάτων, ενώ οι άλλες τρεις μέθοδοι ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται, κυρίως, στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Υδρογεωλογία και στην Τεχνική Γεωλογία για την ανεύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος, σε τοποθεσίες κατασκευής τεχνικών έργων. Πολύ λιγότερο χρησιμοποιούνται στην διασκόπηση πετρελαίου, γιατί με αυτές μπορούμε να μελετήσουμε μόνο τα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης. Σε σπάνιες περιπτώσεις, οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι μπορούν να δώσουν πληροφορίες για βάθη μεγαλύτερα των 2000m.

Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, χρησιμοποιείται περισσότερο από τις υπόλοιπες ηλεκτρικές μεθόδους, για την επίλυση μίας πληθώρας γεωλογικών προβλημάτων. Στην αρχή, η μέθοδος είχε μικρό σχετικά βάθος διερεύνησης, όμως με την εξέλιξη των οργάνων

καταγραφής και της γεωμετρίας των διατάξεων των ηλεκτροδίων, πλέον δίνει την δυνατότητα για έρευνα σε μεγαλύτερα βάθη, τέτοια, ώστε να εντοπιστούν γεωθερμικά πεδία και ρηχοί θύλακες υδρογονανθράκων. Αποτελεσματική, επίσης, είναι η χρήση της μεθόδου για τον εντοπισμό τεκτονικών δομών και μεταλλευμάτων, αλλά και στην αρχαιολογική έρευνα, την Υδρογεωλογία και την Τεχνική και Περιβαλλοντική Γεωλογία. Παρακάτω αναλύεται η μεθοδολογία της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στα ορυκτά και πετρώματα.

5.1.1. Ειδική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών

Η ειδική αντίσταση, ρ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ηλεκτρική διασκόπηση, ενώ χρησιμοποιείται αρκετά συχνά για την διασκόπηση διάφορων στόχων (τεκτονικές ασυνέχειες, μεταλλεύματα κ.λπ.). Αν R είναι η ηλεκτρική αντίσταση ενός κομματιού πετρώματος σχήματος κυλίνδρου, διατομής S και μήκους l , η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση**, ορίζεται από τη σχέση:

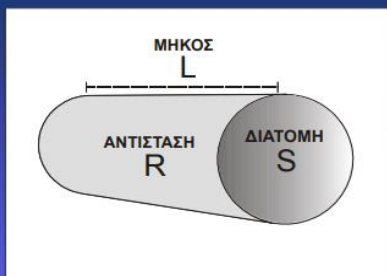
$$\rho = \frac{R S}{l}$$

Το αντίστροφο, $\sigma = 1/\rho$, της ειδικής αντίστασης ονομάζεται **ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα** του πετρώματος.

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων S.I., είναι το Ωm . Πολλές φορές χρησιμοποιείται και η μονάδα Ωcm , όπου $1\Omega\text{m} = 100\Omega\text{cm}$.

Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών είναι μία από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητές τους. Οι τιμές κυμαίνονται από $10^{-6}\Omega\text{m}$ σε ορισμένα ορυκτά, όπως ο γραφίτης, μέχρι τα $10^{15}\Omega\text{m}$ σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Καλοί αγωγοί θεωρούνται τα πετρώματα και ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{-6} και $10^{-1}\Omega\text{m}$ και κακοί αγωγοί αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^8 και $10^{15}\Omega\text{m}$.

Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση



ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ρ :

$$\rho = \frac{R S}{L}$$

ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ : $\frac{\text{Ohm} \cdot \text{m}^2}{\text{m}} = \text{Ohm} \cdot \text{m}$

ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ σ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ : $\frac{1}{\text{Ohm} \cdot \text{m}} = \text{Siemens} / \text{m} = \text{S/m}$

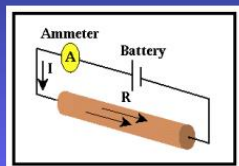
Εικόνα 17: Σχέση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την ηλεκτρική αγωγιμότητα των υλικών. ς. Από τις παρουσιάσεις του μαθήματος "Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης", Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.

Δεν υπάρχει συστηματική διαφορά μεταξύ των ειδικών αντιστάσεων των πλουτώνιων και μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Τα περισσότερα ιζηματογενή πετρώματα έχουν ειδικές αντιστάσεις ($1-10^3 \Omega \text{m}$) μικρότερες από τις ειδικές αντιστάσεις των πλουτώνιων και μεταμορφωμένων πετρωμάτων ($10^3-10^5 \Omega \text{m}$), αλλά ο συμπαγής ασβεστόλιθος έχει υψηλές τιμές ($> 10^5 \Omega \text{m}$).

Ορισμένα υλικά, μεταξύ των οποίων είναι και ορισμένα ορυκτά τα οποία παρουσιάζουν οικονομικό ενδιαφέρον (γραφίτης, πυρίτης, σιδερίτης) έχουν μικρές ειδικές αντιστάσεις σε σχέση με τα περιβάλλοντά τους πετρώματα. Σε αυτήν την ιδιότητα, λοιπόν, των ορυκτών βασίζονται οι μέθοδοι της ηλεκτρικής διασκόπησης που εφαρμόζονται για τον εντοπισμό οικονομικών στόχων.

Νόμος του Ohm

- Το 1828 ο George Ohm προτείνει την παρακάτω εμπειρική σχέση που συνδέει την διαφορά δυναμικού V που πρέπει να ασκηθεί σε ρεύμα έντασης I ώστε αυτό να διέλθει από υλικό με ηλεκτρική αντίσταση R



Νόμος του Ohm (απλοποιημένη μορφή):

$$V = I R$$

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

- Η έννοια της ηλεκτρικής αντίστασης περιγράφει την ιδιότητα του υλικού χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις διαστάσεις του.
- Για το λόγο αυτό εισάγεται ο όρος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Εικόνα 18: Ο νόμος του Ohm, ο οποίος συνδέει την αντίσταση (R) με την τάση (V) και την ένταση (I) του ηλεκτρικού ρεύματος. Από τις παρουσιάσεις του μαθήματος "Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης", Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.

Μερικά ορυκτά, όπως είναι κάποια μέταλλα που βρίσκονται στη φύση και ο γραφίτης, έχουν καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, λόγω των ελεύθερων ηλεκτρονίων τους. Όμως, τα περισσότερα ορυκτά, από τα οποία συνήθως αποτελούνται τα πετρώματα, είναι μονωτές και η ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων που τα περιέχουν και κυρίως αυτών που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της Γης, οφείλεται στα ιόντα τα οποία σχηματίζονται στο νερό που περιέχουν τα πετρώματα αυτά στους πόρους τους (ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα). Οπότε, η αγωγιμότητα ενός πετρώματος πρέπει να εξαρτάται από το πορώδες του πετρώματος.

Η παραπάνω θέση εκφράζεται με τον **νόμο του Archie**, που εκφράζεται με την παρακάτω εμπειρική σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης ρ και το πορώδες ϕ ενός πετρώματος, η οποία θέλει να δείξει ότι η ειδική αντίσταση αυξάνει όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος:

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

όπου: ϕ ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον όγκο του πετρώματος (πορώδες)
 α , m σταθερές που σε πρώτη προσέγγιση έχουν τιμές $\alpha=1$, $m=2$
 ρ_v η ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος.

Για τα πετρώματα που είναι διαποτισμένα με νερό, υπάρχει μία έμμεση σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης και της λιθολογίας ή της γεωλογικής ηλικίας, γιατί οι δύο αυτοί παράγοντες καθορίζουν το πορώδες και κατά συνέπεια την χωρητικότητα του πετρώματος σε

νερό. Η τιμή του πορώδους αρχίζει από 0.4, για τα πελαγικά ιζήματα και σχεδόν μηδενίζεται για τα άλλα ιζήματα (ασβεστόλιθος, κ.λπ.).

Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων αυξάνεται γενικά με τη γεωλογική ηλικία τους, λόγω της αύξησης της συνοχής τους, η οποία οφείλεται στην αύξηση του πάχους των υπερκείμενων στρωμάτων και συνεπώς της πίεσης που ασκούν τα στρώματα αυτά, στα υποκείμενά τους με την αύξηση του χρόνου. Όμως αυτό δεν ισχύει πάντα και ιδιαίτερα για τα τριτογενή ιζήματα, τα οποία λόγω του ότι σχηματίστηκαν σε γλυκό νερό κατά κύριο λόγο, έχουν μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις από τα μεσοζωικά ιζήματα, τα οποία σχηματίστηκαν σε αλμυρά νερά. Στα κρυσταλλικά πετρώματα των οποίων το πορώδες είναι εξαιρετικά χαμηλό, η ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλεται αποκλειστικά σχεδόν στις ρωγμές που υπάρχουν στα πετρώματα αυτά.

Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων εξαρτάται, επίσης, από τη θερμοκρασία τους. Μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας επιδρούν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με νερό, στο βαθμό που επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη που περιέχεται στα πετρώματα. Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί ελάττωση του ιζώδους του νερού, με συνέπεια τη ελάττωση της ειδικής αντίστασης (αύξηση της αγωγιμότητας).

Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με νερό επηρεάζεται έντονα από τη θερμοκρασία μόνο σε περίπτωση μεγάλων μεταβολών αυτής και ιδιαίτερα όταν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, ώστε να προκαλέσει εξάτμιση του νερού ή πολύ χαμηλή, ώστε το νερό να παγώσει. Στη μεγάλη ελάττωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προκαλείται από υψηλές θερμοκρασίες που εξατμίζουν το νερό, οφείλεται η χρήση των γεωηλεκτρικών μεθόδων και ιδιαίτερα η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, στην έρευνα γεωθερμικών πεδίων. Ο παρακάτω πίνακας μας δίνει ενδεικτικές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ) σε διάφορα πετρώματα και χημικές ενώσεις της Γης (Παπαζάχος, 1996; Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013).



Υλικό	Ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Ωm)
Γρανίτης	$5 \cdot 10^3 - 10^6$
Βασάλτης	$10^3 - 10^6$
Μάρμαρο	$5 \cdot 10^3 - 10^6$
Χαλαζίτης	$10^2 - 2 \cdot 10^8$
Ψαμμίτης και Κροκαλοπαγή	$8 - 4 \cdot 10^3$
Αργιλικός Σχιστόλιθος	$20 - 2 \cdot 10^3$
Ασβεστόλιθος	$50 - 4 \cdot 10^2$
Ασβεστόλιθος (συμπαγής)	$10^3 - 10^5$
Άργιλος	$1 - 10^2$
Άμμοι και χάλικες	$20 - 10^3$
Αλλούβια	$10 - 8 \cdot 10^2$
Νερό	$10 - 10^2$
Θαλασσινό νερό	$0.2 - 1$
Permafrost	$8 \cdot 10^3 - 10^5$
Σουλφίδια	$0.01 - 1$
Γραφίτης	$0.1 - 10$
Σίδηρος	$9.074 \cdot 10^{-3}$
10^{-2} M Χλωριούχο Κάλιο	0.708
10^{-2} M Χλωριούχο Νάτριο	0.842
10^{-2} M Οξικό Οξύ	6.13

5.1.2. Η μεθοδολογία της μεθόδου ειδικής αντίστασης

Η λήψη μετρήσεων στις γεωηλεκτρικές μεθόδους, έτσι και στην μέθοδο της ειδικής αντίστασης, είναι εύκολη και γρήγορη, με την χρήση οργάνων πολλών καναλιών, με δυνατότητα να πραγματοποιηθεί δισδιάστατη ή τρισδιάστατη ηλεκτρική βυθοσκόπηση (κατάκρυφη ηλεκτρική διασκόπηση) και ηλεκτρική χαρτογράφηση (οριζόντια ηλεκτρική διασκόπηση).

ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

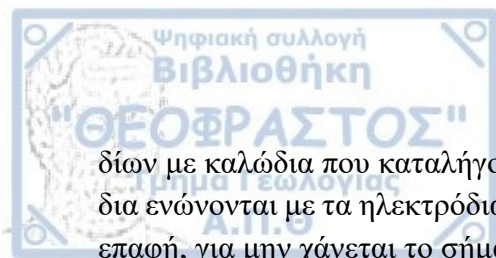
- Σκοπός της μεθόδου της ειδικής αντίστασης είναι να βρεθεί η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους.
- Η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής.

- Διαβιβάζεται συνεχές ηλεκτρικό έντασης I μέσα στη γη με δυο ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και μετράται σε διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού V_{MN} μεταξύ δυο ηλεκτροδίων δυναμικού M,N.
- Βρίσκεται έτσι για κάθε μέτρηση η ηλεκτρική αντίσταση R

$$R = \frac{V_{MN}}{I_{AB}}$$

Εικόνα 19: Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Από τις παρουσιάσεις του μαθήματος "Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης", Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στην γεωηλεκτρική διασκόπηση είναι συνήθως απλές και περιλαμβάνουν καλώδια, ηλεκτρόδια και πολυκαναλικό όργανο καταγραφής. Η εφαρμογή της μεθόδου ξεκινάει πακτώνοντας τα ηλεκτρόδια καλά στο έδαφος, προσπαθώντας να έχουν καλή επαφή με το έδαφος (χωρίς κενά αέρα). Η τοποθέτησή τους θα ακολουθεί τους κανόνες που ορίζει η διάταξη που αποφασίσαμε να χρησιμοποιηθεί, ενώ ο αριθμός των ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιηθεί, εξαρτάται από το πόσα μπορεί να διαχειριστεί ο εξοπλισμός (όργανο ηλεκτροδότησης και καταγραφής) και οι αποστάσεις μεταξύ τους θα εξαρτηθούν από τον στόχο της διασκόπησης, που μπορεί να αυξάνονται κατά την διάρκεια της μέτρησης. Στη περίπτωση που ανάμεσα σε ηλεκτρόδιο και έδαφος υπάρχουν κενά ή χαμηλό ποσοστό υγρασίας, τότε το ρεύμα δεν διοχετεύεται με μεγάλη ευκολία, και άρα εφαρμόζονται διάφορες διεργασίες, όπως η χρήση αλατόνευρου στη θέση των ηλεκτροδίων, για να μειωθεί η αντίσταση που συναντά το ρεύμα κατά την είσοδο του στο έδαφος, ποσότητα που καλείται αντίσταση επαφής (R_c). Ακολουθεί η σύνδεση των ηλεκτρο-



δίων με καλώδια που καταλήγουν στην μονάδα μέτρησης και διακοπών, τα οποία καλώδια ενώνονται με τα ηλεκτρόδια με μονωτική ταινία, με τρόπο ώστε να υπάρχει πολύ καλή επαφή, για μην χάνεται το σήμα.

Η συσκευή μέτρησης περιλαμβάνει βολτόμετρο που μετράει τη διαφορά τάσης (ΔV) μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων δυναμικού (M και N), μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος (συνήθως μπαταρία τύπου αυτοκινήτου), αμπερόμετρο για να μετράται η ένταση του ρεύματος (I), η οποία διαβιβάζεται στη Γη μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος (A και B). Η ηλεκτρική πηγή έχει τη δυνατότητα διαβίβασης συνεχούς (D.C.) ή εναλλασσόμενου ρεύματος (A.C.), στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού. Εάν το ρεύμα που χρησιμοποιείται είναι συνεχές, πρέπει τα ηλεκτρόδια να είναι πορώδη, ώστε να αποφεύγεται η πόλωσή τους, ενώ για τον ίδιο λόγο η πολικότητα θα πρέπει να εναλλάσσεται περιοδικά. Για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιούνται κυρίως πηγές εναλλασσόμενου και όχι συνεχούς ρεύματος, με χρήση ηλεκτροδίων από ατσάλι ή αλουμίνιο, φτάνοντας σε ένα αρκετά μεγάλο βάθος. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση διασκόπησης σε πολύ μεγάλο βάθος, όπου χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα.

Ακολουθεί ο προγραμματισμός των διακοπών και του συστήματος μέτρησης, ώστε να ελεγχθεί η διαδοχή των ηλεκτροδίων σε κάθε μέτρηση, δηλαδή να καθοριστεί ποια δύο από τα ηλεκτρόδια θα λειτουργήσουν ως ηλεκτρόδια ρεύματος και ποια δύο ως ηλεκτρόδια δυναμικού, ενώ σε κάθε μέτρηση τα υπόλοιπα θα αποσυνδέονται, πάντα με βάση την διάταξη που επιλέχθηκε στην αρχή της έρευνας. Πριν την έναρξη των μετρήσεων μετράται το φυσικό δυναμικό του εδάφους, την αφαίρεση της τιμής του από τα προσμετρούμενα δυναμικά, κατά την καταγραφή των μετρήσεων.

Στη συνέχεια ξεκινάει η παροχή ρεύματος στα ηλεκτρόδια ρεύματος, με κάθε πιθανό συνδυασμό ηλεκτροδίων ρεύματος-δυναμικού. Όπως είναι κατανοητό, το μήκος της διάταξης και η διαδοχική απόσταση των ηλεκτροδίων επηρεάζει το βάθος της διασκόπησης, όπως και στις υπόλοιπες μεθόδους που αναφέρθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία. Έτσι, αν η έρευνα στοχεύει σε ρηχό στόχο, τα ηλεκτρόδια έχουν πιο πυκνή ταξινόμηση, για πυκνή καταγραφή και υψηλή διακριτική ικανότητα, ενώ για μεγαλύτερα βάθη τα ηλεκτρόδια χρειάζεται να έχουν πιο αραιή κατανομή, ανάλογα πάντα με την διάταξη που εφαρμόζεται.

Μετά το πέρας των μετρήσεων, υπάρχει απευθείας αποτύπωση των αποτελεσμάτων σε ψευδοτομή φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση (ρ_a), δεν είναι μία φυσική ποσότητα, η οποία όμως χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των σχηματισμών και πετρωμάτων του υπεδάφους και που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ένας «μέσος όρος» των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους.

ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛ/ΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
Επειδή η γη είναι γεωηλεκτρικά ανομοιογενής, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση:

- της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους
- της γεωμετρίας της μέτρησής μας (Θέσεις Α,Β,Μ,Ν)

Για να λάβουμε υπόψη την επίδραση της γεωμετρίας εισάγεται ο όρος της :

ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ρ_a

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

R = ηλεκτρική αντίσταση, K = γεωμετρικός παράγοντας

Εικόνα 20: Ορισμός και τύπος της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που εμφανίζεται στην ψευδοτομή μας. Από τις παρουσιάσεις του μαθήματος "Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης", Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.

Από τη στιγμή που η Γη δεν είναι ομογενής, δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί εύκολα απευθείας η πραγματική αντίσταση των πετρωμάτων, καθώς με την μεταβολή της θέσης και απόστασης των ηλεκτροδίων μεταβάλλεται και η μετρούμενη τιμή της διαφοράς δυναμικού (ΔV) από τα ηλεκτρόδια δυναμικού Μ, Ν. Γίνεται κατανοητό, λοιπόν, ότι η ποσότητα που αρχικά υπολογίζεται κατά τις μετρήσεις είναι η φαινόμενη αντίσταση, από την οποία μέσω περαιτέρω επεξεργασίας στο γραφείο προκύπτει και η ειδική αντίσταση. Η ψευδοτομή αποτελεί μία αλλοιωμένη εικόνα του υπεδάφους, που περιέχει πληροφορίες για την πραγματική αντίσταση, ωστόσο εξαρτάται από τη διάταξη της μέτρησης, παράμετρος που πρέπει να εξαλειφθεί στην επεξεργασία στο γραφείο, μέσω αντιστροφής δεδομένων. Με την πρώτη απεικόνιση της ψευδοτομής, υπάρχει δυνατότητα αφαίρεσης θορυβωδών δεδομένων, τα οποία αλλοιώνουν την ποιότητα των μετρήσεων και δίνουν μία μη πραγματική εικόνα για την γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους. Για την παραγωγή αυτής της ψευδοτομής, τοποθετείται στο μέσο των ηλεκτροδίων, που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μέτρηση σε μια τομή, σημείο αναφοράς το οποίο έχει βάθος ανάλογο της απόστασης των ηλεκτροδίων.

Για να αυξηθεί το βάθος ανοίγει η απόσταση των ηλεκτροδίων και συνεχίζει η ίδια διαδικασία στην παραγωγή ψευδοτομής. Η ψευδοτομή δεν χρησιμεύει ως τελική τομή για την εξαγωγή των συμπερασμάτων της δομής του υπεδάφους, αλλά αποτελεί μια ένδειξη για την κατανομή των ειδικών αντιστάσεων των πετρωμάτων και μέσω αυτής κατάσκευάζο-

νται οι καμπύλες ίσης φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι διαγράμματα από τα οποία μπορούν να διεξαχθούν συμπεράσματα για την αντίσταση των στρωμάτων, αλλά και τα πάχη αυτών. Ωστόσο, ενδέχεται σε αυτές να παρουσιαστούν φαινόμενα «ισοδυναμίας» και «συμπίεσης». Σύμφωνα με το φαινόμενο «ισοδυναμίας» υπάρχει η περίπτωση μοντέλα με διαφορετικούς συνδυασμούς πάχους και ειδικών αντιστάσεων να δώσουν σχεδόν ταυτόσημες καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, ενώ κατά το φαινόμενο της «συμπίεσης» ενδέχεται, για παράδειγμα, ένα στρώμα με παρόμοια ειδική αντίσταση με το υποκείμενο του να μην εμφανίζεται καθόλου στην καμπύλη. Για την δημιουργία της τελικής τομής, που περιλαμβάνει την κατανομή των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων, είναι απαραίτητη η χρήση αλγορίθμων αντιστροφής των δεδομένων. Ο αλγόριθμος εξαλείφει την επίδραση της γεωμετρικής διάταξης και χωρίζει το γεωλογικό υπέδαφος σε ορθογώνια παραλληλόγραμμα, ή αλλιώς κελιά, που το καθένα αντιστοιχεί σε μια τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μεταβολή αυτού του μοντέλου, έτσι ώστε να επιτευχθεί σύμπτωση των μετρούμενων καμπυλών με τις υπολογιζόμενες από τον αλγόριθμο καμπύλες, με όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση.

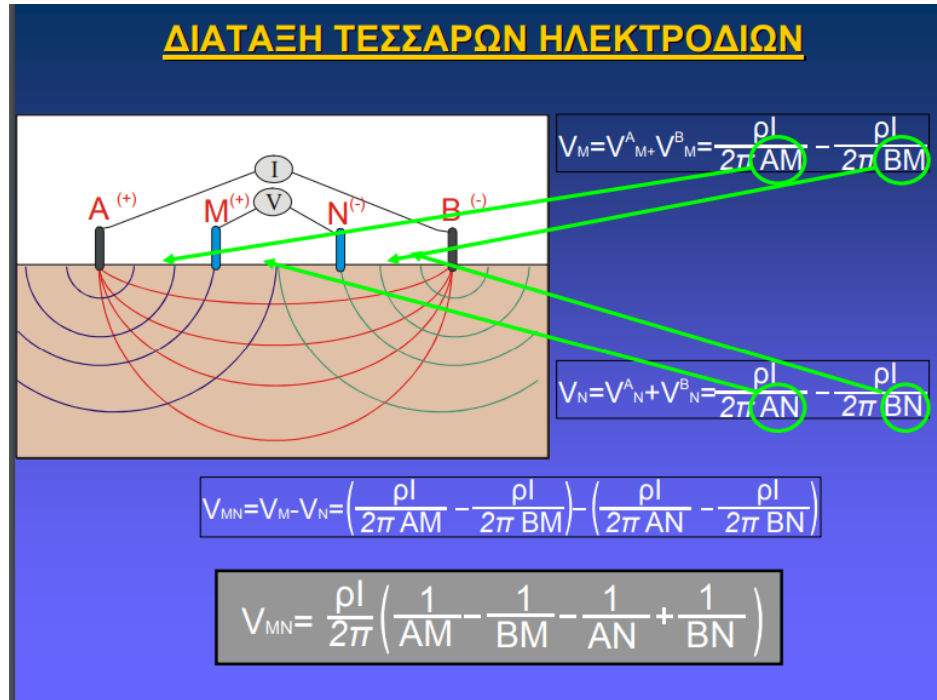
Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, βασίζεται σε ένα φαινόμενο που είναι ανάλογο του φαινομένου της διάθλασης των σεισμικών ακτινών, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο της σεισμικής διάθλασης. Συγκεκριμένα, έστω ότι υπάρχει στρώμα ειδικής αντίστασης ρ_1 , που βρίσκεται σε επαφή με υποκείμενο ημιχώρο ειδικής αντίστασης ρ_2 , τότε όταν ηλεκτρικό ρεύμα πυκνότητας J_1 , που διαρρέει το πάνω στρώμα, προσπέσει υπό γωνία στη διαχωριστική επιφάνεια των δυο στρωμάτων, θα την διαπεράσει, αλλά η διεύθυνση της συνιστώσας της πυκνότητας του ρεύματος θα αλλάξει και θα διαφέρει η τιμή της γωνίας με την κατακόρυφη από την αντίστοιχη της προσπίπτουσας γωνίας. Με βάση την αρχή ότι το δυναμικό και η κατακόρυφη συνιστώσα της πυκνότητας του ρεύματος έχουν σταθερές τιμές και από τις δυο μεριές της διαχωριστικής επιφάνειας αποδεικνύεται η σχέση:

$$\frac{\varepsilon\varphi\varphi_1}{\varepsilon\varphi\varphi_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Από την σχέση αυτή προκύπτει ότι αν το ρεύμα ρέει από στρώμα υψηλότερης ειδικής αντίστασης σε υποκείμενο ημιχώρο χαμηλότερης ειδικής αντίστασης, δηλαδή αν ισχύει $\rho_1 > \rho_2$, τότε η συνιστώσα της πυκνότητας του ρεύματος θα απομακρύνεται από την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια των στρωμάτων και το μεγαλύτερο ποσοστό ρεύματος θα διαρρεύσει από τον ημιχώρο, ενώ αν ισχύει ότι $\rho_1 < \rho_2$, τότε η γραμμή ροής του ρεύματος θα προσεγγίζει την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια και το μεγαλύτερο ποσοστό ρεύματος θα περάσει από το ανώτερο στρώμα. Συνεπώς, με αυτό το τρόπο το ρεύμα που παράγεται τεχνητά στην επιφάνεια από τα ηλεκτρόδια ρεύματος (Α και Β) διοχετεύεται και κινείται στο εσωτερικό της Γης και δημιουργεί ισοδυναμικές καμπύλες η διαφορά τάσης των οποίων υπολογίζεται από τα ηλεκτρόδια δυναμικού (Μ και Ν).

5.1.3. Οι διάφορες διατάξεις που χρησιμοποιούνται

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού.



Εικόνα 21: Διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων και τύπος του δυναμικού V , που εξαρτάται από την γεωμετρία της διάταξης. Από τις παρουσιάσεις του μαθήματος "Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης", Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.

Οι πιο γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι τρεις: η διάταξη **Wenner**, η διάταξη **Schlumberger** και η διάταξη **Διπόλου-Διπόλου**. Επίσης, υπάρχουν και δευτερεύουσες διατάξεις, όπως: η διάταξη **Lee**, η διάταξη **Πόλου-Διπόλου**, η διάταξη **Πόλου-Πόλου**, η διάταξη **τριών σημείων**, η **τετραγωνική διάταξη** κ.λπ. Σε αυτή την εργασία θα αναπτυχθούν οι τρεις βασικές παρακάτω:

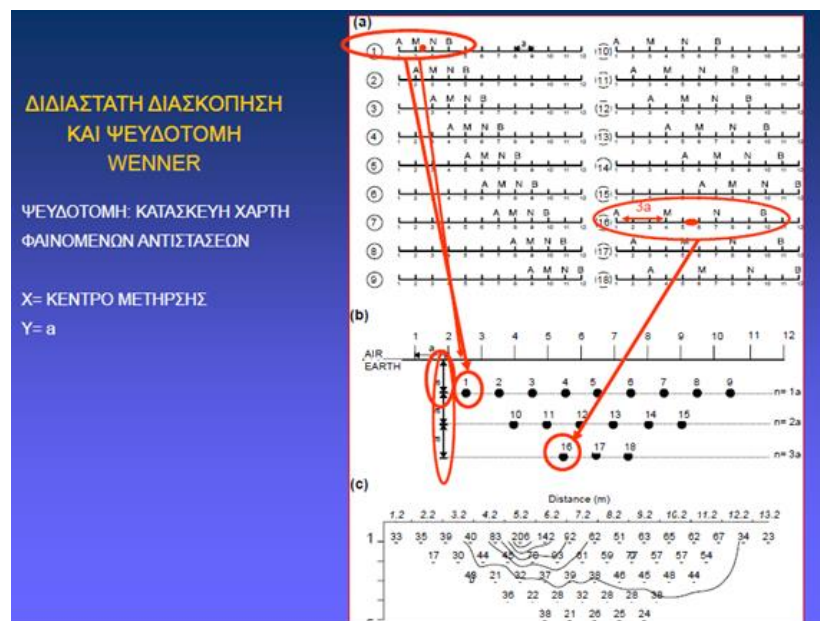
- ✓ **Διάταξη Wenner:** Κατά τη διάταξη αυτή λαμβάνονται $AM = MN = NB = a$, δηλαδή τα ηλεκτρόδια διατάσσονται συμμετρικά σε μία ορισμένη γραμμή. Σε αυτή τη διάταξη η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

Δηλαδή στην περίπτωση αυτή, ο **γεωμετρικός συντελεστής** είναι $K=2\pi a$. Κατά την εφαρμογή της διάταξης Wenner για **ηλεκτρική βυθοσκόπηση**, δηλαδή, για κατάκρυφη ηλεκτρική διασκόπηση, τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται σε σχέση με ορισμένο κέντρο, με αύξηση της a , κατά ορισμένη κάθε φορά απόσταση, ενώ κατά

την εφαρμογή της για **ηλεκτρική χαρτογράφηση**, δηλαδή, για οριζόντια ηλεκτρική διασκόπηση, η απόσταση a παραμένει σταθερή και τα τέσσερα ηλεκτρόδια κινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής (οριζόντιας γραμμής), κατόπιν κατά μήκος άλλης, κ.ο.κ., και η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χαρτογραφείται στο κέντρο κάθε διάταξης.

Η διάταξη Wenner, παρά τη γεωμετρική της απλότητα, παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων, κυρίως γιατί πρέπει να μετακινούμε όλα τα ηλεκτρόδια κατά την πραγματοποίηση νέας μέτρησης και έχει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα κατά την ερμηνεία των παρατηρήσεων για θεωρητικούς λόγους.



Εικόνα 22: Διάταξη Wenner και ενδεικτική απεικόνιση ειδικών αντιστάσεων. Από τις παρουσιάσεις του μαθήματος "Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης", Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.

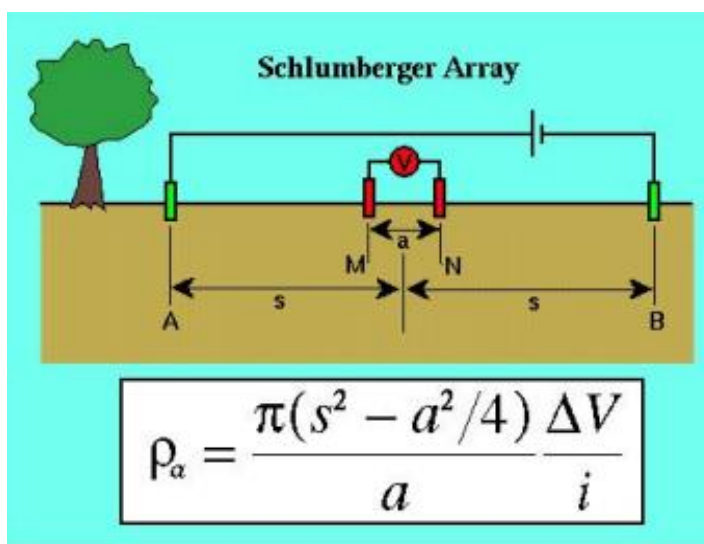
- ✓ **Διάταξη Schlumberger:** Στη διάταξη αυτή, η απόσταση $MN = l$, μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού, είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση $AB = 2L$, μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος ($L \gg l$). Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι στην περίπτωση αυτή, η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\pi l^2}{2l} + \frac{\Delta V}{I}$$

Άρα, στην συγκεκριμένη περίπτωση ο γεωμετρικός συντελεστής είναι $K = \pi l^2 / 2l$. Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger σε μία γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά, ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά προς το κέντρο

της διάταξης, ενώ κατά την εφαρμογή της διάταξης για γεωηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται πάνω στην τομή, ενώ η απόστασή τους παραμένει σταθερή, όπως στην διάταξη Wenner.

Η διάταξη Schlumberger εφαρμόζεται περισσότερο από όλες τις διατάξεις, επειδή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι το ότι απαιτείται η μεταβολή της απόστασης μόνο τω δύο ηλεκτροδίων κατά τη γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, το ότι η χρησιμοποίηση σταθερού διπόλου τάσης, περιορίζει ανεπιθύμητες επιδράσεις στις μετρήσεις, που προκαλούνται από γεωλογικές πλευρικές ασυνέχειες και ότι το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου σήμερα βοηθητικού υλικού (καμπύλες, προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών) για την ερμηνεία παρατηρήσεων έγινε για την εφαρμογή σε διάταξη Schlumberger.



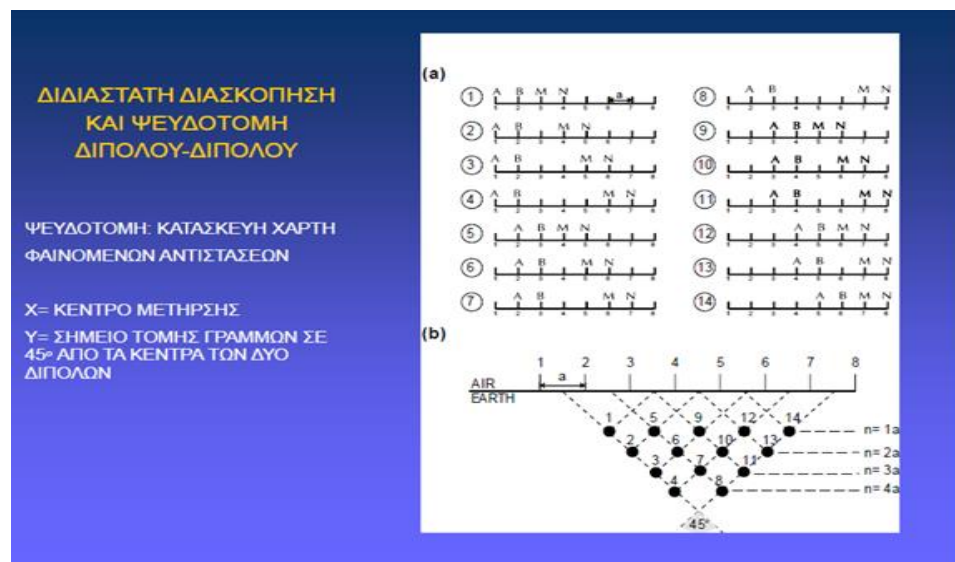
Εικόνα 23: Διάταξη Schlumberger. . Από τις παρουσιάσεις του μαθήματος "Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης", Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.

- ✓ **Διάταξη διπόλου-διπόλου:** Στη διάταξη αυτή, τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, $AB=2l$, αλλά είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, δηλαδή, απέχουν από αυτά σημαντική απόσταση, $BM=n2l$, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν, συνήθως, την ίδια μικρή απόσταση $MN=2l$. Στην περίπτωση αυτή ($n \gg 1$), η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

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

Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα, ότι η απόσταση $2nl$, μεταξύ του διπόλου ρεύματος και του διπόλου δυναμικού, μπορεί να αυξηθεί σημαντικά και περι-

ορίζεται μόνο από τον εδαφικό θόρυβο και από τη δυνατότητα των οργάνων να καταγράψουν την τάση και όχι από την απαίτηση για μεγάλα μήκη καλωδίων, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις Wenner και Schlumberger. Οι μετρήσεις κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, πραγματοποιούνται με αύξηση του n κατά βήματα.



Εικόνα 24: Διάταξη διπόλου-διπόλου και ενδεικτική απεικόνιση ψευδοτομής με τις ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Από τις παρουσιάσεις του μαθήματος "Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης", Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.

Η μαθηματική ανάλυση για την ποσοτική ερμηνεία των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, έχει αναπτυχθεί για την εφαρμογή της, κυρίως στην περίπτωση γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης (κατακόρυφης διασκόπησης). Η ερμηνεία αυτή γίνεται αρχικά με όχι πολύ ακριβείς γραφικές μεθόδους και τα αποτελέσματα αυτά, τα οποία προκύπτουν σχετικά εύκολα και ενώ ο ερευνητής βρίσκεται ακόμα στο ύπαιθρο, χρησιμοποιούνται ως αρχικά στοιχεία για την εφαρμογή περισσότερο προχωρημένων μεθόδων διαδοχικών προσεγγίσεων με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών.

5.2. Η εφαρμογή της μεθόδου

Στην παρούσα εργασία, εφαρμόστηκε η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, με τη διάταξη «Διπόλου-Διπόλου» στις 04/06/2019. Τα σημεία των μετρήσεων ήταν τα ίδια με τις μετρήσεις της σεισμικής διάθλασης, στην τομή **L3** και **L1** της Θέσης 3 και Θέσης 1, αντίστοιχα (κατά Χατζηπέτρο, 2006), με διεύθυνση BBA-NNΔ. Σε αυτήν την εργασία θα ασχοληθούμε με την τομή L3, καθώς η L1 αναλύθηκε από άλλον προπτυχιακό φοιτητή.



Εικόνα 25: Η διεύθυνση της τομής L3, όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης, για την έρευνα που αναλύει η συγκεκριμένη εργασία.

Χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια, που ανάλογα με την διάταξη και τον προγραμματισμό και το όργανο μέτρησης και διακοπών, εναλλάσσονται από ηλεκτρόδια δυναμικού σε ρεύματος, και το αντίθετο. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε μονωμένο πολυπύρηνιο καλώδιο, με διαδοχικές εξόδους, βραχυκυκλωμένες με τα ηλεκτρόδια στην τομή, το οποίο συνδέθηκε στο πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης «SYSCAL Pro» της εταιρείας «IRIS INSTRUMENTS». Το όργανο μέτρησης αυτό, αποτελεί ένα πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε βυθοσκοπήση, αλλά και σε χαρτογράφηση, φέρει τη δυνατότητα καταγραφής 10 δια-

φορών δυναμικού, καθιστώντας ταχύτατη τη διαδικασία μέτρησης, ενώ εμπεριέχει πηγή συνεχούς ρεύματος 250Watt, με αυτοματοποιημένη αλλαγή πολικότητας, που του προσδίδει μεγάλη ισχύ κατά τη διάρκεια μίας μέτρησης με τη χρήση οποιασδήποτε διάταξης. Επίσης, εξασφαλίζει μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις, αφού προσφέρει αυτοματοποιημένο έλεγχο αντιστάθμισης του φυσικού δυναμικού, ενίσχυση σήματος και προβολή σφάλματος κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Μπορεί να πετύχει τη δημιουργία ρεύματος, με ένταση που μπορεί να ξεπεράσει τα 1000mA και μπορεί να φθάσει (τυπικά) τα 2500mA και παρουσιάζει μέγιστη τάση εξόδου 800V. Έχει αποτελεσματική χρήση στις μετρήσεις επαγόμενης πολικότητας και σε πληθώρα προβλημάτων σε περιβαλλοντικές, τεκτονικές, γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές έρευνες.

Η χρήση της διάταξης «Διπόλου-Διπόλου», έγινε για να εξασφαλισθεί η καλή ποιότητα των μετρήσεων, καθώς η συγκεκριμένη διάταξη χαρακτηρίζεται από καλή σχέση σήματος προς θόρυβο, με επαρκή διακριτική ικανότητα σε πλευρικές και σε κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής αντίστασης (χαρτογράφηση και βυθοσκόπηση). Παρόλα αυτά, απαιτείται μεγάλης έντασης ρεύμα και ευαίσθητα όργανα, για αυτό χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο όργανο μετρήσεων «SYSCAL Pro», που αναφέρθηκε παραπάνω.



Εικόνα 26: Το όργανο SYSCAL Pro, που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις.

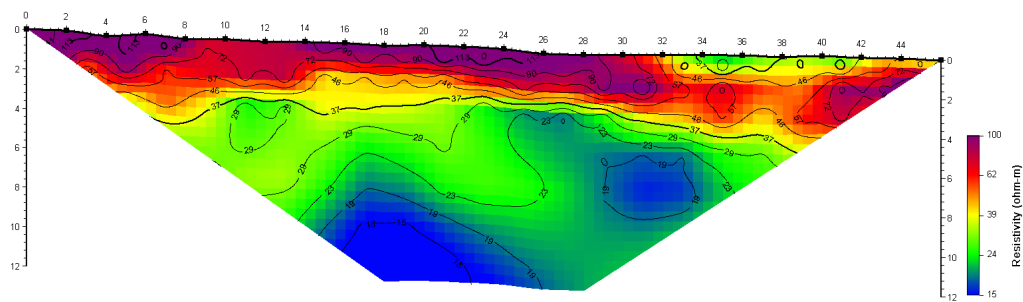
Όπως αποφασίστηκε από τον αρχικό σχεδιασμό, τα ηλεκτρόδια στήθηκαν με διαδοχικές αποστάσεις 2m, ώστε δημιουργήθηκε μία γραμμή διάταξης συνολικού μήκους 46m. Το ανάγλυφο, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο που αναλύθηκε η σεισμική διάθλαση, ήταν ομαλό στα σημεία των μετρήσεων, ενώ η παράταξη της τομής αποφασίστηκε με βάση την χαρτογράφηση του ρήγματος των Λαγυνών, όπως πραγματοποιήθηκε από τον Χατζηπέτρο το 2006 και αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Αρχικά, τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια, μετρώντας τις αποστάσεις τους με μετροταινία και πακτώνοντάς τα, έπειτα, στο έδαφος στις αποστάσεις που μετρήθηκαν. Έπειτα, τα ηλεκ-

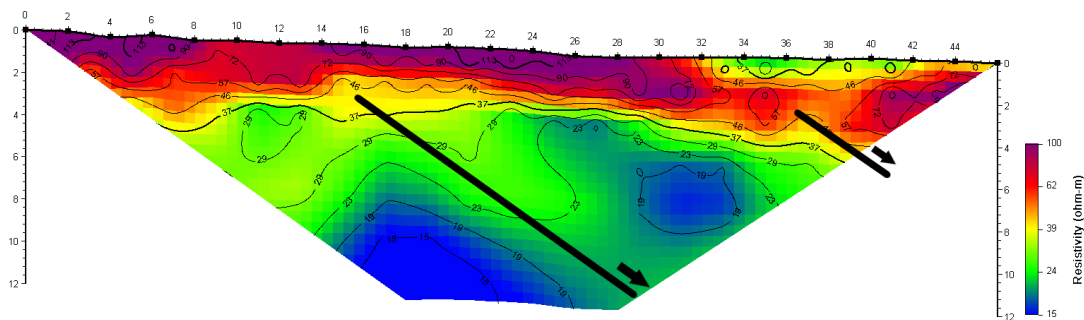
τρόδια συνδέθηκαν με το πολυπύρρηνο καλώδιο, με τη βοήθεια μονωτικής ταινίας, το οποίο καλώδιο συνδέθηκε με το όργανο μέτρησης και διακοπών SYSCAL Pro, για να επιτευχθεί η διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος. Προτού αρχίσουν οι μετρήσεις πραγματοποιείται ο προγραμματισμός του οργάνου, για να χρησιμοποιήσει τη διάταξη Διπόλου-Διπόλου και να ελέγχει αυτόματα ποια ηλεκτρόδια θα είναι δυναμικού, ποια ρεύματος και ποια θα αποσυνδέονται σε κάθε μέτρηση. Όπως αναφέρθηκε, η απόσταση ανάμεσα σε ηλεκτρόδια δυναμικού και ανάμεσα σε ηλεκτρόδια ρεύματος ήταν $a = 2\text{m}$, ενώ η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίου ρεύματος – δίπολου, όπως προγραμματίστηκε, ξεκίνησε από 2m και αυξήθηκε σταδιακά μέχρι και 5 φορές, δηλαδή έφτασε μέχρι $n = 10\text{m}$, έχοντας ως αποτέλεσμα το μέγιστο βάθος έρευνας να ήταν περίπου 10m .

5.3. Ανάλυση, επεξεργασία δεδομένων και αποτελέσματα των μετρήσεων

Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, μεταφέρθηκαν τα δεδομένα από το όργανο μετρήσεων SYSCAL-Pro σε υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Αφού ολοκληρωθεί η μεταφορά και η αποθήκευση στον υπολογιστή αρχείου της μορφής π.χ.: 3dd.dat, ξεκινά η επεξεργασία του μέσω του λογισμικού DC_2DPro V. 0.99. Οι μετρήσεις υπαίθρου εμφανίζονται στο πρόγραμμα με τη μορφή ψευδοτομής, στην οποία προστέθηκε και το αρχείο του ομαλού τοπογραφικού ανάγλυφου όπου αναπτύχθηκε η τομή, και ελέγχθηκε η ποιότητα των μετρήσεων, ενώ απορρίφθηκαν ακραίες τιμές στις μετρήσεις για μείωση του σφάλματος. Τα δεδομένα, στη συνέχεια, υποβλήθηκαν σε δισδιάστατη αντιστροφή, με έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, καθώς σκοπός είναι τα θεωρητικά δεδομένα που προκύπτουν από την ψευδοτομή να έρθουν πιο κοντά στο πραγματικό μοντέλο του εδάφους. Η αντιστροφή για τη τομή επαναλήφθηκε έξι φορές με παραμέτρους βάθους των 10m . Τα αποτελέσματα της αντιστροφής χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα αξιόπιστα καθώς η τιμή του RMS για κάθε αντιστροφή κυμάνθηκε στο 0.06, αρκετά μικρή όπως είναι και το επιθυμητό. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής, που απεικονίζουν την πραγματική ειδική αντίσταση του υπεδάφους με χρωματική διαφοροποίηση και μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τα πάχη και τα είδη των γεωλογικών σχηματισμών, την δομή των στρωμάτων αλλά και την τεκτονική, άρα και πιθανώς για το αίτιο των ρωγμών που εμφανίζονται στη περιοχή μελέτης.



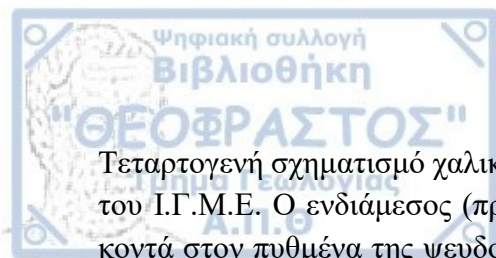
Εικόνα 27: ψευδοτομή 3ddmg. Με κόκκινο χρώμα οι υψηλές αντιστάσεις (έως 100 Ohm-m) και με μπλε οι χαμηλές αντιστάσεις (έως 15 Ohm-m).



Εικόνα 28. Η ψευδοτομή 3ddmg, με πιθανές θέσεις ρηγμάτων, όπως φαίνεται από την κατανομή των αντιστάσεων.

Στην παραπάνω ψευδοτομή, η οποία προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής αντίστασης σε διάταξη «διπόλου-διπόλου», πραγματοποιήθηκε αντιστροφή δεδομένων για καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Παρατηρούνται τρεις αποχρώσεις κυρίως στα επιφανειακά στρώματα, κόκκινο (50-90 Ohm-m), κίτρινο-πορτοκαλί (30-50 Ohm-m) και ιώδες (>95 Ohm-m). Βαθύτερα παρατηρείται να επικρατεί το πράσινο χρώμα (20-30 Ohm-m) και υπάρχουν εμφανίσεις μπλε χρώματος (<20 Ohm-m) πιθανώς εκεί συναντάται υπόγειος υδροφόρος σε αργιλικά υλικά.

Μέχρι περίπου το 1/3 του βάθους της τομής (~4m), τα υλικά έχουν από πολύ ψηλές έως μεσαίες αντιστάσεις, υποδηλώνοντας μη συνεκτικά υλικά, αδρομερή, όπως επιφανειακά κορήματα, κροκάλες, αμμοχάλικο. Αυτό το στρώμα αντιστοιχεί, πιθανώς, στον



Τεταρτογενή σχηματισμό χαλικιών και άμμου (Pt.t3.1), σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. Ο ενδιάμεσος (πράσινος) ορίζοντας που συναντάται σε βάθη ~2m έως και κοντά στον πυθμένα της ψευδοτομής σε κάποια σημεία (~10m), με κύρια εξάπλωση στα 3-7m βάθος, και χαμηλές έως μεσαίες αντιστάσεις (18-30 Ohm-m), που υποδηλώνουν κυριάρχηση της αργίλου, ίσως και την ύπαρξη υπόγειου νερού. Περίπου στα 24m της τομής φαίνεται να υπάρχει πλευρική γεωηλεκτρική ασυνέχεια, που ερμηνεύεται ως πιθανό ρήγμα (εικόνα 30). Επίσης στα περίπου 38m της τομής (εικόνα 30), φαίνεται να υπάρχει και άλλη πλευρική μετακίνηση του ανώτερου ορίζοντα με τα αμμοχάλικα, πιθανώς ακόμα ένα ρήγμα, που φτάνει μέχρι την επιφάνεια. Βαθύτερα, περί τα 7-12m, εμφανίζεται ένα εξαιρετικά αγωγίμο στρώμα (μπλε χρώμα, αντιστάσεις <20 Ohm-m), που φαίνεται να σιγουρεύει το σενάριο ύπαρξης υδροφόρου ορίζοντα. Σε άλλες θέσεις στην περιοχή, το πάχος αυτού του στρώματος είναι μικρότερο, εδώ όμως φτάνει στον πυθμένα της τομής.

6. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.

Η Γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή των Λαγυνών, στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, είχε ως στόχο την μελέτη των πιθανών γεωλογικών που δημιουργούν τις επιφανειακές ρωγμώσεις και καταστροφές στα κτίρια του οικισμού. Εφαρμόστηκαν η μέθοδος της *Σεισμικής Διάθλασης* και η μέθοδος της *Ειδικής Αντίστασης* και παρακάτω αναλύονται τα συνδυαστικά αποτελέσματα μετά από την ερμηνεία των δεδομένων.

Η στρωματογραφία που επικρατεί στην θέση μέτρησης είναι, από τα υπερκείμενα προς τα υποκείμενα:

- i. Στρώμα με εδαφικά υλικά, χαλαρής συνεκτικότητας, αδρόκοκκα (άμμοι, χαλίκια, κροκάλες), χωρίς ύπαρξη νερού. Αυτό το στρώμα φαίνεται να έχει πάχος 2-4m. Πιθανώς υπάρχει σύνδεση του στρώματος αυτού με τον Τεταρτογενή σχηματισμό χαλικιών και άμμου (Pt.t3.1), που φαίνεται στον χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε., στο κεφάλαιο 3.1. του παρόντος. Ακολουθεί στρώμα αργίλου, που φαίνεται να περιέχει υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, σε βάθη από 2m έως 10-12m. Αυτό το στρώμα παραπέμπει στις αμμούχες αργίλους του Ολοκαίνου (H.1), σύμφωνα πάλι με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. Ακολουθεί σε βάθη $> 8-10m$, το υπόβαθρο, αποτελούμενο από συμπαγή υλικά (υψηλές ταχύτητες σεισμικών), πιθανώς κάποια συμπαγής άργιλος/ιλύς ή ακόμα και εναλλαγές χαλαζιτών και χαλαζιτικών ψαμμιτών, με φυλλιτικές ενστρώσεις, ηλικίας Τριαδικού-Μέσου Ιουρασικού (T-Jm.st), από την Περιοδοτική ζώνη, σύμφωνα με τον χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (κεφ. 3.1.). Αυτό το στρώμα εμφανίζεται μόνο στην τομή της σεισμικής διάθλασης, ενδεχομένως, γιατί έχει καλύτερο βάθος διασκόπησης από την μέθοδο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- ii. Παρατηρήθηκε μία ασυνέχεια, στην θέση $\sim 40m$ και των δύο τομών των δύο μεθόδων, η οποία μαρτυράται από την κατακόρυφη μετακίνηση των στρωμάτων που διαπερνάει. Στην ηλεκτρική τομογραφία, είναι ευκρινής και μία δεύτερη ζώνη με αυτά τα χαρακτηριστικά, στην θέση $\sim 20-24m$. Εκεί φαίνεται να επηρεάζεται κυρίως το μεσαίο αργιλικό στρώμα, που περιέχει τον υδροφόρο. Αυτές οι δύο ζώνες πλευρικής ασυνέχειας, είναι πιθανές ζώνες ρήγματος, που φυσικά πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω. Επίσης φαίνεται ότι χαρτογραφικά συμπίπτουν με το ήδη χαρτογραφημένο ρήγμα των Λαγυνών, όπως αυτό χαρτογραφήθηκε από τον Χατζηπέτρο το 2006.

Οι επιφανειακές διαρρήξεις και ρωγμώσεις, οι οποίες προκάλεσαν τις ζημιές στον οικισμό των Λαγυνών, έχουν κύρια διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, κάτι που τα συνδέει με τις ζώνες που προαναφέρθηκαν και προέκυψαν από την γεωφυσική μελέτη. Όμως, αυτές οι ζώνες «κόβουν» τους επιφανειακούς ορίζοντες των αμμούχων αργίλων του Ολοκαίνου (H.1) και τις άμμους και χαλίκια του Τεταρτογενούς (Pt.t3.1) (χάρτης Ι.Γ.Μ.Ε.), οπότε

και φαίνεται να είναι κάποιο ρήγμα νεότερο των υπόλοιπων χαρτογραφημένων της περιοχής. Από τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από την περιοχή μελέτης, το συγκεκριμένο ρήγμα, δε φαίνεται να αποτελείσει σεισμική εστία έως τώρα. Οι ρωγμές πρωτοεμφανίζονται στην περιοχή περί το 2004, ενώ δε φαίνεται υπάρχει σεισμική δραστηριότητα, που να συνδέεται με το γεγονός των επιφανειακών ρωγμών. Άρα, φαίνεται πως υπάρχει σεισμική δραστηριότητα του ρήγματος, με συνεχή μετατόπιση υλικών (υποχώρηση), οφειλόμενη στην λιθολογική διαφοροποίηση ως προς τις πλευρικές ασυνέχειες. Οι ζώνες αυτές σεισμικής κίνησης, έχουν λογικά κάποιο βαθύτερο αίτιο, δηλαδή πιθανώς συνδέονται με κάποια βαθύτερη ζώνη ρήγματος, η οποία απλά επηρέασε τους επιφανειακούς ορίζοντες καθιστώντας τους ευάλωτους σε αυτές τις ζώνες (ζώνες αδυναμίας).

Ως αποτέλεσμα της παραπάνω σεισμικής, αλλά συνεχούς κίνησης πάνω σε αυτές τις επιφάνειες, είναι οι επιφανειακές ρωγμές και διαρρήξεις, που οδηγούν σε ζημιές σε κτίρια στην οικιστική περιοχή Λαγυνών. Το γεγονός ενισχύεται σε ένταση, λόγω της ανεξέλεγκτης υπεράντλησης στην περιοχή, κάτι που είναι πολύ συχνό σε ολόκληρη της περιοχή της Μυγδονίας λεκάνης και επηρεάζει σημαντικά την αντοχή των υλικών και τις μηχανικές τους ιδιότητες. Έτσι, ο υδροφόρος οδηγείται σε πτώση και προκαλούνται τοπικές καθιζήσεις.

Τα προαναφερόμενα ρήγμα φαίνεται να συνδέονται με τα ενεργά ρήγματα της περιοχής του νοτιοδυτικού τμήματος της λεκάνης της Μυγδονίας. Η διεύθυνσή του, φαίνεται να συμφωνεί με την διεύθυνση του ρήγματος του Αγίου Βασιλείου, το οποίο αποτελεί προέκταση προς τα δυτικά του ενεργού ρήγματος Γερακαρούς- Νικομιδηνού- Στίβου- Περιστερώνα, με το τελευταίο να σχετίζεται με σεισμική ακολουθία του 1978, που έπληξε την περιοχή της Θεσσαλονίκης και προκάλεσε μεγάλες ζημιές. Οπότε πιθανώς η δράση του ρήγματος του Αγίου Βασιλείου, που εντοπίζεται ως το όριο μεταξύ υποβάθρου (T-Jm.st) και Τεταρτογενών αποθέσεων (Pt.t3.1), επηρεάζει με συνθετικά ρήγματα Ολοκαινικές αποθέσεις, τα οποία ως αποτύπωμα αφήνουν τις επιφανειακές ρωγμές, που προκαλούν τις ζημιές στα κτίρια της περιοχής των Λαγυνών.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Α. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΦΡΑΦΙΑ

- «Εισαγωγή στη Σεισμολογία», Παρουσιάσεις μαθήματος, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.
- Ζερβοπούλου Α., 2010. Νεοτεκτονικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης σε σχέση με τα εδάφη θεμελίωσης. (Διδακτορική Διατριβή).
- «Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης», Παρουσιάσεις μαθήματος, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.
- Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος 1:50.000, Φύλλο Θερμόν.
- Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε): Τοπογραφικός χάρτης της Ελλάδος 1:50.000, Φύλλο Θερμόν.
- Μανάκου Μ., 2007. Συμβολή στον προσδιορισμό τρισδιάστατου εδαφικού προσομοιώματος για τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης: Εφαρμογή στην ιζηματογενή Μυγδονία λεκάνη. (Διδακτορική Διατριβή).
- Μουντράκης, Δ., 2010. Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Παπαζάχος Β. & Παπαζάχου Κ. 1989. Οι σεισμοί της Ελλάδας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παπαζάχος Β., 1996. Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παπαζάχος Β. & Παπαζάχου Κ. 2003. Οι σεισμοί της Ελλάδας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παπαζάχος Β. Κ., Καρακαϊσής Γ. Φ., Χατζηδημητρίου Π. Μ., 2005. Εισαγωγή στη σεισμολογία. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παυλίδης Σ. Β. 2016. Γεωλογία των Σεισμών: Εισαγωγή στη Νεοτεκτονική, Μορφοτεκτονική, Παλαιοσεισμολογία και Αρχαιοσεισμολογία. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- «Σεισμικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης», Παρουσιάσεις μαθήματος, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής.
- Τσάπανος Θ., Παυλίδης Σ., Χατζηπέτρος Α., 2006. Γεωλογική – Σεισμολογική έρευνα του ρήγματος στο Δ.Δ. Λαγυνών του Δήμου Λαγκαδά. Έκθεση Δήμου Λαγκαδά.
- Τσελέντης Ά. & Παρασκευόπουλος Π., 2013. Εφαρμοσμένη γεωφυσική. Εκδόσεις Liberal Books, Αθήνα.
- Χατζηπέτρος Α., 1998. Παλαιοσεισμολογική- Μορφοτεκτονική μελέτη και μηχανική συμπεριφορά των συστημάτων ενεργών διαρρήξεων, Μυγδονίας,

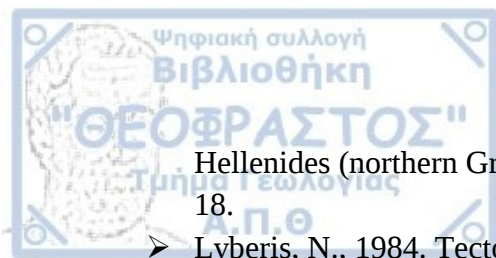


Ανατολικής Χαλκιδικής, Κοζάνης- Γρεβενών. Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη.

- Ψιλοβίκος Α., 1977. Παλαιογεωγραφική εξέλιξη της λεκάνης και της λίμνης της Μυγδονίας (Λαγκαδά-Βόλβης). Σελίδες 1-256. (Διδακτορική Διατριβή).

B. ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alexandridis Th., Takavakoglou V., Crisman Th., Zalidis G., 2006. Remote Sensing & GIS Techniques for Selecting a Sustainable Scenario for Lake Koronia, Greece. Environ Manage, No 39, 9 June 2006.
- Barka, A. A., 1992. The North Anatolian Fault Zone. Annales Tectonicae, Vol. 6.
- Chatzipetros A.A. and Pavlides S.B., 1998. A quantitative morphotectonic approach to the study of active faults; Mygdonia basin, northern Greece. Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. 32, No 1.
- • Chatzipetros, A., Mourouzidou, O., and Pavlides, S., 2003. Recent earthquake activity in a multifracted area as derived by trenching – Mygdonia basin, northern Greece. International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault Systems: Recent Progress in Tectonics and Paleoseismology, and Field Training Course in Paleoseismology, Ankara, Turkey, 31 August-12 September 2003, Abstract volume.
- Chatzipetros A., Kokkalas S., Pavlides S. and Koukouvelas I., 2005. Palaeoseismic data and their implication for active deformation in Greece. Journal of Geodynamics, Vol. 40, No 2-3.
- Chatzipetros, A., Papadopoulou, E., 2009. A case of active fault migration in Mygdonia basin, northern Greece. IESCA – International Earth Science Colloquium on the Aegean Region, Izmir, Turkey, 7-11 October 2019.
- DC_2DPro Version 0.99, User's Guide, Jung- Ho Kim.
- Doveton, S. H., 1986. Log Analysis of subsurface Geology: Concepts and Computer Models. John Wiley & Sons, New York.
- Galanis, O. C., Papazachos, C. B., Hatzidimitriou P. M., Scordilis E. M., 2004. Application of 3-D velocity models and ray tracing in double difference earthquake location algorithms: application to the Mygdonia basin (Northern Greece). Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. XXXVI, Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki, April 2004.
- Kaufmann G., Kockel F., Mollat H., 1976. Notes on the stratigraphic and paleogeographic position of the Svoula Formation in the Innermost Zone of the



- Hellenides (northern Greece). Bulletin de la Societe Geologique de France, No 18.
- Lyberis, N., 1984. Tectonic evolution of the Aegean trough in the geological evolution of the Eastern Mediterranean. London, Geological Society, Special Publ. No 17.
 - Manakou, M., Raptakis, D., Apostolidis P., Chavez-Garcia F., Pitilakis K. (2007). The 3D geological structure of the Mygdonia basin (Greece) in terms of site response evaluation. 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (4ICEGE). Thessaloniki, Greece.
 - Mercier, J. L., Carey-Gailhardis, E., Mouyaris, N. Simeakis, K., Roundouyannis, Th., Anghelidhis, Ch., 1983. Structural analysis of recent and active fault and regional state of stress in the epicentral area of the 1978 Thessaloniki earthquakes (Northern Greece). Tectonics, Vol. 2, No 6, December 1983.
 - Mountrakis, D., Psilovikos, A., Papazachos, C. B, 1983. The geotectonic regime of the Thessaloniki earthquakes, in the Thessaloniki, Northern Greece, Earthquake of June 20, 1978 and Its Seismic Sequence. Edited by Papazachos, C. B and Carydis, P.G., Technical Chamber of Greece.
 - Papazachos, B., Mountrakis, D., Psilovikos, A., Leventakis, G., 1979. Surface fault traces and fault plane solution of May- June 1978 major shocks in the Thessaloniki area. Tectonophysics, Vol. 53.
 - Papazachos, B. C., Mountrakis, D., Psilovikos, A., Leventakis, G., 1980. Focal properties of the 1978 earthquakes in the Thessaloniki area. Bulgarian Geophysical J., Vol. 6.
 - Papazachos, B., Tsapanos, T., Panagiotopoulos, D., 1982. A premonitory pattern of earthquakes in Northern Greece. Nature, Vol. 296.
 - Pavlides, S., Kiliass, A., (1987). Neotectonic and active faults along the Servomacedonian zone (Chalkidiki, N. Greece). Annales Tectonicae, Vol. 1.
 - Pavlides, S., Caputo, R., Koukouvelas, I., Kokkalas S., Chatzipetros, A., 2006. Paleioseismological investigations of Aegean- type active faults in mainland Greece and their implications. Geological Society of America, Special Paper 409.
 - SeisImager/ 2DTM Manual Version 3.2, Pickwin v. 3.2, Plotrefa v. 2.8, December 2006.
 - Sotiriadis, L., Psilovikos, A., Vavliakis, E., Syrides G., 1983. Some Tertiary and Quaternary Basins of Macedonia/Greece. Formation and Evolution. Clausthaler Geologische Abhandlungen, No 44.
 - Tranos, M., Papadimitriou, E. Kiliass, A., (2003). Thessaloniki – Gerakarou Fault zone (TGFZ): the western extension of the 1978 Thessaloniki earthquake fault (Northern Greece) and seismic hazard assessment. Journal of Structural Geology, Vol. 25.



Γ. ΔΙΑΔΥΚΤΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- www.geometrics.com/seismographs/ Geometrics StrataView.
- www.geophysics.geo.auth.gr/ss/ Σεισμολογικός Σταθμός Α.Π.Θ.
- www.eqgeogr.weebly.com Greek Database of Seismogenic Sources.
- www.iris-instruments.com/syscal-pro IRIS Instruments.
- www.itsak.gr Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών.
- www.statistics.gr/2011 Ελληνική Στατιστική Αρχή