



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΚΑΙ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΜΑΡΘΑ ΚΟΚΚΑΛΙΔΟΥ

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020



Διερεύνηση ρωγμών στην περιοχή των Λαγυνών Θεσσαλονίκης με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων

ΜΑΡΘΑ ΚΟΚΚΑΛΙΔΟΥ

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέποντες Καθηγητές:

ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής
ΤΣΟΥΡΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, Καθηγητής
ΧΑΤΖΗΠΕΤΡΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1. Εργασίες που υλοποιήθηκαν.....	11
2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	15
2.1. Γεωγραφικά στοιχεία	15
2.2. Πληθυσμιακά στοιχεία και χρήσεις γης	15
2.3. Κλιματικά στοιχεία	17
2.4. Μορφολογικά στοιχεία.....	18
2.5. Γεωλογία της περιοχής.....	19
2.5.1. Σερβομακεδονική μάζα	19
2.5.2. Περιοδοπική ζώνη	20
2.5.3. Μεταλπικά ιζήματα	23
2.6. Τεκτονική της περιοχής	27
2.7. Σεισμικότητα της περιοχής.....	35
2.7.1. Καταγραφικά δίκτυα	36
2.8. Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής	39
3. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ	
ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ	42
3.1. Η τεχνική της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης	42
3.2. Εξοπλισμός, σχεδιασμός και λήψη μετρήσεων σεισμικής διάθλασης	46
3.3. Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σεισμικής διάθλασης	51
3.4. Αποτελέσματα και ερμηνεία τομής σεισμικής διάθλασης	57

4. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	61
4.1. Η τεχνική της γεωηλεκτρικής διασκόπησης.....	61
4.2. Εξοπλισμός, σχεδιασμός και λήψη μετρήσεων γεωηλεκτρικής διασκόπησης.....	67
4.3. Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων γεωηλεκτρικής διασκόπησης	71
4.4. Αποτελέσματα και ερμηνεία τομής γεωηλεκτρικής διασκόπησης.....	71
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	74
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77



Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθιά τον Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. και Διευθυντή του Τομέα Γεωφυσικής, κύριο Γεώργιο Βαργεμέζη, για την εξαιρετική συνεργασία και άμεση επικοινωνία σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας, αλλά και για όλες τις γνώσεις που μου πρόσφερε σε επίπεδο σπουδών, καθώς και κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Ο ζήλος που μου μετέδιδε για το αντικείμενο της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, σε συνδυασμό με την πολύχρονη εμπειρία του ως ελεύθερος επαγγελματίας και στο διδακτικό τομέα, όπως και η συμμετοχή του σε μια πληθώρα ερευνητικών έργων, με οδήγησαν στο να θέλω να συνεργαστώ μαζί του. Επιπλέον, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Αναπληρωτή Καθηγητή, κύριο Αλέξανδρο Χατζηπέτρο, για την παραχώρηση στοιχείων της περιοχής έρευνας, καθώς και για την προθυμία του να μου δείξει όλα όσα είχε παρατηρήσει και ο ίδιος κατά την μελέτη που διεξήγαγε στην περιοχή με ερευνητική ομάδα του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., αποτελούμενη από τον Καθηγητή κ. Θεόδωρο Τσάπανο και τον Ομότιμο Καθηγητή κ. Σπυρίδωνα Παυλίδη. Επίσης, ευχαριστώ πολύ τον Καθηγητή, κύριο Παναγιώτη Τσούρλο και το μέλος Ε.Δ.Ι.Π. του τμήματος Γεωφυσικής, κύριο Ηλία Φίκο, για τη βοήθεια τους στην διεκπεραίωση των εργασιών υπαίθρου, αλλά και για τις γνώσεις που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους προπτυχιακούς φοιτητές, Δημοσθένη Κούφα και Γεώργιο Φωτιάδη, για την ευχάριστη συνεργασία μας και την βοήθεια τους στις μετρήσεις υπαίθρου που πραγματοποιήθηκαν. Τέλος, αισθάνομαι έντονη την ανάγκη να ευχαριστήσω τους γονείς μου, την θεία μου και τους πολύ κοντινούς μου φίλους, που με στήριξαν σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου με κάθε τρόπο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την συνδυασμένη εφαρμογή σεισμικών και ηλεκτρικών γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης, στη περιοχή των Λαγυνών, με απώτερο σκοπό την ερμηνεία της γεωλογικής δομής του υπεδάφους και κατά κύριο λόγο τον προσδιορισμό του αιτίου πρόκλησης των ρωγμών σε κτίρια και κατασκευές του οικισμού. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη Βόρεια Ελλάδα, στα ΒΑ της πόλης της Θεσσαλονίκης και ανήκει στο ΝΔ τμήμα του τεκτονικού βυθίσματος της Μυγδονίας λεκάνης. Στην ευρύτερη περιοχή έντονη είναι η γεωργική και βιομηχανική δραστηριότητα με αρνητικό αντίκτυπο την ανεξέλεγκτη υπεράντληση. Το κλίμα χαρακτηρίζεται ως εύκρατο Μεσογειακό και το υψόμετρο είναι ομαλό, με εξαίρεση το νότιο τμήμα του οικισμού που το ανάγλυφο είναι απότομο λόγω παρουσίας ενεργών ρηγμάτων που οριοθετούν το νότιο περιθώριο της Μυγδονίας λεκάνης. Η λεκάνη βρίσκεται στο όριο της Σερβομακεδονικής μάζας με τη Περιοδοπική ζώνη και στο δυτικό τμήμα της, που ανήκει η περιοχή έρευνας, το υπόβαθρο συνίσταται από μετακροκαλοπαγή, μεταψαμμίτες, χαλαζίτες και χαλαζιτικούς ψαμμίτες με φυλλιτικές ενστρώσεις, σχιστόλιθους, μάρμαρα και ανθρακικούς σχηματισμούς νηριτικής ιζηματογένεσης. Από το Άνω Μειόκαινο και μετά, το τεκτονικό βύθισμα της Μυγδονίας πληρώθηκε σε δυο φάσεις με νεότερα, Νεογενή και Τεταρτογενή, ποταμοχειμάρια και λιμναία ιζήματα και γι' αυτό οι επιφανειακές διαρρήξεις στα Λαγυνά εμφανίζονται πάνω σε Τεταρτογενή σχηματισμό χαλικιών και άμμου και αμμούχες αργίλους.

Για την έρευνα των ρωγμών στην περιοχή των Λαγυνών, εφαρμόστηκαν οι γεωφυσικοί μέθοδοι της σεισμικής διάθλασης και ηλεκτρικής αντίστασης. Τα δεδομένα των σεισμικών μετρήσεων επεξεργάστηκαν με το λογισμικό Seislmager/ 2D και η τομή ηλεκτρικής τομογραφίας με το αντίστοιχο DC_2DPRO. Με την ερμηνεία των δεδομένων επιβεβαιώθηκε η θέση των διαρρήξεων στο υπέδαφος, η οποία συνάδει με αυτή που προέκυψε από αποτελέσματα παλιότερης τεκτονικής έρευνας πάνω στην περιοχή. Η σεισμική ζώνη διαρρήξεων πιθανά οφείλει την ανάπτυξη της στη δράση των ενεργών ρηγμάτων της λεκάνης και το φαινόμενο ρωγμών ενισχύεται από την υπεράντληση, που προκαλεί καθίζηση του εδάφους.

Λέξεις- Κλειδιά: Επιφανειακές διαρρήξεις, Μυγδονία λεκάνη, σεισμική διάθλαση, ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην περιοχή του Δημοτικού Διαμερίσματος των Λαγυνών, που ανήκει στον Δήμο Λαγκαδά του Νομού Θεσσαλονίκης, παρατηρήθηκε από τα μέσα περίπου του 2004 η εμφάνιση μιας ζώνης επιφανειακών διαρρήξεων, που προκάλεσε ζημιές σε αρκετές κατασκευές στο βόρειο τμήμα του οικισμού. Σε πρώτη επαφή με το φαινόμενο της περιοχής ήρθε μια ερευνητική ομάδα του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., αποτελούμενη από τον Καθηγητή κ. Θεόδωρο Τσάπανο, τον Ομότιμο Καθηγητή κ. Σπυρίδωνα Παυλίδη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αλέξανδρο Χατζηπέτρο, οι οποίοι διεξήγαγαν λεπτομερή γεωλογική και σεισμολογική έρευνα ύστερα από σύναψη προγραμματικής σύμβασης μεταξύ του Δήμου Λαγκαδά, της Νομαρχιακής αυτοδιοίκησης Θεσσαλονίκης και του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Κατά την έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση των επιφανειακών διαρρήξεων και καταγραφή των ζημιών. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται χάρτης με τις επιφανειακές διαρρήξεις, αλλά και την πιθανή πορεία του ρήγματος, όπως χαρτογραφήθηκαν από τον Χατζηπέτρο (2006), ενώ στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται οι ακριβείς συντεταγμένες των θέσεων που παρατηρήθηκαν ζημιές στις κατασκευές.



Εικόνα 1: Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης. Με κόκκινο χρώμα και αρίθμηση απεικονίζονται οι θέσεις όπου παρατηρούνται ζημιές σε κατασκευές από τη δράση του ρήγματος, ενώ με μαύρη έντονη γραμμή απεικονίζεται η πιθανή θέση του ρήγματος στις ενδιάμεσες περιοχές. (Χατζηπέτρος, 2006)

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα η ζώνη επιφανειακών διαρρήξεων έχει διεύθυνση ΒΔ- ΝΑ, παράταξης 120° . Συγκεκριμένα και σύμφωνα με τις ζημιές που έχουν καταγραφεί σε καταστήματα, δρόμους και άλλα κτίσματα παλιά και νέα του οικισμού η ζώνη αυτή φαίνεται να εκτείνεται από το κατάστημα «Εγνατία» στα ΒΔ, που βρίσκεται κοντά στην εθνική οδό Θεσσαλονίκης- Καβάλας, μέχρι τα ΝΑ που συναντάει πάλι την εθνική οδό. Το συνολικό ορατό μήκος της εκτιμάται περίπου στα 2.2Km, ενώ διέρχεται από εδαφοποιημένα, ποταμοχειμάριας προέλευσης ιζήματα Τεταρτογενούς ηλικίας, που συμβολίζονται ως H.1 και Pt.t3.1. κατά τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (βλ. Εικόνα 18). Ωστόσο σύμφωνα με πιο πρόσφατη παρατήρηση της περιοχής, φαίνεται η επιφανειακή διάρρηξη να εκτείνεται περισσότερο προς τα ΒΔ καθώς εμφανής ήταν η προσπάθεια επιδιόρθωσης της ασφάλτου στην εθνική οδό. Σε γενικά πλαίσια η επιφανειακή διάρρηξη στο σύνολο της είναι αισθητή μόνο σε σημεία όπου διαπερνά κατασκευές, ενώ στο έδαφος δε διακρίνονται μετατοπίσεις που οφείλονται σε διάρρηξη, καθώς είναι αρκετά εδαφοποιημένα τα υλικά και άρα χαρακτηρίζονται από χαμηλή συνεκτικότητα, ενώ επίσης οι καλλιέργειες στην περιοχή αποτρέπουν την παρατήρηση τέτοιων φαινομένων.



Εικόνα 2: Δορυφορική εικόνα όπου φαίνονται οι συντεταγμένες των θέσεων στις οποίες παρατηρούνται ζημιές στις κατασκευές από τη δράση του ρήγματος.

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες με τις περιπτώσεις των ζημιών που καταγράφηκαν. Σε γενικές γραμμές, σύμφωνα με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε θέση διάρρηξης (Χατζηπέτρος, 2006) εκδηλώνεται μια μετάπτωση προς τα ΒΑ που συνδέεται με κατακόρυφη μετατόπιση από 5 έως 12cm, ενώ το οριζόντιο άνοιγμα των διαρρήξεων κυμαίνεται από 0.2 μέχρι 5cm. Όσο για την παράταξη, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως υπολογίζεται μεταξύ 110° με 130° .



Εικόνα 3: Άποψη κτιρίου όπου διακρίνονται μεγάλες παραμορφώσεις στη ΒΑ πλευρά του, ενώ εμφανής είναι και η οριζόντια αριστερόστροφη περιστροφή. (Χατζηπέτρος, 2006)



Εικόνα 4: Επιφανειακή διάρρηξη σε δρόμο του οικισμού όπου έγινε προσπάθεια επιδιόρθωσης της ασφάλτου, αλλά επηρεάστηκε από νεότερη διάρρηξη (δεξιά), γεγονός που δείχνει την συνεχή εξέλιξη του φαινομένου με τα χρόνια. Διακρίνεται επίσης και η παραμορφωμένη κολώνα. Και οι δυο ζημιές φαίνεται να έχουν την ίδια παράταξη. (Χατζηπέτρος, 2006)



Εικόνα 5: Εμφανής αποκόλληση δομικών υλικών σε αποθήκη η οποία σε πιο πρόσφατη έρευνα δεν συναντάται πια στη συγκεκριμένη θέση, ενώ στον δρόμο μπροστά από το κτίσμα διακρίνονται απόπειρες επιδιόρθωσης του οδοστρώματος. (Χατζηπέτρος, 2006)



Εικόνα 6: Αποκόλληση κολώνας περιφράξης με οριζόντιο άνοιγμα 5cm στην κορυφή και 3cm στη βάση της, ενώ φέρει και αριστερόστροφη κατακόρυφη μετατόπιση 12cm. Στα θεμέλια της κολώνας (δεξιά) παρατηρείται ρωγμή με παράταξη 130° και άνοιγμα 0.2cm. (Χατζηπέτρος, 2006)



Εικόνα 7: Παρατηρούνται δύο παράλληλες ζώνες διάρρηξης στην άσφαλτο στη ΝΔ πλευρά του καταστήματος «ΕΓΝΑΤΙΑ». Η μια ζώνη φέρει μετάπτωση προς τα ΒΑ, ενώ η άλλη προς τα ΝΔ. (Χατζηπέτρος, 2006)



Εικόνα 8: Διάρρηξη στο εσωτερικό του καταστήματος «ΕΓΝΑΤΙΑ» (αριστερά) Εμφανής αποκόλληση της ένωσης της ΒΔ τοιχοποιίας (δεξιά) του ίδιου καταστήματος με το σκελετό του κτιρίου. (Chatzipetros & Papadopoulou, 2019)



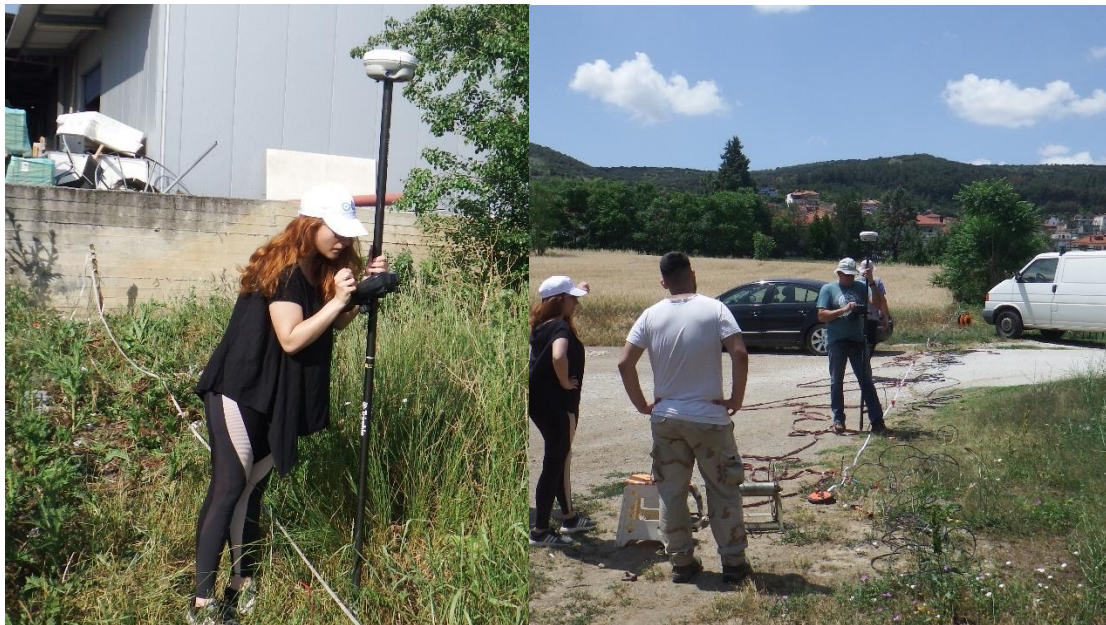
Εικόνα 9: Εμφανής κατακόρυφη και οριζόντια μετατόπιση της τσιμεντένιας περίφραξης στα ΒΔ του καταστήματος «ΕΓΝΑΤΙΑ». Παράλληλα σε αυτή τη περίφραξη εκτελέστηκαν οι μετρήσεις στη τομή L1. (Chatzipetros & Papadopoulou, 2019)

1.1. Εργασίες που υλοποιήθηκαν

Για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- Συλλογή και μελέτη ελληνικής, αλλά και διεθνούς βιβλιογραφίας- εργασιών, που είχαν ως κύριο αντικείμενο την παρουσία αντίστοιχων φαινομένων ρωγμών σε διάφορες περιοχές, αλλά και τις διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την οριστική επιβεβαίωση της προέλευσης αυτών των επιφανειακών διαρρήξεων.
- Συλλογή πληροφοριών μέσω βιβλιογραφίας για τις γεωλογικές, τεκτονικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, δεδομένα που επιβεβαιώθηκαν με προσωπική επίσκεψη στην περιοχή μελέτης, αλλά και με συνοδεία του ενός από τους επιβλέποντες μου στην διπλωματική, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αλέξανδρο Χατζηπέτρο.
- Υπολογισμός της ακριβούς θέσης των γεωφώνων και των ηλεκτροδίων, έτσι όπως τοποθετήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων γεωφυσικής διασκόπησης, με την χρήση ειδικού οργάνου Trimble R6 GNSS. (βλ. Εικόνα 10, Πίνακας 1)
- Εφαρμογή γεωφυσικών διασκοπήσεων με τις μεθόδους της σεισμικής διάθλασης και της ηλεκτρικής τομογραφίας σε δυο θέσεις στην περιοχή έρευνας. Οι πρώτες μετρήσεις έγιναν στη θέση 1 σύμφωνα με την Εικόνα 2 (με συντεταγμένες 415876, 4508676), ενώ οι δεύτερες μετρήσεις σε θέση ανάμεσα στα σημεία 3 και 4

σύμφωνα με Εικόνα 2 (με συντεταγμένες 416185, 4508425). Ωστόσο, στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται και αναλύονται τα δεδομένα από τη πρώτη θέση μέτρησης, αναφερόμενη εδώ ως L1 (βλ. Εικόνα 11), η οποία βρίσκεται στα δυτικά του καταστήματος «ΕΓΝΑΤΙΑ», καθώς η δεύτερη θέση, αναφερόμενη ως L2, αποτέλεσε αντικείμενο επεξεργασίας από άλλη ομάδα προπτυχιακών φοιτητών. Πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές διασκοπήσεις για να ολοκληρωθεί η εικόνα της γεωλογικής και σεισμολογικής έρευνας που προηγήθηκε από προηγούμενες ερευνητές και να επιβεβαιωθεί ή όχι η παρουσία του ρήγματος και γενικότερα η πρόελευση των επιφανειακών διαρρήξεων. Ενδεχομένως οι ρωγμές που παρατηρούνται στις κατασκευές να μην είναι αποτέλεσμα τεκτονικής δράσης, αλλά συνέπεια της υπεράντλησης στην ευρύτερη περιοχή η οποία εκδηλώνεται με καθίζηση του εδάφους, ακόμη βέβαια υπάρχει περίπτωση να είναι και συνδυασμός των δυο αυτών παραγόντων.



Εικόνα 10: Εντοπισμός των συντεταγμένων των θέσεων των γεωφώνων και των ηλεκτροδίων με τη χρήση ειδικού οργάνου Trimble.

- Σύνταξη χαρτών με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών/GIS που περιλαμβάνουν τις εμφανίσεις των γεωλογικών σχηματισμών και του υποβάθρου στην ευρύτερη περιοχή, την παρουσία τεκτονικών ασυνεχειών, καθώς και τις θέσεις των τομών που πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις, τις θέσεις των επιφανειακών διαρρήξεων στις κατασκευές και την πιθανή θέση του ρήγματος στις ενδιάμεσες περιοχές (βλ. Εικόνα 31).

Για την επεξεργασία και παρουσίαση των παραπάνω δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά QuantumGIS version 3.4 Madeira, Seislmager/ 2D της εταιρείας Geometrics για τα δεδομένα σεισμικής διάθλασης, DC_2DPRO για τα δεδομένα ηλεκτρικής τομογραφίας, Microsoft Office ver. 2010 για την συγγραφή.



Εικόνα 11: Οι τομές L1 και L3 στις οποίες λήφθηκαν οι μετρήσεις με τις μεθόδους της σεισμικής διάθλασης και της ειδικής αντίστασης. Τα αποτελέσματα μόνο της τομής L1 αναλύονται στη παρούσα εργασία.

Θέση γεωφώνων/ηλεκτροδίων	Γεωγραφικό μήκος (m)	Γεωγραφικό πλάτος (m)	Υψόμετρο (m)
L1-01	415847.074	4508667.161	100.211
L1-02	415848.354	4508668.703	100.157
L1-03	415849.391	4508670.385	100.086
L1-04	415850.601	4508671.947	100.049
L1-05	415851.867	4508673.462	99.968
L1-06	415853.093	4508675.094	99.914
L1-07	415854.331	4508676.597	99.872
L1-08	415855.573	4508678.101	99.821
L1-09	415856.859	4508679.741	99.745
L1-10	415858.093	4508681.211	99.661
L1-11	415859.346	4508682.830	99.698
L1-12	415860.480	4508684.469	99.646
L1-13	415861.688	4508686.038	99.620
L1-14	415862.794	4508687.578	99.630
L1-15	415863.926	4508689.204	99.570
L1-16	415865.097	4508690.755	99.572
L1-17	415866.273	4508692.359	99.580
L1-18	415867.457	4508693.859	99.615
L1-19	415868.543	4508695.429	99.602
L1-20	415869.883	4508697.004	99.492
L1-21	415871.183	4508698.728	99.378
L1-22	415872.344	4508700.381	99.327
L1-23	415873.532	4508702.027	99.201
L1-24	415874.765	4508703.648	99.126

Πίνακας 1: Συντεταγμένες και υψομετρική θέση των γεωφώνων/ ηλεκτροδίων που τοποθετήθηκαν στην τομή L1 και μετρήθηκαν σύμφωνα με το όργανο Trimble R6 GNSS.

2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1. Γεωγραφικά στοιχεία

Η περιοχή των Λαγυνών βρίσκεται στη Βόρεια Ελλάδα, στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, στο Νομό Θεσσαλονίκης και ειδικότερα ανήκει στο Δήμο Λαγκαδά. Απέχει 13 χιλιόμετρα από την πόλη της Θεσσαλονίκης με κατεύθυνση προς τα ΒΑ και καταλαμβάνει μια έκταση $5,12\text{km}^2$ σε υψόμετρο 130m έως 280m από το επίπεδο της θάλασσας. Από υδρογεωλογικής άποψης τα Λαγυνά εντοπίζονται στο ΝΔ τμήμα της λεκάνης απορροής του τεκτονικού βυθίσματος γνωστού ως Μυγδονία λεκάνη, που υπάγεται στο 10° υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας.



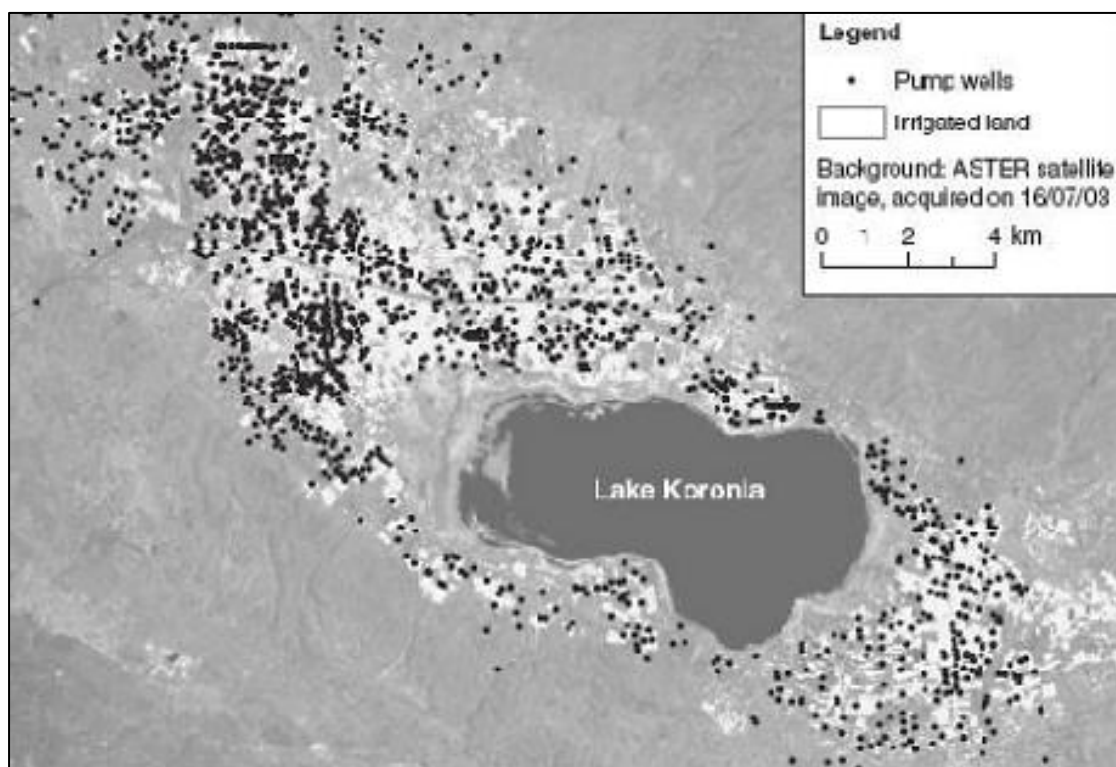
Εικόνα 12: Δορυφορική εικόνα γεωγραφικής θέσης της περιοχής μελέτης (Λαγυνά). (Google Earth)

2.2. Πληθυσμιακά στοιχεία και χρήσεις γης

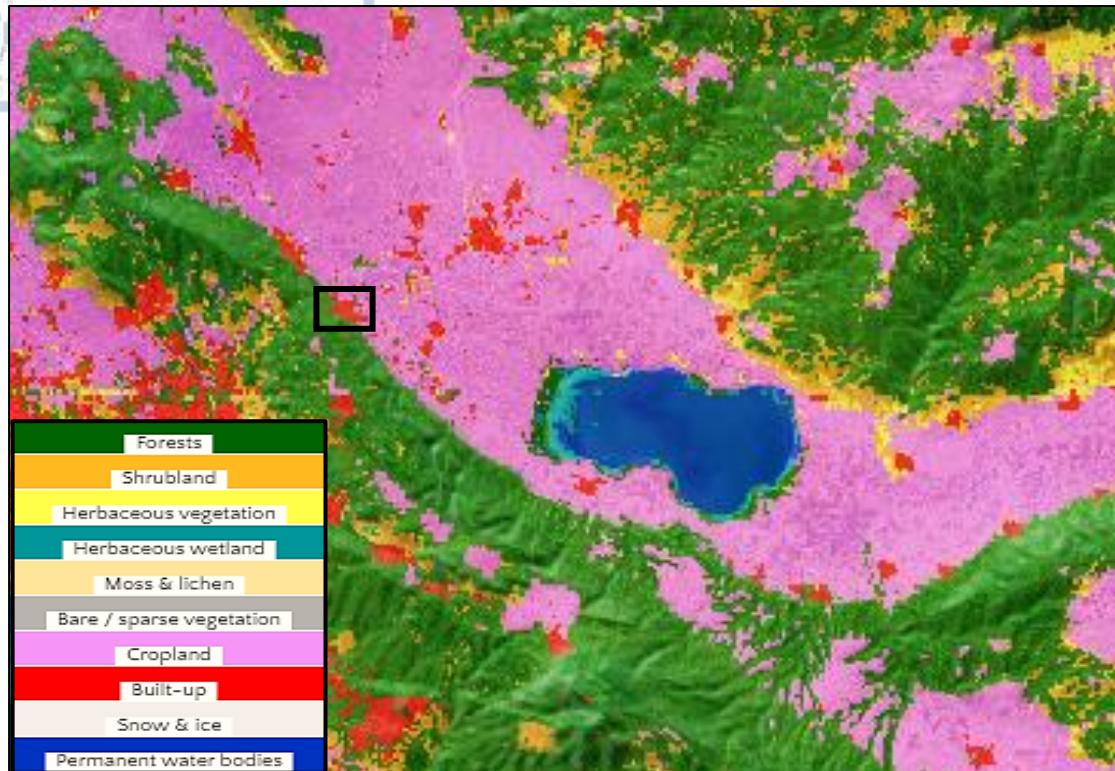
Σύμφωνα με την απογραφή πληθυσμών από την ΕΛ.ΣΤΑΤ. που έγινε το 2011 οι μόνιμοι κάτοικοι της περιοχής των Λαγυνών υπολογίζονται στα 3591 άτομα. Ο ρυθμός μεταβολής (%) του πληθυσμού του οικισμού των Λαγυνών μεταξύ των ετών 1981-2011 παρουσιάζει αύξηση 57.3% και αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η περιοχή δεν επηρεάστηκε από την γενικότερη τάση αστικοποίησης του αγροτικού πληθυσμού που επικρατούσε εκείνη τη περίοδο.

Αντιθέτως, παρατηρήθηκε έντονη οικοδομική δραστηριότητα, άνοδος του δευτερογενούς, αλλά και τριτογενούς τομέα παραγωγής, μεταβολές που συνδέονται σε ένα μεγάλο βαθμό με το ότι η περιοχή κατέχει κομβική θέση στο βασικό οδικό δίκτυο (Εγνατία οδός, Α/Δ Θεσσαλονίκης-Σερρών). Πριν το 2013 από τις σημαντικότερες δραστηριότητες της περιοχής συνιστούσε η λειτουργία της γαλακτοβιομηχανίας ΑΓΝΟ, καθώς τροφοδοτούνταν με γαλακτοκομικά προϊόντα από τις πολλές κτηνοτροφικές μονάδες που συναντώνται στην έκταση αυτή. Ακόμη στην ευρύτερη περιοχή εδράζουν εταιρείες παραγωγής, αλλά και εμπορίας δομικών υλικών, εταιρείες παραγωγής σκυροδέματος, μονάδες μεταλλικών κατασκευών, επιπλοποιεία, βιοτεχνίες βαφείων και αποξηραντήρια οπωρικών.

Όσο για τις καλλιέργειες στην έκταση αυτή, η παραγωγή είναι μεγάλη, καθώς τα εδάφη είναι εύφορα και η παρουσία του υγρού στοιχείου έντονη, στην λίμνη Κορώνεια, στους χειμάρρους που συναντώνται σε όλο το μήκος της Μυγδονίας λεκάνης και στους σημαντικούς πάχους υδροφόρους ορίζοντες στα τεταρτογενή ιζήματα της περιοχής. Αυτοί οι λόγοι είναι που καθιστούν και την επαρχία Λαγκαδά τη δεύτερη σημαντικότερη καλλιεργήσιμη έκταση μετά την περιοχή Αξιού και Γαλλικού στα πλαίσια του Νομού Θεσσαλονίκης. Τα είδη που συναντώνται στις καλλιέργειες είναι βαμβάκι, σιτάρι, κριθάρι, σίκαλη, καλαμπόκι, κτηνοτροφικές τροφές (τριφύλλι), κηπευτικά και ενεργειακές καλλιέργειες. Η κάλυψη των αναγκών των βιομηχανιών, της υδροδότησης των οικισμών και της άρδευσης των καλλιεργήσιμων εκτάσεων γίνεται μέσω υδρογεωτρήσεων. Συγκεκριμένα, κατά μήκος της Μυγδονίας λεκάνης εκτιμάται ότι υπάρχουν πάνω από 2000 γεωτρήσεις, η λειτουργία των οποίων είναι ανεξέλεγκτη, γεγονός που οδηγεί στην πτώση της στάθμης της λίμνης Κορώνεια και Βόλβης, αλλά και στην υποβάθμιση των υδροφόρων οριζόντων.



Εικόνα 13: Κατανομή των γεωτρήσεων και των αρδευόμενων εκτάσεων γης στο Δυτικό τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης. (Alexandridis et. al 2006)



Εικόνα 14: Γενικές κατηγορίες χρήσεων γης στο δυτικό τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης με ένδειξη της περιοχής μελέτης (Λαγυνά). (land.copernicus.eu/global)

2.3. Κλιματικά στοιχεία

Οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή έρευνας χαρακτηρίζουν το εύκρατο Μεσογειακό κλίμα, που γενικά συνδέεται με ξηρό-θερμό καλοκαίρι και ήπιο-βροχερό χειμώνα.

Σύμφωνα με παρατήρηση των δεδομένων από το Μετεωρολογικό Σταθμό του Λαγκαδά, το Ετήσιο Θερμοκρασιακό Εύρος (Ε.Θ.Ε.) φέρει μια σχετικά μεγάλη τιμή, που αποτελεί χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου τύπου ηπειρωτικού κλίματος. Συγκεκριμένα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες από το 2008 έως το 2019 καταγράφονται τους μήνες Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο με μια μέση τιμή τους 3,4°C. Από την άλλη, κατά την διάρκεια των μηνών Ιούνιο με Αύγουστο, για τα ίδια έτη, η θερμοκρασία λαμβάνει την υψηλότερη τιμή της γύρω στους 27°C.

Όσον αφορά τα κατακρημνίσματα, οι μήνες που χαρακτηρίζονται από τις μικρότερες βροχοπτώσεις είναι ο Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος. Ειδικότερα, η ελάχιστη μέση τιμή βροχόπτωσης τα τελευταία 10 έτη παρατηρείται κατά τον Ιούλιο με 13,8 mm. Αντίστοιχα, οι πλέον βροχεροί μήνες είναι ο Νοέμβριος, Δεκέμβριος και Ιανουάριος με μέση τιμή βροχόπτωσης 52.5 mm. Γενικά, στην ευρύτερη έκταση η υγρασία είναι αυξημένη και λόγω της παρουσίας των λιμνών, που αποτελούν ρυθμιστικό παράγοντα για την τιμή της υγρασίας, κατά τη διάρκεια του χειμώνα συχνά εμφανίζονται φαινόμενα περιορισμένης οριζόντιας ορατότητας.

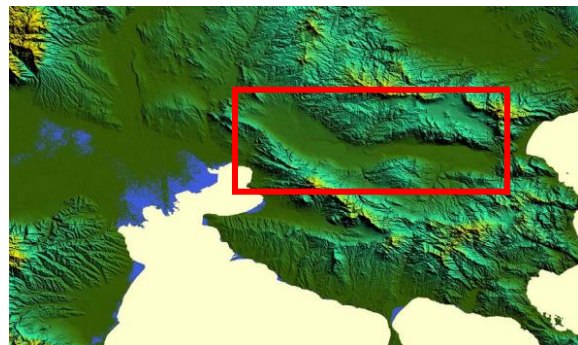
2.4. Μορφολογικά στοιχεία

Τα Λαγυνά συναντώνται στο ΝΔ τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης. Η Μυγδονία λεκάνη, όπως και θα αναφερθεί πιο αναλυτικά στη συνέχεια, είναι ένα τεκτονικό βύθισμα που περιλαμβάνει τις λίμνες Κορώνεια και Βόλβη. Το δυτικό τμήμα που βρίσκεται η περιοχή μελέτης οριοθετείται από το ρήγμα Λητής- Λαγυνών- Αγίου Βασιλείου (F-AV) στα νότια, που είναι προέκταση του μεγάλης έκτασης ρήγμα Γερακαρούς- Νικομηδινού- Στίβου- Περιστερώνα (F-GNSP) και το ρήγμα Ασσήρου-Αναλήψεως-Σχολαρίου (F-AA) στα βόρεια, τα οποία χαρακτηρίζονται ως κανονικά και έχουν κατεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, η οποία μεταβαίνει σε Α-Δ προς το ανατολικό τμήμα της λεκάνης. Στα περιθώρια του βυθίσματος λόγω της δράσης των ρηγμάτων το ανάγλυφο είναι απότομο, ο βαθμός δαντέλωσης είναι χαμηλός, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 15, χαρακτηριστικό που είναι ενδεικτικό της ενεργότητας των ρηγμάτων (Chatzipetros & Pavlides, 1998). Άλλο γεωμορφολογικό χαρακτηριστικό που εμφανίζεται στην έκταση αυτή και συνδέεται με την ενεργότητα των ρηγμάτων είναι η έντονη κατά βάθος διάβρωση. Συγκεκριμένα, στις περιοχές πίσω από τα νεοτεκτονικά ρήγματα σχηματίζονται βαθιές κοιλάδες σχήματος V, ενώ προς τη θέση των λιμνών η κοίτη εξομαλύνεται. Το ομαλό ανάγλυφο στο εσωτερικό της λεκάνης αποτελεί τη θέση του βασικού επιπέδου που, σε συνδυασμό με την έντονη κατά βάθος διάβρωση, υποδηλώνει την πρόσφατη πτώση του.



Εικόνα 15: Τοπογραφικός χάρτης του φύλλου Θέρμη από τη Γ.Υ.Σ. όπου είναι εμφανής η παρουσία των ενεργών ρηγμάτων, όπως φαίνεται από το χαμηλό βαθμό δαντέλωσης, το ανάγλυφο της περιοχής και με ένδειξη της περιοχής μελέτης (Λαγυνά). (Γ.Υ.Σ., 1970, 1:50000)

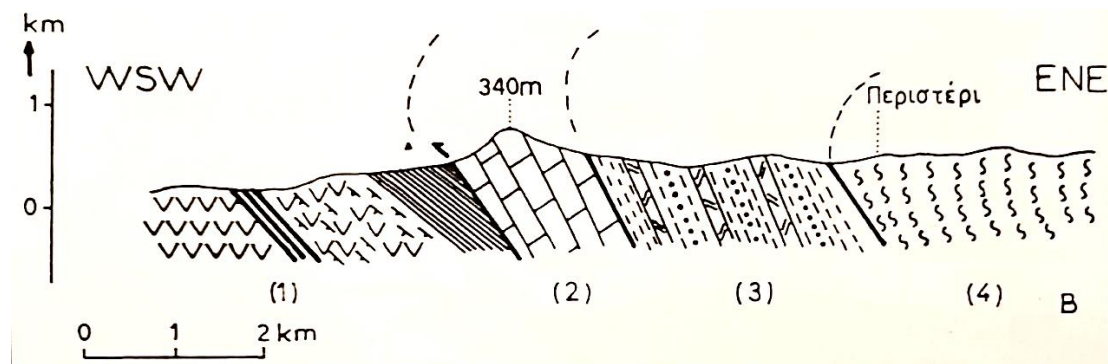
Εικόνα 16: Τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους της ευρύτερης περιοχής μελέτης το οποίο έχει προέλθει από την χρήση των αρχείων SRTM. Ορατή είναι η μορφολογία της λεκάνης Μυγδονίας με τους ορεινούς όγκους που την περικλείουν. (Ζερβοπούλου, 2010)



2.5. Γεωλογία της περιοχής

Ο οικισμός των Λαγυνών συναντάται στο ΝΔ τμήμα του τεκτονικού βυθίσματος που καλείται Μυγδονία λεκάνη, το οποίο ήταν αποτέλεσμα τεκτονικής δράσης που έλαβε χώρα στο Κάτω Πλειστόκαινο. Πιο συγκεκριμένα, η λεκάνη αυτή αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου τεκτονικού βυθίσματος που σχηματίστηκε στο Μέσο Μειόκαινο (Πόντιο- Βιλλαφράγιο κατά Sotiriadis et al., 1983), την Προμυγδονία λεκάνη, η οποία περιελάμβανε και τις γειτονικές λεκάνες Ζαγκλιβερίου, Μαραθούσας και Βρωμολιμών.

Από γεωλογικής άποψης η Μυγδονία λεκάνη βρίσκεται στο όριο της Σερβομακεδονικής μάζας με τη Περιοδοπική ζώνη. Το προαλπικό κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Σερβομακεδονικής καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του βυθίσματος, ενώ ένα μικρό τμήμα στα δυτικά, ξεκινώντας την εμφάνιση από τη λίμνη Κορώνεια, καταλαμβάνεται από τα πετρώματα και τους σχηματισμούς της Περιοδοπικής. Σύμφωνα με Δ. Μουντράκης (2010), η σημερινή τεκτονική εικόνα της περιοχής του ορίου της Σερβομακεδονικής και Περιοδοπικής εμφανίζει τα στρώματα και των δυο ζωνών να είναι αναστραμμένα, με τα παλιότερα να βρίσκονται τεκτονικά τοποθετημένα πάνω στα νεότερα. Η αναστροφή αυτή αποδίδεται στην Τριτογενή πτύχωση με απόκλιση προς τα Δυτικά, με αποτέλεσμα η Σερβομακεδονική κρυσταλλοσχιστώδης μάζα να εφιππεύει τα νεότερα Περιμοτριάδικα μεταϊζήματα της Περιοδοπικής ζώνης (βλ. Σχήμα 1). Τα κυριότερα γεωλογικά χαρακτηριστικά των ενοτήτων παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 1: Σχηματική γεωλογική τομή στην περιοχή του δυτικού ορίου της Σερβομακεδονικής όπου φαίνεται η αναστροφή των στρωμάτων. 1: Οφειολιθικά πετρώματα από τη ζώνη Αζιού και ιζήματα βαθιάς θάλασσας, κερατόλιθοι και φλύσχης Ιουρασικού της Περιοδοπικής, 2: Ανθρακικά πετρώματα Τριαδικού- Ιουρασικού, 3: Μετακλαστική- ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά Περιμίου- Κάτω Τριαδικού, 4: Κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο Σερβομακεδονικής. (Μουντράκης, 2010)

2.5.1. Σερβομακεδονική μάζα

Η Σερβομακεδονική μάζα εκτείνεται σε μια έκταση πλάτους 38- 60 Km, με διεύθυνση ΒΔ- ΝΑ, στη δυτική πλευρά της μάζας Ροδόπης. Στον Ελλαδικό χώρο, ξεκινώντας από τα σύνορα Ελλάδας- Σκοπίων- Βουλγαρίας προεκτείνεται προς τα ΝΑ στη λίμνη Βόλβη, καταλαμβάνοντας το δυτικό τμήμα της Λεκάνης του Στρυμόνα, τμήμα του κορμού της Χαλκιδικής και της χερσονήσου της Σιθωνίας, αλλά και το μεγαλύτερο τμήμα της χερσονήσου του Αθω.



Σχήμα 2: Τεκτονικό σκαρίφημα Σερβομακεδονικής μάζας.
1: Μεταλικά ιζήματα κοιλάδας Στρυμόνα,
2: Ενότητα Βερτίσκου,
3: Ενότητα Κερδυλίων,
4: Μάζα Ροδόπης,
5: Περιοδοπική ζώνη,
6: Ανατολικό όριο της Σερβομακεδονικής,
7: Δυτικό όριο Σερβομακεδονικής.
(Μουντράκης, 2010)

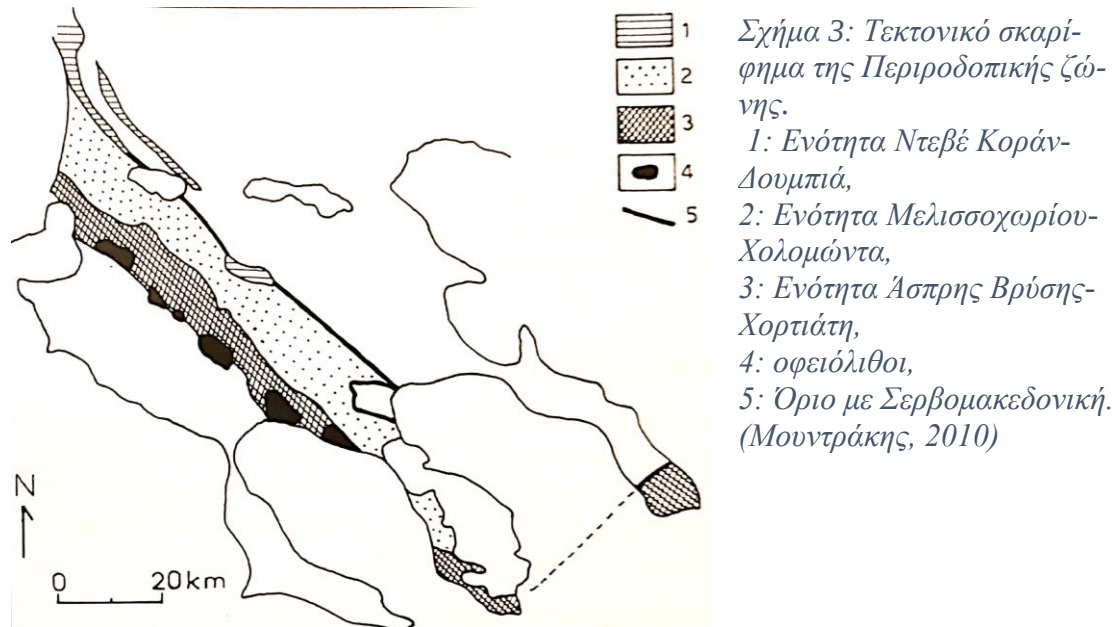
Η δυτική γεωτεκτονική ζώνη της Ελληνικής Ενδοχώρας διαιρείται σε δυο μεγάλες ενότητες πετρωμάτων (Kockel & Walther, 1968): την κατώτερη και αρχαιότερη ενότητα των Κερδυλίων και την ανώτερη και νεότερη ενότητα του Βερτίσκου.

- ❖ Η **ενότητα των Κερδυλίων** εντοπίζεται στις εκβολές του ποταμού Στρυμόνα και στην Ανατολική Χαλκιδική μέχρι τη περιοχή του Στρατωνίου, με συνολικό πάχος περίπου 3 Km. Η λιθοστρωματογραφία της ενότητας αποτελείται από εναλλαγές ανάμεσα στους εξής ορίζοντες, από τους ανώτερους προς τους βαθύτερους: ανώτερος ορίζοντας μαρμάρου, βιοτιτικοί γνεύσιοι, ενδιάμεσος ορίζοντας μαρμάρου, βιοτιτικοί γνεύσιοι, ορίζοντας κατώτερου μαρμάρου, βιοτιτικοί γνεύσιοι. Στη Μυγδονία λεκάνη η ενότητα Κερδυλίων εμφανίζεται σε ένα πολύ μικρό τμήμα στο ανατολικό όριο της.
- ❖ Η **ενότητα του Βερτίσκου** καταλαμβάνει μέρος του κορμού της Χαλκιδικής, σχεδόν όλη τη χερσόνησο του Άθω και τμήμα της χερσονήσου Σιθωνίας, ενώ επεκτείνεται προς στα βόρεια μέχρι τα σύνορα της Ελλάδας με τα Σκόπια και τη Βουλγαρία. Η λιθοστρωματογραφική στήλη της ενότητας συνίσταται από: μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, ορθογνεύσιους, λεπτά στρώματα μαρμάρων, αμφιβολίτες και άλλα μεταβασικά πετρώματα, όπως μεταγάββρους, μεταδιαβάσες. Η ενότητα αυτή πετρωμάτων καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης.

2.5.2. Περιοδοπική ζώνη

Η Περιοδοπική ζώνη αποτελεί την πιο εσωτερική ζώνη των Ελληνίδων οροσειρών (Kauffmann et al., 1976) και βρίσκεται στη δυτική πλευρά της Σερβομακεδονικής μάζας. Εμφανίζεται στην επιφάνεια με πλάτος 10-20 Km και με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Εκτείνεται από τα σύνορα της Ελλάδας με τα Σκόπια ΝΑ προς τη λίμνη Κορώνεια, καλύπτει τμήμα του κορμού της Χαλκιδικής και της χερσονήσου της Σιθωνίας, ενώ

στη πορεία της κάμπτεται αποκτώντας διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ και έτσι καλύπτει το νοτιότερο τμήμα της χερσονήσου του Άθω και τέλος καταλήγει στην περιοχή Αλεξανδρούπολης, Έβρου. Η Περιοδοπική ζώνη, λοιπόν, περιβάλλει την Ελληνική Ενδοχώρα με αυτή την τοξοειδή μορφή, η οποία ενδεχομένως είναι αποτέλεσμα της γενικής διαμόρφωσης του Ελληνικού τόξου.

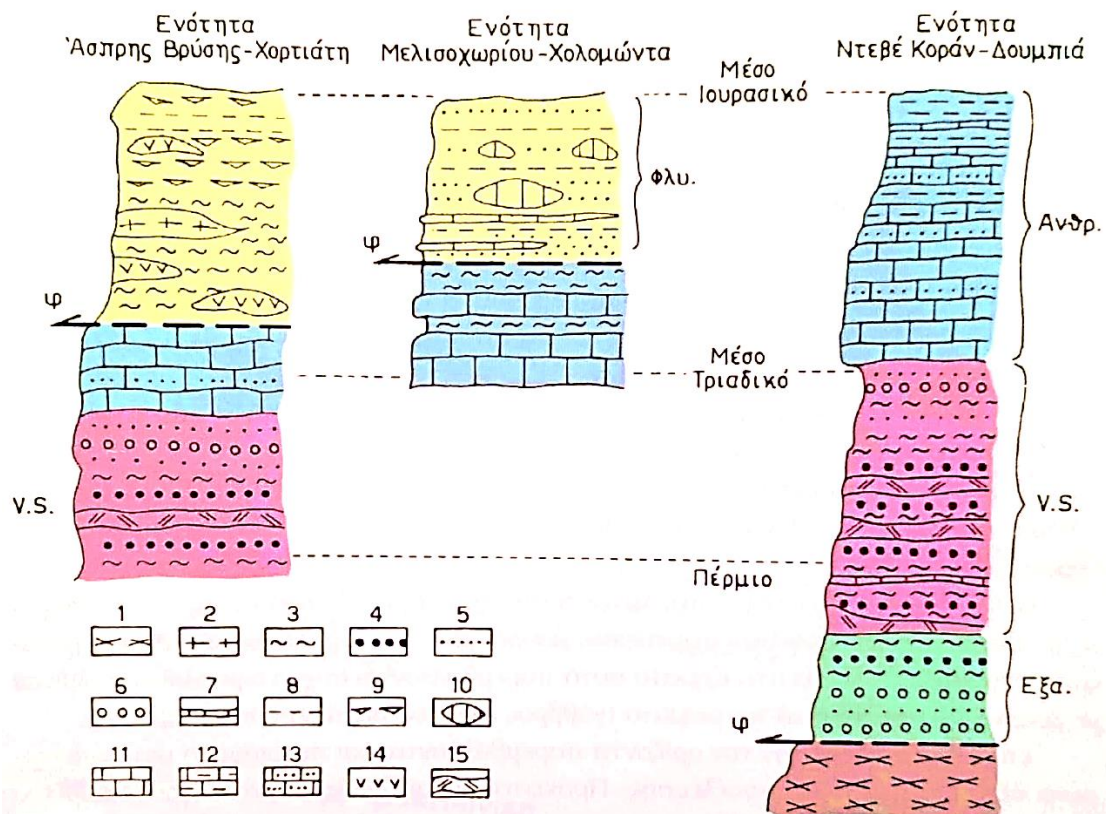


Η ανατολικότερη γεωτεκτονική ζώνη των Εσωτερικών Ελληνίδων συγκροτείται από τρεις βασικές ενότητες, οι οποίες από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά είναι: Ενότητα Ντεβέ Κοράν- Δουμπιά, Ενότητα Μελισσοχωρίου- Χολομώντα και Ενότητα Ασπρης Βρύσης-Χορτιάτη.

- ❖ Η **ενότητα Ντεβέ Κοράν- Δουμπιά** συνίσταται στη βάση της από το σχηματισμό Εξαμιλίου, ο οποίος περιλαμβάνει μετακροκαλοπαγή, μεταψαμμίτες, χαλαζίτες και χαλαζιακούς σχιστόλιθους ηλικίας Περμίου. Πάνω από αυτό το σχηματισμό εμφανίζεται μια ημιμεταμορφωμένη ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά ηλικίας Περμίου- Κάτω Τριαδικού με χαρακτηριστικά προϊόντα bimodal ηφαιστειότητας (Ασβεστά, 1992). Στα ανώτερα στρώματα της ενότητας αυτής συναντάται μια ανθρακική σειρά που συνδέεται κατά κύριο λόγο με νηριτική ιζηματογένεση από το Μέσο Τριαδικό έως το Μέσο Ιουρασικό. Η έκταση της ενότητας είναι πολύ μικρή στον Ελλαδικό χώρο και το μεγαλύτερο μέρος βρίσκεται στα βόρεια της λίμνης Κορώνειας.
- ❖ Η **ενότητα Μελισσοχωρίου- Χολομώντα** περιλαμβάνει στη βάση της μάρμαρα και ανακρυσταλλωμένους ασβεστολίθους ηλικίας Μέσου- Άνω Τριαδικού, ενώ ο ανώτερος σχηματισμός της αναφέρεται ως «φλύσχης της Σβούλας» με ηλικία Κάτω- Μέσο Ιουρασικό. Ο συγκεκριμένος φλύσχης είναι σπουδαίας σημασίας καθώς αντιπροσωπεύει τη δράση της Περιοδοπικής ζώνης ως ηπειρωτική κατωφέρεια κατά τη διάρκεια της Αλπικής ορογένεσης. Η ενότητα αυτή φέρει πλάτος 5- 15 Km και η έκταση που καταλαμβάνει είναι η μεγαλύτερη από τις τρεις ενότητες της Περιοδοπικής ζώνης. Πάνω σε αυτήν αναπτύσσεται το

δυτικότερο τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης και καλύπτεται από μεταλλικά ιζήματα.

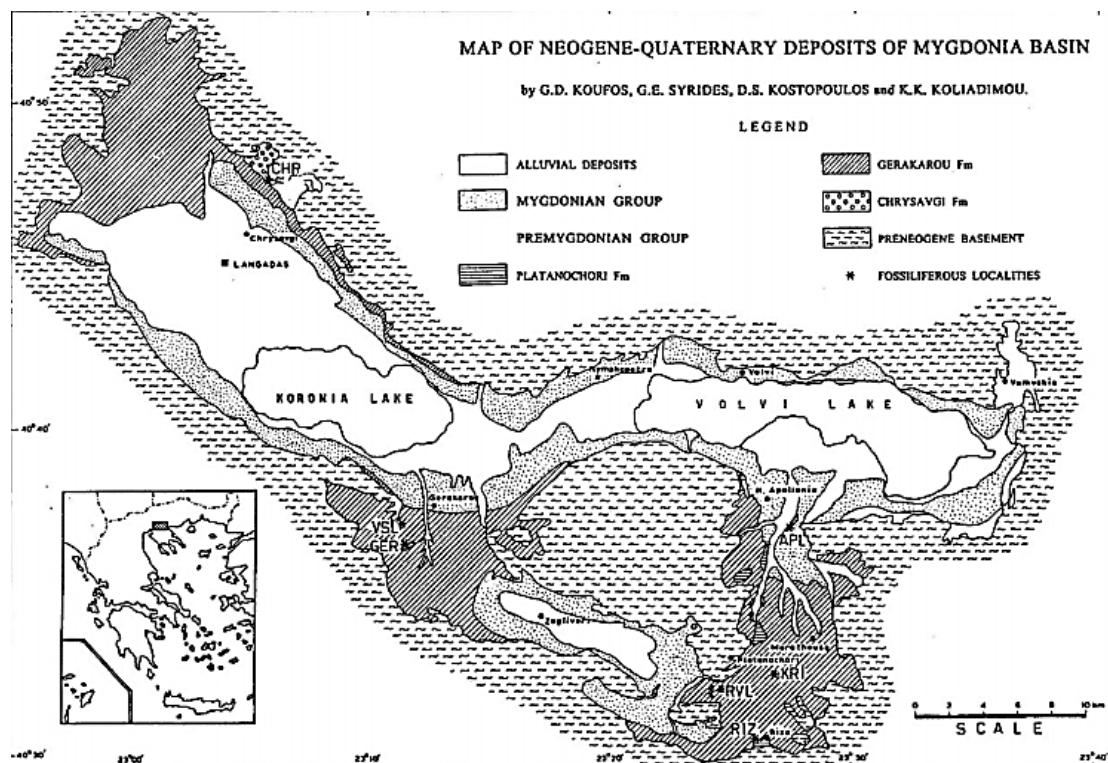
- ❖ Η **ενότητα Άσπρης Βρύσης- Χορτιάτη** αποτελείται στα κατώτερα τμήματα της από μετακλαστικά και νηριτικά ανθρακικά ιζήματα Περμο-Τριαδικής ηλικίας, ενώ στα ανώτερα στρώματα εμφανίζονται αντιπροσωπευτικά ιζήματα βαθιάς θάλασσας. Σε αυτόν τον τελευταίο και ανώτερο ορίζοντα παρεμβάλλεται επίσης και η «Μαγματική σειρά Χορτιάτη», που συνίσταται από πετρώματα όξινης μαγματικής προέλευσης που έχουν υποστεί πρασινοσχιστολιθική μεταμόρφωση κατά το Ανώτερο Ιουρασικό με Κάτω Κρητιδικό και δημιούργησαν τους πράσινους γνεύσιους της Θεσσαλονίκης. Το πάχος της ενότητας είναι 4-8 Km και η διεύθυνση εμφάνισης της είναι παράλληλη με τη διεύθυνση της ενότητας Μελισσοχωρίου- Χολομώντα, ενώ αποτελεί και το τμήμα της Περιροδοπικής ζώνης που παρατηρείται στη χερσόνησο του Άθω.



Σχήμα 4: Λιθοστρωματογραφικές στήλες των τριών ενοτήτων της Περιροδοπικής ζώνης. 1: Κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο Σερβομακεδονικής, 2: Πράσινοι γνεύσιοι Θεσσαλονίκης και μεταπυριγενή πετρώματα «Μαγματικής σειράς Χορτιάτη», 3: Σχιστόλιθοι και φυλλίτες, 4: Πυροκλαστικά υλικά, 5: Μεταψαμμίτες, χαλαζίτες, 6: Μετακροκαλοπαγή, 7: Ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι, 8: Αργιλικόι σχιστόλιθοι και μάρμες, 9: Κερατόλιθοι, 10: Ολισθόλιθοι Τριαδικών μαρμάρων, 11: Ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι, μάρμαρα, 12: Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, 13: Ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι, 14: Οφειολιθικά πετρώματα, 15: Ηφαιστειακά υλικά, φ: Τεκτονική επαφή, Εξα: Σχηματισμός Εξαμιλίου, V.S.: Ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά, Ανθρ.: Ανθρακική νηριτική σειρά, Φλν.: Φλύσχης. (Μουντράκης, 2010)

2.5.3. Μεταλλικά ιζήματα

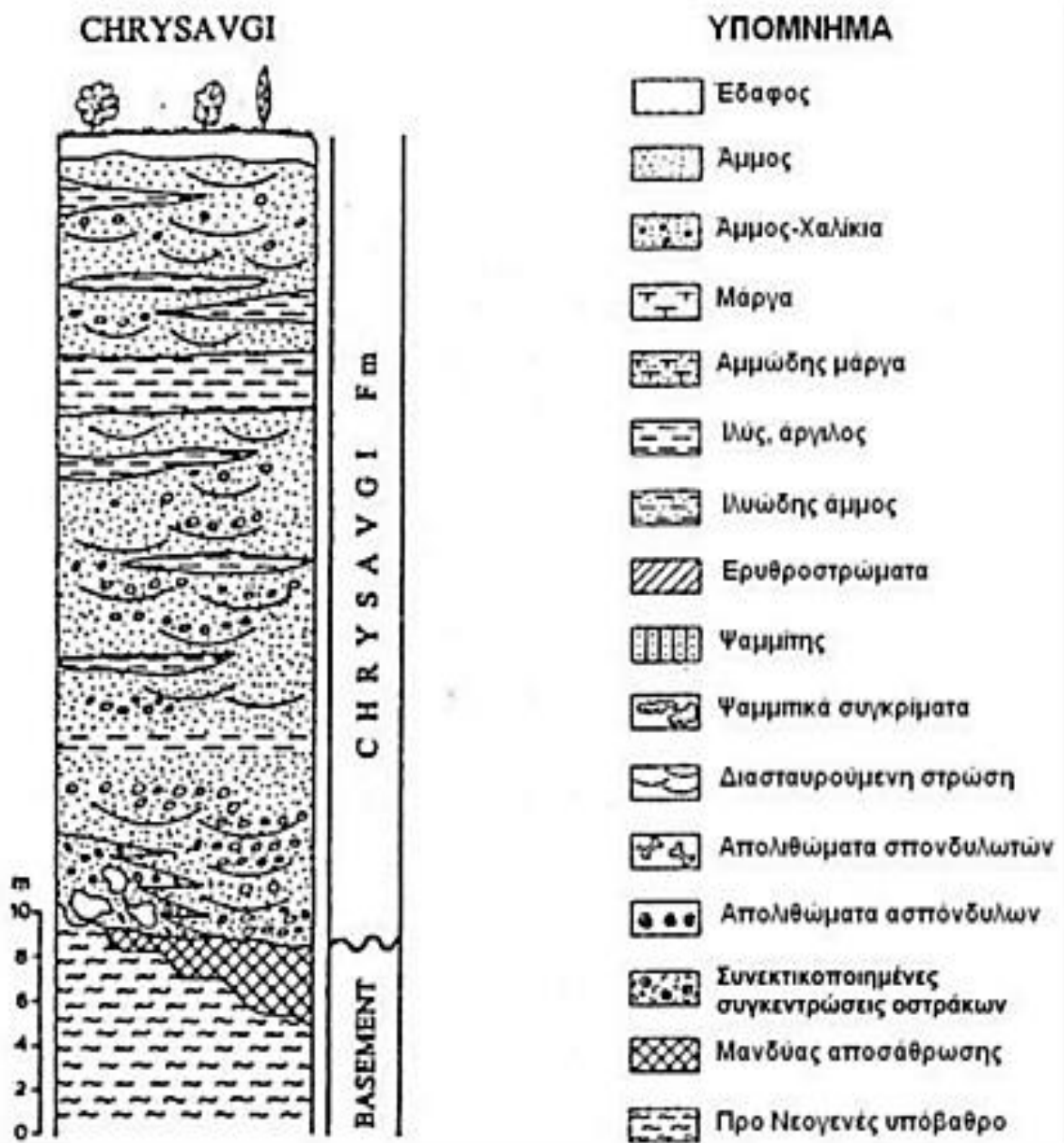
Μετά την Αλλική ορογένεση και πιο συγκεκριμένα από το Άνω Μειόκαινο και μετά, το τεκτονικό βύθισμα της Μυγδονίας πληρώθηκε με νεότερα, Νεογενή και Τεταρτογενή, ποταμοχειμάρια και λιμναία ιζήματα. Η στρωματογραφία των ιζημάτων αυτών και η σύστασή τους διακρίνεται σε δύο ομάδες, την Προμυγδονιακή και την Μυγδονιακή ομάδα (Ψιλοβίκος, 1977). Αρχικά, η Προμυγδονιακή ομάδα είναι αυτή που αποτέθηκε, κατά το Μειόκαινο μέχρι και το Κάτω Πλειστόκαινο, στην Προμυγδονία λεκάνη και γι' αυτό η συγκεκριμένη ακολουθία των σχηματισμών συναντάται και στις γειτονικές λεκάνες Ζαγκλιβερίου, Μαραθούσας και Βρωμολιμνών. Λόγω τεκτονικής δράσης που έλαβε χώρα στο Τεταρτογενές, η Προμυγδονία λεκάνη διασπάστηκε σε μικρότερα τμήματα και έτσι επήλθε ο σχηματισμός της Μυγδονίας λεκάνης. Στην τελευταία αποτέθηκε, από το Κάτω Πλειστόκαινο, η Μυγδονιακή ομάδα, η οποία εμφανίζεται σε όλες τις υπολεκάνες της Προμυγδονίας, αλλά με διαφορετικούς τύπους. Παρόμοια σύσταση με την Μυγδονιακή ομάδα έχουν και οι Ολοκαινικές αποθέσεις της λεκάνης, καθώς εμφανίζονται στα περιθώρια της λεκάνης ποταμοχειμάρια ιζήματα, με τη μορφή πλευρικών κορημάτων και αλλουβιακών ριπιδίων, ενώ στο εσωτερικό της συναντώνται λιμναίας προέλευσης ιζήματα. Τέλος, σε διάσπαρτα σημεία του τεκτονικού βυθίσματος συναντώνται τραβερτινικές δομές, ο σχηματισμός των οποίων οφείλεται στην έντονη γεωθερμική δραστηριότητα της ευρύτερης περιοχής.



Εικόνα 17: Οι κύριες λιθοστρωματογραφικές ενότητες που αποτέθηκαν κατά το Νεογενές με Τεταρτογενές στη Μυγδονία λεκάνη. (Koufos et al., 1995)

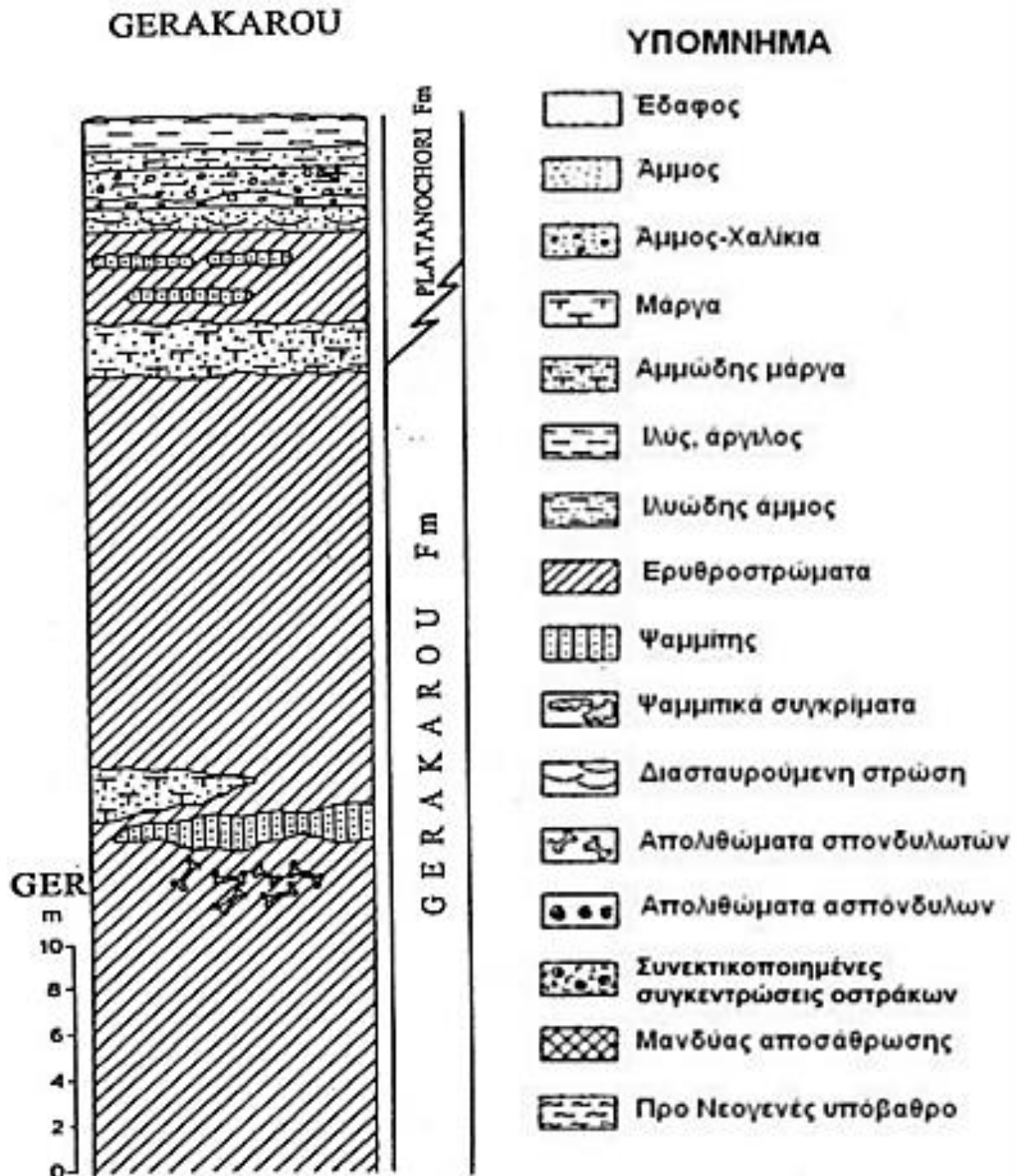
Η Προμυγδονιακή ομάδα συγκροτείται από τρεις σχηματισμούς, οι οποίοι από το κατώτερο προς τον νεότερο είναι: Σχηματισμός Χρυσανγής, Σχηματισμός Γερακαρούς και Σχηματισμός Πλατανοχωρίου (Koufos et al., 1995).

- ❖ Ο Σχηματισμός Χρυσανγής βρίσκεται ασύμφωνα πάνω στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Σερβομακεδονικής. Αποτελείται από ποταμοχειμάριας προέλευσης κροκαλοπαγή, ψαμμίτες σε διασταυρούμενες στρώσεις και λιμναία-ποταμολιμναία αργιλοψαμμιτικά ιζήματα, που αποτέθηκαν κατά το Πόντιο. Η εμφάνιση του σχηματισμού είναι περιορισμένη στη Μυγδονία λεκάνη, ενώ το πάχος του υπολογίζεται στα 40 με 50m.



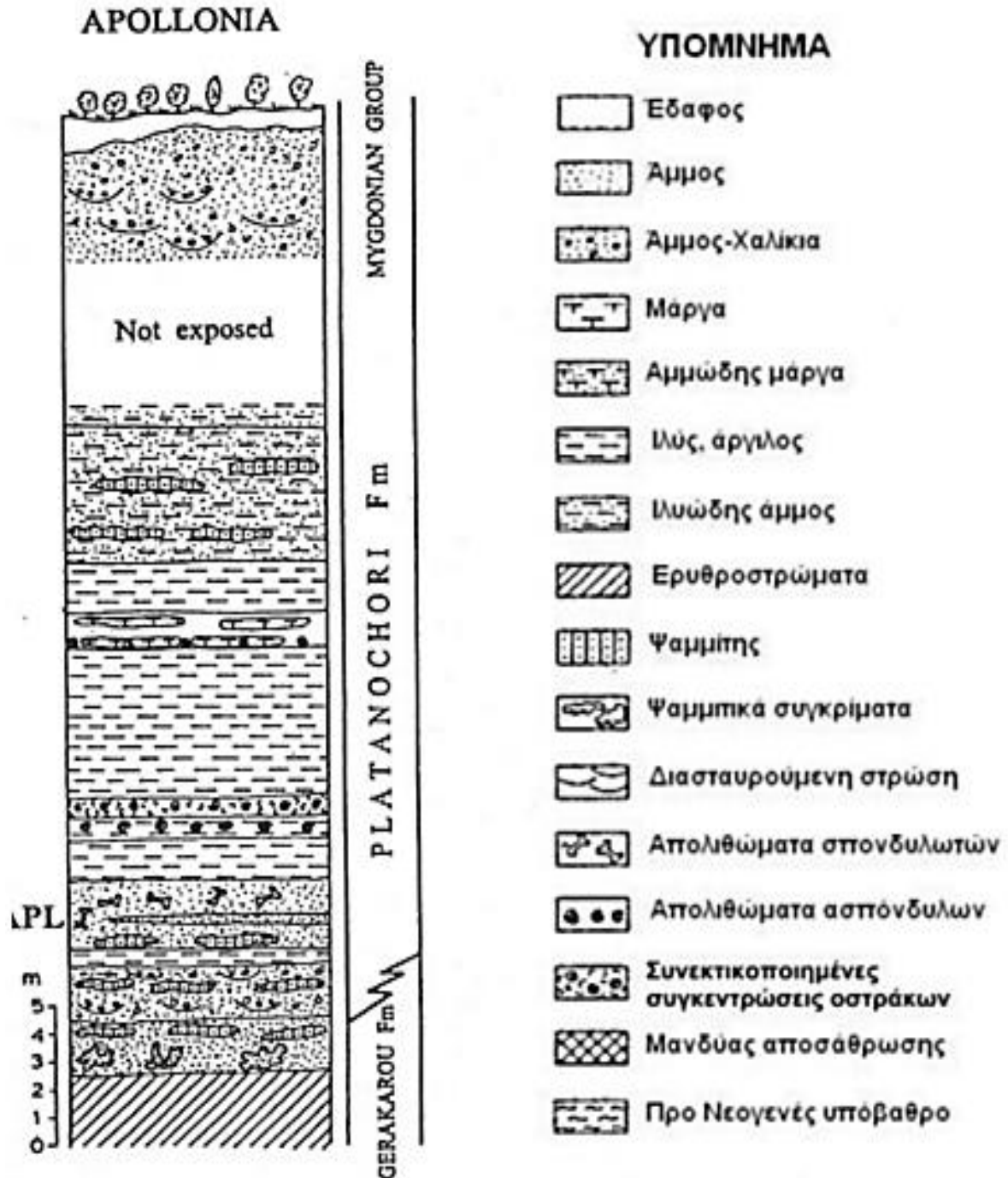
Σχήμα 5: Στρωματογραφική στήλη του σχηματισμού Χρυσανγής. (Koufos et al., 1995)

- ❖ Ο Σχηματισμός Γερακαρούς συνίσταται από ερυθροστρώματα, τα οποία αποτελούνται από κροκαλοπαγή, άμμο, ιλύ και άργιλο με χαρακτηριστικό ερυθρό χρώμα και διασταυρωτή στρώση, που έχουν αποτεθεί υπό χερσοποτάμιες συνθήκες κατά το Ανώτερο Πλειόκαινο μέχρι το τέλος του Βίλλαφράγκιου. Η εμφάνιση αυτού του σχηματισμού είναι εκτεταμένη στη Μυγδονία λεκάνη με το πάχος του να κυμαίνεται από 45m στα περιθώρια της λεκάνης μέχρι πάνω από 100m στο εσωτερικό της.



Σχήμα 6: Στρωματογραφική στήλη του σχηματισμού Γερακαρούς. (Koufos et al., 1995)

- ❖ Ο Σχηματισμός Πλατανοχωρίου συγκροτείται από ποταμολιμναίας προέλευσης αργιλικά ιζήματα, ψαμμίτες και στρώματα ιλύος με ψαμμιτικούς φακούς. Σύμφωνα με παλαιοντολογικές μελέτες η ηλικία του σχηματισμού προσδιορίζεται στο Ανώτατο Βίλλαφράγκιο με Κατώτερο Μπιχάριο (Koufos et al. 1992). Οι εμφανίσεις του είναι περιορισμένες στη Μυγδονία λεκάνη και φέρει πάχος 10- 20m.



Σχήμα 7: Στρωματογραφική στήλη του σχηματισμού Πλατανοχωρίου. (Koufos et al., 1995)

Η Μυγδονιακή ομάδα τοποθετείται ασύμφωνα πάνω στη Προμυγδονιακή ομάδα και συναντάται με τους εξής δύο τύπους στη Μυγδονία λεκάνη. Αρχικά, στα περιθώρια της λεκάνης αποτέθηκαν ιζήματα ποταμολιμναίας προέλευσης, όπου συγκροτούνταν από κροκαλοπαγή, χονδρόκοκκη άμμο και άργιλο. Ωστόσο, στο εσωτερικό μέρος της λεκάνης τα υλικά που την πλήρωσαν, λεπτόκοκκη άμμος, άργιλος και ιλύς, αντιπροσωπεύουν ήρεμες συνθήκες απόθεσης και χαρακτηρίζονται ως λιμναία ιζήματα.

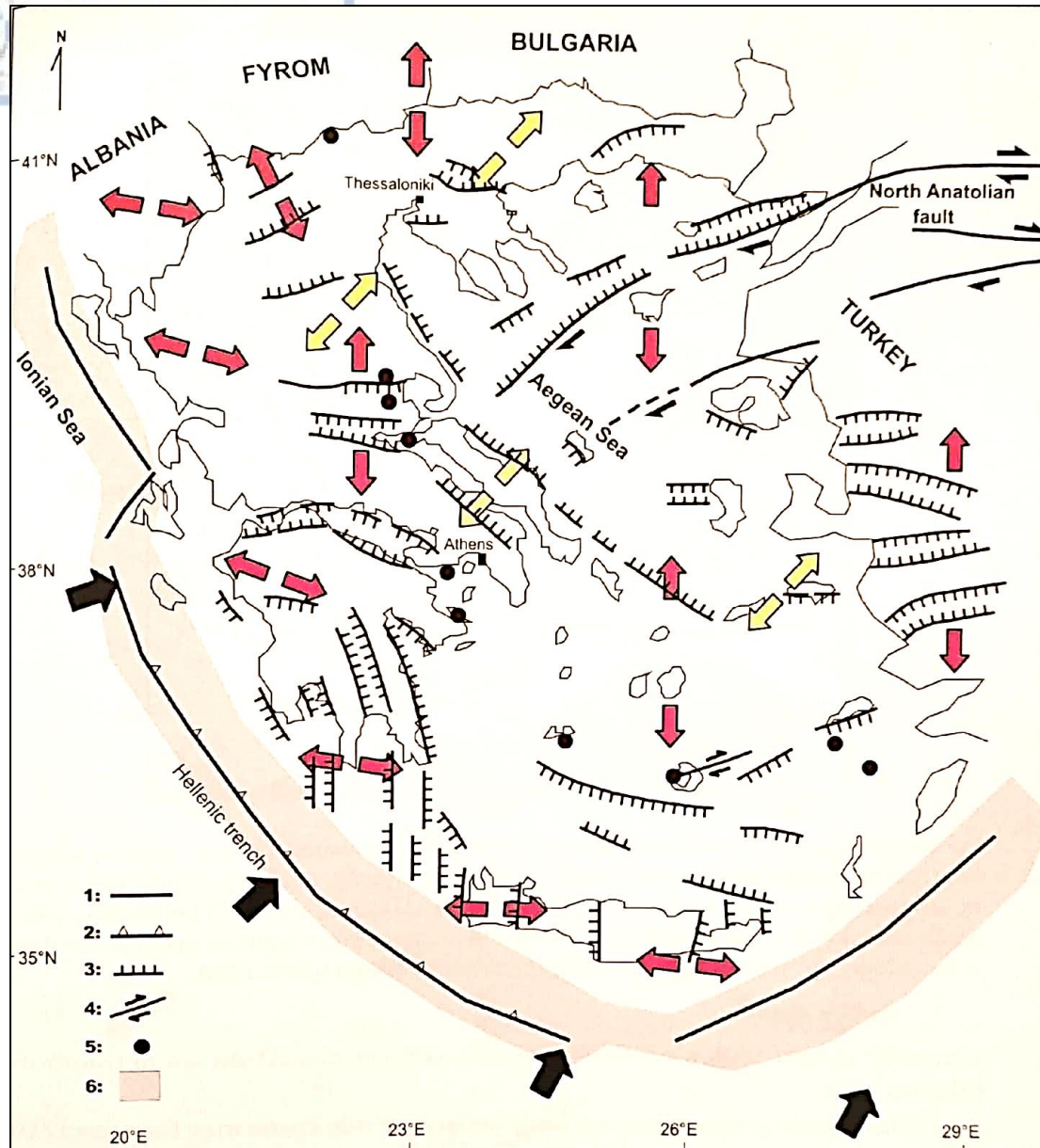


Εικόνα 18: Γεωλογικός χάρτης του φύλλου Θερμόν από το ΙΓΜΕ με ένδειξη της περιοχής μελέτης (Λαγυνά). (ΙΓΜΕ, 1:50000)

Στον παραπάνω χάρτη της Εικόνας 18 διακρίνεται η γεωλογική δομή της περιοχής των Λαγυνών. Δομείται από αμμούχες αργίλους Ολοκαίνου (H.1), ένα Τεταρτογενή σχηματισμό χαλικιών και άμμου (Pt.t3.1) και εναλλαγές χαλαζιτών και χαλαζιτικούς ψαμμίτες με φυλλιτικές ενστρώσεις ηλικίας Τριαδικού- Μέσου Ιουρασικού (T-Jm.st) της Περιροδοπικής ζώνης. Διακρίνεται επίσης το χαρτογραφημένο γεωλογικό ρήγμα (διακεκομμένη γραμμή) του Αγίου Βασιλείου (F- AV) που αποτελεί προέκταση προς τα δυτικά του ρήματος Γερακαρούς- Νικομηδινού- Στίβου- Περιστερώνα (F-GNSP) και εμφανίζεται ως το όριο μεταξύ υποβάθρου (T- Jm.st) και Τεταρτογενών αποθέσεων (Pt.t3.1), ενώ σε κάποια σημεία κατά μήκος του παρατηρούνται αλλουβιακά ριπίδια (Q.cs1).

2.6. Τεκτονική της περιοχής

Η περιοχή του Βορείου Αιγαίου χαρακτηρίζεται από μια ιδιαίτερα πολύπλοκη τεκτονική δομή η οποία επηρεάζεται από την δράση του βόρειου τμήματος του δεξιόστροφου ρήματος της Ανατολίας, αλλά και από την διαρκή μετανάστευση του Ελληνικού ορογενούς προς τα N-ΝΔ από το Ηώκαινο μέχρι σήμερα. Με την τελευταία διαδικασία, μετατοπίζεται το συμπίεστικό πεδίο τάσεων στο σημείο σχηματισμού του Ελληνικού ιζηματογενούς τόξου, δηλαδή εκεί που βυθίζεται η Αφρικανική πλάκα κάτω από την Ευρασιατική. Ωστόσο, πίσω από το Ελληνικό τόξο οι τάσεις χαλαρώνουν, κατάσταση που εκδηλώνεται με τη δημιουργία εφελκυστικών δομών.



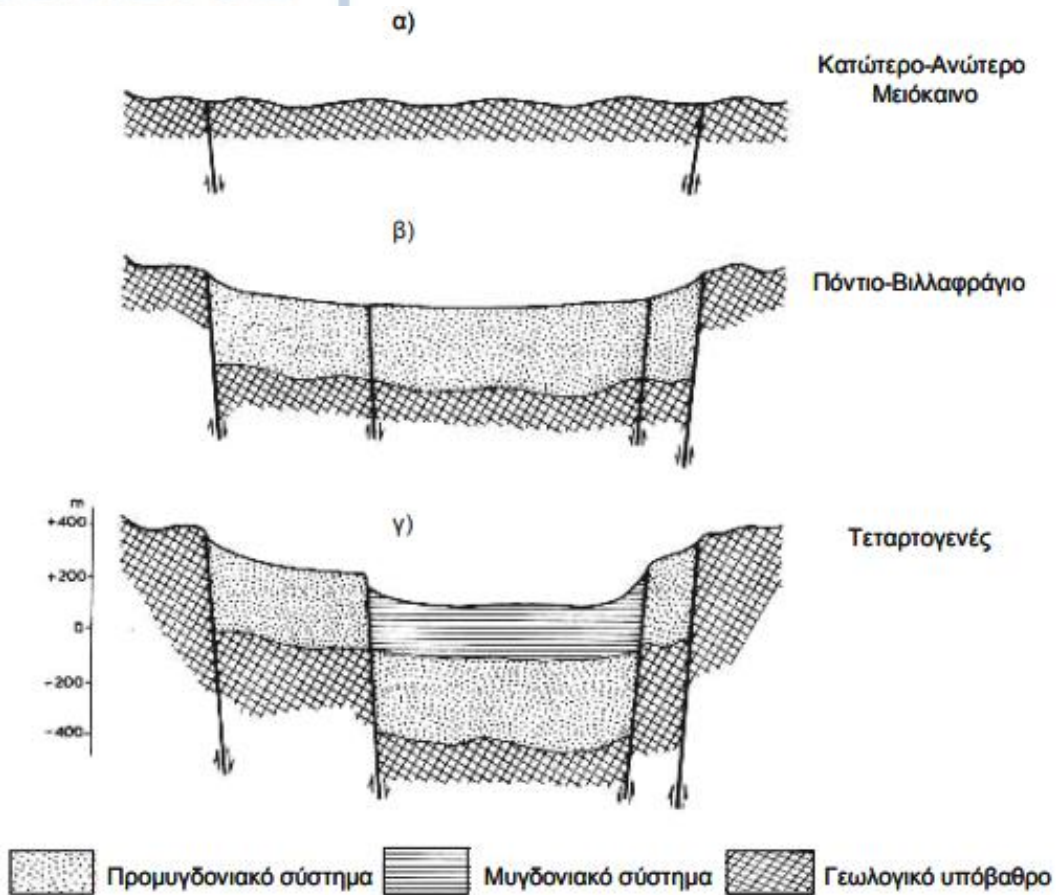
Εικόνα 19: Ενεργή τεκτονική στον Ελληνικό χώρο. 1) Όρια λιθοσφαιρικών πλακών, 2) Ανάστροφα ρήγματα, 3) Κανονικά ρήγματα, 4) Ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης με ένδειξη την διεύθυνση ολίσθησης, 5) Ηφαίστεια, 6) Ζώνη συμπίεσης. Τα κίτρινα βέλη δείχνουν την διεύθυνση του εφελκυσμού από το Άνω Μειόκαινο μέχρι το Πλειόκαινο. Τα κόκκινα βέλη δείχνουν την διεύθυνση του εφελκυστικού πεδίου από το Πλειστόκαινο μέχρι σήμερα. Τα μαύρα βέλη δείχνουν την κίνηση της Αφρικανικής πλάκας. (Mountrakis, 2010)

Νεοτεκτονικές παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον ευρύτερο χώρο του Βορείου Αιγαίου δίνουν μια αντιπροσωπευτική εικόνα και για την εξέλιξη της Μυγδονίας λεκάνης από το Μέσο Μειόκαινο μέχρι σήμερα.

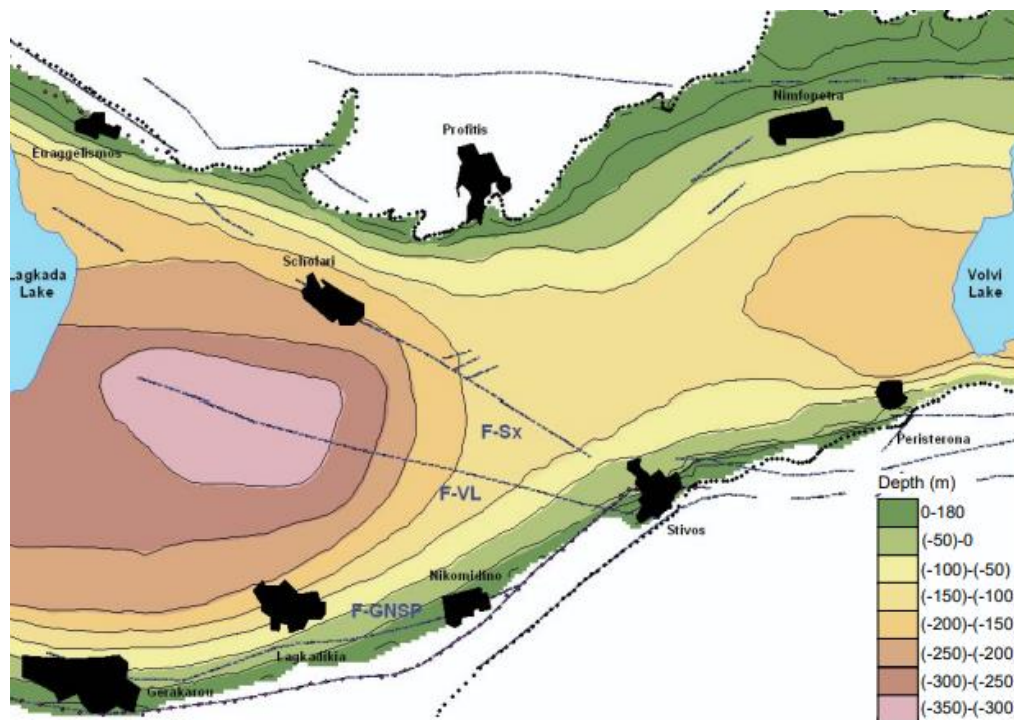
- Στο Μέσο- Άνω Μειόκαινο η διεύθυνση του εφελκυσμού που επικρατούσε ως επί το πλείστον στον Ελλαδικό χώρο ήταν ΔΒΔ- ΑΝΑ (Mercier et al., 1989) με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν κανονικά ρήγματα με παράταξη ΒΑ- ΝΔ, τα οποία σύμφωνα με Lyberis, 1984 φαίνεται να χαρακτηρίζονται από μικρή

αριστερόστροφη συνιστώσα. Αυτές οι τεκτονικές δομές τεμάχισαν το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Σερβομακεδονικής στο χώρο της Μυγδονίας λεκάνης (βλ. Σχήμα 8α).

- Στο Κατώτερο Πλειόκαινο ξεκίνησε η δράση του ρήγματος της Ανατολίας (Α.Α. Barka, 1992) μεταβάλλοντας τη διεύθυνση του ασκούμενου εφελκυστικού πεδίου στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου από ΔΒΔ- ΑΝΑ σε ΒΑ- ΝΔ. Η τεκτονική αυτή δράση διήρκησε από το Πλειόκαινο μέχρι το Κάτω Πλειστόκαινο και τα ρήγματα που σχηματίστηκαν υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες είχαν παράταξη ΒΔ- ΝΑ, ενώ και παλιότερα ρήγματα επαναδραστηροποιήθηκαν (Mercier et al., 1989). Η περιοχή καταβυθίστηκε εντός των νέων ρηγμάτων με αποτέλεσμα τον σχηματισμό της Προμυγδονίας λεκάνης (βλ. Σχήμα 8β), όπου επακολούθησε η έναρξη της απόθεσης της Προμυγδονιακής ομάδας. Η έκταση της λεκάνης κάλυπτε τη σημερινή Μυγδονία, καθώς και τις γειτονικές λεκάνες Ζαγκλιβερίου, Μαραθούσας και Βρωμολιμνών.
- Από το Μέσο Πλειστόκαινο μέχρι σήμερα οι εφελκυστικές τάσεις έχουν διεύθυνση Β-Ν, η οποία οφείλεται, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην μετατόπιση του Ελληνικού ορογενούς προς τα νότια, και είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία ρηγμάτων παράταξης Α-Δ. Αυτά τα τελευταία ρήγματα θεωρούνται ενεργά και είναι υπεύθυνα για την καταγραφή πολλών πρόσφατων και μεγάλων σεισμών, όπως τον σεισμό του 1978 στη Θεσσαλονίκη, όπου επιβεβαιώθηκε η διεύθυνση εφελκυστικού πεδίου από τη μέτρηση του διανύσματος ολίσθησης σε επιφανειακές διαρρήξεις (Mercier et al., 1983). Σε αυτή τη φάση εξέλιξης της λεκάνης, η Προμυγδονία διαχωρίστηκε σε επιμέρους μικρότερες λεκάνες και άρχισε η απόθεση της Μυγδονιακής ομάδας (βλ. Σχήμα 8γ) στην ομώνυμη λεκάνη. Τα ύδατα δεν έβρισκαν πλέον διαφυγή προς τη λεκάνη του Στρυμόνα με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται στο εσωτερικό της λεκάνης, αναπτύσσοντας την «Μυγδονία λίμνη» (Ψιλοβίκος, 1977, Sotiriadis et al., 1983). Η παρουσία πολλών χειμάρρων και έντονων ρευμάτων στην περιοχή οδήγησε στην γρήγορη μεταφορά μεγάλης ποσότητας κλαστικών υλικών και απόθεσης τους στο κεντρικό τμήμα της λίμνης (Ψιλοβίκος, 1977, Sotiriadis et al., 1983). Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία ενός μεγάλου εξάρματος στη θέση αυτή, που διαχώρισε την αρχική λίμνη σε δυο τμήματα, τις λίμνες Κορώνεια και Βόλβη. Ειδικότερα, το έξαρμα συναντάται στη περιοχή ανάμεσα σε Σχολάρι με Στίβο και λόγω διάβρωσης σήμερα το ύψος του φτάνει μέχρι τα 85 m. Η παρουσία του ανιχνεύτηκε με διασκοπήσεις σεισμικής διάθλασης που πραγματοποιήθηκαν από την Β.Ρ.Γ.Μ. (1971). Ουσιαστικά, αυτό που υπολογίστηκε ήταν σε ποιο βάθος παρουσιάζεται η διεπιφάνεια μεταξύ υποβάθρου και ιζημάτων και άρα το πάχος των ιζημάτων από την επιφάνεια της θάλασσας. Κοντά στη λίμνη Κορώνεια η διεπιφάνεια εμφανίζεται σε βάθος περίπου 300 m, ενώ το μέγιστο πάχος των ιζημάτων, γύρω στα 400 m, συναντάται στα ΝΑ της λίμνης αυτής. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης το υπόβαθρο βρίσκεται σε βάθος 100 m, ενώ στα δυτικά της λίμνης Βόλβη παρουσιάζεται στα 150 m βάθος (Manakou et al., 2007) (βλ. Εικόνα 20).



Σχήμα 8: Κύρια τεκτονικά στάδια εξέλιξης της Μυγδονίας λεκάνης. (Sotiriadis et al., 1983)



Εικόνα 20: Χάρτης ισοβαθών καμπυλών (m) με σημείο αναφοράς τη στάθμη της θάλασσας που υποδεικνύουν την παρουσία της διεπιφάνειας υποβάθρου- ιζημάτων. (Manakou et al., 2007)

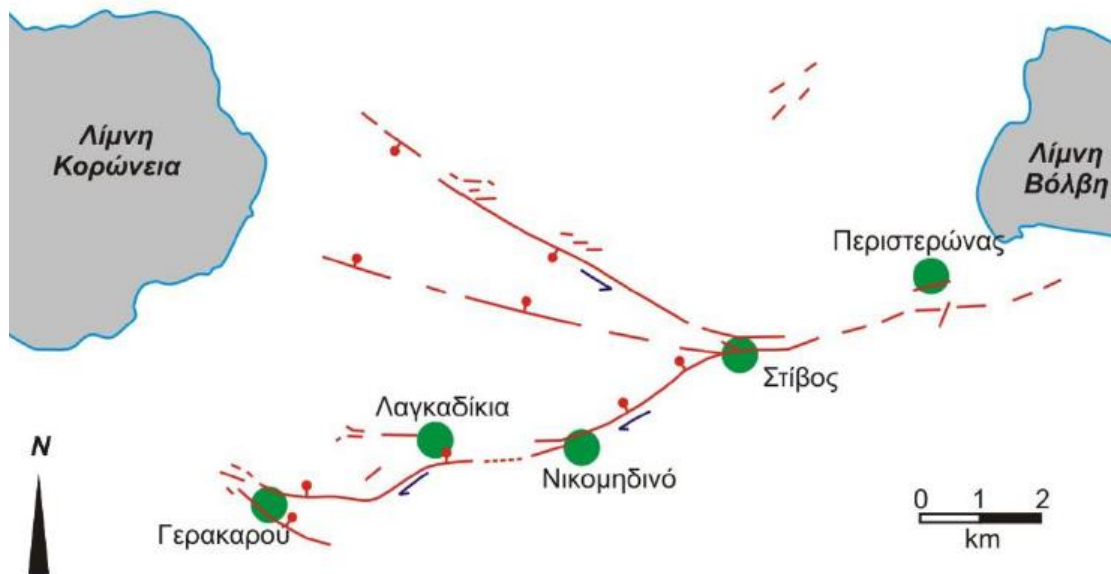
Το ρήγμα Γερακαρούς- Νικομηδινού- Στίβου- Περιστερώνα (F-GNSP) θεωρείται σεισμικά ενεργό ρήγμα και σε αυτό οφείλεται ο σεισμός του Στίβου το 1978 με μέγεθος $M=6.5$, που έπληξε με μεγάλες ζημιές την Θεσσαλονίκη. Συγκεκριμένα, απέχει 28 Km ανατολικά από την πόλη της Θεσσαλονίκης και αναπτύσσεται σε ορατό μήκος περίπου 12 Km. Η κύρια διεύθυνση του κανονικού αυτού ρήγματος είναι Α- Δ και κατά διαστήματα εμφανίζεται με παράταξη ΑΒΑ- ΔΝΔ και ΔΒΔ- ΑΝΑ (βλ. Εικόνα 22), ενώ παρατηρείται μετάπτωση του βόρειου τεμάχους ως προς το νότιο (Papazachos et al., 1980). Η κλίση του στην επιφάνεια είναι $75^{\circ}-80^{\circ}$, ενώ με το βάθος μειώνεται και φτάνει τις 35° περίπου στα 10 Km, παρουσιάζει δηλαδή τυπική λιστρική γεωμετρία (Pavlidis & Kiliass, 1987; Pavlidis et al., 2006; Tranos et al., 2003). Στην λεκάνη εμφανίζεται ως το όριο μεταξύ του υποβάθρου και των Νεογενών και Τεταρτογενών αποθέσεων (βλ. Εικόνα 20), αλλά και μεταξύ των δύο τελευταίων (Mountrakis et al., 1996). Σύμφωνα με ιζηματολογικές παρατηρήσεις στο ύπαιθρο, το συνολικό γεωλογικό άλμα του ρήγματος κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς είναι 250 m και ο ρυθμός ολίσθησης μεταξύ Ολιγοκαίνου και Άνω Πλειστοκαίνου κυμαίνεται στα 0.06- 0.7 mm/y (Chatzipetros, 1998).

Κατά τη σεισμική ακολουθία του 1978, γνωστή ως **σεισμός του Στίβου**, έγιναν αισθητές τρεις μεγάλες δονήσεις, στις 23 Μαΐου με $M=5.8$, στις 20 Ιουνίου με $M=6.5$ και στις 4 Ιουλίου με $M=5$. Το μέσο εστιακό βάθος των γεγονότων της σεισμικής ακολουθίας ήταν από 7 έως 11 Km. Η κατακόρυφη μετατόπιση κατά τον σεισμό ήταν κανονική 12-15cm, ενώ η ασεισμική ολίσθηση αποτελεί το 40% της μετατόπισης που προκλήθηκε από το σεισμό και υπολογίζεται στα 2,8mm/y (Chatzipetros et al., 2003). Σύμφωνα με γεωδαιτικά δεδομένα, η ολίσθηση από το έτος 1979 έως το 1994 δίνει ρυθμό 8cm μέσα σε 15 χρόνια, δηλαδή περίπου 5-6mm/y (Chatzipetros et al., 2005). Παρατηρήθηκαν επίσης ανοίγματα των 4-10cm, καθώς και μια μικρή δεξιόστροφη μετατόπιση των 2cm σε ελάχιστα σημεία (Chatzipetros et al., 2005).

Ο σεισμός του 1978 προκάλεσε τη δημιουργία ενός συστήματος επιφανειακών διαρρήξεων στην περιοχή ανάμεσα στις λίμνες το οποίο συνίσταται από τρεις κύριους κλάδους (βλ. Εικόνα 23).

1. Ο κύριος κλάδος διέρχεται από τους οικισμούς Στίβος, Νικομηδινό και Γερακαρού. Η παράταξη του είναι ΒΑ-ΝΔ με μετάπτωση του ΒΔ τεμάχους ως προς το ΝΑ, ενώ φέρει δεξιόστροφη συνιστώσα.
2. Η ρηξιγενής γραμμή Στίβος- Σχολάρι (συμβολίζεται στην Εικόνα 22 ως F- Sx) έχει μήκος 8 Km και παράταξη ΒΔ- ΝΑ. Η κίνησή του χαρακτηρίζεται ως κανονική με αριστερόστροφη συνιστώσα και μετάπτωση προς τα ΝΔ. Εμφανίζεται ως το όριο μεταξύ Νεογενών και Τεταρτογενών αποθέσεων. Με τη δράση αυτού του ρήγματος κατά τον σεισμό του 1978 παρατηρήθηκε επιφανειακό άλμα 25 cm με αριστερόστροφη μετατόπιση των 2-3 cm, αλλά και άνοιγμα 2-16 cm (Mountrakis et al., 1996).
3. Η ρηξιγενής γραμμή Στίβος- λίμνη Κορώνεια (συμβολίζεται στην Εικόνα 22 ως F-VL) έχει μήκος 5 Km με ΒΔ-ΝΑ παράταξη και κίνηση κανονική που χαρακτηρίζεται με μετάπτωση προς τα ΒΑ. Κατά τη διάρκεια του σεισμού του 1978 το ρήγμα έκοψε τις πρόσφατες αλλουβιακές προσχώσεις που συναντώνται

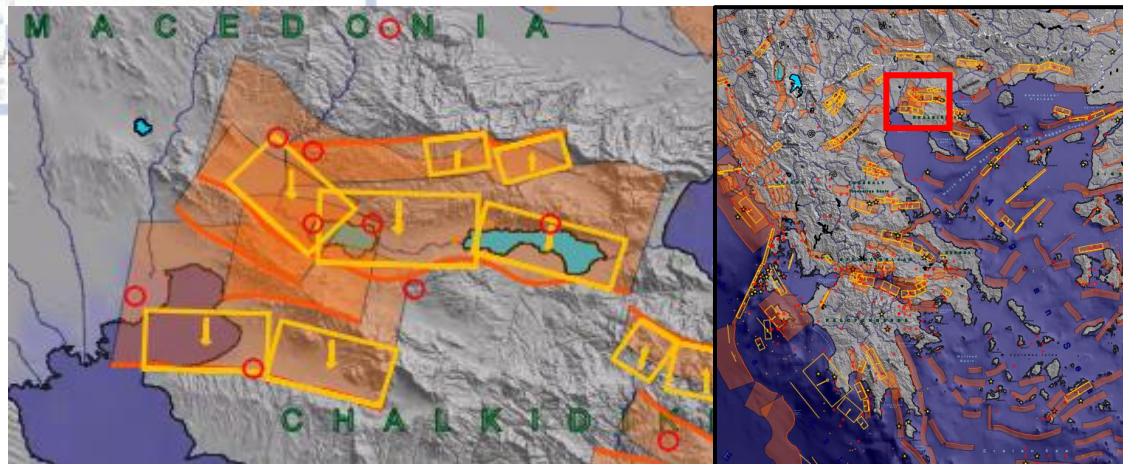
στην περιοχή ανάμεσα στις δυο λίμνες, Κορώνεια και Βόλβη. Το άλμα κυμαίνεται από 2 έως 20cm, ενώ το άνοιγμα ήταν 15cm (Mountrakis et al., 1996).



Εικόνα 23: Χάρτης του συστήματος των επιφανειακών διαρρήξεων που δημιουργήθηκαν από το σεισμό του 1978. (Papazachos et al., 1980)

Το **ρήγμα Αγίου Βασιλείου (F- AV)** αποτελεί προέκταση προς τα δυτικά του ρήγματος Γερακαρούς- Νικομηδινού- Στίβου- Περιστερώνα (F-GNSP). Απέχει από την πόλη της Θεσσαλονίκης 11 Km και διέρχεται από τους οικισμούς Λαγυνών και Αγίου Βασιλείου. Το μήκος του ξεπερνάει τα 20 Km και φέρει παράταξη ΒΔ- ΝΑ, ενώ η κίνησή του χαρακτηρίζεται κανονική με μετάπτωση προς τα Β- ΒΑ. Εμφανίζεται ως το όριο μεταξύ υποβάθρου (T- Jm.st) και Τεταρτογενών αποθέσεων (Pt. t3.1), ενώ σε κάποια σημεία κατά μήκος του παρατηρούνται αλλουβιακά ριπίδια (Q.cs1) (βλ. Εικόνα 18). Το ρήγμα αυτό θεωρείται ενεργό και ειδικότερα το συνολικό του άλμα κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς υπολογίζεται, σύμφωνα με ιζηματολογικές ενδείξεις, στα 220 m (Mountrakis et al., 1996). Πέρα από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.4, η ενεργότητα του συγκεκριμένου ρήγματος γίνεται αισθητή και από άλλους παράγοντες: (α) αποτελεί προέκταση ενός σεισμικά ενεργού ρήγματος, (β) συνδέεται με την εκδήλωση πολλών σεισμών με επίκεντρα σε βάθος 10 Km (Mountrakis et al., 1996) και (γ) επηρεάζει Ολοκαινικές αποθέσεις.

Γενικότερα, τα ρήγματα που εντοπίζονται στη περιοχή του τεκτονικού βυθίσματος της Μυγδονίας έχουν ενεργοποιηθεί πολλές φορές στο παρελθόν δίνοντας ισχυρούς, ιστορικούς σεισμούς με $M \geq 6.0$, που έπληξαν την Θεσσαλονίκη. Χαρακτηριστικοί σεισμοί από τους ιστορικούς μέχρι πιο πρόσφατους χρόνους είναι (Παπαζάχος & Παπαζάχου, 1989/ 2003): του 620μ. Χ., του 700, του 1430, του 1759, του 1902 γνωστός ως σεισμός της Ασσήρου και μάλιστα η σεισμική δράση τέτοιας παράταξης ρηγμάτων παρατηρήθηκε και το 1978, με του 1978 να είναι ο πιο πρόσφατος σεισμός που το επίκεντρό του εντοπίζεται στο γεωγραφικό χώρο της Μυγδονίας λεκάνης. Γίνεται κατανοητό, λοιπόν, ότι η επαναδραστηριοποίηση των δυτικών κυρίως ρηγμάτων της περιοχής της Μυγδονίας λεκάνης θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια μεγάλη απειλή για την πόλη της Θεσσαλονίκης.



LEGEND

Earthquakes (M = Magnitude): 550 BC - 2010 AD (Papachos et al., 2000; 2010)



$M \geq 7.0$

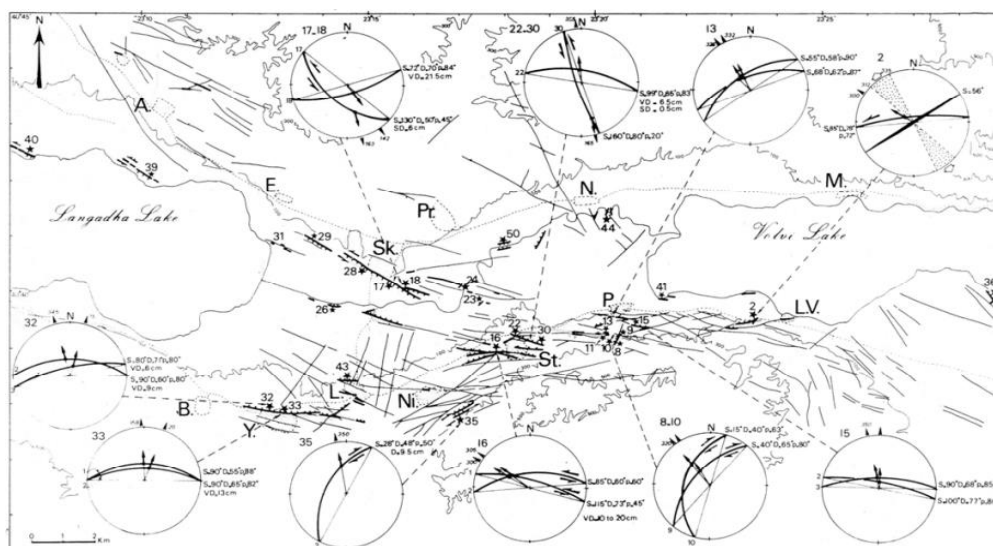
$6.0 \leq M < 7.0$

$5.5 \leq M < 6.0$

Individual Seismogenic Sources: they are obtained from geological and geophysical data and are characterized by a full set of geometric (strike, dip, length, width and depth), kinematic (rake, average displacement per event) and seismological (magnitude, slip rate, return period) parameters. ISSs are assumed to exhibit "characteristic" behaviour with respect to rupture length/width and expected mean and maximum magnitude. Moreover, ISSs can also be considered as fault segments of larger fault zones when there are evidences of individual rupture. The ISSs favour accuracy of the information supplied over the completeness of the sources themselves. As such, they can be used for deterministic assessment of seismic hazard, for calculating earthquake and tsunami scenarios, and for tectonic and geodynamic investigations.

Composite Seismogenic Sources: they are obtained from geological and geophysical data and characterized by geometric (strike, dip, width, min/max depth) and kinematic (rake) parameters, but their sliding surface geometry is more loosely defined and can contain an unspecified number of ISSs. They are not assumed to be capable of a characteristic earthquake but their potential can derive from existing earthquake catalogues or other geological considerations. A CSS is essentially inferred on the basis of regional surface and subsurface geological data that are exploited well beyond the simple identification of active faults or youthful tectonic features. Opposite to the ISSs, this category of sources favours completeness of the record of potential earthquake sources over accuracy of source description. In conjunction with seismicity and modern strain data, CSSs can thus be used for regional probabilistic Seismic Hazard Assessment and for investigating large-scale geodynamic processes. A CSS can represent a large fault zone which can consist of one or more well defined ISSs. However, it can also be 'empty' of ISSs if none can be recognized. The seismic behaviour of the CSSs can be completely independent for the ISSs, given that a potential event may rupture the total length of the source, whether it contains none, one or more ISSs.

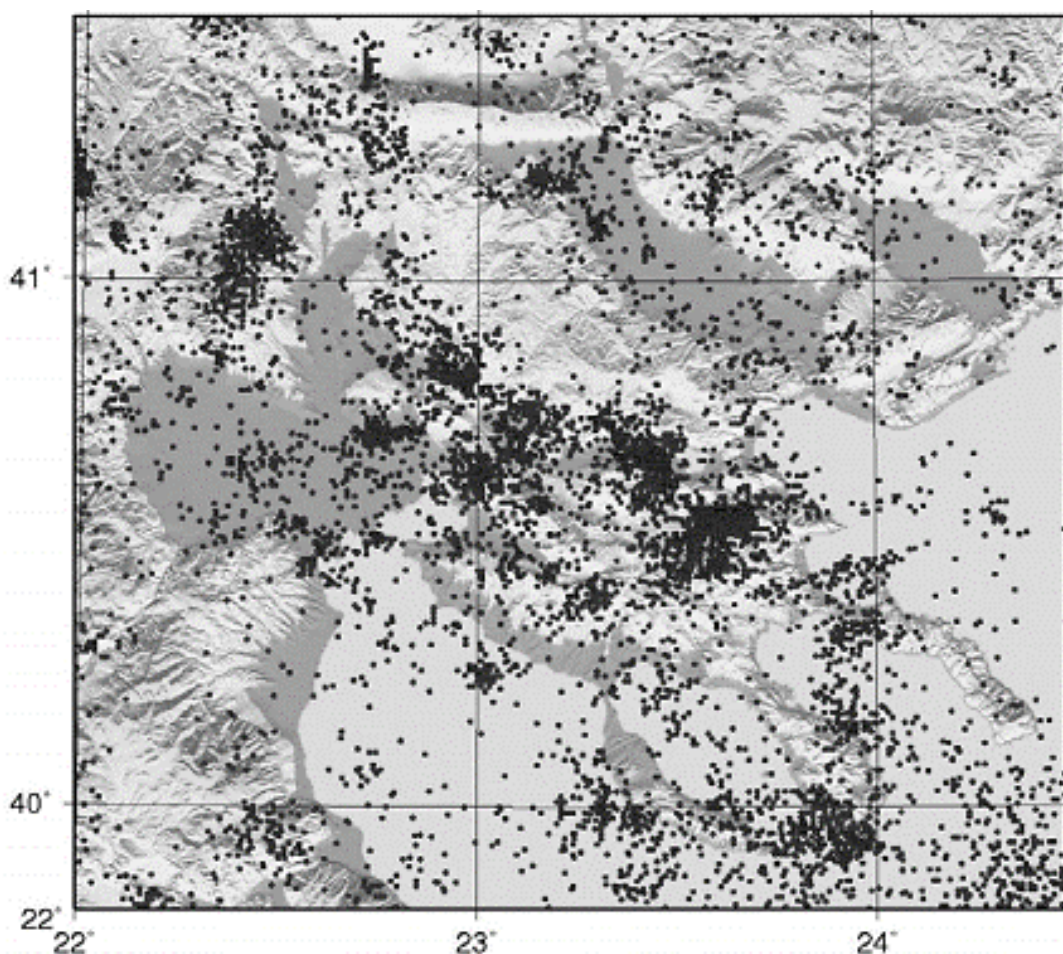
Εικόνα 24: Χάρτης ενεργών ρηγμάτων Μυγδονίας λεκάνης (<http://eqgeogr.weebly.com/>)



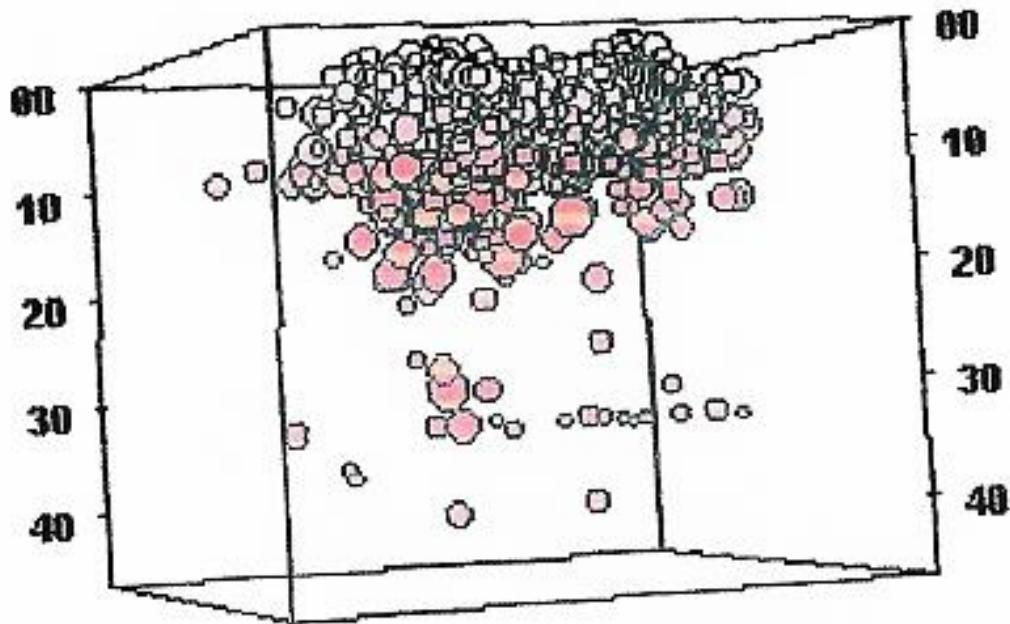
Εικόνα 25: Χάρτης της περιοχής μεταξύ των λιμνών Λαγκαδά και Βόλβης όπου σημειώνονται οι ρηξιγενείς γραμμές που εντοπίστηκαν μετά τον σεισμό του 1978. Τα διαγράμματα Wulff δείχνουν την διεύθυνση S, την κλίση D, το pitch p, την διεύθυνση ολίσθησης, την κατακόρυφη μετατόπιση VD και την οριζόντια SD μετατόπιση (cm). (Mercier et al., 1983)

2.7. Σεισμικότητα της περιοχής

Ο Βόρειος Ελληνικός χώρος εμφανίζει υψηλή σεισμικότητα κυρίως κατά μήκος των κύριων ζωνών διάρρηξης, όπως είναι η τάφρος του Βορείου Αιγαίου που ενδεχομένως αποτελεί συνέχεια του ρήγματος της Ανατολίας, αλλά και οι μεγάλοι μήκους ρηξιγενείς ζώνες που οριοθετούν τεκτονικές τάφρους της Σερβομακεδονικής ζώνης. Συγκεκριμένα, η Σερβομακεδονική ζώνη αποτελεί μια από τις πιο σεισμικά ενεργές ζώνες του Βορειοελλαδικού χώρου και χαρακτηρίζεται με μεγάλη συγκέντρωση εστίων ισχυρών σεισμών (Papazachos et al., 1979 & 1982; Mountrakis et al., 1983; Pavlides & Kiliyas, 1987). Έχει διαπιστωθεί έπειτα από έρευνες (Σκορδύλης, 1988) ότι υπάρχει ένας χώρος υψηλής σεισμικότητας που εκτείνεται κατά μήκος της λεκάνης της Μυγδονίας και φτάνει μέχρι το κόλπο της Ιερισσού (βλ. Εικόνα 26). Τα εστιακά βάθη των σεισμών αυτών είναι 5- 15 Km (βλ. Εικόνα 27), πρόκειται δηλαδή για επιφανειακούς σεισμούς, γεγονός που αυξάνει την καταστρεπτικότητα των ισχυρών σεισμών. Οι σημαντικότεροι σεισμοί του προηγούμενου αιώνα που έπληξαν και την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης είναι της Ασσήρου (5 Ιουλίου 1902, $M=6.6$), της Kresna (4 Απριλίου 1904, $M=7.3$), του Αγίου Όρους (8 Νοεμβρίου 1905, $M=7.5$), της Ιερισσού (26 Σεπτεμβρίου 1932, $M=6.9$) και του Στίβου (20 Ιουνίου 1978, $M=6.5$), που συνδέεται με το ρήγμα Γερακαρούς- Νικομηδινού- Στίβου- Περιστερώνα (F-GNSP) και για τον οποίο έγινε αναφορά στην παράγραφο 2.6.



Εικόνα 26: Επίκεντρα σεισμών στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης και Χαλκιδικής για τη χρονική περίοδο 1981- 2003. (Galanis et al., 2004)

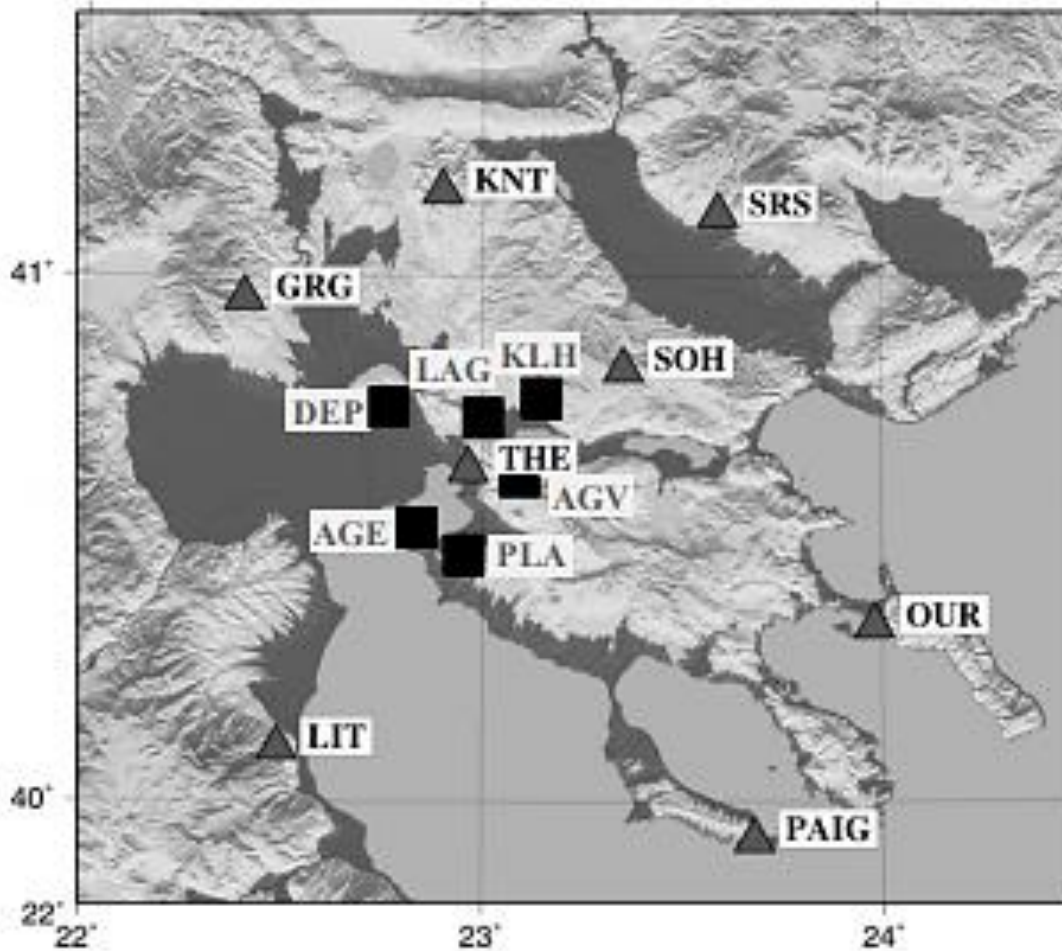


Εικόνα 27: Τρισδιάστατη απεικόνιση των σεισμών με μέγεθος $M_w > 3.5$ σε ακτίνα 25 Km από την περιοχή του Λαγκαδά από το 620μ.Χ. μέχρι σήμερα. (Χατζηπέτρος, 2006)

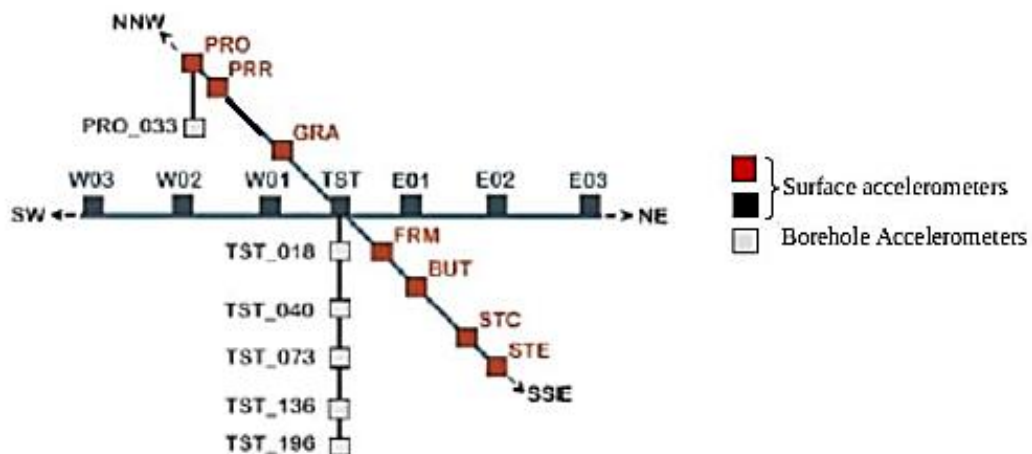
2.7.1. Καταγραφικά δίκτυα

Η σεισμικότητα του Βορειοελλαδικού χώρου καταγράφεται από το 1981 στο Σεισμολογικό Σταθμό του Α.Π.Θ. που υπάγεται στον Τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Αποτελεί τον κεντρικό σταθμό ενός δικτύου 48 τηλεμετρικών σταθμών, οι περισσότεροι από τους οποίους είναι εγκατεστημένοι στη Βόρεια Ελλάδα, ενώ αρκετοί έχουν εγκατασταθεί σε νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου πελάγους. Οι καταγραφές αποδελτιώνονται σε καταλόγους οι οποίοι περιλαμβάνουν πληροφορίες για τις βασικές εστιακές παραμέτρους (χρόνος γένεσης, επίκεντρο, εστιακό βάθος, μέγεθος) των σεισμών. Ειδικότερα, η πληρότητα των δεδομένων αφορά σεισμούς με $M > 4.5$ από το 550π.Χ., με $M > 6.5$ από το 1901, με $M > 5.2$ από το 1911, με $M > 4.8$ από το 1950 και με $M > 4.5$ από το 1964, ενώ από το 1995 μέχρι σήμερα περιλαμβάνει και καταγραφές σεισμών με $M \geq 2.0$. Ωστόσο, κατά περιόδους, πέρα από το μόνιμο Σεισμολογικό Σταθμό του Α.Π.Θ., λειτουργούν στην ευρύτερη περιοχή της Μυγδονίας λεκάνης και της Θεσσαλονίκης προσωρινά, μικρότερα δίκτυα σεισμογράφων για την μελέτη της τοπικής σεισμικότητας (βλ. Εικόνα 28).

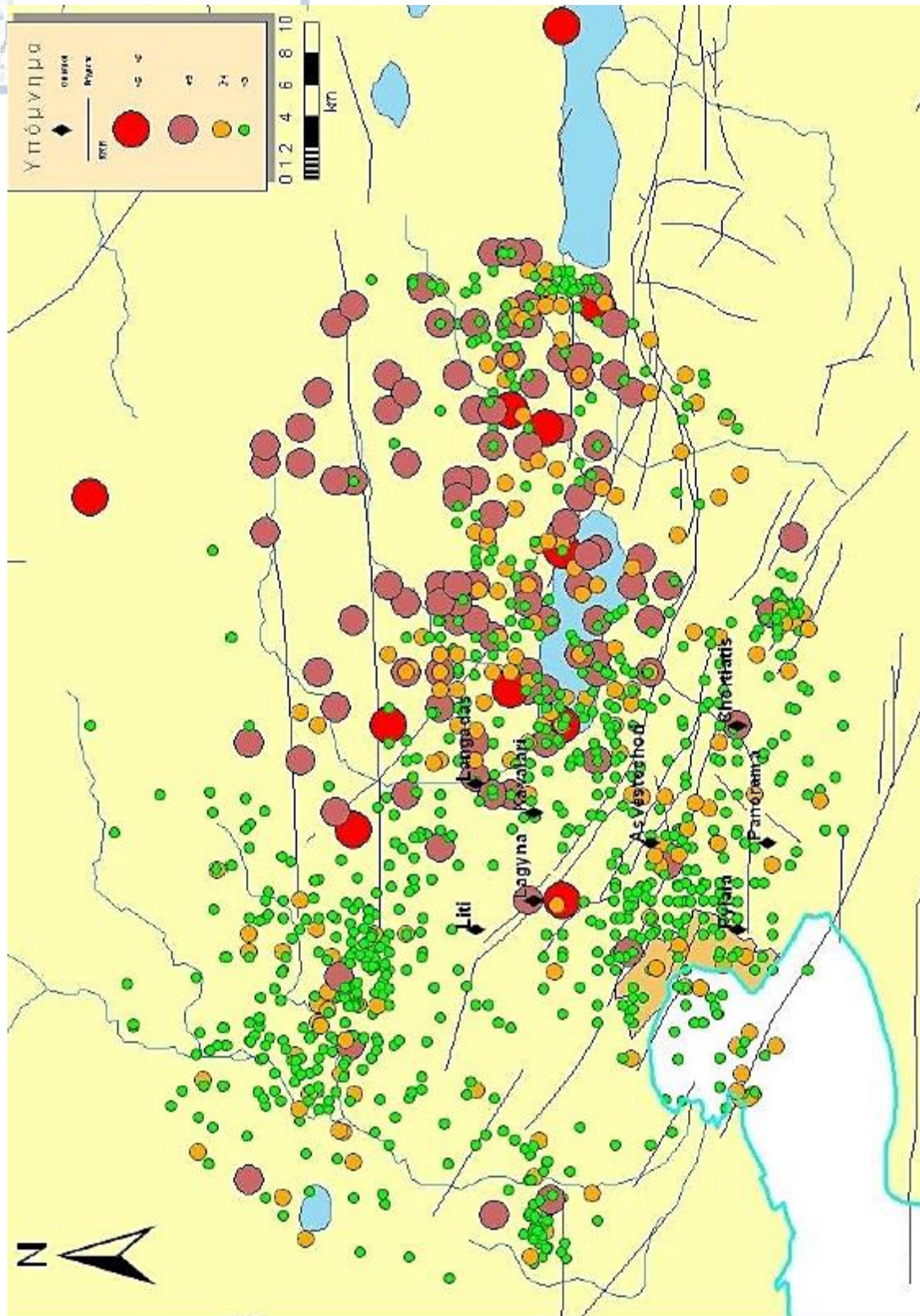
Ανάμεσα στις δυο λίμνες, Κορώνεια και Βόλβη, της Μυγδονίας λεκάνης λειτουργεί από το 1993 έως σήμερα ένα τρισδιάστατο δίκτυο επιταχυνσιογράφων, γνωστό ως Euroseistest, με συντονισμό του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ. (Ε.Ε.Θ.Γ.Σ.Μ. - Α.Π.Θ.) και συμμετοχή του ΙΤΣΑΚ. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 20 ψηφιακούς επιταχυνσιογράφους τριών συνιστωσών οι οποίοι αναπτύσσονται σε διεύθυνση ΝΔ- ΒΑ και ΒΒΔ- ΝΝΑ (βλ. Εικόνα 29). Οι περισσότεροι επιταχυνσιογράφοι είναι επιφανειακοί, ενώ οι υπόλοιποι είναι εγκατεστημένοι στις θέσεις PRO και TST σε διάφορα βάθη μέσα σε γεωτρήσεις και εντός διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών που συναντώνται στην περιοχή.



Εικόνα 28: Χάρτης όπου εμφανίζονται το μόνιμο σεισμομετρικό δίκτυο του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. (τρίγωνα) και το προσωρινό δίκτυο που λειτούργησε από τον 7/2001 μέχρι τον 6/2005 για τις ανάγκες του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος Euroseisrisk. (2nd Annual Euroseisrisk Report, 2003)



Εικόνα 29: Σχηματική αναπαράσταση τοποθέτησης του τρισδιάστατου δικτύου επιταχυνσιογράφων Euroseisrisk στην επιφάνεια του εδάφους και σε διάφορα βάθη εντός γεωτρήσεων (<http://www.itsak.gr>)



Εικόνα 30: Σεισμοί και μικροσεισμοί που έγιναν στην ευρύτερη περιοχή της περιοχής μελέτης (Λαγυνά). Οι κύκλοι κόκκινου χρώματος είναι τα επίκεντρα μεγάλων και καταστρεπτικών σεισμών με $M > 6.0$. Οι κύκλοι μωβ χρώματος αντιπροσωπεύουν επίκεντρα σεισμών με $M \geq 5.0$. Εμφανίζονται επίκεντρα σεισμών με $M > 3.0$ και συμβολίζονται με πορτοκαλί χρώμα, αλλά και πληθώρα μικροσεισμών με $M < 3.0$ με πράσινο χρώμα. (Χατζηπέτρος, 2006)

Με δεδομένα από τα παραπάνω καταγραφικά δίκτυα που αναφέρθηκαν και όπως φαίνεται και στον χάρτη της Εικόνας 30, χαρτογραφήθηκαν για τις ανάγκες μελέτης (Χατζηπέτρος, 2006) τα επίκεντρα σεισμών διαφόρων μεγεθών και μικροσεισμών που καταγράφηκαν στο ανατολικό τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης απέχοντας περίπου 25Km περιμετρικά του οικισμού του Λαγκαδά. Παρατηρούμε ότι τα επίκεντρα σεισμών με μεγάλα μεγέθη, $M > 5.0$, συγκεντρώνονται στο κεντρικό τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης, ανάμεσα στις δυο λίμνες, και προς τη περιοχή της Κορώνειας λίμνης. Από την άλλη, τα επίκεντρα σεισμών με μεγέθη $M < 5.0$ και των μικροσεισμών φαίνεται να συγκεντρώνονται σε τέσσερα γεωγραφικά σημεία. Εμφανίζεται συκέντρωση σεισμικών επίκεντρών στο ΔΒΔ τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης, καθώς και στο ΝΝΔ κομμάτι της. Ακόμη, πληθώρα σεισμικών επικέντρων εντοπίζεται στην περιοχή ανάμεσα στις δυο λίμνες, αλλά και στο χώρο κοντά στους οικισμούς Λαγκαδά, Καβαλάρη, Λαγυνά. Τέλος, εντοπίζονται στον χάρτη δυο μακρινά σεισμικά επίκεντρα τα οποία αντιστοιχούν στους σεισμούς του 620μ.Χ. και 1932 έτσι ώστε να αποδοθεί μια πιο αντιπροσωπευτική εικόνα της περιοχής μελέτης, περιλαμβάνοντας όλους τους ισχυρούς σεισμούς που συνέβησαν από τους ιστορικούς χρόνους.

Ειδικότερα, όσον αφορά την περιοχή μελέτης, τον οικισμό των Λαγυνών, παρατηρούνται πολύ κοντά σε αυτόν δυο επίκεντρα ισχυρών σεισμών με $M = 5.5$ και $M = 4.2$, η γένεση των οποίων έλαβε χώρα στις 5 Νοεμβρίου 1905 και 28 Σεπτεμβρίου 1978 αντίστοιχα (Χατζηπέτρος, 2006). Οι δυο αυτοί σεισμοί οφείλονται πιθανά στο ενεργό ρήγμα Αγίου Βασιλείου (F- AV) που διατρέχει τον οικισμό και αποτελεί προέκταση προς τα δυτικά του ρήγματος Γερακαρούς- Νικομηδινού- Στίβου- Περιστερώνα (F- GNSP).

2.8. Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής

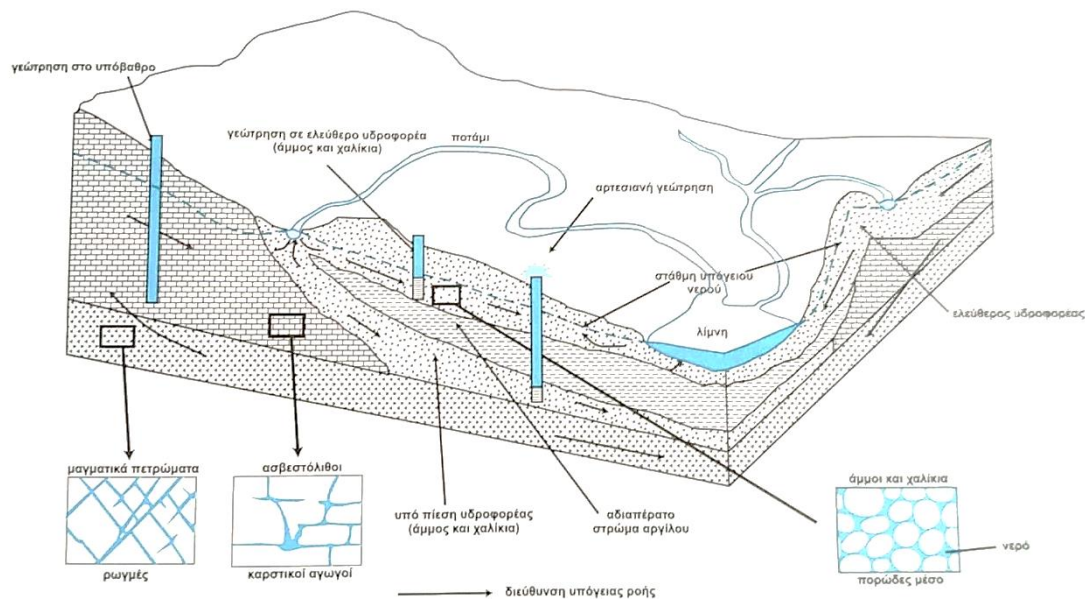
Στην έκταση της Μυγδονίας λεκάνης συναντώνται ελεύθεροι και υπό πίεση υδροφορείς, με τους τελευταίους να δημιουργούνται από την παρουσία στρωμάτων με αδιαπέρατα, αλλά και ημιδιαπερατά υλικά. Τα βάθη των υδροφόρων οριζόντων στην περιοχή διαφοροποιούνται ανάλογα με τα πάχη των περατών σχηματισμών και κυμαίνονται από 20m μέχρι και πάνω από 100m.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εντοπίζονται στην λεκάνη μπορούν να διακριθούν, ανάλογα με την δυνατότητα τους να διεισδύει και να κυκλοφορεί νερό στη μάζα τους, σε:

- ❖ Μικροπερατούς σχηματισμούς, που στη συγκεκριμένη περίπτωση ανήκουν τα κροκαλοπαγή, οι άμμοι, τα Τεταρτογενή κορήματα (Q.cs1) και τα χαλαρά Ολοκαινικά υλικά της έκτασης που εμφανίζονται με τη μορφή αλλουβιακών ριπιδίων (al). Γενικότερα, κοκκώδεις, αδρομερείς σχηματισμοί που η αποθήκευση του νερού στη μάζα τους γίνεται μέσω διακένων, δηλαδή φέρουν πρωτογενές πορώδες.
- ❖ Μικροπερατούς σχηματισμούς, δηλαδή γεωλογικά στρώματα συνεκτικά που χαρακτηρίζονται από την παρουσία δευτερογενούς πορώδους. Πρόκειται για διαρρηγμένα πετρώματα του υποβάθρου της Σερβομακεδονικής και Περιοδικής ζώνης, αλλά και συνεκτικά κροκαλοπαγή και ψαμμίτες που έχουν

υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση, ενώ επίσης συναντώνται και καρστικοί υδροφορείς στα ανθρακικά πετρώματα.

- ❖ Αδιαπέρατους σχηματισμούς. Στη περιοχή μελέτης εντοπίζονται αργιλικό και μαργαϊκό ορίζοντες που χαρακτηρίζονται από υψηλή στεγανότητα και στην παρουσία των οποίων οφείλεται η λειτουργία φαινομένων αρτεσιανισμού.
- ❖ Ημιπερατούς σχηματισμούς. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα ερυθροστρώματα του σχηματισμού Γερακαρούς της Προμυγδονιακής ομάδας με πάχη που ανά θέσεις ξεπερνάνε τα 100m. Εμφανίζουν διακυμάνσεις στην περατότητα από ημιπερατά έως και αδιαπέρατα λόγω της σύστασής τους που εναλλάσσεται ανάμεσα σε κροκαλοπαγή, άμμο, ιλύ και άργιλο.



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση διαφόρων ειδών υδροφορέων σε σχέση με το πορώδες που εμφανίζουν. Οι περιπτώσεις καλύπτουν όλες τις εμφανίσεις υδροφόρων στη Μυγδονία λεκάνη. (Βουδούρης, 2017)

Οι ελεύθεροι υδροφορείς της Μυγδονίας λεκάνης εμπλουτίζονται από την βροχόπτωση αλλά και την επιφανειακή απορροή από ορεινότερα σημεία μέσω ποταμοχειμάρων. Από την άλλη, ο εμπλουτισμός των υδροφόρων στρωμάτων που βρίσκονται σε βάθος επιτυγχάνεται μέσω τεκτονικών ασυνεχειών σε σχηματισμούς και πετρώματα του υποβάθρου της περιοχής. Ωστόσο, μεταξύ των διαφόρων επιμέρους υδροφόρων οριζώντων που αναπτύσσονται, φαίνεται να υπάρχει υδραυλική επικοινωνία καθώς τα αργιλικά και μαργαϊκά στρώματα, που συνιστούν δάπεδο και οροφή για τα υδροφόρα στρώματα, δεν είναι συνεχή σε όλη την έκταση της λεκάνης.

Η Κορώνεια λίμνη στα δυτικά της Μυγδονίας λεκάνης αποτελεί ένα αβαθή, φρεάτιο υδροφόρο ορίζοντα ο οποίος έχει σχεδόν εξαντληθεί. Το φαινόμενο που παρατηρείται στην περιοχή με την εμφανή πτώση στάθμης οφείλεται σε ένα συνδυασμό υπεράντλησης και τεκτονικής δραστηριότητας. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.2 στην ευρύτερη περιοχή μελέτης λειτουργούν αλόγιστα και συνεχώς πάνω από 2000 γεωτρήσεις, χρήση η οποία μπορεί να οδηγήσει ενδεχομένως και σε φαινόμενα καθιζήσεων. Από την άλλη, λόγω της έντονης τεκτονικής καταπόνησης της περιοχής

μελέτης είναι έντονη η ανάπτυξη δευτερογενούς πορώδους στους σχηματισμούς και στα πετρώματα. Το δευτερογενές πορώδες εκδηλώνεται με τη μορφή επιφανειακών διαρρήξεων/ ρηγμάτων που επιτρέπουν την διέλευση του νερού από τα ανώτερα στρώματα των ελεύθερων υδροφόρων οριζόντων σε κατώτερους υδροφορείς, κατάσταση που επιφέρει μείωση της στάθμης στην επιφανειακή υδάτινη έκταση.

3. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

3.1. Η τεχνική της μεθόδου της σεισμικής διάθλασης

Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης είναι μια από τις πρώτες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό γεωλογικών δομών στο υπέδαφος που ευνοούν την ανάπτυξη υδρογονανθράκων, αλλά και αλατούχων δομών. Ωστόσο, πριν από την εφαρμογή της στην γεωφυσική διασκόπηση χρησιμοποιούνταν από τους σεισμολόγους για την μελέτη της δομής του εσωτερικού της Γης. Πέρα από τις εφαρμογές αυτές που αναφέρθηκαν, η συγκεκριμένη τεχνική είναι αποτελεσματική για τον προσδιορισμό ελαστικών παραμέτρων των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών που συναντώνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, για την χαρτογράφηση και τοπογραφία του υδροφόρου ορίζοντα, τον εντοπισμό ζωνών ρηγμάτωσης, αλλά και της θέσης υπόγειων εγκοίλων. Επίσης, με βάση παραμέτρους όπως είναι η σεισμική ταχύτητα των πετρωμάτων, οι ελαστικές παράμετροι και η πυκνότητα των γεωλογικών στρωμάτων μπορεί να καθοριστεί η ποιότητα του πετρώματος και η δυνατότητα εκσκαψιμότητάς του, δεδομένα που μπορούν να βρουν χρήση στα τεχνικά έργα.

Με την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης επιδιώκεται ο καθορισμός των μεταβολών των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στα διάφορα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης. Η γνώση της μεταβολής της ταχύτητας οδηγεί στον εντοπισμό γεωλογικών δομών οι οποίες παρουσιάζουν οικονομικό ενδιαφέρον, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αλλά δίνει και ικανοποιητικά αποτελέσματα στην αποτύπωση της γεωλογικής δομής, της στρωματογραφίας αλλά διακρίνει και τους διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς με βάση τη τιμή της ταχύτητας, ενώ εντοπίζει και το υπόβαθρο (βλ. Πίνακα 2). 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 στο νόμο της διάθλασης και στο Νόμο Snell. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το νόμο αυτό όταν η σεισμική ακτίνα προσπέσει σε μια διαχωριστική επιφάνεια, η οποία μπορεί να αναπαριστά την επαφή διαφορετικών σχηματισμών, τότε στην περίπτωση που η ταχύτητα του βαθύτερου στρώματος είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του υπερκείμενου θα ισχύει ότι η γωνία της διαθλώμενης ακτίνας, δηλαδή της σεισμικής ακτίνας που περνάει από την διαχωριστική επιφάνεια, θα είναι μεγαλύτερη από την γωνία της προσπίπτουσας ακτίνας έως και παράλληλη με την διαχωριστική επιφάνεια (ορική διάθλαση). Τα κύματα αφού διαδοθούν στα επιφανειακά στρώματα της Γης καταγράφονται στην επιφάνεια από σεισμόμετρα κατασκευασμένα ειδικά για αυτό το σκοπό, τα οποία ονομάζονται γεώφωνα. Με βάση τις αναγραφές αυτές κατασκευάζονται καμπύλες χρόνων διαδρομής, δηλαδή γραφικές παραστάσεις των χρόνων διαδρομής των κυμάτων σε συνάρτηση με την οριζόντια απόσταση, τα οποία διαγράμματα παίρνουμε σε ηλεκτρονική μορφή από τα καταγραφικά όργανα και επεξεργαζόμαστε, αφού έχει προηγηθεί ο εντοπισμός των πρώτων αφίξεων των διαθλώμενων κυμάτων, διαδικασία που φέρει ως τελικό αποτέλεσμα τον υπολογισμό των ταχυτήτων διάδοσης σε συνάρτηση με το βάθος. Όπως και οι άλλοι μέθοδοι σεισμικής διασκόπησης, έτσι και η σεισμική διάθλαση βασίζεται στις απλές βασικές αρχές που διέπουν την διάδοση των κυμάτων και αυτές 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», ενώ η αρχή Fermat ορίζει 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 ακολουθεί αυτόν που απαιτεί τον ελάχιστο χρόνο».

Υλικό	V _p (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 2 km)	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

Πίνακας 2: Ενδεικτικές ταχύτητες επιμηκών κυμάτων (P) σε διάφορα πετρώματα της Γης. (Παπαζάχος, 1996; Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013)

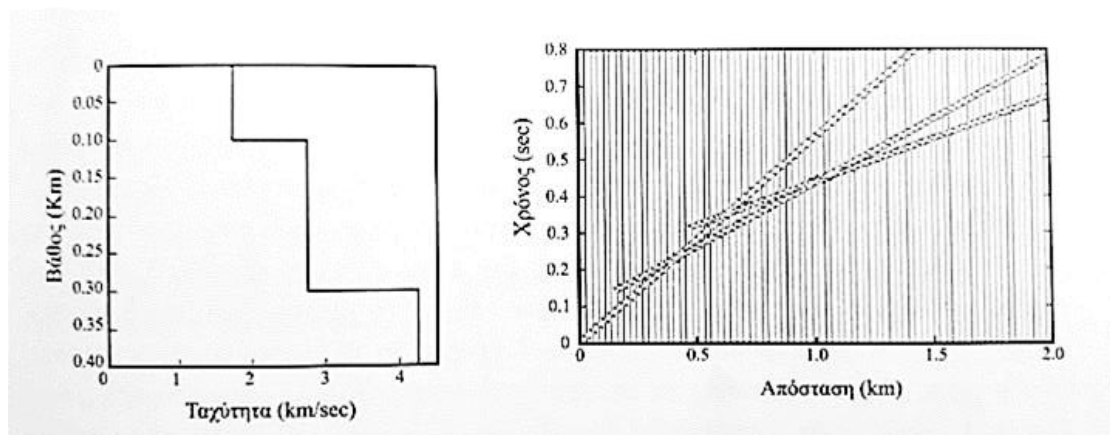
Όσον αφορά την διαδικασία λήψης μετρήσεων στην ξηρά, αφού προηγηθεί έρευνα γραφείου σχετικά με τον σχεδιασμό των παραμέτρων που απαιτούνται για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα στην έρευνα, τοποθετούνται τα γεώφωνα ο αριθμός και το ανάπτυγμα των οποίων εξαρτάται από τον στόχο της μελέτης. Τα γεώφωνα πρέπει να τοποθετούνται με την όσο πιο δυνατόν μικρότερη απόκλιση από την κατακόρυφη έτσι ώστε να καταγράφεται σωστά η κατακόρυφη συνιστώσα του σήματος. Επίσης, για να καταγραφεί η πραγματική κίνηση του εδάφους εφαρμόζεται στο σύστημα δύναμη ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης της ιδιοταλάντωσης του πηνίου. 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», σεισμικούς 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 της σεισμικής διάθλασης φέρει τα πλεονεκτήματα ότι μπορεί να χαρτογραφήσει πολύ ρηχές επιφάνειες και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιοχές με μορφολογικές ανωμαλίες. Ωστόσο εμφανίζει κάποια μειονεκτήματα και περιορισμούς. Ειδικότερα, τα βάθη διερεύνησης και η διακριτική ικανότητα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι μικρότερα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους σεισμικής διασκόπησης, όταν χρησιμοποιούμε την ίδια σεισμική πηγή. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το βάθος που μπορεί να χαρτογραφηθεί εξαρτάται από την ισχύ της σεισμικής

πηγής, αλλά και από την γεωμετρία μεταξύ πηγής και γεωφώνων. Από τη στιγμή που η τεχνική της σεισμικής διάθλασης αξιοποιεί μόνο τις πρώτες αφίξεις σε μια σεισμική καταγραφή για να αποτυπωθούν όλα τα γεωλογικά στρώματα θα πρέπει να καταγραφεί σωστά ένας αριθμός πρώτων αφίξεων από όλες τις διεπιφάνειες που συναντώνται. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει η ταχύτητα να αυξάνεται συνεχώς με το βάθος και τα στρώματα να έχουν ένα επαρκές πάχος για να εντοπιστούν. Υπάρχουν περιπτώσεις που κάποια στρώματα δεν καταγράφονται ή δεν ξεχωρίζουν από τα υπερκείμενα τους. Το κατώτερο στρώμα μιας διεπιφάνειας δύναται να έχει χαμηλότερη ταχύτητα, δηλαδή να υπάρχει αναστροφή ταχυτήτων των στρωμάτων με το βάθος, και συνεπώς το στρώμα αυτό το οποίο καλείται «τυφλό στρώμα» δεν εντοπίζεται. Σε άλλες περιπτώσεις, ενώ η ταχύτητα αυξάνεται με το βάθος, δεν καταγράφονται συγκεκριμένα στρώματα, που καλούνται «κρυμμένα στρώματα», λόγω μικρού πάχους ή λόγω του ότι η αύξηση της ταχύτητας στην οροφή ενός στρώματος είναι μικρή σε σχέση με αυτή στα βαθύτερα στρώματα. Προκειμένου, λοιπόν, η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα θα πρέπει να τηρούνται τρεις βασικές προϋποθέσεις (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013):

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

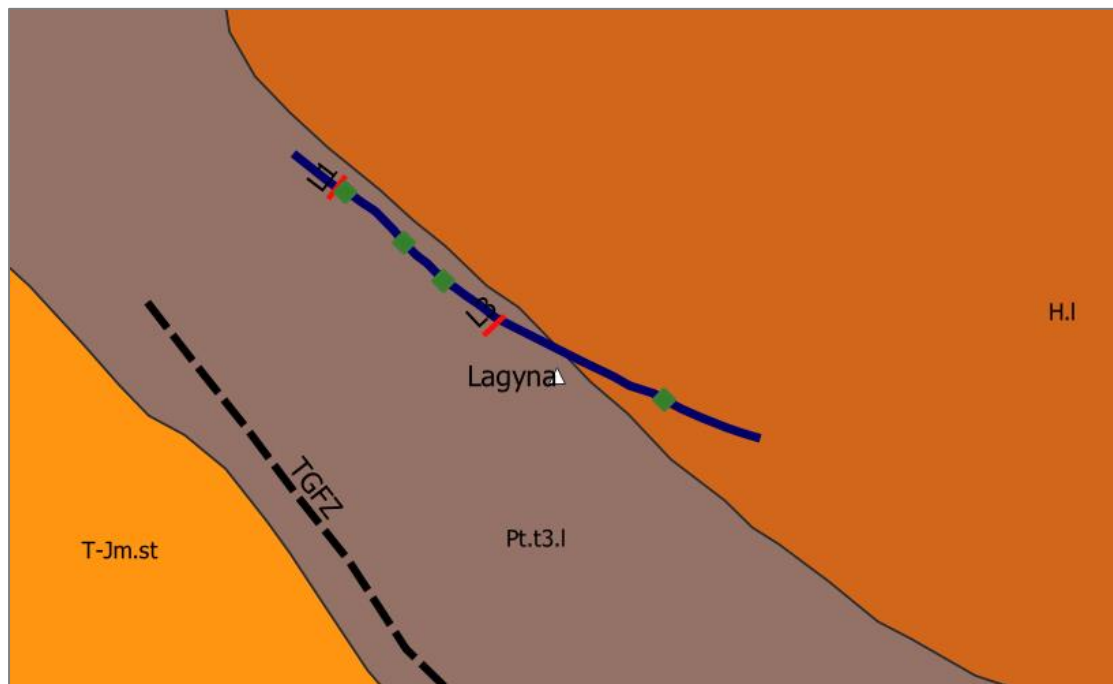
Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι η πλευρική διακριτική ικανότητα μιας σεισμικής γραμμής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των γεωφώνων, ενώ η κατακόρυφη διακριτική ικανότητα εξαρτάται από το πάχος των γεωλογικών στρωμάτων το οποίο θα πρέπει να είναι επαρκές.



Σχήμα 10: Μοντέλο ταχυτήτων με τρία στρώματα και τα συνθετικά σειсмоγράμματα με τις διαθλάσεις που θα καταγράφονταν. Τηρούνται και οι τρεις βασικές προϋποθέσεις για την λήψη αξιόπιστων αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή της σεισμικής διάθλασης. (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013)

3.2. Εξοπλισμός, σχεδιασμός και λήψη μετρήσεων σεισμικής διάθλασης

Η περιοχή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι ο οικισμός των Λαγυνών. Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν μετρήσεις σεισμικής διάθλασης σε δυο τομές οι οποίες φέρουν διεύθυνση NNΔ -BBA και είναι τοποθετημένες σχεδόν κάθετα στη τεκτονική ασυνέχεια, όπως αυτή χαρτογραφήθηκε από τον Χατζηπέτρο το 2006 και φαίνεται στην Εικόνα 1, και η οποία προκάλεσε τις ρωγμές στα κτίρια του οικισμού. Τα δεδομένα της πρώτης τομής λήφθηκαν από την σεισμική γραμμή, L1 σύμφωνα με τα δεδομένα μας, που αναπτύχθηκε στην δυτική μεριά του καταστήματος «ΕΓΝΑΤΙΑ» (Θέση 1 κατά Χατζηπέτρος, 2006) και είναι αυτά τα οποία θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία και θα δώσουν αποτελέσματα, σε συνδυασμό με την ηλεκτρική τομογραφία, για την αιτία πρόκλησης ρωγμών στα κτίρια. Η δεύτερη σεισμική γραμμή, αναφερόμενη ως L3 στη παρούσα εργασία, που αναλύθηκε από άλλους προπτυχιακούς φοιτητές βρίσκεται κοντά στη Θέση 3 κατά Χατζηπέτρος, 2006. Στην επόμενη Εικόνα 31 που επεξεργάστηκε σε λογισμικό QuantumGIS φαίνεται ακριβώς η περιοχή μελέτης και οι δυο γεωλογικές τομές (L1, L3) που μετρήθηκαν.



Εικόνα 31: Χάρτης επεξεργασμένος σε λογισμικό QuantumGIS, όπου φαίνονται με κόκκινο χρώμα οι τομές σεισμικής διάθλασης και ηλεκτρικής τομογραφίας που πραγματοποιήθηκαν και με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι θέσεις που παρατηρούνται ζημιές σε κατασκευές από τη δράση του ρήγματος, ενώ με μπλε γραμμή σημειώνεται η πιθανή θέση του ρήγματος στις ενδιάμεσες περιοχές. TGFZ: Thessaloniki- Gerakarou Fault Zone, H.I: αμμώδεις 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 Τεταρτογενής σχηματισμούς, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 31. Ο εξοπλισμός που

χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση στη σεισμική γραμμή περιελάμβανε 24 γεώφωνα, ένα σειсмоγράφο Geometrics StrataView 48 καναλιών.



Εικόνα 32: Στη σεισμική γραμμή L3 φαίνεται η τοποθέτηση των γεωφώνων με 2m απόσταση μεταξύ τους και ο σειсмоγράφος Geometrics StrataView 48 καναλιών.

Για τη λήψη των μετρήσεων από τα γεώφωνα χρειάζεται η παραγωγή σεισμικών κυμάτων και αυτή επιτεύχθηκε με τη χρήση σεισμικής σφύρας η οποία έχει βάρος περίπου 3 με 5kg και ο χειριστής την κραδαίνει πάνω σε μια μεταλλική πλάκα, που βρίσκεται σε καλή επαφή με το έδαφος. Η σφύρα συνήθως συνδέεται με το σύστημα καταγραφής με καλώδιο και τη στιγμή που η σφύρα χτυπάει την πλάκα το σύστημα καταγραφής αρχίζει να καταγράφει την εδαφική κίνηση στη θέση των γεωφώνων. Στις φωτογραφίες παρακάτω φαίνεται πως γίνεται η παραγωγή των σεισμικών κυμάτων.



Εικόνα 33: Παραγωγή ελαστικών κυμάτων στην σεισμική γραμμή L1 με χρήση σεισμικής σφύρας. Διακρίνεται και η μεταλλική πλάκα.



Εικόνα 34: Παραγωγή σεισμικών κυμάτων στην σεισμική γραμμή L3 με χρήση σεισμικής σφύρας.



Εικόνα 35: Στη σεισμική γραμμή L3 φαίνεται η τοποθέτηση των γεωφώνων, ο σειсмоγράφος που χρησιμοποιήθηκε, η μεταλλική πλάκα και η σεισμική σφύρα η οποία είναι συνδεδεμένη μέσω καλωδίου με το σύστημα καταγραφής έτσι ώστε όταν γίνεται η κρούση στην μεταλλική πλάκα να πυροδοτεί άμεσα την έναρξη καταγραφής της εδαφικής κίνησης.

Η γραμμή μέτρησης είχε συνολικό μήκος 46m και η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών γεωφώνων των 40Hz ήταν 2m, ενώ το βάθος διασκόπησης έφτασε περίπου τα 6m. Για να έρθουν τα γεώφωνα σε καλή επαφή με το έδαφος, έτσι ώστε να αποφευχθεί τυχόν απώλεια του σήματος, καθαρίστηκε η βλάστηση και στα σημεία που υπήρχε τσιμέντο σκάφτηκε αρχικά τρύπα και ύστερα τοποθετήθηκαν τα όργανα. Οι σεισμικές διαταραχές πραγματοποιήθηκαν σε 25 θέσεις ξεκινώντας 1m πριν το πρώτο γεώφωνο φτάνοντας μέχρι 1m μετά το 24^ο γεώφωνο. Σε κάθε σημείο σεισμικής πηγής

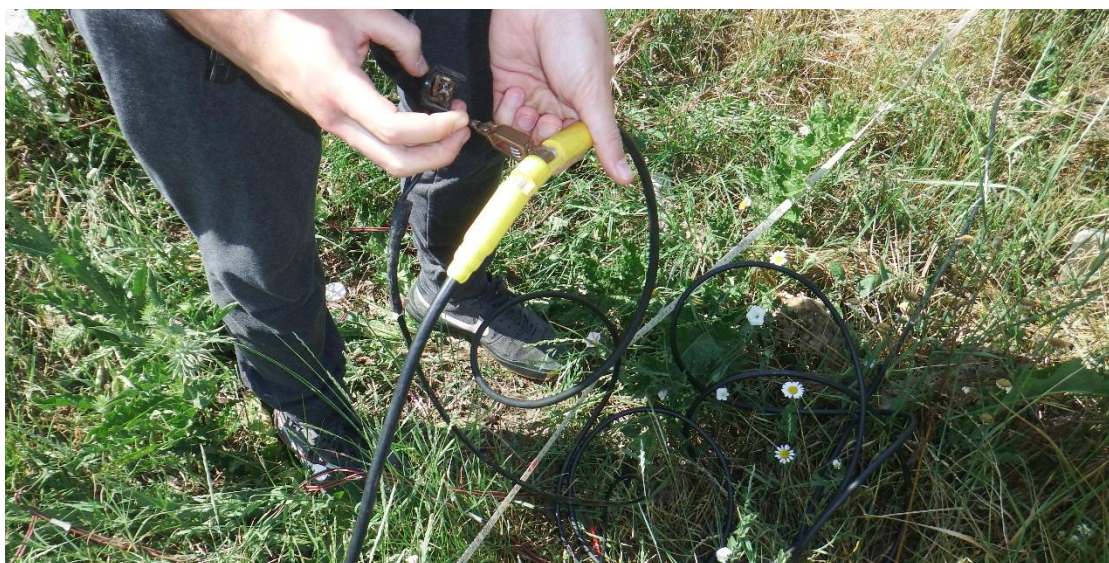
πραγματοποιήθηκαν περίπου 3 με 4 κρούσεις ανά περίπτωση, οι οποίες αθροίστηκαν προκειμένου να ενισχυθεί το τελικό μας σήμα.



Εικόνα 36: Τοποθέτηση των γεωφώνων συχνότητας 40Hz σε όσο καλύτερη επαφή γίνεται με το έδαφος για την σωστότερη καταγραφή του σήματος.



Εικόνα 37: Καλή τοποθέτηση γεωφώνου ύστερα από εκκαθάρισή βλάστησης για την μείωση απώλειας του σήματος.

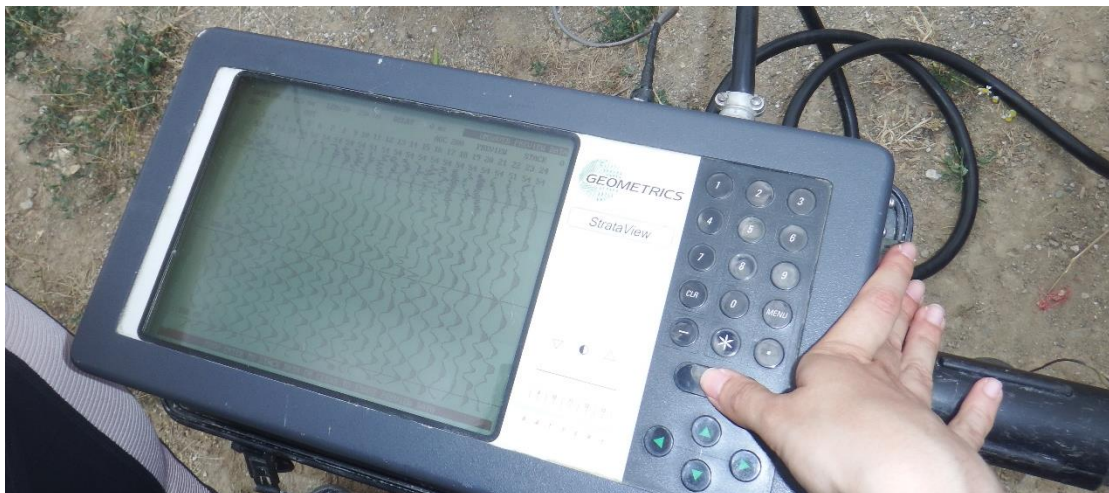


Εικόνα 38: Σύνδεση των γεωφώνων με τον καταγραφέα.

Ο σειсмоγράφος, Geometrics StrataView 48 καναλιών, που χρησιμοποιήθηκε έχει ενσωματωμένο υπολογιστή, οπότε δεν υπάρχει η ανάγκη να συνδέεται επιπλέον με φορητό υπολογιστή, ενώ επίσης το λογισμικό που διαθέτει είναι πολύ εύκολο σε 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 μια μικρή μπαταρία των 12Volts, ενώ επιτυγχάνεται η δημιουργία ρεύματος με ένταση περίπου 5Amps στα μικρά συστήματα, αλλά με την αύξηση των συνδεόμενων 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 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 την δυνατότητα εφαρμογής διαφόρων φίλτρων ανάλογα με την περίπτωση σεισμικού θορύβου.



Εικόνα 39: Χρήση σειсмоγράφου Geometrics StrataView 48 καναλιών υπό την καθοδήγηση διδακτικού- ερευνητικού προσωπικού, όπου φαίνεται στα δεξιά η σύνδεση με την μπαταρία των 12Volts και στα αριστερά του οργάνου η σύνδεση με τα γεώφωνα.



Εικόνα 40: Καταγραφή διάδοσης σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος από τον σειсмоγράφο Geometrics StrataView 48 καναλιών, ύστερα από πρόκληση σεισμικής διαταραχής 1m πριν το πρώτο γεώφωνο στην σεισμική γραμμή L3.

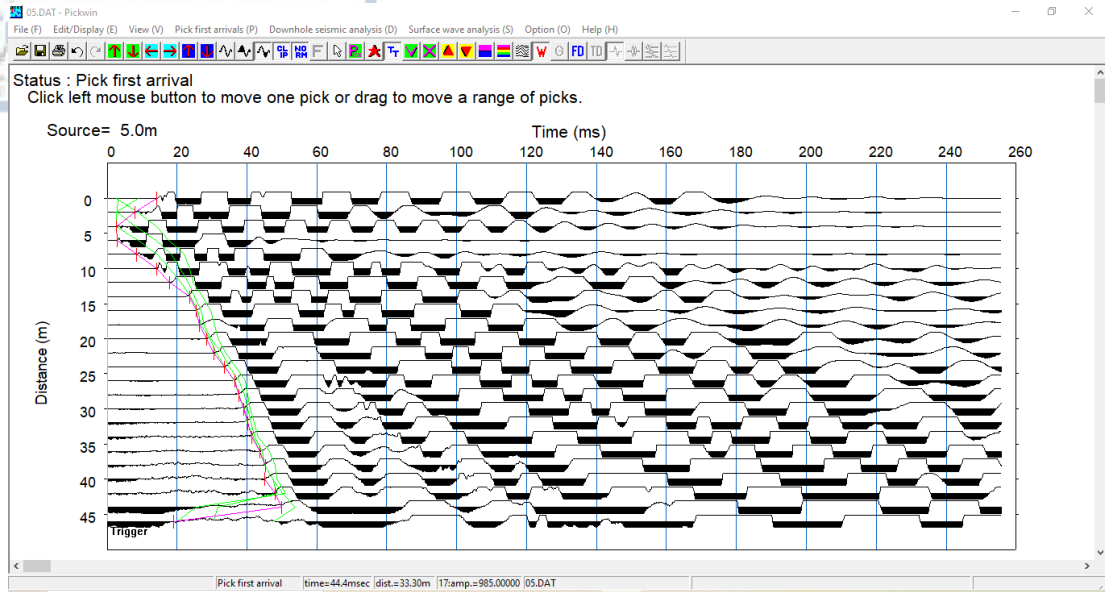
Εφόσον ολοκληρωθεί η συνδεσμολογία του εξοπλισμού, λαμβάνονται οι μετρήσεις από κάθε θέση σεισμικής διαταραχής οι οποίες αποθηκεύονται και μεταφέρονται αργότερα από το σκληρό δίσκο του σειсмоγράφου σε δισκέτα και έπειτα σε φορητό υπολογιστή για να επεξεργαστούν μέσω του λογισμικού Geometrics Seislmager/2D.

3.3. Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σεισμικής διάθλασης

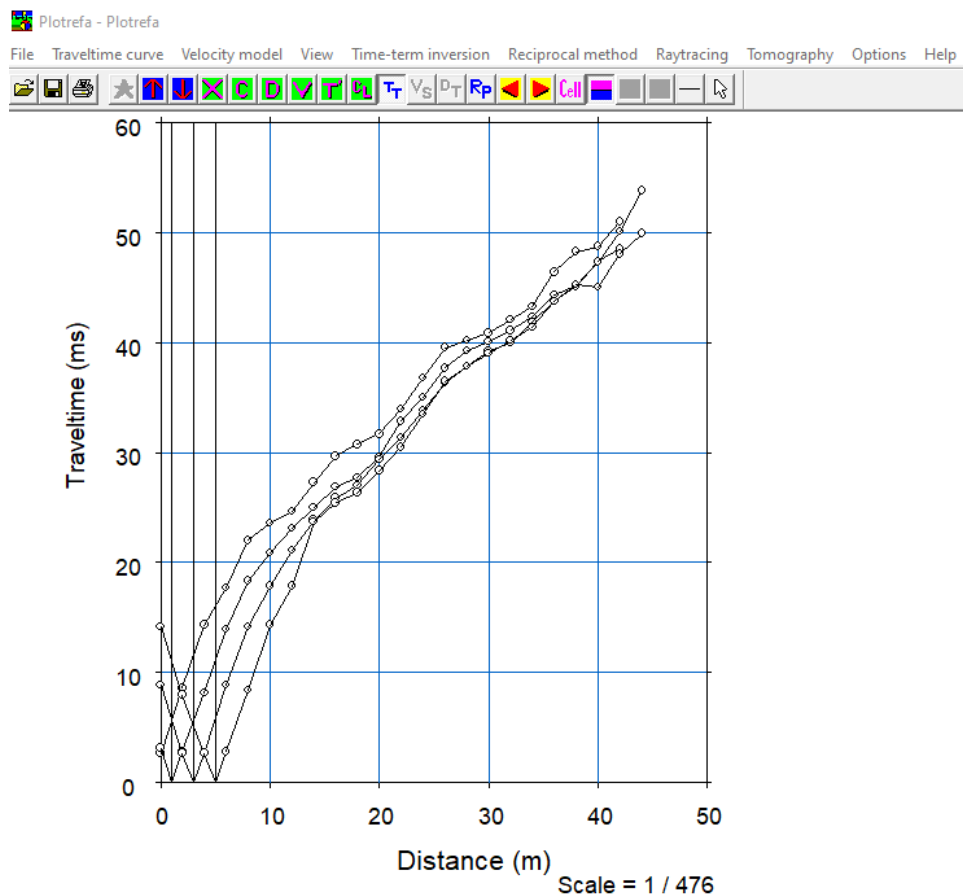
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα δεδομένα που προκύπτουν από κάθε μέτρηση αποθηκεύονται στο σκληρό δίσκο του σειсмоγράφου. Μετέπειτα, στο γραφείο μεταφέρονται τα δεδομένα αυτά σε δισκέτα η οποία έχει συγκεκριμένη χωρητικότητα με αποτέλεσμα να μην μεταφέρονται όλες οι μετρήσεις απευθείας. Σταδιακά αποθηκεύεται από τον σειсмоγράφο στην δισκέτα και στη συνέχεια σε υπολογιστή ένας μικρός αριθμός αρχείων της μορφής π.χ.: 01.DAT, όπου 01 είναι αριθμός που αλλάζει ανάλογα με την κάθε θέση στην οποία προκλήθηκε η σεισμική διαταραχή και που μετατοπίζεται ανά 2m στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Αφού ολοκληρωθεί η μεταφορά και η αποθήκευση των μετρήσεων στον υπολογιστή ξεκινά η επεξεργασία τους μέσω του λογισμικού Seislmager/2D της εταιρείας Geometrics. Η τεχνική της σεισμικής διάθλασης αξιοποιεί μόνο τις πρώτες αφίξεις από μια σεισμική καταγραφή, προκειμένου να αποτυπώσει την γεωλογική δομή του υπεδάφους και να εντοπίσει τις διεπιφάνειες που παρατηρείται αλλαγή ταχύτητας διάδοσης των τεχνητά παραγόμενων σεισμικών κυμάτων. Σκοπός, λοιπόν, της επεξεργασίας με το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ο προσδιορισμός των πρώτων αφίξεων (First picks) των καταγραφών σε κάθε ένα από τα 24 γεώφωνα ξεχωριστά, διαδικασία η οποία επαναλαμβάνεται για κάθε αρχείο DAT/ σεισμική διαταραχή και πραγματοποιείται σε περιβάλλον Pickwin του Seislmager. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται καταγραφές που μετρήθηκαν από διάφορες θέσεις πρόκλησης σεισμικής διαταραχής κατά μήκος τοποθέτησης των γεωφώνων, μαζί με τις πρώτες αφίξεις έτσι όπως επιλέχθηκαν.

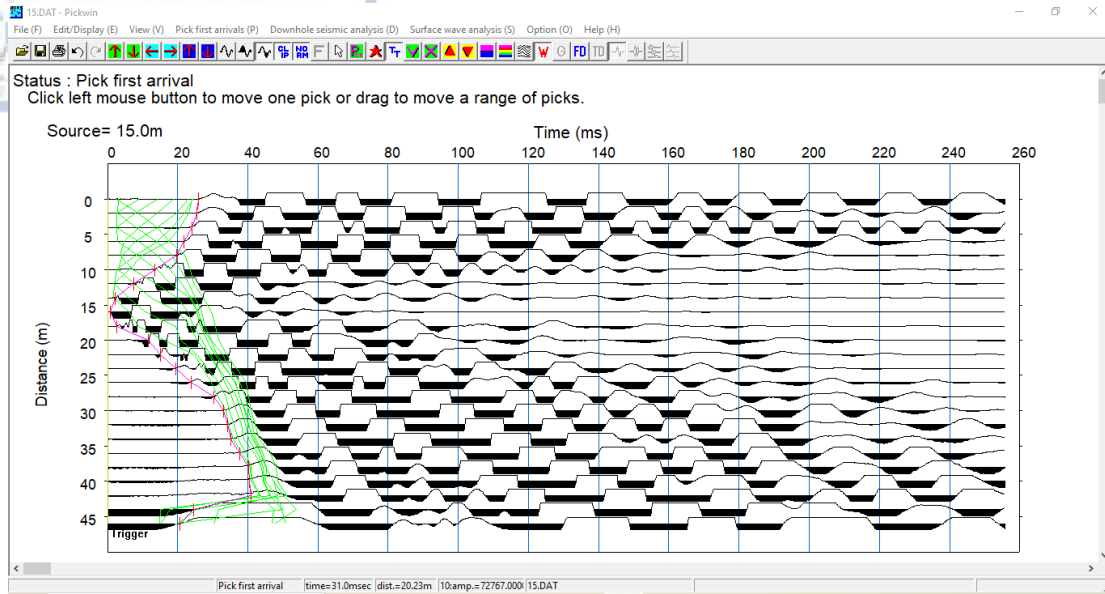
Όταν ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός των πρώτων αφίξεων κατασκευάζονται καμπύλες χρόνων διαδρομής, πρόκειται δηλαδή, όπως ειπώθηκε και στο Κεφάλαιο 3.1., για γραφικές παραστάσεις των χρόνων διαδρομής των κυμάτων σε συνάρτηση με την οριζόντια απόσταση. Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται οι καμπύλες χρόνων διαδρομής που προέκυψαν έπειτα από πρόκληση σεισμικής διαταραχής σε διάφορες θέσεις της σεισμικής γραμμής L1. Οι καμπύλες αυτές αποθηκεύονται ως αρχεία VS τα οποία αποτελούν τα δεδομένα εισόδου στο περιβάλλον Plotrefa μέσα στο λογισμικό του Seislmager για περαιτέρω επεξεργασία που θα οδηγήσει στον υπολογισμό της μεταβολής των ταχυτήτων διάδοσης σε συνάρτηση με το βάθος και συνεπώς στην δημιουργία μοντέλου σεισμικής τομογραφίας, που αναπαριστά την γεωλογική δομή. Η επεξεργασία σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την επιλογή σημείων όπου υπάρχει εμφανής αλλαγή στη κλίση της καμπύλης και σηματοδοτεί την αλλαγή του γεωλογικού στρώματος. Το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει, όπως αναλύεται και στο επόμενο κεφάλαιο, είναι ένα μοντέλο που παρουσιάζει τις ταχύτητες με χρωματική διαφοροποίηση και τα πάχη των γεωλογικών σχηματισμών, αλλά και ενδεχομένως του υποβάθρου, καθώς επίσης εμφανίζεται και η πορεία των διαθλώμενων σεισμικών ακτινών σε κάθε διεπιφάνεια.



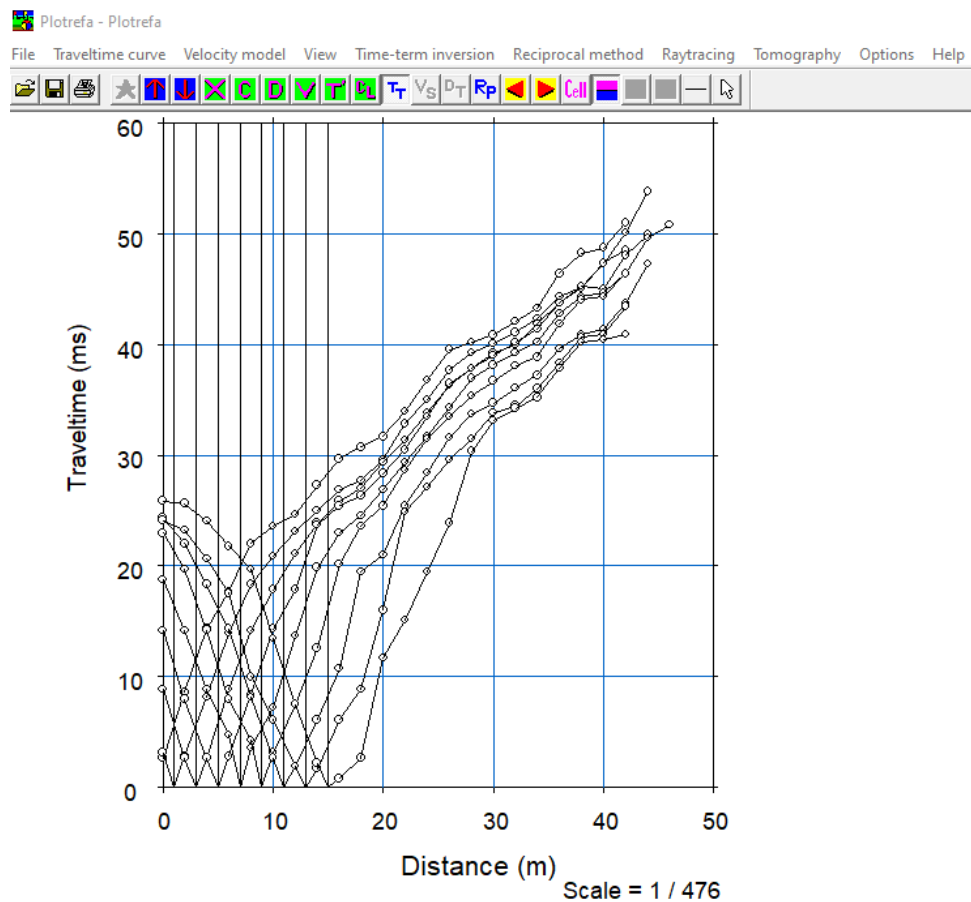
Εικόνα 41: Καταγραφή και πρώτες αφίξεις από την πέμπτη θέση της πρώτης σεισμικής γραμμής L1.



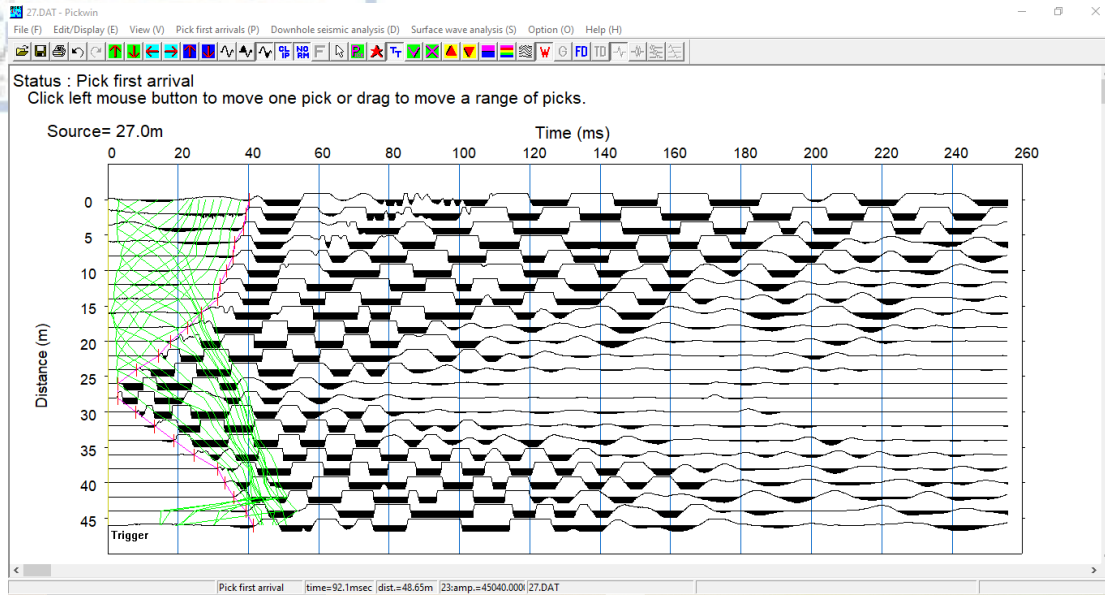
Εικόνα 42: Καμπύλες χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων που καταγράφηκαν από τα πρώτα τρία γεώφωνα της σεισμικής γραμμής L1, σε συνδυασμό με προηγούμενες καταγραφές διαθλώμενων κυμάτων από τα γεώφωνα.



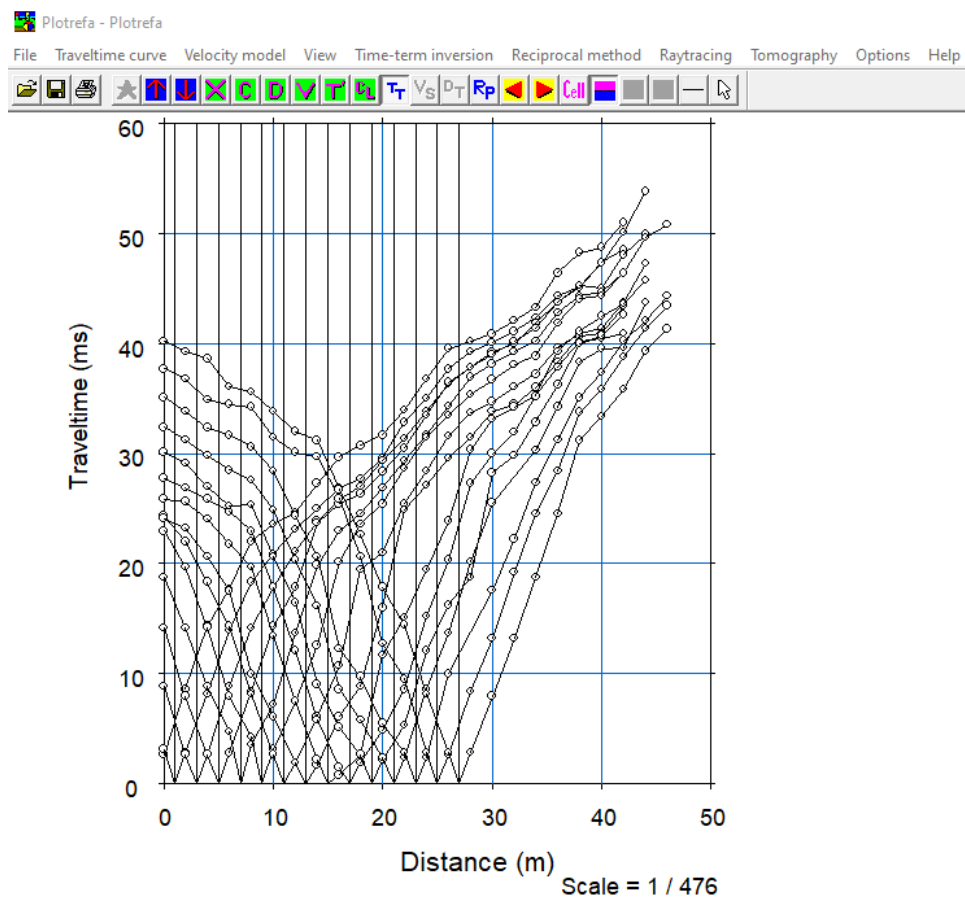
Εικόνα 43: Καταγραφή και πρώτες αφίξεις με την πηγή στο 15^ο μέτρο της πρώτης σεισμικής γραμμής L1.



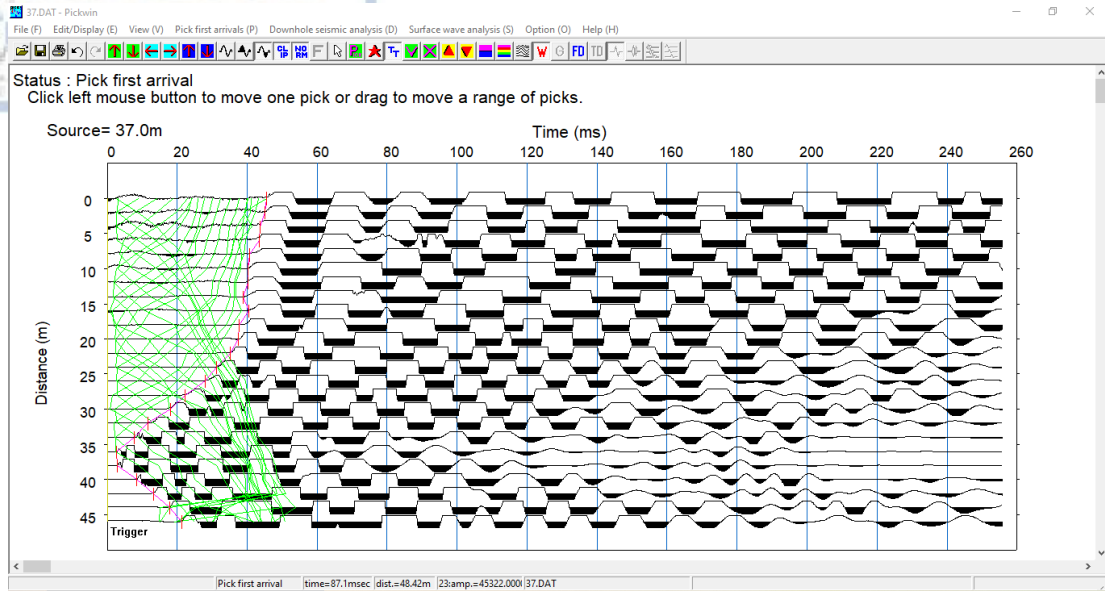
Εικόνα 44: Καμπύλες χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων που καταγράφηκαν με τις πηγές από το 0 μέχρι το 15^ο μέτρο της σεισμικής γραμμής L1, σε συνδυασμό με προηγούμενες καταγραφές διαθλώμενων κυμάτων από τα γεώφωνα.



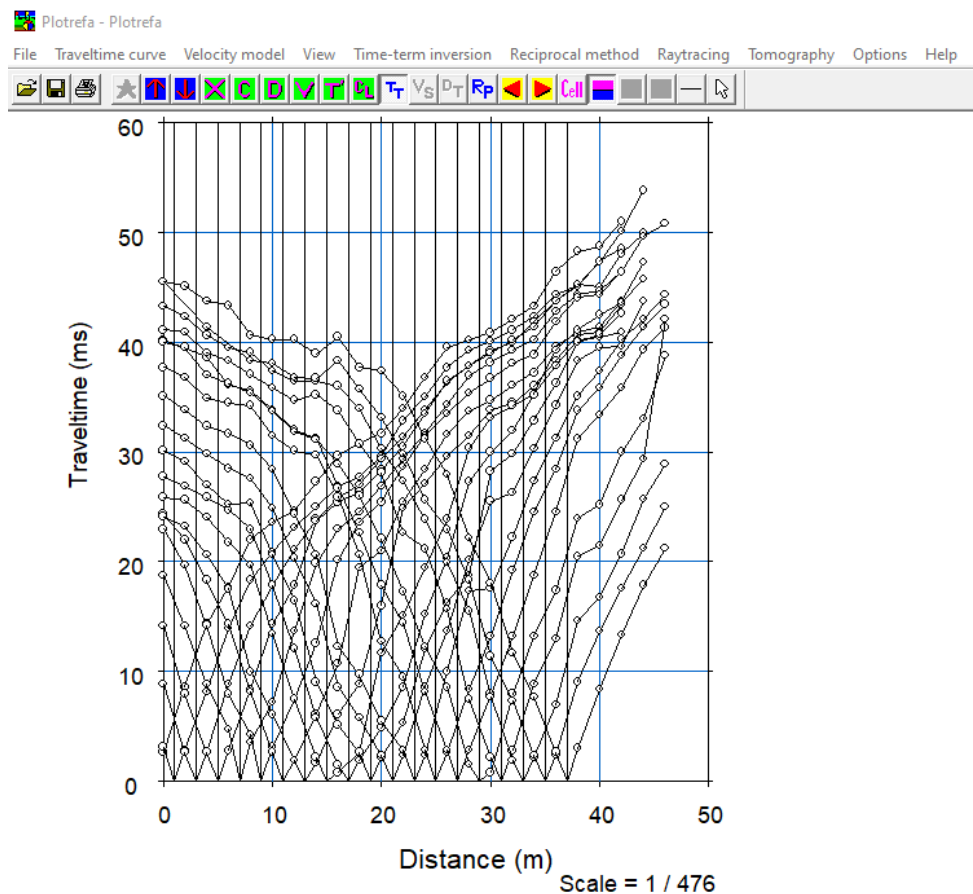
Εικόνα 45: Καταγραφή και πρώτες αφίξεις από την πηγή στο 27^ο μέτρο της πρώτης σεισμικής γραμμής L1.



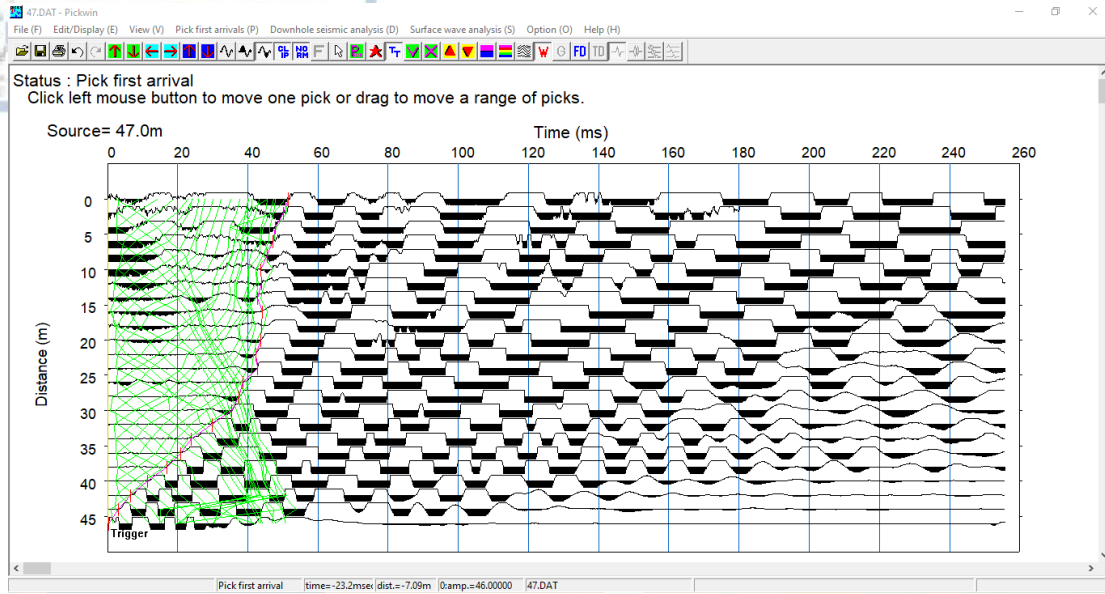
Εικόνα 46: Καμπύλες χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων που καταγράφηκαν με πηγή μέχρι και το 27^ο γεώφωνο της σεισμικής γραμμής L1, σε συνδυασμό με προηγούμενες καταγραφές διαθλώμενων κυμάτων από τα γεώφωνα.



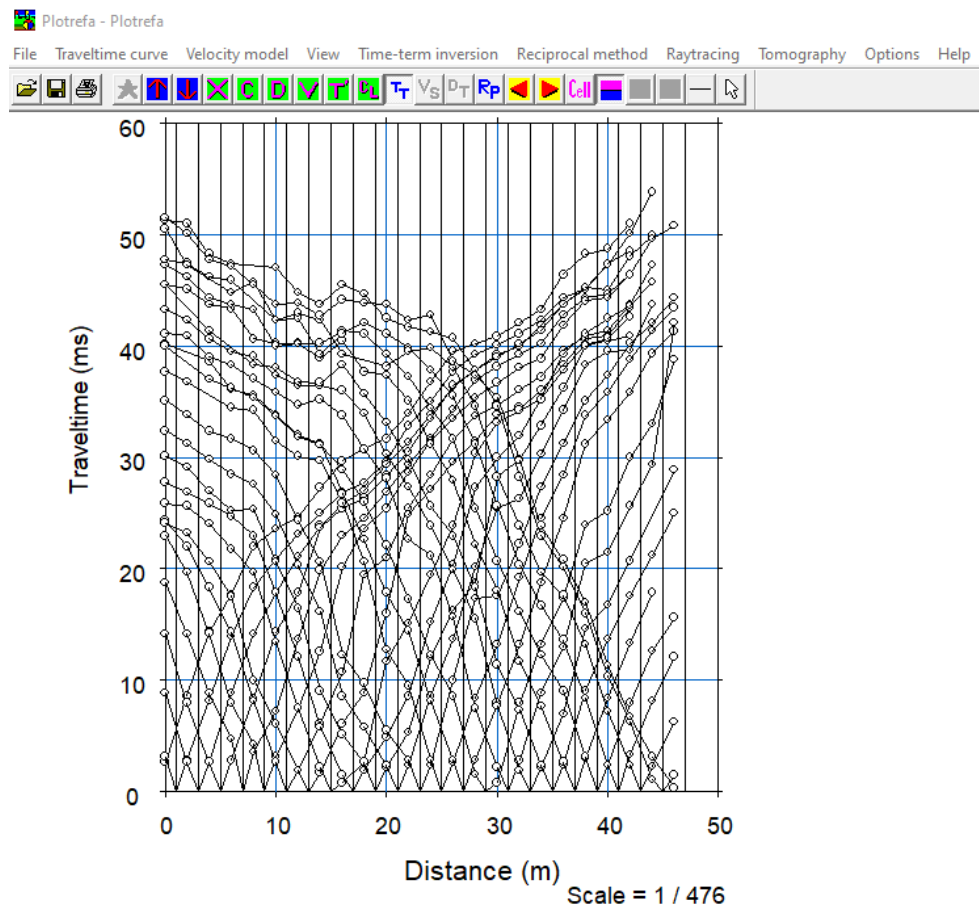
Εικόνα 47: Καταγραφή και πρώτες αφίξεις με την πηγή στο 37^ο μέτρο της πρώτης σεισμικής γραμμής L1.



Εικόνα 48: Καμπύλες χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων που καταγράφηκαν με πηγές μέχρι και το 37^ο μέτρο της σεισμικής γραμμής L1, σε συνδυασμό με προηγούμενες καταγραφές διαθλώμενων κυμάτων από τα γεώφωνα.



Εικόνα 49: Καταγραφή και πρώτες αφίξεις από την τελευταία θέση της πηγής (47^ο μέτρο) της πρώτης σεισμικής γραμμής L1.

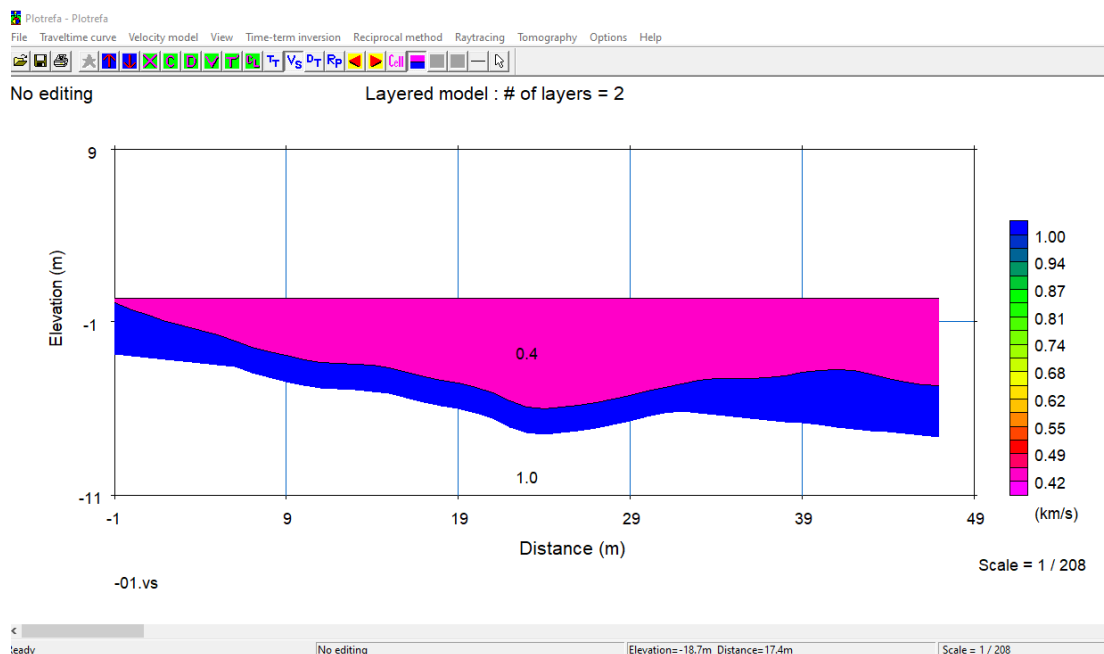


Εικόνα 50: Καμπύλες χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων στην σεισμική γραμμή L1.

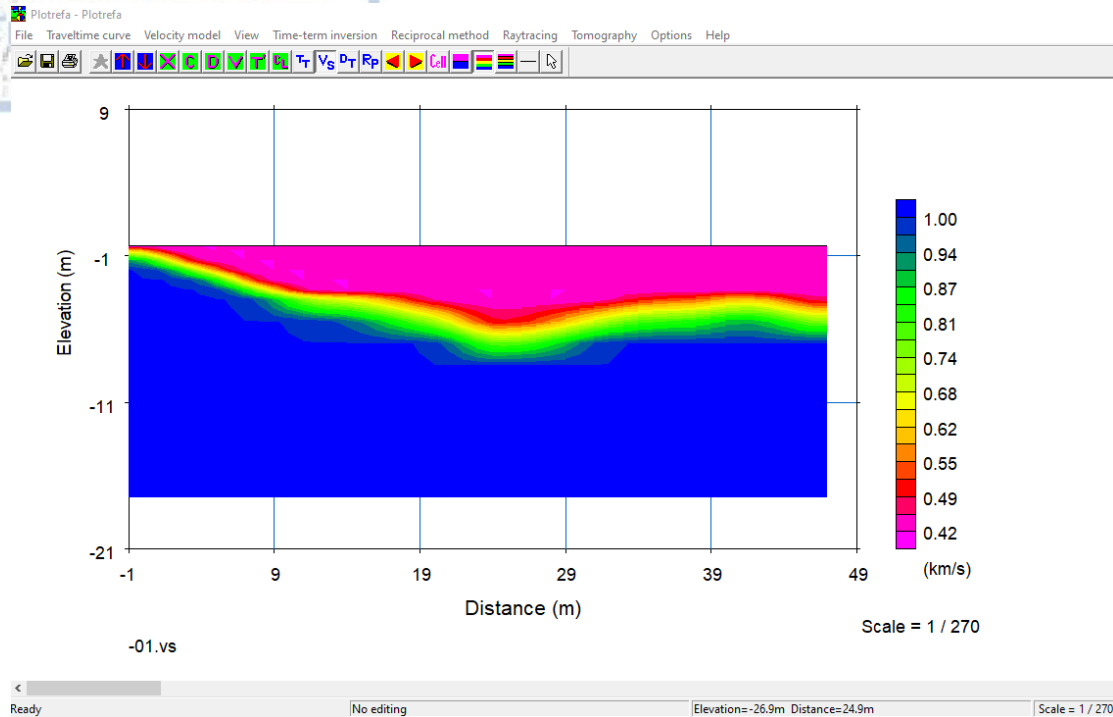
3.4. Αποτελέσματα και ερμηνεία τομής σεισμικής διάθλασης

Έπειτα από εξέταση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την κάθε θέση στην οποία προκλήθηκε σεισμική διαταραχή κατά μήκος της τομής L1 παρατηρήθηκε μια στρωματογραφική διαφοροποίηση με χρωματική κλίμακα «ουρανίου τόξου», η οποία οφείλεται στις διαφορετικές ταχύτητες του κάθε γεωλογικού σχηματισμού που συναντάται στο υπέδαφος. Παρακάτω παρουσιάζονται έπειτα από αντιστροφή το μοντέλο ταχυτήτων διάδοσης των τεχνητά παραγόμενων σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος και οι καμπύλες χρόνων διαδρομής, μαζί με μια γενική ερμηνεία ως προς λιθολογικά και τεκτονικά στοιχεία, αλλά και αναφορές για τα βάθη των στρωμάτων και τις ταχύτητες που τους αντιστοιχούν. Η χρωματική κλίμακα «ουρανίου τόξου» που χρησιμοποιείται φέρει ψυχρά χρώματα (μπλε) και θερμά χρώματα (μωβ). Τα ψυχρά χρώματα αντιστοιχούν σε υψηλές ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και αντιπροσωπεύουν υλικά χαμηλής συνεκτικότητας (άμμο, κροκάλες), ενδεχομένως κορεσμένα σε νερό, αλλά ακόμη, αν οι τιμές ξεπερνάνε τα 1.8Km/s (βλ. Πίνακα 2), μπορεί να γίνεται λόγος για τον εντοπισμό πετρωμάτων του υποβάθρου και ανθρακικών υλικών. Τα θερμά χρώματα αντιστοιχούν σε χαμηλές ταχύτητες διάδοσης των τεχνητά παραγόμενων ελαστικών κυμάτων που υποδεικνύουν την παρουσία αργιλικών ιζημάτων, εδαφοποιημένων υλικών και πιθανώς επιχωματώσεων.

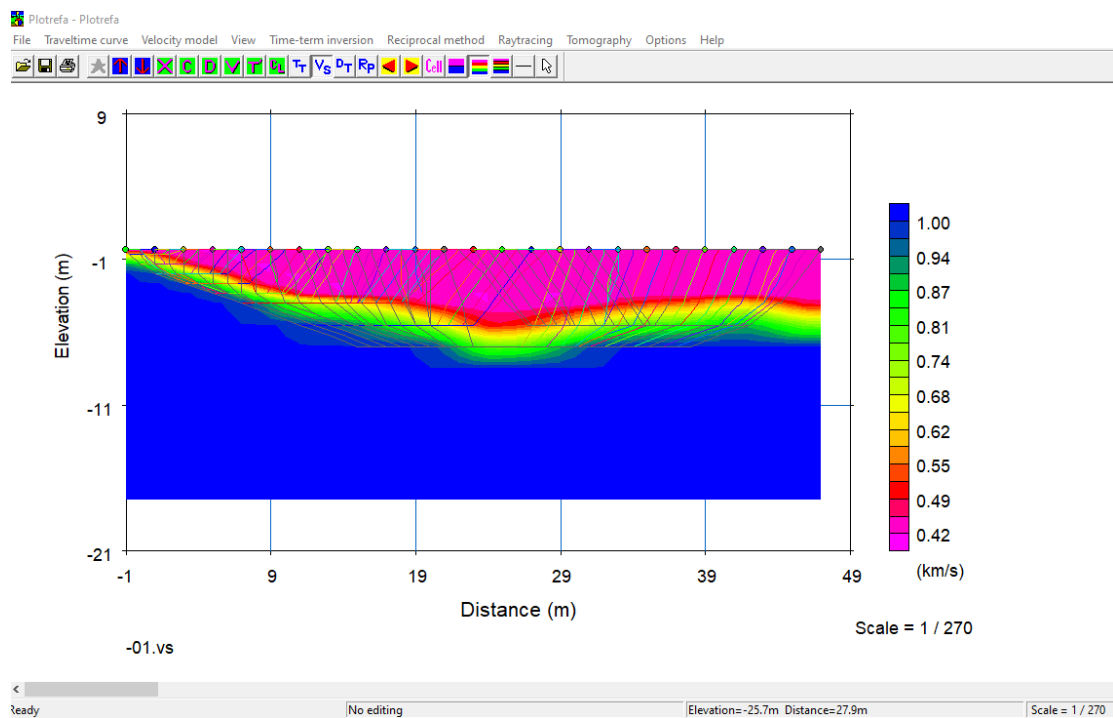
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι μετρήσεις της τομής σεισμικής διάθλασης L1 εκτελέστηκαν μέσα στον οικισμό των Λαγυνών, παράλληλα στη ΒΔ περίφραξη του καταστήματος «ΕΓΝΑΤΙΑ». Η διεύθυνση της τομής ήταν NNΔ -BBA με ομαλό ανάγλυφο και η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων ήταν 2m και το συνολικό μήκος της τομής 46m.



Σχήμα 11: Μοντέλο ταχυτήτων διάδοσης των τεχνητά παραγόμενων σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος έπειτα από αντιστροφή με ανάθεση δυο στρωμάτων. Παρατηρείται ένα ανώτερο στρώμα ταχύτητας 400 m/s και ένα κατώτερο στρώμα με ταχύτητα 1000 m/s.



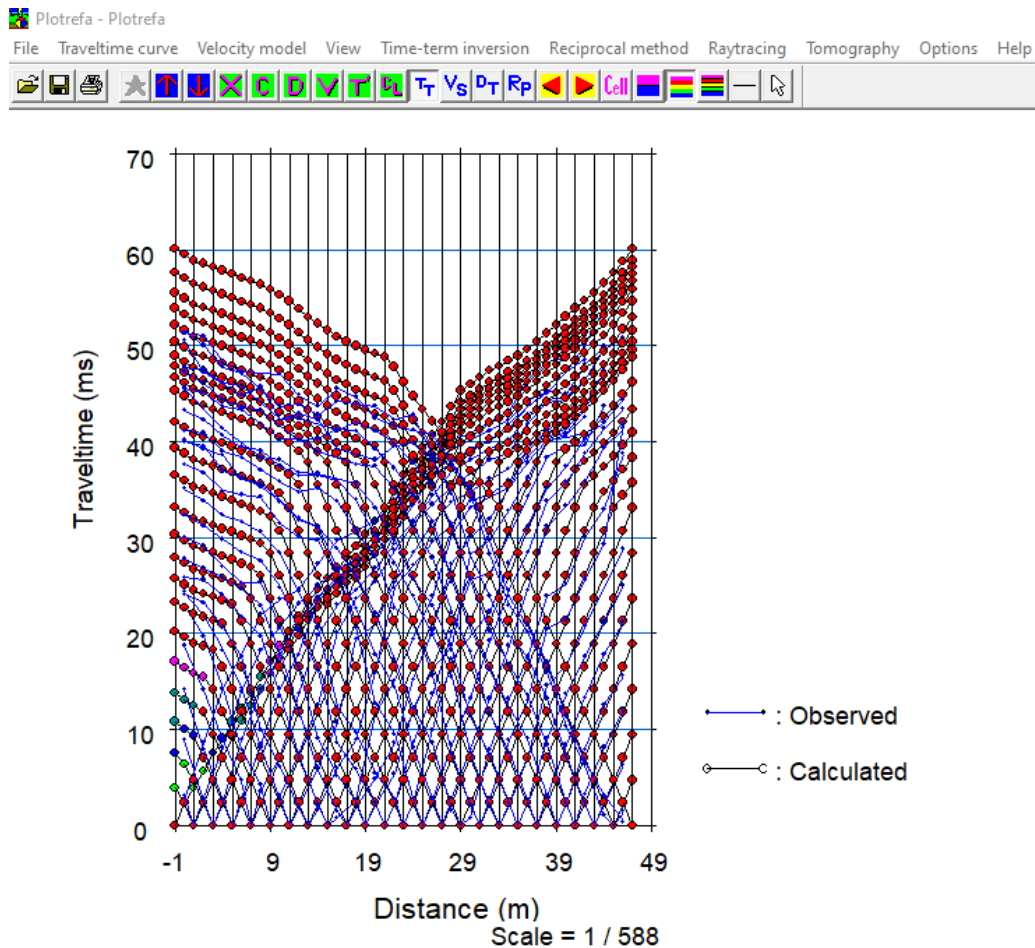
Σχήμα 12: Εικόνα της κατανομής των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος στη θέση L1, ύστερα από Tomography Inversion, όπου προκύπτει μοντέλο ταχυτήτων που αναπαριστά μια πιο κοντινή εικόνα σε αυτή του πραγματικού μοντέλου του εδάφους.



Σχήμα 13: Μοντέλο ταχυτήτων διάδοσης των τεχνητά παραγόμενων σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος, όπου φαίνεται η πορεία ανάκλασης των σεισμικών ακτίνων μέχρι την καταγραφή τους στα τοποθετημένα γεώφωνα.

Η διάδοση των σεισμικών ακτινών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13, είναι συνεχής σε όλο το μήκος της τομής, γεγονός που φανερώνει μια καλή δειγματοληψία του υπεδάφους. Ωστόσο, οι ανακλώμενες ακτίνες φτάνουν μέχρι το βάθος των 6m, που αποτελεί το βάθος της διασκόπησης στη συγκεκριμένη περίπτωση, και πέρα από το βάθος αυτό δε γνωρίζουμε ακριβώς πως μεταβάλλεται η σεισμική ταχύτητα.

Με την αντιστροφή των δεδομένων στις καμπύλες χρόνων διαδρομής εμφανίζονται πέρα από τις αρχικές παρατηρούμενες καμπύλες και οι αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες (βλ. Εικόνα 51). Σε μια ιδανική δειγματοληψία οι παρατηρούμενες καμπύλες χρόνων διαδρομής ταυτίζονται με τις θεωρητικές. Συνεπώς, η διαφορά μεταξύ των δυο ειδών καμπυλών αποτελεί ένδειξη του σφάλματος, αναφερόμενου ως RMS Error, που η τιμή του εξαρτάται και από το πόσο ακριβής ήταν η επιλογή των πρώτων αφίξεων στο περιβάλλον του Pickwin, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.3. Όσο πιο μικρή είναι η τιμή του RMS Error, τόσο πιο κοντά βρίσκονται οι θεωρητικές καμπύλες στις παρατηρούμενες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το RMS Error υπολογίστηκε 1.222409 ms, δηλαδή σχετικά μικρό που δείχνει καλή επιλογή της θέσης των πρώτων αφίξεων.



Εικόνα 51: Καμπύλες χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων στην σεισμική γραμμή L1 έπειτα από αντιστροφή των δεδομένων, όπου εμφανίζονται οι παρατηρούμενες καμπύλες (μπλε) και οι θεωρητικές (calculated) καμπύλες (κόκκινες).

Από στρωματογραφικής άποψης εμφανίζεται αλληλουχία των στρωμάτων του υπεδάφους (βλ. Σχήμα 12), έτσι όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων της σεισμικής διάθλασης. Το επιφανειακό στρώμα (ροζ- κόκκινο χρώμα) φέρει πάχος από 1m στα ΝΔ της τομής μέχρι 5,5m στο μέσο και προς τα ΒΑ της τομής και σεισμική ταχύτητα γύρω στα 350- 550 m/s. Το υποκείμενο σεισμικό στρώμα (κίτρινο-πράσινο χρώμα) στην αρχή της τομής φέρει πάχος περίπου 2m, ενώ προς το τέλος αυτής το πάχος του φτάνει τα 3m. Το εύρος των σεισμικών ταχυτήτων στο στρώμα αυτό κυμαίνεται από 600 μέχρι 1000 m/s. Γενικά, στο ενδιάμεσο στρώμα ξεχωρίζει η παρουσία δυο μικρών κοιλοτήτων, μια στα 9- 15m από την αρχή της τομής και μια στα 25-30m από την αρχή της τομής. Το επόμενο σεισμικό στρώμα (μπλε χρώμα), έχει ταχύτητα γύρω στα 1000-1200 m/s και άγνωστο πάχος.

Με βάση τις σεισμικές ταχύτητες που προσδιορίστηκαν από την εφαρμογή της μεθόδου σεισμικής διάθλασης στη περιοχή μελέτης προκύπτει ότι το υπέδαφος αποτελείται από:

- A. Ένα επιφανειακό στρώμα που αποδίδεται σε εδαφοποιημένο υλικό με κροκάλες και αμμοχάλικα, που μπορεί να αντιστοιχεί στο Τεταρτογενή σχηματισμό χαλικιών και άμμου (Pt.t3.l) σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (βλ. Εικόνα 18)
- B. Ένα ενδιάμεσο στρώμα που αποδίδεται σε παρουσία πορώδη υδροφορέα. Η μεγάλη διαβάθμιση της ταχύτητας στο στρώμα αυτό πιθανά να οφείλεται και στην ύπαρξη αργιλικού υλικού στο συγκεκριμένο στρώμα και να παραπέμπει στις αμμούχες αργίλους Ολοκαίνου (H.l) σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (βλ. Εικόνα 18).
- C. Ένα υποκείμενο στρώμα που ακολουθεί και αποδίδεται σε πιο συμπαγή υλικά, ενδεχομένως ορίζοντας αργίλου ή ακόμη και να αντιστοιχίζεται στις εναλλαγές χαλαζιτών και χαλαζιτικών ψαμιτών με φυλλιτικές ενστρώσεις. ηλικίας Τριαδικού- Μέσου Ιουρασικού (T-Jm.st) που ανήκουν στην Περιοδοπική ζώνη, σύμφωνα πάλι με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (βλ. Εικόνα 18).

Σύμφωνα με την μορφολογία των στρωμάτων όπως αποτυπώθηκαν από τη σεισμική διάθλαση, παρατηρούνται δυο θέσεις που ενδεχομένως να οφείλονται σε τεκτονική ασυνέχεια. Η πρώτη ασυνέχεια εντοπίζεται στα 9m από την αρχή της τομής, ενώ η δεύτερη στα 20-21m περίπου από την αρχή της τομής της σεισμικής διάθλασης. Όσο για τις αναφερόμενες κοιλότητες, μπορεί να είναι αποτέλεσμα της δράσης των ρηγμάτων που παρασύρουν τα μη συνεκτικά υλικά λόγω λιθολογικής διαφοροποίησης.

4. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

4.1. Η τεχνική της γεωηλεκτρικής διασκόπησης

Οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης αποσκοπούν στον καθορισμό της γεωηλεκτρικής δομής, δηλαδή την κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης, διαδικασία η οποία επιτυγχάνεται με την μέτρηση ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια του εδάφους. Άμεσος στόχος είναι ο προσδιορισμός της γεωηλεκτρικής δομής, αλλά το τελικό αποτέλεσμα που επιδιώκεται είναι η γεωλογική ερμηνεία του υπεδάφους, από την οποία προκύπτουν συμπεράσματα και για τα πάχη των διαφόρων στρωμάτων και πετρωμάτων που συναντώνται, τις τεκτονικές, υδρογεωλογικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι του φυσικού δυναμικού και των τελλουρικών ρευμάτων, που βασίζονται στη μέτρηση ηλεκτρικών ποσοτήτων οι οποίες οφείλονται σε φυσικά ηλεκτρικά πεδία. Η δεύτερη κατηγορία αφορά μεθόδους που οι μετρήσεις δυναμικού οι οποίες καταγράφονται στα όργανα, οφείλονται σε τεχνητά παραγόμενα ηλεκτρικά ρεύματα/ πεδία. Σε αυτή τη τελευταία κατηγορία περιλαμβάνονται οι μέθοδοι επαγόμενης πολικότητας, ισοδυναμικών γραμμών και ειδικής αντίστασης, με την οποία θα ασχοληθούμε στη παρούσα εργασία.

Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιείται εκτενέστερα από όλες τις άλλες μεθόδους γεωηλεκτρικής διασκόπησης για την επίλυση διαφόρων γεωλογικών προβλημάτων. Αρχικά, το βάθος διερεύνησης της μεθόδου ήταν σχετικά μικρό, ωστόσο η εξέλιξη των γεωηλεκτρικών οργάνων καταγραφής, αλλά και της γεωμετρίας των διατάξεων και τοποθέτησης των ηλεκτροδίων, έδωσε τη δυνατότητα έρευνας σε μεγάλα βάθη, αρκετά έτσι ώστε να εντοπιστούν γεωθερμικά πεδία και ρηχοί θύλακες υδρογονανθράκων. Επιπλέον, η συγκεκριμένη τεχνική είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στον εντοπισμό τεκτονικών δομών και στη μεταλλευτική έρευνα, αλλά και στην αρχαιολογία, στην υδρογεωλογία, την τεχνική και περιβαλλοντική γεωλογία. Οι υδρογεωλογικές έρευνες, που διεξάγονται με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου βασίζονται στην ιδιότητα του εδαφικού νερού να φέρει χαμηλή τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (10-100Ωm), λόγω της παρουσίας διαλυμένων ενώσεων, σε αντίθεση με το απιονισμένο νερό που χαρακτηρίζεται ως κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, και στο γεγονός ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων εξαρτάται από το ποσοστό νερού που υπάρχει στο πορώδες αυτών. Συνεπώς, με αυτόν τον τρόπο αποτυπώνονται τα τοπικά υδροφόρα στρώματα, τα πάχη αυτών και το βάθος στο οποίο συναντώνται, καθώς επίσης εντοπίζονται μη περατοί σχηματισμοί, ζώνες υφαλμύρισης, ζώνες διαρροής από ταμειντήρες και επιφανειακές διαρρήξεις πληρωμένες με περατό υλικό και νερό. Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές έρευνες, η μέθοδος εφαρμόζεται με επιτυχία στην αποτύπωση της κίνησης ρυπογόνων ουσιών στο υπέδαφος και διαρροών από Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων και διυλιστήρια, λόγω της υψηλής τιμής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του ρυπαντή. Η μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βρίσκει ευρεία εφαρμογή και στην επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων, όπως ενδεικτικά στον εντοπισμό εγκοίλων, ρηξιγενών ζωνών και γενικά ασταθών περιοχών σε θέσεις διάνοιξης σιράγγων, στον προσδιορισμό του βάθους του υποβάθρου σε τοποθεσίες κατασκευής φραγμάτων, αλλά και των φαινομένων διαρροών μετά την

πλήρωση του ταμιευτήρα με νερό, και στον εντοπισμό χώρων εναπόθεσης στερεών αποβλήτων.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες κάποιους από τους οποίους ενδεικτικά αναλύονται παρακάτω. Αρχικά, η λιθολογία, η παρουσία συγκεκριμένων ορυκτών και χημικών στοιχείων στη σύσταση των πετρωμάτων, επηρεάζει σε ένα μεγάλο βαθμό την τιμή της ειδικής αντίστασης. Τα περισσότερα ορυκτά, που συνιστούν τα πετρώματα χαρακτηρίζονται ως μονωτές με βάση την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, δηλαδή δεν επιτρέπουν την διέλευση του ρεύματος, που σημαίνει ότι η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι υψηλή, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ξηρών χαλαζιακών πετρωμάτων. Ορισμένα ορυκτά με οικονομικό ενδιαφέρον και μέταλλα, όπως ο γραφίτης, σιδερίτης, εμφανίζουν καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και άρα ανιχνεύονται από τις μικρές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με τα περιβάλλοντα πετρώματα. Καλοί αγωγοί του ρεύματος θεωρούνται πετρώματα και ορυκτά με τιμές ειδικής αντίστασης της τάξης 10^{-6} με $10^{-1}\Omega\text{m}$, ενώ κακοί αγωγοί αυτά με τιμές της τάξεως μεταξύ 10^8 και $10^{15}\Omega\text{m}$. Τα ιζηματογενή πετρώματα φέρουν χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης ($1-10^3\Omega\text{m}$), καθώς τα πυριγενή και μεταμορφωμένα υψηλές τιμές ($10^3-10^5\Omega\text{m}$), ιδιότητες οι μεταβολές των οποίων οφείλονται στο βαθμό συμπαγοποίησης του πετρώματος και στην παρουσία πρωτογενούς ή/και δευτερογενούς πορώδους. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες, που μεταβάλλει την τιμή της ειδικής αντίστασης είναι το πορώδες. Συγκεκριμένα, έχει προταθεί μια εμπειρική σχέση, γνωστή ως Νόμος Archie (Παπαζάχος, 1996), που συσχετίζει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ) του πετρώματος με το πορώδες (ϕ) του, δηλαδή το λόγο των πόρων προς το συνολικό όγκο του πετρώματος. Ο Νόμος Archie εξαρτάται από παράγοντες όπως το πορώδες και τη γεωμετρία του πετρώματος, το υγρό που βρίσκεται στο πορώδες και φέρει τη μορφή:

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

- όπου ρ : η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος
 α : ο συντελεστής που εξαρτάται από τη λιθολογία
 ρ_v : η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του ρευστού που βρίσκεται στο πορώδες του πετρώματος
 ϕ : το πορώδες
 m : ο συντελεστής στερεοποίησης, που εξαρτάται από γεωμετρία του πορώδους και το πόσο συμπαγές είναι το πέτρωμα με τιμές ανάμεσα σε 1.3 για μη συνεκτικούς αμμώδεις σχηματισμούς μέχρι 2.2 σε συμπαγή ασβεστόλιθο, σύμφωνα με πίνακες (Doveton, 1986).

Το ρευστό το οποίο κινείται μέσα στο πορώδες συνήθως είναι εδαφικό νερό και λόγω των διαλυμένων αλάτων που περιέχει φέρει χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Ωστόσο, ιζήματα που αποτέθηκαν μέσα σε γλυκό νερό φέρουν μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις από ότι πετρώματα που σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό. Η τιμή του πρωτογενούς πορώδους αρχίζει από 0.4 για ιζήματα που προήλθαν από περιβάλλον ρηχής ιζηματογένεσης και σχεδόν μηδενίζεται για άλλα ιζήματα, όπως ο ασβεστόλιθος και η άργιλος, ενώ αντίστοιχα η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται με τη μείωση του πορώδους. Στις περιπτώσεις, λοιπόν, που η τιμή του πρωτογενούς πορώδους είναι εξαιρετικά μικρή, η μεταβολή της τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από το δευτερογενές πορώδες. Συνεπώς, αν τα πετρώματα φέρουν επιφανειακές διαρρήξεις, ρωγμές και τεκτονικές δομές θα καταγραφούν στα όργανα γεωηλεκτρικής

διασκόπησης υψηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης στις συγκεκριμένες θέσεις, αλλά αν στο εσωτερικό των ρωγμών κυκλοφορεί νερό μειώνονται οι τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Σε αυτή τη περίπτωση για να διακριθεί η παρουσία ρήγματος θα πρέπει να ερμηνευθεί η γεωηλεκτρική δομή και να εντοπιστεί τυχόν μετατόπιση στρωμάτων. Επιπλέον, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων αυξάνεται με τη γεωλογική ηλικία, καθώς με την αύξηση του χρόνου προστίθενται στον φλοιό όλο και περισσότερα ιζηματα με αποτέλεσμα να αυξάνεται το πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων, να ασκείται πίεση στα κατώτερα στρώματα και τελικά να μειώνεται η χωρητικότητα των πετρωμάτων και ιζημάτων σε νερό, ενώ η συνοχή τους αυξάνεται. Τέλος, ακόμη και σχετικά μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας επιδρούν στην ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με νερό ή άλλου ρευστού. Ειδικότερα, είναι γνωστό ότι αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του ιξώδους του νερού, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής της ειδικής αντίστασης, ενώ με μείωση θερμοκρασίας σε βαθμό που το νερό παγώνει η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται κατά πολύ (πάνω από 10^4). Βάση αυτού του τελευταίου παράγοντα επίδρασης της ηλεκτρικής αντίστασης, οι γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις εφαρμόζονται με επιτυχία για την ανίχνευση γεωθερμικών πεδίων, καθώς η παρουσία θερμομεταλλικών ρευστών στους γεωθερμικούς ταμιευτήρες, αποτυπώνεται ως ζώνη χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Υλικό	Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση (Ohm)
Πυριγενή και Μεταμορφωμένα πετρώματα	
Γρανίτης	$5 \cdot 10^3 - 10^6$
Βασάλτης	$10^3 - 10^6$
Μάρμαρο	$5 \cdot 10^3 - 10^6$
Χαλαζίτης	$10^2 - 2 \cdot 10^8$
Ιζηματογενή πετρώματα	
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	$0,1 - 10$
Χημικά Στοιχεία	
Σίδηρος	$9,074 \cdot 10^{-8}$
10^{-2} M Χλωριούχο Κάλιο	0,708
10^{-2} M Χλωριούχο Νάτριο	0,842
10^{-2} M Οξικό Οξύ	6,13

Πίνακας 3: Ενδεικτικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ) σε διάφορα πετρώματα της Γης. (Παπαζάχος, 1996; Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013)

Η λήψη μετρήσεων στις γεωηλεκτρικές μεθόδους διασκόπησης γίνεται πολύ γρήγορα και εύκολα με τη χρήση πολυκαναλικών οργάνων με τα οποία μπορεί να

πραγματοποιηθεί δισδιάστατη ή τρισδιάστατη ηλεκτρική βυθοσκόπηση (οριζόντια και κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση) και ηλεκτρική χαρτογράφηση (οριζόντια ηλεκτρική διασκόπηση). Πέρα από το πολυκαναλικό όργανο καταγραφής και τεχνητής παραγωγής ρεύματος, χρησιμοποιούνται καλώδια και ηλεκτρόδια.

Αρχικά, για την λήψη των δεδομένων τα ηλεκτρόδια πακτώνονται στο έδαφος με βάση τη διάταξη που έχει κριθεί κατάλληλη για την μελέτη, ενώ ο αριθμός αυτών εξαρτάται από το πόσα ηλεκτρόδια μπορεί να διαχειριστεί ο εξοπλισμός και η απόσταση μεταξύ τους, που μπορεί να αυξάνεται κατά τη διάρκεια της μέτρησης, καθορίζεται από τον στόχο έρευνας. Τα ηλεκτρόδια συνδέονται με καλώδια που είναι μονωμένα με πλαστικό και η σειρά των καλωδίων καταλήγει στη μονάδα μέτρησης και διακοπών. Η συσκευή μέτρησης περιλαμβάνει βολτόμετρο που μετράει τη διαφορά τάσης (ΔV) μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων δυναμικού M, N, πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, αμπερόμετρο που μετρά την ένταση του ρεύματος (i) που διαβιβάζεται στη Γη μέσω των δυο ηλεκτροδίων ρεύματος A, B. Η ηλεκτρική πηγή μπορεί να διαβιβάζει συνεχές (D.C.) ή εναλλασσόμενο ρεύμα (A.C.) στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται πηγή συνεχούς ρεύματος πρέπει τα ηλεκτρόδια να είναι πορώδη για να αποφεύγεται η πόλωση των ηλεκτροδίων, δηλαδή η συγκέντρωση ανιόντων γύρω από το θετικό ηλεκτρόδιο και κατιόντων γύρω από το αρνητικό ηλεκτρόδιο, ενώ για τον ίδιο λόγο η πολικότητα θα πρέπει να εναλλάσσεται περιοδικά. Οι περισσότερες γεωηλεκτρικές μετρήσεις γίνονται με τη χρήση πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς δεν υπάρχει πρόβλημα ηλεκτρολυτικής πόλωσης των ηλεκτροδίων, ενώ το υλικό των ηλεκτροδίων, σε αυτή την περίπτωση, είναι ατσάλι ή αλουμίνιο. Με τη χρήση πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος και χαμηλής συχνότητας η γεωηλεκτρική διασκόπηση μπορεί να φθάσει σε ένα σχετικά μεγάλο βάθος, ενώ για πολύ μεγάλο βάθος διασκόπησης χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα.

Αφού προηγηθεί η τοποθέτηση και πριν ξεκινήσει η λήψη μετρήσεων, το σύστημα μέτρησης και διακοπών προγραμματίζεται ώστε να ελέγχει τη διαδοχή των ηλεκτροδίων σε κάθε μέτρηση, δηλαδή ποια δυο ηλεκτρόδια της σειράς θα λειτουργούν ως ηλεκτρόδια ρεύματος και ποια δυο ως δυναμικού, καθώς τα υπόλοιπα θα αποσυνδέονται. Ουσιαστικά, η επιλογή γίνεται με βάση την διάταξη ηλεκτροδίων που αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί στην έρευνα. Προτού διαβιβαστεί το ρεύμα στο έδαφος, μετράται το φυσικό δυναμικό έτσι ώστε να αντισταθμιστεί στις μετρήσεις που θα καταγραφούν. Επιπλέον, για να προκύψει καλή ποιότητα δεδομένων, ελέγχεται η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, δηλαδή αν υπάρχει καλή επαφή αυτών με το έδαφος. Στη περίπτωση που ανάμεσα σε ηλεκτρόδιο και έδαφος υπάρχουνε κενά ή χαμηλό ποσοστό υγρασίας, τότε το ρεύμα δεν διοχετεύεται με μεγάλη ευκολία, και άρα εφαρμόζονται διάφορες διεργασίες, όπως η χρήση αλατόνερου 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). Στη συνέχεια, διοχετεύεται ρεύμα στο έδαφος και οι μετρήσεις συνεχίζονται έως ότου μετρηθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί ηλεκτροδίων ρεύματος- δυναμικού.

Η διάταξη ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται και η διαδοχική τους απόσταση επηρεάζει το βάθος στο οποίο μπορούν να φθάσουν οι μετρήσεις. Ειδικότερα, αν ο στόχος είναι ρηχός, τότε η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι μικρή, έτσι ώστε να καταγραφούν πυκνές μετρήσεις που παρέχουν υψηλή διακριτική ικανότητα. Συνεπώς, για την αύξηση του βάθους διασκόπησης σε μια ηλεκτρική βυθοσκόπηση η

απόσταση των ηλεκτροδίων αυξάνεται ανάλογα με την διάταξη, ενώ για την πλευρική αποτύπωση της δομής του υπεδάφους σε μια τομή μεγάλου μήκους που να φθάνει στο ίδιο βάθος, η απόσταση των ηλεκτροδίων παραμένει σταθερή, αλλά μετακινούνται οι θέσεις αυτών στο οριζόντιο επίπεδο κατά μήκος της τομής.

Μετά την λήψη των μετρήσεων, τα δεδομένα αποτυπώνονται σε μια ψευδοτομή φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση (ρ_a) είναι μια φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα η οποία 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. 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 M, N. 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. Όσον αφορά την ψευδοτομή αποτελεί μια αλλοιωμένη εικόνα του υπεδάφους, που περιλαμβάνει πληροφορίες για την πραγματική αντίσταση, αλλά ωστόσο εξαρτάται από την διάταξη της μέτρησης, παράμετρος που πρέπει να εξαλειφθεί μέσω αντιστροφής δεδομένων. Με την απεικόνιση της ψευδοτομής είναι δυνατή η αφαίρεση θορυβωδών δεδομένων, που αλλοιώνουν την ποιότητα των μετρήσεων και δίνουν μια γεωηλεκτρική δομή η οποία απέχει από τη πραγματική. Για την παραγωγή αυτής της ψευδοτομής (βλ. Σχήμα 14), 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 κατασκευάζονται 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.

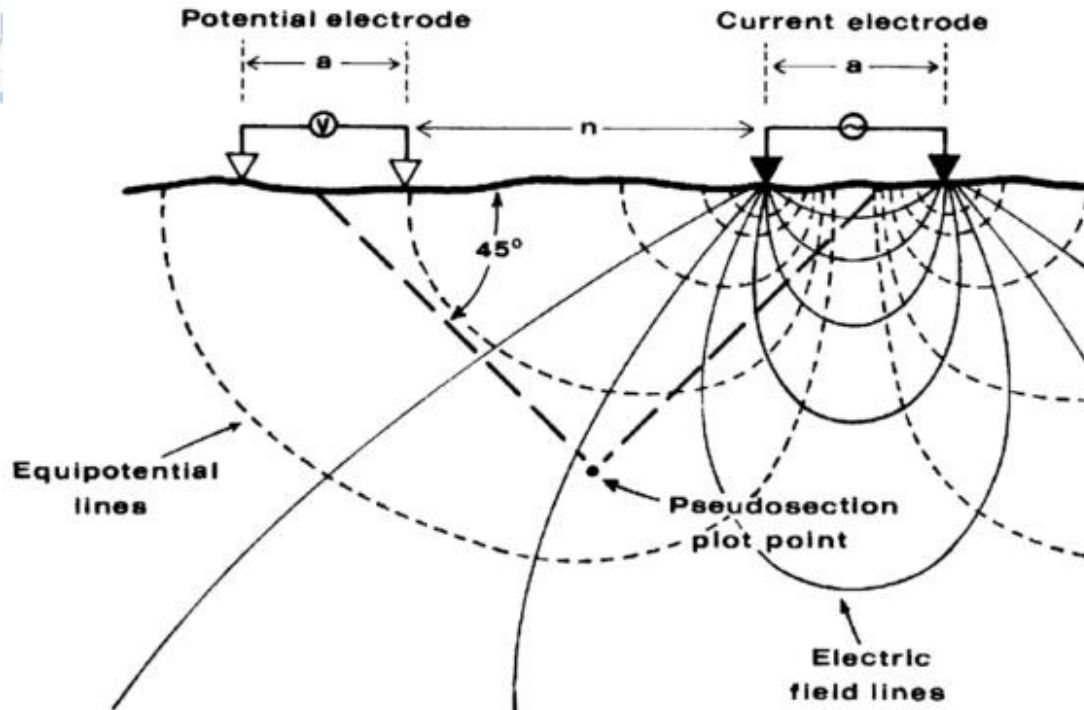
Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, ο τρόπος εφαρμογής της οποίας αναφέρθηκε παραπάνω, βασίζεται σε ένα φαινόμενο που είναι ανάλογο του φαινομένου της διάθλασης των σεισμικών ακτίνων για το οποίο έγινε λόγος στο Κεφάλαιο 3.1. Συγκεκριμένα, έστω ότι υπάρχει στρώμα ειδικής αντίστασης ρ_1 , που βρίσκεται 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 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 διαρρέει 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, Β διοχετεύεται και κινείται στο εσωτερικό της Γης και δημιουργεί ισοδυναμικές καμπύλες η διαφορά τάσης των οποίων υπολογίζεται από τα ηλεκτρόδια δυναμικού Μ, Ν.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος. Οι κυριότερες διατάξεις είναι η «διάταξη Wenner», «διάταξη Schlumberger», «διάταξη Διπόλου- Διπόλου», αλλά υπάρχουν και άλλες δευτερεύουσες διατάξεις όπως η «διάταξη Lee», «διάταξη Πόλου- Διπόλου», «διάταξη Πόλου- Πόλου», «διάταξη τριών σημείων», «τετραγωνική διάταξη», κτλ. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η «διάταξη Διπόλου- Διπόλου» κατά την οποία τα δυο ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν σταθερή απόσταση a (βλ. Σχήμα 14), ίση με την σταθερή απόσταση a που απέχουν τα δυο ηλεκτρόδια ρεύματος μεταξύ τους, ενώ η μεταβαλλόμενη απόσταση μεταξύ των διαφορετικών ζευγών ηλεκτροδίων είναι ίση με n , μεγαλύτερη από a , και μπορεί να αυξηθεί σημαντικά κατά βήματα, ανάλογα με το επιθυμητό βάθος διασκόπησης. Η έκταση της απόστασης n περιορίζεται από τον τοπικό εδαφικό θόρυβο, αλλά και από την δυνατότητα/ ισχύ των οργάνων να καταγράψουν την τάση και το μήκος των καλωδίων.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου σε σχέση με τις άλλες κυριότερες διατάξεις είναι πως δεν απαιτείται μεγάλο μήκος καλωδίων, καθώς όπως αναφέρθηκε η απόσταση n μεταξύ των ζευγών ηλεκτροδίων δυναμικού- ρεύματος μεταβάλλεται κατά βήματα πάνω στην τομή που έχει στηθεί, με βάση τον προγραμματισμό που δόθηκε στο σύστημα μέτρησης για το ποια ηλεκτρόδια θα λειτουργούν και ποια θα αποσυνδέονται σε κάθε μέτρηση.



Σχήμα 14: Η «διάταξη Διπόλου- Διπόλου» που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της γεωηλεκτρικής διασκόπησης και υπόδειξη της παραγωγής της ψευδοτομής με βάση τη συγκεκριμένη διάταξη. (Ogunbe et al., 2010)

4.2. Εξοπλισμός, σχεδιασμός και λήψη μετρήσεων γεωηλεκτρικής διασκόπησης

Η περιοχή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι ο οικισμός των Λαγυνών. Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας με τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης σε δυο τομές οι οποίες φέρουν διεύθυνση NNΔ -BBA και τέμνουν κάθετα τη πιθανή τεκτονική ασυνέχεια, όπως αυτή χαρτογραφήθηκε από τον Χατζηπέτρο το 2006 και φαίνεται στην Εικόνα 1, η οποία προκάλεσε τις ρωγμές στα κτίρια του οικισμού. Η πρώτη μέτρηση ηλεκτρικής τομογραφίας εκτελέστηκε στη θέση L1, που βρίσκεται στη δυτική μεριά του καταστήματος «ΕΓΝΑΤΙΑ» (Θέση 1 κατά Χατζηπέτρος, 2006) και τα δεδομένα που προέκυψαν, αφού επεξεργαστούν και ερμηνευθούν γεωλογικά στην παρούσα εργασία, θα δώσουν αποτελέσματα σε συνδυασμό με την ερμηνεία της σεισμικής διάθλασης, για την αιτία πρόκλησης ρωγμών στα κτίρια. Η δεύτερη γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας, αναφερόμενη ως L3 στη παρούσα εργασία, που αναλύθηκε από άλλους προπτυχιακούς φοιτητές βρίσκεται κοντά στη Θέση 3 κατά Χατζηπέτρος, 2006. Στην Εικόνα 31 που επεξεργάστηκε σε λογισμικό QuantumGIS φαίνεται ακριβώς η περιοχή μελέτης και οι δυο γεωλογικές τομές (L1, L3) που μετρήθηκαν.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 04-06-2019 πάνω σε εκτεθειμένους Τεταρτογενείς σχηματισμούς όπως φαίνεται στην Εικόνα 31. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη μετρήσεων κατά τη γεωηλεκτρική διασκόπηση με τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης περιελάμβανε 24 ηλεκτρόδια, που ανάλογα με την διάταξη και τον προγραμματισμό στο όργανο μέτρησης και διακοπών άλλοτε λειτουργούν ως ηλεκτρόδια ρεύματος και άλλοτε ως δυναμικού. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε μονωμένο

πολυπύρηνου καλώδιο (βλ. Εικόνα 52), με διαδοχικές εξόδους βραχυκυκλωμένες με τα ηλεκτρόδια στη τομή, το οποίο συνδέθηκε στο πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, SYSCAL Pro της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS.



Εικόνα 52: Ατσάλινα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν για την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος και τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού που προκαλείται. Φαίνεται επίσης η σύνδεση του πολυπύρηνου καλωδίου, με έξοδο βραχυκυκλωμένη με το κάθε ηλεκτρόδιο.

Το όργανο μέτρησης και παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος SYSCAL Pro (βλ. Εικόνα 53) της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS αποτελεί ένα πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης σε μια γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση ή/ και χαρτογράφηση. Φέρει τη δυνατότητα καταγραφής 10 διαφορών δυναμικού, καθιστώντας ταχύτατη τη διαδικασία μέτρησης, ενώ εμπεριέχει πηγή συνεχούς ρεύματος 250W, με αυτοματοποιημένη αλλαγή πολικότητας, που του προσδίδει μεγάλη ισχύ κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης με τη χρήση οποιασδήποτε διάταξης. Επιπλέον, εξασφαλίζει μετρήσεις μεγάλης ακρίβειας, καθώς προσφέρει αυτοματοποιημένο έλεγχο αντιστάθμισης του φυσικού δυναμικού, ενίσχυση σήματος και προβολή σφάλματος κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Επιτυγχάνει τη δημιουργία ρεύματος με ένταση που μπορεί να ξεπεράσει τα 1000mA και μπορεί τυπικά να φθάσει έως και τα 2500mA, ενώ παρουσιάζει μια μέγιστη τάση εξόδου των 800 V. Χρησιμοποιείται ακόμη για μετρήσεις επαγόμενης πολικότητας, αλλά και για επίλυση πληθώρας προβλημάτων σε περιβαλλοντικές, τεκτονικές, γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές έρευνες.

Για να εξασφαλιστεί καλή ποιότητα στις μετρήσεις επιλέχθηκε η «διάταξη Διπόλου- Διπόλου» (βλ. Σχήμα 14), η οποία χαρακτηρίζεται μεν από χαμηλή σχέση σήματος προς θόρυβο για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων (Alwan, 2013), αλλά προσφέρει επαρκή διακριτική ικανότητα ειδικά σε πλευρικές μεταβολές και λιγότερο σε κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013). Απαιτεί μικρό μήκος καλωδίων ακόμη και για μετρήσεις μεγάλου βάθους σε αντίθεση με τις άλλες κύριες διατάξεις. Ωστόσο, χρειάζεται πολύ

ρεύμα και ευαίσθητα όργανα, συνθήκη που επιτυγχάνεται με τη χρήση του συγκεκριμένου οργάνου μέτρησης και διακοπών.



Εικόνα 53: Το όργανο SYSCAL-Pro που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των ηλεκτρικών μετρήσεων.

Βάση αρχικού σχεδιασμού επιλέχθηκε η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών ηλεκτροδίων να είναι 2m με αποτέλεσμα να προκύψει τομή συνολικού μήκους 46m. Οι θέσεις που επιλέχθηκαν να γίνουν οι μετρήσεις χαρακτηρίζονταν από ομαλό ανάγλυφο, οπότε δεν υπήρξε πρόβλημα στην ανάπτυξη των δύο τομών και η επιλογή τους έγινε με βάση τα δεδομένα που διεξάχθηκαν από την έρευνα του Χατζηπέτρου (2006). Αρχικά, με τη χρήση μετροταινίας υπολογίστηκαν τα σημεία στα οποία θα τοποθετούνταν τα ηλεκτρόδια και αφού πακτώθηκαν στο έδαφος ακολούθησε η σύνδεση του κάθε ηλεκτροδίου, από τα 24 σε σύνολο, με συγκεκριμένη έξοδο του πολυπύρηνου καλωδίου. Η σειρά καλωδίων συνδέθηκε με το όργανο μέτρησης και διακοπών SYSCAL-Pro έτσι ώστε να γίνει η διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος. Προτού ξεκινήσουν οι μετρήσεις το όργανο προγραμματίστηκε να χρησιμοποιήσει την «διάταξη Διπόλου- Διπόλου» και αυτόματα να ελέγχει ποια ηλεκτρόδια θα χρησιμοποιηθούν ως ρεύματος και ποια ως δυναμικού, ενώ ταυτόχρονα ποια θα αποσυνδέονται κατά την μέτρηση. Όπως αναφέρθηκε, η απόσταση ανάμεσα σε ηλεκτρόδια δυναμικού και ανάμεσα σε ηλεκτρόδια ρεύματος ήταν $a = 2m$, ενώ η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίου ρεύματος – δίπολου, όπως προγραμματίστηκε, ξεκίνησε από 2m και αυξήθηκε σταδιακά μέχρι και 5 φορές, δηλαδή έφτασε μέχρι $n = 10m$, έχοντας ως αποτέλεσμα το μέγιστο βάθος έρευνας να ήταν περίπου 10m.



Εικόνα 54: Εξοπλισμός μέτρησης ηλεκτρικών τομογραφιών. Παρατηρούνται τμήματα της γραμμής των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση της τομογραφίας L1, που είναι συνδεδεμένα με τα πολυπύρρηνα καλώδια και τα οποία με τη σειρά τους είναι συνδεδεμένα με το όργανο μέτρησης και αποθήκευσης των μετρήσεων SYSCAL-Pro.

4.3. Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων γεωηλεκτρικής διασκόπησης

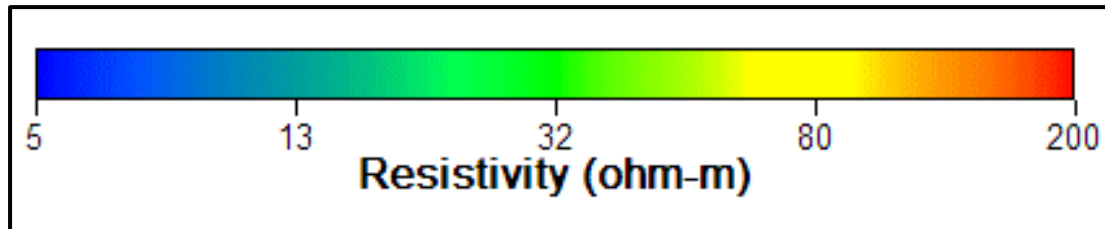
Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, μεταφέρθηκαν τα δεδομένα από το όργανο μετρήσεων SYSCAL-Pro σε υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Αφού ολοκληρωθεί η μεταφορά και η αποθήκευση στον υπολογιστή αρχείου της μορφής π.χ.: 1dd.dat, 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 αναγλύφου 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. Στις επόμενες σελίδες της παρούσας εργασίας, 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 για το αίτιο των ρωγμών που εμφανίζονται στη περιοχή μελέτης.

4.4. Αποτελέσματα και ερμηνεία τομής γεωηλεκτρικής διασκόπησης

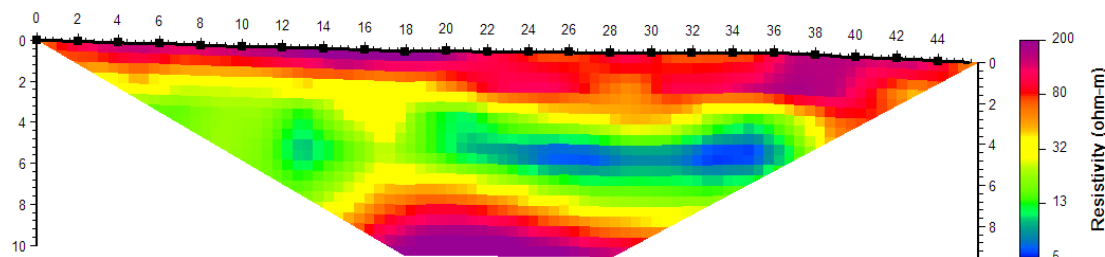
Έπειτα από εξέταση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την παρατήρηση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη τομή L1, η οποία αποτυπώθηκε με χρωματική κλίμακα «ουρανίου τόξου», παρατηρήθηκε μια στρωματογραφική διαφοροποίηση ανάμεσα σε σχηματισμούς και πετρώματα του υποβάθρου, καθώς και χαρακτηριστικές πλευρικές ασυνέχειες ενδεικτικές ύπαρξης τεκτονικών στοιχείων. Η χρωματική κλίμακα «ουρανίου τόξου» που χρησιμοποιείται φέρει ψυχρά χρώματα (μπλε) και θερμά χρώματα (κόκκινα, μωβ). Τα ψυχρά χρώματα αντιστοιχούν σε χαμηλές τιμές πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης και αντιπροσωπεύουν στην συγκεκριμένη περίπτωση λεπτόκοκκους σχηματισμούς αργιλικών οριζόντων ή/ και φακών, υδροφόρα στρώματα (βλ. Πίνακα 3), αλλά και ενδεχομένως μεταλλικούς αγωγούς. Μέσα στα στρώματα χαμηλής ειδικής αντίστασης παρατηρείται σε κάποια σημεία μικρή αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης που οφείλεται σε παρουσία ρηγμάτων. Τα θερμά χρώματα αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και υποδεικνύουν την παρουσία αδρόκοκκων υλικών όπως άμμοι, χάλικες και κροκαλοπαγή, εδαφοποιημένα υλικά και πιθανώς επιχωματώσεις. Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 15. Παρακάτω παρουσιάζεται η τομή L1 μετά την αντιστροφή με βάση την οποία γίνεται η ερμηνεία ως προς λιθολογικά, τεκτονικά χαρακτηριστικά που περιλαμβάνουν πληροφορίες για βάθη εντοπισμού, πάχη των σχηματισμών.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομής L1 εκτελέστηκαν μέσα στον οικισμό των Λαγυνών, παράλληλα στη ΒΔ περίφραξη του καταστήματος «ΕΓΝΑΤΙΑ». Η διεύθυνση της τομής ήταν NNΔ -BBA, η απόσταση μεταξύ

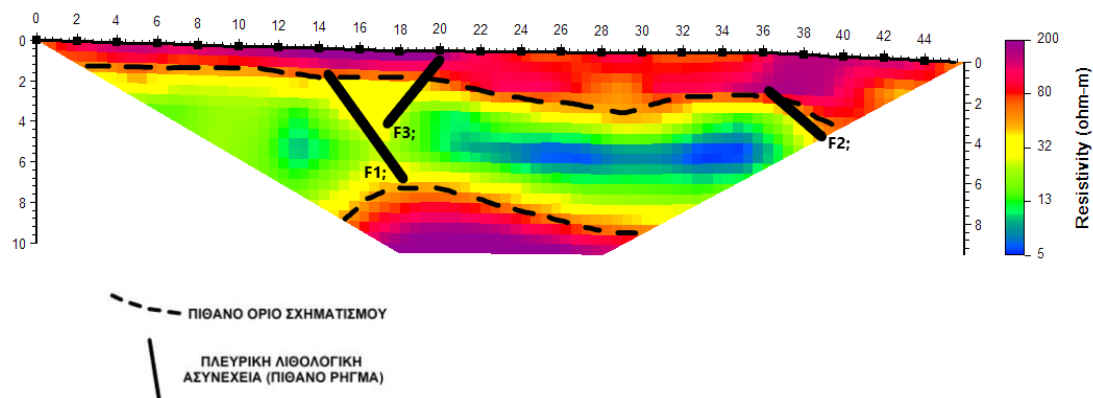
των ηλεκτροδίων ήταν 2m και το συνολικό μήκος της τομής 46m. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας για τη μέτρηση με τη «διάταξη Διπόλου- Διπόλου» παρουσιάζονται στο Σχήμα 16. Επίσης στο Σχήμα 17 παρουσιάζεται η γεωηλεκτρική τομή με ενσωματωμένα τα τεκτονικά στοιχεία ερμηνείας και την υπόδειξη των στρωμάτων.



Σχήμα 15: Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πραγματικής ειδικής αντίστασης του υπεδάφους στη τομή L1.



Σχήμα 16: Εικόνα κατανομής των γεωηλεκτρικών αντιστάσεων στο υπεδάφος για την τομογραφία L1.



Σχήμα 17: Ερμηνεία της γεωηλεκτρικής τομής L1.

Από στρωματογραφικής άποψης, στην τομή του Σχήματος 16 εμφανίζεται αλληλουχία γεωηλεκτρικών στρωμάτων με ένα επιφανειακό στρώμα σχετικά υψηλής αντίστασης, ένα ενδιάμεσο στρώμα χαμηλής έως μέσης αντίστασης και ένα βαθύτερο στρώμα υψηλής αντίστασης. Ο επιφανειακός σχηματισμός εντοπίζεται καθ' όλο το μήκος της τομογραφίας με πάχος που φτάνει τα 2m NΔ της τομής και τα 4m στα ΒΑ της τομής. Καθώς οι αντιστάσεις σε αυτό κυμαίνονται από 70 – 200 Ohm-m, αποτελείται από πολύ αδρομερή υλικά, όπως επιφανειακά κορήματα, κροκάλες, αμμοχάλικο, που αντιστοιχούν στο Τεταρτογενή σχηματισμό χαλικιών και άμμου (Pt.t3.1) σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (βλ. Εικόνα 18). Ο ενδιάμεσος αγωγίμος σχηματισμός εντοπίζεται κι' αυτός σέ όλο το μήκος της τομογραφίας, σε βάθος 2-4m από την επιφάνεια και φθάνει μέχρι τα 6-7m, έχοντας ένα συνολικό πάχος περίπου 5m. Οι τιμές

των ηλεκτρικών αντιστάσεων σε αυτό κυμαίνονται από 5- 32 Ohm-m, με την παρουσία των μικρότερων αντιστάσεων στο μέσο του σχηματισμού και την συγκέντρωση αυτών κυρίως στο ΒΑ τμήμα της τομής. Ενδεχομένως, οι χαμηλές αντιστάσεις να υποδηλώνουν την παρουσία αργιλικών υλικών, αλλά και την ανάπτυξη υδροφόρου στρώματος. Μπορεί η ύπαρξη υδροφόρου στρώματος να οφείλεται στην παρουσία του αργιλικού ορίζοντα εντός αδρόκοκκων υλικών. Είναι φανερή η ύπαρξη πλευρικής γεωηλεκτρικής ασυνέχειας στα 14m της τομής η οποία σχετίζεται πιθανά με την παρουσία ρήγματος, που σημειώνεται ως F1 στο Σχήμα 17 και μιας άλλης ασυνέχειας στα 19m από την αρχή της τομής, που σημειώνεται ως F3 στο Σχήμα 17. Επίσης με κέντρο τα 38m της τομής εμφανίζεται μια ζώνη πλευρικής λιθολογικής ασυνέχειας, που πιθανά συμπίπτει με άλλο ρήγμα που σημειώνεται ως F2 στο Σχήμα 17. Ο βαθύτερος αγωγίμος σχηματισμός με αντιστάσεις που κυμαίνονται από 70 – 200 Ohm-m, εντοπίζεται σε βάθος 8m με άγνωστο πάχος σε απόσταση 15- 30 m από την έναρξη της τομογραφίας. Πρόκειται ενδεχομένως για έναν άλλον σχηματισμό άμμου και κροκάλων ή υπάρχει και η πιθανότητα οι πολύ υψηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης (>100m) (βλ. Πίνακα 3) να αντιστοιχούν και σε εναλλαγές χαλαζιτών και χαλαζιτικών ψαμμιτών με φυλλιτικές ενστρώσεις, ηλικίας Τριαδικού- Μέσου Ιουρασικού (T-Jm.st) που ανήκουν στην Περιοδοπική ζώνη, σύμφωνα πάλι με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (βλ. Εικόνα 18).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

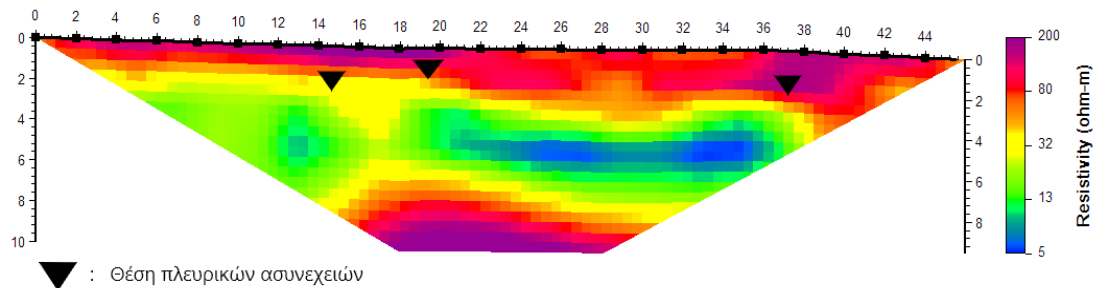
Η γεωφυσική έρευνα, που εκτελέστηκε στην περιοχή των Λαγυνών με τις μεθόδους της σεισμικής διάθλασης και της ειδικής αντίστασης, είχε ως στόχο τη μελέτη της γεωλογικής δομής σε συγκεκριμένες θέσεις που συνδέονται με την εμφάνιση ρωγμών στα κτίρια του οικισμού. Τα συνδυαστικά αποτελέσματα της ερμηνείας των δεδομένων (βλ. Σχήμα 18 και 19) όπως προέκυψαν από τις δυο μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης που εκτελέστηκαν, μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- I. Η στρωματογραφική ακολουθία περιλαμβάνει τα παρακάτω, από τα υπερκείμενα/ επιφανειακά προς τα υποκείμενα στρώματα. Αρχικά, εντοπίζεται ένα εδαφοποιημένο στρώμα με χαλαρά υλικά (άμμο, κροκάλες, χάλικες) με πάχος που κυμαίνεται από 2-4m, που ενδεχομένως να συνδέεται με τον Τεταρτογενή σχηματισμό χαλικιών και άμμου (Pt.t3.l) σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (βλ. Εικόνα 18). Βαθύτερα συναντάται υδροφόρο στρώμα, πάχους περίπου 5m, με κατά θέσεις παρουσία αργιλικού υλικού το οποίο φαίνεται να αποδίδεται στις αμμούχες αργίλους Ολοκαίνου (H.l) σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (βλ. Εικόνα 18). Τέλος, εμφανίζεται ένα στρώμα αγνώστου πάχους με συμπαγοποιημένα υλικά, πιθανά αργιλικά ή υλικά που μπορούν να αντιστοιχηθούν με τις εναλλαγές χαλαζιτών και χαλαζιτικών ψαμμιτών με φυλλιτικές ενστρώσεις. ηλικίας Τριαδικού- Μέσου Ιουρασικού (T-Jm.st) που ανήκουν στην Περιοδοπική ζώνη, σύμφωνα πάλι με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (βλ. Εικόνα 18).
- II. Με την παρατήρηση της τομής σεισμικής διάθλασης και την τομή ηλεκτρικής τομογραφίας προέκυψε η παρουσία μιας κοινής ασυνέχειας περίπου στα 20m από την αρχή των μετρήσεων στα ΝΔ. Η θέση της ασυνέχειας σύμφωνα με τις γεωφυσικές μεθόδους συμπίπτει με την παρατηρούμενη στο ύπαιθρο διάρρηξη στην ΒΔ τσιμεντένια περίφραξη του καταστήματος «ΕΓΝΑΤΙΑ» (βλ. Εικόνα 11 και 55).

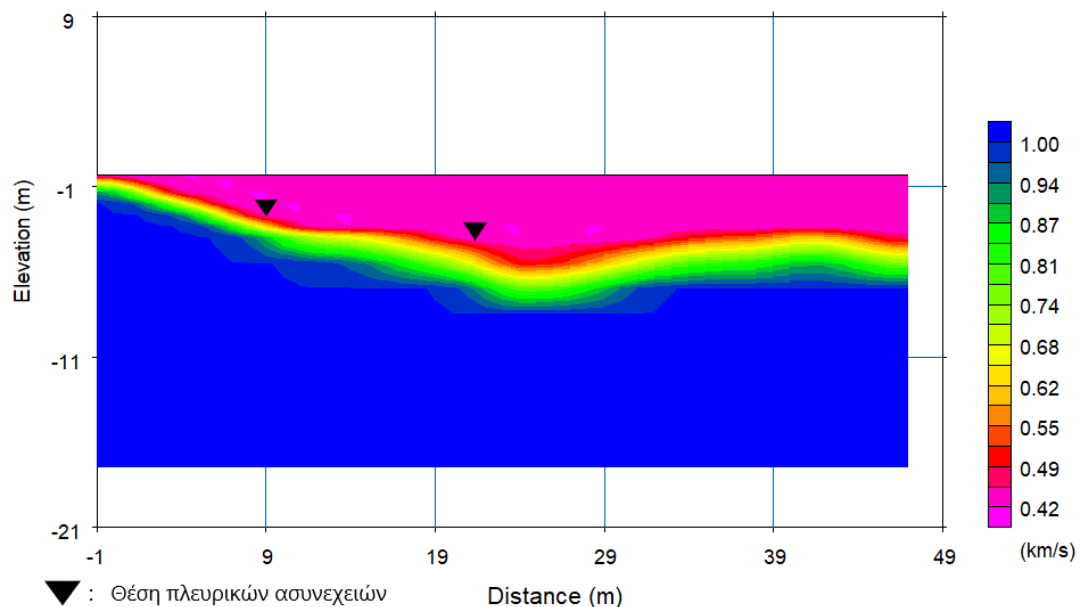
Οι επιφανειακές ρωγμές που έγιναν αισθητές από τις ζημιές στις κατασκευές του οικισμού εκδηλώθηκαν με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ πάνω σε Ολοκαινικά ιζήματα, δηλαδή «κόβουν» αμμούχες αργίλους Ολοκαίνου (H.l) και Τεταρτογενή σχηματισμό χαλικιών και άμμου (Pt.t3.l) σύμφωνα με χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε., γεγονός που αποδεικνύει ότι είναι νεότερο ρήγμα σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρτογραφημένα ρήγματα της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

Έπειτα από την μελέτη αρχείων καταγραφής και χαρτογράφησης σεισμών και μικροσεισμών της περιοχής φαίνεται ότι η περιοχή των Λαγυνών και ειδικότερα το υπό μελέτη ρήγμα δεν αποτέλεσε σεισμική εστία με την άροδο των ετών. Από τη στιγμή εμφάνισης του φαινομένου των ρωγμών στην περιοχή, το 2004, αυτό φαίνεται να συνεχίζεται μέχρι σήμερα, όχι λόγω σεισμικής δραστηριότητας, αλλά εξαιτίας υποχώρησης υλικών ως προς τη ρηξιγενή επιφάνεια, και λόγω λιθολογικής διαφοροποίησης ως προς πλευρικές ασυνέχειες (βλ. Σχήμα 18, 19 και Εικόνα 55), που έχουν ως πιθανά βαθύτερο αίτιο δημιουργίας το μελετώμενο ρήγμα. Η συνεχή δράση του φαινομένου αυτού επηρεάζει συνεχώς κτίρια και δρόμους, λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς

των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής και του εδάφους. Ωστόσο, η δράση του φαινομένου είναι έντονη, επειδή πιθανά ενισχύεται από την ανεξέλεγκτη υπεράντληση η οποία παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στη λεκάνη της Μυγδονίας, που έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή πτώση του υδροφόρου ορίζοντα και άρα την πρόκληση τοπικών καθιζήσεων.



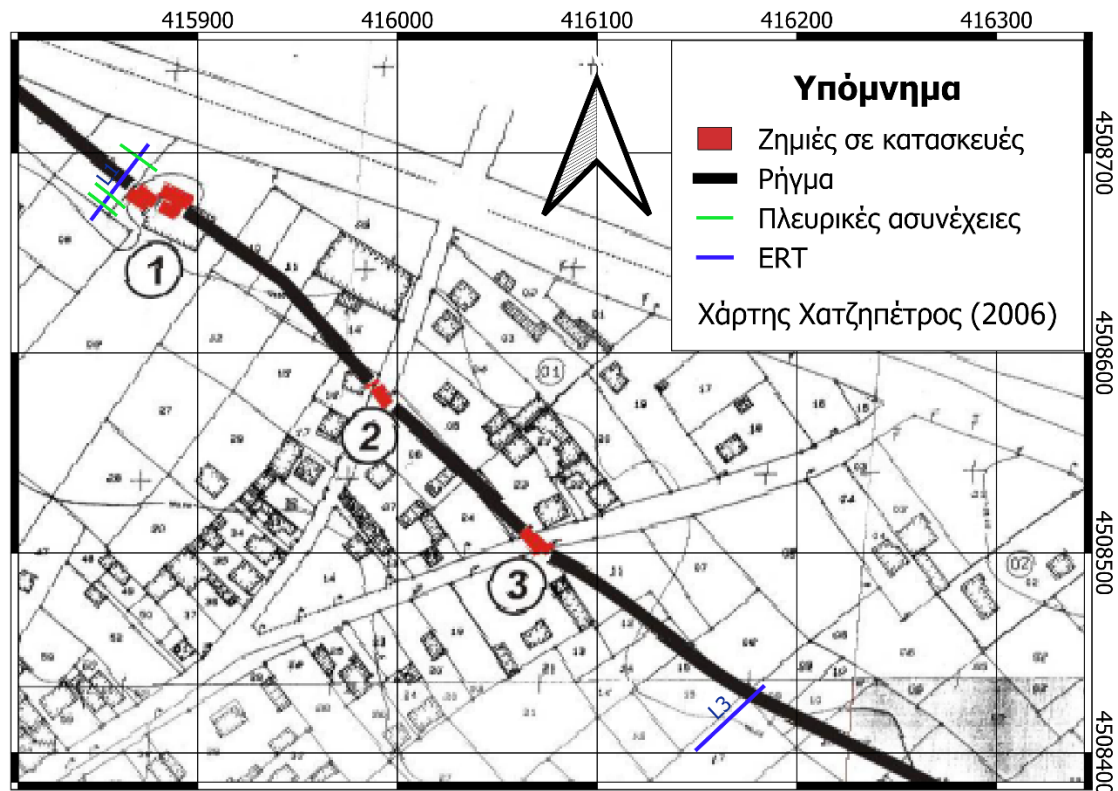
Σχήμα 18: Γεωηλεκτρική τομογραφία στη θέση L1 με υπόδειξη των θέσεων παρουσίας των πλευρικών ασυνεχειών.



Σχήμα 19: Τομογραφία σεισμικής διάθλασης στη θέση L1. Παρατηρείται ότι η δομή του υπεδάφους όπως προκύπτει από το μοντέλο ταχυτήτων διάδοσης των τεχνητά παραγόμενων σεισμικών κυμάτων ακολουθεί την ίδια μορφολογία με την δομή της γεωηλεκτρικής τομής. Εμφανής είναι η αλλαγή στη κλίση στην μορφολογία στις θέσεις των 9m και 20m. Ταύτιση μεταξύ των δυο τομών υπάρχει και στη παρουσία κοιλοτήτων, μια στα 12-17m και η δεύτερη στα 20-30m.

Η παρουσία του ρήγματος πιθανά να συνδέεται με τα ενεργά ρήγματα που συναντώνται στο νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης της Μυγδονίας. Η διεύθυνση του υπό μελέτη ρήγματος φαίνεται να συμφωνεί με τη διεύθυνση του ρήγματος Αγίου Βασιλείου (F- AV) το οποίο αποτελεί προέκταση προς τα δυτικά του ενεργού ρήγματος Γερακαρούς- Νικομηδινού- Στίβου- Περιστερώνα (F-GNSP), με το τελευταίο να συνδέεται με τη σεισμική ακολουθία του 1978, που έπληξε με μεγάλες ζημιές τη πόλη της Θεσσαλονίκης. Από αυτά προκύπτει ότι η δράση του ενεργού ρήγματος Αγίου Βασιλείου (F- AV), που εντοπίζεται ως το όριο μεταξύ υποβάθρου (T- Jm.st) και

Τεταρτογενών αποθέσεων (Pt. t3.1), επηρεάζει ενδεχομένως με μικρότερης έκτασης ρήγματα τις Ολοκαινικές αποθέσεις, τα οποία εμφανίζονται μέσα σε αυτές με τη μορφή επιφανειακών ρωγμών σε κατασκευές.



Εικόνα 55: Χάρτης επεξεργασμένος σε λογισμικό QuantumGIS με υπόβαθρο τον χάρτη από την έρευνα του Χατζηπέτρον (2006), όπου φαίνονται με κόκκινο χρώμα οι θέσεις που παρατηρούνται ζημιές σε κατασκευές από τη δράση του ρήγματος και με μαύρη γραμμή σημειώνεται η πιθανή θέση του ρήγματος στις ενδιάμεσες περιοχές, ενώ με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι τομές σεισμικής διάθλασης και ηλεκτρικής τομογραφίας που πραγματοποιήθηκαν. Με πράσινο χρώμα τοποθετήθηκαν οι θέσεις των λιθολογικών πλευρικών ασυνεχειών, έτσι όπως ανιχνεύθηκαν στη γραμμή L1 έπειτα από ερμηνεία των τομών. Η πλευρική ασυνέχεια των 20m ταυτίζεται με την θέση του ρήγματος (μαύρη γραμμή). L1: σεισμική γραμμή κοντά στο κατάστημα «ΕΓΝΑΤΙΑ», L3: σεισμική γραμμή κοντά στη θέση 3 κατά Χατζηπέτρος, 2006.

A. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΦΡΑΦΙΑ

- Ασβεστά, Α., 1992. Ο μαγματισμός και η συνοδός του ιζηματογένεση κατά τα πρώτα στάδια ανοίγματος της ωκεάνιας λεκάνης του Αξιού στο Τριαδικό. (Διδακτορική Διατριβή)
- Βουδούρης, Κ., 2009. Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος. Εκδόσεις Τζιόλας, Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης, Κ., 2013. Τεχνική Υδρογεωλογία: Υπόγεια Νερά. Εκδόσεις Τζιόλας, Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης, Κ., 2017. Εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειου νερού. Εκδόσεις Τζιόλας, Θεσσαλονίκη.
- Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.): Τοπογραφικός χάρτης Θέρμης, 1970, Κλίμακας 1:50.000.
- Ζερβοπούλου Α., 2010. Νεοτεκτονικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης σε σχέση με τα εδάφη θεμελίωσης. (Διδακτορική Διατριβή)
- Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε): Γεωλογικός 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, Σελίδες 317.
- Παπαζάχος Β. Κ., Καρακαΐσης Γ. Φ., Χατζηδημητρίου Π. Μ., 2005. Εισαγωγή στη σεισμολογία. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παπαζάχος, Κ., Τσόκας, Γρ., Τσούρλος, Π., Βαργεμέζης, Γ., Σταμπολίδης Αλ., Μπογιατζής, Π., Καραούλης, Μ., Σιμυρδάνης, Κλ., Τάσσης, Γ., Βεντούζη, Χ.,

Φίκος, Η., Κκάλλας, Χ., 2009. Μελέτη Σεισμικότητας- Σεισμοτεκτονικής της περιοχής Αναργύρων- Φανού. Τελική έκθεση, Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2009, Σελίδες 73.

- Παυλίδης Σ. Β. 2016. Γεωλογία των Σεισμών: Εισαγωγή στη Νεοτεκτονική, Μορφοτεκτονική, Παλαιοσεισμολογία και Αρχαιοσεισμολογία. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Σκορδύλης, Ε.Μ., 1988. Το τηλεμετρικό σεισμολογικό δίκτυο του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. στη βόρεια Ελλάδα και η συμβολή του στη σεισμολογική μελέτη της περιοχής. Πρακτικά του 1ου Συμποσίου για τις πρόσφατες τάσεις στη Σεισμολογία και τη Γεωφυσική του ελληνικού χώρου, Θεσσαλονίκη, Σελίδες 123-141.
- Τσάπανος Θ., Παυλίδης Σ., Χατζηπέτρος Α., 2006. Γεωλογική – Σεισμολογική έρευνα του ρήγματος στο Δ.Δ. Λαγυνών του Δήμου Λαγκαδά. Έκθεση Δήμου Λαγκαδά.
- Τσελέντης Α. & Παρασκευόπουλος Π., 2013. Εφαρμοσμένη γεωφυσική. Εκδόσεις Liberal Books, Αθήνα.
- Φυτίκας Μ. & Ανδρίτσος Β., 2004. Γεωθερμία. Εκδόσεις Τζιόλας, Θεσσαλονίκη
- Χατζηπέτρος, Α., 1998. Παλαιοσεισμολογική- Μορφοτεκτονική μελέτη και μηχανική συμπεριφορά των συστημάτων ενεργών διαρρήξεων, Μυγδονίας, Ανατολικής Χαλκιδικής, Κοζάνης- Γρεβενών. Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη. Σελίδες 354.
- 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, Pages 278–290.
- Alwan, I., A., K., 2013. Comparison between Conventional Arrays in 2D Electrical Resistivity Imaging Technique for Shallow Subsurface Structure Detection of the University of Technology. Engineering and Technology Journal 31, 10 Part (A) Engineering, Pages 1817-1824
- Barka, A. A., 1992. The North Anatolian Fault Zone. Annales Tectonicae, Vol. 6, Pages 164-195.
- B.R.G.M., 1971. Etude Hydrogeologique du Basin de Mygdonia, O.A.E.S

- 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, Pages 155-164.
- 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, Pages 127.
- 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, September- October 2005, Pages 170-188.
- 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, Pages 273.
- EUROSEISRISK. 2nd Annual Report, 2003.
- 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, Pages 225-230.
- Kockel, F., and Walther, H. W., 1968. Zur geologischen Entwicklung des Suldlichen Seorvomazedonischen Massivs (Nordgriechenland). Bulg. Akad. Sc. Bull. Geol. Inst., Serv. Geot. Str. Lyth., No 17, January 1968, Pages 133–142.
- Koufos, G., 1992. The Pleistocene carnivores of the Mygdonia Basin (Macedonia, Greece). Annales de Paleontologie, Vol. 78, No 4, Pages 205-257.
- Koufos, G., Syrides G., Kostopoulos, D., Koliadimou, K., 1995. Preliminary results about the stratigraphy and the paleoenvironment of Mygdonia Basin, Macedonia, Greece. GEOBIOS, M.S., No 18, Pages 243-249.

- Lyberis, N., 1984. Tectonic evolution of the Aegean trough in the geological evolution of the Eastern Mediterranean. London, Geological Society, Special Publ. No 17, Pages 709–741.
- 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, Pages 577-600.
- Mercier, J. L., Sorel, D., Vergely, P., Simeakis, K., 1989. Extensional tectonic regimes in the Aegean basins during the Cenozoic. Basin Research, Vol. 2, No 1, March 1989, Pages 49 – 71.
- 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, Pages 11-27.
- Mountrakis, D., Pavlides, Sp., Zouros N., Chatzipetros, Al., Kostopoulos, D., 1996. The May 13, 1995 western Macedonia (Greece) earthquake; Preliminary results on the seismic fault geometry and kinematics. Bulletin of Geological Society of Greece. Athens, Greece. Vol.6, Pages 112-121.
- Ogungbe, A. S., Olowofela, J. A., Da-Silva, O. J., Alabi, A.A., Onori, E. O., 2010. Subsurface Characterization using Electrical Resistivity (Dipole-Dipole) method at Lagos State University (LASU) Foundation School, Badagry. Advances in Applied Science Research, Vol. 1, Pages 174-181.
- 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, Pages 171-183.
- 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, Pages 72-80.
- Papazachos, B., Tsapanos, T., Panagiotopoulos, D., 1982. A premonitory pattern of earthquakes in Northern Greece. Nature, Vol. 296, Pages 232- 235.
- Pavlides, S., Kilias, A., (1987). Neotectonic and active faults along the Servomacedonian zone (Chalkidiki, N. Greece). Annales Tectonicae, Vol. 1, Pages 97-104.
- 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, Pages 176-188.

- 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, Pages 87.
- Tranos, M., Papadimitriou, E. Kiliyas, 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, Pages 2109-2123.

C. 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.land.copernicus.eu/global Observation Programme Copernicus
- www.penteli.meteo.gr/stations/lagadas Μετεωρολογικός σταθμός Λαγκαδά
- www.statistics.gr/2011 Ελληνική Στατιστική Αρχή