



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΙΕΡΕΜΙΑΔΟΥ ΒΙΡΓΙΝΙΑ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ
ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΓΓΕΛΟΧΩΡΙΟΥ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ',
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: 'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ'*

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2023





ΙΕΡΕΜΙΑΔΟΥ ΒΙΡΓΙΝΙΑ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ
ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΓΓΕΛΟΧΩΡΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στο πλαίσιο του Προγράμματος
Μεταπτυχιακών Σπουδών 'Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία', με κλάδο
ειδίκευσης στην 'Εφαρμοσμένη Γεωφυσική'

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Βαργεμέζης Γιώργος, Καθηγητής Α.Π.Θ., Επιβλέπων.

Τσούρλος Παναγιώτης, Καθηγητής Α.Π.Θ., Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής
Επιτροπής.

Βουδούρης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Α.Π.Θ., Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής
Επιτροπής.



© Βιργινία Ιερεμιάδου, Γεωλόγος, 2023

Με την επιφύλαξη κάποιων δικαιωμάτων

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΓΓΕΛΟΧΩΡΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ – *Μεταπτυχιακή*

Διπλωματική Εργασία

Το έργο παρέχεται υπό τους όρους Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0.

© Virginia Ieremiadou, Geologist, 2023

Some rights reserved.

APPLICATION OF GEOPHYSICAL METHODS IN THE STUDY OF
SALINIZATION IN THE AREA OF AGGELOCHORI, THESSALONIKI. – *Master
Thesis*

The work is provided under the terms of Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0.

Citation:

Ιερεμιάδου Βιργινία, 2023. – Εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων στη μελέτη της υφαλμύρισης στην περιοχή του Αγγελοχωρίου Θεσσαλονίκης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Ieremiadou Virginia, 2023. – Application of geophysical methods in the study of salinization in the area of Aggelochori, Thessaloniki. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki.

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



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Κατ' αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βαργεμέζη Γεώργιο, Καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για την επίβλεψη και την αμέριστη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Οι συμβουλές και η καθοδήγηση του ήταν απαραίτητες για την ολοκλήρωση αυτής της διατριβής.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Τσούρλο Παναγιώτη, Καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για τη συμβολή του, το συνεχές ενδιαφέρον και τις συμβουλές του, που με βοήθησαν να βελτιώσω την εργασία μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Συρίδη Γεώργιο, Καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για την ιδιαίτερη βοήθεια του και τις συμβουλές του σε γεωλογικά και γεωμορφολογικά ζητήματα, για την περιοχή του Αγγελοχωρίου.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Μιχαηλίδη Στυλιανό, του Τμήματος Παρακολούθησης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, της Διεύθυνσης Υδάτων Κεντρικής Μακεδονίας για τις χρήσιμες γνώσεις του στη νομοθεσία των υφάλμυρων υπόγειων υδάτων.

Ακόμη, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Φίκο Ηλία, μέλος του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού (ΕΔΙΠ) του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για τη βοήθεια του στην υλοποίηση των γεωφυσικών μετρήσεων και τις συμβουλές του σε γεωλογικά ζητήματα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, Γεώργιο Τσούγγαρη και Γεώργιο Παπαδόπουλο, για τη σημαντική τους στήριξη και βοήθεια στην εκτέλεση των μετρήσεων.

Ευχαριστώ θερμά όλους τους καθηγητές του τομέα Γεωφυσικής, του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, που με βοήθησαν σε όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών και μου μετέδωσαν τις χρήσιμες γνώσεις τους.



Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Σε όλους εσάς, εκφράζω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη για τη συμβολή και τη στήριξή σας. Αυτή η διπλωματική εργασία δεν θα ήταν εφικτή χωρίς εσάς.



Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον εντοπισμό του φαινομένου υφαλμύρισης στην περιοχή του Αγγελοχωρίου, με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης.

Το Αγγελοχώρι αποτελεί παραθαλάσσιο χωριό του δήμου Θερμαϊκού και βρίσκεται έξω από την πόλη της Θεσσαλονίκης. Οι ακτές της ευρύτερης περιοχής εντάσσονται στα ανατολικά παράλια του Θερμαϊκού κόλπου. Τα τελευταία χρόνια η περιοχή του Αγγελοχωρίου χαρακτηρίζεται από έντονη γεωργική, οικιστική και βιομηχανική ανάπτυξη, γεγονός που οδήγησε στην υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων και αποτέλεσε βασικό παράγοντα της σταδιακής διεύδυσης του θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα.

Για τη διεξαγωγή της έρευνας, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) και η μέθοδος των παροδικών πεδίων (TEM). Η επιλογή αυτών των μεθόδων έγινε λόγω της αποτελεσματικότητάς τους στην ανίχνευση των πολύ χαμηλών αντιστάσεων που χαρακτηρίζουν τους υφάλμυρους υδροφορείς.

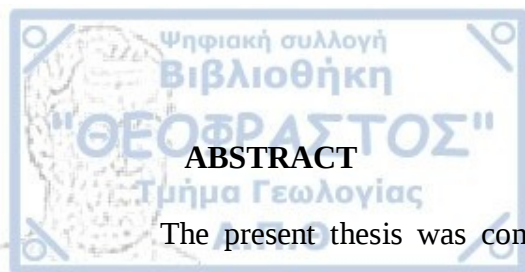
Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν 14 ηλεκτρικές τομογραφίες και 9 σημειακές μετρήσεις TEM, καλύπτοντας επαρκώς την περιοχή του Αγγελοχωρίου. Έπειτα, έγινε συνδυαστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων με τα διαθέσιμα στοιχεία γεωτρήσεων αλλά και με προηγούμενες μελέτες.

Με βάση τα αποτελέσματα των γεωφυσικών μεθόδων της παρούσας εργασίας διαπιστώνεται ότι :

- Το πρόβλημα της υφαλμύρισης στο Αγγελοχώρι, παρατηρείται σε έντονο βαθμό, με τη διεύδυση του αλμυρού νερού να έχει εισχωρήσει εκατοντάδες μέτρα βαθύτερα στην ενδοχώρα.
- Στο δυτικό τμήμα της περιοχής, όπου βρίσκεται η λιμνοθάλασσα του Αγγελοχωρίου, η εξάπλωση του φαινομένου είναι μεγαλύτερη, ενώ το βορειοανατολικό και το νοτιοανατολικό, δεν φαίνεται να έχει προσβληθεί από τη διεύδυση του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα.
- Είναι επιτακτική ανάγκη η άμεση λήψη μέτρων, για τον περιορισμό της έκτασης του φαινομένου και την αποκατάσταση της ποιότητας των υπόγειων υδροφορέων.



Λέξεις κλειδιά: Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, μέθοδος παροδικών πεδίων (TEM), υφαλμύριση.



ABSTRACT

The present thesis was conducted with the aim of identifying the phenomenon of salinization in the area of Aggelochori, using geophysical survey methods.

Aggelochori is a coastal village, located close to the city of Thessaloniki. The shores of this area are part of the eastern coastline of Thermaikos gulf. Over the years, the area of Aggelochori has been developed rapidly in the field of agriculture, population and industry, which has led to the overexploitation of groundwater and has been a key factor in the gradual intrusion of seawater. For this research, the electrical resistivity tomography (ERT) method and the transient electromagnetic (TEM) method were used, in order to map the subsurface structure and detect the very low resistivities that characterize saline aquifers.

In particular, a total of 14 ERT lines and 9 TEM soundings were measured, covering the entire area. Afterwards, a combined interpretation of the results was performed, including the available drilling results and the master thesis by Kesoglou (2011).

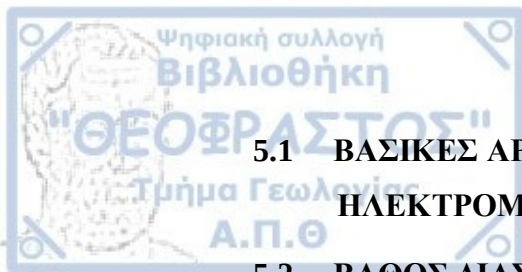
According to the results of the geophysical survey, the following observations were made:

- The salinization in Aggelochori is observed to a significant degree, with the intrusion of saline water having reached the inland area.
- The extent of the problem is greater at the western part of the area, where Aggelochori's lagoon is located, while the northeastern and southeastern parts, do not seem to be affected by the intrusion of seawater into the aquifers.
- Urgent measures are necessary to limit the spread of salinization and restore the quality of the groundwater resources.

Keywords: Electrical resistivity method, transient electromagnetic method (TEM), salinization.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	
1. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ	3
1.1 Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	3
1.2 ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ	4
1.3 ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ	6
1.4 ΑΙΤΙΑ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ	7
1.5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ	8
1.6 ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ	12
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	15
2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	18
2.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	28
2.3 ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΑ ΑΛΥΚΗΣ ΑΓΓΕΛΟΧΩΡΙΟΥ	30
2.4 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	35
3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΓΕΩΦΥΣΙΚΗ	45
4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	50
4.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	52
4.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	54
4.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΥΘΕΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	58
4.4 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ	59
4.5 Ο ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ	62
4.6 ΜΕΣΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ (RMS).....	63
4.7 ΕΞΟΠΑΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ 	64
4.8 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	67
5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ (TEM)....	70



5.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ (TEM)	71
5.2	ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ - ΕΠΙΔΕΡΜΙΚΟ ΒΑΘΟΣ	73
5.3	ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	74
5.4	ΕΞΟΠΑΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ (TEM)	76
5.5	ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ TEM.....	85
5.6	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ TEM	87
6.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	92
6.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	93
6.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ (TEM).....	112
7.	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	126
7.1	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ TEM.....	126
7.2	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	140
7.3	ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	156
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	159
9.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	165



Η παρούσα διπλωματική εργασία διεκπεραιώθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος 'Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία', με ειδίκευση στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική και Σεισμολογία, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Ο τομέας της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής εστιάζει στη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών στο υπέδαφος, με μη καταστρεπτικές μεθόδους, χρησιμοποιώντας νόμους της Φυσικής. Βασικός σκοπός της επιστήμης αυτής, αποτελεί ο εντοπισμός δομών ή στόχων ενδιαφέροντος στο υπέδαφος που είναι οικονομικού, γεωτεχνικού, περιβαλλοντικού ή πολιτισμικού χαρακτήρα. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόζονται, βασίζονται στον υπολογισμό μεγεθών όπως η ταχύτητα διάδοσης των πετρωμάτων, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, ηλεκτρική αντίσταση κ.α. και διακρίνονται στις σεισμικές, ηλεκτρικές, βαρυτικές, ηλεκτρομαγνητικές και μαγνητικές.

Η διπλωματική αυτή, έχει περιβαλλοντικό χαρακτήρα και ασχολείται με την διερεύνηση του φαινομένου υφαλμύρισης, στην ευρύτερη περιοχή του Αγγελοχωρίου. Υφαλμύριση, λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο το θαλασσίνο νερό διεισδύει στους υπόγειους υδροφορείς (Βουδούρης, 2003) και συνιστά ένα από τα κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα των παράκτιων περιοχών. Οι επιπτώσεις του φαινομένου είναι εξαιρετικά επιβλαβείς και επιζήμιες, τόσο στο φυσικό όσο και στο ανθρώπινο περιβάλλον.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της ηλεκτρικής μεθόδου διασκόπησης και ειδικότερα τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας όπως και της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, των παροδικών πεδίων TEM, καθώς είναι οι πιο διαδεδομένες για την αναγνώριση και χαρτογράφηση υφάλμυρου νερού στα υπόγεια ύδατα. Με την ηλεκτρική τομογραφία, επιτυγχάνεται καλύτερη απεικόνιση της δομής του υπεδάφους, σε βάθη 60m έως 150m, ενώ τα TEM έχουν μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα και προσφέρουν περισσότερες πληροφορίες, για μεγαλύτερα βάθη.

Βασικός στόχος της εργασίας, είναι ο εντοπισμός των ζωνών υφαλμύρισης και ο βαθμός εξάπλωσης προς την ενδοχώρα, με τη χρήση των πιο ενδεδειγμένων γεωφυσικών μεθόδων για το πρόβλημα αυτό.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο, περιγράφεται αρχικά, ο κύκλος του νερού στη Γη, με σκοπό την κατανόηση της προέλευσης του υπόγειου νερού. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η έννοια και η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης, οι αιτίες που το προκαλούν και οι τρόποι αντιμετώπισης για τον περιορισμό του.

Έπειτα, στο επόμενο κεφάλαιο, αναφέρονται συνοπτικά οι βασικότερες πληροφορίες για την περιοχή έρευνας, μαζί με τα γεωλογικά, τα γεωμορφολογικά και τα τεκτονικά στοιχεία της. Ακόμη, παρουσιάζονται οι υδρογεωλογικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή του Αγγελοχωρίου σε προηγούμενες μελέτες.

Στο τρίτο κεφάλαιο, εισάγεται η έννοια του κλάδου της Υδρογεωφυσικής και αναλύεται ο συσχετισμός της Υδρογεωλογίας με τις γεωφυσικές μεθόδους διασκόπησης.

Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο, αναλύονται ξεχωριστά οι βασικές αρχές των γεωφυσικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην παρούσα έρευνα, συμπεριλαμβανομένου του εξοπλισμού και του τρόπου διεκπεραίωσης των μετρήσεων. Επίσης, αναφέρεται για κάθε μέθοδο η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι που ορίστηκαν για τις μετρήσεις (διατάξεις, μήκος αναπτύγματος, συχνότητες εκπομπής κλπ.) και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας και των TEM, αντίστοιχα.

Ακολουθεί το έβδομο κεφάλαιο, στο οποίο γίνεται η συνδυαστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων και η αξιολόγηση τους σε σύγκριση με διαθέσιμα στοιχεία άλλων μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή μελέτης.

Τέλος, παρατίθενται συνοπτικά τα αποτελέσματα και τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

1.1 Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Ο κύκλος του νερού, γνωστός ως υδρολογικός κύκλος, είναι η συνεχής ανακύκλωση του νερού στη Γη, μεταξύ της ατμόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και της ξηράς. Η συνεχής αυτή διεργασία, επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας. Το νερό βρίσκεται στη φύση σε τρεις καταστάσεις, υγρή, αέρια (υδρατμοί) και στερεά (παγετώνες) και η ποσότητά του είναι της τάξης 1.336.800.000 km³. Το νερό φθάνει στην επιφάνεια της Γης, με τη μορφή βροχής, χιονιού, χαλαζιού κλπ., τα οποία είναι γνωστά και ως «ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα» (Σούλιος, 2010). Στη συνέχεια, το νερό της βροχής ή τα κατακρημνίσματα, ακολουθούν μία από τις τρεις πορείες:

- Εισχωρούν στην επιφάνεια του εδάφους και εισέρχονται στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, ή
- Απορρέουν επιφανειακά στα ποτάμια συστήματα, έως ότου να καταλήξουν στη θάλασσα και εξατμισθούν, ή
- Είτε εξατμίζονται είτε επανέρχονται στην ατμόσφαιρα μέσω της εξατμισοδιαπνοής των φυτών (Σούλιος, 2010).

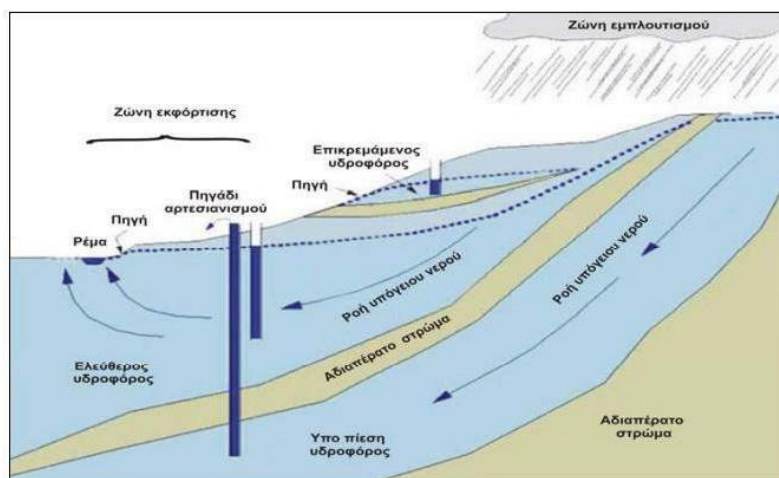


Σχήμα 1.1 Ο κύκλος του νερού (USGS).

1.2 ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα μέρος του νερού των κατακρημνίσεων εισχωρεί στο έδαφος. Η κίνηση του νερού διακόπτεται όταν συναντήσει έναν σχηματισμό, με αποτέλεσμα να συγκεντρωθεί στη θέση αυτή. Το υπεδαφικό στρώμα το οποίο συγκεντρώνει το νερό στους πόρους του, καθίσταται κορεσμένο και αν οι πόροι του επικοινωνούν μεταξύ τους, τότε επιτρέπεται η κίνηση του υπόγειου νερού. Το κορεσμένο σε νερό στρώμα ονομάζεται *υδροφόρος*, ή *υδροφορέας*, ή *υδροφόρο στρώμα* και είναι ικανό να τροφοδοτήσει γεωτρήσεις και πηγές με σημαντικές ποσότητες νερού (Βουδούρης, 2009). Τα κυριότερα είδη υδροφόρων είναι οι:

- **Ελεύθεροι υδροφορείς ή φρεάτια στρώματα:** είναι οι υδροφορείς, στους οποίους η στάθμη ή ορίζοντας, δεν εμποδίζεται από αδιαπέρατα στρώματα στην οροφή τους και έχουν ως δάπεδο στεγανό γεωλογικό στρώμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στην ελεύθερη επιφάνεια ή στάθμη των υπόγειων νερών, η υδροστατική πίεση να είναι ίση με την ατμοσφαιρική (Βουδούρης, 2009) .
- **Υπό πίεση υδροφορείς ή εγκλωβισμένοι:** στην περίπτωση αυτή, το νερό είναι περιορισμένο μεταξύ του αδιαπέρατου σχηματισμού της οροφής και του στεγανού δαπέδου. Το υπό πίεση υδροφόρο στρώμα δεν έχει ελεύθερη επιφάνεια και η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής (Σούλιος, 2010, Βουδούρης, 2009).



Σχήμα 1.2 Είδη υδροφόρων οριζόντων (Βουδούρης, 2009).

Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών εξαρτάται κυρίως από:

α) Το πορώδες (n) : εκφράζεται με τον λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (Nκ) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος, ως προς το συνολικό όγκο του πετρώματος Vol.

$$n = \frac{V_{\kappa}}{V_{\text{ολ}}}$$

Πίνακας 1.1 Τιμές ολικού πορώδους (Καλλέργης, 2000).

Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρωγματομένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ιλυόλιθοι	21-41	Μη Ρωγματομένα	0-5
Χονδρόκοκκοι άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρωμένοι γρανίτες	34-57
Ιλύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

β) Το ενεργό πορώδες: δείχνει τον αριθμό των διακένων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού, λόγω της επίδρασης της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Το πορώδες που προκύπτει από τη διάταξη των κόκκων του πετρώματος ονομάζεται πρωτογενές, ενώ αυτό που δημιουργήθηκε από τεκτονισμό και τη διάλυση πετρωμάτων, ονομάζεται δευτερογενές.

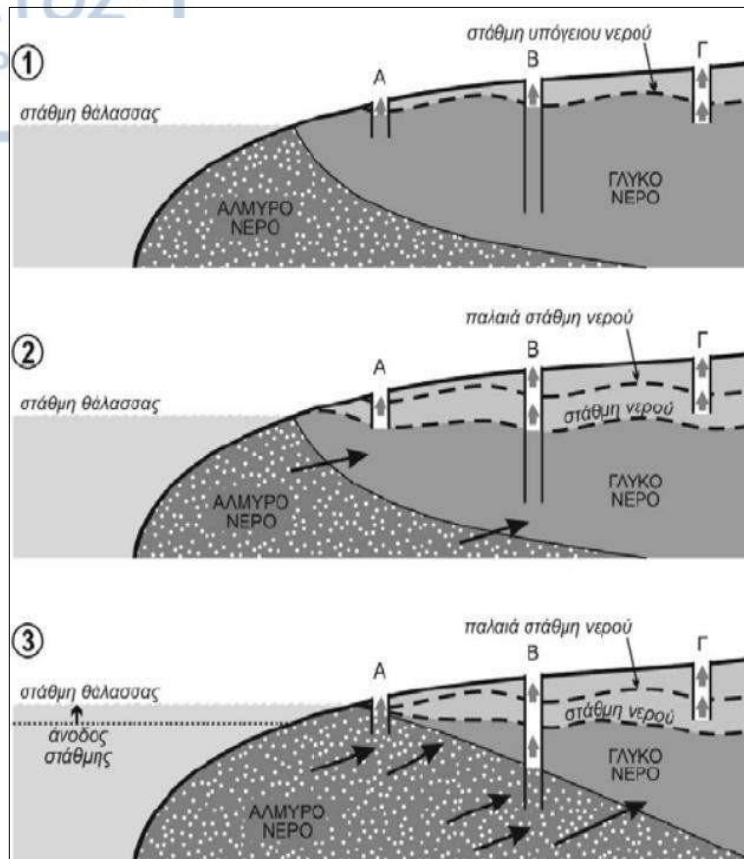
γ) Τους υδροπερατούς και αδιαπέρατους σχηματισμούς: υδροπερατοί ονομάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν τη διείσδυση και την κυκλοφορία του νερού μέσω της μάζας τους.

1.3 ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Στις παράκτιες περιοχές, είναι συνήθης η ανάπτυξη υδροφόρων στην έξοδο των ρευμάτων, όπου οι αποθέσεις φερτών υλικών είναι σημαντικές. Η μεγάλη συγκέντρωση του πληθυσμού στις περιοχές αυτές και οι αυξημένες ανάγκες, σε συνδυασμό με την εύκολη άντληση και την βιομηχανική χρήση, οδήγησε στην υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων. Όταν οι απολήψιμες ποσότητες υπόγειου νερού ξεπεράσουν την ικανότητα της ασφαλούς απόδοσης ενός παράκτιου υδροφορέα, σημειώνονται φαινόμενα θαλάσσιας διείσδυσης, τα οποία αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων νερών (Βουδούρης κ.α., 2004).

Το φαινόμενο, κατά το οποίο παρατηρείται διείσδυση του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα, με αποτέλεσμα την αύξηση της αλατότητας του νερού, λέγεται υφαλμύριση (Βουδούρης, 2003). Η υφαλμύριση παρατηρείται τόσο στους ελεύθερους, όσο και στους υπό πίεση υδροφορείς.

Γενικά, στους παράκτιους υδροφορείς, το αλμυρό νερό βρίσκεται σε επαφή με το γλυκό, αλλά δεν αναμειγνύονται, λόγω της διαφοράς της πυκνότητάς τους. Το γλυκό νερό έχει πυκνότητα $\rho_{\gamma}=1.004 \text{ gr/cm}^3$, ενώ το θαλασσινό έχει $\rho_{\theta}=1.040 \text{ gr/cm}^3$. Σε αδιατάρακτα παράκτια συστήματα και υπό φυσιολογικές συνθήκες, οι υδροφορείς, αποστραγγίζονται προς τη θάλασσα. Ωστόσο, με την ταπείνωση της στάθμης των υπόγειων νερών, σε σχέση με αυτή της θάλασσας, δημιουργούνται αρνητικές υδραυλικές κλίσεις, με αποτέλεσμα τη διείσδυση του θαλασσινού νερού, προς τη θέση που κατείχε το γλυκό. Έτσι, το γλυκό νερό εμπλουτίζεται με χλωριούχα ιόντα, καθιστώντας το ακατάλληλο για κάθε χρήση από τον άνθρωπο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ιχθυοκαλλιέργειες.



Σχήμα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση της σταδιακής διείσδυσης του θαλασσινού νερού λόγω των υπεραντλήσεων (Βουδούρης, 2009).

1.4 ΑΙΤΙΑ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης και η υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού, μπορεί να προκληθεί κατά κύριο λόγο από ανθρωπογενείς παράγοντες, αλλά και σε μικρότερο βαθμό από φυσικά αίτια. Τα κύρια φυσικά αίτια που οδηγούν στη διείσδυση του θαλασσινού νερού είναι :

- Η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας,
- Η μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων και οι κλιματικές αλλαγές (ξηρασία),
- Η ύπαρξη αποθέσεων εβαποριτών,
- Η ύπαρξη παράκτιων καρστικών πηγών,
- Η εισχώρηση νερού σε ρήγματα ή διακλάσεις,

- Τα εγκλωβισμένα αλμυρά νερά από παλαιότερες εποχές και
- Η ύπαρξη λιμνοθάλασσας. Σε περιόδους ξηρασίας το αλμυρό νερό της λιμνοθάλασσας εξατμίζεται, με αποτέλεσμα τα άλατα που καθιζάνουν να εισχωρούν στο υπόγειο νερό.

Παράλληλα, τα βασικότερα ανθρωπογενή αίτια που οδηγούν στην υφαλμύριση των υπόγειων υδάτων, είναι:

- Η υπεράντληση του υπόγειου νερού για την άρδευση και την ύδρευση,
- Οι παράνομες γεωτρήσεις,
- Η οικιστική ανάπτυξη (τσιμεντοποίηση και ασφαλοποίηση πολεοδομικών συγκροτημάτων, στεγανοποίηση ρεμάτων και των κοιτών των χειμάρρων κ.α.)
- Η απόρριψη άλμης από εργοστάσια αφαλάτωσης, ειδικότερα αν γίνεται κοντά σε ακτή,
- Η χρήση λιπασμάτων,
- Η παραγωγή υγρών και στερεών αποβλήτων και
- Η χρήση ουσιών αποπαγοποίησης των δρόμων.

1.5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

Οι πρώτοι ερευνητές που μελέτησαν το φαινόμενο της υφαλμύρισης ήταν ο Badon-Ghyben (1888) και ο Herzberg (1901). Σύμφωνα με αυτούς, σε στατικές συνθήκες και σε ένα ιδεατό παράκτιο υδροφόρο (π.χ. νησί), λόγω των διαφορετικών πυκνοτήτων, το γλυκό νερό που συγκεντρώνεται, διακρίνεται από το θαλασσινό μέσω μιας ζώνης που ονομάζεται ζώνη διεπιφάνειας, ή διάφασης ή διάχυσης, ή μετάβασης ($\rho_{\gamma}=1004 \text{ gr/cm}^3$, $\rho_{\theta}=1040 \text{ gr/cm}^3$). Η διεπιφάνεια αυτή, πρέπει να ξεκινάει από την ακτή, ώστε να υπάρχει υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού (Λαμπράκης Νικόλαος, 2015).

Για ένα τυχαίο επίπεδο αναφοράς (Σχήμα 1.4), οι υδροστατικές πιέσεις P_{Σ} και $P_{\Sigma'}$, είναι ίσες και προκύπτει η σχέση Ghyben-Herzberg

$$P_{\Sigma}=P_{\Sigma'} \Leftrightarrow \quad (2.1)$$

$$\rho_{\gamma}g(z+h)=\rho_{\theta}gz \quad \Leftrightarrow \quad (2.2)$$

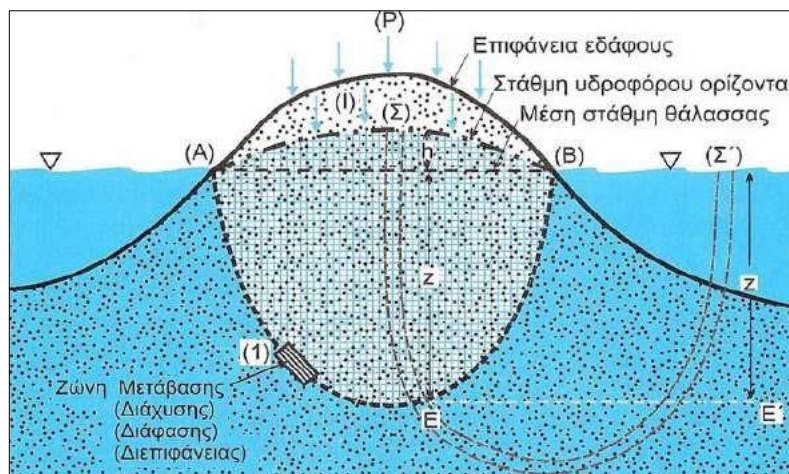
$$z=h\left(\frac{\rho_{\gamma}}{\rho_{\theta}-\rho_{\gamma}}\right)$$

(Ghyben-Herzberg) (2.3)

Όπου:

- ρ_{γ} η πυκνότητα του γλυκού νερού του υδροφορέα (gr/cm^3 ή 1000 kg/m^3),
- ρ_{θ} η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (gr/cm^3 ή 1000 kg/m^3),
- h το υδραυλικό φορτίο, η στάθμη του υπόγειου νερού του υδροφορέα,
- z το βάθος του γλυκού νερού από τη μέση στάθμη της θάλασσας,
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Στην περίπτωση που $\rho_{\gamma}=1004 \text{ kg/m}^3$ και $\rho_{\theta}=1040 \text{ kg/m}^3$ τότε η σχέση (2.3) ισούται με $z=40h$ και αυτό ισχύει για κάθε θέση κατά μήκος της πιεζομετρικής επιφάνειας των παράκτιων υδροφορέων. Με τον τύπο Ghyben-Herzberg διαπιστώνεται ότι το βάθος z του γλυκού νερού του είναι 40 φορές μεγαλύτερο από τη στάθμη του υδροφορέα h . Εάν η στάθμη του υπόγειου νερού είναι μηδέν ($h=0$), αντίστοιχα και το βάθος έχει μηδενική τιμή ($z=0$), τότε θεωρείται ότι υπάρχει μόνο αλμυρό νερό (Σούλιος, 2004).



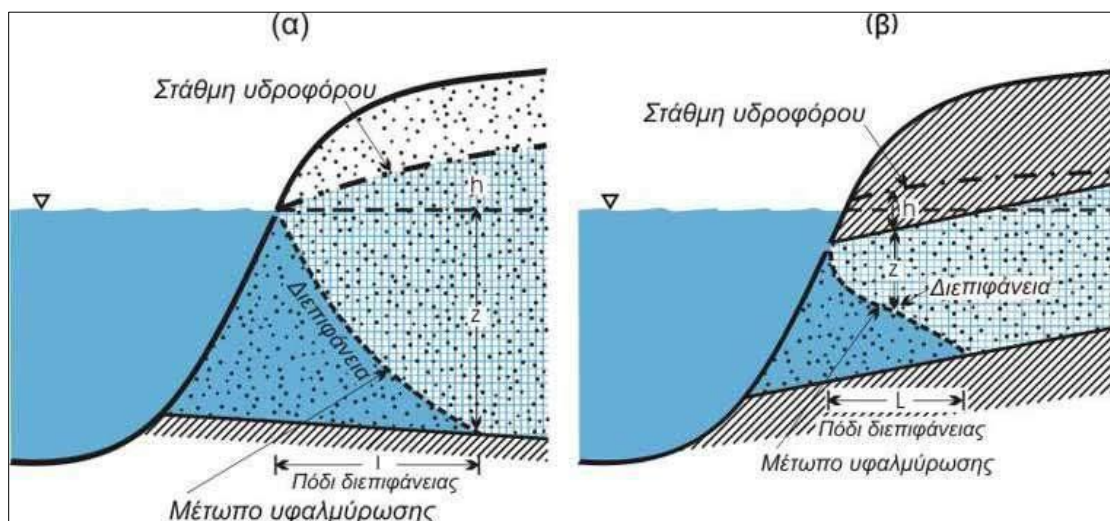
Σχήμα 1.4 Κυκλοφορία γλυκού και αλμυρού υπόγειου νερού στη ζώνη διάχυσης σε ένα παράκτιο υδροφορέα (Σούλιος, 2004).

Το μοντέλο Ghyben-Herzberg εφαρμόζεται στους ελεύθερους και υπό πίεση παράκτιους υδροφόρους. Η μέγιστη απόσταση της εισχώρησης του αλμυρού νερού σε έναν υδροφόρο, δηλαδή η απόσταση μέχρι την οποία η διεπιφάνεια συναντά το αδιαπέρατο υπόβαθρο ονομάζεται πόδας της διεπιφάνειας γλυκού και αλμυρού νερού. Η απόσταση αυτή δίνεται από τη σχέση του Bear (1979):

$$L = D \sqrt{\frac{K}{cR}} \quad (2.4)$$

Όπου :

- c ο λόγος $\frac{\rho_g}{\rho_0 - \rho_g}$,
- R ο εμπλουτισμός (mm/y) της μοναδιαίας λωρίδας του παράκτιου υδροφορέα,
- D το πάχος του υδροφόρου που αντιστοιχεί στον πόδα της διεπιφάνειας.
- K η υδραυλική αγωγιμότητα (m/s).



Σχήμα 1.5 Ζώνη Διάφρασης (διεπιφάνειας): (α) σε ελεύθερο, και (β) σε υπό πίεση υδροφόρο στρώμα (Σούλιος, 2004).

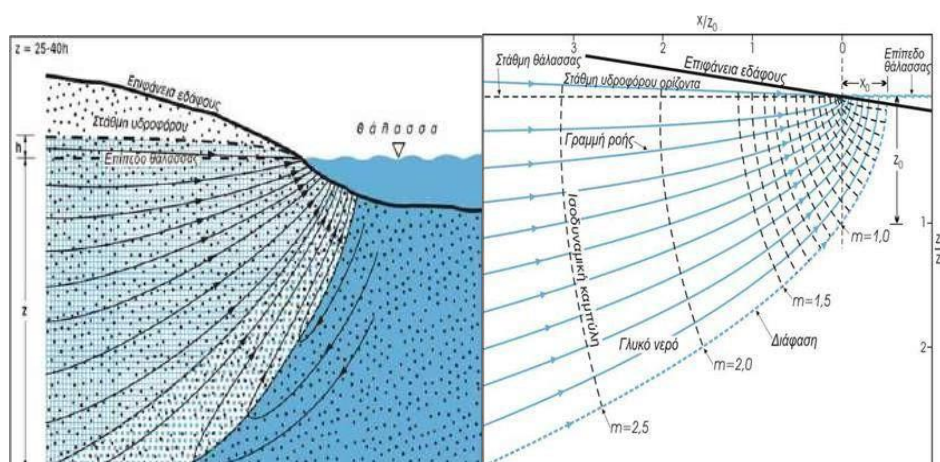
Παρ' όλα αυτά, το μοντέλο των Ghyben-Herzberg αποτελεί μια προσεγγιστική μαθηματική προσομοίωση, που δεν αναπαριστά στην πραγματικότητα το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Για παράδειγμα, σε δυναμικές συνθήκες, λόγω συνεχούς ροής του γλυκού νερού προς τη θάλασσα, η διεπιφάνεια δεν ξεκινά από την ακτή, αλλά από κάποια απόσταση από τη θάλασσα. Επίσης, η διεπιφάνεια γλυκού και αλμυρού νερού, δεν είναι ακίνητη αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα ή αντίστροφα. Ακόμη, το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψιν την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας, στην διεπιφάνεια του γλυκού νερού προς τη θάλασσα (Βουδούρης, 2003). Ωστόσο το μοντέλο προσομοίωσης του Ghyben-Herzberg, αποτελεί χρήσιμο εργαλείο, για την εύρεση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού.

Μια πιο ακριβή σχέση, για την περιγραφή της θέσης της διεπιφάνειας σε ένα πραγματικό δίκτυο ροής παράκτιου υδροφόρου στρώματος (Σχήμα 1.6), έδωσε ο Glover (1964) :

$$z^2 - \frac{2q\rho_\gamma}{\Delta\rho K} x - \frac{q^2\rho_\gamma^2}{\Delta\rho^2 K^2} = 0 \quad (2.5)$$

Όπου :

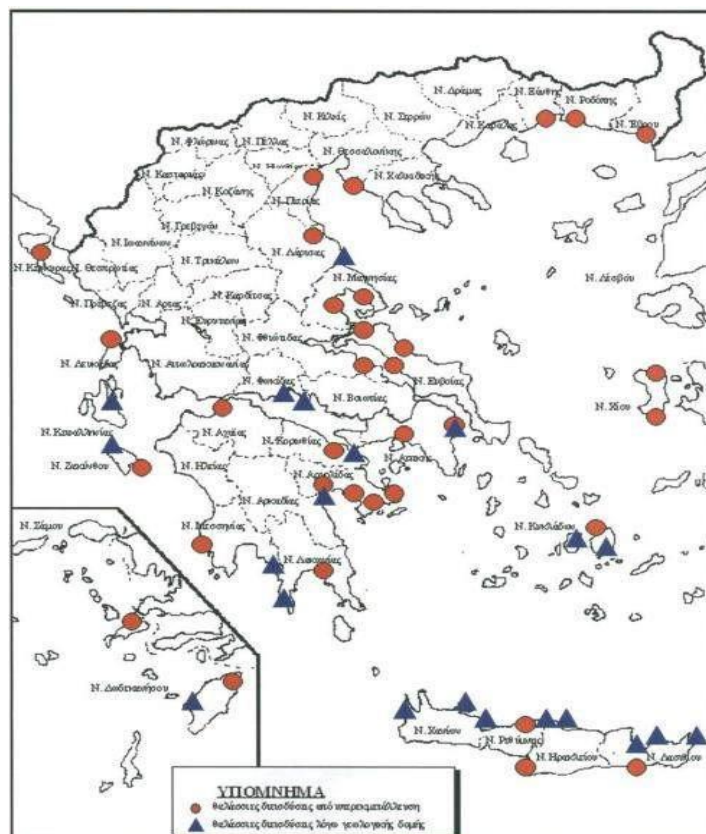
- q η ανά μονάδα μήκους της ακτής παροχή του υδροφορέα προς τη θάλασσα (m^2/s),
- $\Delta\rho$ η διαφορά πυκνοτήτων,
- K η υδραυλική αγωγιμότητα (m/s).



Σχήμα 1.6 Α) Τομή σε παράκτιο υδροφόρο στρώμα στην οποία διακρίνονται οι υπόγειες ροές, η θέση και το σχήμα της ζώνης διάφασης (μετάβασης). Β) Μοντέλο με γραμμές ροής και ισοδυναμικές καμπύλες (κατά Glover R., 1964).

1.6 ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

Η Ελλάδα στο μεγαλύτερο μέρος της περιβάλλεται από θάλασσα, επομένως η διείσδυση του θαλασσινού νερού στα υπόγεια νερά είναι αναμενόμενη. Η υφαλμύριση θεωρείται μια μορφή ρύπανσης που οφείλεται σε φυσικούς παράγοντες, αλλά οι ανθρωπογενείς δράσεις εντείνουν το φαινόμενο σε επικίνδυνο βαθμό. Η μεγάλη συγκέντρωση του πληθυσμού σε παράκτιες περιοχές, οδηγεί σε αυξημένες ανάγκες και σε έντονη εκμετάλλευση του υπόγειου νερού (άρδευση, ύδρευση, βιομηχανία). Στο Σχήμα 1.7 απεικονίζονται οι περιοχές που προσβάλλονται από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού, είτε λόγω υπεράντλησης (κόκκινοι κύκλοι), είτε από τη γεωλογική δομή της περιοχής (μπλε τρίγωνα).



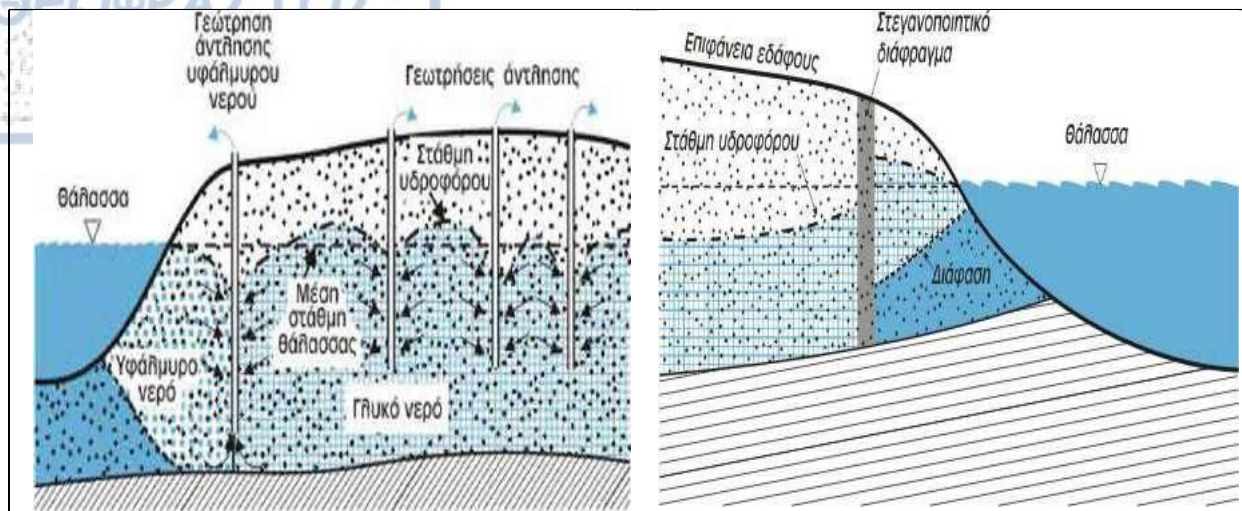
Σχήμα 1.7 Υφάλμυρα υπόγεια νερά θαλάσσιας διείσδυσης, α) από υπερεκμετάλλευση (κύκλος) β) λόγω γεωλογικής δομής (τρίγωνο) (Περγαλιώτης και Παπαδάκου, 1998).

Συνάγεται έτσι το συμπέρασμα, ότι το φαινόμενο της υφαλμύρισης αποδίδεται κυρίως στην υπεράντληση του υπόγειου νερού. Έχει παρατηρηθεί ότι σχεδόν 2 εκατομμύρια στρέμματα καλλιεργήσιμης γης, αντιμετωπίζουν τις επιπτώσεις του φαινομένου που είναι η μείωση της παραγωγής και η υποβάθμιση της αγροτικής γης. Επιπλέον, το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης προκαλεί σοβαρές αλλοιώσεις στα παράκτια ποτάμια και λιμναία οικοσυστήματα (Σταμάτης Γ., 2012). Συνεπώς, είναι επιτακτική ανάγκη ο έλεγχος, η αποκατάσταση και η διαφύλαξη των παράκτιων υδροφόρων, ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητα του γλυκού νερού.

Ορισμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της υφαλμύρισης είναι:

- Ορθολογική διαχείριση επιφανειακών και υπόγειων νερών με σωστό σχεδιασμό αντλήσεων.
- Ανύψωση της αντλίας στις γεωτρήσεις όπου εντοπίζεται πρόβλημα υφαλμύρισης.
- Στις γεωτρήσεις όπου η υδροστατική στάθμη είναι κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, απαιτείται επιπλέον ελάττωση της αντλούμενης παροχής.
- Τεχνητός εμπλουτισμός με διάφορες μεθόδους, ώστε να αυξηθεί η εκμεταλλεύσιμη παροχή και να ανεβεί η στάθμη του υδροφορέα.
- Κατασκευή υδραυλικού φραγμού του γλυκού νερού, από συστοιχία γεωτρήσεων άντλησης, ή γεωτρήσεων εμπλουτισμού.
- Δημιουργία στεγανοποιητικού διαφράγματος.
- Η ύπαρξη υπηρεσίας διαχείρισης των πόρων και χρηματοδότησης διαχειριστικού προγράμματος για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Ειδικότερα, για την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων και την καλή κατάσταση όλων των υδάτινων πόρων, έχει θεσπιστεί η Οδηγία 2000/60/EK (Θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων), όπως και για την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση, έχει θεσπιστεί η Οδηγία 2006/118/EK.



Σχήμα 1.8 Α) Δημιουργία φραγμού από τεχνητό εμπλουτισμό κοντά στην ακτή (Καλλέργη, Γ., 2001, τροποποιημένο από Σούλιος, 2004), Β) Δημιουργία στεγανοποιητικού διαφράγματος κοντά στην ακτή (Σούλιος, 2004).

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Το Αγγελοχώρι βρίσκεται σε απόσταση 30 km από το κέντρο της πόλης Θεσσαλονίκης και εντάσσεται στο δήμο Θερμαϊκού, της περιφερειακής ενότητας Θεσσαλονίκης, η οποία ανήκει στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας. Το Αγγελοχώρι, αποτελεί ένα μεγάλο παραθαλάσσιο χωριό, με έκταση 5,863 τετραγωνικά χιλιόμετρα, και μόνιμο πληθυσμό 1074 κατοίκους (2023). Η παραλία του Αγγελοχωρίου ανήκει στα ανατολικά παράλια του εσωτερικού τμήματος του Θερμαϊκού Κόλπου. Η ακτή έχει μήκος 2.700 μέτρα και οριοθετείται από το ακρωτήριο του Μεγάλου Εμβόλου μέχρι το ακρωτήριο της Τούζλας.



Σχήμα 2.1 Χάρτης της περιοχής του Αγγελοχωρίου Θεσσαλονίκης (Γεωλογικά Φύλλα Θεσσαλονίκης (1978) & Επανομής (1969), ΕΑΓΜΕ).

Η ευρύτερη περιοχή παρουσιάζει κυρίως αγροτική ανάπτυξη, καθώς καλύπτεται από μεγάλες εκτάσεις γεωργικών καλλιεργειών, αλλά εμφανίζει και έντονη αλιευτική δραστηριότητα. Τους θερινούς μήνες παρατηρείται αύξηση του τουρισμού λόγω των

παραθεριστικών κατοικιών και της οργανωμένης παραλίας που βρίσκεται δυτικά της περιοχής.

Η περιοχή του Αγγελοχωρίου παρουσιάζει επίσης, ιστορικό ενδιαφέρον, καθώς φιλοξενεί μνημεία της νεότερης ιστορίας. Η τοποθεσία του ακρωτηρίου Μεγάλου Εμβόλου ή αλλιώς Καραμπουρνού, είχε ιδιαίτερη στρατηγική σημασία τα παλαιότερα χρόνια. Τον 18^ο αιώνα, την περίοδο της Οθωμανικής Αυτοκρατορίας χτίσθηκε το φρούριο του Αγγελοχωρίου από Γερμανούς μηχανικούς (1883-1885), με σκοπό να ελέγχει το πέρασμα στον κόλπο της Θεσσαλονίκης. Ο φάρος, δίπλα από το φρούριο, κατασκευάστηκε το 1864 από την Γαλλική Εταιρεία Οθωμανικών Φάρων και αποτελεί το παλιότερο φάρο της Μεσογείου. Σήμερα η περιοχή αυτή, είναι ιδιοκτησία του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού και φιλοξενεί τη βάση ασυρμάτων ΚΕΑ (κέντρο εκπομπής Αγγελοχωρίου). Η ελεύθερη πρόσβαση στη στρατιωτική βάση, απαγορεύεται.



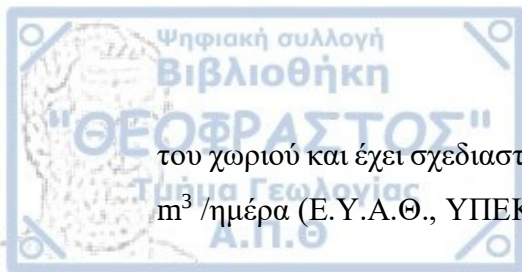
Σχήμα 2.2. Ο Φάρος Αγγελοχωρίου και το Φρούριο του Μεγάλου Εμβόλου (Δήμος Θερμαϊκού www.thermaikos.gr).



Σχήμα 2.3 Α) το λιμανάκι του Αγγελοχωρίου (Δήμος Θερμαϊκού, thermaikos.gr) και Β) Ο Φάρος του Αγγελοχωρίου (Γιάννης Τριανταφυλλόπουλος, parallaximag.gr).

Αξίζει ακόμη να αναφερθεί, η ύπαρξη ενός φυσικού προστατευμένου υδροβιότοπου γύρω από τη Λιμνοθάλασσα του Αγγελοχωρίου, η οποία βρίσκεται ανάμεσα στο Ακρωτήριο του Μεγάλου Εμβόλου και στο Ακρωτήριο της Τούζλας. Δίπλα από τη λιμνοθάλασσα λειτουργούν αλυκές και επιτυγχάνεται η παραγωγή αλατιού. Η Λιμνοθάλασσα του Αγγελοχωρίου αναλύεται περαιτέρω σε επόμενη ενότητα.

Επιπλέον, στην περιοχή του Αγγελοχωρίου υπάρχει από το 1997, η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων - Βοθρολυμάτων (ΕΕΛ ΑΙΝΕΙΑ) των Τουριστικών περιοχών Θεσσαλονίκης, έργο που βρίσκεται κάτω από την επίβλεψη της Εταιρείας Ύδρευσης Αποχέτευσης Θεσσαλονίκης (Ε.Υ.Α.Θ). Η ΕΕΛ ΑΙΝΕΙΑ βρίσκεται στο νότιο τμήμα



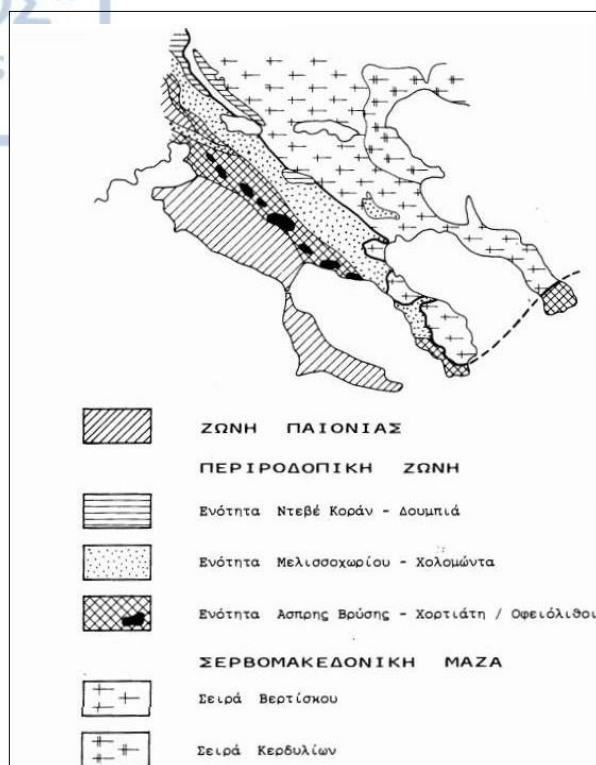
του χωριού και έχει σχεδιαστεί για φορτία 87.000 κατοίκων, με μέγιστη παροχή 26.000 m³ /ημέρα (Ε.Υ.Α.Θ., ΥΠΕΚΑ).

Η διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων γίνεται μέσω υποθαλάσσιου αγωγού, η εκβολή του οποίου εντοπίζεται στη θαλάσσια περιοχή βορειοδυτικά του οικισμού Νέας Μηχανιώνας. Ακόμη, από την άνοιξη του 2017, λειτουργεί η νέα μονάδα οζόνωσης για την απολύμανση των επεξεργασμένων λυμάτων πριν αυτά διατεθούν στο Θερμαϊκό κόλπο (Ε.Υ.Α.Θ.).

Σύμφωνα με την Ε.Υ.Α.Θ. η ποιότητα των επεξεργασμένων λυμάτων καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις της ελληνικής και ευρωπαϊκής νομοθεσίας ως προς όλες τις παραμέτρους. Η απόδοση της λειτουργίας της εγκατάστασης κρίνεται ιδιαίτερα υψηλή και κυμαίνεται σε ποσοστό από 93 έως 99,9% ως προς τις παραμέτρους που ορίζουν οι διατάξεις.

2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή του Αγγελοχωρίου, ανήκει στη ζώνη Παιονίας, η οποία αποτελεί μία από τις τρεις υποζώνες που έχει διαιρεθεί η ζώνη Αξιού (Υποζώνη Πάικου, Υποζώνη Αλμωπίας). Η λιθολογία της ζώνης Παιονίας χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη ποικιλία ιζημάτων, όπως ασβεστόλιθους, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, φυλλίτες, μαρμαρυγιακούς και ασβεστιτικούς σχιστόλιθους και ηφαιστειογενή πετρώματα. Τα ιζήματα αυτά αποτέθηκαν σε μια ωκεάνια αύλακα κατά το Μεσοζωικό και πολλές φορές στο εσωτερικό τους συναντώνται όγκοι οφιολιθικών εκχύσεων. Βασικό χαρακτηριστικό της ζώνης Παιονίας αποτελεί η εμφάνιση των πετρωμάτων ως μεγάλα λέπια, τα οποία είναι αποκομμένα μεταξύ τους, λόγω της απόθεσης νεότερων ιζημάτων (Συρίδης 1990, Μουντράκης 1985).



Σχήμα 2.4 Γεωτεκτονικές ζώνες στη Χαλκιδική (Μουντράκης, 1985).

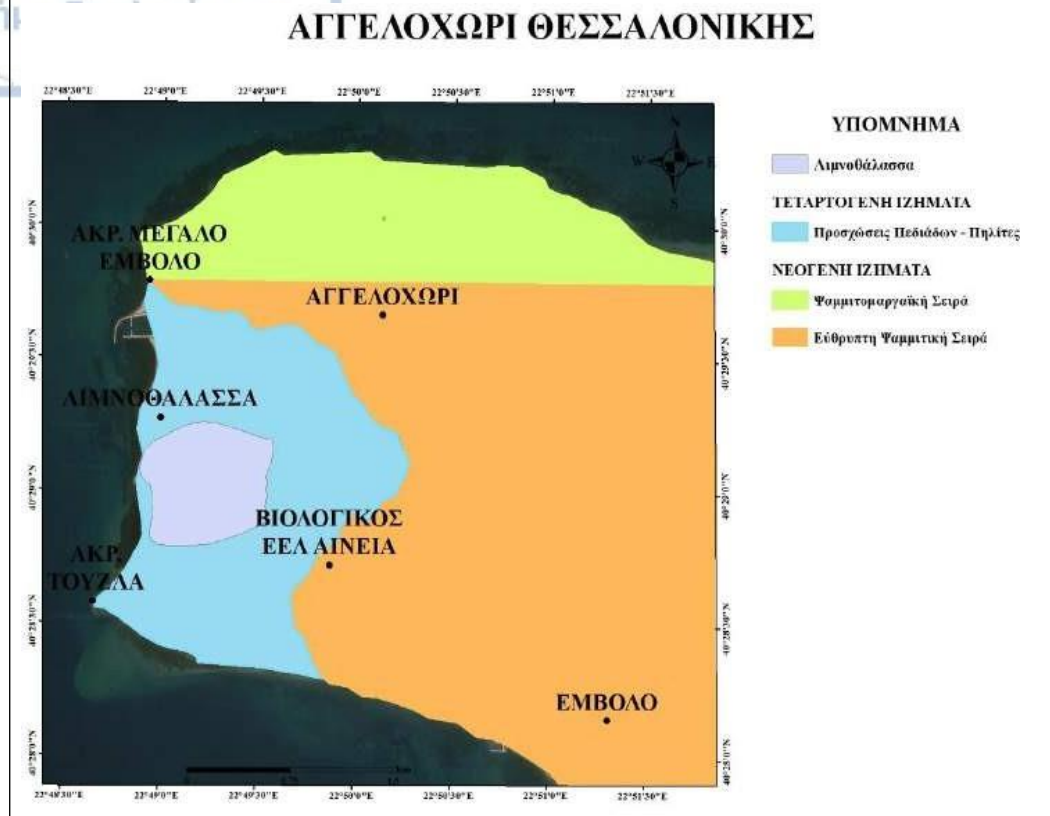
Ειδικότερα, στο δυτικό μέρος της Χαλκιδικής και της Νοτιοανατολικής Θεσσαλονίκης, παρατηρείται στο προ-Νεογενές υπόβαθρο, ένα παχύ στρώμα νέων χαλαρών ιζημάτων. Τα ιζήματα αυτά δηλώνουν χερσοποτάμιες, ποταμοδελταϊκές, λιμνοδελταϊκές, χερσαίες και λιμναίες αποθέσεις, που σχηματίστηκαν κατά την ταφρογέννεση στη ζώνη Αξιού-Θερμαϊκού Κόλπου (Ψιλοβίκος κ.α., 1988).

Επιπρόσθετες πληροφορίες, σχετικά με τη λιθολογία της περιοχής μελέτης, λήφθηκαν από τα γεωλογικά φύλλα Επανομής και Θεσσαλονίκης του Ε.Α.Γ.Μ.Ε (Ελληνικής Αρχής Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, πρώην Ι.Γ.Μ.Ε.). Αναλυτικότερα παρατηρείται :

- **Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά :** Στο βόρειο τμήμα της περιοχής του Αγγελοχωρίου, από το Μεγάλο Έμβολο μέχρι την παραλία της Αγίας Τριάδας, παρατηρούνται ιζήματα του Νεογενούς και πιο συγκεκριμένα του Ανώτερου Μειόκαινου και Κατώτερο Πλειόκαινου. Αυτά αποτελούνται από εύθρυπτους έως και πολύ συμπαγείς ψαμμίτες και τοπικά εντοπίζονται ορίζοντες από μάργες (Φύλλο Θεσσαλονίκης, ΕΑΓΜΕ, Ζερβοπούλου, Α., 2010). Επίσης, στα δυτικά του Μεγάλου Εμβόλου,

έχουν διαπιστωθεί στρώματα αργίλου, άμμου με κροκάλες και ασβεστιτικά συγκρίματα (Σιδηροπούλου, 2017).

- **Εύθρυπτη ψαμμιτική σειρά:** Σε όλο το κεντρικό και νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, εντοπίζονται ιζήματα του Πλειόκαινου και συγκεκριμένα, εύθρυπτοι συγκολλημένοι ψαμμίτες και τοπικά μικροκαλοπαγή με διασταυρούμενη στρώση. Κάτω από τη σειρά αυτή, ακολουθούν οι αργιλούχοι τεφρόχρωμοι ψαμμίτες και στη συνέχεια, δύο ασβεστολιθικά στρώματα που διαχωρίζονται, είτε με κυανούς απολιθωματοφόρους αργίλους, είτε με ερυθρούς πλακώδεις ασβεστόλιθους (Φύλλο Επανομής, ΕΑΓΜΕ, Ζερβοπούλου, Α., 2010).
- **Αλλουβιακές αποθέσεις:** Στο νοτιοδυτικό κομμάτι του Αγγελοχωρίου και γύρω από τη Λιμνοθάλασσα Αλυκής, παρατηρούνται ιζήματα του Τεταρτογενούς, δηλαδή, κυρίως αλλουβιακές αποθέσεις, προσχώσεις πεδιάδων και πηλίτες (Φύλλο Επανομής, ΕΑΓΜΕ)



Σχήμα 2.5 Χάρτης με τους γεωλογικούς σχηματισμούς του Αγγελοχωρίου (Γεωλογικά Φύλλα Θεσσαλονίκης (1978) & Επανομής (1969), ΕΑΓΜΕ).

Σύμφωνα με τον Συρίδη (1990), η Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά και η Εύθρυπτη ψαμμιτική σειρά αντιστοιχούν στον Σχηματισμό Γωνιάς, ενώ στα επιφανειακά στρώματα εμφανίζεται και Σχηματισμός Μουδανίων.

- **Σχηματισμός Γωνιάς:** ονομάστηκε έτσι από το χωριό Γωνιά, καθώς βρίσκεται πάνω από τα ιζήματα του. Η λιθολογία του σχηματισμού περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία Πλειοκαινικών ιζημάτων, όπως, άμμους, ψαμμίτες, αργίλους, μάργες, κροκαλοπαγή και ασβεστόλιθους, τα οποία είναι οργανωμένα σε στρώσεις-φακούς, με περιορισμένες διαστάσεις. Βασικό γνώρισμα του Σχηματισμού Γωνιάς είναι ότι αποτελείται από εναλλαγές χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων υλικών. Το συνολικό πάχος των ιζημάτων κυμαίνεται στα 100-150 m και έχουν κλίση NNA. Ακόμη,

χαρακτηριστική είναι η παρουσία ηφαιστιακών κροκάλων σε στρώματα άμμου με διασταυρούμενη στρώση, οι οποίες μεταφέρθηκαν από την Αλμωπία μέσω παλαιοχειμάρρων και εντοπίστηκαν στην περιοχή του Μ. Εμβόλου. Η μεγάλη ποικιλία των ιζημάτων του Σχηματισμού Γωνιάς, η κοκκομετρική τους σύσταση και η εσωτερική τους δομή, δηλώνουν ένα αβαθές ποτάμιο περιβάλλον (Συρίδης, 1990).

- **Σχηματισμός Μουδανίων:** Η ονομασία του προέρχεται από τα Νέα Μουδανιά που βρίσκονται στο δυτικό τμήμα της Χαλκιδικής. Ο σχηματισμός είναι νεότερος και υπέρκειται του Σχηματισμού Γωνιάς, ενώ ο διαχωρισμός του γίνεται μέσω μίας ζώνης διάβρωσης. Τα ιζήματα του εμφανίζονται στην περιοχή του Μεγάλου Εμβόλου μέχρι και τη Μηχανιώνα. Λιθολογικά αποτελείται από ένα μεγάλο όγκο ερυθροστρωμάτων, με εναλλαγές φακών κροκάλων, άμμους και ψαμμίτες με διασταυρούμενη στρώση και αμμούχες-ιλυούχες άργιλοι. Τα στρώματα του καλύπτουν μεγάλη επιφανειακή έκταση και σχηματίζουν ένα ομαλό ανάγλυφο, ενώ στην ακτή δημιουργούνται αναβαθμίδες και κρεμασμένες κοιλάδες. Ο σχηματισμός Μουδανίων αποτέθηκε σε χερσαίο- χερσοποτάμιο περιβάλλον κατά το Πλειστόκαινο (Συρίδης, 1990).

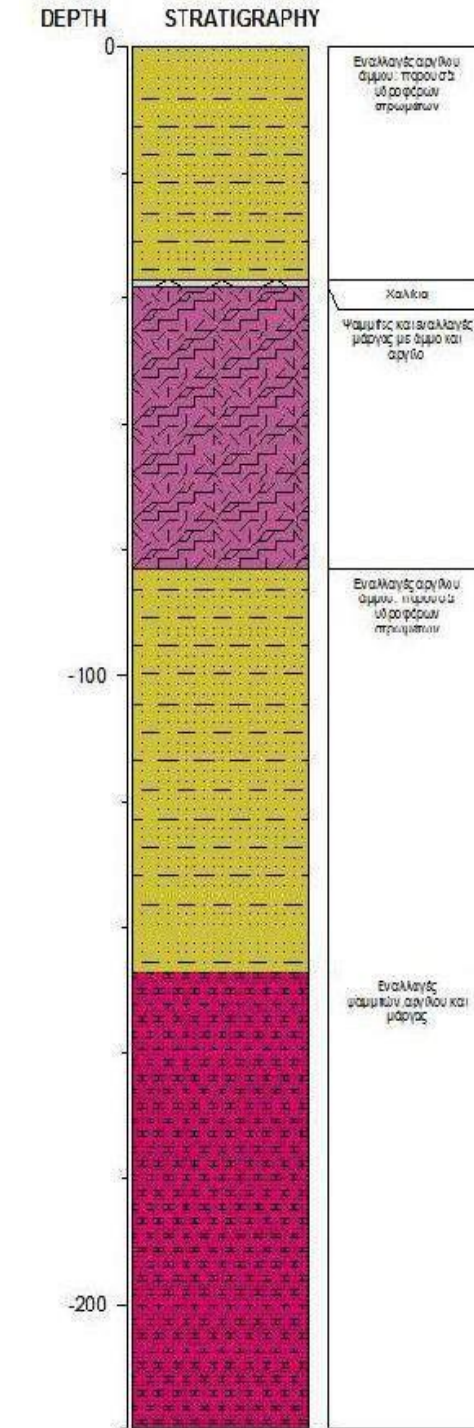
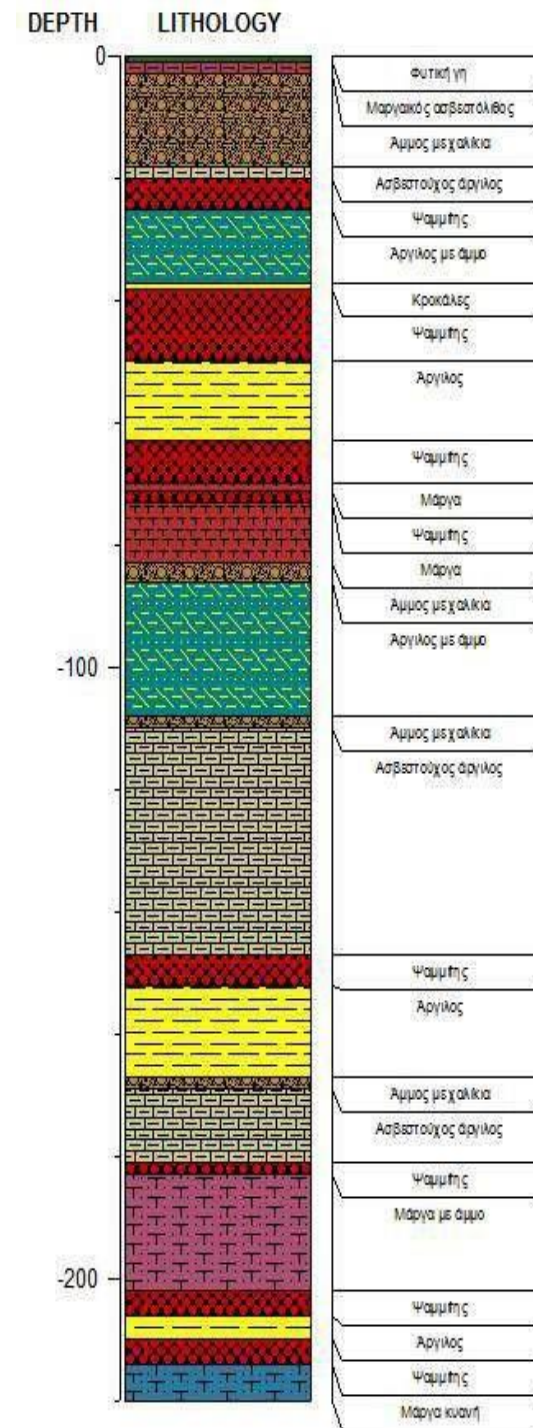
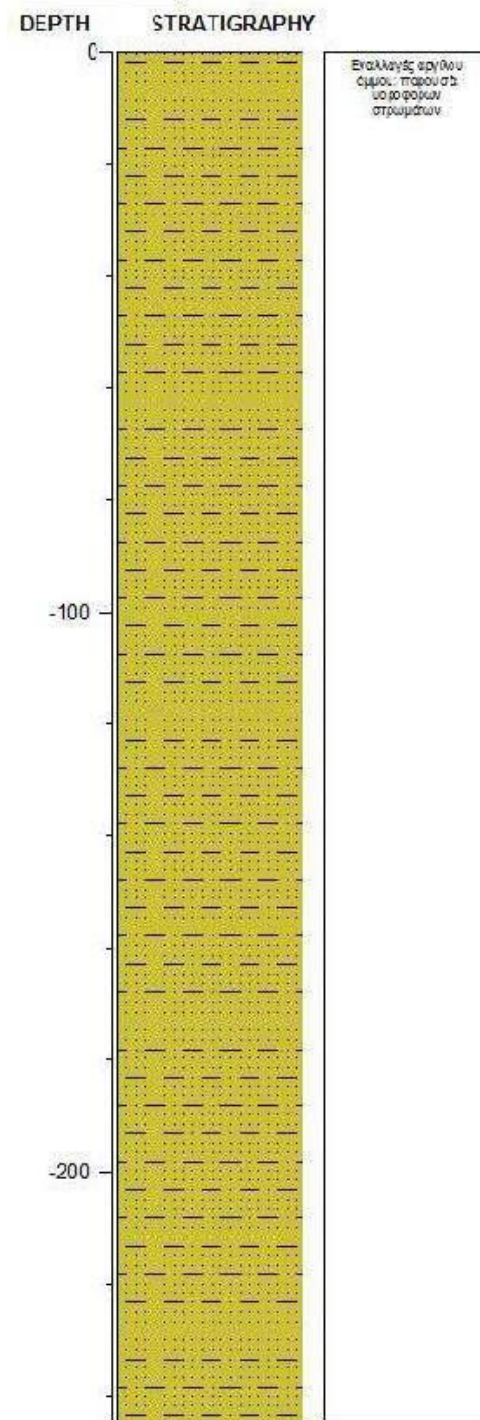
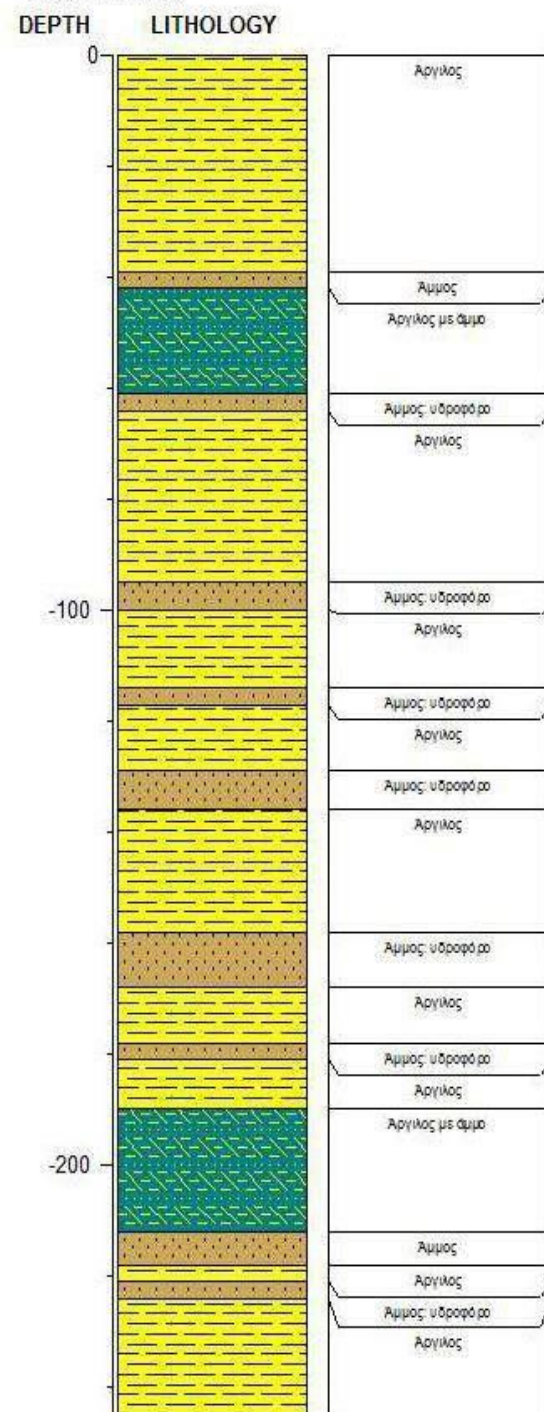
Ακόμη, λήφθηκαν πληροφορίες από στοιχεία γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή του Αγγελοχωρίου, από το 1958 μέχρι και το 2010. Τα στοιχεία αυτά επιβεβαιώνουν ότι η περιοχή μελέτης κυριαρχείται από ιζήματα και συγκεκριμένα μάργες, ψαμμίτες, χαλίκια, άμμους, αργίλους και ασβεστόλιθους. Στη συνέχεια παρατίθενται οι λιθολογικές και οι στρωματογραφικές στήλες των γεωτρήσεων (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1 Θέσεις των γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης (Σύστημα συντεταγμένων σε ΕΓΣΑ '87).

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	X	Y	ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
T1	402571	4480681	1976
T2	402993.1	4481827	1958
T3	402408.3	4483423	1958
T4	401705.9	4484163	2010
T5	401483.6	4483255	1975
T6	401928.1	4483092	1958
T7	4003501	4483048	1976

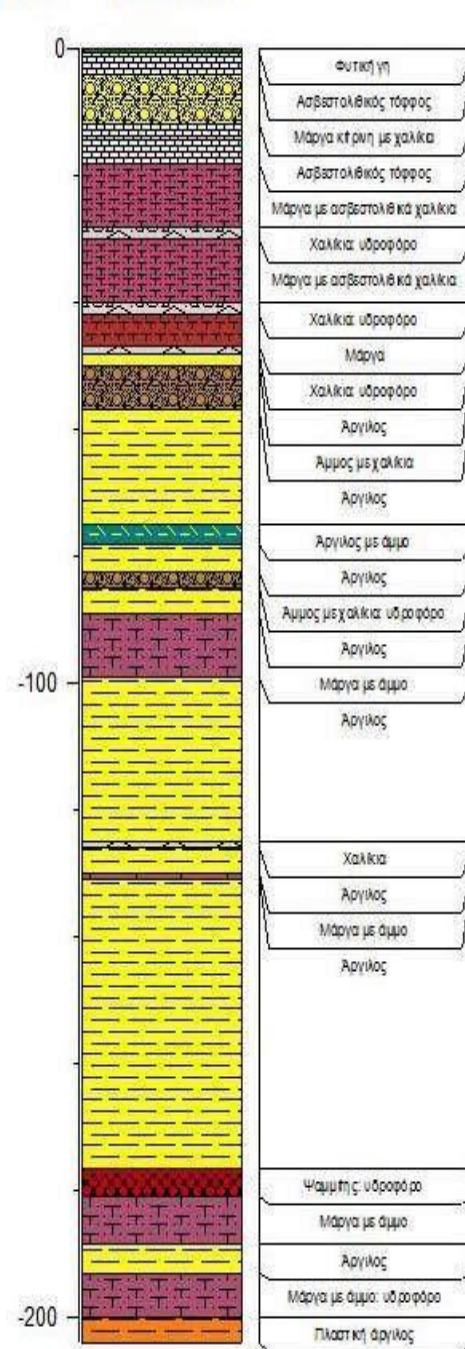


Σχήμα 2.6 Θέσεις των γεωτρήσεων στην περιοχή του Αγγελοχωρίου.



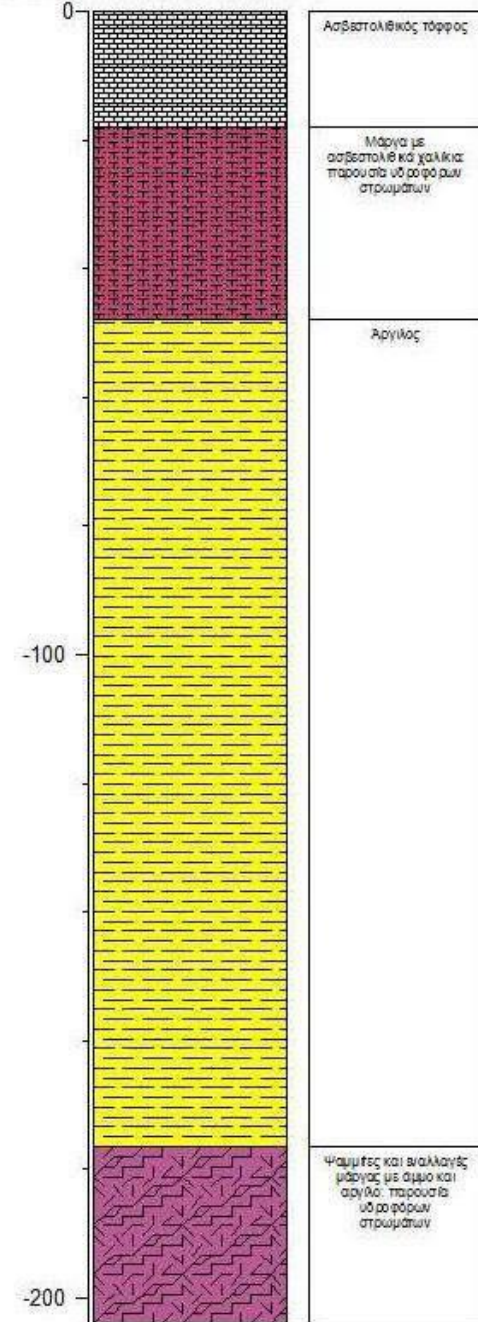
ΓΕΩΤΡΗΣΗ T3

DEPTH LITHOLOGY



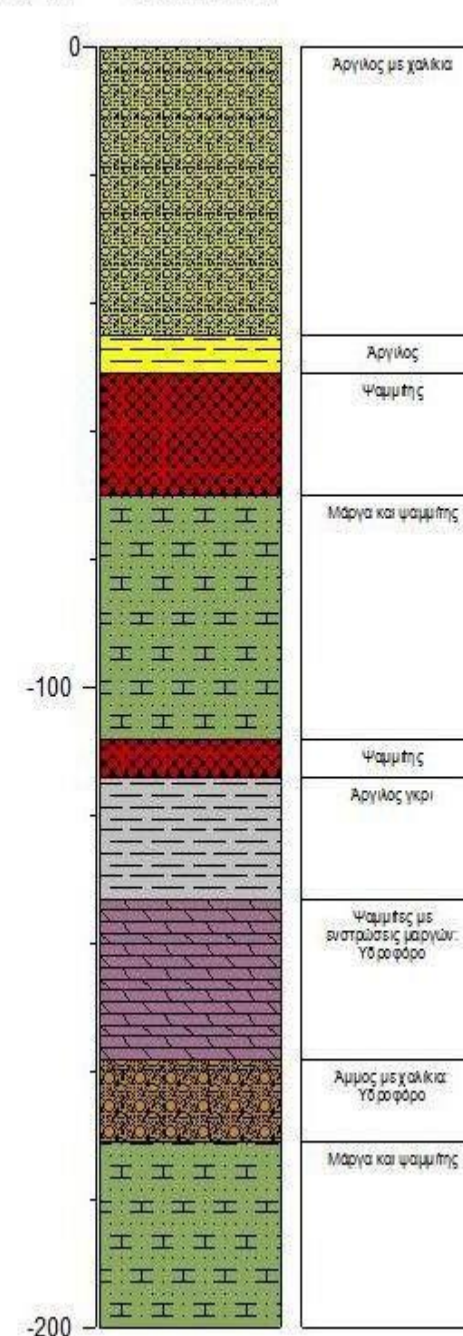
ΓΕΩΤΡΗΣΗ T3

DEPTH STRATIGRAPHY



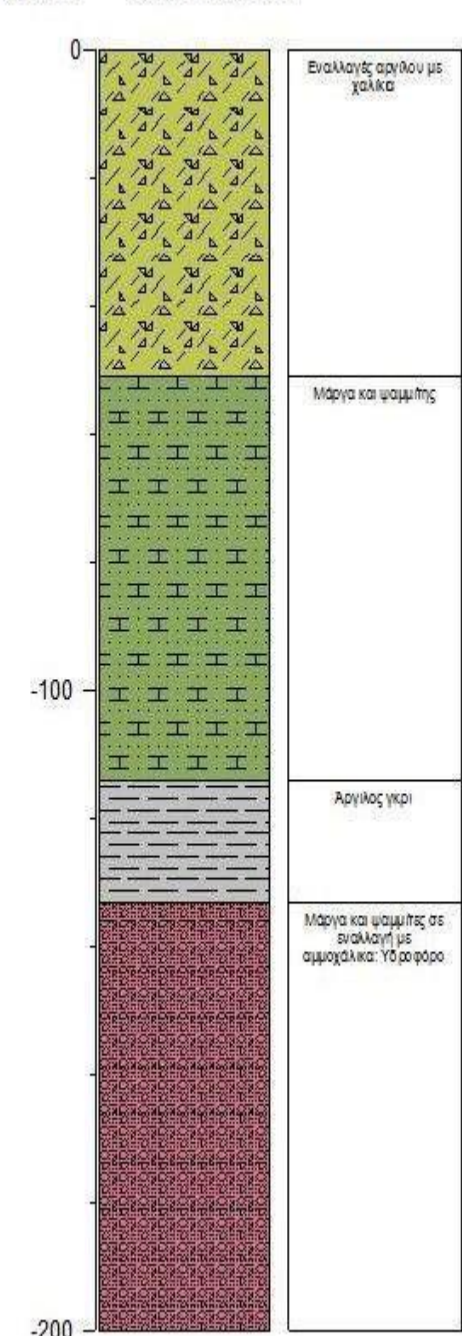
ΓΕΩΤΡΗΣΗ T4

DEPTH LITHOLOGY



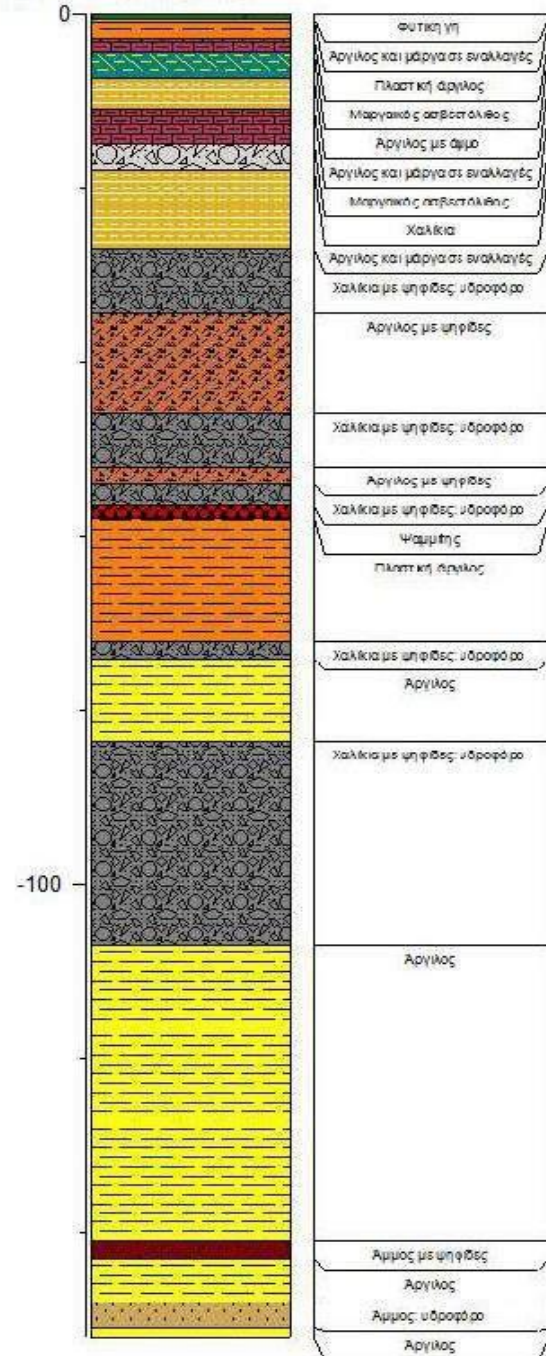
ΓΕΩΤΡΗΣΗ T4

DEPTH STRATIGRAPHY



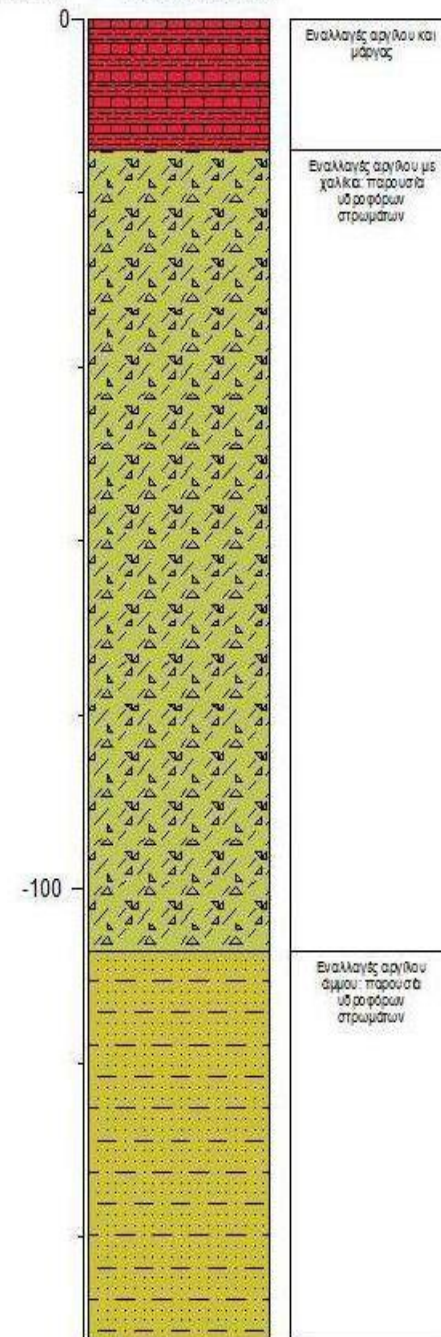
ΓΕΩΤΡΗΣΗ T5

DEPTH LITHOLOGY



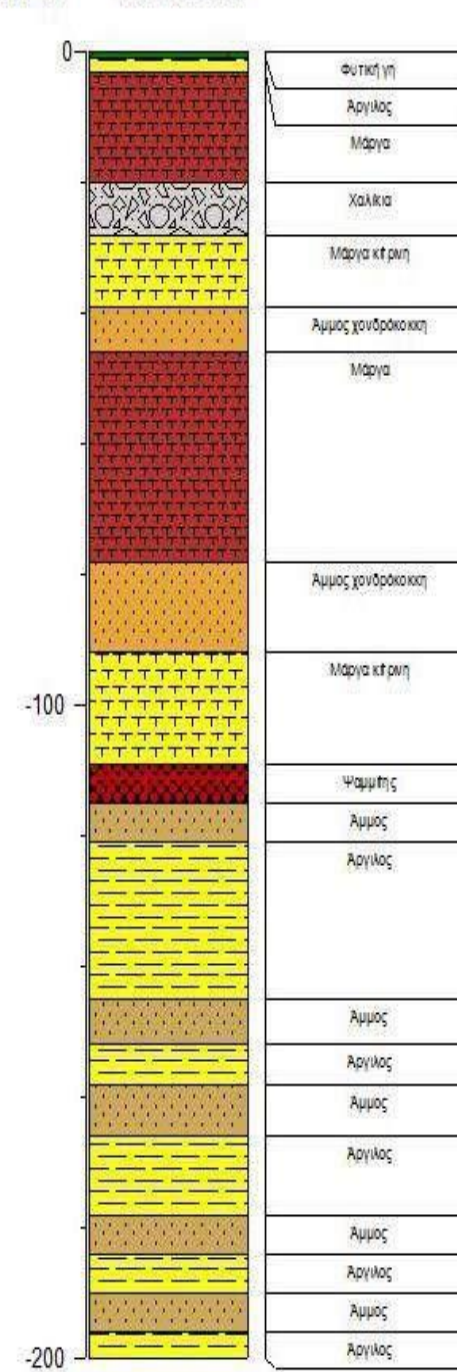
ΓΕΩΤΡΗΣΗ T5

DEPTH STRATIGRAPHY



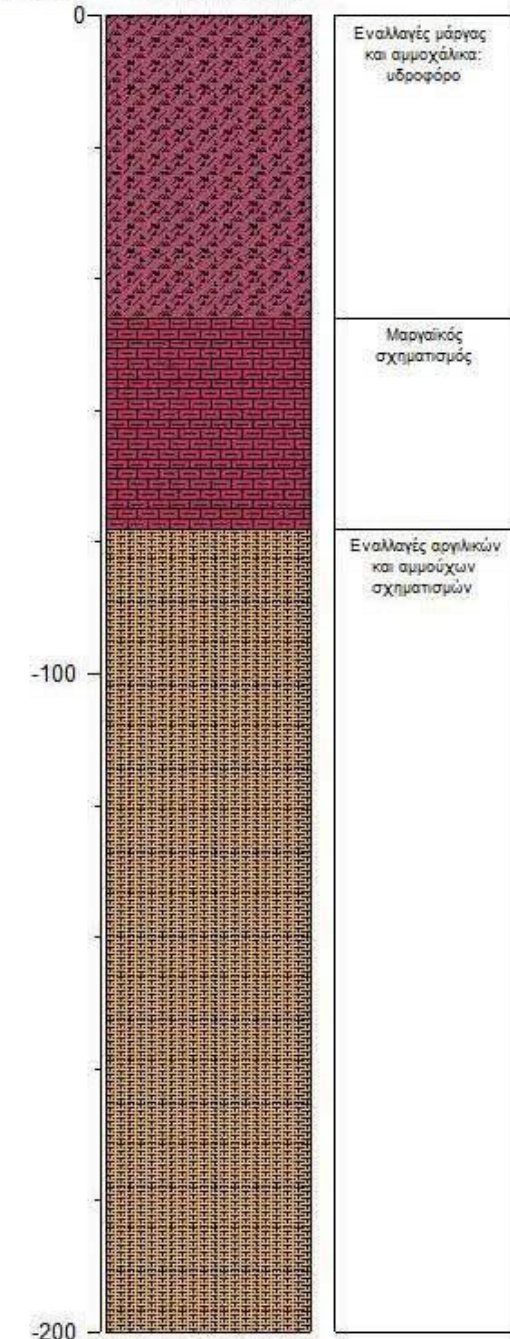
ΓΕΩΤΡΗΣΗ T6

DEPTH LITHOLOGY

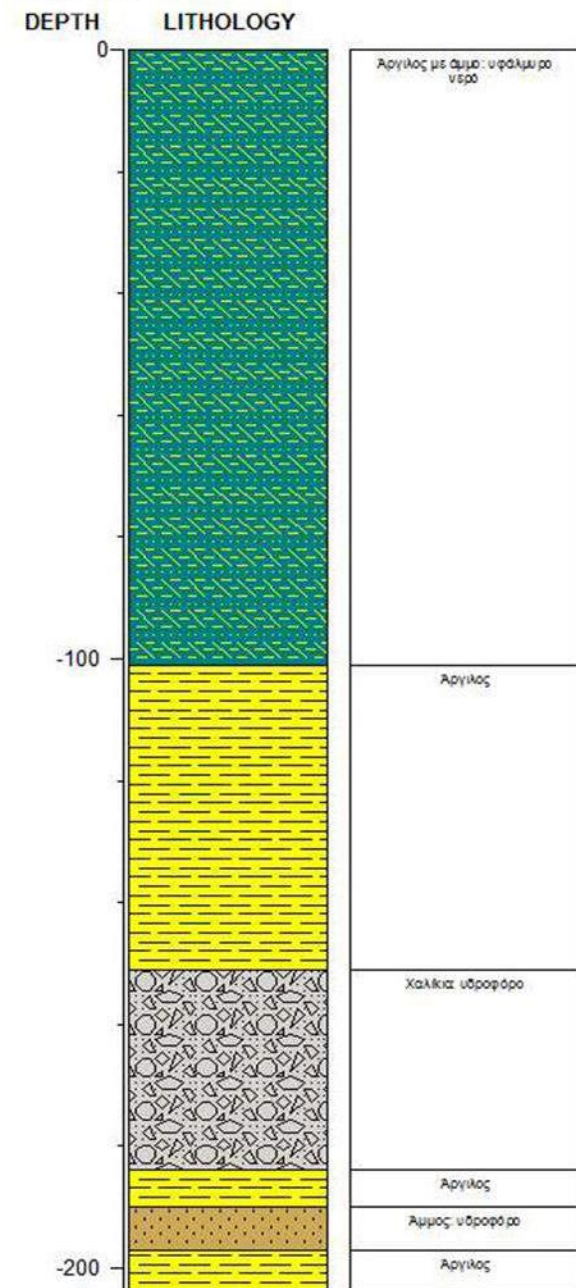


ΓΕΩΤΡΗΣΗ T6

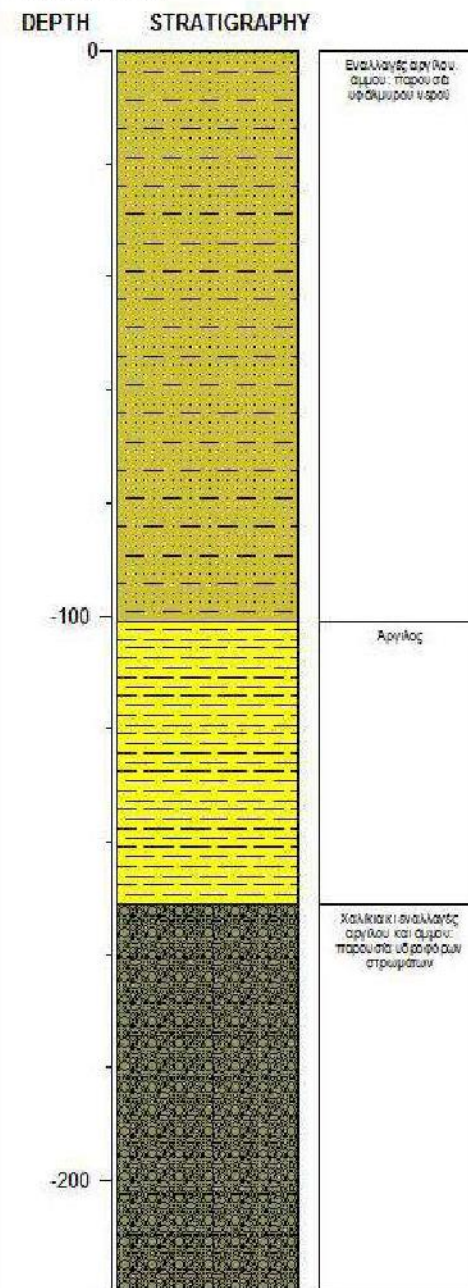
DEPTH STRATIGRAPHY



ΓΕΩΤΡΗΣΗ T7



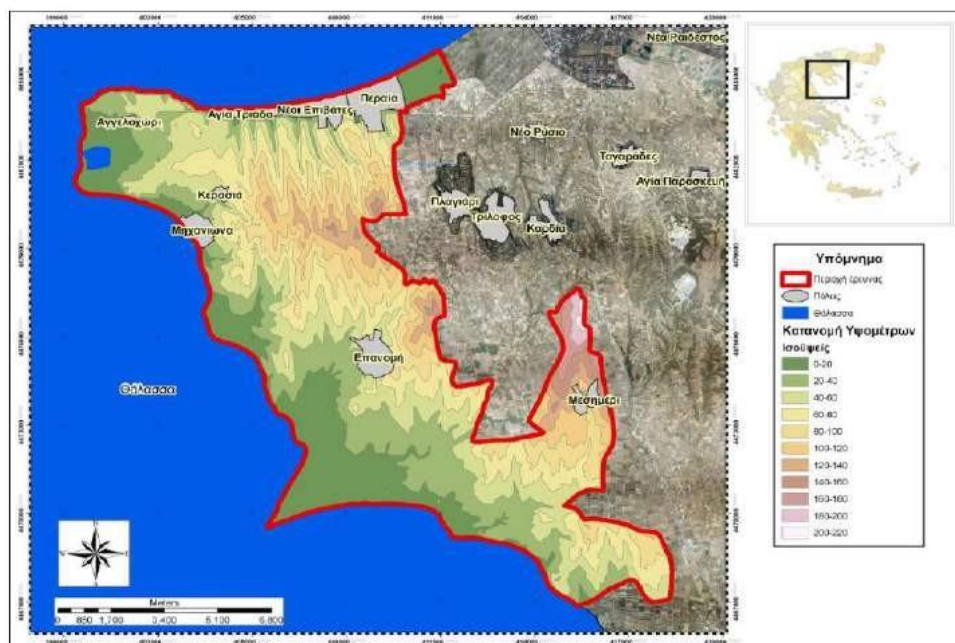
ΓΕΩΤΡΗΣΗ T7



2.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το Αγγελοχώρι και η ευρύτερη περιοχή του, ανήκει στη ΝΑ Θεσσαλονίκη και κατ' επέκταση στον Κόλπο του Θερμαϊκού. Το μέγιστο υψόμετρο της περιοχής είναι περίπου 50 m. Στη μορφολογία του εδάφους, εκτός από τις φυσικές διεργασίες συμβάλουν και οι ανθρώπινες δραστηριότητες.

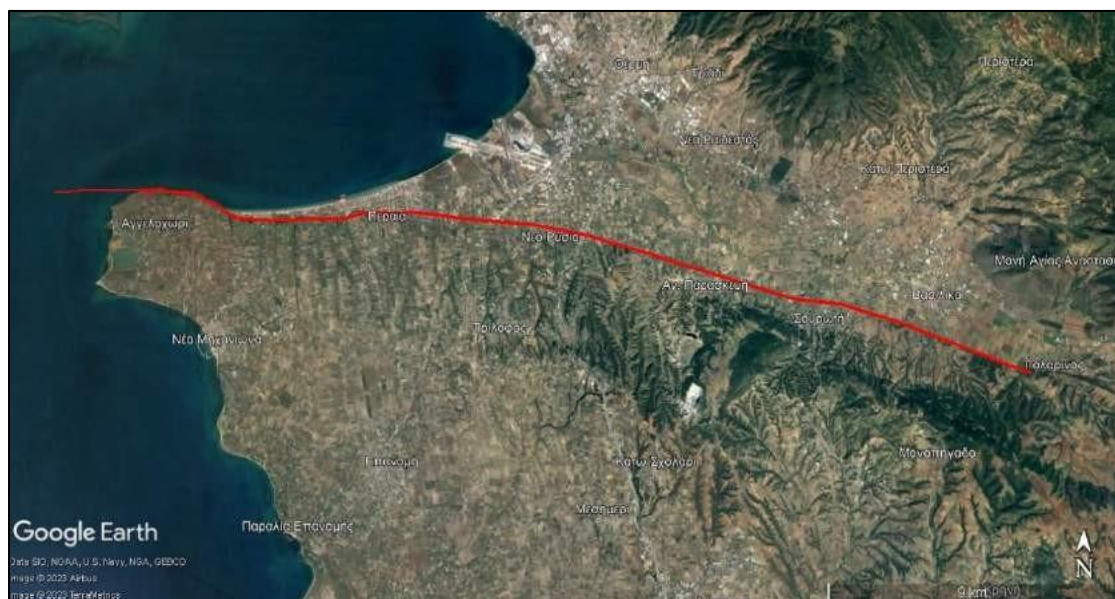
Το ανατολικό τμήμα του Θερμαϊκού Κόλπου αποτελείται από διαβρωμένες αναβαθμίδες με πολύ μικρές ακτές και διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Στην περιοχή του Μ. Εμβόλου, παρατηρείται διακοπή της παράκτιας αναβαθμίδας από τη χαμηλή αποθετική ακτή του ακρωτηρίου της Τούζλας (Αλμπανάκης κ.α., 1999). Γεωμορφολογικά, το ανάγλυφο χαρακτηρίζεται ως παλιό, χαμηλό και λοφώδες με κλίση 2°- 5° N-ΝΔ και με επιμήκεις πεδιάδες σχήματος U, όπου κυριαρχούν τα νεότερα Τεταρτογενή-Νεογενή ιζήματα (Συρίδης, 1990).



Σχήμα 2.7 Μορφολογικός χάρτης του Δήμου Θερμαϊκού (Βουδούρης κ.α., 2014).

Όσον αφορά την τεκτονική της περιοχής, αξίζει να αναφερθεί η ύπαρξη του ενεργού ρήγματος του Ανθεμούντα. Το ρήγμα εντοπίζεται νοτιοανατολικά από την πόλη της Θεσσαλονίκης και εκτείνεται από το θαλάσσιο τμήμα βόρεια του Αγγελοχωρίου μέχρι και το χωριό Γαλαρινός, με συνολικό μήκος 32 km. Αποτελεί κανονικό ρήγμα με μετάπτωση προς το Βορρά και διεύθυνση Α-Δ (Ζερβοπούλου, 2010). Το ρήγμα του Ανθεμούντα διακρίνεται σε τρία επιμέρους τμήματα:

- Το πρώτο τμήμα περιλαμβάνει τις περιοχές μετά το Ν. Ρύσιο έως και το χωριό Γαλαρινός,
- Το δεύτερο τμήμα αρχίζει από το Ν. Ρύσιο μέχρι και την περιοχή του Μ. Εμβόλου του Αγγελοχωρίου και
- Τέλος, το υποθετικό τρίτο τμήμα που συνιστά την επέκταση του ρήγματος στο εσωτερικό της θάλασσας, με μήκος περίπου 3 km (Ζερβοπούλου, 2010).



Σχήμα 2.8 Απεικόνιση του ρήγματος του Ανθεμούντα από το χωριό Γαλαρινός μέχρι και την υποθετική προέκτασή του στο θαλάσσιο χώρο.

2.3 ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΑ ΑΛΥΚΗΣ ΑΓΓΕΛΟΧΩΡΙΟΥ

Η λιμνοθάλασσα του Αγγελοχωρίου εντοπίζεται στο χερσαίο τμήμα, μεταξύ των ακρωτηρίων του Μ. Εμβόλου και της Τούζλας και έχει συνολική έκταση περίπου 8303.8 στρέμματα ή αλλιώς 830.38 ha (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας - Ειδική Γραμματεία Υδάτων). Η λιμνοθάλασσα έχει σχετικά μικρό βάθος και διαχωρίζεται με τη θάλασσα, από μια στενή αμμώδη ακτή, ενώ ταυτόχρονα συνδέεται με αυτή μέσω μιας τεχνητής συνδετικής τάφρου. Η περιοχή αυτή φιλοξενεί πλούσια βιοποικιλότητα και είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ορνιθοπανίδα, καθώς έχουν παρατηρηθεί 200 είδη πουλιών, πολλά από αυτά είναι σπάνια ή απειλούμενα.



Σχήμα 2.9 Λιμνοθάλασσα Αγγελοχωρίου (Μονάδα Διαχείρισης Προστατευόμενων Περιοχών Κεντρικής Μακεδονίας).

Η περιοχή της Λιμνοθάλασσας Αγγελοχωρίου είναι προστατευόμενη τοποθεσία του δικτύου NATURA 2000 με κωδικό GR1220005 σύμφωνα με την Οδηγία 92/43/ΕΟΚ (Οδηγία των Οικοτόπων της Ευρωπαϊκής Κοινότητας, περιοχές Natura),

χαρακτηρίζεται ως «Ζώνη Ειδικής Προστασίας» με βάση την Οδηγία 2009/147/EK (Διατήρηση των αγρίων πτηνών) και προστατεύεται από το Νόμο ΥΠ'ΑΡΙΘ.3937 «Διατήρηση της βιοποικιλότητας και άλλες διατάξεις».

Όσον αφορά τη χλωρίδα, γύρω από τη λιμνοθάλασσα, η βλάστηση είναι χαμηλή αλοφυτική και αμμοθινική και απαρτίζεται κυρίως από ετήσια φυτά. Τα κυριότερα είδη ανήκουν στις οικογένειες των Αγρωστωδών και Αστεροειδών και στην τάξη των Καρυοφυλλωδών. Η τεχνητή τάφρος που περιβάλλει τις αλυκές, καταλαμβάνεται από καλαμώνες, αλλά απαντούν επίσης, σπάρτα, βούρλα και ασφόδελοι.



Σχήμα 2.10 Είδος φυτού (Limonium narbonneense) που αναπτύσσεται στην περιοχή της λιμνοθάλασσας Αγγελοχωρίου (Κώστας Βιδάκης).

Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο υγρότοπος της λιμνοθάλασσας Αγγελοχωρίου, ως μέρος αναπαραγωγής, διατροφής και μετανάστευσης για ένα μεγάλο αριθμό πουλιών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται και τα απειλούμενα είδη, τα οποία είναι: το φλαμίνγκο, ο κορμοράνος, το φοινικόπτερο, το νεροχελίδονο, ο πελαργός, ο καλαμοκανάς, η αβοκέτα, η λαγγόνα, η χουλιαρομούτα, η χαλκόκοτα κ.ά. Παράλληλα, στην περιοχή έχουν καταγραφεί 13 είδη ερπετών και αμφιβίων και 10 είδη θηλαστικών. Ακόμη, στο θαλάσσιο τμήμα της προστατευόμενης περιοχής απαντά το εμβληματικό είδος της Μεσογείου, η πύνα, η οποία πρόσφατα έχει ενταχθεί από την

IUCN (International Union for Conservation of Nature) ως κρίσιμο προς εξαφάνιση είδος και εκτάσεις θαλάσσιας βλάστησης με Ποσειδωνία.



Σχήμα 2.11 Είδη υδρόβιων πτηνών που συγκεντρώνονται στη λιμνοθάλασσα Αγγελοχωρίου (Πηγή: travel.gr, Μονάδα Διαχείρισης Προστατευόμενων Περιοχών Κεντρικής Μακεδονίας)

Στο βόρειο τμήμα της λιμνοθάλασσας, λειτουργούν από το 1902, οι αλυκές για την παραγωγή αλατιού και διαχειρίζονται από την εταιρεία «Ελληνικές Αλυκές ΑΕ». Οι εγκαταστάσεις έχουν έκταση 1.166 στρέμματα και η δυναμικότητα παραγωγής είναι 1.166 στρέμματα. Η συγκομιδή του αλατιού πραγματοποιείται συνήθως στις αρχές Σεπτεμβρίου και διαρκεί περίπου 40 ημέρες. Οι προετοιμασίες αρχίζουν το Μάρτιο και

η άντληση αρχίζει τον Απρίλιο. Το αλάτι μετά τον καθαρισμό του μεταφέρεται σε αλατοσωρούς, όπου φορτώνεται σε φορτηγά οχήματα για τους αγοραστές.



Σχήμα 2.12 Οι αλυκές στη λιμνοθάλασσα του Αγγελοχωρίου (Προστατευόμενες περιοχές Θερμαϊκού Κόλπου).

Γενικότερα, οι επιπτώσεις από την λειτουργία της αλυκής θεωρούνται μικρές και αντιμετωπίσιμες. Η αλυκή, παρόλο που είναι ένα τεχνητό οικοσύστημα, λειτουργεί ως φυσικό, διότι περιορίζει την ανθρώπινη δραστηριότητα, εφοδιάζει με ύδατα την περιοχή και συντηρεί οργανισμούς, για παράδειγμα ψάρια, στρείδια, γαρίδες, οι οποίοι αποτελούν τροφή για άλλα είδη του υγροτόπου.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, λόγω της αστικοποίησης και της βιομηχανοποίησης, έχουν αυξηθεί οι παράκτιες δραστηριότητες, με αποτέλεσμα να απειλούνται είδη και οικοτόποι. Τα περισσότερα προβλήματα προκύπτουν από τις καλλιέργειες, τη χρήση λιπασμάτων, τη βοσκή, τις υδατοκαλλιέργειες, τις δραστηριότητες παραγωγής αλατιού, την επαγγελματική και αναψυχική αλιεία, το κυνήγι, τις αστικές υποδομές, την έκθεση απορριμμάτων και λυμάτων, το δίκτυο συγκοινωνίας, τις αναψυχικές και τουριστικές υποδομές κ.ά. Τα μεγαλύτερα προβλήματα σχετίζονται με την εισβολή ειδών φυτών και την όχληση από θορύβους.

Κατά συνέπεια, σήμερα παρουσιάζονται τα ακόλουθα βασικά προβλήματα για το προστατευόμενο αυτό μέρος, τα οποία είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν άμεσα:

- Υποβάθμιση των θαλάσσιων οικοτόπων,
- Υποβάθμιση των λειτουργιών της λιμνοθάλασσας,
- Ρύπανση επιφανειακών υδάτων,
- Επιπτώσεις στους πληθυσμούς της ορνιθοπανίδας,
- Εξαφάνιση ειδών βλάστησης
- Ανεξέλεγκτες τουριστικές δραστηριότητες.

Αναγνωρίζοντας την οικολογική, κοινωνική και την οικονομική αξία και τις πιέσεις που ασκούνται στο περιβάλλον, υλοποιήθηκε τον Οκτώβριο του 2010 ένα τριετές έργο, που εντάχθηκε στην πρόσκληση «LIFE + Nature and Biodiversity 2009». Το έργο αυτό, είχε τον τίτλο «Δράσεις για τη διατήρηση παράκτιων οικοτόπων και σημαντικών ειδών ορνιθοπανίδας των περιοχών του Δικτύου NATURA 2000 λιμνοθάλασσα Επανομής, λιμνοθάλασσα Αγγελοχωρίου – ACCOLAGOONS», το οποίο περιελάμβανε σημαντικές δράσεις παρακολούθησης και διαχείρισης των περιοχών. Μετά την ολοκλήρωση του έργου LIFE, έλαβε χώρα πρόγραμμα παρακολούθησης βιοτικών και αβιοτικών μέτρων στις περιοχές του έργου, με αναθέτουσα αρχή την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας. Το 2020 η Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, ανακοίνωσε την υλοποίηση προγράμματος για την παρακολούθηση της ποιότητας του περιβάλλοντος στους υγροτόπους και τη θαλάσσια περιοχή της Επανομής και του Αγγελοχωρίου, διάρκειας 38 μηνών.

Ανακεφαλαιώνοντας, η θαλάσσια παράκτια ζώνη της λιμνοθάλασσας του Αγγελοχωρίου, διακρίνεται από τους ποικίλους τύπους οικοτόπων, τα είδη βλάστησης και ορνιθοπανίδας, πολλά από τα οποία είναι σπάνια και απειλούμενα. Αποτελεί παράκτιο φυσικό οικοσύστημα που συμβάλει στην αποφυγή πλημμυρών και σε φαινόμενα διάβρωσης, αποθηκεύει νερό και εμπλουτίζει τα υπόγεια ύδατα και λειτουργεί ως φυσικό φίλτρο καθαρισμού του νερού από ρύπους. Ως αποτέλεσμα όλων αυτών, εντάχθηκε στο δίκτυο NATURA 2000 και περιλαμβάνει Ζώνη Ειδικής Προστασίας στη λιμνοθάλασσα. Παρ' όλα αυτά, η συνεχής ανθρώπινη παρέμβαση και η διατάραξη της βιοποικιλότητας στην περιοχή, μπορούν να επιφέρουν σοβαρές επιπτώσεις στον υγρότοπο, αλλά και στην οικονομική δραστηριότητα της παράκτιας περιοχής. Για αυτό τον λόγο, είναι αναγκαία η λήψη μέτρων και η τήρηση αυτών, η συνεχής παρακολούθηση και η διατήρηση της ποιότητας του υγροτόπου όπως και η

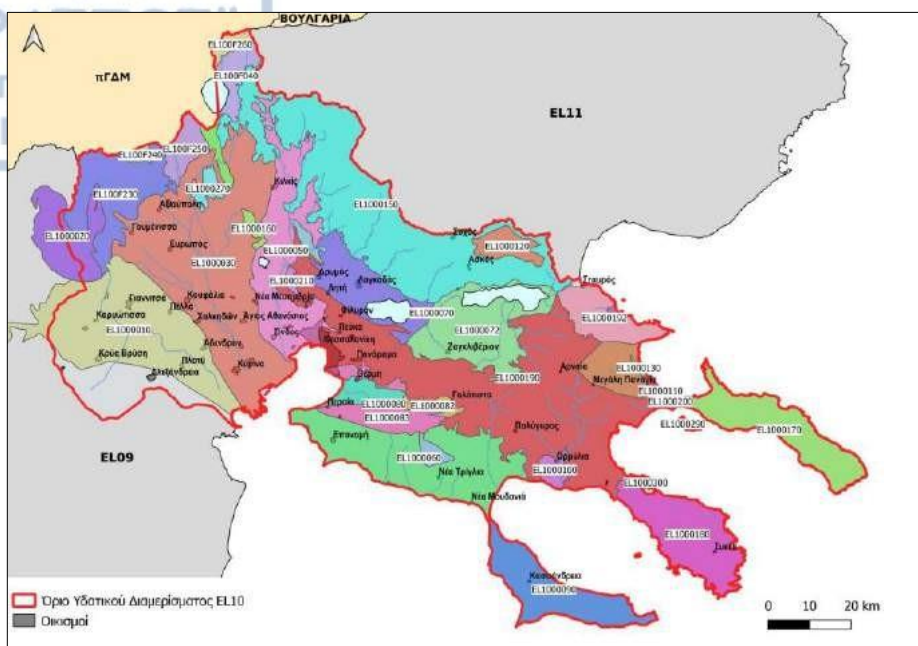
ενημέρωση των κατοίκων για την ευρύτερη σημασία, της προστασίας της παράκτιας περιοχής της λιμνοθάλασσας.

2.4 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η περιοχή μελέτης ανήκει στο 10^ο υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας, σύμφωνα με το ΦΕΚ Α' 280/9.12.2003, στη GR05, λεκάνη απορροής Χαλκιδικής (ΦΕΚ 1383/Β/2-9-2010) και το υπόγειο υδατικό σύστημα εντάσσεται στο σύστημα Επανομής Μουδανιών (EL1000061).



Σχήμα 2.13 Α) Χάρτης των υδατικών διαμερισμάτων της Ελλάδας, Β) Χάρτης των λεκανών απορροής (Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας & Κλιματικής αλλαγής).

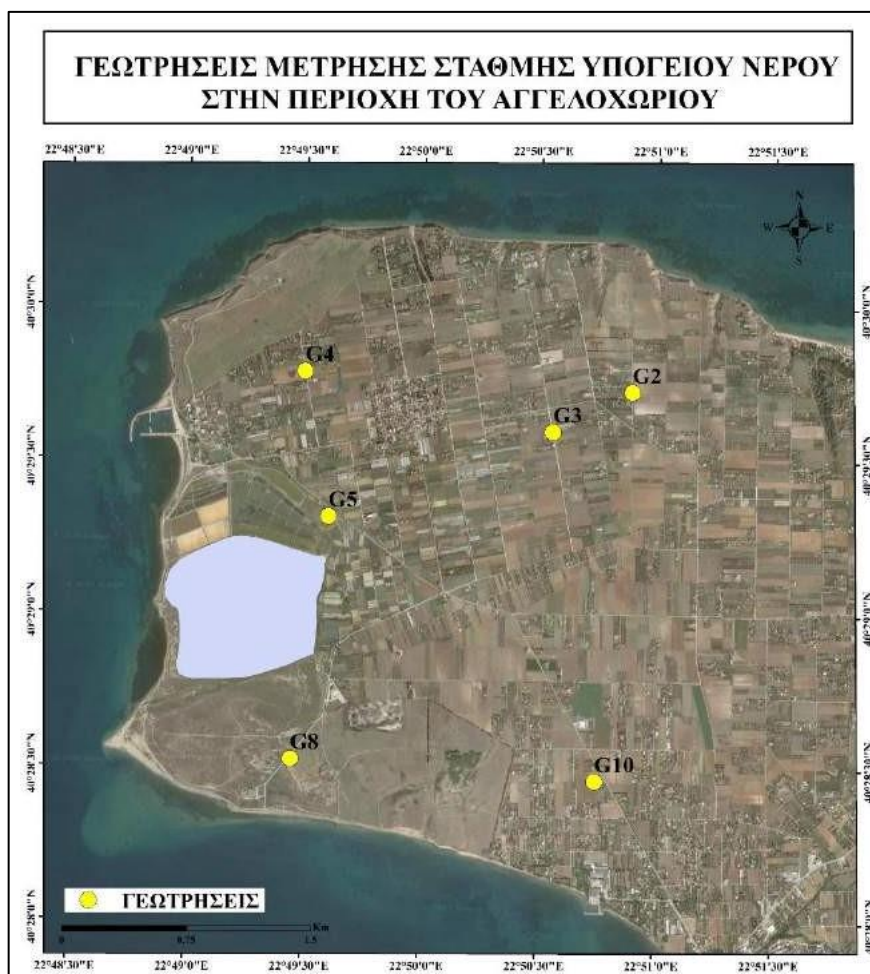


Σχήμα 2.14 Υπόγεια υδατικά συστήματα του υδατικού διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας - Ειδική Γραμματεία Υδάτων Κατάρτιση της 1ης Αναθεώρησης του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Κεντρικής Μακεδονίας (EL10).

Ο κύριος τύπος υδροφορίας που καταλαμβάνει την περιοχή του Αγγελοχωρίου είναι ο ελεύθερος. Ο ελεύθερος υδροφορέας συνιστάται από πετρώματα της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς και ποτάμιες αποθέσεις. Σε μεγαλύτερα βάθη (>150 m), παρατηρείται η ύπαρξη ενός υπό πίεση υδροφορέα που αποτελείται κυρίως από άμμο και χαλίκια και χαρακτηρίζεται ως ποιοτικά υποβαθμισμένος (Pavlou et al., 2013). Ακόμη, σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής του Υδατικού Διαμερίσματος Μακεδονίας, το Υπόγειο Υδατικό Σύστημα Επανομής - Μουδανίων, χαρακτηρίζεται από κακή ποσοτική και ποιοτική ανάλυση υδάτων, με αυξημένες συγκεντρώσεις As, B, Fe, Mn και Ni και φαινόμενα υφαλμύρισης στην παράκτια ζώνη (ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ).

Με βάση τις δειγματοληψίες νερού που πραγματοποιήθηκαν τον Απρίλιο 2011 (Κεσόγλου, 2011), συλλέχθηκαν πληροφορίες για την ποιότητα του υπόγειου νερού και τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού δείχνει ότι το ύψος του νερού βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, υποδηλώνοντας την πιθανή διείσδυση του θαλασσινού νερού (Πίνακας 2.2). Στη

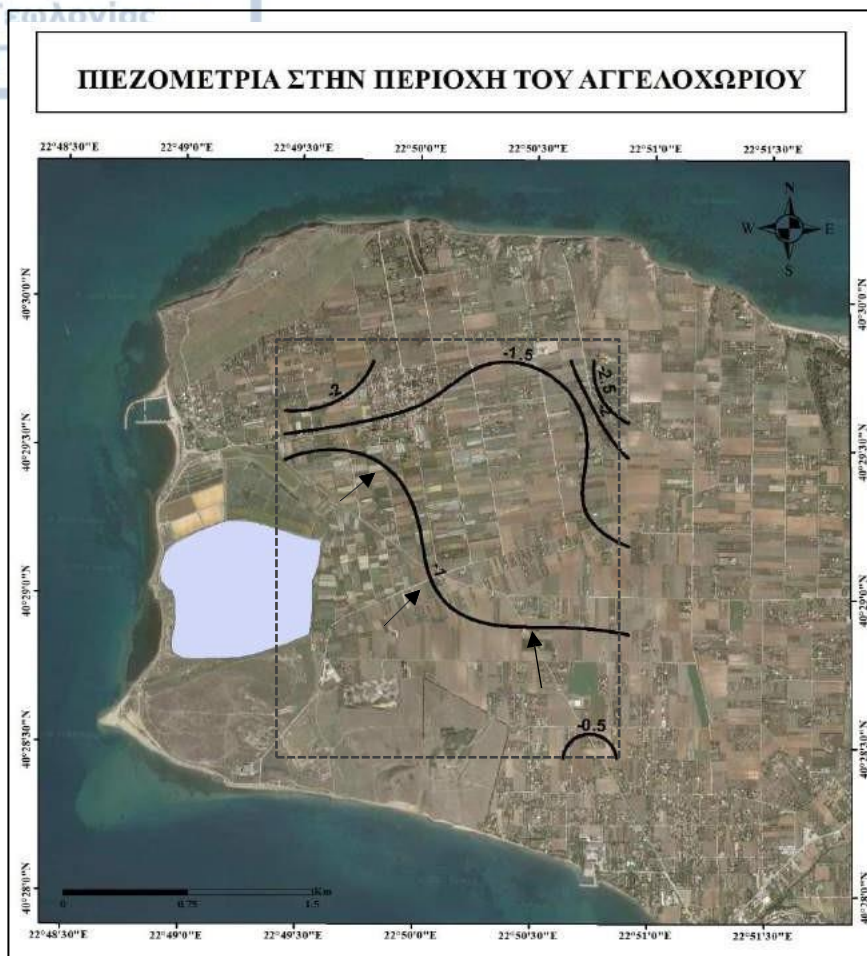
συνέχεια παρατίθεται ο πιεζομετρικός χάρτης της Κεσόγλου (2011) με τιμές -0.5 έως -3, για τον ελεύθερο υδροφόρα, στο ΝΔ τμήμα της περιοχής.



Σχήμα 2.15 Γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της στάθμης του υπόγειου νερού στη περιοχή του Αγγελοχωρίου (τροποποιημένο από Κεσόγλου 2011).

Πίνακας 2.2 Στοιχεία των γεωτρήσεων για τον υπολογισμό της στάθμης του νερού (Κεσόγλου 2011).

Γεώτρηση	Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό πλάτος	Στάθμη υπόγειου νερού (m)	Υψόμετρο (m)	Απόλυτο υψόμετρο στάθμης (m)
G2	402404	4483394	60	57	-3
G3	401923	4483157	40	39	-1
G4	400436	4483538	23.5	21	-2.5
G5	400568	4482663	1.5	1	-0.5
G8	400334	4481207	0.51	0	-0.51
G10	402160	4481053	30.48	30	-0.48



Σχήμα 2.16 Πιεζομετρικός χάρτης του επιφανειακού υδροφόρου στο ΝΑ τμήμα της περιοχής μελέτης (Κεσόγλου 2011).

Για την αξιολόγηση της ποιότητας του υπόγειου νερού, πραγματοποιείται μέτρηση των φυσικών και χημικών παραμέτρων του :

- Φυσικές: Θερμοκρασία, χρώμα, θολρότητα, γεύση, οσμή, ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), ολικά διαλυμένα στερεά (TDS),
- Χημικές: pH, βαρέα μέταλλα, σκληρότητα, ιόντα Καλίου (K^+), Νατρίου (Na^+), Ασβεστίου (Ca^{2+}), Μαγνησίου (Mg^{2+}), Χλωρίου (Cl^-),θειικά ιόντα (SO_4^{2-}), όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-), νιτρικά ιόντα (NO_3^-).

Ειδικότερα, για την αναγνώριση του φαινομένου της υπαλμύρισης, σε έναν υπόγειο υδροφορέα, η συγκέντρωση του (Cl^-), είναι σημαντικός δείκτης, που εξακριβώνει τη θαλάσσια διείσδυση. Επιθυμητό όριο συγκέντρωσης (Cl^-) για το πόσιμο νερό είναι 25 mg/L, ενώ μία τιμή της τάξεως των 100 mg/L, δηλώνει παρουσία θαλασσινού νερού

(Βουδούρης, κ.α., 2004). Επίσης, όταν σε δείγματα νερού από παράκτιους υδροφορείς, εμφανίζεται πλεόνασμα σε Ca^{2+} , υποδηλώνει θαλάσσια διείσδυση, ενώ πλεόνασμα σε Na^+ , υποδηλώνει διείσδυση γλυκού νερού (Βουδούρης, κ.α., 2004).

Άλλοι δείκτες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της υφαλμύρισης είναι τα διαλυμένα στερεά (TDS) και ο συντελεστής Revelle. Το σύνολο των διαλυμένων στερεών, TDS (Total Dissolved Solids), εκφράζει τη συγκέντρωση των αλάτων στο νερό και αποτελεί δείκτη αλατότητας. Το νερό χαρακτηρίζεται γλυκό αν οι τιμές του κυμαίνονται από 0-1000 mg/L, υφάλμυρο 1000-10.000 mg/L, αλμυρό 10.000-100.000 mg/L και υπεράλμυρο για τιμές μεγαλύτερες των 100.000 mg/L (Βουδούρης, 2009).

Ο συντελεστής Revelle αποτελεί δείκτης της υφαλμύρισης και ορίζεται ως το πηλίκο των ιόντων (meq/L) χλωρίου προς το άθροισμα των ανθρακικών και των όξινων ανθρακικών ιόντων:

$$Revelle = \frac{Cl^-}{CO_3^{2-} + HCO_3^-} \quad (7.1)$$

Όταν ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές κοντά ή μεγαλύτερες του 1 τότε υπάρχει ένδειξη υφαλμύρισης. Η χρήση του συντελεστή Revelle πρέπει να γίνεται σε συνδυασμό με σαφή γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής, στην οποία εφαρμόζεται. Η κατανομή του συντελεστή Revelle ακολουθεί αυτή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και των συνολικών διαλυμένων στερεών.

Πίνακας 2.3 Βαθμός ρύπανσης νερού από τη διείσδυση της θάλασσας (Καλλέργης, 2000).

Συντελεστής Revelle προτεινόμενο όριο	Χαρακτήρας νερού
<1	Καλό υπόγειο νερό χωρίς ρύπανση
1-2	Ελαφρά ρυπασμένο
2-6	Μέτρια ρυπασμένο
6-10	Σοβαρά ρυπασμένο
10-150	Επικίνδυνα ρυπασμένο
>150	Θαλασσινό νερό

Πίνακας 2.4 Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το πόσιμο νερό σύμφωνα με την νέα Οδηγία 2184/2020/ΕΕ σχετικά με την ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης (ΕΥΑΘ & <https://eur-lex.europa.eu>).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΤΙΜΗ	ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ
Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (pH)	> 6.5 και < 9,5	Είναι μέτρο της ισορροπίας όξινων και αλκαλικών ενώσεων που βρίσκονται σε διάλυση στο νερό.
Αγωγιμότητα (EC)	2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Η παράμετρος αυτή είναι μέτρο της συγκέντρωσης των διαλυμένων αλάτων στο νερό.
Χλωριούχα (Cl^-)	250 mg/L	Είναι ευρέως διαδεδομένα ως άλατα νατρίου, καλίου και ασβεστίου. Προέρχονται από τη διάβρωση των βράχων. Απότομη αύξηση τους στο νερό δείχνουν πιθανή επαφή με θαλασσινό νερό ή ακόμη και πιθανή ρύπανση από λύματα.
Κάλιο (K^+)	12 mg/L	?
Νάτριο (Na^+)	200 mg/L	Το νάτριο είναι απαραίτητο στοιχείο σε πολλούς φυσιολογικούς μηχανισμούς του σώματος. Οι οικιακές συσκευές αποσκλήρυνσης του νερού μπορεί να προκαλέσουν αύξηση της συγκέντρωσής του.
Μαγνήσιο (Mg^{2+})	50 mg/L	?
Νιτρικά ιόντα (NO_3^-)	50 mg/L	Τα νιτρικά ανιόντα είναι προϊόντα του τελικού σταδίου οξείδωσης της αμμωνίας. Υψηλές συγκεντρώσεις οφείλονται σε λιπάσματα, απορρίμματα και ζωικά ή ανθρώπινα απόβλητα. Τυχόν παρουσία τους στο νερό δείχνει παλαιότερη ρύπανση.
Θειικά ιόντα (SO_4^{2-})	250 mg/L	Υψηλές συγκεντρώσεις θεικών μπορεί να εισέλθουν στο νερό από λιπάσματα ή βιομηχανικά απόβλητα.

Πίνακας 2.5 Ταξινόμηση νερών με βάση τη σκληρότητα (Βουδούρης, 2009).

Ισοδύναμο CaCO ₃ (mg/L)	Γαλλικοί βαθμοί	Χαρακτηρισμός νερού
0-100	0-10	Μαλακό
101-200	10-20	Μέτρια σκληρό
201-300	20-30	Σκληρό
>300	>30	Πολύ σκληρό



Σχήμα 2.17 Γεωτρήσεις κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία νερού (Κεσόγλου, 2011).

Οι τιμές των παραμέτρων που λήφθηκαν από τις δειγματοληψίες της Κεσόγλου, παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.6, 2.7, και 2.8. Η γεώτρηση G11 υλοποιήθηκε εκτός του Αγγελοχωρίου, με σκοπό την εκτίμηση της ποιότητας του υπόγειου νερού στην ευρύτερη περιοχή. Σύμφωνα με την υδρογεωλογική μελέτη της Κεσόγλου, αποδεικνύεται ότι το νερό στις γεωτρήσεις G2, G3, G9 και G11 χαρακτηρίζεται ως καλό υπόγειο νερό, ενώ στην G6 ως μέτρια ρυπασμένο και στην G7 ως σοβαρά ρυπασμένο υπόγειο νερό (Κεσόγλου 2011).

Πίνακας 2.6 Φυσικές και χημικές παραμέτρους του υπόγειου νερού για κάθε γεώτρηση.

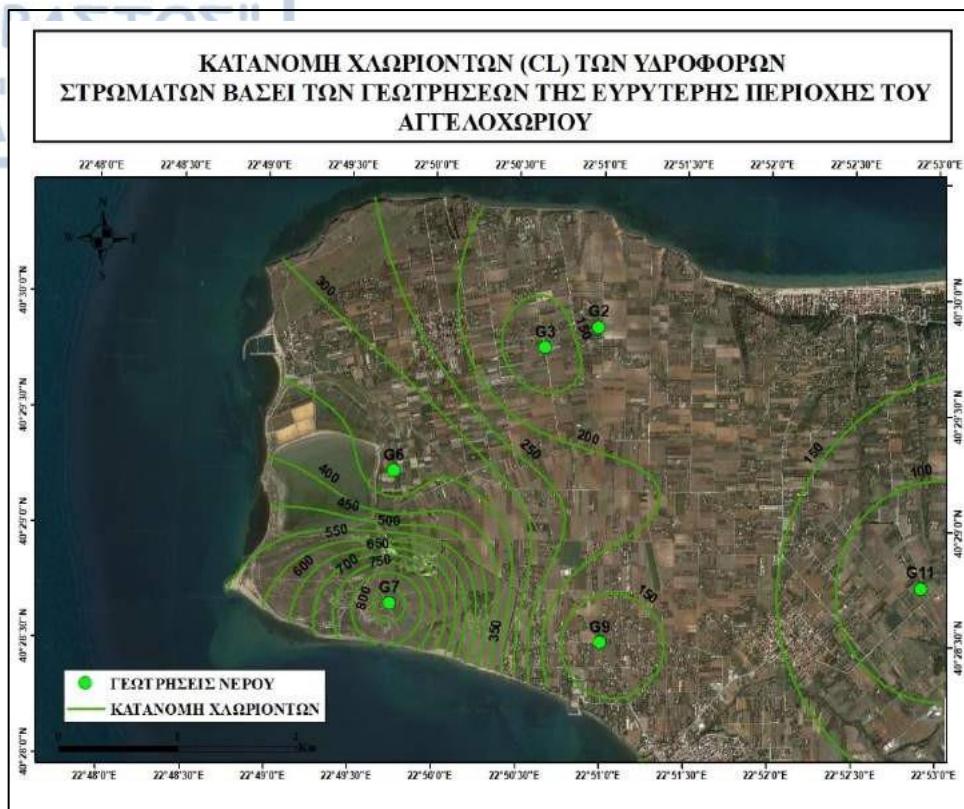
	X	Y	T (°C)	pH	EC (μS/cm)	TDS (mg/L)	Hardness (°f)
G2	402404	4483394	20.3	8.20	1090	854	55.14
G3	401923	4483157	19.8	7.68	1120	1018	66.98
G6	400652	4482244	18.1	7.35	3000	1921	62.53
G7	400604	4481139	19.8	7.74	6440	4013	94.84
G9	402395	4480818	20.6	7.65	1105	710	65.95
G11	405224	4481274	20.9	8.55	878	563	92.92

Πίνακας 2.7 Συγκεντρώσεις ιόντων σε mg/L, για κάθε γεώτρηση (Κεσόγλου 2011).

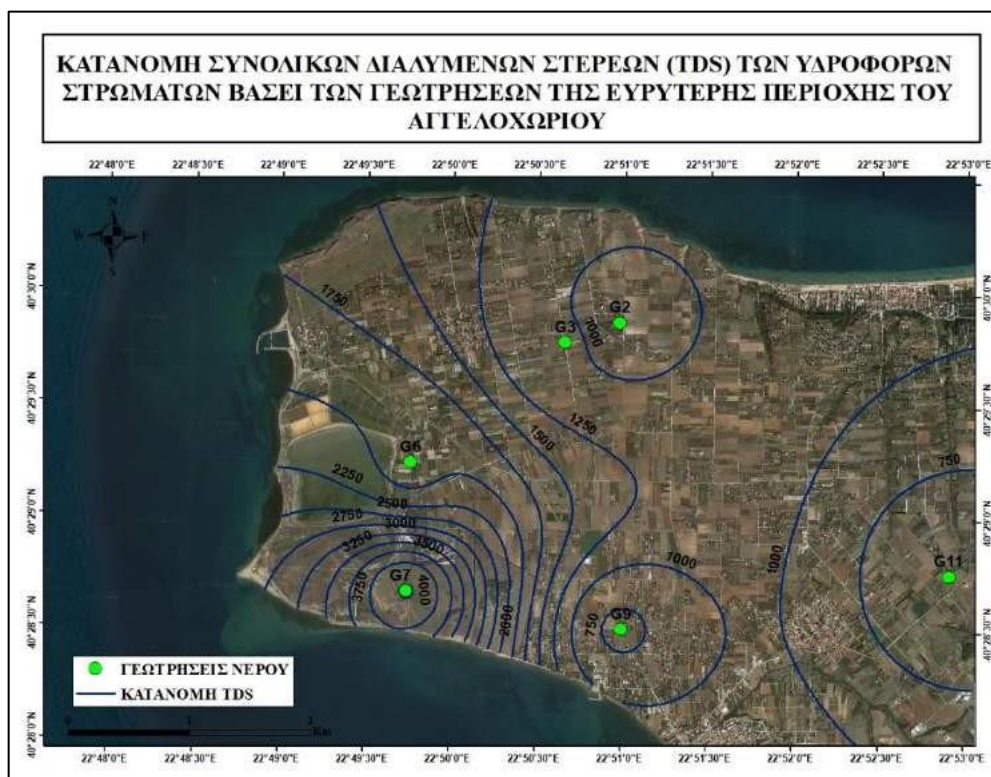
	Ca ²	Mg ²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
G2	185	12	196	2.5	166	14.09	33.8	429
G3	125	87	99	1.9	118	14.51	24.0	549
G6	155	58	245	7.5	331	0.87	15.7	546
G7	300	48	157	37.7	816	13.45	15.6	366
G9	172	56	87	4.3	114	14.29	44.1	515
G1	96	167	151	3.4	59	7.03	7.03	427

Πίνακας 2.8 Τιμή του συντελεστή Revelle για κάθε δείγμα νερού (Κεσόγλου 2011).

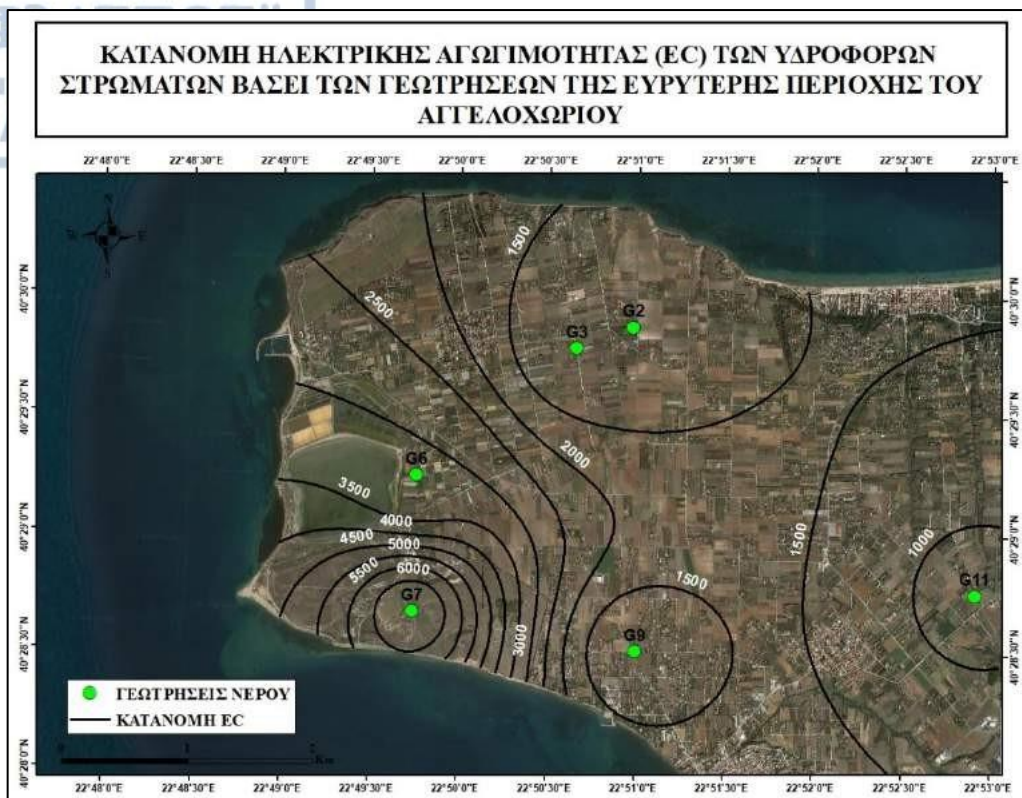
Γεώτρηση	Συντελεστής Revelle
G2	0.75
G3	0.77
G6	2.18
G7	8
G9	0.79
G11	0.15



Σχήμα 2.18 Κατανομή των χλωριόντων (Cl) στα υπόγεια νερά της περιοχής του Αγγελοχωρίου.



Σχήμα 2.19 Κατανομή των διαλυμένων στερεών (TDS) στα υπόγεια νερά της περιοχής του Αγγελοχωρίου.



Σχήμα 2.20 Κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στα υπόγεια νερά της περιοχής του Αγγελοχωρίου.

3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΓΕΩΦΥΣΙΚΗ

Ο επιφανειακός ορίζοντας του φλοιού της Γης, αποτελεί σημαντική γεωλογική ζώνη, καθώς παρέχει μεγάλο μέρος των υδάτινων πόρων, στηρίζει τον αγροτικό τομέα και τα οικοσυστήματα, ενώ επηρεάζει και το κλίμα. Ακόμη, η ζώνη αυτή, λειτουργεί ως αποδέκτης ή αποθηκευτικός χώρος αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων και ρύπων. Η συνεχής αυξανόμενη ανάγκη υδάτινων πόρων και καλής ποιότητας νερού για ανθρώπινη κατανάλωση, δημιούργησε προβλήματα διαθεσιμότητας και υποβάθμισης του υπόγειου νερού. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί πλήρως λειτουργικά εργαλεία και προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό, την παρακολούθηση και την έρευνα υδρογεωλογικών παραμέτρων και διεργασιών στον υπεδάφιο ορίζοντα, με μη καταστρεπτικούς τρόπους.

Ο κλάδος της Υδρογεωφυσικής έχει αναπτυχθεί τις δύο τελευταίες δεκαετίες, με στόχο την εξέλιξη και τη βελτίωση της ταυτόχρονης χρήσης γεωφυσικών και υδρογεωλογικών μετρήσεων σε έρευνες κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, που σχετίζονται συνήθως με την εύρεση αποθεμάτων νερού, τη μεταφορά ρύπων και τις οικολογικές έρευνες. Οι γεωφυσικές μετρήσεις βασίζονται στις μετρήσεις φυσικών μεγεθών των σχηματισμών του υπεδάφους και χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση των υπεδάφινων σχηματισμών, τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων τους και την παρακολούθηση των φυσικοχημικών διεργασιών που είναι σημαντικές σε υδρογεωλογικές έρευνες (Hubbard and Rubin 2005).

Σε αντίθεση με την υδρολογική έρευνα, όπου εφαρμόζονται οι σημειακές μετρήσεις (πεδίου και εργαστηριακές), οι υδρογεωφυσικές μέθοδοι προσφέρουν πληροφορίες ευρείας κλίμακας, σε δισδιάστατη ή και τρισδιάστατη μορφή, με μικρό κόστος, σχετικά γρήγορα και χωρίς τη διατάραξη του υπεδάφους.

Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται συνήθως στην επιφάνεια του εδάφους (surface) αλλά μπορούν να εφαρμοστούν και υπεδάφια (downhole ή borehole) ή εναέρια (airborne). Ένας τρόπος διάκρισης των υδρογεωφυσικών επιφανειακών μεθόδων είναι με βάση τον τόπο λήψης των δεδομένων και τη φύση της ιδιότητας που χρησιμοποιήθηκε:

1. Υπάρχει μία ομάδα μεθόδων που επιτρέπει την απεικόνιση των βασικών ιδιοτήτων του εδάφους, σε χάρτες, έως και σε μικρό βάθος. Για παράδειγμα, αξιοποιώντας

τις οπτικές ιδιότητες των πετρωμάτων και των εδαφών με υπέρυθρες φωτογραφίες, μετρώντας φυσική ραδιενέργεια με τη φασματοσκοπία ή την ανακλαστικότητα ηλεκτρομαγνητικών παλμών με τη μέθοδο του γεωραντάρ, παρέχονται εικόνες κατανομής μίας ιδιότητας, ή της επιφάνειας της Γης (Nwakwoala & Udom, 2008).

2. Οι υπόλοιπες παράγουν εικόνες που αποτυπώνουν την κατανομή μιας ιδιότητας των πετρωμάτων του υπεδάφους, με βάθος από λίγα έως και χιλιάδες μέτρα. Στην κατηγορία αυτή διακρίνονται:
 - i. Οι παθητικές μέθοδοι που βασίζονται στην καταγραφή φυσικών πεδίων και των μεταβολών τους, όπως για παράδειγμα το βαρυτικό, το μαγνητικό, το ηλεκτρικό φυσικό δυναμικό κτλ. (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος 2013, Nwakwoala & Udom 2008).
 - ii. Οι ενεργητικές μέθοδοι, οι οποίες καταγράφουν την απόκριση του υπεδάφους, κατά τη διέγερσή του, είτε από ελαστικά κύματα (π.χ. εκρήξεις ή σεισμικές πηγές) είτε διοχετεύοντας σε αυτό τεχνητά πεδία (π.χ. ηλεκτρικά, ηλεκτρομαγνητικά κτλ.) (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013).

Η επιλογή της κατάλληλης γεωφυσικής μεθόδου εξαρτάται από το αντικείμενο της έρευνας, τις γεωφυσικές ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά του στόχου και τις ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης. Οι διάφορες γεωφυσικές τεχνικές είναι ευαίσθητες σε διάφορες ιδιότητες, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται συνήθως περισσότερες από μία, για την αποτύπωση του υπεδάφους. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι πιο χαρακτηριστικές γεωφυσικές μέθοδοι, που εφαρμόζονται στην υδρογεωλογική έρευνα.

Πίνακας 3.1 Εφαρμογή των διάφορων γεωφυσικών μεθόδων στην Υδρογεωλογία (τροποποιημένο από Hubbard and Rubin, 2005) .

Γεωφυσική Μέθοδος		Γεωφυσικές Ιδιότητες	Υδρογεωλογικούς σκοπούς
Εναέριες (Airborne)	Εναέριες μετρήσεις Αερομαγνητική Ηλεκτρομαγνητική	Ακτινοβολία γάμμα, θερμική ακτινοβολία Ολική ένταση μαγνητικού και βαρυτικού πεδίου Ηλεκτρική αντίσταση	Χαρτογράφηση υποβάθρου, διεπιφάνειες γλυκού-αλμυρού νερού και ρηγμάτων, εκτίμησης ποιότητας νερού
Επιφανειακές	Σεισμική διάθλαση	Ταχύτητα P κυμάτων	Χαρτογράφηση υποβάθρου, υδροφόρου ορίζοντα, ρηγμάτων
	Σεισμική ανάκλαση	Ταχύτητα P κυμάτων και ανακλαστικότητα	Χαρτογράφηση στρωματογραφίας, προσδιορισμός ρηγμάτων και ζώνες διαρρήξεις
	Ηλεκτρικής αντίστασης DC Επαγόμενη Πόλωση IP Φυσικό Δυναμικό SP Ηλεκτρομαγνητική (TDEM, FDEM, CSEM, AMT)	Ειδική ηλεκτρική αντίσταση Ειδική ηλεκτρική αντίσταση, Συντελεστής φόρτωσης Διαφορά δυναμικού, Ηλεκτρική αγωγιμότητα Ηλεκτρική αντίσταση	Χαρτογράφηση υδροφορέα, υδροφόρου ορίζοντα, υποβάθρου, διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού και όρια πλούμιου ή θύσανου (plume), προσδιορισμός υδραυλικής ανισοτροπίας, υδραυλικής αγωγιμότητας και ποιότητας νερού
	Γεωραντάρ (GPR)	Διηλεκτρική σταθερά, Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Χαρτογράφηση στρωματογραφίας, υδροφορέα.
Crosshole (Σε γεώτρησης)	Σεισμική μέθοδος Ηλεκτρική Μέθοδος Γεωραντάρ	Ταχύτητα P κυμάτων Ειδική ηλεκτρική αντίσταση Διηλεκτρικές σταθερές	Προσδιορισμός λιθολογίας και ζώνες διάρρηξης. Χαρτογράφηση υδροφορέα, προσδιορισμός ποιότητας νερού και περιεχόμενου νερού
Wellbore	Γεωφυσικές Διαγραφίες	Ηλεκτρική αντίσταση, σεισμική ταχύτητα, φυσικό δυναμικό, ακτίνα γάμμα	Προσδιορισμός λιθολογίας Χαρτογράφηση υδροφορέα, προσδιορισμός ποιότητας νερού και περιεχόμενου νερού.

Οι συνθήκες του υπόγειου νερού σε μία περιοχή μπορούν να περιγραφούν κυρίως από την κατανομή των υδροπερατών (άμμος, χαλίκια) και μη υδροπερατών (άργιλος, ιλύς) στρωμάτων στο υπέδαφος. Η γεωφυσική απεικόνιση αυτών των στρωμάτων επιτυγχάνεται με την ετερογένεια των πετροφυσικών ιδιοτήτων. Οι πετροφυσικές ιδιότητες που συνδέονται με τη γεωφυσική έρευνα του υπόγειου νερού είναι οι σεισμικές ταχύτητες (σχετίζονται με τις ελαστικές σταθερές και την πυκνότητα), η ηλεκτρική αντίσταση (ή αγωγιμότητα) και η διηλεκτρική σταθερά (Reinhard Kirsch, 2006).

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια, είναι αυτές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ERT, γεωηλεκτρική μέθοδος) και των παροδικών πεδίων (TEM, ηλεκτρομαγνητική μέθοδος), οι οποίες στηρίζονται στην ιδιότητα της ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων.

Η ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων της Γης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία του υπόγειου νερού που υπάρχει στο πορώδες. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα ιζήματα και τα ιζηματογενή πετρώματα, με εξαίρεση ωστόσο τα αργιλικά πετρώματα. Τα περισσότερα πετρογενετικά ορυκτά αποτελούν κακούς αγωγούς του ηλεκτρικού ρεύματος, σε αντίθεση με το υπόγειο νερό. Σε πολλά μεταλλικά ορυκτά και πετρώματα, η καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην κρυσταλλική τους δομή. Αντίθετα, τα περισσότερα ορυκτά που εμπεριέχονται σε πετρώματα, είναι μονωτές, και η διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος σε αυτά, επιτυγχάνεται μέσω των ιόντων αλάτων και ορυκτών που βρίσκονται διαλυμένα στο νερό των πόρων των πετρωμάτων (ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα). Για αυτό τον λόγο, η αγωγιμότητα του πετρώματος αυξάνεται με την ποσότητα του νερού που περιέχεται σε αυτό.

Η σχέση που περιγράφει την εξάρτηση της αγωγιμότητας ενός πετρώματος με το πορώδες του, είναι γνωστή ως νόμος του Archie (Archie, 1942):

$$\rho = \rho_v \alpha \phi^{-m} \quad (3.1)$$

Όπου ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος, ρ_v η ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος, ϕ ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος (πορώδες) και α, m εμπειρικές σταθερές με τιμές συνήθως $\alpha=1$ και $m=2$.

Η σταθερά m αποτελεί τον συντελεστή συγκόλλησης ή στερεοποίησης (cementation factor) και εξαρτάται από τη γεωμετρία των πόρων, τη σύσταση των ορυκτών και τη συνεκτικότητα (Reinhard Kirsch, 2006).

Η σταθερά α αντιπροσωπεύει την επίδραση των κόκκων των ορυκτών στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Αν το πέτρωμα λειτουργεί σαν μονωτής (προϋπόθεση για την εφαρμογή του νόμου του Archie), η σταθερά παίρνει τιμή 1 ($\alpha=1$). Στην περίπτωση όμως που τα συστατικά του πετρώματος συμβάλλουν στην αγωγιμότητα του, τότε η σταθερά α μειώνεται αναλόγως (Reinhard Kirsch, 2006).

Πίνακας 3.2 Τιμές πορώδους ϕ και εμπειρικών σταθερών α , m , για διάφορους τύπους πετρωμάτων (Keller, 1996).

Τύπος Πετρώματος	ϕ	α	m
Χαλαρής συγκόλλησης	0.25 – 0.45	0.88	1.37
Μέτριας συγκόλλησης	0.22 – 0.35	0.62	1.72
Καλής συγκόλλησης	0.05 – 0.25	0.62	1.95
Πυκνό, Πυριγενές, Μεταμορφωμένο	< 0.05	1.4	1.6
Ηφαιστειακό υψηλού πορώδους	0.2 – 0.8	3.5	1.4

Η εφαρμογή του νόμου του Archie ισχύει για υλικά με υψηλή αντίσταση και με αγωγίμο νερό στους πόρους τους. Η σταθερά α , έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει υπόψιν μια μικρή συνεισφορά των κόκκων των ορυκτών στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ωστόσο, όταν η αντίσταση του νερού των πόρων είναι υψηλή, η συνεισφορά των κόκκων είναι πλέον σημαντική, με αποτέλεσμα η μαθηματική σχέση του Archie να μην είναι έγκυρη.

Ένας ακόμη περιορισμός της σχέσης του Archie είναι τα αργιλικά υλικά. Αυτά χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές αντιστάσεων που οφείλονται στην ηλεκτρικά φορτισμένη επιφάνεια τους. Η επιφάνεια αυτή προσροφά τα μόρια του νερού, καθώς αυτά έλκονται προς αυτήν με την ιδιότητα τους ως ηλεκτρικά δίπολα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται σε μέγεθος. Λόγω της υψηλής ικανότητας ιοντικής ανταλλαγής της αργίλου, η επιφάνεια της είναι αρνητικά φορτισμένη, με αποτέλεσμα να μειώνεται περισσότερο η αντίσταση του νερού των πόρων.

4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες γεωφυσικές μεθόδους, με ευρύ πεδίο εφαρμογής, όπως στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών, γεωλογικών, υδρογεωλογικών προβλημάτων, στην έρευνα και στον εντοπισμό του υπόγειου νερού και των μεταλλοφόρων ζωνών αλλά και σε αρχαιολογικές μελέτες. Η γεωηλεκτρική μέθοδος, χρησιμοποιείται με σκοπό τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του υπεδάφους.

Κατά το πρώτο στάδιο της μεθόδου, εισάγεται στο έδαφος με τη χρήση δύο ηλεκτροδίων, τεχνητό ηλεκτρικό ρεύμα και παράλληλα πραγματοποιείται η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού από άλλα δύο ηλεκτρόδια. Τα τέσσερα ηλεκτρόδια, που απαιτούνται για τη λήψη της μέτρησης, διατάσσονται με συγκεκριμένη γεωμετρία στο έδαφος, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε έρευνας.

Με βάση τα δύο αυτά μεγέθη, της διαφοράς δυναμικού (V) και του ηλεκτρικού ρεύματος (I), υπολογίζεται το πηλίκό τους, το οποίο αντιστοιχεί στην ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους (Νόμος Ohm). Η μονάδα μέτρησης της αντίστασης R στο διεθνές σύστημα SI είναι 1 Ohm.

$$R = \frac{V_{MN}}{I_{AB}} \quad (4.1)$$

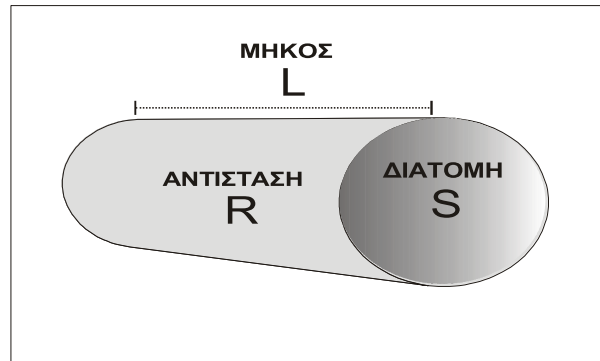
Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει τη δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους. Οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Για αυτόν τον λόγο, η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους χρησιμοποιείται για την έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής και τον εντοπισμό δομών ενδιαφέροντος.

Στη συνέχεια, η ηλεκτρική αντίσταση ανάγεται στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση, με βάση την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ ενός κυλινδρικού σώματος, διατομής S , μήκους L και αντίστασης R ορίζεται ως:

$$\rho = \frac{RS}{L} \quad (4.2)$$

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα SI είναι $1 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$.



Σχήμα 4.1 Κυλινδρικός αγωγός διατομής S , μήκους L και αντίστασης R .

Το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, $\sigma = \frac{1}{\rho}$, λέγεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μονάδα μέτρησής της στο διεθνές σύστημα SI, είναι S/m .

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, χαρακτηρίζεται ως μία μεταβλητή φυσική ιδιότητα των πετρωμάτων και των ορυκτών. Γενικότερα, παίρνει τιμές από $10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ έως $10^{15} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ και τα πετρώματα που έχουν ειδική αντίσταση από $10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ έως και $10^{-1} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ ορίζονται ως καλοί αγωγοί, ενώ αυτά που έχουν τιμές από $10^8 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ έως $10^{15} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$, ως κακοί αγωγοί. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση βασίζεται κυρίως από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα δηλαδή το χημισμό και τη συγκέντρωση του νερού στο εσωτερικό των πετρωμάτων. Επιπρόσθετοι σημαντικοί παράγοντες είναι το πορώδες, η θερμοκρασία και η πίεση, οι ασυνέχειες κ.α.

4.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Κατά την διεργασία των μετρήσεων της μεθόδου της ειδικής αντίστασης, συμπεριλαμβάνεται η γεωμετρία της μέτρησης αλλά και η ανομοιογένεια της Γης. Συνεπώς το μέγεθος που μετράται δεν είναι η πραγματική ειδική αντίσταση αλλά η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a). Η ποσότητα αυτή είναι αναγκαία για τον υπολογισμό της πραγματικής ειδικής αντίστασης στους διάφορους σχηματισμούς του υπεδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται ως εξής:

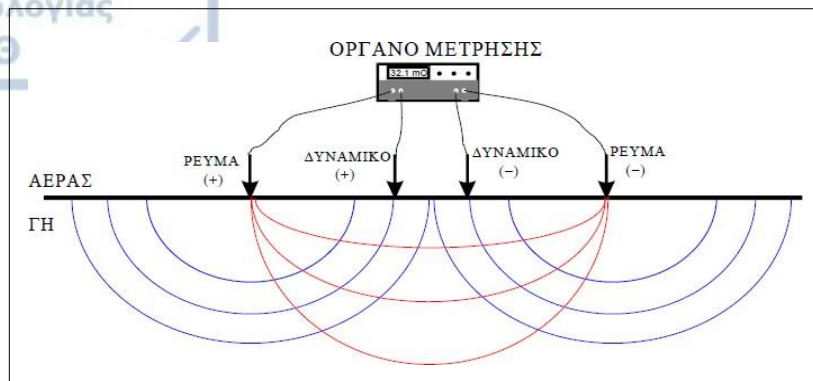
$$\rho_a = \frac{V_{MN}}{I} \left[\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \right] = RK \quad (4.3)$$

Όπου A, M οι θέσεις των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος και M, N οι θέσεις των δύο ηλεκτροδίων δυναμικού. Η ποσότητα $K = \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}$ ονομάζεται γεωμετρικός παράγοντας και υποδηλώνει τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων.

Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης, χρησιμοποιούνται τρεις τεχνικές: η βυθοσκόπηση (VES), η όδευση ή οριζοντιογραφία (Profiling) και η ηλεκτρική τομογραφία (ERT). Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας που αποτελεί συνδυασμό των προηγούμενων, με σκοπό τη μέτρηση τόσο της πλευρικής, όσο και της κατακόρυφης μεταβολής της αντίστασης (δισδιάστατη διασκόπηση). Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη λήψη πληροφοριών για την κατανομή της αντίστασης στο χώρο σε δισδιάστατη ή ακόμα και σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

Όσον αφορά το βάθος διείσδυσης στο οποίο φτάνουν οι μετρήσεις, αυτό εξαρτάται από τις αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, τον αριθμό τους, αλλά και τη διάταξη που χρησιμοποιείται. Όταν ο στόχος της έρευνας βρίσκεται σε μικρό βάθος, τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε μικρότερη απόσταση μεταξύ τους, ώστε οι μετρήσεις να έχουν μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα.

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων, τα δεδομένα αποτυπώνονται σε μία ψευδοτομή φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Στη συνέχεια, με τη χρήση αλγορίθμων αντιστροφής, λαμβάνεται η τελική τομή της κατανομής της ειδικής αντίστασης.



Σχήμα 4.2 Βασική διάταξη των ηλεκτροδίων δυναμικού και ρεύματος, κατά τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης.

Πίνακας 4.1 Ενδεικτικές τιμές ειδικής αντίστασης γεωλογικών σχηματισμών (Παπαζάχος, 1996).

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.m)
ΑΕΡΑΣ	∞
ΣΙΔΗΡΟΠΥΡΙΤΗΣ	3×10^{-1}
ΓΑΛΗΝΙΤΗΣ	2×10^{-3}
ΧΑΛΑΖΙΑΣ	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
ΑΣΒΕΣΤΙΤΗΣ	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
ΓΡΑΝΙΤΗΣ	$100 - 1 \times 10^6$
ΓΑΒΒΡΟΣ	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	$50 - 1 \times 10^7$
ΨΑΜΜΙΤΗΣ	$1 - 1 \times 10^8$
ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ	$20 - 2 \times 10^3$
ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ	$100 - 10^4$
ΑΜΜΟΣ	$1 - 1.000$
ΑΡΓΙΛΟΣ	$1 - 100$
ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ	$0.5 - 300$
ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ	$0.2 - 1$

4.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Η επιλογή μιας διάταξης εξαρτάται από τις απαιτήσεις και το σκοπό της εκάστοτε έρευνας, για παράδειγμα, το επιθυμητό βάθος διασκόπησης, τους στόχους ενδιαφέροντος, τη γεωλογία της περιοχής, την ευαισθησία της διάταξης σε κατακόρυφες και πλευρικές μεταβολές της αντίστασης αλλά και τον λόγο σήματος προς θόρυβο. Συνήθως χρησιμοποιείται παραπάνω από μία διάταξη, για τη λήψη των δεδομένων, ώστε να υπάρχει καλύτερη ερμηνεία των δομών του υπεδάφους.

Οι πιο γνωστές από τις διατάξεις είναι:

α) Διάταξη Wenner : Κατά τη διάταξη αυτή, τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε μία ευθεία και ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a . Η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (4.4)$$

Ο γεωμετρικός παράγοντας ισούται με $K=2\pi a$.

β) Διάταξη Schlumberger: Στη διάταξη αυτή η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού MN η οποία είναι ίση με $2L$, είναι μικρότερη από την απόσταση a των ηλεκτροδίων του ρεύματος .

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2a} \frac{\Delta V}{I} \quad (4.5)$$

Ο γεωμετρικός παράγοντας ισούται με $K = \frac{\pi L^2}{2a}$.

γ) Διάταξη Διπόλου-Διπόλου: Στη διάταξη διπόλου-διπόλου τα ηλεκτρόδια δυναμικού MN βρίσκονται σε σταθερή απόσταση a , ενώ τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος AB με απόσταση a ($AB=MN=a$), τοποθετούνται σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση από τα ηλεκτρόδια δυναμικού.

$$\rho_{\alpha} = [-\pi n a (n+1)(n+2)a] \frac{\Delta V}{I} \quad (4.6)$$

Σε αυτή την περίπτωση ο γεωμετρικός παράγοντας ισούται με

$$K = -\pi n a (n+1)(n+2)a.$$

δ) Διάταξη Πόλου- Διπόλου: Ομοίως με τις άλλες διατάξεις, χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δύο ηλεκτρόδια δυναμικού. Τα τελευταία βρίσκονται σε απόσταση $MN=a$, ενώ το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετείται σε άπειρη θεωρητικά απόσταση. Έστω ότι $AM=na$, τότε:

$$\rho_{\alpha} = [2\pi n a (n+1)] \frac{\Delta V}{I} \quad (4.7)$$

Με γεωμετρικό παράγοντα $K = 2\pi n a (n+1)$.

ε) Διάταξη Πόλου-Πόλου: Κατά τη διάταξη αυτή, το ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και το ένα του δυναμικού A και M, τοποθετούνται επάνω στην προς μέτρηση τομή, ενώ τα αντίστοιχα δευτερεύοντα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού B και N, βρίσκονται σε θεωρητικά άπειρη απόσταση.

$$\rho_{\alpha} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (4.8)$$

Ο γεωμετρικός παράγοντας K ισούται με $K=2\pi a$.

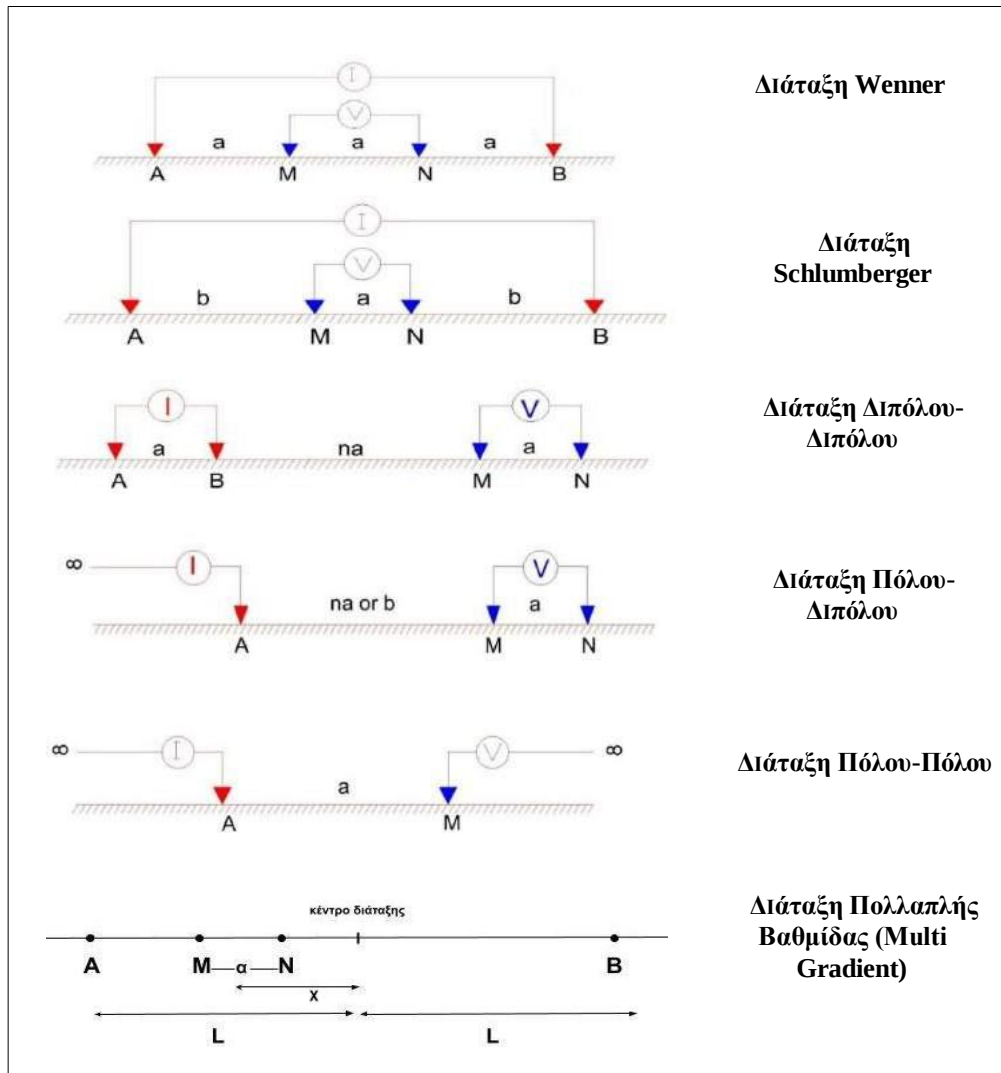
στ) Διάταξη Πολλαπλής Βαθμίδας (Multi Gradient): Κατά τη διάταξη αυτή, η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος AB ισούται με $2L$ ή $(s+2)a$, όπου s αποτελεί παράγοντας και είναι ακέραιος αριθμός που δείχνει των μέγιστο αριθμό μετρήσεων του δυναμικού. Παράλληλα, η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού MN ισούται με a και η φαινόμενη ειδική αντίσταση ορίζεται ως εξής :

$$\rho_{\alpha} = \frac{\pi (L^2 - x^2)}{a (L^2 - x^2)} \frac{\Delta V}{I}$$



Ο γεωμετρικός παράγοντας K της διάταξης πολλαπλής βαθμίδας ισούται με

$$K = \frac{\pi (L^2 - x^2)}{a (L^2 - x^2)}$$

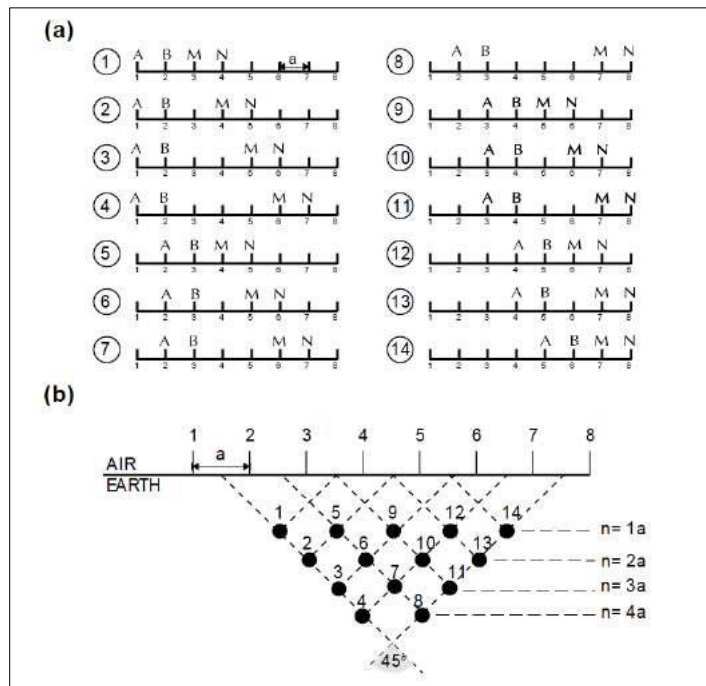


Σχήμα 4.3 Γεωμετρία των συχνότερων διατάξεων ηλεκτροδίων.

Πίνακας 4.2 Αξιολόγηση διατάξεων μέτρησης της αντίστασης (κατά Ward, 1990, από

Tsourlos, 1995).

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΛΟΓΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ/ΘΟΡΥΒΟΥ	ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ
Wenner	5	2	5
Schlumberger	4	2	5
Διπόλου-Διπόλου	1	5	2
Πόλου- Διπόλου	3	4	2
Πόλου-Πόλου	5	4	2
Πολλαπλής Βαθμίδας	3	5	1
Χειρότερη: 1 Καλύτερη: 5			



Σχήμα 4.4 (α) Δισδιάστατη διασκόπηση με τη διάταξη διπόλου-διπόλου, με τη χρήση 8 ηλεκτροδίων και μέγιστο διάστημα $n=4$ και (β) απεικόνιση της ψευδοτομής που προκύπτει από τη μέτρηση (Tsourlos, 1995).

4.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΥΘΕΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

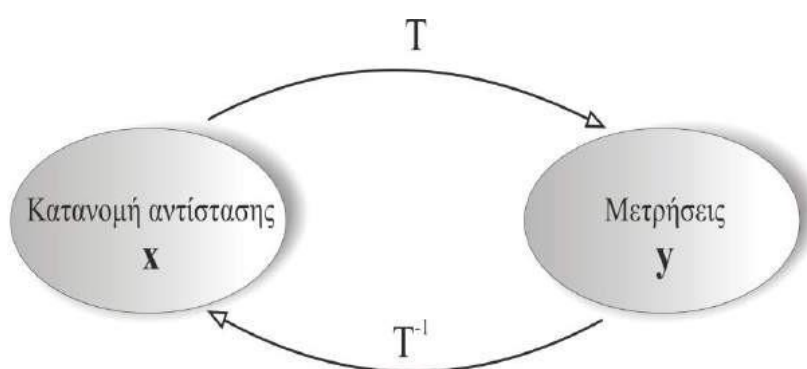
Κατά την εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας, τα δεδομένα αποτυπώνονται σε μία ψευδοτομή. Αυτή, αναπαριστά μία αλλοιωμένη εικόνα του υπεδάφους, χωρίς να δίνει βάση στην πραγματική ειδική αντίσταση αλλά ούτε και στη διάταξη της μέτρησης. Για αυτό τον λόγο, η τελική τομή που αντιπροσωπεύει καλύτερα, την πραγματική κατανομή της ειδικής αντίστασης, λαμβάνεται από μία πολύπλοκη μαθηματική διαδικασία που ονομάζεται, αντιστροφή. Ωστόσο, προϋπόθεση για τη μέθοδο της αντιστροφής, αποτελεί η επίλυση του ευθέως προβλήματος.

Για την επίλυση του ευθέως προβλήματος, θεωρούμε τις μεταβλητές x και y , οι οποίες αναπαριστούν την κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης και τις πραγματικές μετρήσεις αντίστοιχα, ώστε να υπολογιστεί ο μη γραμμικός μετασχηματισμός T .

$$y=T(x) \quad (4.10)$$

Αντιθέτως, για τον υπολογισμό του αντίστροφου προβλήματος, πρέπει να βρεθεί ο αντίστροφος μετασχηματισμός T^{-1} , όπου η άγνωστη μεταβλητή είναι η κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης x .

$$x=T^{-1}(y) \quad (4.11)$$



Σχήμα 4.5 Γραφική απεικόνιση της επίλυσης του ευθέως και αντιστρόφου προβλήματος.

Η μέθοδος του ευθέως προβλήματος, είναι μία διαδικασία υπολογισμού φαινομένων ειδικών αντιστάσεων, για ένα μοντέλο με γνωστές παραμέτρους, δηλαδή τις τιμές της

κατανομής των αντιστάσεων αλλά και τη διάταξη των ηλεκτροδίων. Υπάρχουν δύο τρόποι επίλυσης του ευθέος προβλήματος:

α) Αναλυτικές Μέθοδοι: περιλαμβάνουν την απευθείας επίλυση εξισώσεων πεδίου. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται συνήθως μόνο σε απλές δομές (σφαιρικές), ή και για την επαλήθευση αποτελεσμάτων από άλλες τεχνικές (Tsourlos, 1995).

β) Αριθμητικές Μέθοδοι: περιλαμβάνουν μαθηματικές διεργασίες, οι οποίες διενεργούνται από υπολογιστές. Οι αριθμητικές μέθοδοι διακρίνονται στις ολοκληρωτικές εξισώσεις και στις διαφορικές εξισώσεις. Οι τελευταίες εφαρμόζονται κυρίως όταν γίνεται χρήση του ευθέος προβλήματος, για την επίτευξη της αντιστροφής, ώστε να υπολογιστεί η κατανομή της αντίστασης, βασισμένη σε πραγματικές μετρήσεις (Tsourlos, 1995).

Στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία λύνει τις διαφορικές εξισώσεις, που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή Γη. Κατά τη μέθοδο αυτή, το πεδίο χωρίζεται σε πεπερασμένο αριθμό κελιών, τα οποία αντιπροσωπεύουν διαφορετικές τιμές αντιστάσεων. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται από τη γραμμική σχέση :

$$F=K \cdot V \quad (4.12)$$

Όπου:

- K αποτελεί τον πίνακα δυσκαμψίας,
- V είναι ο πίνακας με τα άγνωστα δυναμικά των κόμβων και
- F είναι ο πίνακας με τις πηγές ρεύματος και τους όρους των ορίων.

4.4 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ

Αφότου, πραγματοποιηθεί η επίλυση του ευθέος προβλήματος, ακολουθεί η διαδικασία της αντιστροφής. Η μέθοδος αυτή, είναι το αντίστροφο του ευθέος προβλήματος, δηλαδή το ζητούμενο αποτελεί η κατανομή της αντίστασης, με δεδομένα τις υπάρχοντες μετρήσεις. Συγκεκριμένα, κύριος σκοπός της θεωρίας της αντιστροφής είναι ο υπολογισμός της κατανομής της αντίστασης, η οποία θα παράγει ένα μοντέλο μετρήσεων, το οποίο θα αντιπροσωπεύει τα πραγματικά δεδομένα.

Στην πράξη, υπάρχουν διάφορες τεχνικές επίλυσης του αντιστρόφου προβλήματος, για παράδειγμα η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Lines & Treitel, 1984), η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης (Marquadt, 1963), η μέθοδος των ιδιάζουσων τιμών (Lanczos, 1960, Lawson & Hanson, 1974) και η μέθοδος της εξομαλυμένης αντιστροφής Occam (Tikhonov 1963, Constable et al., 1987).

Ωστόσο, λόγω της μη γραμμικότητας του προβλήματος, δεν μπορεί να γίνει απευθείας η αντιστροφή με τον αντίστροφο μετασχηματισμό T^{-1} . Για αυτό, χρησιμοποιούνται οι σειρές Taylor, ώστε να επιτευχθεί γραμμικοποίηση, των μη γραμμικών συστημάτων. Έτσι, ορίζεται ένα αρχικό μοντέλο αντίστασης x_0 , το οποίο συνεχώς διορθώνεται, μέχρι τα συνθετικά δεδομένα να ταιριάζουν με τις πραγματικές μετρήσεις.

Το ανάπτυγμα Taylor ορίζεται ως εξής:

$$f(x_i + dx_i) = f(x_i) + \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} dx_i + O((dx_i)^2) \quad i=1,2,3 \dots N \quad (4.13)$$

Όπου, $O((dx_i)^2)$, αναπαριστά τους μεγαλύτερους σε σειρά όρους και στη συνέχεια παραλείπεται, καθώς η μεταβολή της αντίστασης dx είναι μικρή. Επομένως, προκύπτει ότι:

$$f(x+dx) = f(x) + J \cdot dx \quad (4.14)$$

$$f(x+dx) - f(x) = J \cdot dx \quad (4.15)$$

$$d(y) = J \cdot dx \quad (4.16)$$

Όπου:

- J ο Ιακωβιανός πίνακας $m \times n$ (πίνακας μερικών παραγώγων), και
- $f(x+dx)$ ισούται με τα συνθετικά δεδομένα,
- dy , η διαφορά των πραγματικών από τα συνθετικά δεδομένα.

Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζεται η μέθοδος της εξομαλυμένης αντιστροφής Occam (Constable et al., 1987), μέσω του λογισμικού DC_2DPro (Kim, 2010). Η γενική ιδέα αυτής της μεθόδου, είναι η εύρεση ενός απλοποιημένου μοντέλου, ώστε να ταιριάζει καλύτερα με τα δεδομένα. Η μέθοδος της εξομαλυμένης τεχνικής μπορεί να μην αποδίδει την καλύτερη λύση, παρ' όλα αυτά, το απλοποιημένο μοντέλο που παράγει, δίνει μια λογική και ρεαλιστική απεικόνιση του υπεδάφους. Η εξίσωση της μεθόδου Occam δίνεται ως εξής:

$$(J^T J + \mu C^T C) dx = J^T dy \quad (4.17)$$

Στη $k+1$ επανάληψη, το διάνυσμα των παραμέτρων dx_k προκύπτει από:

$$dx_k = (J_k^T J_k + \mu_k C^T C)^{-1} J_k^T dy_k \quad (4.18)$$

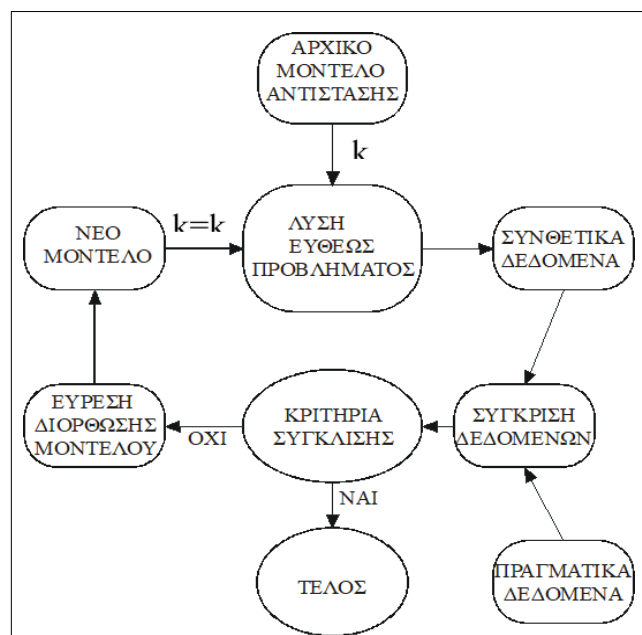
Ο υπολογισμός της νέας αντίστασης δίνεται από:

$$x_{k+1} = x_k + dx_k \quad (4.19)$$

Όπου :

- J ο Ιακωβιανός πίνακας $m \times n$ και J^T ο αντίστροφός του,
- C ο πίνακας εξομάλυνσης και C^T ο αντίστροφός του,
- μ ο πολλαπλασιαστής Lagrangian
- dy η διαφορά των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων.

Η διαδικασία της αντιστροφής Occam επαναλαμβάνεται συνεχώς, διορθώνοντας τη λύση, ώσπου να ικανοποιηθούν τα κριτήρια τερματισμού, δηλαδή είτε να έχει ολοκληρωθεί συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων, είτε όταν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) ελαχιστοποιείται και παραμένει αμετάβλητο.



Σχήμα 4.6 Επιγραμματικά τα βήματα για τη διαδικασία της αντιστροφής (Τσούρλος, 2020)

4.5 Ο ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ

Για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος της αντιστροφής, είναι αναγκαία η χρήση του Ιακωβιανού πίνακα. Ο Ιακωβιανός πίνακας συνδέει τις αλλαγές των παραμέτρων της κατανομής των αντιστάσεων με τις αλλαγές των μετρήσεων. Επίσης, είναι γνωστός και ως πίνακας ευαισθησίας, καθώς δείχνει την ευαισθησία των μετρήσεων της φαινόμενης αντίστασης, σε μικρές μεταβολές των παραμέτρων.

Πιο συγκεκριμένα, έστω m ο αριθμός των μετρήσεων, ενός διανύσματος d και n ο αριθμός των παραμέτρων, ενός διανύσματος p . Συνεπώς ορίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας $m \times n$, με στοιχεία i, j , ως:

$$J_{i,j} = \frac{\partial d_i}{\partial p_j} \quad (4.20)$$

Αν οι μετρήσεις αποτελούν φαινόμενες αντιστάσεις ρ_a , τότε η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως:

$$J_{i,j} = \frac{\partial \rho_{ai}}{\partial \rho_j} = -\frac{\partial \rho_{ai}}{\partial \sigma_j} = \frac{2\pi \partial \Delta V_i}{GI \partial \sigma_j} \quad (4.21)$$

Όπου :

- G είναι ο γεωμετρικός παράγοντας,
- ΔV η διαφορά δυναμικού,
- I η ένταση του ρεύματος,
- ρ_a η φαινόμενη αντίσταση,
- ρ αποτελεί η παράμετρος του μοντέλου και
- σ η αγωγιμότητα.

Ομοίως με την εξίσωση (4.21), ο Ιακωβιανός πίνακας $m \times n$ λύνεται ως εξής :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_1} & \frac{\partial \rho_{a1}}{\partial \rho_2} & \dots & \frac{\partial \rho_{a1}}{\partial \rho_n} \\ \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_a} & \frac{\partial \rho_{a2}}{\partial \rho_2} & \dots & \frac{\partial \rho_{a2}}{\partial \rho_n} \end{bmatrix} \quad \square = 2 \quad \square, \square \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho}{\partial \rho} & \frac{\partial \rho}{\partial \rho} & \dots & \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \\ \frac{\partial \rho}{\partial \rho} & \frac{\partial \rho}{\partial \rho} & \dots & \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \\ \frac{\partial \rho}{\partial \rho} & \frac{\partial \rho}{\partial \rho} & \dots & \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

4.6 ΜΕΣΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ (RMS)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διαδικασία της αντιστροφής αποσκοπεί στην εύρεση ενός μοντέλου κατά την οποία τα συνθετικά δεδομένα (φαινόμενη αντίσταση), θα ταιριάζουν με τις πραγματικές μετρήσεις. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS %) αποτελεί κριτήριο ποιότητας της λύσης, καθώς σε κάθε επανάληψη, συνήθως αυτό μειώνεται, υπολογίζοντας έτσι το βέλτιστο αντιπροσωπευτικό μοντέλο. Το σφάλμα (RMS %) δίνεται από την εξίσωση (Jupp and Vozoff, 1975):

$$RMS = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{d_{obs_i} - d_{calc_i}}{d_{obs_i}} \right)^2} \quad (4.23)$$

Όπου d_{obs} είναι τα πραγματικά δεδομένα, d_{calc} είναι τα συνθετικά δεδομένα και m ο αριθμός των δεδομένων.

Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία της αντιστροφής θα τερματιστεί όταν:

- Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των συνθετικών και των πραγματικών δεδομένων του αλγόριθμου αυξάνεται με κάθε επανάληψη (απόκλιση). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται, όταν υπάρχει αρκετός θόρυβος στα δεδομένα.
- Όταν σε κάθε επανάληψη το σφάλμα μειωθεί ελάχιστα ή καθόλου, ώστε να μην



υπάρχει περαιτέρω βελτίωση του μοντέλου και

- Όταν εκτελεστεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που έχει ορίσει ο χρήστης.

Για την εκτέλεση των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας, χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYSCAL PRO, της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS. Πρόκειται για ένα πολυκάναλο όργανο καταγραφής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, με μέγιστη τάση εξόδου 800 V και μέγιστο ρεύμα έντασης έως και 2.5 A. Το όργανο έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης 10 διαφορών δυναμικού, με ακρίβεια 0.2% και σφάλμα 1μV. Η τροφοδοσία του γίνεται μέσω μιας εσωτερικής μπαταρίας, αλλά συνδέεται και με εξωτερική μπαταρία 12 V. Επίσης, το όργανο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μετρήσεις της επαγόμενης πόλωσης (IP) (Iris Instruments).

Οι μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιούνται αυτόματα, αφού ο χρήστης καθορίσει τις παραμέτρους λειτουργίας του (μέγιστες τιμές ρεύματος ή διαφοράς δυναμικού, διάταξη της μέτρησης, πλήθος επαναλήψεων). Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν πολυκάναλα ηλεκτρόδια, υψηλής αντοχής και αγωγιμότητας. Το Syscal Pro διαθέτει ενσωματωμένο πολυπλέκτη που επιτρέπει τη σύνδεση 48 ηλεκτροδίων (1-24 και 25- 48). Οι μετρήσεις λαμβάνονται μέσω των ήδη υπαρχόντων πρωτοκόλλων του οργάνου που δημιουργούνται από το λογισμικό της IRIS INSTRUMENTS, το Electro Pro. Ακόμη, για την ακρίβεια των θέσεων μέτρησης, χρησιμοποιήθηκε σύστημα GPS χειρός.

Τα δεδομένα αποθηκεύονται στην εσωτερική μνήμη του οργάνου και στη συνέχεια μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, με το πρόγραμμα Prosys II. Το Prosys II, επιτρέπει στο χρήστη την μεταφορά, την επεξεργασία και την εξαγωγή των δεδομένων ηλεκτρικής αντίστασης, σε πρόγραμμα απεικόνισης 2D ή 3D (Iris Instruments). Το πρόγραμμα αυτό είναι το DC_2DPRO (Kim, 2010) και εφαρμόζει τη μέθοδο αντιστροφής των γεωηλεκτρικών δεδομένων.



Σχήμα 4.7 A) Το όργανο Syscal Pro της IRIS Instruments, B) Το όργανο Syscal Pro συνδεδεμένο με εξωτερική μπαταρία και με πολύκλιωνα καλώδια που περιέχουν τα ηλεκτρόδια, Γ) Πίσω όψη του οργάνου, όπου συνδέονται τα 48 ηλεκτρόδια.



Σχήμα 4.8 A), B) Ανάπτυγμα πολυκάναλων ηλεκτροδίων για τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, Γ) Ορισμός των παραμέτρων της μέτρησης, Δ) Μεταφορά των δεδομένων των μετρήσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

4.8 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Αφότου ολοκληρωθεί η διαδικασία των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας, τα δεδομένα μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του λογισμικού Prosys II. Στο πρόγραμμα αυτό, εμφανίζονται όλες οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας, μαζί με τις τιμές των παραμέτρων τους (Σχήμα 4.9) . Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι εξής παράμετροι:

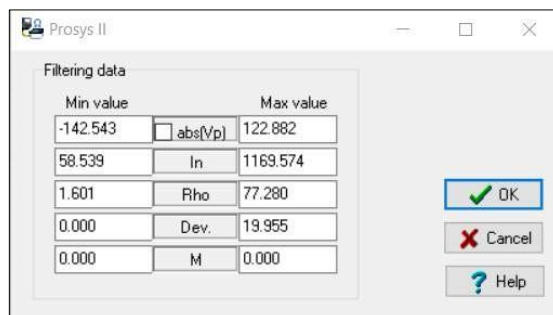
- Αριθμός μέτρησης σημείου,
- Διάταξη ηλεκτροδίων (Array),
- Παράμετροι απόστασης (Spa 1- 4, spacing parameters),
- Τιμή της αντίστασης (Rho, Ohm.m),
- Τυπική απόκλιση (Dev, %),
- Τιμή της πολικότητας (Sp, mV),
- Τιμή της διαφοράς δυναμικού (Vp, mV),
- Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος (In, mA).

#	Elarray	Spa.1	Spa.2	Spa.3	Spa.4	Rho	Dev	M	Sp	Vp	In
370	Dipole Dipole	360.00	420.00	540.00	600.00	21.25	0.17	0.00	31.62	-2.482	528.291
371	Dipole Dipole	390.00	420.00	450.00	480.00	13.91	0.06	0.00	4.18	-26.518	1079.346
372	Dipole Dipole	390.00	420.00	480.00	510.00	17.46	0.16	0.00	58.75	-8.322	1079.346
373	Dipole Dipole	390.00	420.00	510.00	540.00	19.86	0.03	0.00	58.85	-3.787	1079.346
374	Dipole Dipole	390.00	420.00	540.00	570.00	22.04	0.10	0.00	26.14	-2.102	1079.346
375	Dipole Dipole	390.00	420.00	570.00	600.00	24.53	0.13	0.00	5.68	-1.336	1079.346
376	Dipole Dipole	390.00	450.00	480.00	540.00	21.08	0.08	0.00	0.29	-85.088	923.647
377	Dipole Dipole	390.00	450.00	540.00	600.00	26.70	0.06	0.00	31.15	-9.990	923.647
378	Dipole Dipole	390.00	450.00	600.00	610.00	24.19	0.03	0.00	27.70	-22.862	923.647
379	Dipole Dipole	390.00	450.00	510.00	570.00	23.34	0.05	0.00	-32.64	-19.005	923.647
380	Dipole Dipole	420.00	450.00	480.00	510.00	21.43	0.06	0.00	57.37	-30.299	1010.501
381	Dipole Dipole	420.00	450.00	510.00	540.00	23.54	0.00	0.00	58.54	-10.516	1010.501
382	Dipole Dipole	420.00	450.00	540.00	570.00	26.97	0.49	0.00	26.06	-4.802	1010.501
383	Dipole Dipole	420.00	450.00	570.00	600.00	32.31	0.15	0.00	5.63	-2.887	1010.501
384	Dipole Dipole	420.00	480.00	510.00	570.00	35.45	0.06	0.00	-32.90	-40.535	886.505
385	Dipole Dipole	420.00	480.00	570.00	540.00	27.20	0.03	0.00	-25.89	-14.972	886.505
386	Dipole Dipole	420.00	480.00	540.00	600.00	28.96	0.06	0.00	31.37	-22.700	886.505
387	Dipole Dipole	450.00	480.00	510.00	540.00	41.32	0.03	0.00	-57.37	-58.322	790.084
388	Dipole Dipole	450.00	480.00	540.00	570.00	27.44	0.03	0.00	25.83	-9.683	790.084
389	Dipole Dipole	450.00	480.00	570.00	600.00	33.12	0.28	0.00	5.56	-4.675	790.084
390	Dipole Dipole	450.00	510.00	540.00	600.00	41.87	0.03	0.00	31.32	-14.492	122.529
391	Dipole Dipole	480.00	510.00	540.00	570.00	47.01	0.05	0.00	26.40	-45.687	776.653
392	Dipole Dipole	480.00	510.00	570.00	600.00	35.56	0.11	0.00	5.34	-12.215	776.653
393	Dipole Dipole	510.00	540.00	600.00	620.00	77.28	0.06	0.00	5.24	-14.695	107.528
394	Mixed / non converte...	0.00	90.00	30.00	80.00	13.32	0.33	0.00	-51.06	15.445	219.556
395	Mixed / non converte...	0.00	120.00	30.00	80.00	11.82	0.33	0.00	-50.26	16.407	392.345
396	Mixed / non converte...	0.00	120.00	60.00	90.00	13.95	4.29	0.00	445.65	19.396	392.345
397	Mixed / non converte...	0.00	150.00	30.00	80.00	11.44	0.74	0.00	-49.87	15.861	448.068
398	Mixed / non converte...	0.00	150.00	60.00	90.00	10.68	1.54	0.00	383.16	8.470	448.068
399	Mixed / non converte...	0.00	150.00	90.00	120.00	13.88	2.20	0.00	-1.01	19.250	448.068
400	Mixed / non converte...	0.00	180.00	30.00	80.00	10.71	0.42	0.00	50.70	-30.896	988.781
401	Mixed / non converte...	0.00	180.00	60.00	90.00	6.86	0.34	0.00	354.09	11.640	988.781
402	Mixed / non converte...	0.00	180.00	90.00	120.00	10.07	0.29	0.00	-9.26	13.201	988.781
403	Mixed / non converte...	0.00	180.00	120.00	150.00	17.16	0.31	0.00	-226.79	49.513	988.781
404	Mixed / non converte...	0.00	210.00	30.00	60.00	11.15	0.05	0.00	50.16	15.067	477.603
405	Mixed / non converte...	0.00	210.00	60.00	90.00	7.69	0.08	0.00	336.46	4.221	477.603
406	Mixed / non converte...	0.00	210.00	90.00	120.00	9.31	0.16	0.00	-8.47	2.933	477.603
407	Mixed / non converte...	0.00	210.00	120.00	150.00	16.20	0.37	0.00	-204.42	8.344	477.603
408	Mixed / non converte...	0.00	210.00	150.00	180.00	21.91	1.26	0.00	96.16	-29.471	477.603
409	Mixed / non converte...	0.00	240.00	30.00	60.00	11.01	0.41	0.00	49.66	18.435	502.253
410	Mixed / non converte...	0.00	240.00	60.00	90.00	7.46	1.61	0.00	319.61	4.725	502.253

Σχήμα 4.9 Αρχική εικόνα των μετρήσεων στο πρόγραμμα Prosys II.

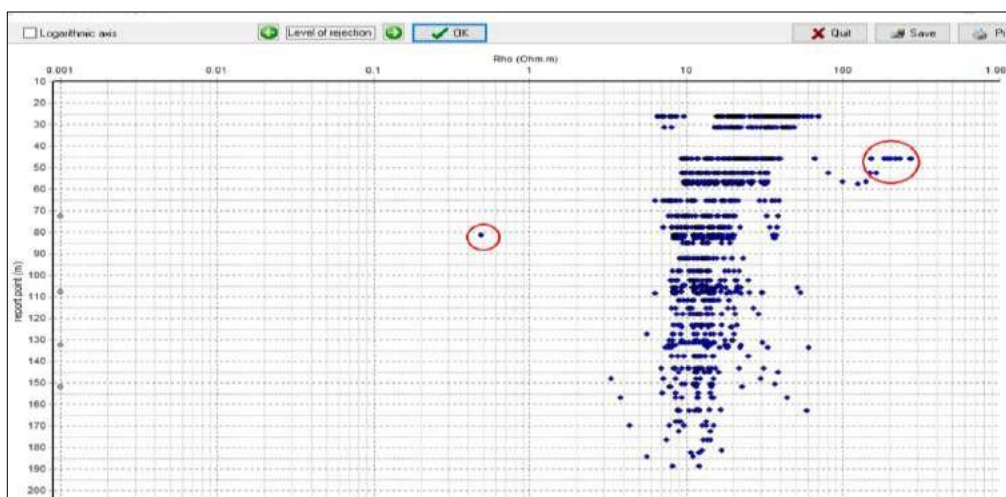
Στην αρχή, ο χρήστης πρέπει να ορίσει την ισοδιάσταση των ηλεκτροδίων που εφαρμόστηκε για κάθε ηλεκτρική τομογραφία, ώστε να υπολογιστεί ο γεωμετρικός

παράγοντας. Έπειτα, πραγματοποιείται αφαίρεση των τιμών (gapfillers) που προστέθηκαν κατά την πολυκάναλη μέτρηση. Ένας από τους τρόπους αφαίρεσης των ακραίων τιμών των μετρήσεων, είναι η εφαρμογή φίλτρου στις τιμές των παραμέτρων. Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να ορίσει το εύρος των τιμών που θεωρεί αποδεκτές στο δυναμικό (V_p), στην ένταση του ρεύματος (I_n), στην αντίσταση (Rho) και στην τυπική απόκλιση (Dev) (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10 Εφαρμογή φίλτρου στις παραμέτρους των μετρήσεων.

Ακόμη, το Prosys II έχει τη δυνατότητα να εμφανίζει σημειακά όλα τα δεδομένα της μέτρησης, σε ένα γράφημα διασποράς της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Αυτή η επιλογή φίλτρου, βασίζεται στην απόρριψη σημείων με ακραίες τιμές φαινομένων ειδικών αντιστάσεων (Σχήμα 4.11).

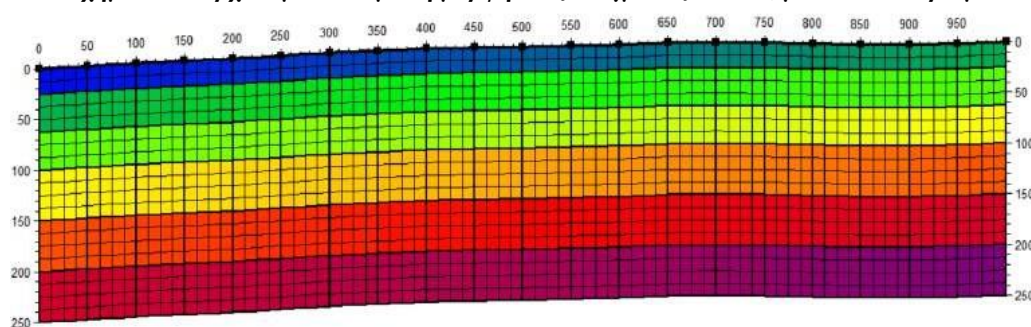


Σχήμα 4.11 Γράφημα των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και απόρριψη ακραίων τιμών.

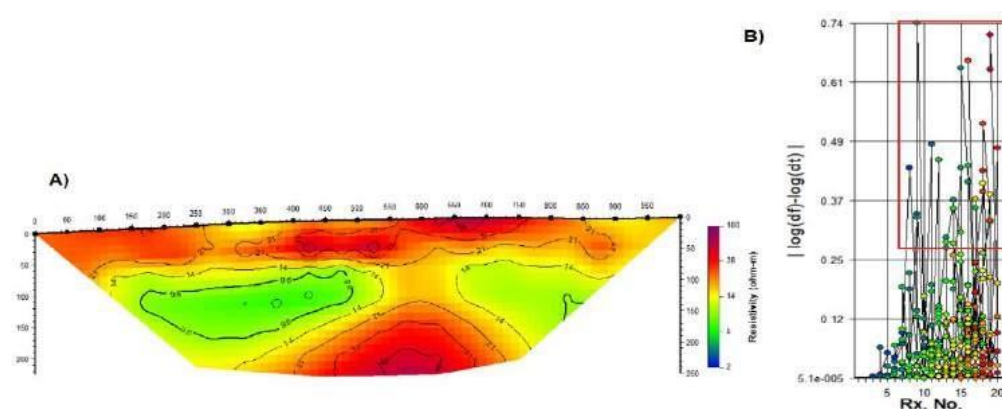
Όταν ολοκληρωθεί η επεξεργασία των μετρήσεων, τα δεδομένα μετατρέπονται και εξάγονται, από αρχεία της μορφής «bin» σε αρχεία «dat», με σκοπό την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα της μεθόδου αντιστροφής DC_2DPRO (Kim, 2010) του Κορεατικού Ινστιτούτου Γεωεπιστημών και Ορυκτών Πόρων.

Αρχικά, εισάγονται τα δεδομένα των μετρήσεων, της μορφής «dat» στο λογισμικό, μαζί με την τοπογραφία της περιοχής έρευνας. Κατά το πρώτο στάδιο, ορίζονται οι παράμετροι ενός αρχικού μοντέλου του υπεδάφους, δημιουργώντας έτσι ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων ή κελιών. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η διαδικασία της αντιστροφής με την εξομαλυνμένη μέθοδο Occam, η οποία χρησιμοποιεί έναν από τους κανόνες αντιστροφής γραμμικών συστημάτων L1 ή L2. Η αντιστροφή ολοκληρώνεται μετά τον καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων και λαμβάνεται το δισδιάστατο μοντέλο της κατανομής της αντίστασης. Με βάση το ποσοστό του τετραγωνικού σφάλματος (RMS), ελέγχεται αν είναι απαραίτητη η αφαίρεση ακραίων τιμών και η επανάληψη της μεθόδου αντιστροφής, για να ελαχιστοποιηθεί όσο γίνεται το σφάλμα του μοντέλου.

Σχήμα 4.12 Αρχικό μοντέλο με τη μορφή ενός πλέγματος κελιών, μετά το καθορισμό του



βάθους και την προσθήκη της τοπογραφίας.



Σχήμα 4.13 Α) Τελικό μοντέλο της κατανομής της αντίστασης, μετά τη μέθοδο αντιστροφής, Β) Αφαίρεση ακραίων τιμών του μοντέλου αντιστροφής.

5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ (TEM)

Η μέθοδος των παροδικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων ή κυματομορφών TEM (Transient Electromagnetic Method) ή TDEM (Time Domain), αποτελεί μία από τις νεότερες ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους γεωφυσικής έρευνας. Στόχος της είναι η χαρτογράφηση της αγωγιμότητας του υπεδάφους, μέσω των ιδιοτήτων του μετρούμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Οι πρώτες εφαρμογές της μεθόδου ήταν στη μεταλλευτική έρευνα το 1962, όπου έλαβαν χώρα με επιτυχία στην Κύπρο και στη Σοβιετική Ένωση (Κάρμης, 2003). Με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση της μεθόδου TEM είναι ευρέως διαδεδομένη στην υδρογεωλογική, περιβαλλοντική, γεωθερμική και γεωλογική έρευνα.

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι ταξινομούνται με βάση την καταγραφή των δεδομένων τους σε συνάρτηση με α) το χρόνο (TEM, Time Domain) ή β) με το πεδίο των συχνοτήτων τους (FEM, Frequency Domain).

Η αρχή των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης βασίζεται στις εξισώσεις του Maxwell για τον ηλεκτρομαγνητισμό. Σύμφωνα με την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, όταν ένα εξωτερικό μεταβαλλόμενο (πρωτεύον) μαγνητικό πεδίο εισχωρεί στο εσωτερικό του εδάφους, τα αγωγίμα σώματα που βρίσκονται εντός του πεδίου, διεγείρονται, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού επαγωγικού ρεύματος, αλλά και ενός δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου (Κάρμης, 2003). Συμπερασματικά, η ηλεκτρομαγνητική γεωφυσική μέθοδος στηρίζεται στην εύρεση της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης στα επιφανειακά στρώματα της Γης, με βάση τις ιδιότητες του δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

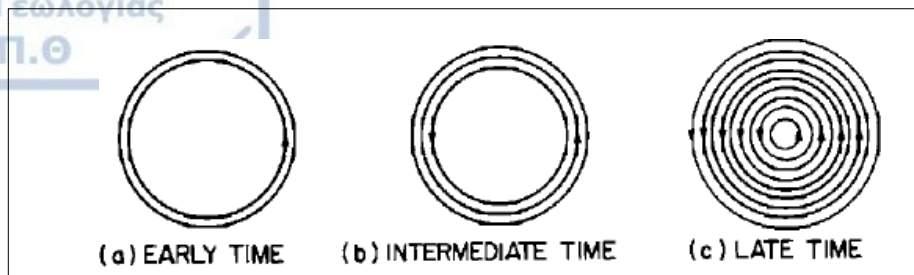
5.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ (TEM)

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος των παροδικών πεδίων, TEM ή TDEM, αποτελεί μέθοδο στο πεδίο του χρόνου και εφαρμόζεται με ένα σύστημα κυκλώματος τριών βρόχων, πομπός-αγωγός-δέκτης. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου TEM, αρχικά, διοχετεύεται μικρής διάρκειας παλμός συνεχούς ρεύματος σε έναν βρόχο εκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και έπειτα, πραγματοποιείται η απότομη διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος. Ο χρόνος μηδενισμού είναι γνωστός σαν ράμπα (delay time / ramp time) και η απόκριση του εδάφους καταγράφεται αμέσως μετά τη διακοπή του ρεύματος.

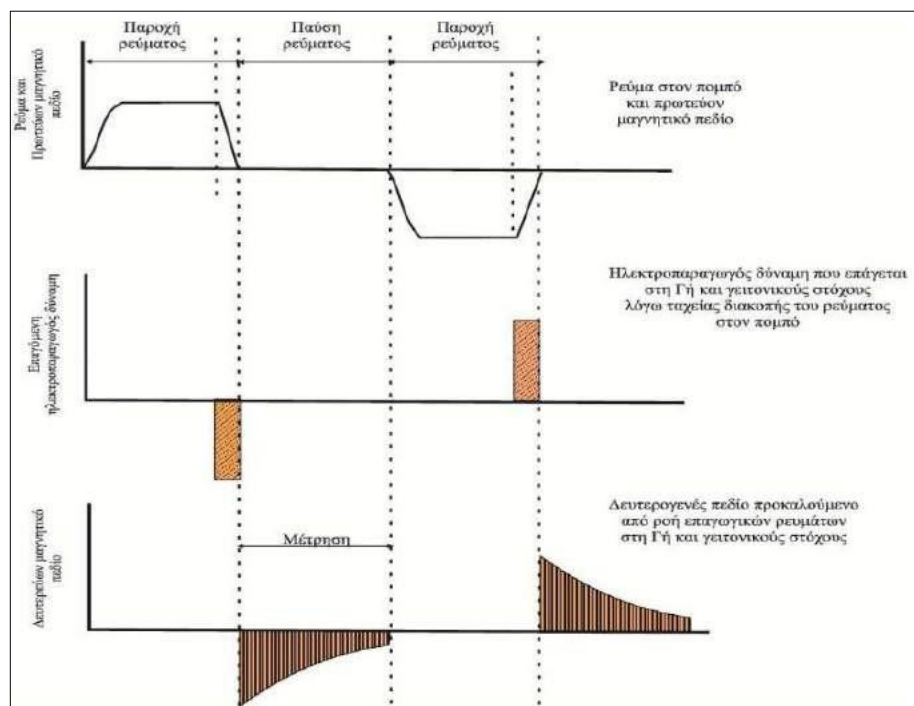
Στο στάδιο αυτό, η απότομη αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο του πομπού, παράγει επαγόμενα ρεύματα (eddy currents) στο αγωγίμο σώμα, τα οποία αρχικά εντοπίζονται στην επιφάνεια του (Grant & West, 1965, Nabighian & Macnae, 1991).

Στη συνέχεια, εξαιτίας των ωμικών απωλειών, τα επιφανειακά ρεύματα εξασθενούν. Παράλληλα, στο εσωτερικό του αγωγίμου σώματος παρατηρείται η μείωση του μαγνητικού πεδίου και η δημιουργία επαγωγικών ρευμάτων, τα οποία επάγουν με τη σειρά τους, δευτερογενές μαγνητικό πεδίο. Οι μεταβολές της τιμής του μαγνητικού πεδίου επάγουν δυναμικό στο πηνίο του δέκτη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται στα εσωτερικά σημεία του αγωγού και μπορεί να οριστεί ως διάχυση του ρεύματος (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013, Nabighian & Macnae, 1991). Η διάχυση έχει ως αποτέλεσμα τη διείσδυση των επαγωγικών ρευμάτων σε βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους και την σταδιακή εξασθένισή τους με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της διακριτικής ικανότητας. Στο τελικό στάδιο, η κατανομή των επαγόμενων ρευμάτων είναι σχεδόν αμετάβλητη με τον χρόνο και παρατηρείται μόνο η μείωση του πλάτους.

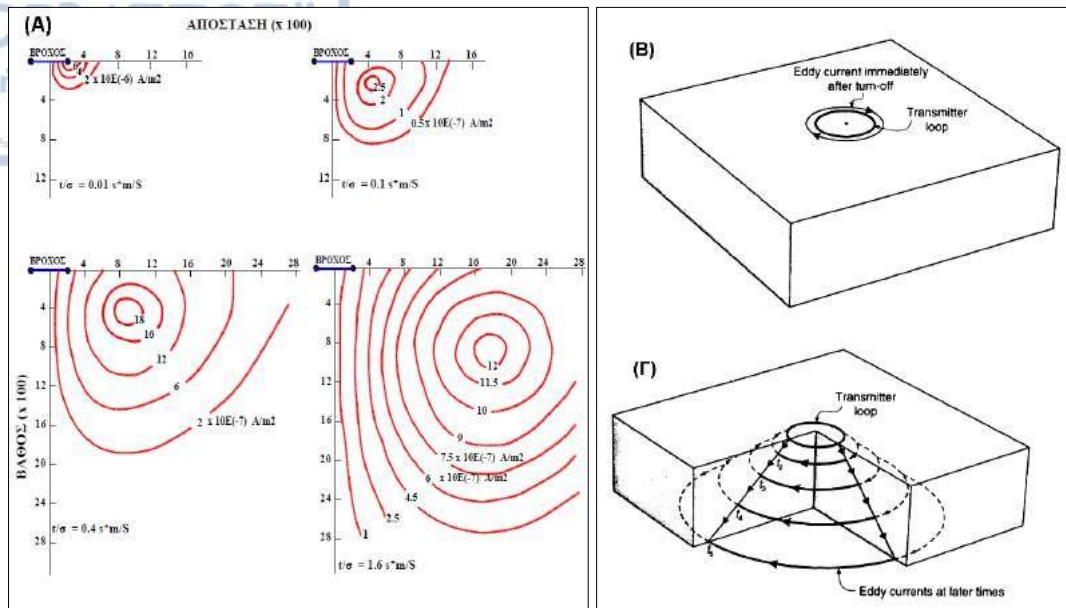
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μεθόδου TEM, έχουν τη μορφή καμπύλης του μετρούμενου δυναμικού συναρτήσει του χρόνου, η οποία ονομάζεται αλλιώς καμπύλη απόσβεσης (decay curve). Η κατανομή και η ένταση των επαγόμενων ρευμάτων του υπεδάφους, εξαρτώνται από την ειδική αντίσταση (Κάρμης, 2003). Για αυτό τον λόγο, τα δεδομένα μετατρέπονται σε τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης με τη διαδικασία της αντιστροφής και απεικονίζονται σε σχέση με το βάθος.



Σχήμα 5.1 Σχηματική απεικόνιση των επαγόμενων ρευμάτων στον αγωγό με βάση τα διάφορα στάδια του χρόνου, αμέσως μετά τη διακοπή του ρεύματος. (Nabighian & Macnae, 1991).



Σχήμα 5.2 Βασικές αρχές της μεθόδου TEM (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013).



Σχήμα 5.3 Α) Ισοδυναμικές καμπύλες των επαγωγικών ρευμάτων (smoke rings) για διάφορους χρόνους (Κάρμης 2003). Β) Αρχικά απεικονίζεται η παραγωγή επαγωγικών ρευμάτων (eddy currents) μετά τη διακοπή του ρεύματος, στο στάδιο του αρχικού χρόνου και στη συνέχεια Γ) η διάχυση των επαγωγικών ρευμάτων.

5.2 ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ - ΕΠΙΔΕΡΜΙΚΟ ΒΑΘΟΣ

Κατά την εφαρμογή των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων βασικό ρόλο κατέχει το βάθος διασκόπησης της γεωφυσικής έρευνας. Το βάθος έρευνας εξαρτάται από διάφορους στοιχεία, όπως τον τρόπο διεξαγωγής της μέτρησης και τις γεωηλεκτρικές ιδιότητες του υπεδάφους.

Το επιδερμικό βάθος για τις μεθόδους στο πεδίο του χρόνου, δηλαδή τη μέθοδο των παροδικών πεδίων (TEM), ορίζεται ως (Nabighian & McNae, 1991):

$$\delta = \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}} \quad (5.17)$$

όπου το επιδερμικό βάθος δ είναι ανάλογο του μήκους διάχυσης των επαγωγικών ρευμάτων. Με άλλα λόγια δίνει την απόσταση στην οποία διαχέεται το πεδίο σε χρόνο t , σε μέσο αγωγιμότητας σ και σε μαγνητική επιδεκτικότητα μ (Κάρμης, 2003).

Ακόμη, οι Spies & Frischknecht (1991) διατύπωσαν τον παρακάτω τύπο, για την εκτίμηση του βάθους διασκόπησης d στη μέθοδο των παροδικών πεδίων:

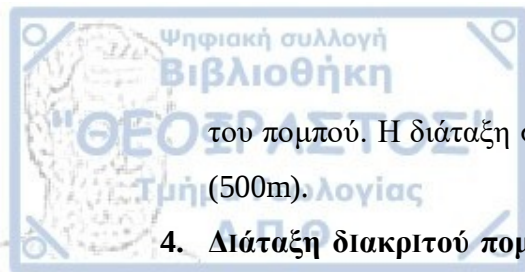
$$d \approx 0.5 \left(\frac{IA}{\sigma \eta_v} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (5.18)$$

όπου I το ρεύμα εκπομπής, A το εμβαδόν του βρόχου, σ η αγωγιμότητα του υπερκείμενου στρώματος και η_v το μικρότερο δυνατό σήμα που είναι δυνατό να μετρηθεί πάνω από το επίπεδο θορύβου (Κάρμης, 2003). Οι τιμές που παίρνει το η_v , είναι ίσες με 50 nV/m^2 , αλλά γενικά εξαρτώνται από την ακρίβεια του εκάστοτε οργάνου μέτρησης.

5.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις της μεθόδου των παροδικών πεδίων πραγματοποιούνται με διάφορους τρόπους, οι οποίοι καθορίζονται σύμφωνα με το αντικείμενο της έρευνας. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιούνται τετράγωνοι βρόχοι ως πομποί ή δέκτες, και ανάλογα με τη γεωμετρία πομπού-δέκτη, διαμορφώνεται η κάθε διάταξη. Οι συνηθέστερες διατάξεις που εφαρμόζονται είναι:

1. **Διάταξη ίδιου βρόχου (Single loop, Coincident Loop).** Η διάταξη αυτή συγκροτείται από έναν βρόχο, ο οποίος λειτουργεί ως πομπός και δέκτης. Όσο το ρεύμα διαρρέεται στο κύκλωμα, ο βρόχος έχει το ρόλο του πομπού. Όταν το ρεύμα διακοπεί, ο βρόχος συνδέεται στο δέκτη και οι μετρήσεις λαμβάνονται όσο ο πομπός είναι κλειστός.
2. **Διάταξη κεντρικού βρόχου (In loop, Central Loop).** Η διάταξη αυτή αποτελεί μία διαφορετική εκδοχή της προηγούμενης. Ο πομπός είναι και σε αυτή την περίπτωση ο τετράγωνος βρόχος, ενώ σαν δέκτης χρησιμοποιείται πηνίο που τοποθετείται στο κέντρο του βρόχου εκπομπής (Κάρμης, 2003).
3. **Διάταξη σταθερού βρόχου (Large Fixed Transmitter).** Σε αυτή τη διάταξη χρησιμοποιείται ένας σταθερός, μεγάλων διαστάσεων πομπός-βρόχος και ένας μικρότερος δέκτης-βρόχος, ο οποίος μετακινείται παράλληλα προς τη μία πλευρά

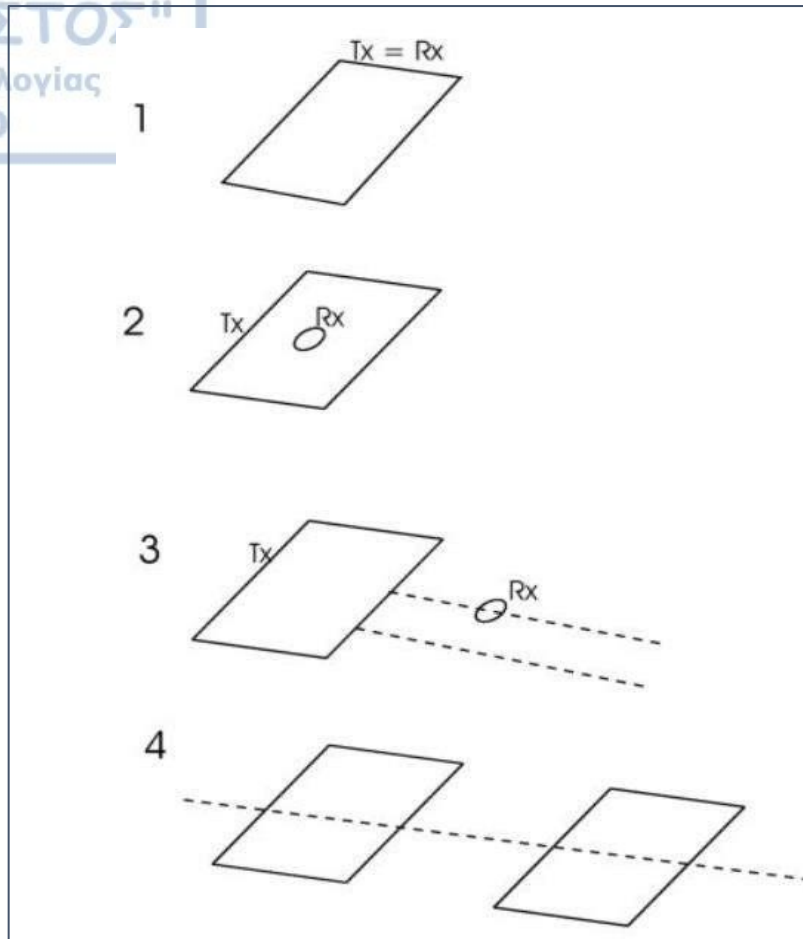


του πομπού. Η διάταξη σταθερού πομπού εφαρμόζεται για μεγάλα βάθη έρευνας (500m).

4. Διάταξη διακριτού πομπού-δέκτη (Τύπου Slingram, Separated Transmitter-Receiver Loop). Η διάταξη τύπου Slingram εφαρμόζεται κυρίως στις μεθόδους του πεδίου συχνοτήτων. Απαρτίζεται από δύο βρόχους ίδιων διαστάσεων που λειτουργούν ως πομπός και δέκτης αντίστοιχα και βρίσκονται σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους.

Η μέθοδος TEM μπορεί να εφαρμοσθεί και σε εναέριες έρευνες, καλύπτοντας πολύ μεγάλη έκταση σε μικρό χρονικό διάστημα (Smith & Keating, 1996).

Σε κάθε γεωφυσική έρευνα TEM, πρώτα πραγματοποιείται ο σχεδιασμός της, δηλαδή η επιλογή της διάταξης και το μέγεθος των βρόχων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Αυτά εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του πιθανού στόχου, το βάθος στο οποίο βρίσκεται, τη μορφολογία του εδάφους αλλά και τη γεωλογία της περιοχής.

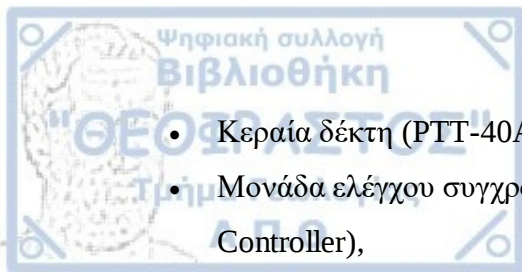


Σχήμα 5.4 Διατάξεις μετρήσεων TEM, 1) Ίδιον βρόχου, 2) Κεντρικού βρόχου, 3) Σταθερού βρόχου, 4) Διακριτού πομπού-δέκτη (Κάρμης, 2003).

5.4 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ (TEM)

Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το σύστημα WTEM-2 για μέτρια έως μεγάλα βάθη έρευνας και είναι κατασκευής της εταιρείας LANGEО/BTSK. Αποτελείται από:

- Πομπό (WTEM-2D 15KWTEM Transmitter),
- Δέκτη (WTEM-2J TEM Receiver),
- Φορητό υπολογιστή τάμπλετ (tablet), με σκοπό να ελέγχει το σύστημα TEM πομπού-δέκτη,



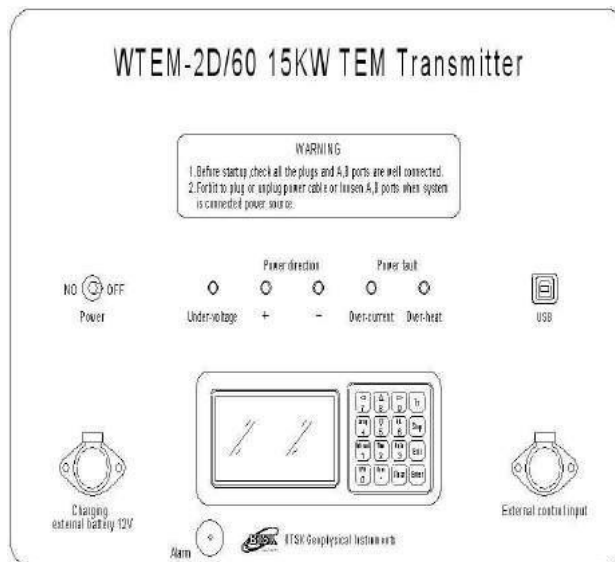
- Κεραία δέκτη (PTT-40A Antenna & Adapter) ,
- Μονάδα ελέγχου συγχρονισμού GPS του πομπού (WTEM-2T/GPS Synchronized Controllor),
- Εξωτερικές μπαταρίες 12V.

Για τη σωστή λειτουργία του συστήματος, ο πομπός πρέπει να συγχρονιστεί με τον δέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μονάδα ελέγχου συγχρονισμού GPS, η οποία συγχρονίζει τον πομπό και τον δέκτη με δορυφορικό σήμα (GPS Satellite Signal), μέσω κεραίας GPS (GPS antenna cable).

Επίσης, το όργανο WTEM-2 υποστηρίζει τρεις διατάξεις των μετρήσεων TEM, τη διάταξη κεντρικού βρόχου (Central, Coincident loop), τη διάταξη διακριτού πομπού-δέκτη (Τύπου Slingram) και τη διάταξη σταθερού βρόχου (Large Fixed Transmitter) (BTSK Geophysical Instruments).

Τα κύρια χαρακτηριστικά του πομπού είναι:

- Μέγιστη τάση ρεύματος 250V,
- Μέγιστη ένταση ρεύματος 60A,
- Ακρίβεια μέτρηση ρεύματος: Το εύρος του ρεύματος πριν τη διακοπή του είναι 0-60A και η απεικόνιση της ανάλυσης 0.01A,
- Συχνότητες πομπού: 0.0625Hz, 0.125Hz, 0.25Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 4Hz, 8Hz, 16Hz, 32Hz,
- Χρόνος καθυστέρησης ράμπας ή διακοπή του ρεύματος (turn off delay time): 1μs~1000μs,
- Χρόνος ράμπας ή διακοπή του ρεύματος: $\leq 160\text{ns}$,
- Μέγεθος βρόχου 100m x 100m, 2000m x 2000m,
- Τρόπος συγχρονισμού: είτε εξωτερικός (με κεραία, GPS) είτε μέσω καλωδίου που συνδέει τον πομπό με τον δέκτη.



Σχήμα 5.5 Ο πομπός του συστήματος WTEM-2(BTSK Geophysical Instruments) .

Παράλληλα, τα κύρια χαρακτηριστικά του δέκτη είναι:

- Αριθμός καναλιών: 1,
- Προ-ενίσχυση (Pre-amplification gain): 8 ή 32 φορές,
- Ελάχιστο διάστημα δειγματοληψίας 1μs,
- Μέγιστος αριθμός δειγμάτων 128,
- Μέγιστος αριθμός σώρευσης 9999.



Σχήμα 5.6 Ο δέκτης του συστήματος WTEM-2 (BTSK Geophysical Instruments).

Η μονάδα ελέγχου συγχρονισμού GPS του δέκτη έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Υποστηρίζει συχνότητες: 0.0625Hz, 0.125Hz, 0.25Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 4Hz, 8Hz, 16Hz, 32Hz,
- Μέγιστοι διαθέσιμοι δορυφόροι 12,
- Χρόνος συγχρονισμού έως και 40 s,
- Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας 170 mA.



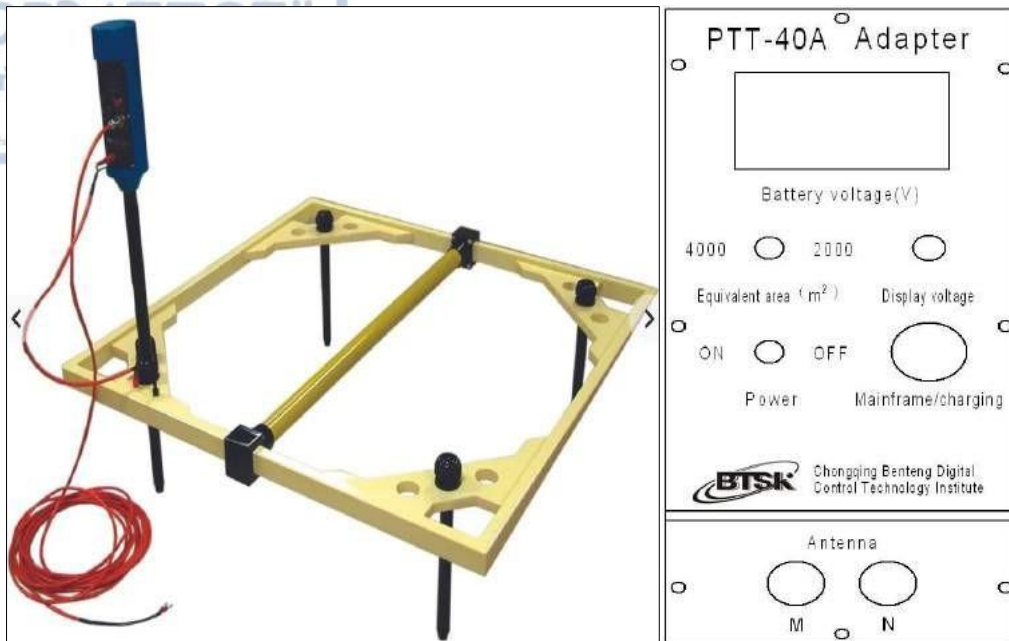
Σχήμα 5.7 Η μονάδα ελέγχου συγχρονισμού GPS του δέκτη (BTSK Geophysical Instruments).



Σχήμα 5.8 Σύνδεση του πομπού με τη μονάδα συγχρονισμού του GPS.

Η κεραία του δέκτη έχει τα παρακάτω γνωρίσματα:

- Δυνατότητα σήματος για περιοχή 2000 m² ή 4000 m²,
- Θόρυβος 10 nV/m²,
- Εύρος συχνότητας 100 kHz,



Σχήμα 5.9 Η κεραία του δέκτη και ο αντάπτορας του συστήματος WTEM-2(BTSK Geophysical Instruments) .



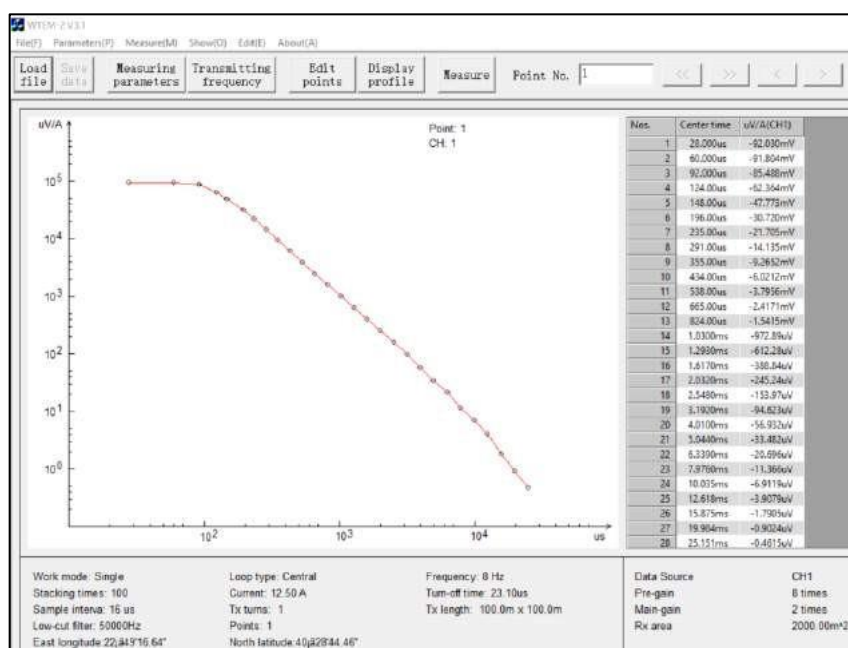
Σχήμα 5.10 Σύνδεση του δέκτη με την κεραία.

Μόλις συνδεθεί ο πομπός με τον δέκτη και όλες οι συνδέσεις του συστήματος είναι σωστές, πραγματοποιείται σύνδεση του Bluetooth του οργάνου με το φορητό τάμπλετ. Με αυτό τον τρόπο όλες οι διεργασίες πραγματοποιούνται αυτόματα στον υπολογιστή και μεταφέρονται στο όργανο. Στη συνέχεια, γίνεται εκκίνηση του προγράμματος

WTEM-2 (Σχήμα 5.12), όπου αρχικά ο χρήστης ορίζει τις παραμέτρους της γραμμής μέτρησης, του πομπού και του δέκτη (Line Parameters, Tx parameters, Rx parameters) (BTSK Geophysical Instruments).



Σχήμα 5.11 Ο δέκτης σε συνδυασμό με το φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή, πριν τη διεξαγωγή των μετρήσεων.



Σχήμα 5.12 Απεικόνιση των δεδομένων με τη μορφή καμπύλης του μετρούμενου δυναμικού ως προς το χρόνο, στο πρόγραμμα WTEM-2.

Επειτα, ο χρήστης ρυθμίζει τη συχνότητα εκπομπής. Η επιλογή της συχνότητας στο πρόγραμμα, πρέπει να είναι σε συμφωνία με τη συχνότητα του πομπού. Προτού αρχίσει η μέτρηση του οργάνου, απαιτείται να είναι γνωστή η τιμή του ρεύματος εκπομπής και ο χρόνος μηδενισμού του ρεύματος (delay time). Όταν το όργανο λειτουργεί με εσωτερικό συγχρονισμό (καλώδιο), τα παραπάνω ενημερώνονται αυτόματα στο λογισμικό. Στην περίπτωση, με διαμόρφωση λειτουργίας ξεχωριστού πομπού-δέκτη (συγχρονισμός με GPS), τα στοιχεία αυτά διαβάζονται στον πομπό και εισάγονται χειροκίνητα από τον χειριστή στο λογισμικό.

Τέλος, τα δεδομένα λαμβάνονται στον φορητό υπολογιστή με τη μορφή καμπύλης και απεικονίζονται με τις τιμές του μετρούμενου δυναμικού ($\mu\text{V}/\text{A}$) ¹ ως προς τον χρόνο (usec) (BTSK Geophysical Instruments).

WTEM-2

Line parameters | Tx parameters | Rx parameters

Browse C:\Users\virgi\Desktop\TEM_MASTER\ARXEIA_DAT_USF\1st_DAY_LINE\

Line name: Ag5_a20 Work mode: ☒ Single ☐ Continuous

Time zone: (GMT+08)Beijing, Chongqi Point No.: 1

COM port: COM6 Spacing on point: 1

Loop type: Central Altitude(m): 10

Note: The line name is name of the saved file.

OK

Σχήμα 5.13 Προσδιορισμός των παραμέτρων της γραμμής μέτρησης στο πρόγραμμα WTEM-2.

¹ $\mu\text{V}=\mu\text{V}$, $\text{usec}=\mu\text{sec}$

Σχήμα 5.14 Προσδιορισμός των παραμέτρων του πομπού στο πρόγραμμα WTEM-2.

Σχήμα 5.15 Προσδιορισμός των παραμέτρων του δέκτη στο πρόγραμμα WTEM-2.

5.5 ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ TEM

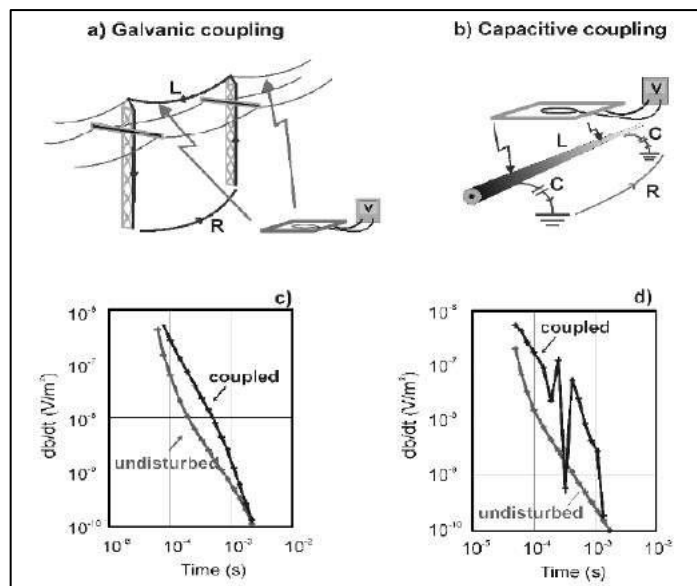
Κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου TEM, μπορεί να προκληθούν σφάλματα στα δεδομένα. Οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων αποτελούν:

α) Γεωμετρικές πηγές σφαλμάτων. Στην κατηγορία αυτή τα δεδομένα παρουσιάζουν σφάλματα, λόγω της γεωμετρίας των θέσεων πομπού και δέκτη και της επίδρασης της τοπογραφίας του εδάφους. Ωστόσο, οι περισσότερες διατάξεις TEM, δεν επηρεάζονται από τη γεωμετρία τους, με αποτέλεσμα τα λάθη να είναι αμελητέα. Όσον αφορά την τοπογραφία, στην περίπτωση αντιστατικού σώματος, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η θέση μέτρησης κάθε σταθμού και τα επαγωγικά ρεύματα που προκαλούνται. Αντίθετα, όταν υπάρχει αγώγιμος σχηματισμός, μπορεί να δημιουργήσει σημαντικά σφάλματα στις μετρήσεις, τα οποία μπορούν να διορθωθούν μόνο αν είναι γνωστή η γεωμετρία των επαγωγικών ρευμάτων (Nabighian & Macnae, 1991).

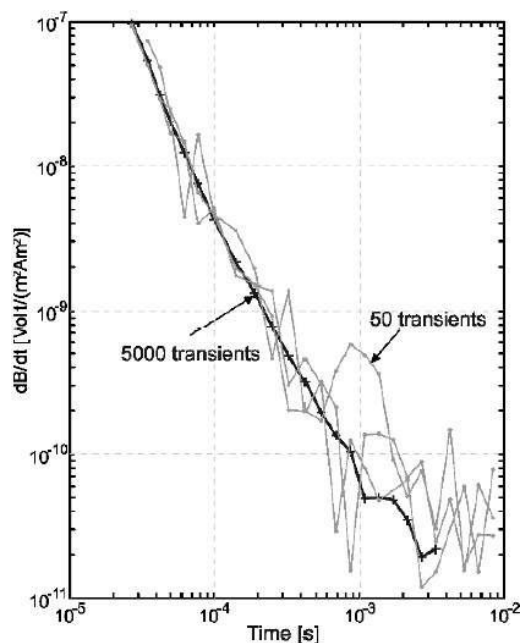
β) Ανθρωπογενείς πηγές σφαλμάτων. Κύρια αιτία των σφαλμάτων αυτών, αποτελεί ο θόρυβος, που προκαλείται από την ύπαρξη υπόγειων μεταλλικών αγωγών, γραμμές ρεύματος, μεταλλικοί φράχτες, καλώδια της ΔΕΗ κτλπ., καθώς έχουν τη δυνατότητα να διοχετεύουν ρεύμα στα γειτονικά πετρώματα. Η επίδραση των ανθρωπογενών πηγών, συνήθως δημιουργεί ισχυρές ανωμαλίες στα δεδομένα (Εικ.43) και μειώνεται με την απόσταση ($1/r$). Ενδεικτική απόσταση από υπόγεια και υπέργεια καλώδια είναι μεγαλύτερη των 150m και για γραμμές μεταφοράς ρεύματος μεγαλύτερη των 300m (Nabighian & Macnae, 1991).

γ) Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος. Ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος οφείλεται σε γεωμαγνητικά σήματα εντός και πάνω από την ιονόσφαιρα, με συχνότητες μικρότερες των 1Hz. Στα 6-10Hz προκαλείται θόρυβος από τις εκκενώσεις κεραυνών που αποτελούν φυσικά παροδικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Σε υψηλότερες συχνότητες ο θόρυβος προέρχεται από τις γραμμές κατανομής του ηλεκτρικού ρεύματος (50-60Hz), ανάλογα με το σύστημα μετάδοσης της κάθε χώρας και από τους σταθμούς VLF (10-25Hz). Σε εναέριες έρευνες ή σε ανοιχτούς χώρους επιδρά ο θόρυβος εξαιτίας του αέρα, που προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο της Γης (Nabighian & Macnae, 1991).

Κατά συνέπεια, τα συστήματα TEM εκπέμπουν επαναλαμβανόμενο σήμα και χρησιμοποιούν τη σόρευση (stacking), για να μειώνεται με κάθε μέτρηση η επίδραση του θορύβου και να αυξάνεται ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο.



Σχήμα 5.16 Γραφική απεικόνιση θορύβου από α) καλώδια ρεύματος, β) θαμμένα καλώδια και η αποτύπωση τους αντίστοιχα στα δεδομένα c) και d) (Reinhard Kirsch, 2006).

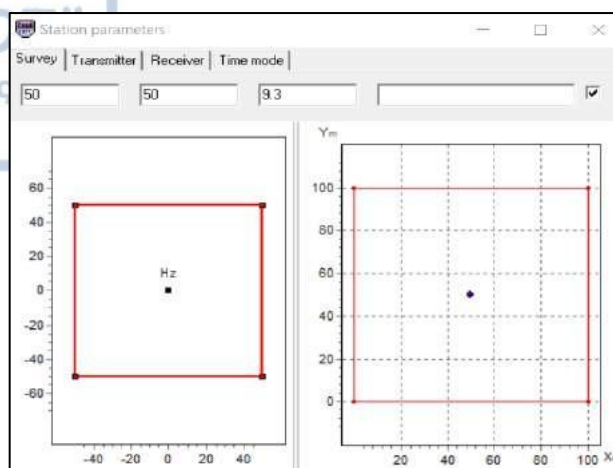


Σχήμα 5.17 Δεδομένα TEM με τη μορφή καμπύλων απόσβεσης, με τη χρήση σόρευσης (stacking) 50 εκπομπών σημάτων και 5000 (Reinhard Kirsch, 2006).

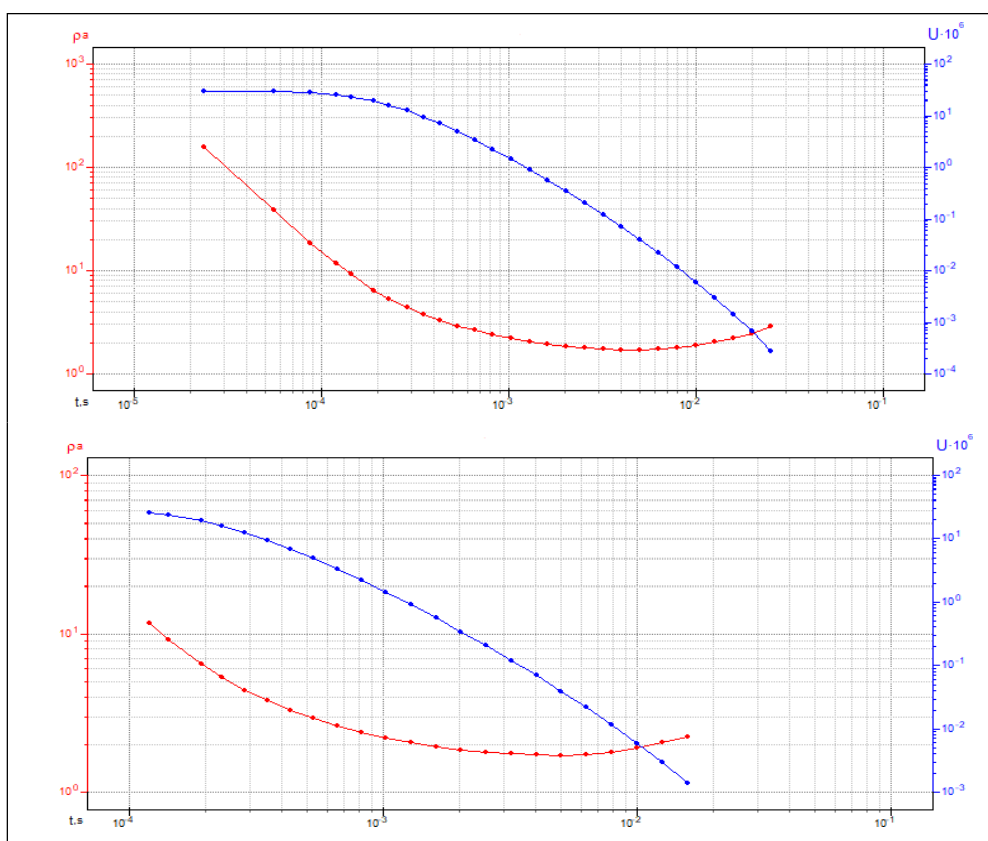
5.6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ TEM

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων TEM, τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα ZondTEM1D. Το πρόγραμμα αυτό είναι σχεδιασμένο για τη μονοδιάστατη (1D) ερμηνεία, πολλαπλών σταθμών, της μεθόδου των παροδικών πεδίων (TEM) αλλά και για μετρήσεις στο πεδίο των συχνοτήτων (frequency domain). Το πρόγραμμα υποστηρίζει όλες τις παραδοσιακές διατάξεις μετρήσεων (Single loop, Coincident loop, Central loop, In loop, Fixed loop). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί τα δεδομένα που έχουν ληφθεί, να αφαιρέσει εσφαλμένες τιμές που θεωρεί ότι έχουν επηρεαστεί από θόρυβο, να εισάγει παραμέτρους και στο τέλος, με τη διαδικασία της αντιστροφής, να παράγει τη στρωματογραφική γεωηλεκτρική ερμηνεία (αριθμός στρωμάτων, πάχος και ειδική ηλεκτρική αντίσταση κάθε στρώματος), η οποία στη συνέχεια μπορεί να ερμηνευτεί με γεωλογικά κριτήρια.

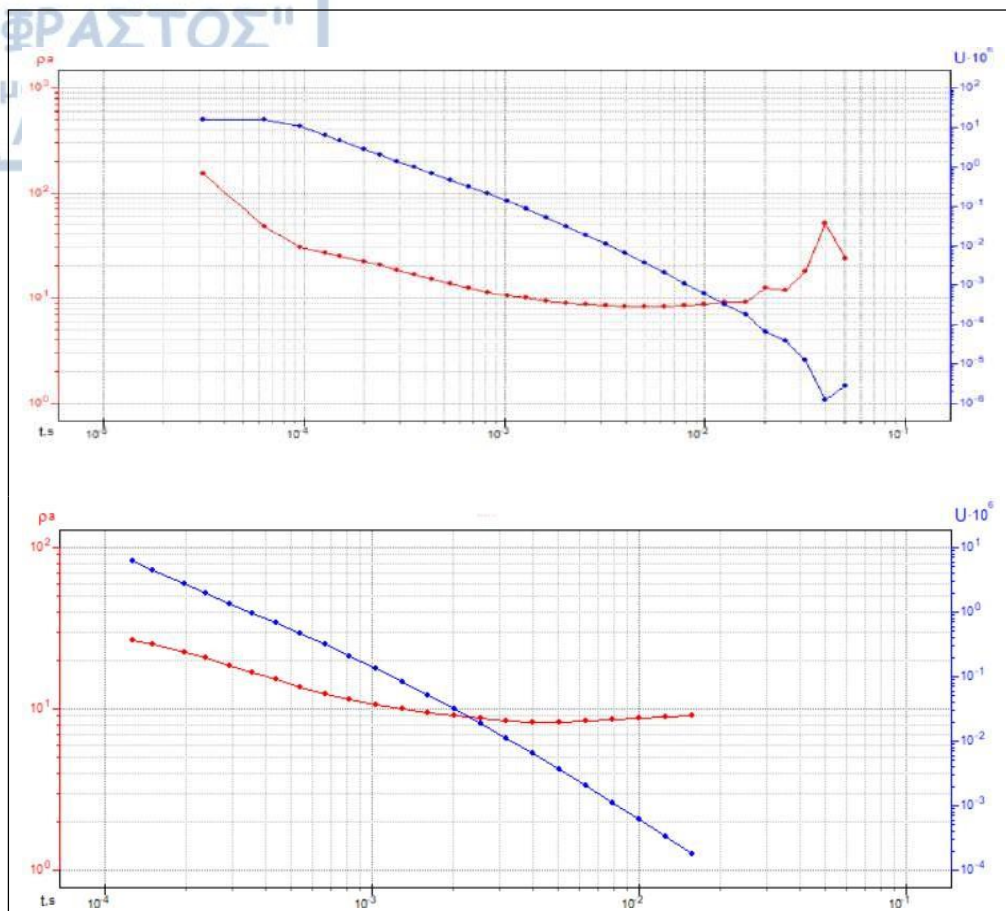
Αρχικά, τα δεδομένα εξάγονται από το πρόγραμμα WTEM του οργάνου, σε αρχεία της μορφής USF, ώστε να μπορέσουν να διαβαστούν από το πρόγραμμα ZondTEM1D. Αφού, εισαχθούν οι μετρήσεις TEM, αυτές με τη σειρά τους εμφανίζονται ως γραφήματα του μετρούμενου δυναμικού σε σχέση με τον χρόνο, στο παράθυρο επεξεργασίας δεδομένων (Data editor, Editing style). Στο στάδιο αυτό, ο χρήστης ρυθμίζει τις παραμέτρους των σταθμών, του πομπού, του δέκτη και του σήματος (Σχήμα 5.18). Έπειτα, πραγματοποιείται η επεξεργασία των καμπυλών του γραφήματος, με τη μπλε, να απεικονίζει την απόσβεση του δυναμικού (V) με τον χρόνο (t), και την κόκκινη, την κατανομή της αντίστοιχης φαινόμενης ειδικής αντίστασης (ρ_a) με τον χρόνο (Σχήμα 5.19, 5.20). Τα σημεία της καμπύλης μπορούν να χαρακτηριστούν με βαθμό βαρύτητας ως προς την ποιότητά τους (καλή, κακή και πολύ κακή), ώστε να συμμετέχουν στη διαδικασία της αντιστροφής με το ανάλογο βάρος. Ακόμη, ο χρήστης μπορεί να διαγράψει σημεία της καμπύλης, τα οποία θεωρεί εσφαλμένα. Ο βαθμός βαρύτητας στα σημεία των μετρήσεων, παίζει σημαντικό ρόλο στις παραμέτρους του μοντέλου αντιστροφής (Zond geophysical software).



Σχήμα 5.18 Επεξεργασία των παραμέτρων των σταθμών των μετρήσεων TEM.



Σχήμα 5.19 Α) Αρχική μορφή των καμπύλων του μετρούμενου δυναμικού (U) και της φαινόμενης ειδικής αντίστασης (ρ_a) σε συνάρτηση με τον χρόνο (t), Β) Οι καμπύλες των μετρήσεων TEM μετά την αφαίρεση λανθασμένων σημείων.

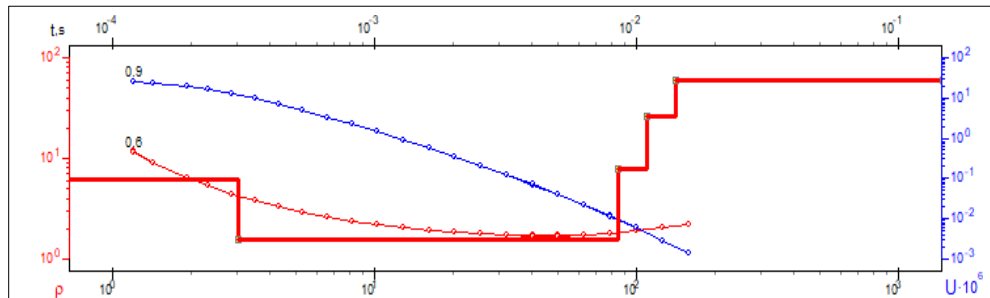


Σχήμα 5.20 Α) Αρχική μορφή των καμπύλων του μετρούμενου δυναμικού (U) και της φαινόμενης ειδικής αντίστασης (ρ_a) σε συνάρτηση με τον χρόνο (t), με θόρυβο σε συχνότητα 4 Hz Β) Οι καμπύλες των μετρήσεων TEM μετά την αφαίρεση του θορύβου.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η μέθοδος της αντιστροφής κατά την οποία τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο κεντρικό παράθυρο του προγράμματος (Interpretation style, Vision style), ως:

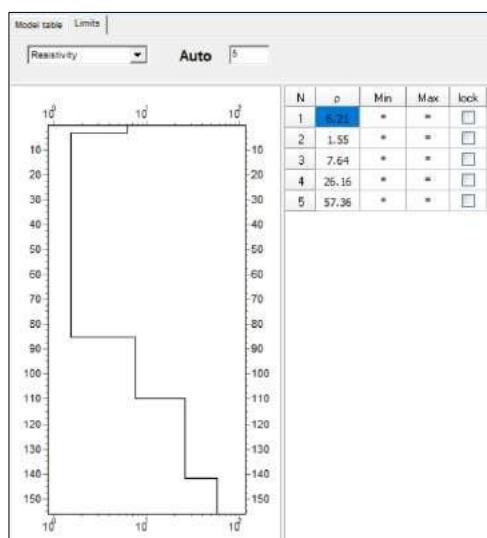
- Παράθυρο του μοντέλου αντιστροφής (Model Editor) που δείχνει τόσο τα αρχικά δεδομένα του δυναμικού και των φαινόμενων αντιστάσεων ως μπλε και κόκκινα σημεία (κύκλοι) και τις αντίστοιχες συνθετικές μετρήσεις του τελικού ηλεκτρικού μοντέλου ως καμπύλες δυναμικού (μπλε δεξιός άξονας) και φαινόμενης αντίστασης (κόκκινος αριστερός άξονας). Παράλληλα με συνεχή κόκκινη παχιά γραμμή αποτυπώνεται γραφικά η λύση της αντιστροφής (στρώματα, πάχη και ηλεκτρικές αντιστάσεις), καθώς ο κάτω οριζόντιος άξονας αποτελεί το βάθος του υπολογισμένου μοντέλου. Τα νούμερα που αναγράφονται πάνω στις καμπύλες, παρουσιάζουν, για κάθε μία, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) (Σχήμα 5.21).

- Πίνακα των παραμέτρων του μοντέλου (Model Table). Ο πίνακας ως επικεφαλίδα δείχνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων. Ακολουθεί ο πίνακας με τον αριθμό των στρωμάτων (N), την αντίσταση του κάθε στρώματος (ρ), το πάχος του κάθε στρώματος (h) και το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (z). Αξίζει να σημειωθεί ότι, στο τελευταίο στρώμα κάθε μέτρησης, αναγράφεται μόνο το βάθος στο οποίο εντοπίζεται και όχι μέχρι το τέλος της έκτασης του, καθώς θεωρείται ημιχώρος. Ακόμη, παρουσιάζονται γραφικά το όρια του μοντέλου, δηλαδή οι τιμές της αντίστασης με το βάθος (Σχήμα 5.22).
- Ψευδοτομή της κατανομής της αντίστασης σε ισογραμμές (Pseudosection). Οι τιμές της αντίστασης απεικονίζονται σε χρωματική κλίμακα. Η ψευδοτομή αποτελεί αποτέλεσμα πολλών μετρήσεων TEM σε γραμμική τομή (Σχήμα 5.23).
- Γεωηλεκτρική τομή που απεικονίζει την κατανομή της αντίστασης (Section) με το βάθος. Οι τιμές της αντίστασης απεικονίζονται σε χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου ή όποια άλλη επιλέξει ο χρήστης (Σχήμα 5.24).

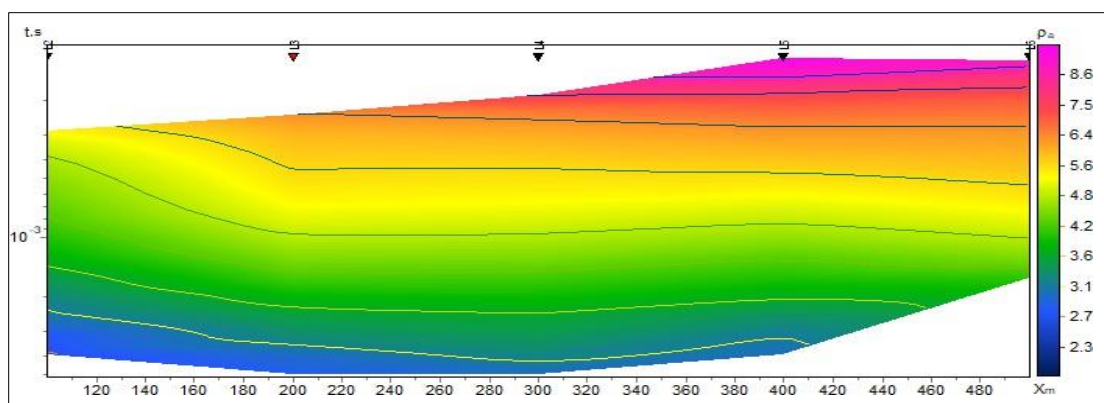


Σχήμα 5.21 Το μοντέλο αντιστροφής των μετρήσεων με τη κόκκινη συνεχή γραμμή να δείχνει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος.

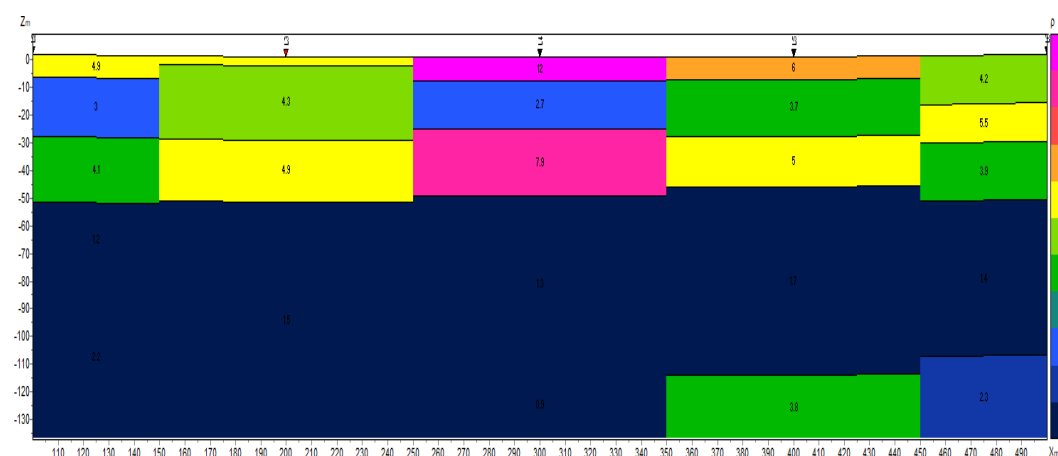
Model table Err=0.9%							
Model table Limits							
N	ρ	η	τ	c	μ	h	z
1	6.21	0	0.0014	0.50	1	3.01	0/1
2	1.55	0	0.0014	0.50	1	81.89	3.01
3	7.64	0	0.0014	0.50	1	24.74	84.89
4	26.16	0	0.0014	0.50	1	32.30	109.63
5	57.36	0	0.0014	0.50	1		141.93



Σχήμα 5.22 Α) Πίνακας των παραμέτρων του μοντέλου αντιστροφής, Β) Γράφημα απεικόνισης των ορίων της αντίστασης με το βάθος, του μοντέλου αντιστροφής.



Σχήμα 5.23 Παράδειγμα ψευδοτομής της φαινόμενης αντίστασης του υπεδάφους.



Σχήμα 5.24 Γεωηλεκτρική τομή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων των μεθόδων της ηλεκτρικής τομογραφίας και των παροδικών πεδίων TEM. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εύρεση των ζωνών υφαλμύρισης στην περιοχή του Αγγελοχωρίου, με την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων. Η μέθοδος TEM έχει ευρεία χρήση στις υδρογεωλογικές μελέτες και στη γεωλογική χαρτογράφηση. Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε για να δοκιμαστεί επικουρικά αλλά και για να εξετασθεί η απόκρισή της στη χαρτογράφηση αγώγιμων σωμάτων που βρίσκονται σε αντιστατικό περιβάλλον και σε μεγάλα βάθη. Οι μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας έλαβαν χώρα στις 29 Απριλίου 2021 και στις 7 Μαΐου 2021, ενώ οι μετρήσεις TEM, στις 24 Ιουνίου 2021.

Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκαν:

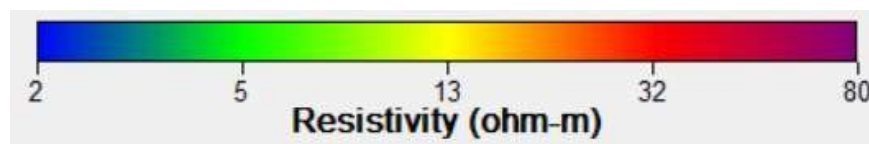
- Συνολικά 14 ηλεκτρικές τομογραφίες στην ευρύτερη περιοχή του Αγγελοχωρίου. Οι θέσεις των τομογραφιών χωροθετήθηκαν έτσι ώστε να αποτυπωθεί γεωφυσικά το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής έρευνας, σε συνδυασμό και με παλαιότερες μελέτες. Η πλειοψηφία των τομογραφιών βρίσκεται παραθαλάσσια, ώστε να ανιχνευθεί η διείσδυση του θαλασσινού νερού στο υπόγειο νερό (Τομές B, C, D, F, G, H και J). Οι τομές A, M και L, τοποθετήθηκαν εσκεμμένα βαθύτερα στην ενδοχώρα, προκειμένου να εξετασθεί ο βαθμός εξάπλωσης του φαινομένου. Οι τομές N και E, βρίσκονται εξωτερικά του χωριού του Αγγελοχωρίου και κεντρικά στην περιοχή μελέτης. Οι τομές I και K, τοποθετήθηκαν στις συγκεκριμένες θέσεις, με σκοπό να αποτυπωθεί το υπέδαφος στην περιοχή των αλυκών και της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων (Αινεία).
- Στις τομές ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκαν 21 ηλεκτρόδια σε αναπτύγματα διαφορετικού μήκους. Κατά κανόνα το ανάπτυγμα ήταν 1000m και διάστημα ηλεκτροδίων 50m, με εξαίρεση τις D και E, οι οποίες έχουν ανάπτυγμα 600m και διάστημα 30m και την F, με μήκος 800m και απόσταση ηλεκτροδίων 40m.

- 9 μετρήσεις TEM, οι 5 από τις οποίες είναι τοποθετημένες σε μία ευθεία (L1-L5). Οι θέσεις των υπόλοιπων μετρήσεων καθορίστηκαν έτσι ώστε να παρέχουν περαιτέρω πληροφορίες για αγώγιμους σχηματισμούς του υπεδάφους.

6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας, εφαρμόστηκαν οι διατάξεις διπόλου-διπόλου (dipole-dipole), λόγω της υψηλής διακριτικής ικανότητας σε πλευρικές και κατακόρυφες μεταβολές και της πολλαπλής βαθμίδας (multi-gradient), η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο. Τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας, εξάχθηκαν από το λογισμικό Prosys II και μεταφέρθηκαν στο πρόγραμμα αντιστροφής και ερμηνείας δισδιάστατων (2D) μοντέλων, DC_2DPRO.

Τα τελικά γεωηλεκτρικά μοντέλα αποτελούν συνδυασμό των δύο διατάξεων, περιέχουν την τοπογραφία της περιοχής, αλλά και το υψόμετρο από τη στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας. Τα αποτελέσματα έχουν μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) μικρότερο από 13%. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση στις τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας, απεικονίζεται με χρωματική λογαριθμική κλίμακα σε Ohm.m, διαφοροποιώντας έτσι τους υπεδάφιους σχηματισμούς (Πίνακας 6.1). Τα τμήματα με έντονο μπλε χρώμα (0.2-4 Ohm.m) δηλώνουν τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στο υπέδαφος.



Σχήμα 6.1 Λογαριθμική χρωματική κλίμακα της αντίστασης που χρησιμοποιήθηκε για τις τομές ηλεκτρικής τομογραφίας.



Για την καλύτερη ερμηνεία των ηλεκτρικών τομογραφιών, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με τη γεωλογία της περιοχής μελέτης. Όπως έχει αναφερθεί, και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην περιοχή του Αγγελοχωρίου εντοπίζονται Νεογενή ιζήματα, που περιλαμβάνουν άμμους, ψαμμίτες, αργίλους, μάργες και ασβεστόλιθους, όπως και Τεταρτογενή ιζήματα που αποτελούνται από ερυθροστρώματα, με εναλλαγές φακών κροκάλων, άμμους, ψαμμίτες και αργίλους. Σε συνδυασμό με τις λιθολογικές και στρωματογραφικές στήλες των γεωτρήσεων, επιτεύχθηκε η βαθμονόμηση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Στον Πίνακα 6.1, γίνεται αντιστοίχιση κάθε γεωλογικού σχηματισμού, με την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που παρουσιάζει στην ηλεκτρική τομογραφία.

Πίνακας 6.1 Βαθμονόμηση των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με κάθε γεωλογικό σχηματισμό της περιοχής μελέτης.

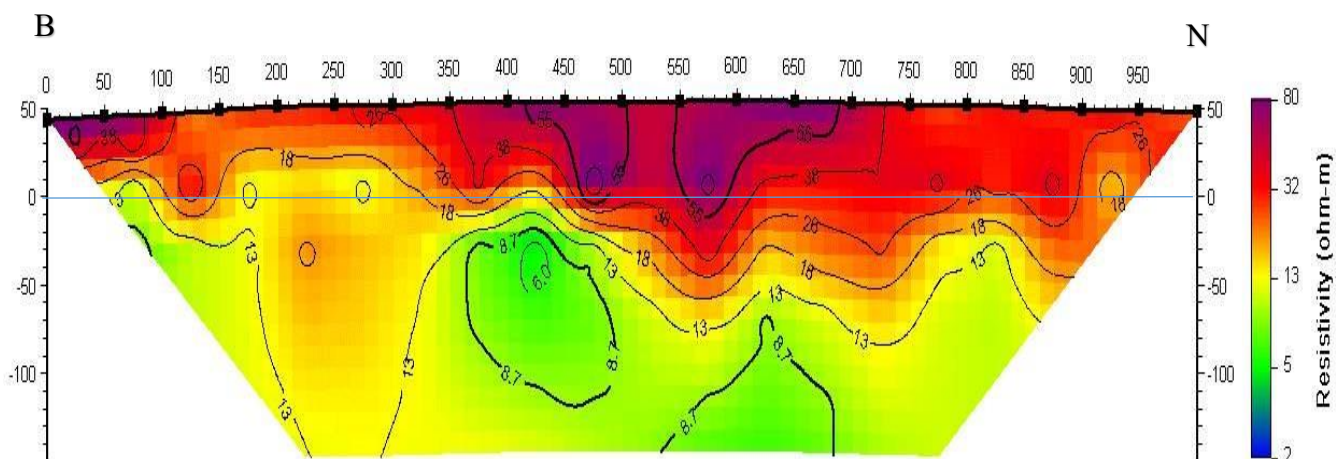
ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.m)	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	
0.1 - 5	Θαλασσινό νερό	
5 - 10	Αργιλοί σχηματισμοί ή/και πιθανή υφαλμύριση	
10 - 20	Αργιλοαμμώδη εδάφη με ή χωρίς παρουσία υδροφορίας ή Εναλλαγές αργίλου με διάσπαρτα χαλίκια με ή χωρίς παρουσία υδροφορίας	
20 - 30	Άμμος με χαλίκια ή Χαλίκια ή Εναλλαγές μάργας με άργιλο Με ή/και χωρίς παρουσία υδροφορίας	
30– 40	Μαργαϊκοί σχηματισμοί ή Μαργαϊκοί σχηματισμοί με χαλίκια ή αμμοχάλικα με ή χωρίς παρουσία υδροφορίας ή Ψαμμίτες με μαργαϊκούς σχηματισμούς με ή χωρίς εναλλαγές αργίλου ή/και άμμου και με ή χωρίς παρουσία υδροφορίας	
40-80	Ασβεστολιθικός τόφος ή Ασβεστόλιθος (τιμές μεγαλύτερες από 100-150 Ohm.m)	

Πίνακας 6.2 Πληροφορίες των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας(Σύστημα συντεταγμένων σε ΕΓΣΑ '87).

No	ΟΝΟΜΑ	ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗΣ (m)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ (m)	X (ΑΡΧΗΣ)	Y (ΑΡΧΗΣ)	X (ΤΕΛΟΥΣ)	Y (ΤΕΛΟΥΣ)
1	A	1000	50	402810.6985	4483549.617	402799.5466	4482546.892
2	B	1000	50	402010.0402	4484235.519	402191.7975	402191.7975
3	C	1000	50	401336.8708	4484219.493	401500.3714	4483236.114
4	D	600	30	401386.8449	4483953.821	401975.9676	4484047.448
5	E	600	30	400850.618	4483454.454	401450.297	4483553.411
6	F	800	40	400909.663	4484299.317	401044.931	4483502.258
7	G	1000	50	400174.239	4483665.903	400890.203	4484321.542
8	H	1000	50	399665.709	4483331.998	400518.493	4483844.061
9	I	1000	50	400.392.239	4482871.109	401192.083	4482256.628
10	J	1000	50	401139.8075	4480787.355	401133.9995	4481735.909
11	K	1000	50	400581.997	4481688.035	401572.7845	4481677.728
12	L	1000	50	401924.7673	4481677.886	402918.1023	4481655.178
13	M	1000	50	401703.2351	4482083.469	402696.959	4482062.168
14	N	1000	50	401269.1148	4482190.148	401102.8566	4483167.614



Σχήμα 6.2 Θέσεις τομών ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή του Αγγελοχωρίου.

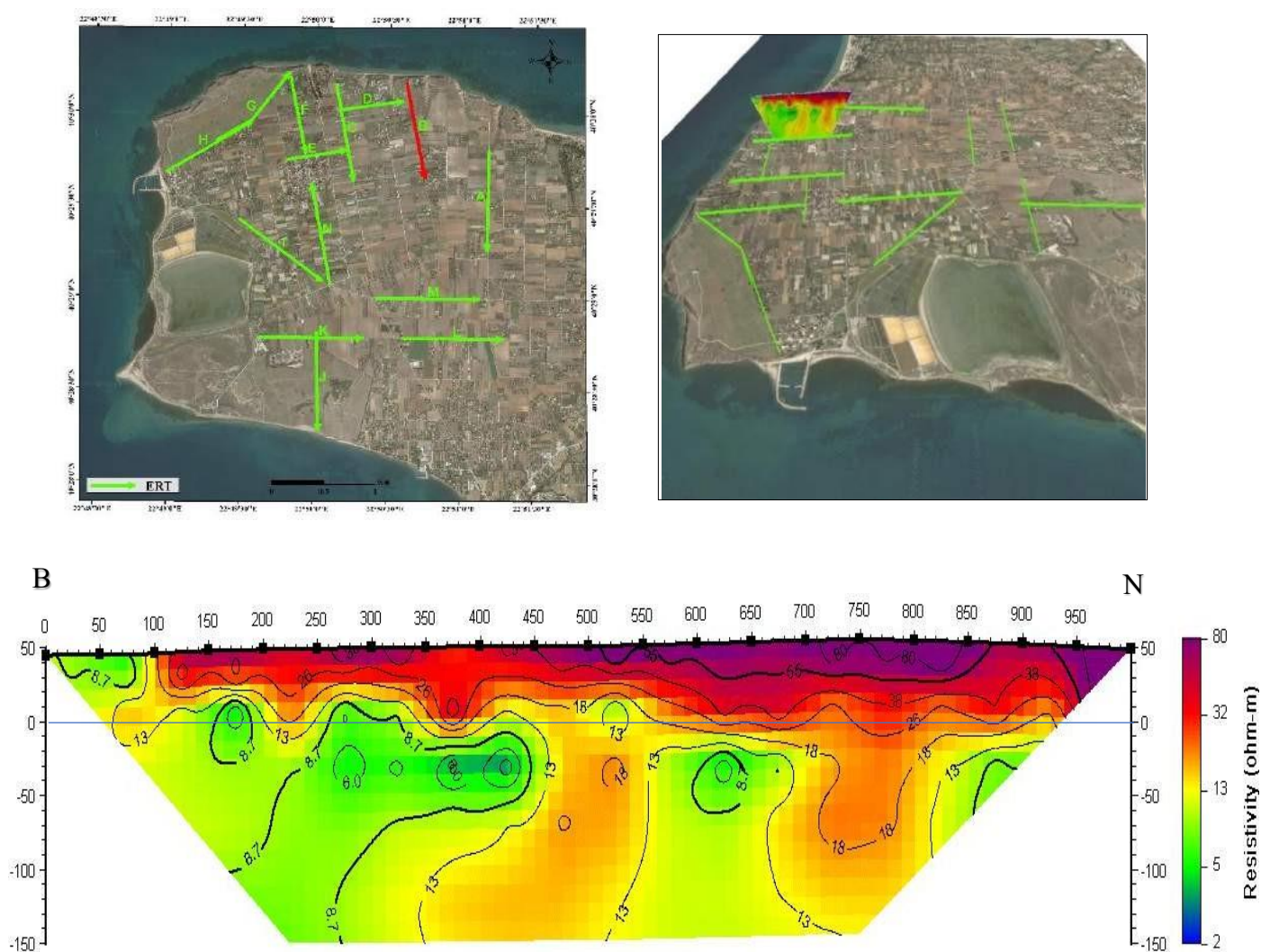


Σχήμα 6.3 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας A με RMS 4.5% .

Η ηλεκτρική τομογραφία A βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής του Αγγελοχωρίου και έχει υψόμετρο 50 m. Σύμφωνα με το μοντέλο της γεωηλεκτρικής μεθόδου, στο επιφανειακό στρώμα της τομογραφίας A, παρατηρείται αντιστατικός σχηματισμός, με τιμές από 30-60 Ohm.m (κόκκινο-μοβ χρώμα), ο οποίος εκτείνεται μέχρι τα -50 m βάθος. Σύμφωνα, με τη γεωλογία της περιοχής, οι υψηλές τιμές αντιστάσεων παραπέμπουν σε μαργαίτους ή ψαμμιτικούς σχηματισμούς με χαλίκια και πιθανή παρουσία υδροφορέα ή και ασβεστολιθικό πέτρωμα. Στη συνέχεια,

συναντώνται σχηματισμοί με ενδιάμεσες τιμές ειδικής αντίστασης, οι οποίες κυμαίνονται στα 10-18 Ohm.m που πιθανόν αντιστοιχούν σε αργιλοαμμώδη εδάφη ή εναλλαγές αργίλου με χαλίκια (κίτρινο χρώμα). Σε βάθος 20-150 m από την επιφάνεια της θάλασσας εμφανίζονται τμηματικά σχηματισμοί με αντίσταση 6-13 Ohm.m (πράσινο χρώμα) που υποδηλώνουν την ύπαρξη αργιλικού υλικού με υποψία υφάλμυρου νερού.

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Β

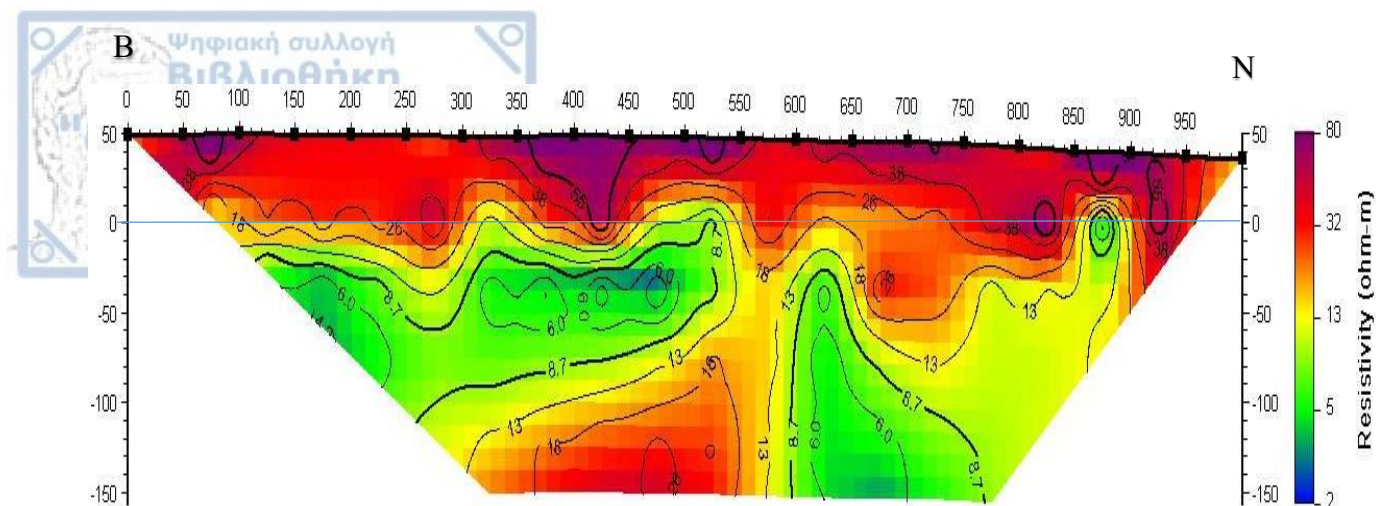


Σχήμα 6.4 Αποτέλεσμα της διδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας Β με RMS 3.6% .

Η ηλεκτρική τομογραφία Β τοποθετήθηκε βορειοανατολικά του Αγγελοχωρίου και το υψόμετρο της περιοχής από τη στάθμη της θάλασσας είναι 50 m. Σύμφωνα με την κατανομή των αντιστάσεων, στα πρώτα 50 m, παρουσιάζονται υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Οι τιμές με εύρος 20-50 Ohm.m ενδεχομένως ανήκουν σε μαργαϊκούς σχηματισμούς με χαλίκια ή και με παρουσία υδροφόρων στρωμάτων, ενώ εκείνες που ξεπερνούν τα 80 Ohm.m αντιστοιχούν σε ασβεστολιθικά πετρώματα (έντονο μοβ χρώμα). Έπειτα, μέχρι τα -150 m βάθος από την επιφάνεια της θάλασσας, παρατηρούνται τμηματικά μεσαίες τιμές ειδικής αντίστασης, 10-18 Ohm.m (κίτρινο χρώμα) που σχετίζονται με αργιλοαμμώδη εδάφη ή εναλλαγές αργίλου με χαλίκια και ίσως υδροφόρα στρώματα. Επίσης, εμφανίζονται τιμές 4-9 Ohm.m (πράσινο χρώμα) που πιθανώς παραπέμπουν σε αργλικούς σχηματισμούς με υποψία παρουσίας υφάλμυρου νερού (μπλε χρώμα).

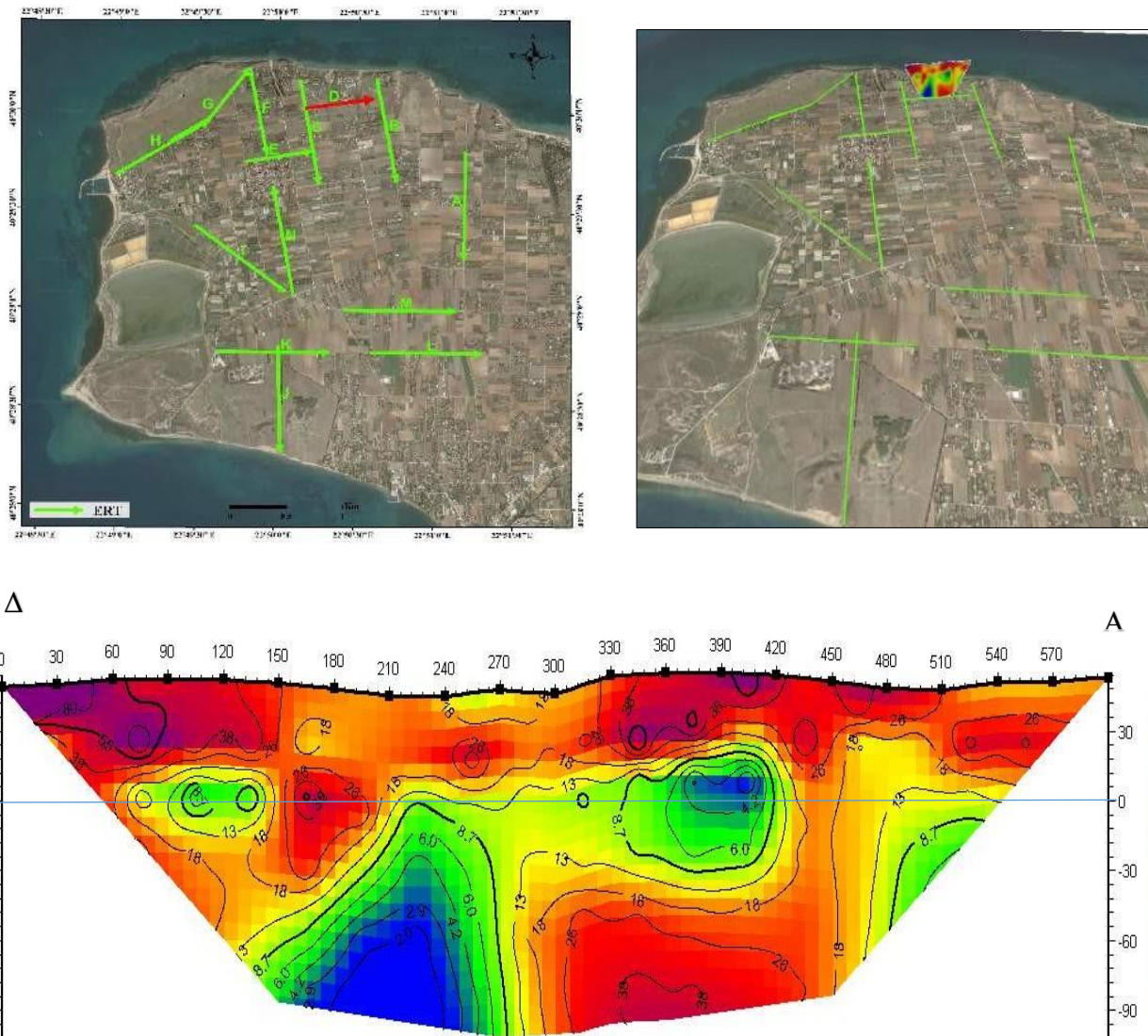
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ C





Σχήμα 6.5 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας C με RMS 5.3% .

Η ηλεκτρική τομογραφία C πραγματοποιήθηκε βόρεια της περιοχής μελέτης και έχει υψόμετρο 50 m. Τα επιφανειακά στρώματα, χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης, 26-80 Ohm.m και αντιστοιχούν σε εναλλαγές χαλικιών, άμμου, σε μαργαϊκούς ή ψαμμιτικούς σχηματισμούς (κόκκινο χρώμα) ή και ασβεστόλιθους (μοβ χρώμα) με πιθανή ύπαρξη υδροφορίας. Στη συνέχεια, μέχρι τα -150 m βάθος, εμφανίζονται σχηματισμοί με αντιστάσεις 2-10 Ohm.m μέσα στους οποίους έχει διεισδύσει το θαλασσινό νερό. Οι σχηματισμοί αυτοί πιθανόν αποτελούνται από αργιλικό ή αργιλοαμμώδες υλικό. Ακόμη, μεταξύ των αργιλικών σχηματισμών, βρίσκεται στρώμα αντίστασης, 13-30 Ohm.m, το οποίο συνίσταται από άμμο με χαλίκια ή και με ψαμμίτες μαζί με υδροφόρα στρώματα.

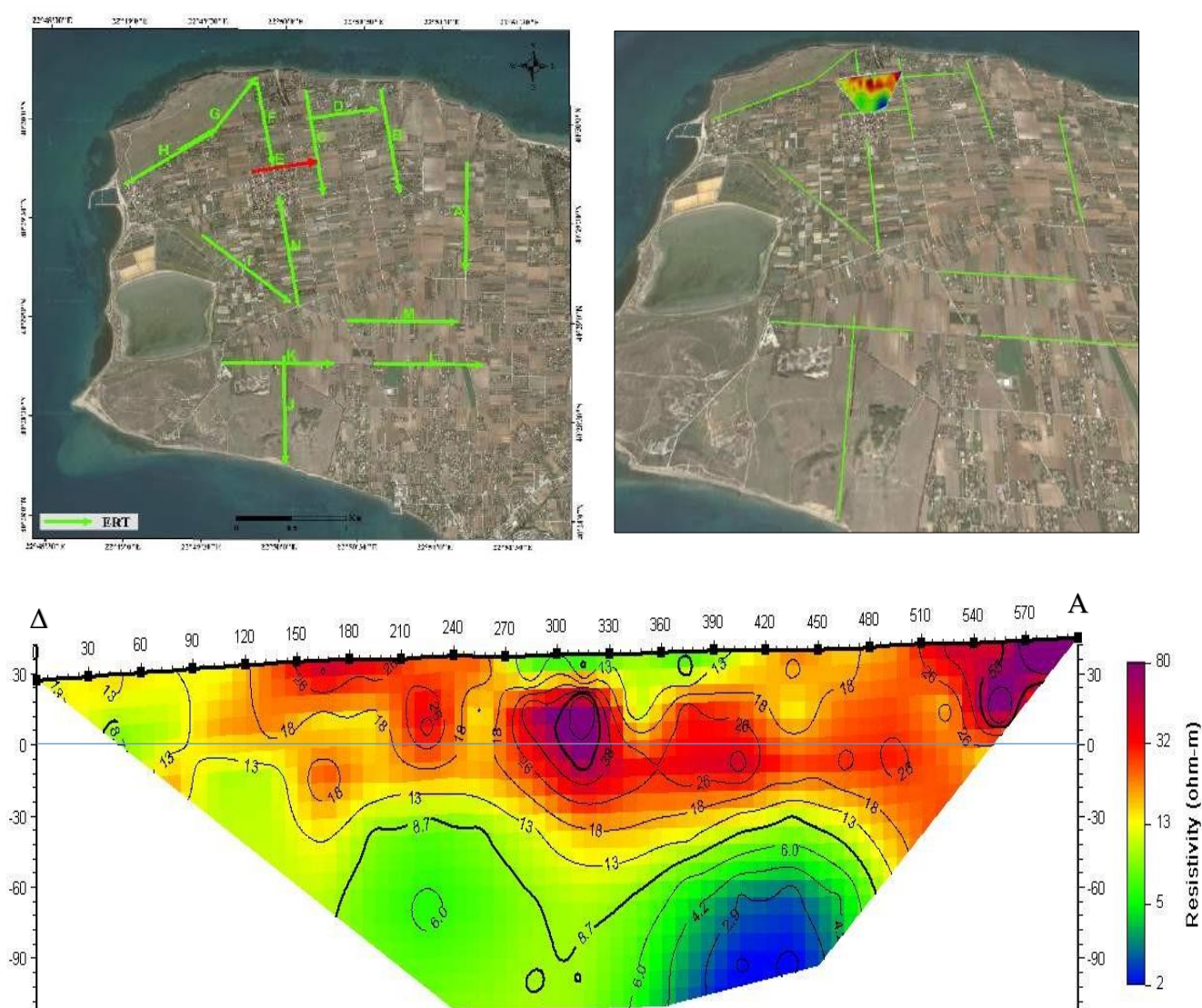


Σχήμα 6.6 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας D με RMS 3.7% .

Η ηλεκτρική τομογραφία D, βρίσκεται βόρεια της περιοχής του Αγγελοχωρίου με υψόμετρο περίπου 40 m. Σε βάθη από 20 έως και 40 m (βάθος πάνω από τη στάθμη της θάλασσας), η τομή D χαρακτηρίζεται κυρίως από υψηλής αντίστασης πετρώματα. Το πορτοκαλί χρώμα ανήκει σε αργιλοαμμώδη εδάφη ή εναλλαγές με χαλίκια ή και μάργα, ενώ τα τμήματα με κόκκινο και έντονο μοβ χρώμα συνιστούν μαργαϊκούς ή ψαμμιτικούς σχηματισμούς ή και τμηματικά ασβεστολιθικά πετρώματα με πιθανή παρουσία υδροφόρου. Ύστερα, στα 20 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

παρατηρείται «φακός» έντονου μπλε χρώματος, υποδεικνύοντας την ύπαρξη υφάλμυρου νερού, το οποίο είναι είτε εγκλωβισμένο από παλαιότερες εποχές, είτε από την εισχώρηση του σε σχηματισμούς πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Σε μεγαλύτερα βάθη, εντοπίζεται στρώμα υφάλμυρου νερού που πιθανόν αποτελεί αργιλικό υλικό. Παράλληλα, στα 290 m κατά μήκος της τομής, στα ίδια βάθη συναντάται αντιστατικός σχηματισμός που παραπέμπει σε μαργαϊκό ή ψαμμιτικό πέτρωμα με εναλλαγές άμμου ή και χαλικιών και συνοδεύεται από υδροφορία.

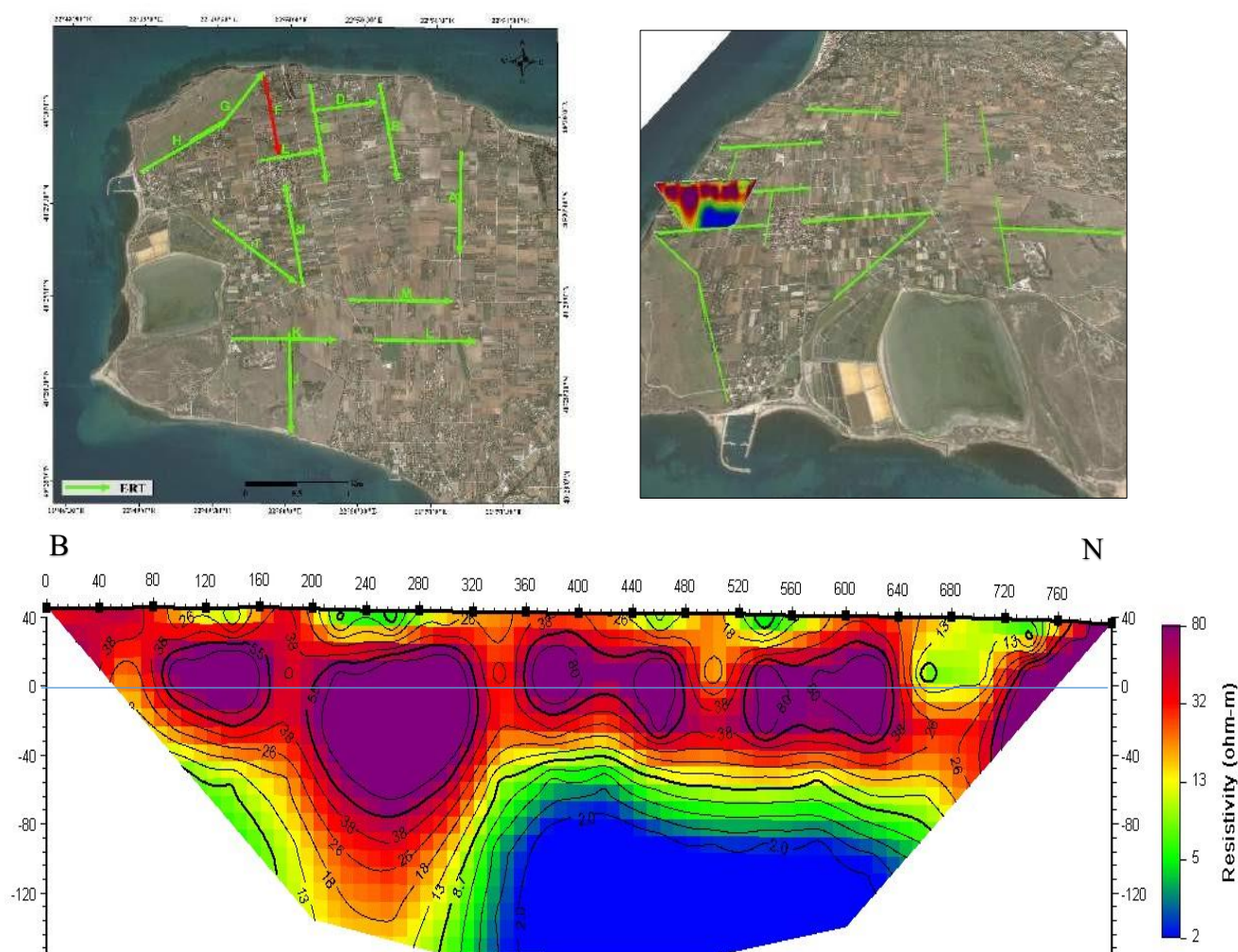
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Ε



Σχήμα 6.7 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας Ε με RMS 3.3%

Η μέτρηση της ηλεκτρικής τομογραφίας E, έχει πραγματοποιηθεί στη βόρεια πλευρά του χωριού του Αγγελοχωρίου και έχει υψόμετρο 30 m. Με βάση το γεωηλεκτρικό μοντέλο, στα πρώτα 60 m παρουσιάζονται ενδιάμεσης και υψηλής αντίστασης σχηματισμοί, με τιμές 10-60 Ohm.m, οι οποίοι παραπέμπουν σε εναλλαγές αργίλου με μάργα, ή χαλικιών με άργιλο ή και μάργα ή ψαμμίτη με παρουσία υδροφορίας. Σε μεγαλύτερα βάθη, εντοπίζεται στρώμα αργιλικού υλικού, το οποίο εξαπλώνεται σε όλο το μήκος της τομής, ωστόσο στο ανατολικό μέρος, από τα -40 m βάθος, υπάρχει ξεκάθαρη διείσδυση του υφάλμυρου νερού.

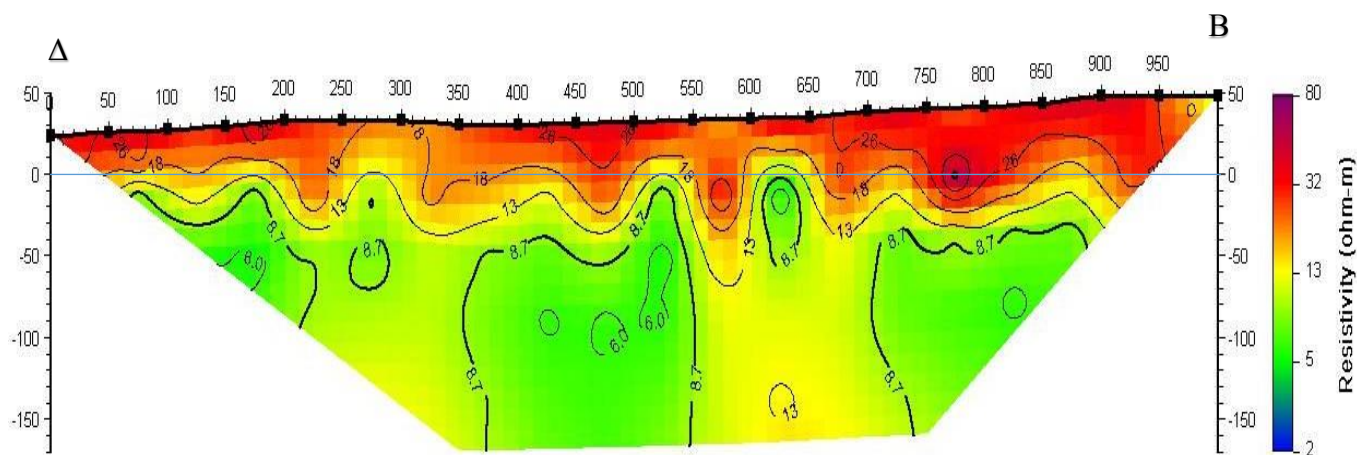
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ F



Σχήμα 6.8 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας F με RMS 13% .

Η ηλεκτρική τομογραφία F απαντάται στο βόρειο τμήμα του Αγγελοχωρίου και εμφανίζει μία ιδιαίτερη κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης. Η επιφανειακή απόσταση του εδάφους από την στάθμη της θάλασσας είναι 40 m. Οι σχηματισμοί που εξαπλώνονται από την αρχή της τομής μέχρι τα -90 m βάθος, παρουσιάζουν πολύ υψηλές αντιστάσεις, με τιμές που ξεπερνούν τα 80 Ohm.m. Το έντονο μώβ χρώμα υποδεικνύει την ύπαρξη ασβεστολιθικών πετρωμάτων, ενώ ταυτόχρονα εμφανίζονται τοπικά μικρότερης αντίστασης πετρώματα 9-13 Ohm.m που πιθανόν είναι αργιλοαμμώδη. Στα 350 m κατά μήκος της τομής και βάθος -50 m, εντοπίζεται μεγάλου πάχους υφάλμυρος σχηματισμός που αντιστοιχεί σε αργιλικό ή αργιλοαμμώδες υλικό.

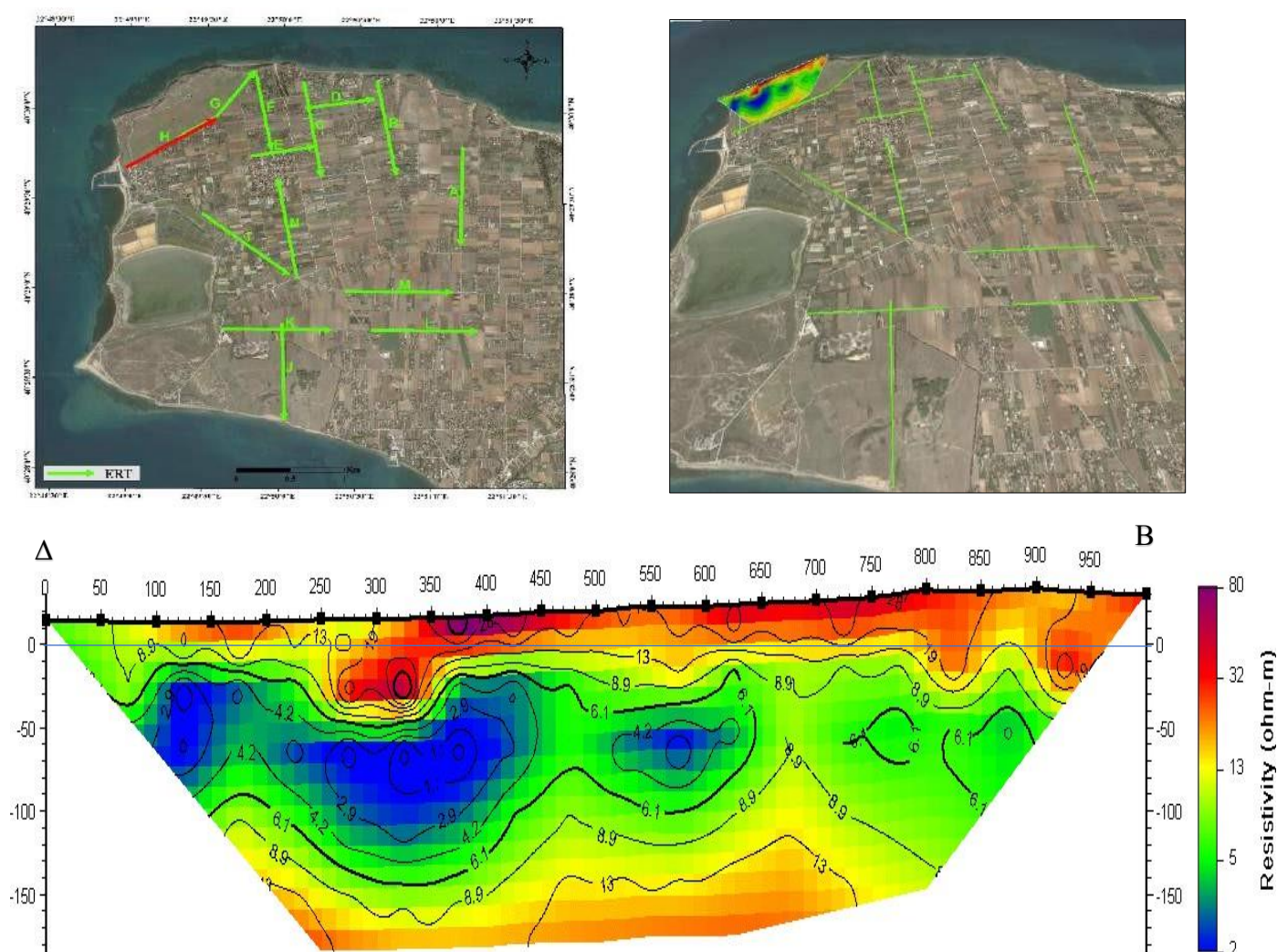
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ G



Σχήμα 6.9 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας G με RMS 6.8% .

Η ηλεκτρική τομογραφία G, έχει πραγματοποιηθεί βορειοδυτικά του Αγγελοχωρίου και συγκεκριμένα έξω από το χώρο του κέντρου εκπομπής του Ελληνικού Ναυτικού. Το υψόμετρο της περιοχής κυμαίνεται από 20 έως 50 m. Μέχρι τα 390 m μήκος, το γεωηλεκτρικό μοντέλο είναι κοινό με ένα μέρος της τομογραφία H. Με βάση τις τιμές των αντιστάσεων, έως τα -20 m βάθος, παρατηρούνται ενδιάμεσης και υψηλής αντίστασης πετρώματα, τα οποία πιθανώς να είναι ψαμμίτες ή μάργες με εναλλαγές αργίλων, χαλικιών ή και άμμου. Τα υποκείμενα στρώματα συγκροτούνται από τιμές ειδικής αντίστασης 6-9 Ohm.m και περιέχονται με αργιλικά υλικά με υποψία παρουσίας υφάλμυρου νερού.

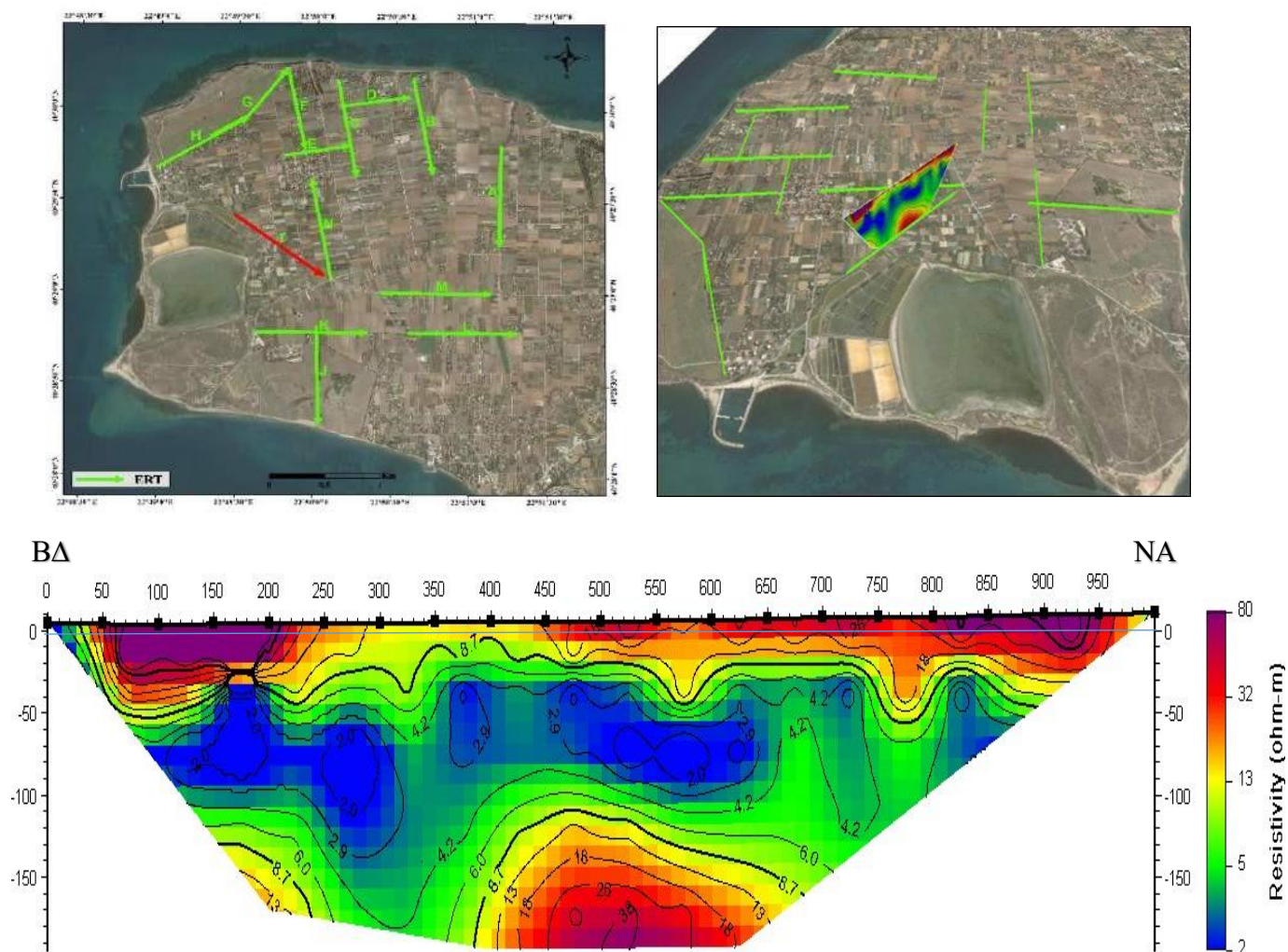
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Η



Σχήμα 6.10 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας H με RMS 4.5% .

Η τομογραφία Η βρίσκεται δίπλα από τη G και μάλιστα την τέμνει μέχρι τα 390 m, με αποτέλεσμα το τμήμα από τα 690 m έως και το τέλος της τομής Η να είναι κοινό. Παρομοίως με τη G, συναντάμε στα επιφανειακά στρώματα ενδιάμεσης και υψηλής αντίστασης σχηματισμούς. Ωστόσο, σε βάθος -20 m, συναντάται υφάλμυρο στρώμα, το οποίο εκτείνεται μέχρι τα 630 m κατά μήκος και βάθος -120 m. Ο σχηματισμός στον οποίο έχει εισχωρήσει το θαλασσίνο νερό είναι ενδεχομένως αργιλικός ή αργιλοαμμώδης. Σε βαθύτερα στρώματα, παρατηρούνται τιμές ενδιάμεσης αντίστασης που ανήκουν σε αργιλοαμμώδη εδάφη ή χαλίκια ή εναλλαγές ιζημάτων, με πιθανή παρουσία υδροφορίας.

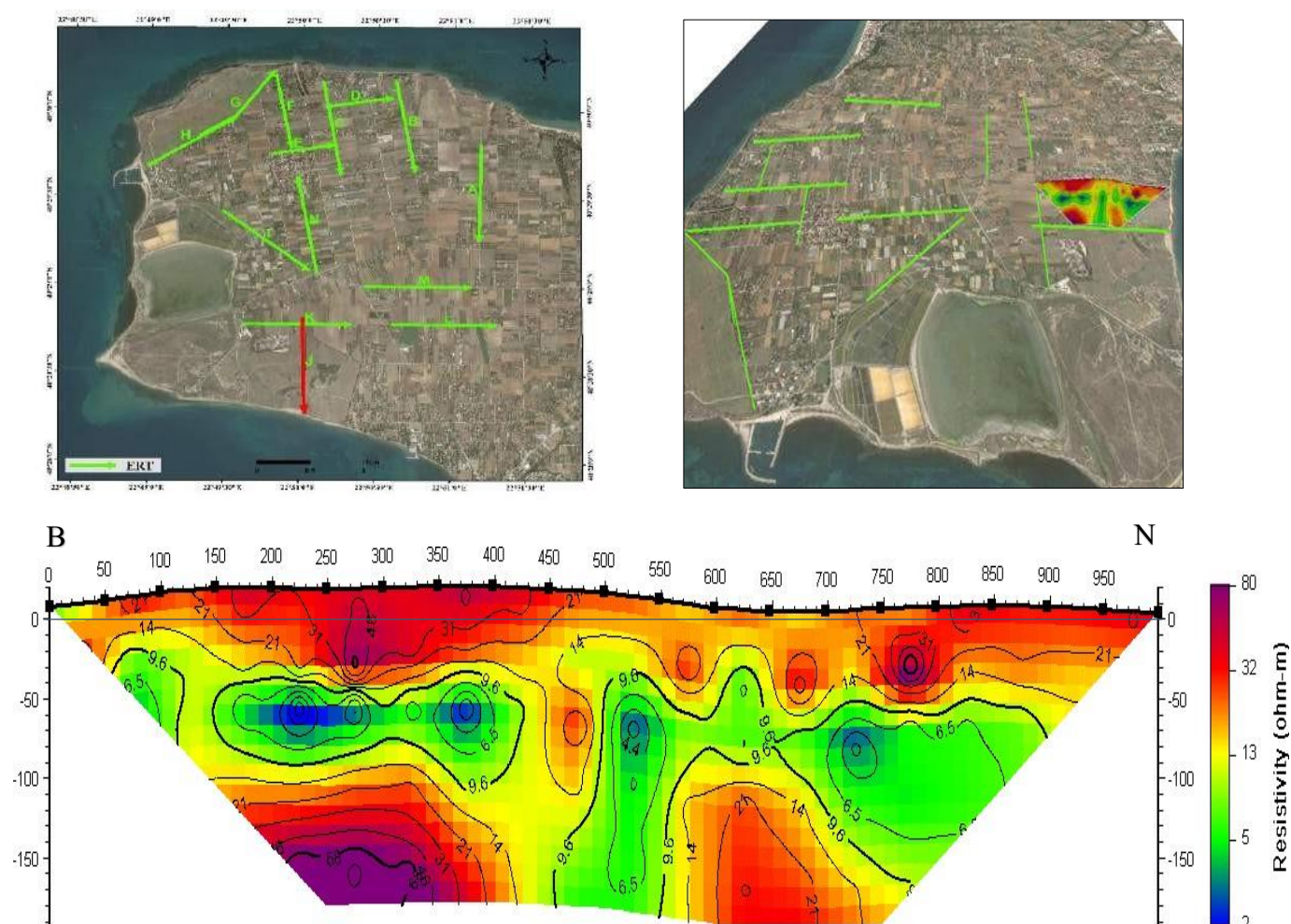
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Ι



Σχήμα 6.11 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας Ι με RMS 6% .

Η ηλεκτρική τομογραφία I εντοπίζεται βορειοανατολικά από τη λιμνοθάλασσα του Αγγελοχωρίου. Τα πρώτα 30 m των επιφανειακών στρωμάτων περιλαμβάνουν ενδιάμεσης και υψηλής αντίστασης πετρώματα, τα οποία αντιστοιχούν σε εναλλαγές ιζημάτων (αργίλος, άμμος, χαλίκια) ίσως και με παρουσία υδροφορίας, ή σε μάργες ή ψαμμίτες ή και σε ασβεστολιθικά τεμάχια. Από τα -30 m βάθος, ξεκινάει ο υφάλμυρος ορίζοντας, ο οποίος εκτείνεται σε όλο το μήκος της τομής, με πάχος περίπου 80 m, αλλά φαίνεται να διεισδύει τμηματικά και σε μεγαλύτερα βάθη. Το θαλασσινό νερό πιθανώς φιλοξενείται σε αργλικούς σχηματισμούς, καθώς οι περιβάλλουσες αντιστάσεις έχουν τιμές 9-5 Ohm.m. Επιπλέον, στα -130 m βάθος και μήκος 400 m, βρίσκεται σχηματισμός υψηλών αντιστάσεων που παραπέμπει σε αμμοχάλικα με εναλλαγές αργίλου ή και μάργας ή ψαμμίτη μαζί με υδροφόρα στρώματα.

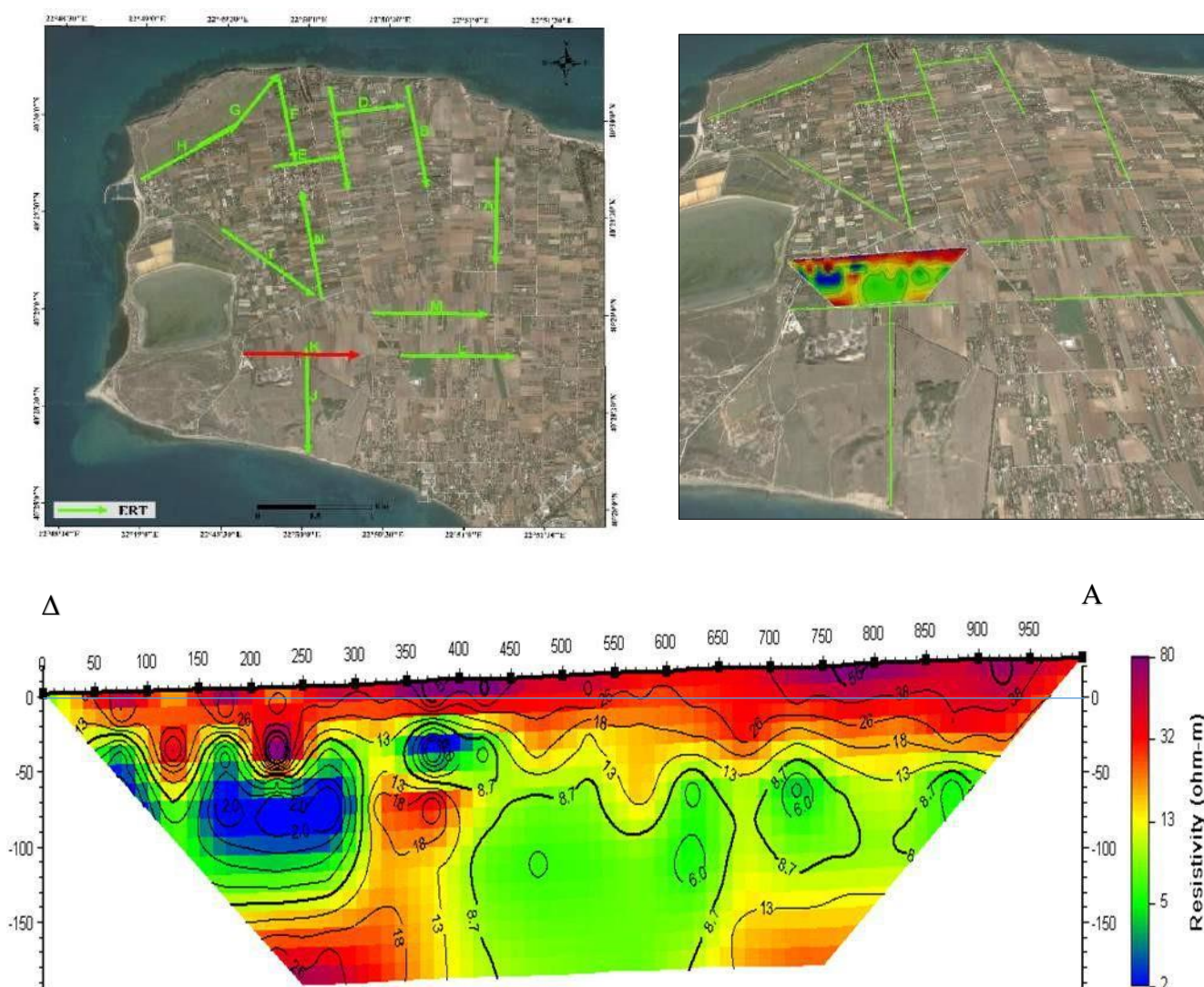
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ J



Σχήμα 6.12 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας J με RMS 2.3% .

Η ηλεκτρική τομογραφία J, χωροθετήθηκε στη νότια πλευρά του Αγγελοχωρίου και έχει υψόμετρο 10-20 m. Η κατανομή της ειδικής αντίστασης είναι όμοια με τις προηγούμενες, με τα επιφανειακά στρώματα να αποτελούνται από τιμές με εύρος 14-50 Ohm.m. Στα -30m βάθος ακολουθεί πιθανόν αργιλικό ή αργιλοαμμώδες στρώμα με παρουσία υφάλμυρου νερού. Έπειτα, από τα -120 m βάθος έως και το τέλος της τομής, υπόκεινται αντιστατικοί σχηματισμοί στο βόρειο και νότιο τμήμα, με τιμές 20-80 Ohm.m, με τις χαμηλότερες να υποδηλώνουν εναλλαγές αργίλου με άμμο και ίσως παρουσία υδροφορίας, και τις υψηλότερες μαργαϊκό ή ψαμμιτικό σχηματισμό με υδροφορίας.

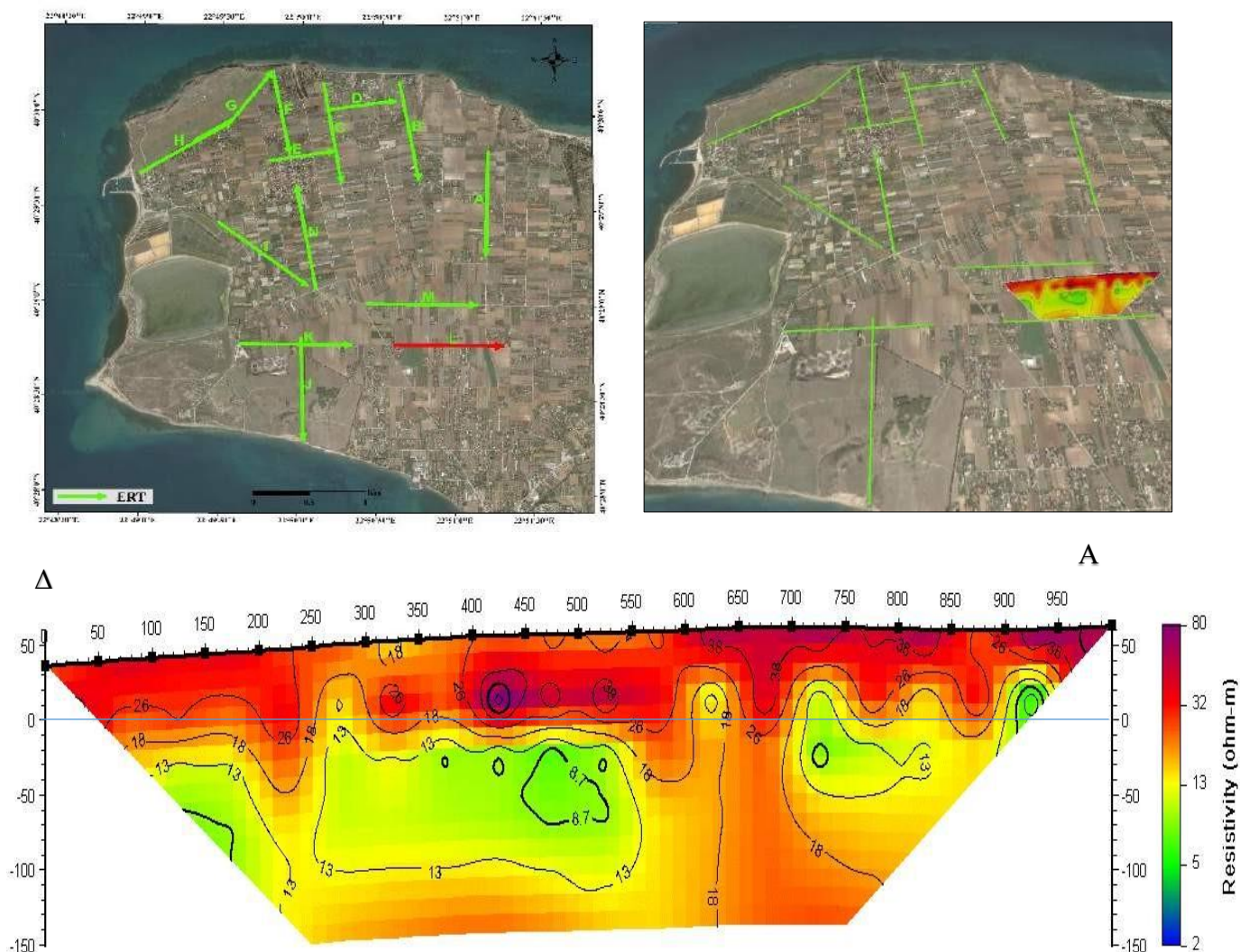
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Κ



Σχήμα 6.13 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας Κ με RMS 2.2% .

Η ηλεκτρική τομογραφία Κ έχει τοποθετηθεί νοτιοανατολικά από τη λιμνοθάλασσα του Αγγελοχωρίου και το υψόμετρο της περιοχής παίρνει τιμές από 0-20 m. Τα επιφανειακά στρώματα χαρακτηρίζονται από υψηλής αντίστασης σχηματισμούς που συνίστανται από άμμο ή και χαλίκια ή εναλλαγές ιζημάτων, μάργα ή ψαμμίτες και ίσως παρουσία υδροφορίας. Οι σχηματισμοί αυτοί εντοπίζονται εκ νέου, σε μεγαλύτερα βάθη. Από τα 30-150 m βάθος (από τη στάθμη της θάλασσας) και μήκος έως και 420 m, παρατηρούνται αγωγίμοι σχηματισμοί με τιμές μικρότερες των 2 Ohm.m, υποδεικνύοντας έναν ορίζοντα υφάλμυρου νερού μέσα σε αργιλικό υλικό. Στη συνέχεια, από τα 420 m κατά μήκος της τομής, εμφανίζονται αργιικοί σχηματισμοί με πιθανή παρουσία θαλασσινού νερού.

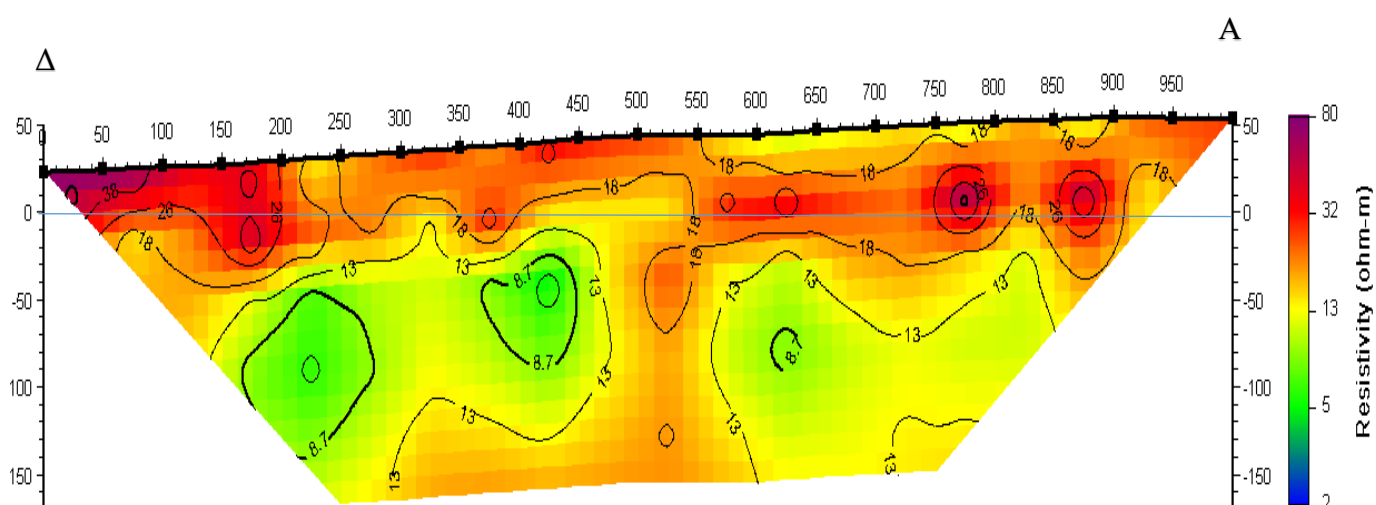
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ L



Σχήμα 6.14 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας L με RMS 3%

Η ηλεκτρική τομογραφία L, αποτελεί συνέχεια της K, αλλά εκτείνεται βαθύτερα στην ενδοχώρα και έχει υψόμετρο 50 m. Η κατανομή των αντιστάσεων είναι όμοια με τις προηγούμενες τομές, με τις υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης να κυριαρχούν στα πρώτα 50 m αλλά να εισχωρούν και σε μεγαλύτερα βάθη. Οι τιμές κυμαίνονται από 20 έως 40 Ohm.m και ενδεχομένως ανήκουν σε αργιλοαμμώδες, ψαμμιτικό ή και μαργαϊκό υλικό, με παρουσία υδροφόρων στρωμάτων. Στη συνέχεια, ακολουθεί στρώμα αντίστασης 9-13 Ohm.m, που αντιστοιχεί σε αργιλικά ή αργιλοαμμώδη ιζήματα.

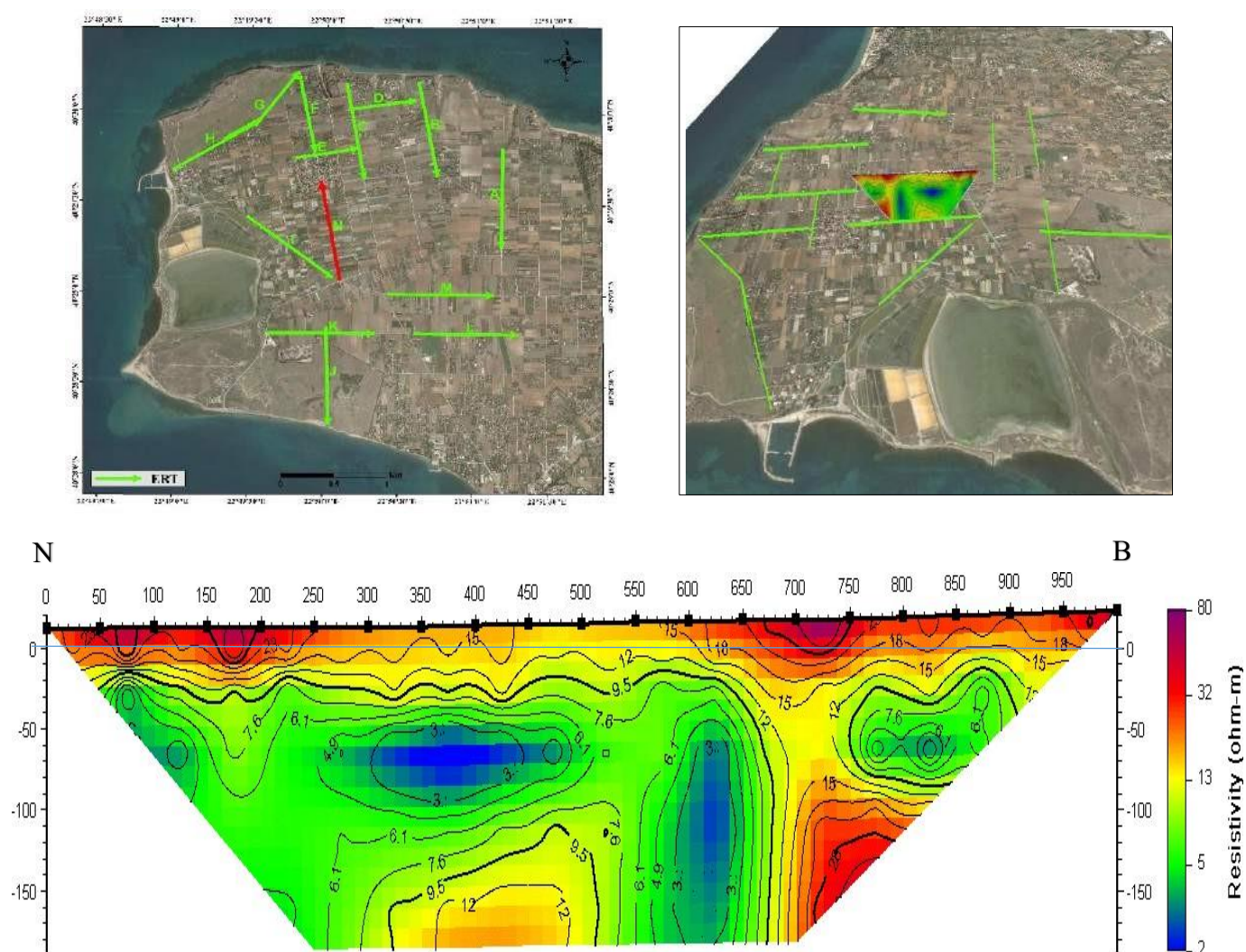
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ M



Σχήμα 6.15 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας M με RMS 1.8% .

Η ηλεκτρική τομογραφία Μ έχει τοποθετηθεί παράλληλα και βορειότερα από την L και το υψόμετρο της από τη στάθμη της θάλασσας είναι 20-50 m. Όσον αφορά την κατανομή των τιμών ειδικής αντίστασης, παρατηρείται αρχικά το στρώμα υψηλών αντιστάσεων που ανήκει σε εναλλαγές αργίλου με άμμο ή χαλίκια ή και σε μαργαϊκό ή ψαμμιτικό σχηματισμό και πιθανή παρουσία υδροφόρου ορίζοντα. Οι ενδιάμεσες τιμές αντιστάσεων (13-20 Ohm.m), φαίνεται ότι εισχωρούν τοπικά σε βαθύτερα στρώματα. Στα -30 m βάθος από την επιφάνεια της θάλασσας, αρχίζουν την εξάπλωσή τους οι αργιλοκοί και οι αργιλοαμμώδεις σχηματισμοί.

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Ν



Σχήμα 6.16 Αποτέλεσμα της δισδιάστατης (2D) ερμηνείας της τομογραφίας Ν με RMS 2.7% .

Η ηλεκτρική τομογραφία Ν απαντάται στο νότιο τμήμα του χωριού του Αγγελοχωριού με υψόμετρο 10-20 m. Αρχικά, στο μοντέλο της ηλεκτρικής τομογραφίας, παρουσιάζεται ένα λεπτού πάχους στρώμα, με τιμές ειδικής αντίστασης 15 έως 40 Ohm.m, στο οποίο οι χαμηλές τιμές αντιστοιχούν σε αργιλοαμμώδη εδάφη ή εναλλαγές ιζημάτων με παρουσία υδροφορίας, ενώ οι υψηλές τιμές, σε μαργαϊκούς ή ψαμμιτικούς σχηματισμούς με υδροφορία. Οι σχηματισμοί αυτοί συναντώνται ξανά και σε μεγαλύτερα βάθη. Από τα -20 m βάθος έως και το τέλος της τομής, φαίνεται τμηματικά αργιλικό ή αργιλοαμμώδες υλικό (πράσινο χρώμα) μέσα στο οποίο έχει διεισδύσει το θαλασσινό νερό (μπλε χρώμα).

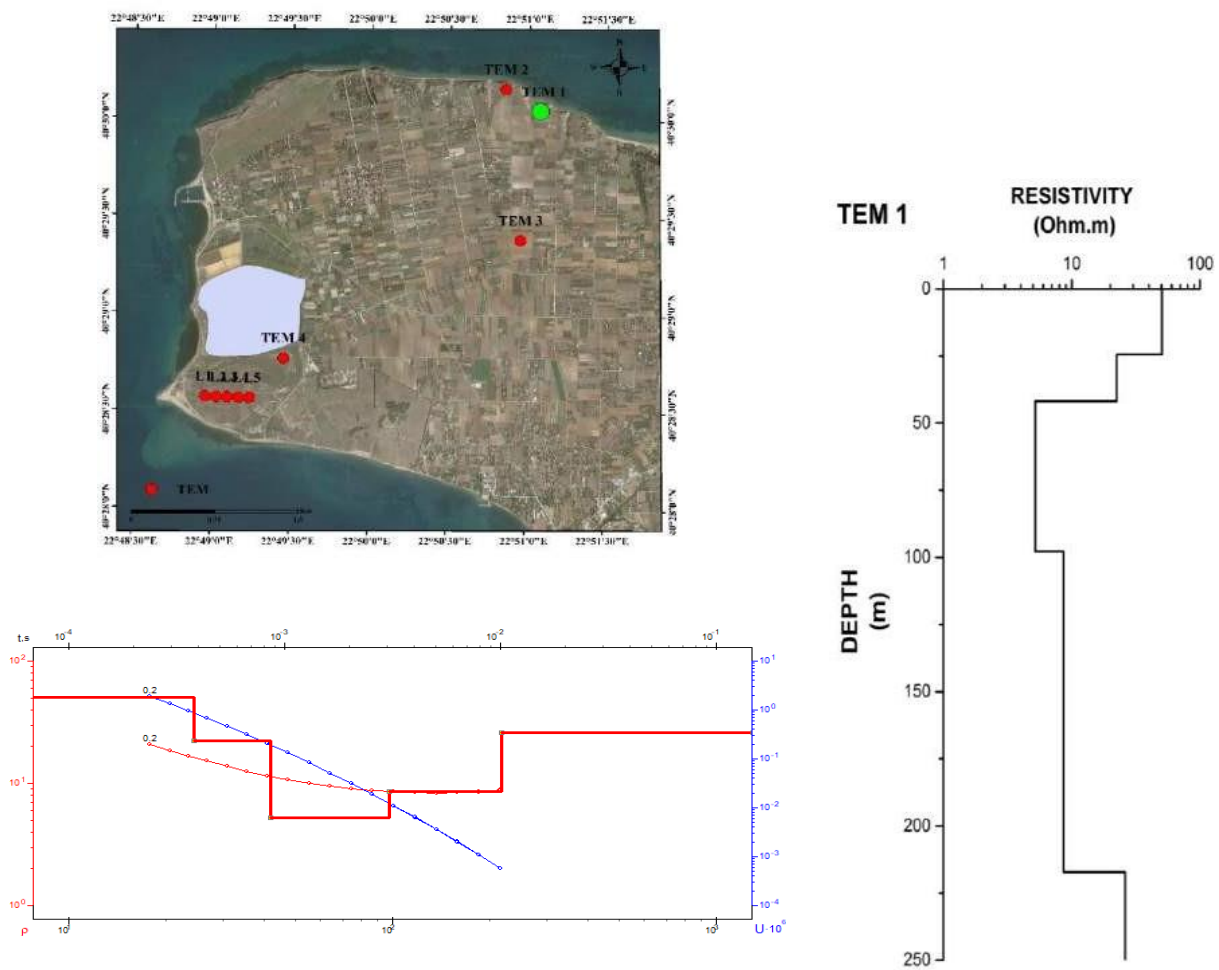
6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ (TEM)

Οι μετρήσεις της μεθόδου TEM, πραγματοποιήθηκαν με την κεντρική διάταξη τετράγωνου βρόχου μήκους 100x100 m. Ο βρόχος λειτουργεί ως πομπός και ο δέκτης τοποθετείται στο κέντρο του. Η λειτουργία μέτρησης ήταν σημειακή (Single measurement mode) και για αυτό τον λόγο εφαρμόστηκαν διαφορετικές συχνότητες εκπομπής, μέχρι και 32 Hz, για κάθε μέτρηση. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν οι συχνότητες 1/2Hz, 1Hz, 2Hz, 4Hz, 8Hz, 16Hz και 32Hz. Παρατηρήθηκε ότι στις χαμηλές συχνότητες (1/2Hz, 1Hz, 2Hz), το σήμα ήταν κακής ποιότητας και επηρεαζόταν ευκολότερα από πηγές θορύβου. Αντιθέτως, από τα 4Hz και άνω, το σήμα είναι καλύτερης ποιότητας και απουσιάζει ο θόρυβος. Όσον αφορά την απαλοιφή του θορύβου από το σήμα, σε κάθε μέτρηση ορίστηκε αριθμός σώρευσης (stacking) 100.

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα της μεθόδου TEM και ειδικότερα αυτά με συχνότητα εκπομπής 8Hz (TEM 1, TEM 2, TEM 3, TEM 4) και 4 Hz (L1-L5), καθώς διακρίνονται από την καλύτερη ποιότητα των μετρήσεων αλλά και το υψηλό βάθος απόκρισης, με μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) μικρότερο από 2%. Το σημείο αναφοράς των μετρήσεων είναι η επιφάνεια του εδάφους.

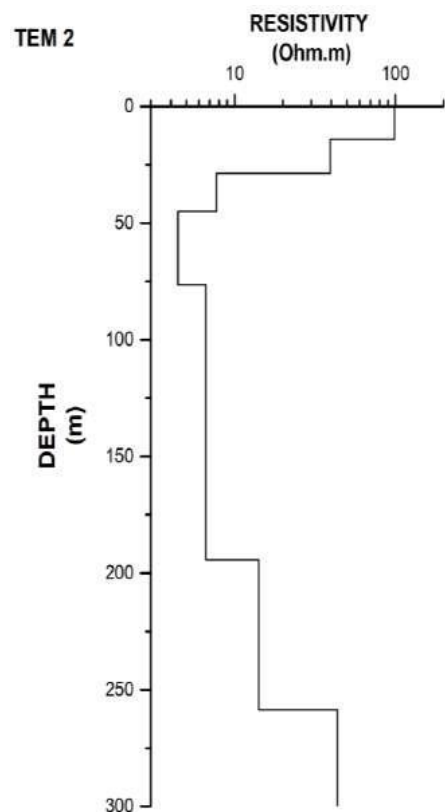
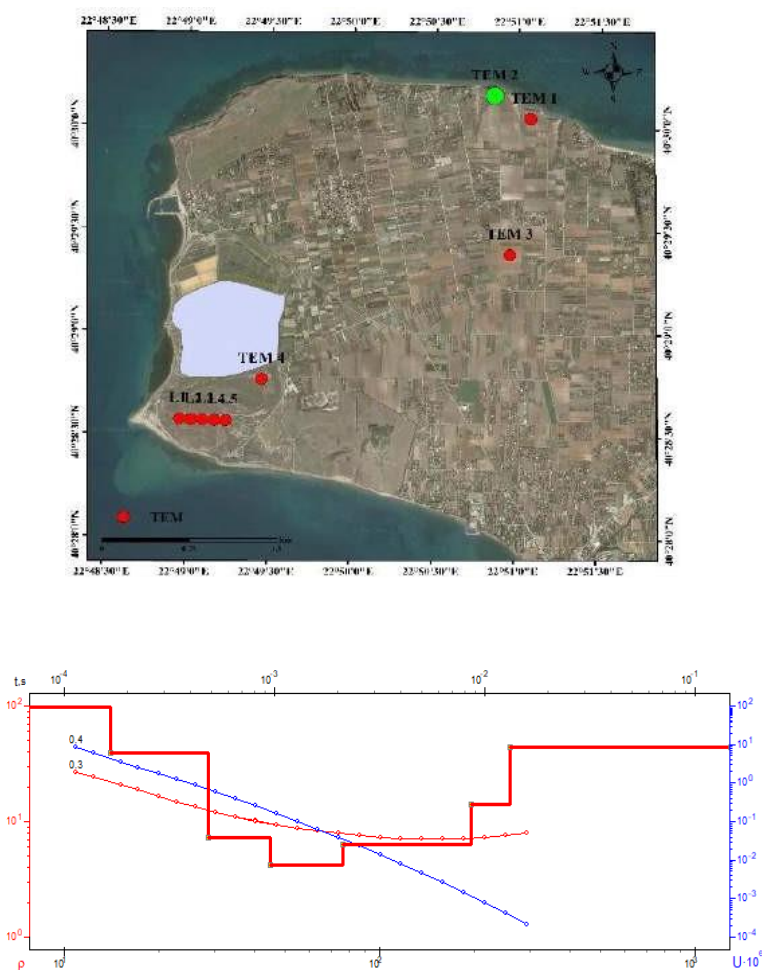


Σχήμα 6.17 Θέσεις των μετρήσεων TEM, στην περιοχή του Αγγελοχωρίου.

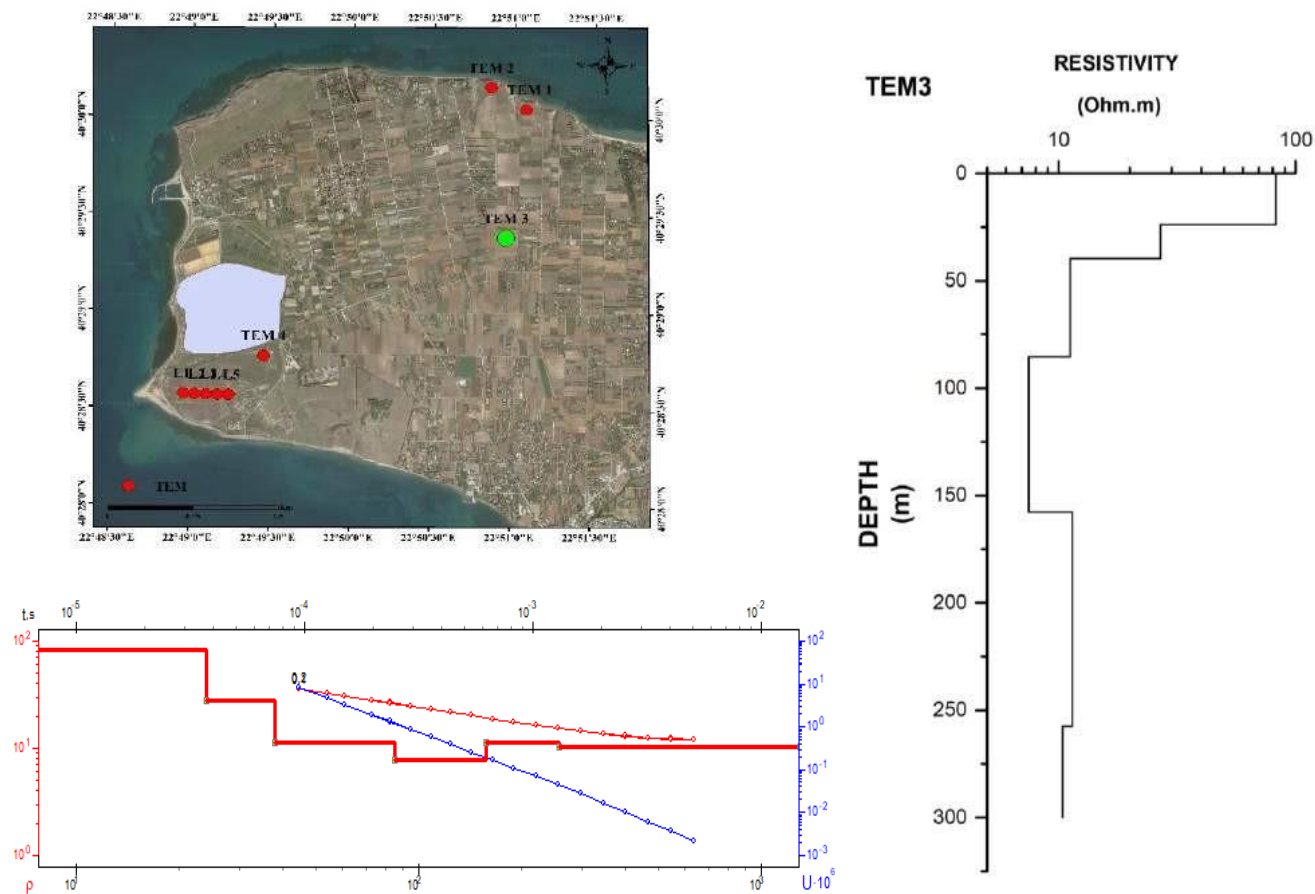


Σχήμα 6.18. Αποτελέσματα της μεθόδου TEM, για τη μέτρηση TEM-1 με RMS 0.2%

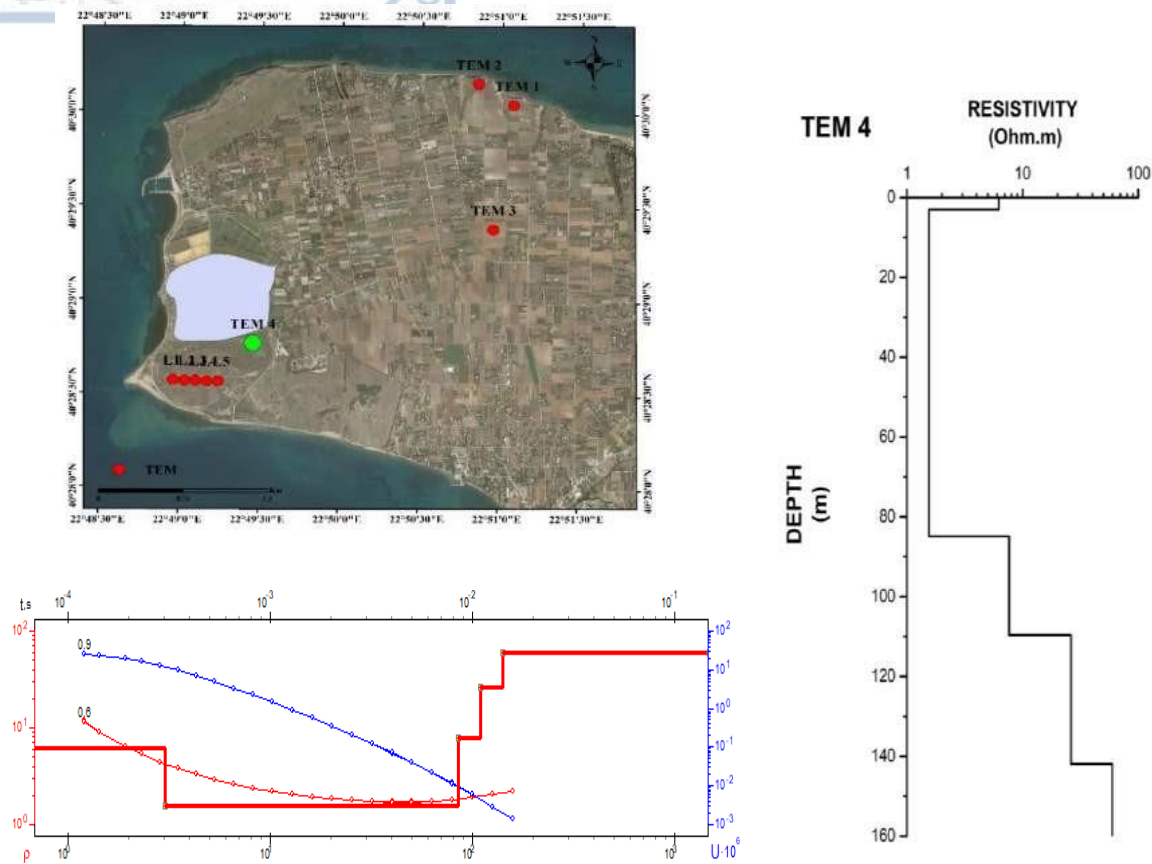
TEM-2



Σχήμα 6.19. Αποτελέσματα της μεθόδου TEM, για τη μέτρηση TEM-2 με RMS 0.4%



Σχήμα 6.20. Αποτελέσματα της μεθόδου TEM, για τη μέτρηση TEM-3 με RMS 0.2%



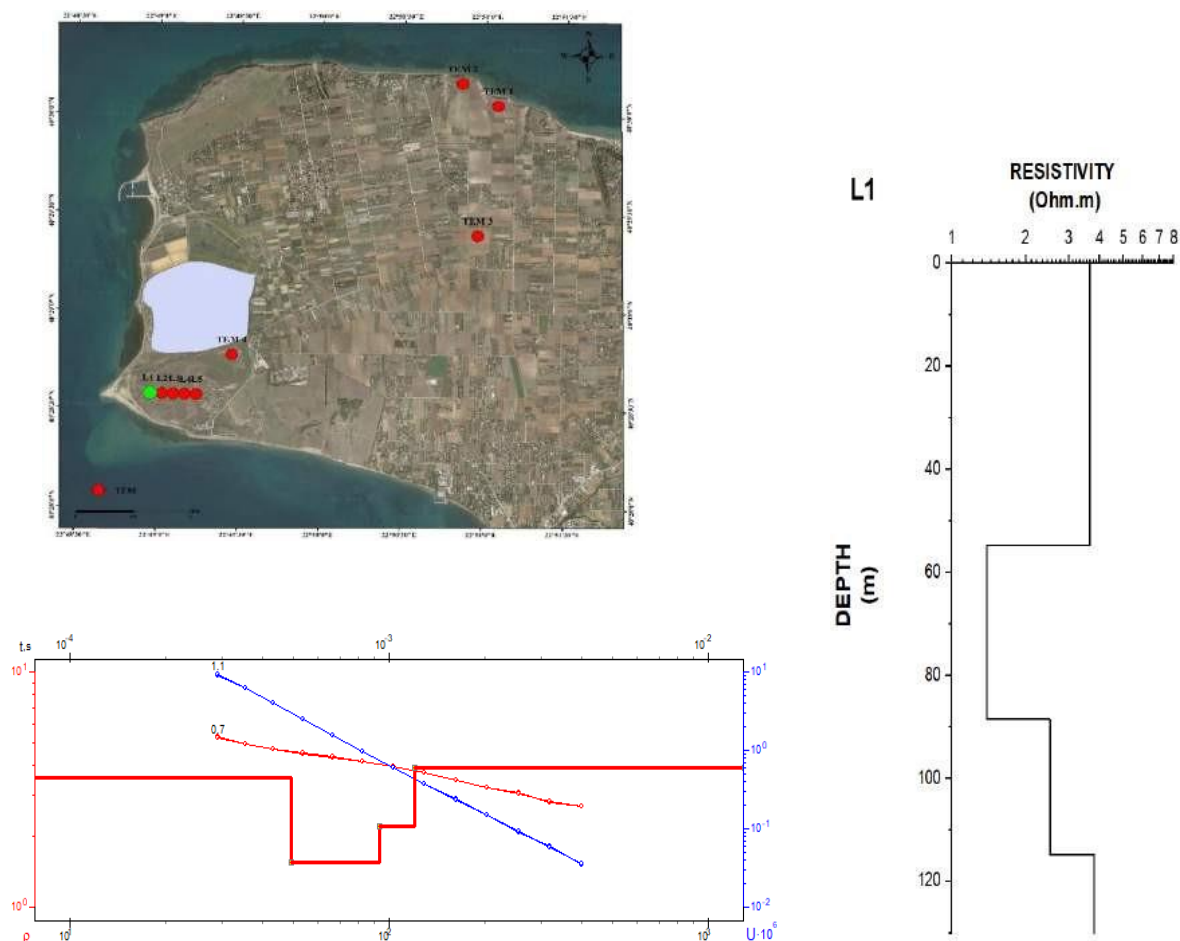
Σχήμα 6.21. Αποτελέσματα της μεθόδου TEM, για τη μέτρηση TEM-4 με RMS 0.9%

Πίνακας 6.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της μεθόδου TEM, (TEM 1-TEM 4). Οι αντιστάσεις των στρωμάτων είναι σε (Ohm.m) , ενώ τα πάχη και το βάθος τους σε (m). Το πρώτο στρώμα περιέχει επιπρόσθετα το υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους.

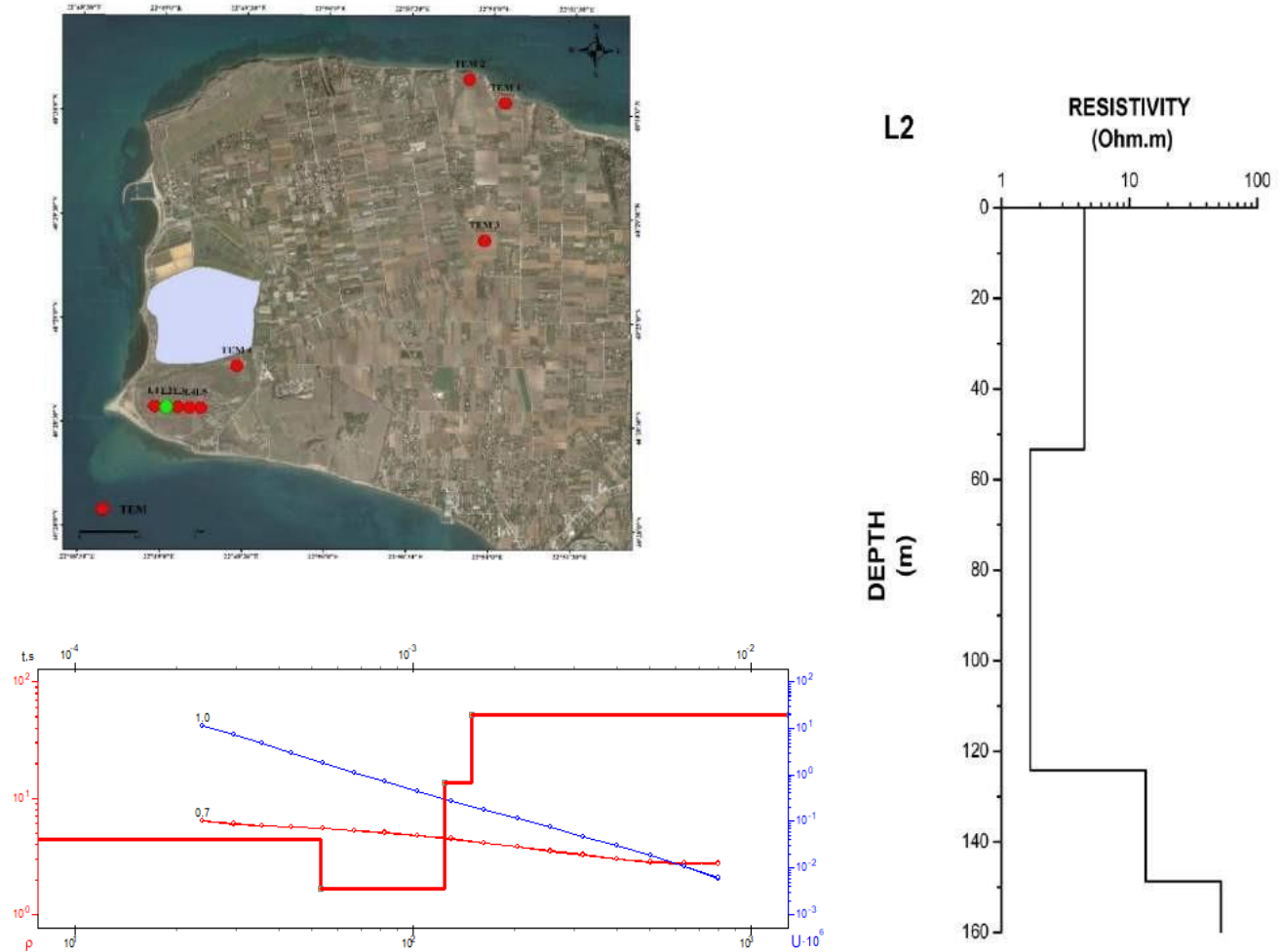
	TEM 1			TEM 2			TEM 3			TEM 4		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ρ	h	z	ρ	h	z	ρ	h	z	ρ	h	z
ΣΤΡΩΜΑ 1	50.335	24.412	0/20	98.624	14.02	0	82.43	23.959	0	6.214	3.005	0
ΣΤΡΩΜΑ 2	22.389	17.466	24.412	39.317	14.596	14.02	28.206	14.117	23.959	1.547	81.886	3.005
ΣΤΡΩΜΑ 3	5.189	55.897	41.878	7.314	16.319	28.616	11.291	47.263	38.076	7.641	24.741	84.891
ΣΤΡΩΜΑ 4	8.613	119.402	97.775	4.192	31.616	44.935	7.836	72.213	85.339	26.162	32.297	109.632
ΣΤΡΩΜΑ 5	26.066		217.18	6.404	117.778	76.551	11.439	99.981	157.553	59.594		141.929
ΣΤΡΩΜΑ 6				14.121	64.256	194.329	10.399		257.534			
ΣΤΡΩΜΑ 7				43.694								

ΨΕΥΔΟΤΟΜΗ TEM L1-L5

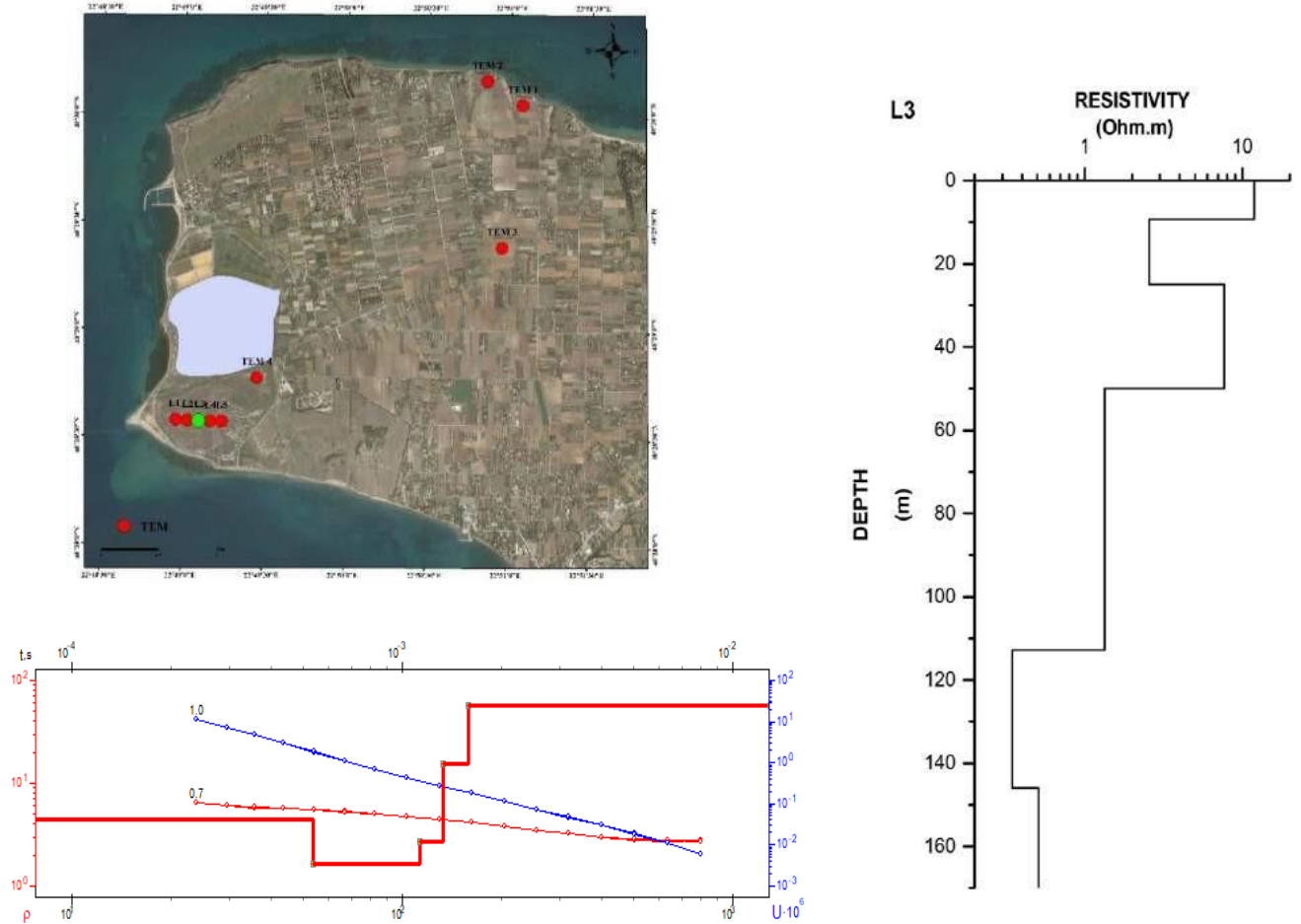
L1



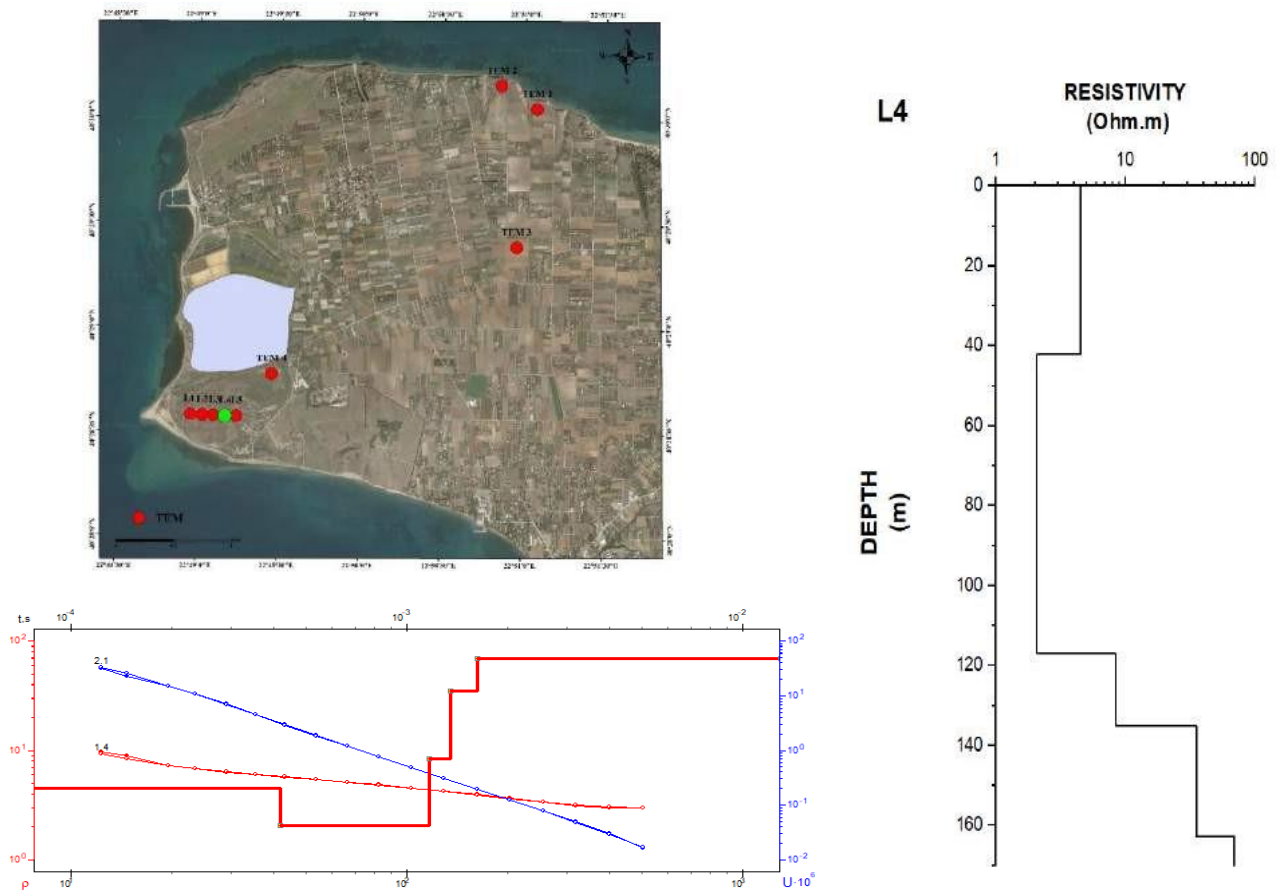
Σχήμα 6.22 Αποτελέσματα της μεθόδου TEM, για τη μέτρηση L1 με RMS 1.1%.



Σχήμα 6.23 Αποτελέσματα της μεθόδου TEM, για τη μέτρηση L2 με RMS 1.0%.

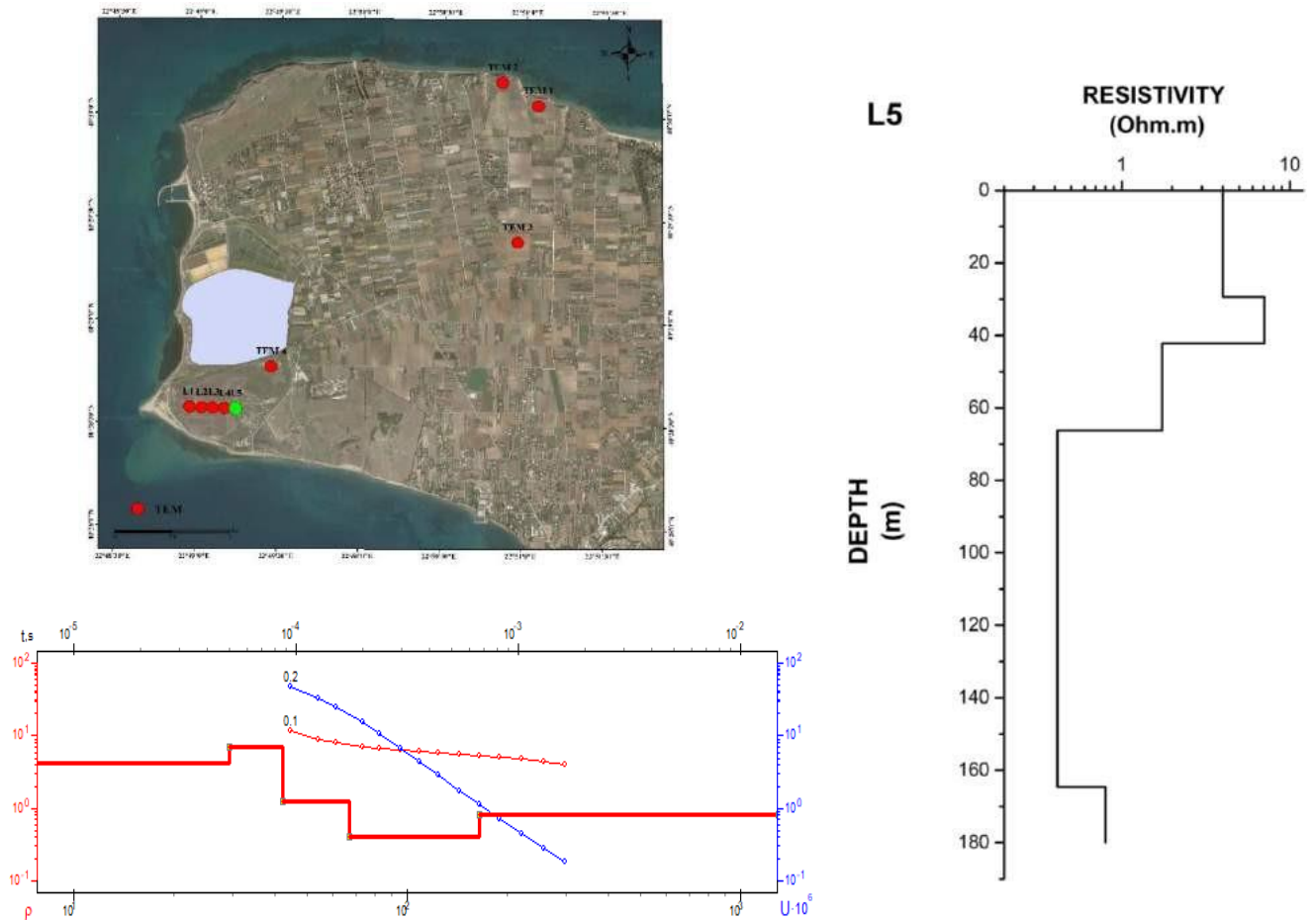


Σχήμα 6.24 Αποτελέσματα της μεθόδου TEM, για τη μέτρηση L3 με RMS 0.7%.

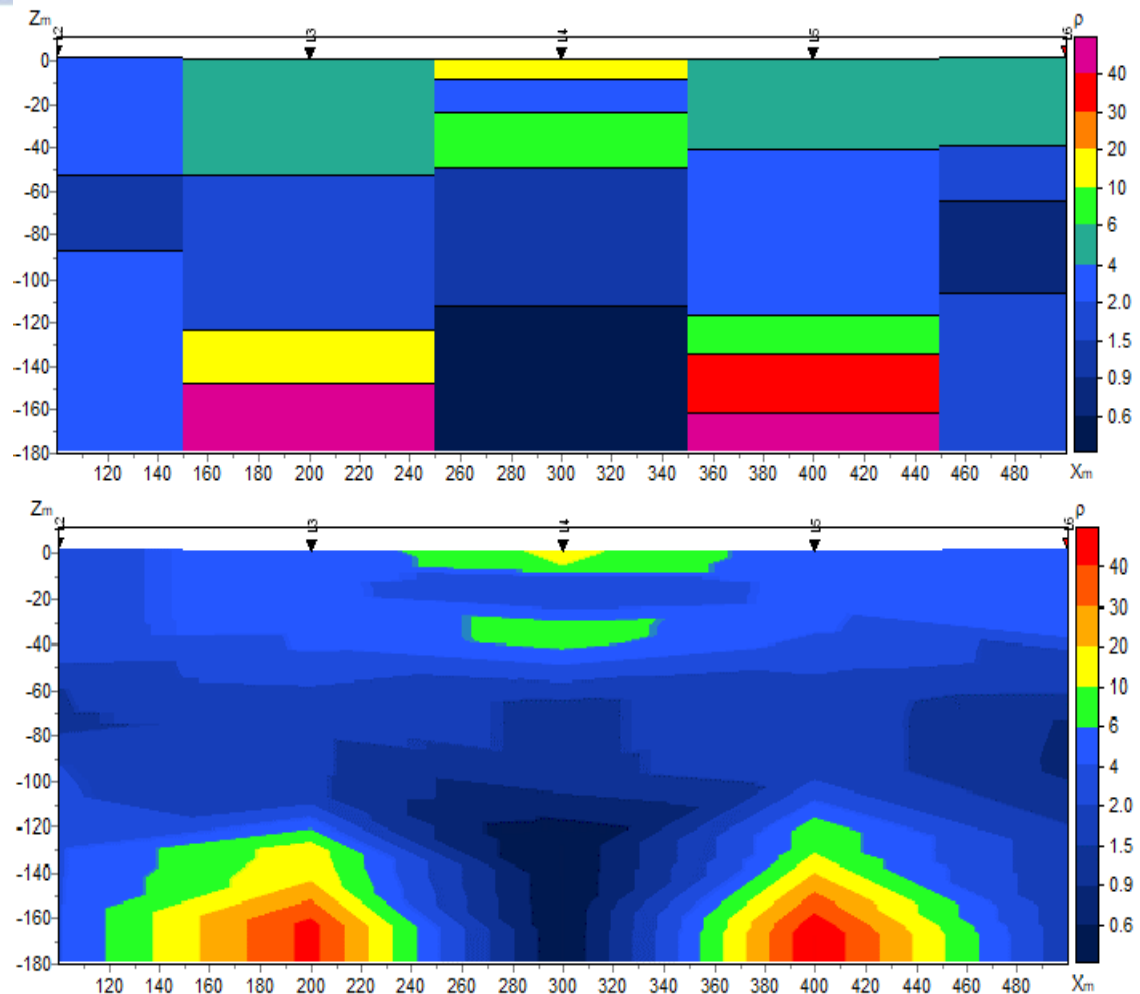


Σχήμα 6.25 Αποτελέσματα της μεθόδου TEM, για τη μέτρηση L4 με RMS 2.1%.

L5



Σχήμα 6.26 Αποτελέσματα της μεθόδου TEM, για τη μέτρηση L5 με RMS 0.2%.



Σχήμα 6.27 Γεωηλεκτρική τομή της κατανομής της αντίστασης των L1-L5, με λογαριθμική χρωματική κλίμακα σε α) στρώσεις και β) με περίγραμμα (contour).

Πίνακας 6.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της μεθόδου TEM κατά μήκος της μέτρησης L1-L5. Οι αντιστάσεις των στρωμάτων είναι σε (Ohm.m) , ενώ τα πάχη και το βάθος τους σε (m)

L1				L2			L3		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ρ	h	z	ρ	h	z	ρ	h	z
ΣΤΡΩΜΑ 1	3.651	54.746	0	4.444	53.337	0	11.888	9.24	0
ΣΤΡΩΜΑ 2	1.383	33.801	54.746	1.674	70.927	53.337	2.563	15.694	9.24
ΣΤΡΩΜΑ 3	2.508	26.281	88.546	13.403	24.498	124.264	7.656	25.04	24.934
ΣΤΡΩΜΑ 4	3.796		114.827	51.849		148.762	1.334	62.851	49.974
ΣΤΡΩΜΑ 5							0.347		112.825
ΣΤΡΩΜΑ 6							0.51		146
L4				L5					
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ρ	h	z	ρ	h	z			
ΣΤΡΩΜΑ 1	4.501	41.946	0	4.154	29.341	0			
ΣΤΡΩΜΑ 2	2.073	74.984	41.946	7.062	12.877	29.341			
ΣΤΡΩΜΑ 3	8.381	18.221	116.93	1.237	25.095	42.218			
ΣΤΡΩΜΑ 4	35.191	27.501	135.15	0.414	97.272	67.313			
ΣΤΡΩΜΑ 5	69.345		162.651	0.799		164.586			

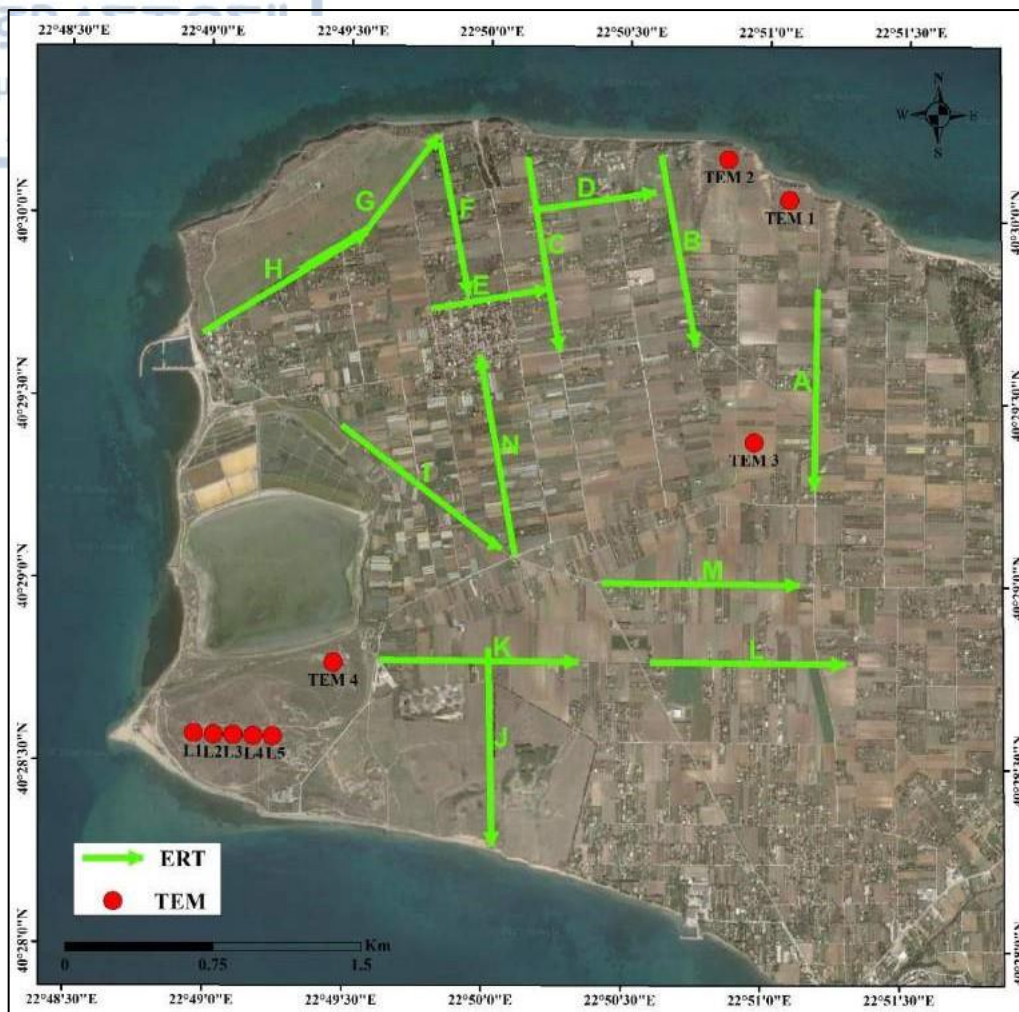
7. ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρατίθεται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας σε συνδυασμό με αυτά της μεθόδου των παροδικών πεδίων, TEM, όπου είναι εφικτό. Επιπλέον, παρουσιάζονται ενοποιημένες οι ηλεκτρικές τομογραφίες σε τρισδιάστατη μορφή, με σκοπό τον εντοπισμό των ζωνών υφαλμύρινσης, σε όλη την έκταση του Αγγελοχωρίου. Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση αλλά και συνδυαστική ερμηνεία με τα γεωφυσικά αποτελέσματα και τα στοιχεία των γεωτρήσεων, προηγούμενης μελέτης που έχει υλοποιηθεί στην περιοχή.

7.1 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ TEM

Οι τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας και τα διαγράμματα της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, προσφέρουν τη δυνατότητα εντοπισμού των ζωνών υφαλμύρινσης σε όλη την περιοχή του Αγγελοχωρίου. Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιείται συνήθως σε έρευνες μικρού βάθους, λόγω της υψηλής ευαισθησίας της κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Αντίθετα, η μέθοδος TEM ενδείκνυται σε έρευνες μεγάλους βάθους και μπορεί να ορίσει αγωγίμους σχηματισμούς. Οι μετρήσεις TEM που εφαρμόστηκαν στην παρούσα έρευνα, ενισχύουν τις πληροφορίες σχετικά με τους σχηματισμούς του υπεδάφους και την ύπαρξη υφάλμυρου νερού σε αυτούς.

Για την καλύτερη συνδυαστική ερμηνεία και σύγκριση των μεθόδων, τα αποτελέσματα των μετρήσεων TEM παρουσιάζονται με τη μορφή στηλών και διαχωρίζονται με τη χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε στις ηλεκτρικές τομογραφίες. Το βάθος των στρωμάτων περιλαμβάνει το υψόμετρο του ανάγλυφου από τη στάθμη της θάλασσας.



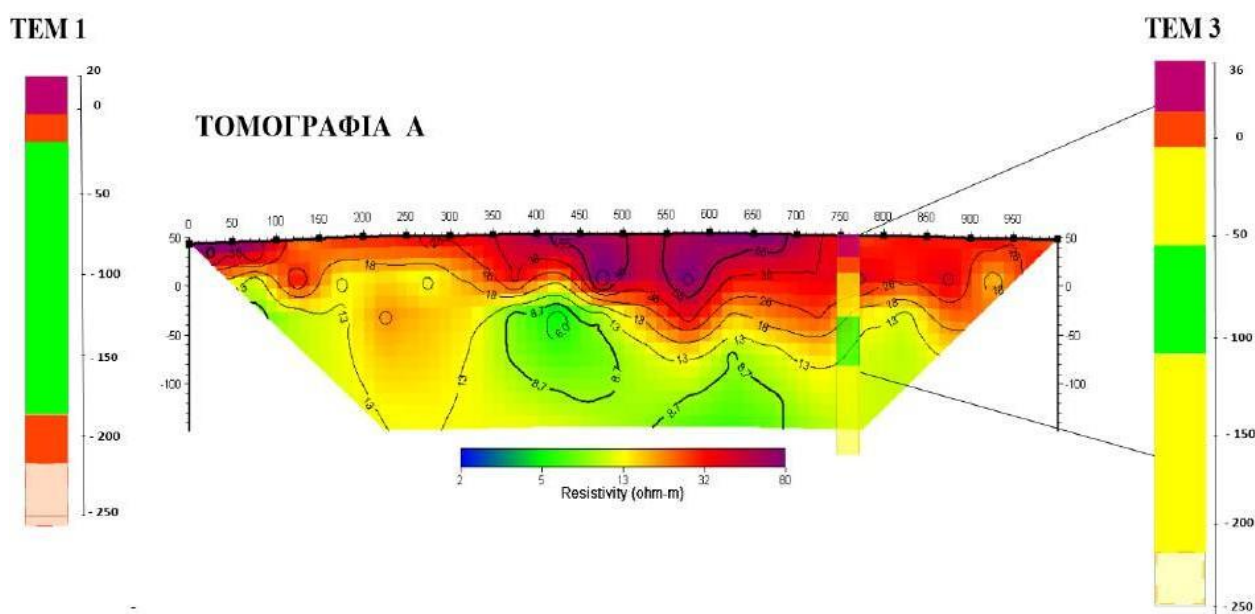
Σχήμα 7.1 Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας και της μεθόδου TEM που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή του Αγγελοχωρίου.

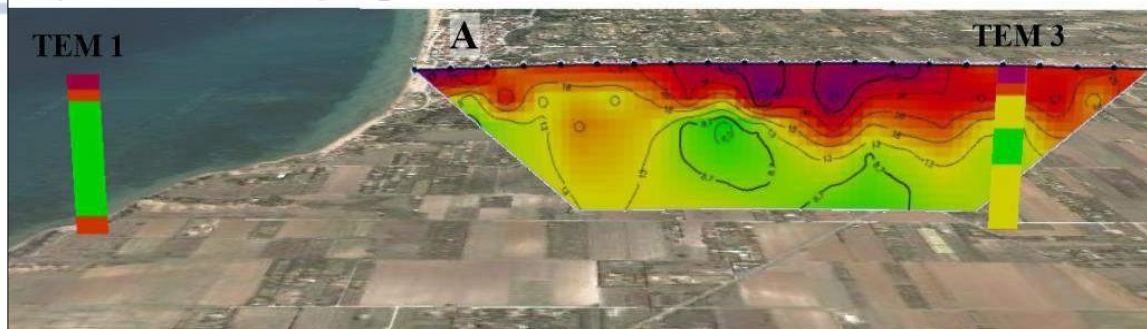
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Α, TEM-1 ΚΑΙ TEM-3

Η τομογραφία Α όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.2, βρίσκεται σε απόσταση 300 m περίπου από τη μέτρηση TEM-3 και οι θέσεις των μετρήσεων ανήκουν στο ΒΑ τμήμα της περιοχής μελέτης. Σύμφωνα με την κατανομή των αντιστάσεων που παρουσιάζουν και τα δύο γεωφυσικά μοντέλα, λιθολογικά και στρωματογραφικά συμπίπτουν. Τα επιφανειακά στρώματα της μέτρησης TEM-3 χαρακτηρίζονται από υψηλής αντίστασης σχηματισμούς, 82 και 28 Ohm.m (πρώτο και δεύτερο στρώμα αντίστοιχα), τα οποία αποτελούνται από μάργες ή ψαμμίτες ή και ασβεστολιθικά πετρώματα με ενδεχόμενη παρουσία υδροφόρου. Έπειτα, ακολουθούν ενδιάμεσες τιμές αντιστάσεων, 11 και 8 Ohm.m, που παραπέμπουν αντίστοιχα σε αργιλοαμμώδη εδάφη και σε αργιλικό υλικό

με υποψία υφαλμύρινσης. Στη συνέχεια η μέτρηση TEM-3 εντοπίζει εκ νέου σχηματισμό σε βάθος -220 m και τιμή ειδικής αντίστασης 11 Ohm.m. Το τελευταίο στρώμα της μέτρησης των παροδικών πεδίων ξεπερνάει το βάθος απόκρισης της ηλεκτρικής τομογραφίας A, ωστόσο το βάθος μέχρι το οποίο εκτείνεται παραμένει άγνωστο.

Η τομογραφία A μπορεί επίσης να συσχετισθεί με τη μέτρηση TEM-1, η οποία απέχει περίπου 700 m από αυτήν. Η TEM-1, παρόλο που βρίσκεται παραθαλάσσια, παρουσιάζει τιμές αντιστάσεων παρόμοιες με την τομή A. Τα επιφανειακά στρώματα εμφανίζουν αντιστάσεις 50 και 23 Ohm.m (μοβ και κόκκινο χρώμα) και βαθύτερα, οι αντιστάσεις μειώνονται στα 5 Ohm.m (πράσινο χρώμα), υποδηλώνοντας την ύπαρξη αργιλικού υλικού με υποψία υφάλμυρου νερού. Σε αντίθεση με την τομογραφία A, η μέτρηση της μεθόδου TEM-1 φθάνει σε μεγαλύτερα βάθη και εντοπίζει στα -200 m (βάθος από την επιφάνεια της θάλασσας), σχηματισμό με τιμή ειδικής αντίστασης 23 Ohm.m που αντιστοιχεί σε άμμο ή χαλίκια ή και αργιλικό υλικό με πιθανή παρουσία υδροφορίας.





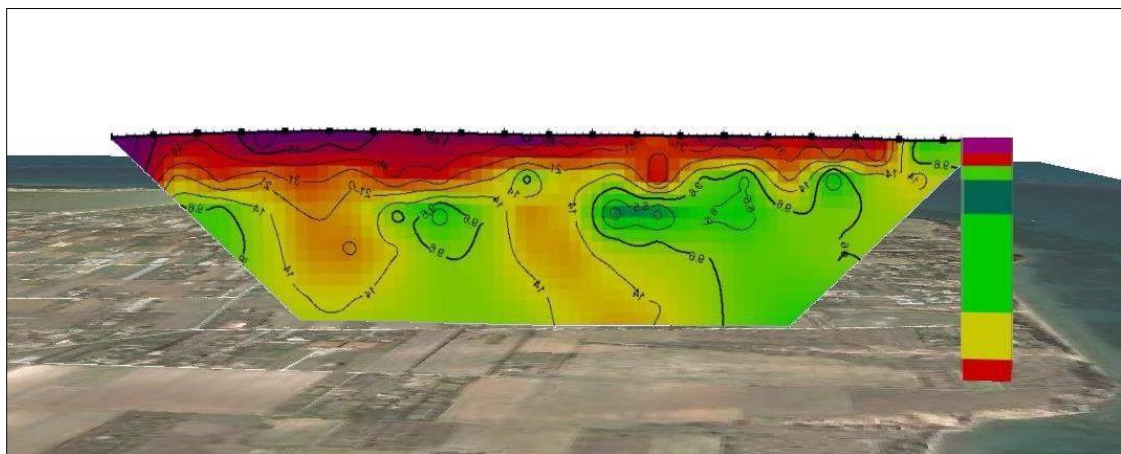
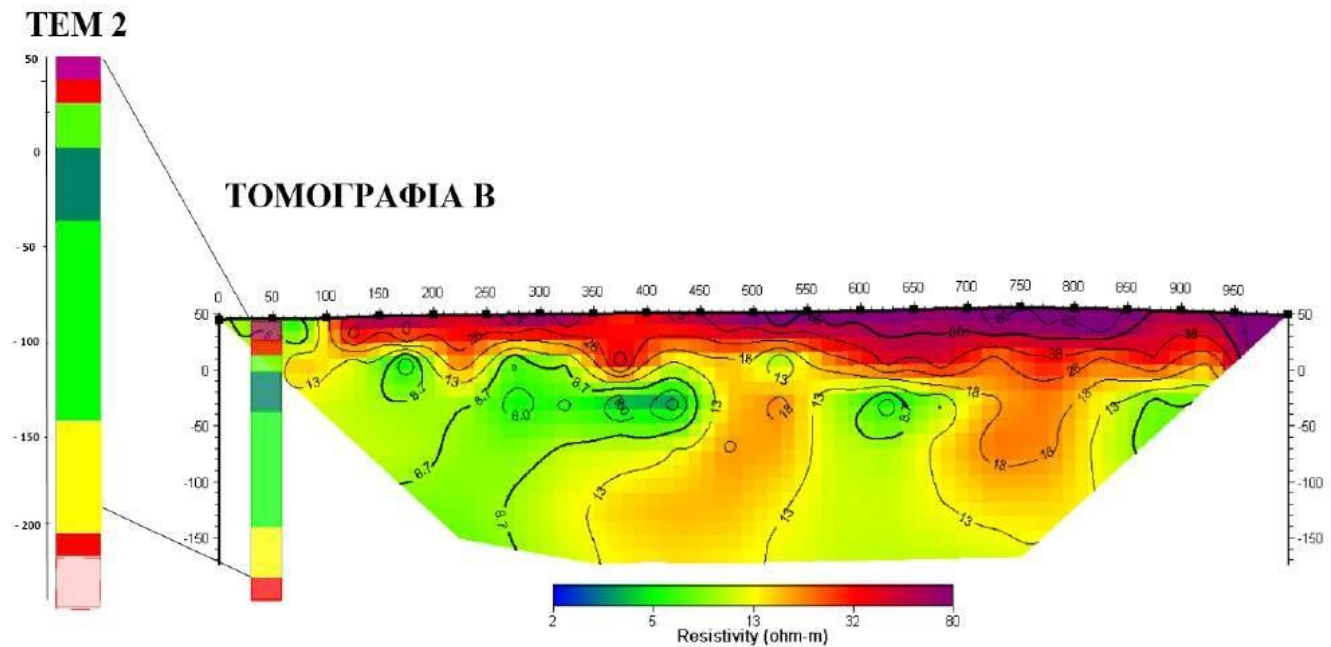
Σχήμα 7.2 Συνδυαστική ερμηνεία της ηλεκτρικής τομογραφίας Α με τη μέτρηση TEM-1 και TEM-3.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Β ΚΑΙ TEM-2

Στο Σχήμα 7.3, απεικονίζονται τα αποτελέσματα της κατανομής των αντιστάσεων της τομογραφίας Β με τη μέτρηση TEM-2, η οποία απέχει 300 m από αυτήν. Η ηλεκτρική τομογραφία Β, παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά με τη μέτρηση TEM-2. Τα επιφανειακά στρώματα της TEM-2, παρουσιάζουν υψηλές αντιστάσεις, με τιμές 98 και 39 Ohm.m, τα οποία ενδεχομένως ανήκουν σε ασβεστόλιθο ή και σε μαργαϊκούς ή ψαμμιτικούς σχηματισμούς με παρουσία υδροφορίας. Στη συνέχεια, παρατηρείται σχηματισμός αντίστασης 7 Ohm.m που συνίσταται από αργιλικό υλικό, και διακόπτεται από στρώμα πάχους 40 m και αντίστασης 4 Ohm.m. Οι χαμηλές αντιστάσεις υποδεικνύουν την παρουσία υφάλμυρου νερού, πιθανώς σε αργιλικούς σχηματισμούς, όπως συμβαίνει και στην τομογραφία Β. Το αργιλικό στρώμα συνεχίζει εκ νέου μέχρι τα -140m βάθος (από την στάθμη της θάλασσας), με πιθανή παρουσία υφάλμυρου νερού. Έπειτα ακολουθούν τιμές ειδικής αντίστασης 14 και 43 Ohm.m που αντιστοιχούν σε αργιλοαμμώδες και σε μαργαϊκό ή ψαμμιτικό σχηματισμό με πιθανή παρουσία υδροφορίας. Με βάση τη μέτρηση TEM-2, το τελευταίο αντιστατικό στρώμα ξεκινάει σε βάθος -200 m.

Συμπερασματικά, παρόλο που η μέτρηση TEM-2 δεν αποτελεί τμήμα της ηλεκτρικής τομογραφίας Β, στρωματογραφικά και λιθολογικά είναι όμοιες. Όσον αφορά την ύπαρξη θαλασσινού νερού, οι χαμηλές τιμές των ειδικών αντιστάσεων που

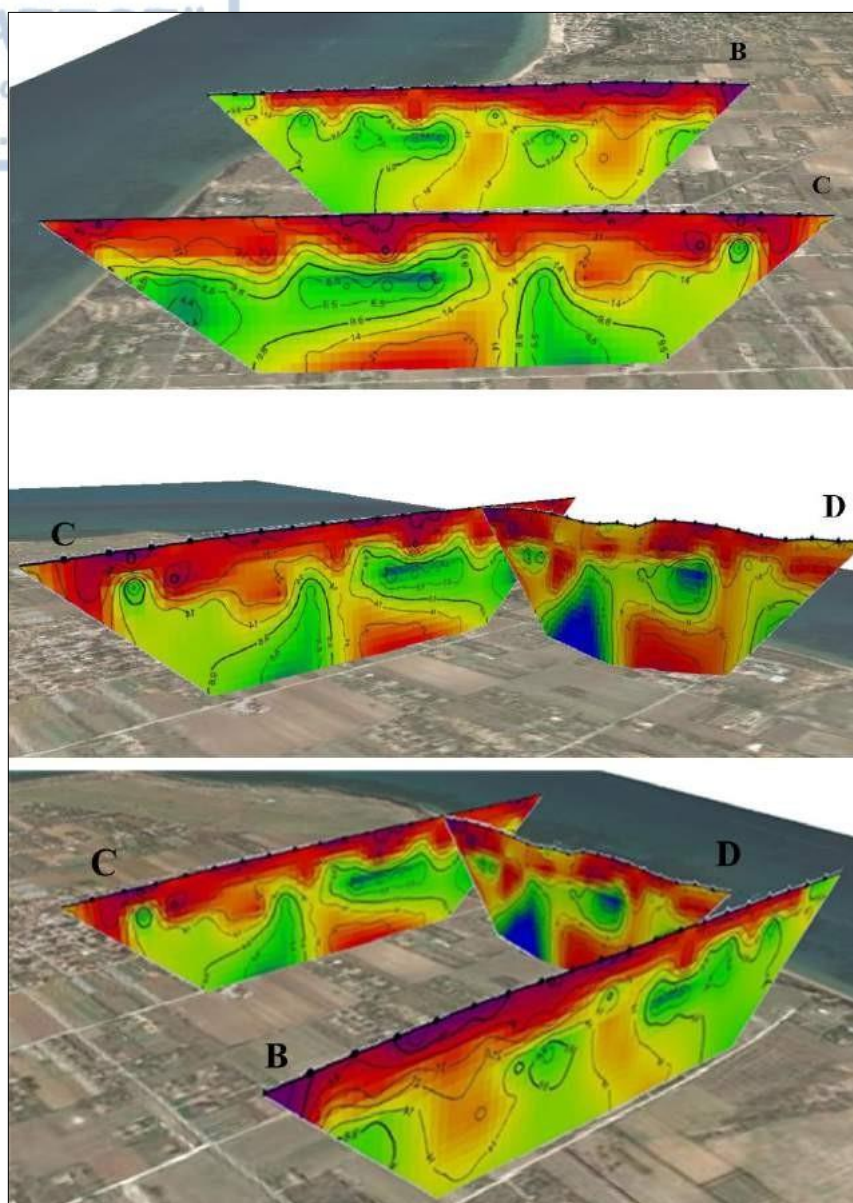
συναντώνται σε βάθος 0 - 40 m και στις δύο μεθόδους, δείχνουν κορεσμένους υφάλμυρους σχηματισμούς.



Σχήμα 7.3 Συνδυαστική ερμηνεία της ηλεκτρικής τομογραφίας Β με τη μέτρηση TEM-2.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ C ΚΑΙ D

Στο Σχήμα 7.4 απεικονίζονται οι τομές B, C και D, οι οποίες εντοπίζονται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης. Τα πρώτα 50 m των επιφανειακών στρωμάτων συνίστανται κυρίως από υψηλής αντίστασης σχηματισμούς, με τιμές που κυμαίνονται από 20 έως 80 Ohm.m και αποτελούνται από μαργαϊκής ή ψαμμιτικής σύστασης πετρώματα ή και με εναλλαγές αμμοχάλικων, σε συνδυασμό με υδροφορία. Έπειτα, ακολουθούν τιμές ειδικές αντίστασης 2-9 Ohm.m (μπλε και πράσινο χρώμα) που δείχνουν τη διείσδυση του θαλασσινού νερού σε αργιλικά πετρώματα ή σε αργιλοαμμώδη εδάφη. Οι χαμηλές αντιστάσεις διακρίνονται καλύτερα στην τομή D, φανερώνοντας τον υφάλμυρο ορίζοντα που εκτείνεται σε βάθη άνω των 150 m (από την επιφάνεια του εδάφους). Επίσης, παρατηρούνται και στις τρεις τομές οι έντονες πλευρικές μεταβολές των ιζημάτων. Ειδικότερα, στην τομή D, και C, ο αντιστατικός σχηματισμός που εναλλάσσεται με τις χαμηλότερες αντιστάσεις, παραπέμπει σε μαργαϊκό ή ψαμμιτικό πέτρωμα με εναλλαγές άμμου ή χαλικιών ή και άργιλο με παρουσία υδροφόρων στρωμάτων.

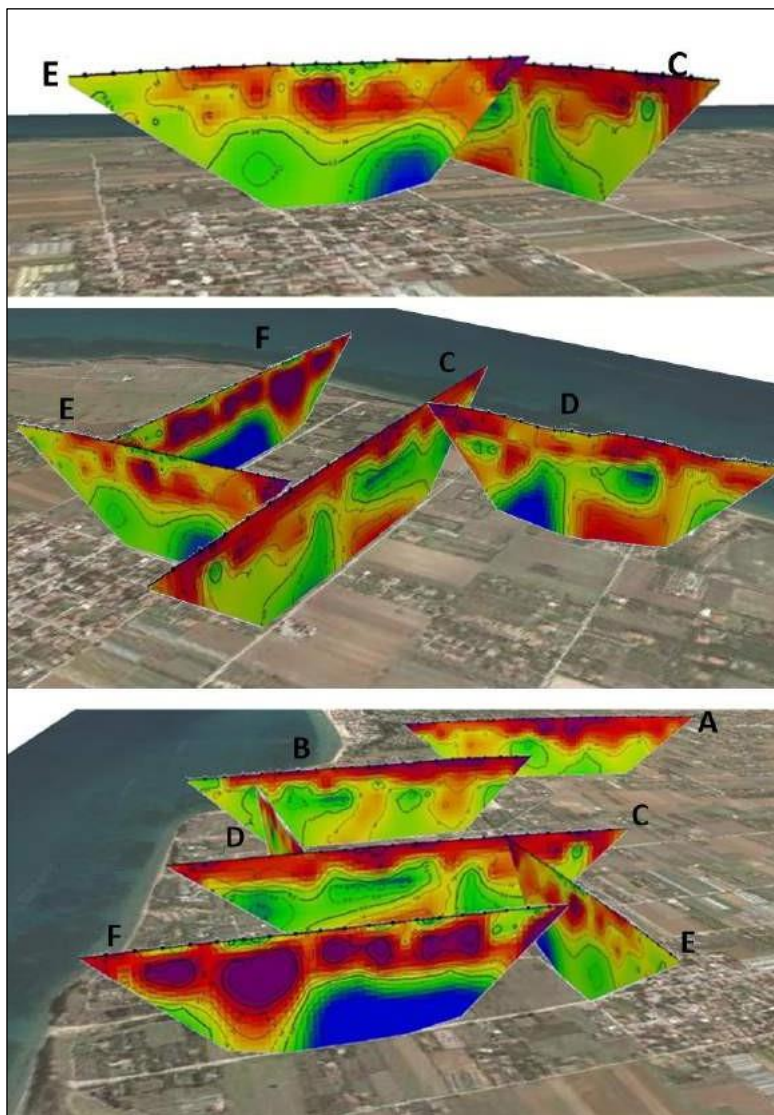


Σχήμα 7.4 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών B,C και D.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ Ε ΚΑΙ F

Η ηλεκτρική τομογραφία E, χωροθετείται βόρεια από το χωριό του Αγγελοχωρίου και τέμνει τις τομογραφίες C και F. Οι αντιστατικοί επιφανειακοί σχηματισμοί (30-60 Ohm.m) συνεχίζουν τμηματικά την εμφάνισή τους στην τομή E, σε συνδυασμό με τις ενδιάμεσες τιμές αντιστάσεων (10-30 Ohm.m). Ωστόσο στην τομή F, παρατηρούνται κυρίως τιμές ειδικής αντίστασης άνω των 80 Ohm.m που παραπέμπουν σε ασβεστολιθικά πετρώματα. Στα υποκείμενα στρώματα της E, παρουσιάζονται

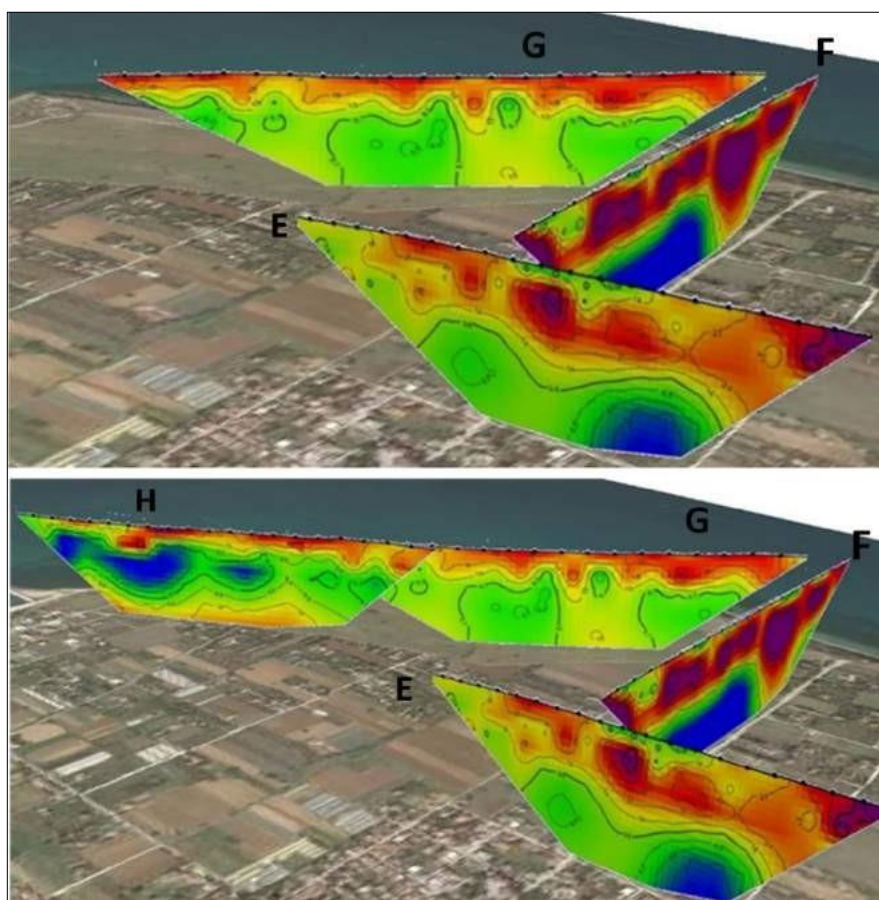
αργίλιοι σχηματισμοί (6-9 Ohm.m), οι οποίοι στο ανατολικό μέρος της είναι εμπλουτισμένοι με υφάλμυρο νερό. Ο ορίζοντας υφαλμύρινης εκτείνεται μέχρι την τομή C. Ταυτόχρονα, εμφανίζεται υφάλμυρος σχηματισμός και στο νότιο τμήμα της τομογραφίας F, γεγονός που υποδεικνύει την πιθανότητα επέκτασής του μέχρι την E, μέσω κάποιας πλευρικής ασυνέχειας.



Σχήμα 7.5 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών E και F, σε συνδυασμό με τις A, B, C, D και G.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ G ΚΑΙ Η

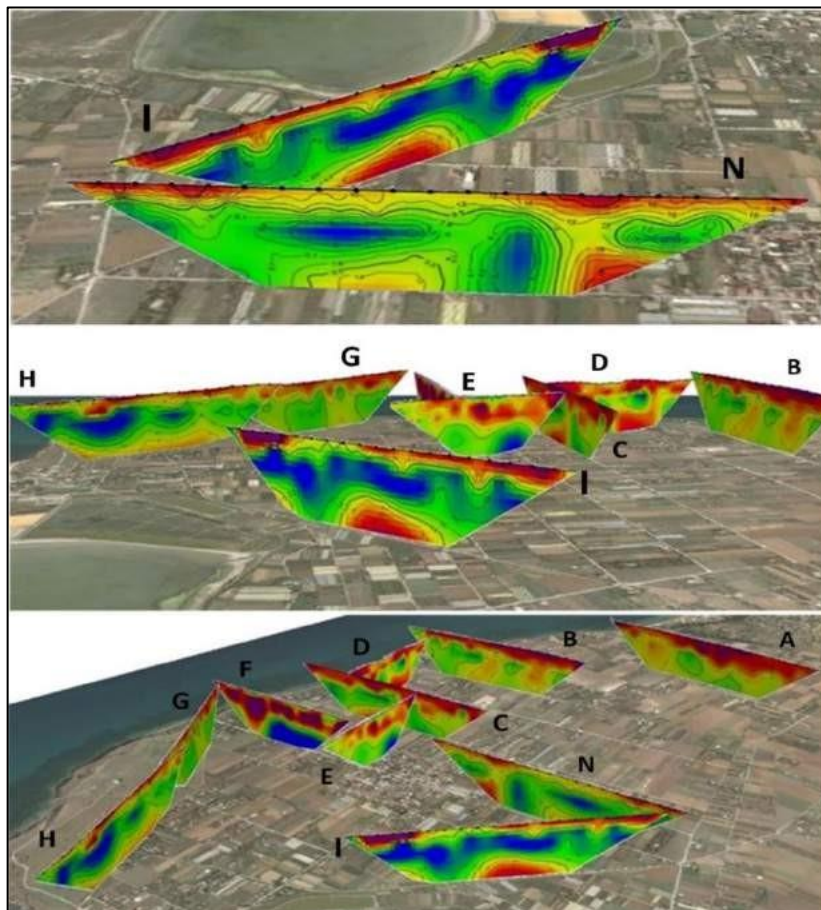
Οι τομογραφίες G, H τοποθετούνται εξωτερικά της βάσης του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού και το τμήμα, από τα 690 m κατά μήκος της H μέχρι και τα 390 m της G είναι κοινό. Τα μοντέλα των δύο τομών, παρουσιάζουν στα επιφανειακά στρώματα τιμές ειδικής αντίστασης 10 έως 30 Ohm.m που παραπέμπουν σε αργιλοαμμώδη εδάφη ή εναλλαγές άμμου με χαλίκια και πιθανώς υδροφορία. Στην τομογραφία G, καθώς αυξάνεται το βάθος, διακρίνονται κυρίως αργιλοκοί σχηματισμοί (πράσινο χρώμα) ενδεχομένως με παρουσία υφάλμυρου νερού, και αργιλοαμμώδη εδάφη (κίτρινο χρώμα). Αντιθέτως, η τομή H από τα -30 m έως και τα -120 m βάθος, εμφανίζει έναν ορίζοντα υφαλμύρινσης που έχει διεισδύσει σε αργιλικό υλικό. Το θαλασσίνο νερό δεν φαίνεται ξεκάθαρα αν εξαπλώνεται στην τομή G, όμως οι τιμές ειδικής αντίστασης (4 Ohm.m) που παρατηρούνται στο δυτικό μέρος της H, υποδηλώνει την ύπαρξη του.



Σχήμα 7.6 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών G, H, F και E.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ Ι ΚΑΙ Ν

Η τομογραφία Ι βρίσκεται βορειοανατολικά από τη λιμνοθάλασσα του Αγγελοχωρίου και κοντά στις αλυκές. Η τομογραφία Ν, χωροθετείται νότια από το χωριό του Αγγελοχωρίου και τέμνει το τέλος της Ι. Οι σχηματισμοί που επικρατούν και στα δύο γεωηλεκτρικά μοντέλα, μέχρι τα -30 m βάθος από την στάθμη της θάλασσας, χαρακτηρίζονται από ενδιάμεσης και υψηλής αντίστασης σχηματισμούς. Έπειτα, εντοπίζονται υφάλμυροι ορίζοντες με μεγάλη έκταση, οι οποίοι φθάνουν μέχρι τη νότια πλευρά του χωριού αλλά εισχωρούν και σε μεγαλύτερα βάθη. Τέλος, και οι δύο ηλεκτρικές τομογραφίες παρουσιάζουν αντιστατικό σχηματισμό στα βαθύτερα στρώματα.

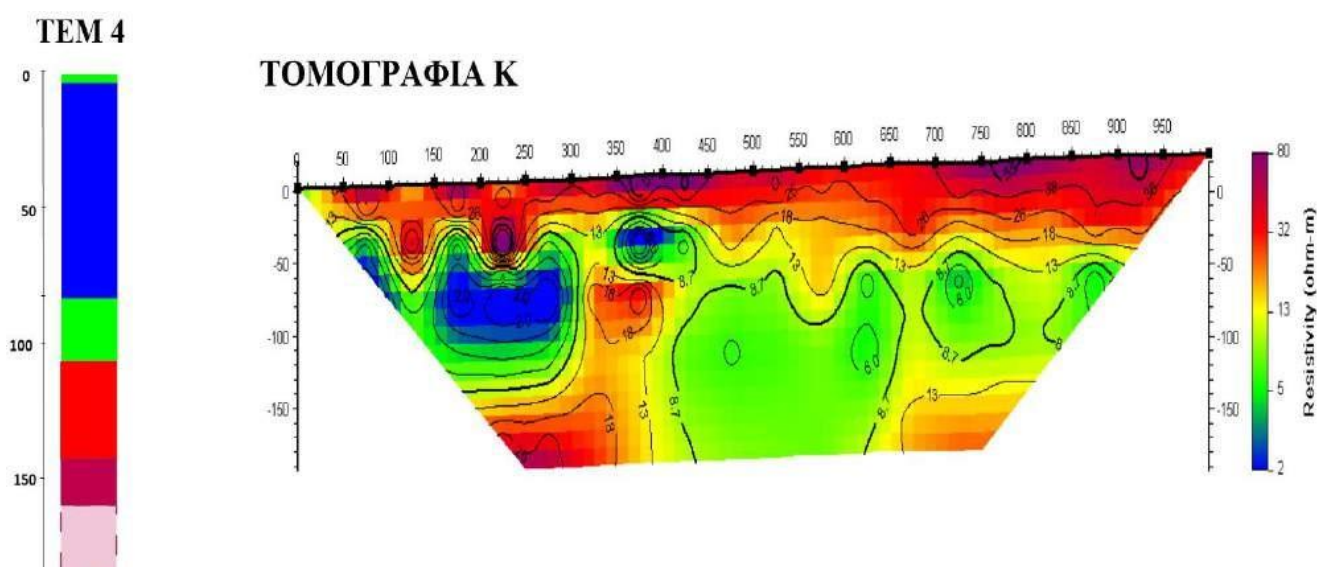


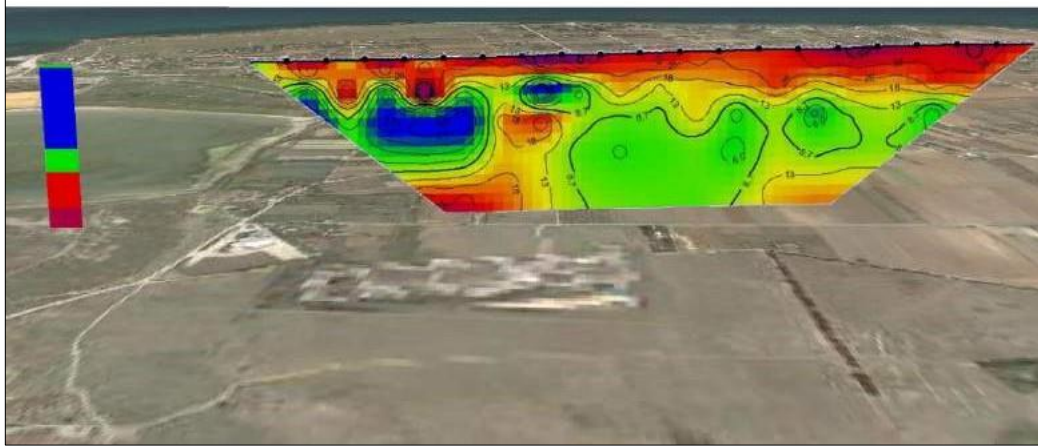
Σχήμα 7.7 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών Ι, Ν και σε συνδυασμό με τις Α, Β, C, D, E, F, G και Η.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Κ ΚΑΙ TEM-4

Η μέτρηση των παροδικών πεδίων TEM-4 και η ηλεκτρική τομογραφία Κ, έχουν πραγματοποιηθεί στο νοτιοανατολικό άκρο της λιμνοθάλασσας του Αγγελοχωρίου και απέχουν μεταξύ τους 200 m. Αρχικά, στη μέτρηση TEM-4, παρατηρείται το επιφανειακό στρώμα, με τιμή αντίστασης 6 Ohm.m (πράσινο χρώμα), το οποίο παραπέμπει σε αργιλικό ή αργιλοαμμώδες υλικό με ενδεχόμενη παρουσία αλμυρού νερού. Στη συνέχεια, εντοπίζεται το θαλασσινό νερό που έχει διεισδύσει στον αργιλικό σχηματισμό, με τιμή ειδικής αντίστασης 1.5 Ohm.m (μπλε χρώμα). Αμέσως μετά, συναντάται εκ νέου αργιλικός σχηματισμός, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη, παρατηρούνται αντιστατικοί σχηματισμοί με τιμές, 26 και 60 Ohm.m που αντιστοιχούν σε αμμοχάλικα και μάργα ή ψαμμίτη, με παρουσία υδροφόρων στρωμάτων.

Η κατανομή των αντιστάσεων των δύο μοντέλων, διαφέρει κυρίως στα επιφανειακά στρώματα, καθώς στην τομογραφία Κ, εμφανίζονται κυρίως υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Ωστόσο, αυτό είναι αναμενόμενο, διότι η περιοχή που περιβάλλει τη λιμνοθάλασσα διακρίνεται από αλλουβιακές αποθέσεις. Επίσης, ο υφάλμυρος ορίζοντας της τομής Κ που αποτελεί συνέχεια της μέτρησης TEM-4, φαίνεται να εκτείνεται μέχρι τα 450 m της τομής, έπειτα, υπάρχει υποψία θαλασσινού νερού στα αργιλικά πετρώματα.

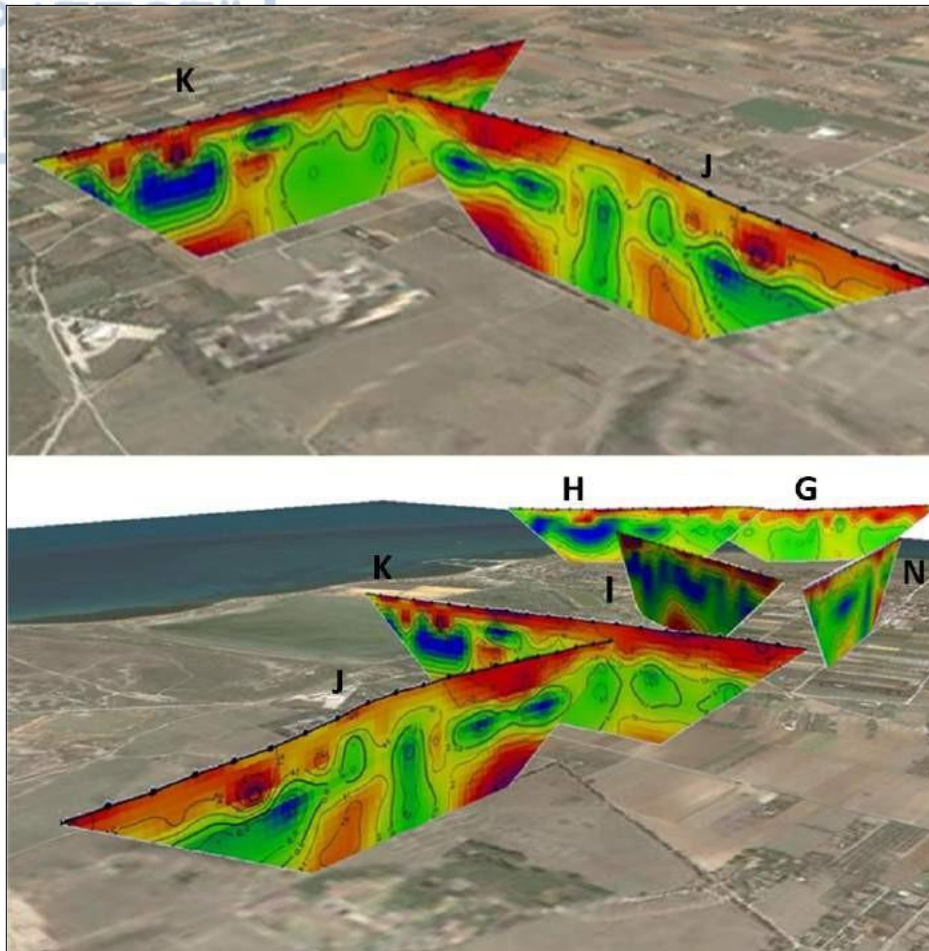




Σχήμα 7.8 Συνδυαστική ερμηνεία της ηλεκτρικής τομογραφίας K με τη μέτρηση TEM-4.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ Κ ΚΑΙ J

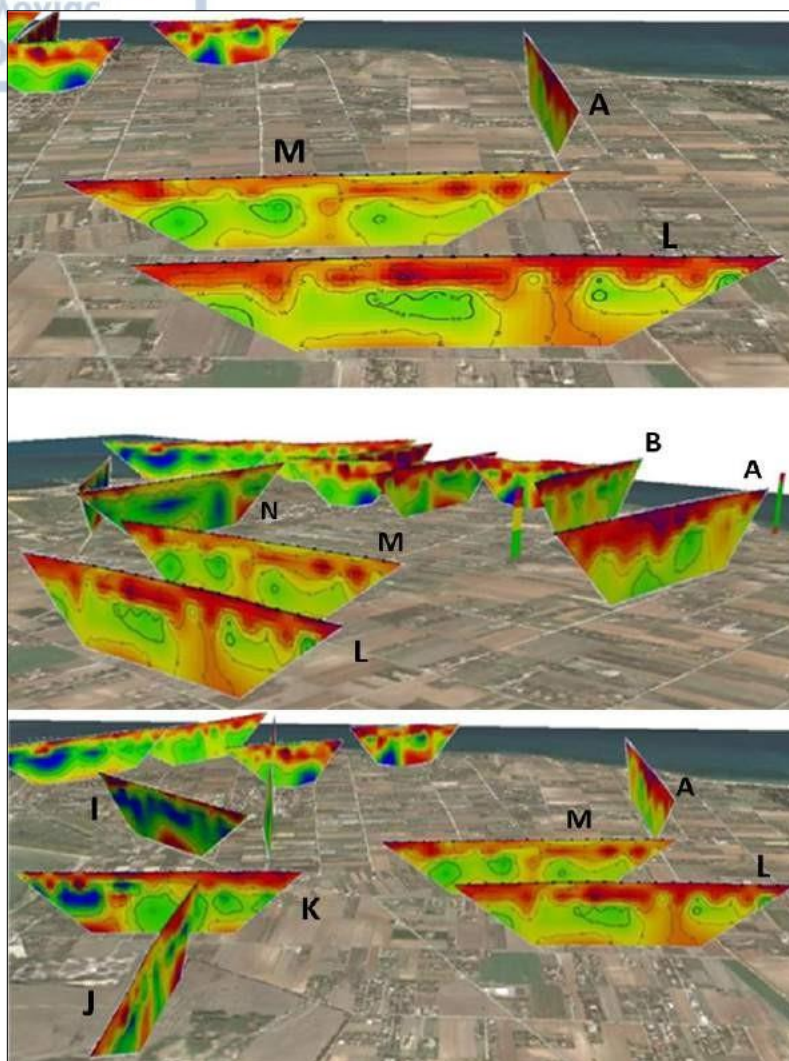
Η τομογραφία J βρίσκεται κάθετα στην τομογραφία K και την τέμνει στα 600 m μήκος. Τα δύο γεωφυσικά μοντέλα στα πρώτα 40 m, χαρακτηρίζονται από ενδιάμεσης και υψηλής αντίστασης σχηματισμούς που αντιστοιχούν σε αργιλοαμμώδη εδάφη ή χαλίκια και μαργαϊκούς ή ψαμμιτικούς σχηματισμούς και πιθανώς ύπαρξη υδροφορίας. Στη συνέχεια, παρατηρούνται τα αργιλικά στρώματα που περιέχουν θαλασσινό νερό, τα οποία, ειδικότερα στην τομή J, εκτείνονται σχεδόν σε όλο το μήκος της. Στα βαθύτερα στρώματα τους, διακρίνονται και στις δύο τομές τμηματικά υψηλές αντιστάσεις με τιμές άνω των 30 Ohm.m, οι οποίες πιθανώς ανήκουν σε ψαμμιτικό ή μαργαϊκό υλικό ή και με άργιλο ή χαλίκια ή άμμοι και παρουσία υδροφορίας.



Σχήμα 7.9 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών J, K και σε συνδυασμό με G, H, I και N.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ L ΚΑΙ M

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες L και M, απαντώνται στο εσωτερικό της περιοχής του Αγγελοχωρίου, απομακρυσμένες σχετικά από τη θάλασσα. Η κατανομή της ειδικής αντίστασης στα δύο γεωφυσικά μοντέλα, υποδεικνύει όμοιες λιθολογίες μεταξύ των δύο τομών. Γενικότερα, στα πρώτα 60 m από την επιφάνεια του εδάφους κυριαρχούν υψηλές τιμές αντιστάσεων που φαίνεται να διεισδύουν και σε μεγαλύτερα βάθη. Στη συνέχεια, παρατηρούνται ενδιάμεσες τιμές αντιστάσεων, 7-13 Ohm.m, που πιθανώς αντιστοιχούν σε αργιλικά και αργιλοαμμώδη εδάφη. Οι πλευρικές μεταβολές των ιζηματογενών πετρωμάτων που αποτυπώνονται και στις δύο τομές, σε βάθος 50 m από την επιφάνεια της θάλασσας, θα μπορούσαν να φανερώνουν την ύπαρξη ενός ρήγματος.



Σχήμα 7.10 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών L, M και σε συνδυασμό J, K, A, I και N.

7.2 ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

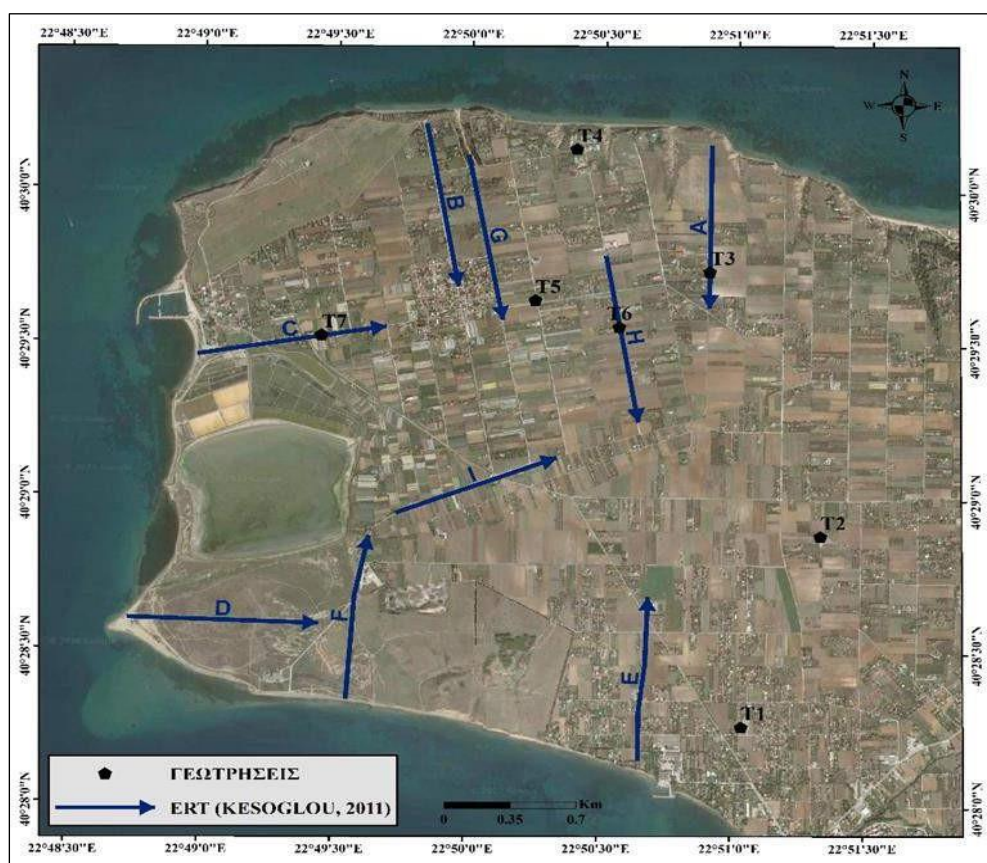
Στην περιοχή του Αγγελοχωρίου, έχει διεξαχθεί μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης, με τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Κεσόγλου Ολυμπίας (2011), στην οποία έγινε χρήση της μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας σε συνδυασμό με δειγματοληψίες του υπόγειου νερού. Στο κεφάλαιο αυτό, παρατίθενται τα αποτελέσματα της μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας της Κεσόγλου, συγκριτικά με αυτά της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στις παλαιότερες ηλεκτρικές τομογραφίες εφαρμόστηκαν οι διατάξεις, Dipole-Dipole και Wenner-Schlumberger, με τα τελικά γεωηλεκτρικά μοντέλα να αποτελούν συνδυασμό αυτών των δύο.

Επίσης, για την καλύτερη ερμηνεία της λιθολογίας του υπεδάφους και της ποιότητας του υπόγειου νερού, χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία των γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή του Αγγελοχωρίου. Έπειτα, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των τομών της ηλεκτρικής τομογραφίας με τις στρωματογραφικές στήλες των γεωτρήσεων αλλά και με τα αποτελέσματα δειγματοληψίας του υπόγειου νερού. Τα διαθέσιμα στοιχεία αφορούν μόνο τον επιφανειακό ορίζοντα της περιοχής του Αγγελοχωρίου. Οι κύριες παράμετροι που υποδεικνύουν την παρουσία υφάλμυρου νερού είναι:

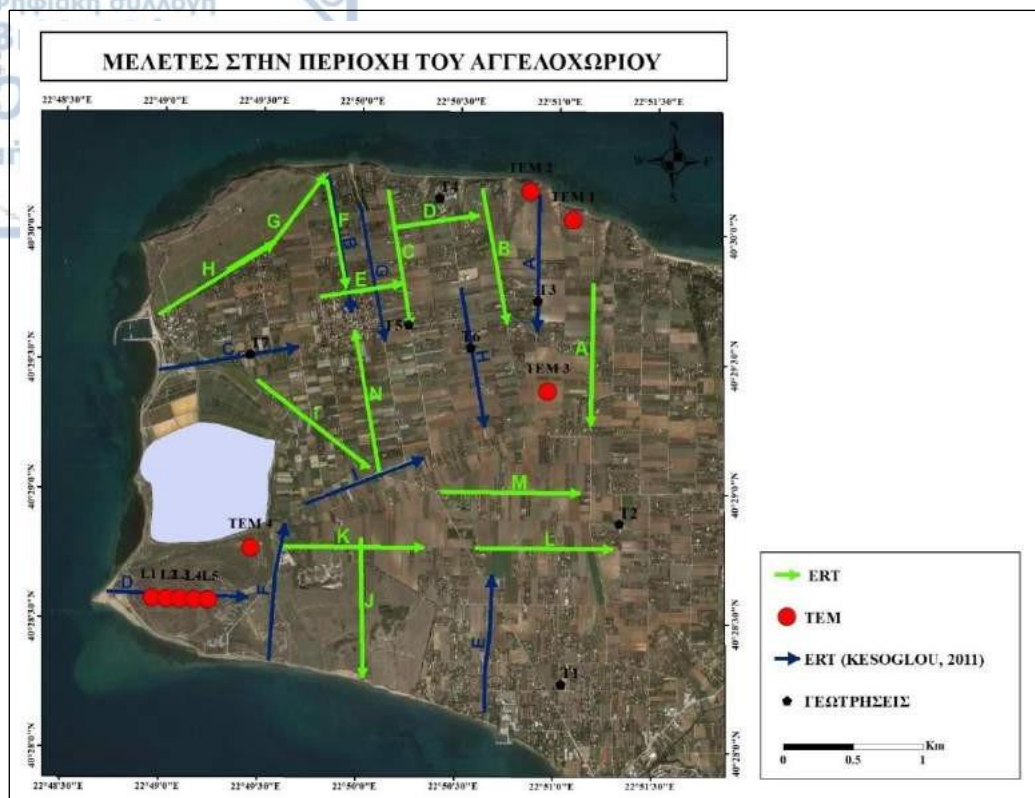
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), με ενδεικτική τιμή 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και με ανώτερη επιτρεπόμενη τιμή 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$,
- Η συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων στο νερό αλάτων ή στερεών (T.D.S). Οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0-1.000 mg/L (γλυκό νερό), 1.000-10.000 mg/L (υφάλμυρο νερό), 10.000-100.000 mg/L (αλμυρό νερό) και για τιμές μεγαλύτερες των 100.000 mg/L το νερό χαρακτηρίζεται ως υπεραλμυρό,
- Τα ιόντα Cl^- , στα οποία το επιθυμητό όριο συγκέντρωσης στο πόσιμο νερό είναι 25 mg/L και το ανώτατο επιτρεπτό στα 250 mg/L και
- Ο συντελεστής Revelle, όταν παίρνει τιμές κοντά ή μεγαλύτερες του 1, δείχνουν την ένδειξη υφαλμύρισης.

Πίνακας 7.1 Θέσεις των ηλεκτρικών τομογραφιών της Κεσόγλου (2011), στην περιοχή μελέτης (Σύστημα συντεταγμένων σε ΕΓΣΑ '87).

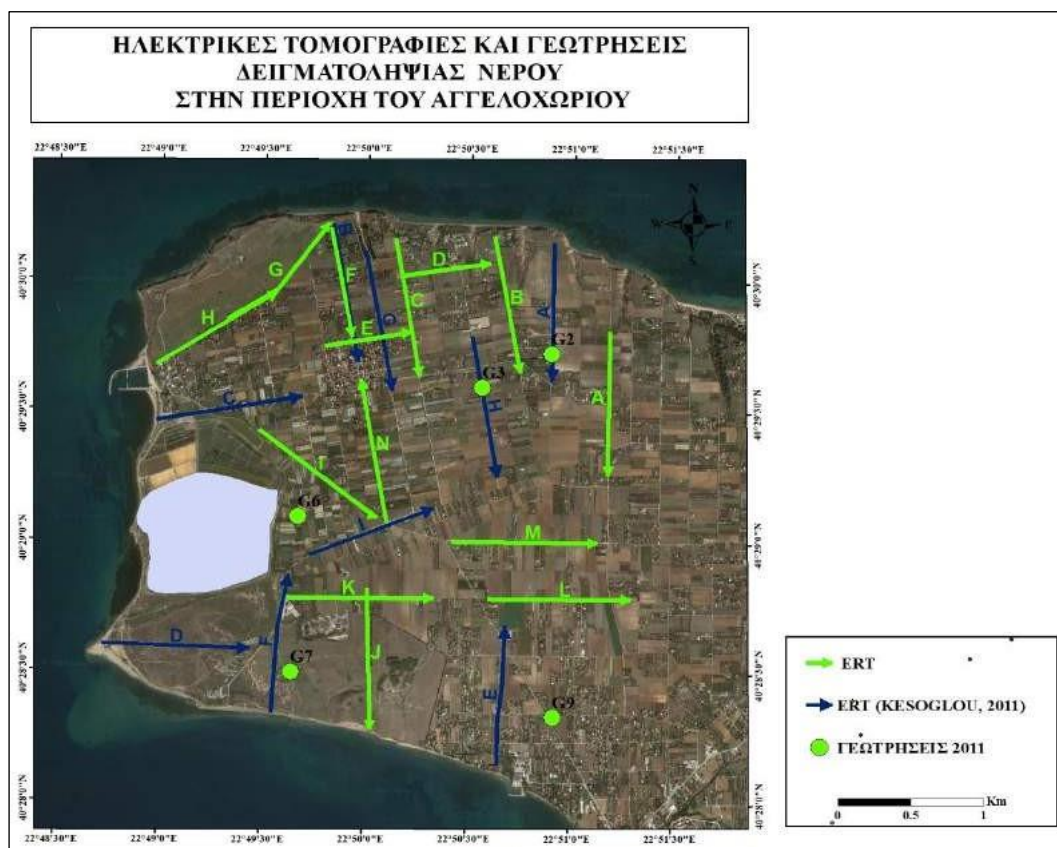
No	X (ΑΡΧΗΣ)	Y (ΑΡΧΗΣ)	X (ΤΕΛΟΥΣ)	Y (ΤΕΛΟΥΣ)
A	402421.1256	4484183.913	402405.2506	4483199.661
H	401857.562	4483521.13	402028.2186	4482517.034
B	400909.0289	4484318.85	401075.7167	4483338.567
C	399691.3902	4482935.165	400695.486	4483097.884
D	399315.1757	4481351.807	400331.1777	4481312.119
F	400474.053	4480851.743	400597.0845	4481839.964
E	402021.8686	4480478.68	402077.4312	4481466.901
G	401130.9491	4484130.139	401310.8662	4483134.245
I	400739.0505	4481974.921	401596.3023	4482305.651



Σχήμα 7.11 Οι θέσεις των γεωτρήσεων με τη λιθολογία του υπεδάφους, στην περιοχή του Αγγελοχωρίου και οι ηλεκτρικές τομογραφίες της Κεσόγλου (2011).



Σχήμα 7.12 Οι θέσεις των γεωτρήσεων και των ηλεκτρικών τομογραφιών της Κεσόγλου (2011) σε συνδυασμό με τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας.



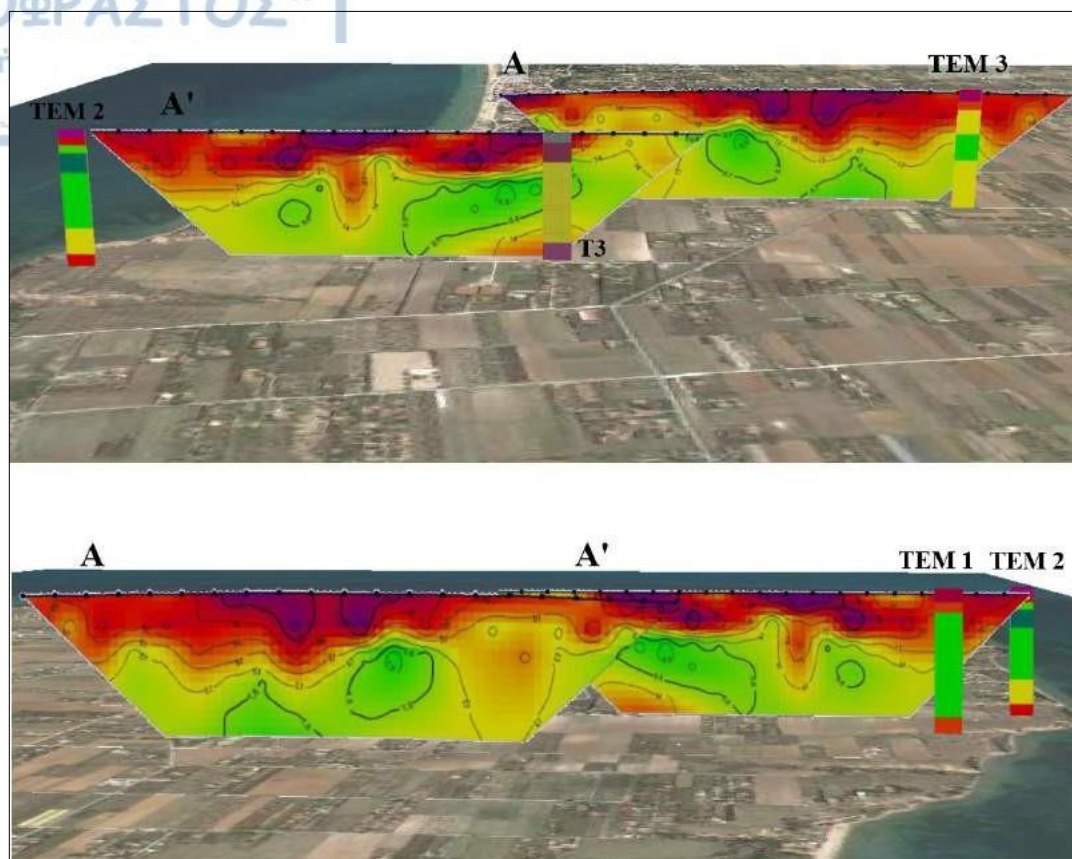
Σχήμα 7.13 Οι θέσεις των γεωτρήσεων δειγματοληψίας νερού και των ηλεκτρικών τομογραφιών της Κεσόγλου (2011) σε συνδυασμό με τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Α, ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Α' (2011), TEM-1, TEM-2 & ΓΕΩΤΡΗΣΗ Τ3

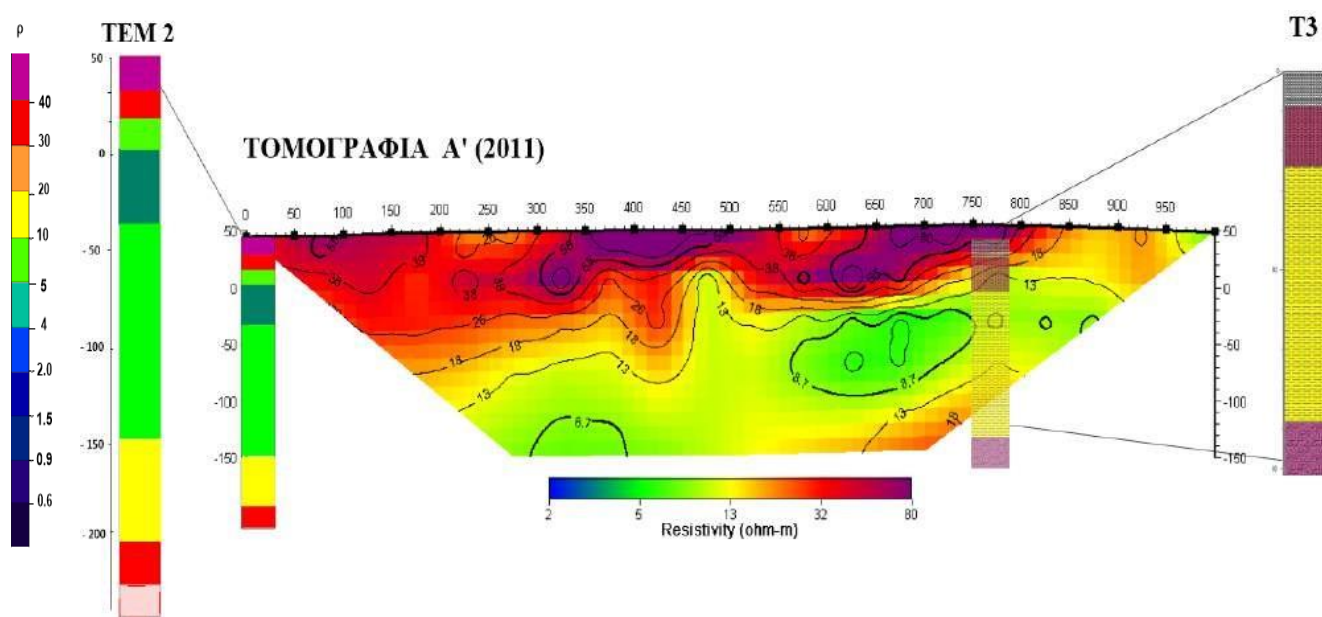
Στο Σχήμα 7.14, παρουσιάζονται σε τρισδιάστατη μορφή στο χώρο, η ηλεκτρική τομογραφία Α, οι μετρήσεις TEM-1, TEM-2, TEM-3 μαζί με την τομογραφία Α' (Κεσόγλου, 2011) και τη γεώτρηση Τ3. Καταρχάς, φαίνεται ότι η κατανομή των αντιστάσεων βρίσκεται σε συμφωνία μεταξύ των τομογραφιών και των μετρήσεων TEM. Παρ' όλα αυτά, η TEM-2, η οποία απέχει από την παλαιότερη τομή Α' 70 m, εντοπίζει στα 50 m βάθος στρώμα αντίστασης 4 Ohm.m, το οποίο απουσιάζει από την τομή και υποδηλώνει την ύπαρξη θαλασσινού νερού.

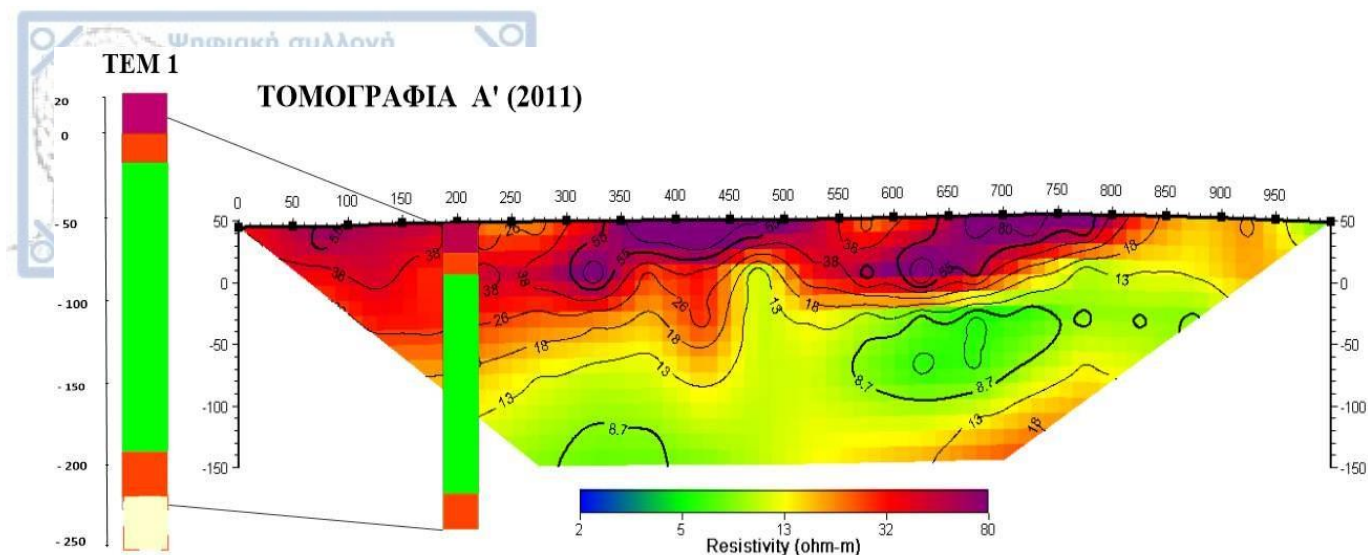
Η λιθολογία της γεώτρησης Τ3 συμπίπτει με την κατανομή των αντιστάσεων και των δύο ηλεκτρικών τομογραφιών. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι, ο αντιστατικός σχηματισμός που απλώνεται στα πρώτα 50 m βάθος (μοβ και κόκκινο χρώμα) της τομής Α' όπως και στην Α, σύμφωνα με τη γεώτρηση Τ3, περιέχει κατά σειρά, ασβεστολιθικούς τόφφους, μάργα με ασβεστολιθικά χαλίκια και παρουσία υδροφόρων στρωμάτων. Στη συνέχεια, ο σχηματισμός με τις ενδιάμεσες αντιστάσεις (πράσινο χρώμα), αντιστοιχεί κυρίως σε άργιλο και το υποκείμενο του στρώμα (κόκκινο χρώμα), περιέχει ψαμμίτες, εναλλαγές μάργας με άμμο και άργιλο και παρουσία υδροφόρων στρωμάτων. Το τελευταίο υδροφόρο στρώμα της γεώτρησης, εμφανίζεται στη μέτρηση TEM-1 και TEM-2.

Όσον αφορά τα υδρογεωλογικά στοιχεία που έχουν συλλεχθεί, κατά τη δειγματοληψία του υπόγειου νερού στη γεώτρηση G2, αρχικά παρατηρείται ότι, η τιμή του απόλυτου υψόμετρου ισούται με -3 m, το οποίο δείχνει ότι το ύψος του υπόγειου νερού βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Ακόμη, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) έχει τιμή 1090 $\mu\text{S}/\text{cm}$ που είναι αρκετά υψηλότερη από την επιθυμητή ενδεικτική τιμή των 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, αλλά μέσα στο ανώτερο επιτρεπόμενο όριο των 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Τα συνολικά διαλυμένα στερεά (T.D.S) έχουν τιμή 854 mg/L, η οποία εντάσσεται στα όρια του γλυκού νερού και τα ιόντα χλωρίου Cl^- ισούνται με 166 mg/L που θεωρούνται αρκετά υψηλά σε σχέση με την ενδεικτική τιμή. Επίσης, σύμφωνα με τον συντελεστή Revelle, το υπόγειο νερό είναι καλής ποιότητας χωρίς ένδειξη ρύπανσης.



Σχήμα 7.14 Τρισδιάστατη παρουσίαση και βαθμονόμηση των τιμών ειδικής αντίστασης των ηλεκτρικών τομογραφιών Α και Α' (2011), σε συνδυασμό με τις μετρήσεις TEM-1, TEM-2, TEM-3 και της γεώτρησης T3.





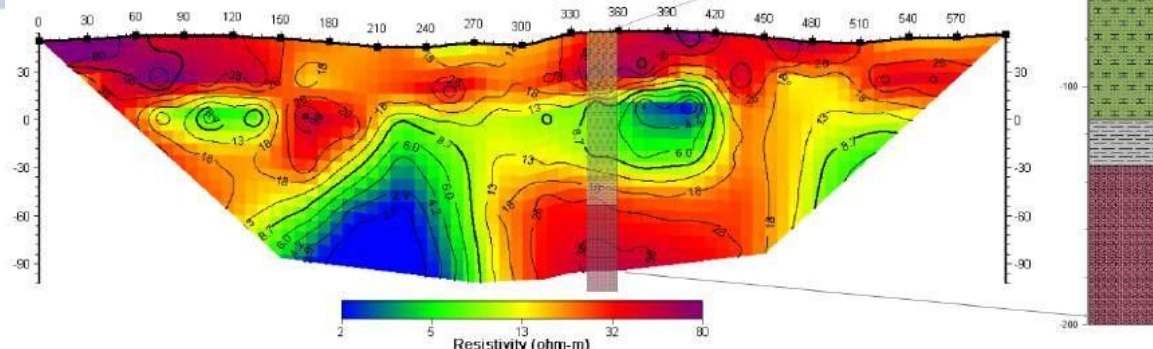
Σχήμα 7.15 Βαθμονόμηση των τιμών ειδικής αντίστασης της ηλεκτρικής τομογραφίας Α' (2011) με τη γεώτρηση T3 και τις μετρήσεις TEM-1 ,TEM-2.

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ D – ΓΕΩΤΡΗΣΗ T4

Η ηλεκτρική τομογραφία D εντοπίζεται σε απόσταση 150 m από τη γεώτρηση T4, ωστόσο οι λιθολογικές και οι στρωματογραφικές της στήλες διαφέρουν αρκετά με την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του γεωφυσικού μοντέλου. Οι υψηλές τιμές αντιστάσεων που επικρατούν στο επιφανειακό στρώμα της τομογραφίας (30-46 Ohm.m), δεν αντιστοιχούν με τα λιθολογικά στοιχεία της γεώτρησης, σε εναλλαγές αργίλου και χαλικιών. Στη συνέχεια, τα υποκείμενα στρώματα της γεώτρησης T4, αποτελούνται από μάργα και ψαμμίτη. Αντιθέτως, η τομογραφία παρουσιάζει χαμηλές αντιστάσεις με τιμές 2-9 Ohm.m, που ενδεχομένως αντιστοιχούν σε αργιλικούς σχηματισμούς με παρουσία υφάλμυρου νερού. Έπειτα, παρατηρείται ένα λεπτού πάχους αργιλικό στρώμα και μέχρι το τέλος της γεώτρησης, εντοπίζεται σχηματισμός με μάργα και ψαμμίτη, σε εναλλαγές με αμμοχάλικα και υδροφόρα στρώματα. Το υδροφόρο αυτό στρώμα, συμφωνεί με την τιμή ειδικής αντίστασης 30 Ohm.m που συναντάται στα ίδια βάθη της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Η διαφοροποίηση που παρατηρείται στη λιθολογία μεταξύ της γεώτρησης T4 και της ηλεκτρικής τομογραφίας, μπορεί να ερμηνευτεί από το νεοτεκτονισμό της περιοχής. Τα επιμήκη ρέματα με διεύθυνση B-N, που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα της περιοχής αποτελούν ενδείξεις τεκτονικής δραστηριότητας.

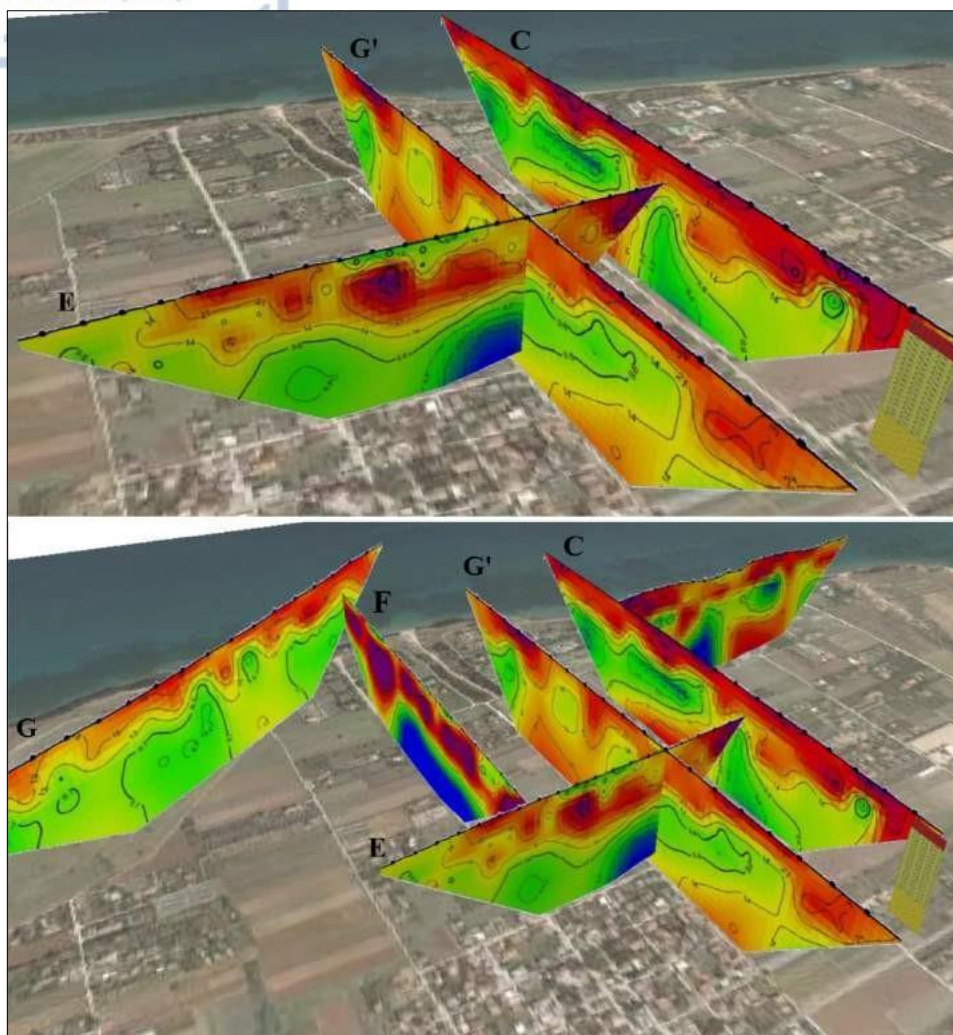
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ D



Σχήμα 7.16 Σύγκριση των τιμών ειδικής αντίστασης της ηλεκτρικής τομογραφίας D με τη γεώτρηση T4 και βαθμονόμηση των τιμών ειδικής αντίστασης.



Σχήμα 7.17 Απεικόνιση των επιμήκων ρεμάτων που φανερώνουν τεκτονική δραστηριότητα στο βόρειο τμήμα του Αγγελχωρίου.

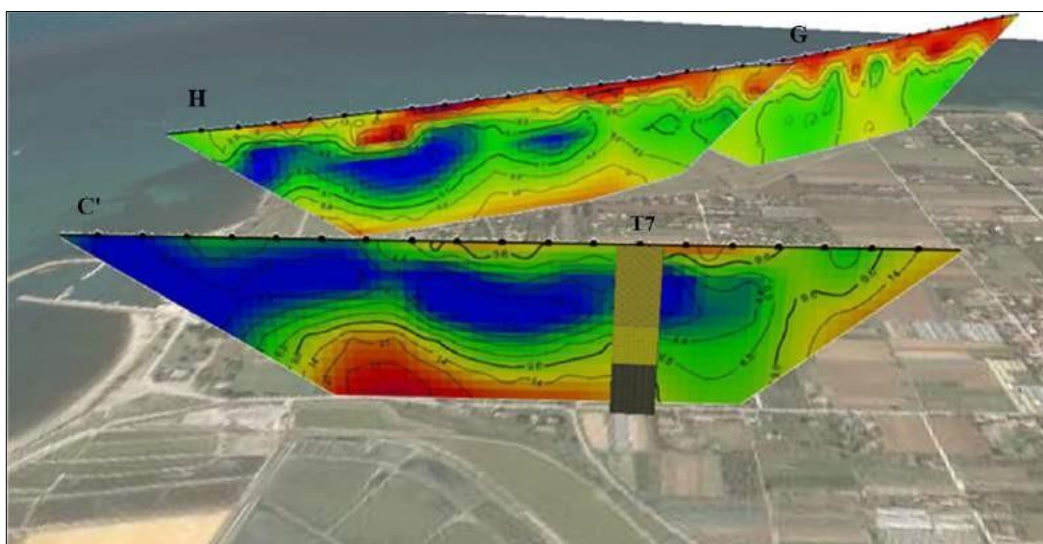


Σχήμα 7.18 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών C, F, E, G και σύγκριση με την G' (2011).

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Η - ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ C' (2011) & ΓΕΩΤΡΗΣΗ T7

Η ηλεκτρική τομογραφία C' (2011), εντοπίζεται βόρεια των αλυκών και της λιμνοθάλασσας του Αγγελοχωρίου, ενώ η τομογραφία Η, βρίσκεται εξωτερικά του κέντρου εκπομπής του Ελληνικού Ναυτικού. Όπως αναλύθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο τμήμα αυτό υπάρχει διεisdυση του θαλασσινού νερού στους υπεδάφιους σχηματισμούς. Αυτό φανερώνεται, επίσης στη γεώτρηση G4, όπου το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού ισούται με -2.5 m.

Σύμφωνα με το γεωηλεκτρικό μοντέλο της τομογραφίας C' της Κεσόγλου και τη γεώτρηση T7 που βρίσκεται κατά μήκος της, στα πρώτα 100m περιέχονται εναλλαγές αργίλου και άμμου με παρουσία υφάλμυρου νερού, το οποίο συμπίπτει με τις πολύ χαμηλές τιμές αντιστάσεων της τομογραφίας C' (2-4 Ohm.m). Έπειτα ακολουθεί στρώμα πάχους 50 m, με αργίλικούς σχηματισμούς, ενώ μέχρι το τέλος της γεώτρησης, παρατηρούνται χαλίκια με εναλλαγές αργίλου και άμμου, σε συνδυασμό με υδροφόρα στρώματα. Συνεπώς, η κατανομή της ειδικής αντίστασης της ηλεκτρικής τομογραφίας C' συμβαδίζει με τη λιθολογία της γεώτρησης T7, αλλά και με την τομογραφία H, καθώς δείχνει την εκτεταμένη διείσδυση του θαλασσινού νερού βόρεια της λιμνοθάλασσας του Αγγελοχωρίου.



Σχήμα 7.19 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών H, G, την C' (2011) και της γεώτρησης T7.

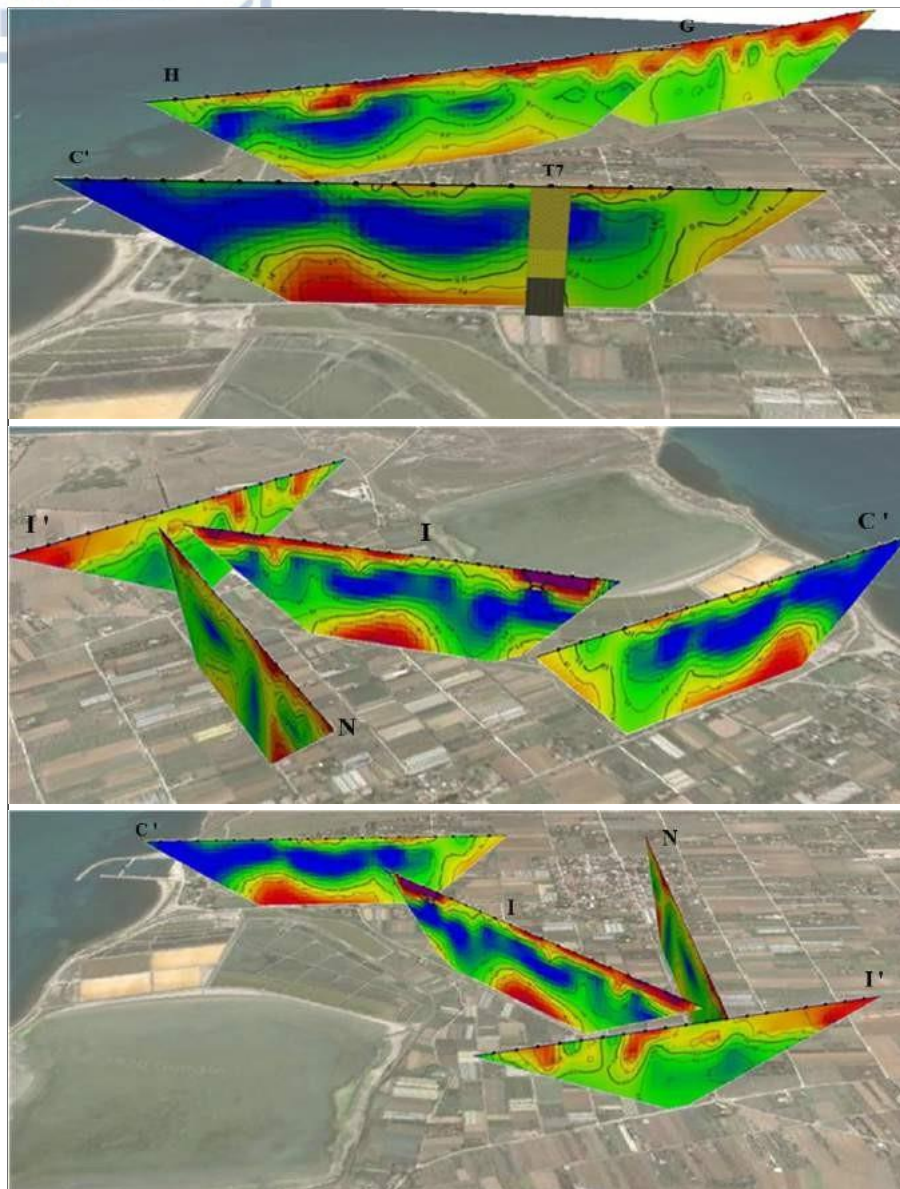
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Ι, ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Ν – ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ C' (2011), ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ Γ' (2011)

Στο δυτικό τμήμα της ηλεκτρικής τομογραφίας C' (2011), αρχίζει η διείσδυση του θαλασσινού νερού που εκτείνεται μέχρι τα 800 m μήκος και 100 m βάθος. Σε κοντινή απόσταση από την C', εντοπίζεται η ηλεκτρική τομογραφία Ι, η οποία αποτυπώνει την πορεία του θαλασσινού νερού βαθύτερα στην ενδοχώρα. Σε αντίθεση με τη C', τα

επιφανειακά στρώματα της τομογραφίας I, χαρακτηρίζονται από τιμές ειδικής αντίστασης 13-80 Ohm.m και πιθανόν αποτελούνται από αργιλοαμμώδη εδάφη ή εναλλαγές αργίλου με χαλίκια ή και με παρουσία υδροφορίας. Ο υφάλμυρος ορίζοντας διεισδύει σε αργιλικό ή αργιλοαμμώδες υλικό και ξεκινάει από τα 30 m και καταλήγει στα 150 m βάθος. Ο υποκείμενος αντιστατικός σχηματισμός, ενδεχομένως είναι ο ίδιος με αυτόν της C' και αποτελείται από χαλίκια με εναλλαγές αργίλου και άμμου μαζί με υδροφόρα στρώματα. Στη συνέχεια, ο ορίζοντας υφάλμυρου νερού εκτείνεται στα ίδια βάθη στην τομή N, η οποία βρίσκεται νότια του χωριού Αγγελοχωρίου. Έπειτα, οι τομές N και I συναντώνται στην παλαιότερη τομογραφία I' (2011), η οποία παρουσιάζει όμοια κατανομή της ειδικής αντίστασης με τις προηγούμενες.

Επιπρόσθετα, στην περιοχή αυτή πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία του υπόγειου νερού στη γεώτρηση G6, για την ένδειξη της ποιότητας του. Αναλυτικότερα, παρατηρείται ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) ισούται με 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, τα συνολικά διαλυμένα στερεά (T.D.S) με 1921 mg/L και η περιεκτικότητα των χλωριόντων έχει τιμή 331. Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και των ιόντων του χλωρίου υπερβαίνουν τα ανώτερα επιτρεπτά όρια, ο δείκτης T.D.S δείχνει ότι το νερό είναι υφάλμυρο ενώ με βάση τον συντελεστή Revelle, το υπόγειο νερό χαρακτηρίζεται μέτρια ρυπασμένο.

Οι τιμές των χημικών και φυσικών παραμέτρων, επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα των γεωηλεκτρικών μοντέλων, αποδεικνύοντας την εκτεταμένη εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμυρίνσης στην περιοχή αυτή.



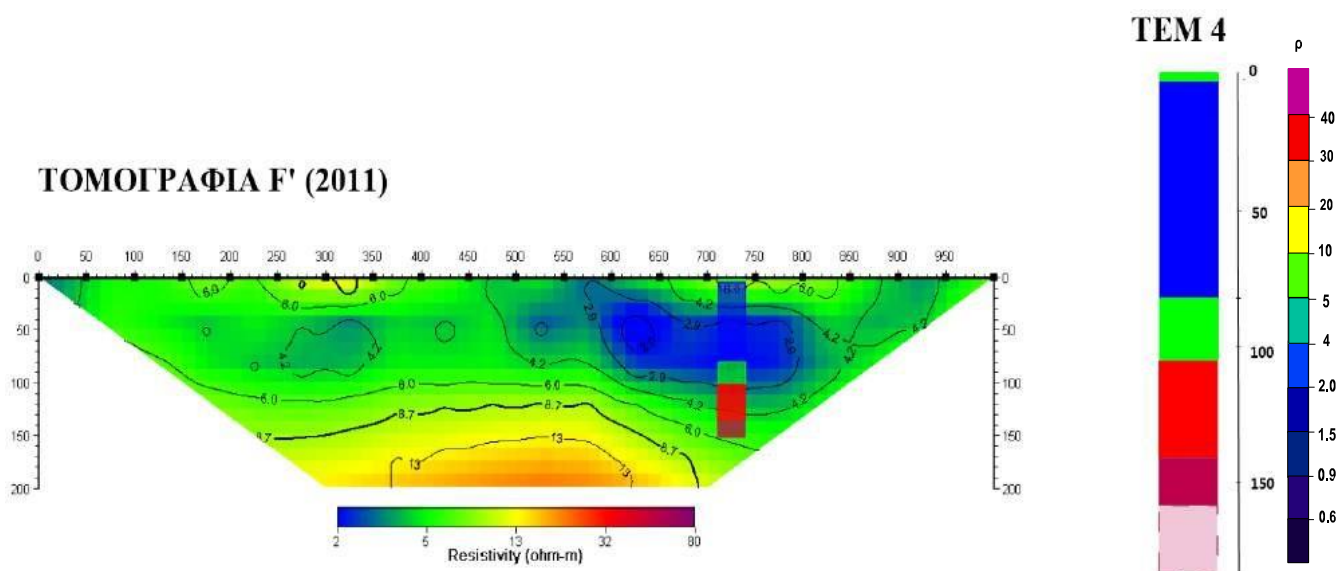
Σχήμα 7.20 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών H, I, N, I'(2011), C' (2011) και της γεώτρησης T7.

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ F'(2011) –TEM- 4

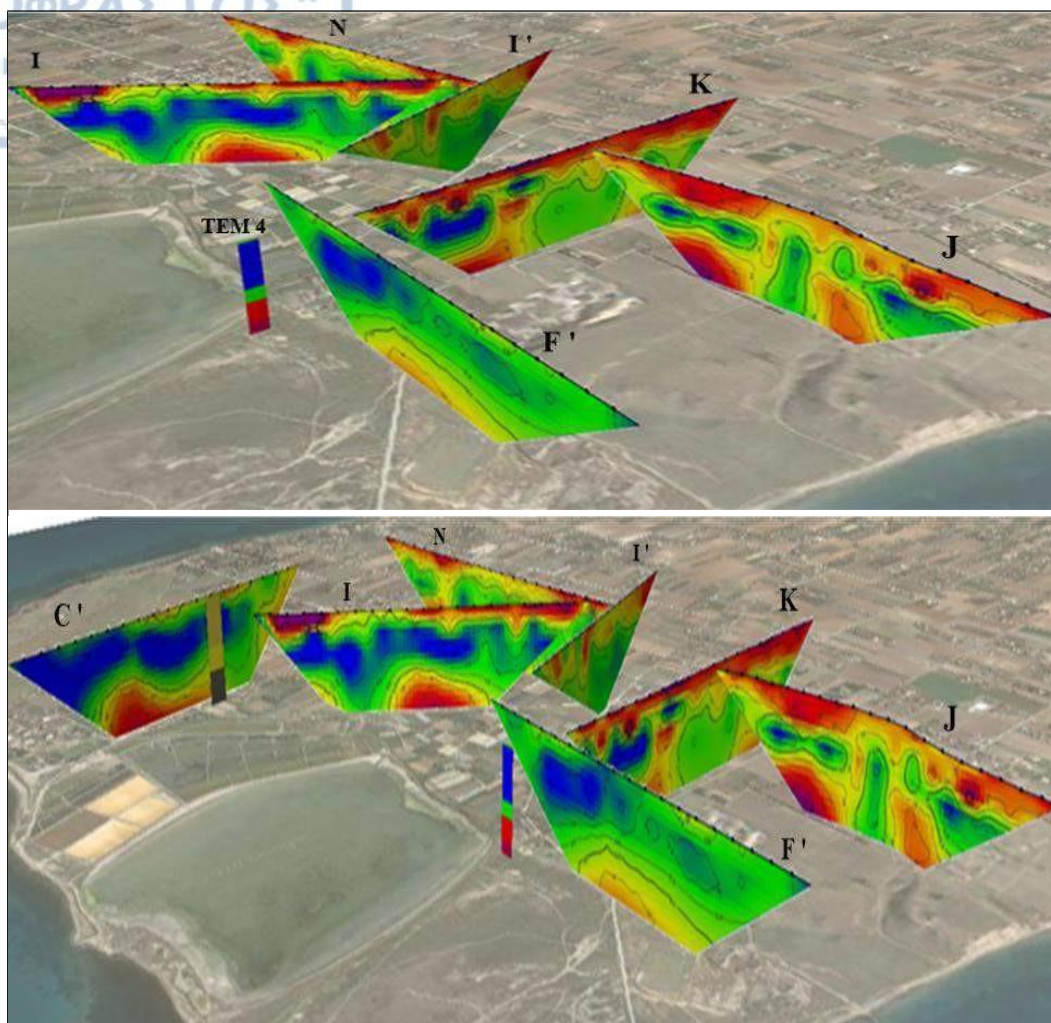
Η μέτρηση των παροδικών πεδίων TEM-4 βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με την παλαιότερη ηλεκτρική τομογραφία της Κεσόγλου, F'(2011). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο γεωφυσικών μοντέλων, παρατηρείται η όμοια κατανομή της

ειδικής αντίστασης. Αρχικά εντοπίζεται σχηματισμός με τιμή ειδικής αντίστασης 6 Ohm.m που παραπέμπει σε αργιλικό ή και αργιλοαμμώδη σχηματισμό με υποψία υφάλμυρου νερού. Έπειτα, ακολουθεί το υφάλμυρο αργιλικό στρώμα με πάχος που ξεπερνάει τα 50 m. Στη συνέχεια, συναντώνται εκ νέου οι αντιστάσεις των αργιλικών υλικών, με ενδεχόμενη παρουσία θαλασσινού νερού. Στα 100 m βάθος η μέτρηση TEM-4 βρίσκει αντιστατικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται σε βαθύτερα στρώματα στην τομή F' και αντιστοιχούν σε εναλλαγές χαλικιών με άργιλο και άμμο με παρουσία υδροφόρων στρωμάτων ή σε μαργαϊκούς ή ψαμιμτικούς υδροφόρους σχηματισμούς.

Παράλληλα, τα αποτελέσματα των φυσικών και των χημικών παραμέτρων της ποιότητας του υπόγειου νερού στη γεώτρηση G7, έδειξαν τις υψηλότερες τιμές που έχουν παρατηρηθεί, σε όλη την περιοχή του Αγγελοχωρίου. Συγκεκριμένα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα έχει τιμή 6440 $\mu\text{S}/\text{cm}$, τα συνολικά διαλυμένα στερεά ισούνται με 4013 mg/L και η περιεκτικότητα των χλωριόντων είναι 816, ενώ ο συντελεστής Revelle χαρακτηρίζει το υπόγειο νερό ως σοβαρά ρυπασμένο.



Σχήμα 7.21 Σχηματική παρουσίαση της τομογραφίας F' (2011), συνδυαστικά με τη μέτρηση TEM-4.

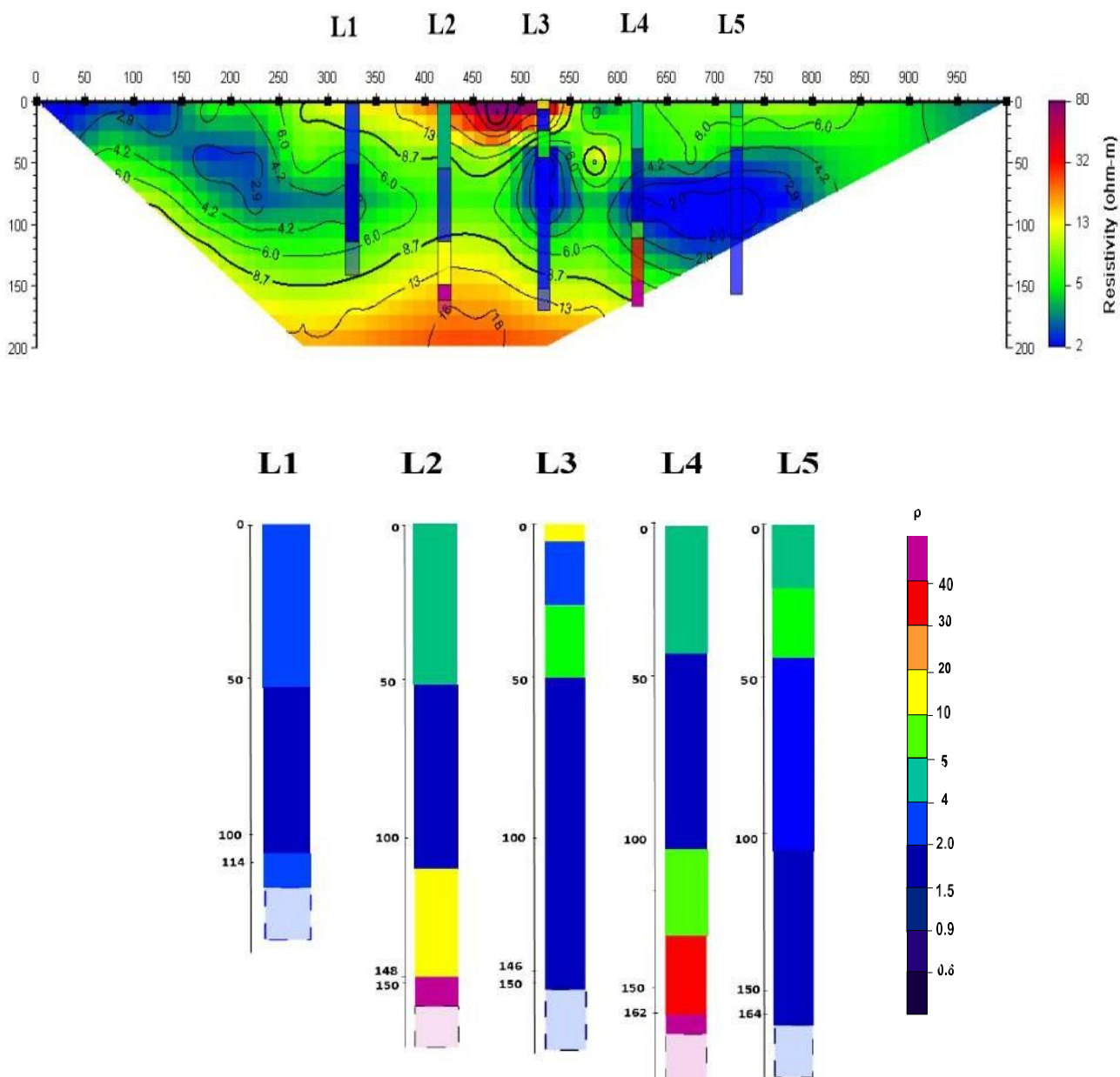


Σχήμα 7.22 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών I, J, K, N, των παλαιότερων F'(2011) Ι'(2011), C' (2011) και της μέτρησης TEM-4.

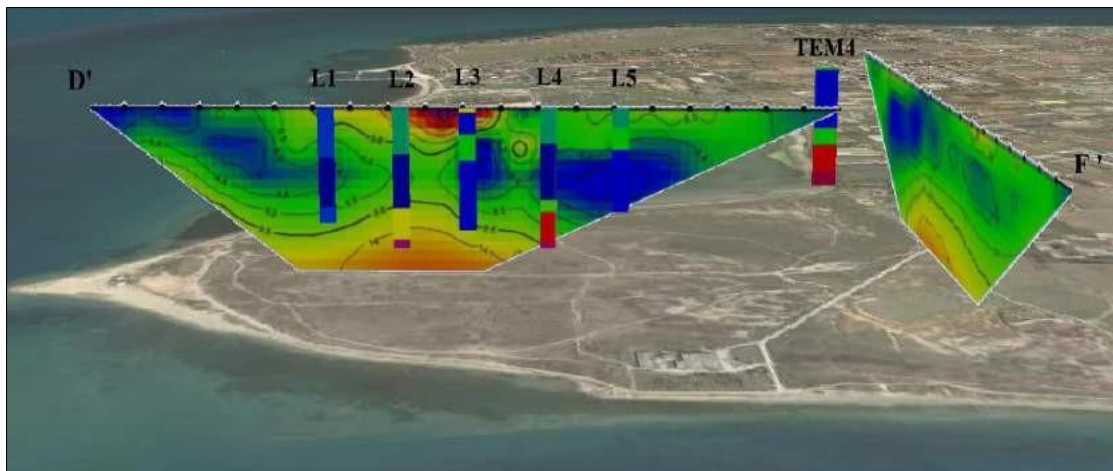
ΜΕΤΡΗΣΗ TEM L1-L5

Κατά τη διεκπεραίωση των μετρήσεων TEM, σχεδιάστηκαν οι μετρήσεις L1-L5 σε μία ευθεία, έτσι ώστε να συμπίπτουν συγχρόνως με την παλαιότερη τομογραφία D' (2011). Η ηλεκτρική τομογραφία D, εντοπίζεται νότια της λιμνοθάλασσας του Αγγελοχωρίου και απέχει από την ακτή σχεδόν 40 m. Σύμφωνα με τη σχηματική απεικόνιση της κατανομής της αντίστασης, μεταξύ των δύο μεθόδων (Σχήμα 7.23), παρατηρείται στο αρχικό τμήμα της τομής, η διείσδυση του θαλασσινού νερού στα επιφανειακά στρώματα. Στη συνέχεια, το θαλασσινό νερό εισχωρεί βαθύτερα και εμφανίζεται μέχρι τα 130 έως και τα 165 m βάθος (L5), ενώ εκτείνεται σε όλο το μήκος

της τομής. Το πάχος του ορίζοντα υφαλμύρινσης κυμαίνεται στα 30-70 m. Οι ενδιάμεσες τιμές αντιστάσεων, 5 έως 14 Ohm.m (πράσινο χρώμα), ανήκουν σε χαλίκια με εναλλαγές αργίλου ή και άμμου ή σε αργιλοαμμώδη εδάφη, με παρουσία υφάλμυρου νερού. Παράλληλα, οι μετρήσεις L2 και L4, σε βάθη άνω των 135 m εμφανίζουν αντιστάσεις 35-70 Ohm.m και αντιστοιχούν πιθανώς σε υδροφόρα στρώματα χαλικιών με εναλλαγές αργίλου ή άμμου ή και μάργας ή ψαμμίτη. Αντιθέτως, η ηλεκτρική τομογραφία παρουσιάζει σε μεγαλύτερα βάθη αντιστάσεις 10- 20 Ohm.m.



Σχήμα 7.23 Βαθμονόμηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ της ηλεκτρικής τομογραφίας D' (2011) και των σημειακών μετρήσεων L1-L5, κατά μήκος της.



Σχήμα 7.24 Τρισδιάστατη παρουσίαση των ηλεκτρικών τομογραφιών D' (2011) και F' (2011), σε συνδυασμό με τις μετρήσεις TEM.

7.3 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Συνοψίζοντας την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν, προκύπτουν τα εξής:

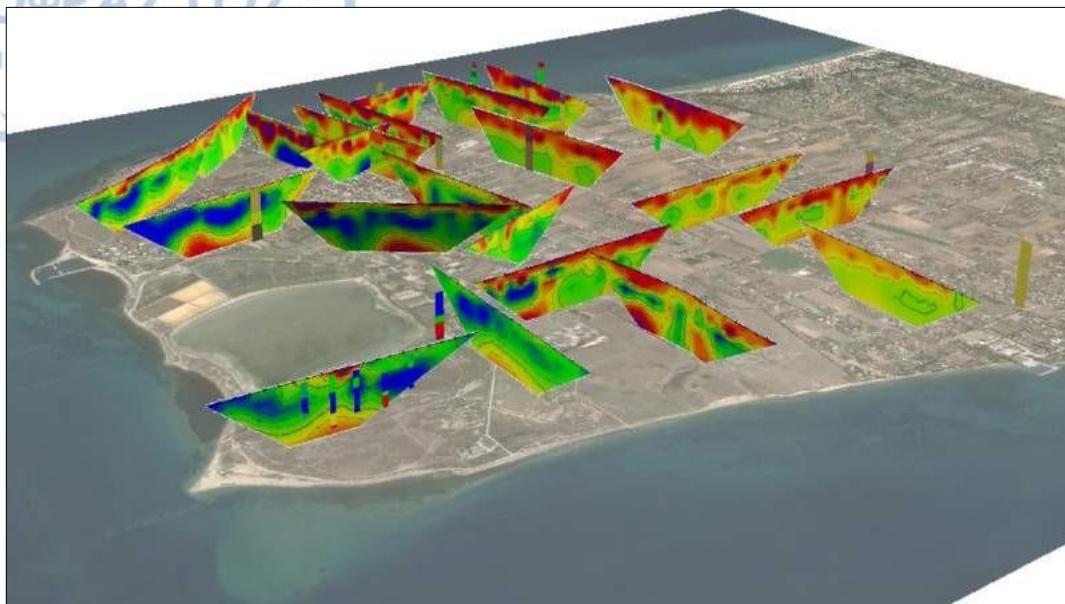
- Υπάρχουν κυρίως τέσσερις ζώνες αντιστάσεων στην περιοχή μελέτης, οι τιμές των οποίων κυμαίνονται από 0.1 - 100 Ohm.m. Αρχικά, παρατηρείται μια ζώνη πολύ χαμηλών αντιστάσεων (0.1 - 5 Ohm.m) που σχετίζεται με παρουσία θαλασσινού νερού σε κορεσμένα στρώματα, μία ζώνη ενδιάμεσων αντιστάσεων (5-20 Ohm.m) και δύο ζώνες υψηλών αντιστάσεων (20 - 30 Ohm.m) και (40 – 80 Ohm.m).
- Οι υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης που παρατηρούνται στα επιφανειακά στρώματα αντιστοιχούν πιθανώς στον σχηματισμό Μουδανίων. Ο σχηματισμός αποτελείται από ιζήματα Πλειστοκαινικής προέλευσης, τα οποία έχουν το χαρακτηριστικό ερυθρό χρώμα. Τα υποκείμενα στρώματα με τις ενδιάμεσες τιμές αντιστάσεων και το αντιστατικό υπόβαθρο ανήκουν στον σχηματισμό Γωνιάς που αποτέθηκε κατά το Πλειόκαινο.
- Στο βόρειο τμήμα του Αγγελοχωρίου, επισημαίνεται η ύπαρξη επιμήκων, παράλληλων κοιλάδων, διεύθυνσης B-N που σύμφωνα με τον Συρίδη (1990), οφείλεται σε τεκτονική δραστηριότητα. Οι κοιλάδες αυτές αρχίζουν την εμφάνισή τους στην Περαία, συνεχίζουν στην Αγία Τριάδα και στην περιοχή του Αγγελοχωρίου γίνονται λιγότερο ορατές (Σχήμα 7.25).
- Σύμφωνα με τις πληροφορίες που λήφθηκαν από τις γεωτρήσεις και τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων των ηλεκτρικών τομογραφιών και των TEM, παρατηρήθηκαν δύο υδροφορίες, με τη πρώτη να εντοπίζεται σε βάθη έως 100 m (γεωτρήσεις T1, T2, T3, T5, T6 και T7) και τη δεύτερη σε βάθη μεγαλύτερα των 150 m (γεωτρήσεις T1, T3, T4, T5 και T7). Τα υδροφόρα στρώματα αποτελούνται κυρίως από ψαμμίτες, μάργα, αργίλους, άμμους ή χαλίκια.
- Όσον αφορά τη διείσδυση του θαλασσινού νερού, διακρίνονται τρεις υφάλμυροι ορίζοντες, με βάση τη γεωγραφική τους θέση:
 - Ο πρώτος εμφανίζεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης στις ηλεκτρικές τομογραφίες B, C, D, E, F και στη μέτρηση TEM-2.
 - Ο δεύτερος, ορίζεται βόρεια των αλυκών και της λιμνοθάλασσας του Αγγελοχωρίου και εντοπίζεται στις τομογραφίες H, N, I, και στις παλαιότερες C'(2011) και I'(2011).

➤ Τέλος, ο τρίτος ορίζοντας θαλασσινού νερού, βρίσκεται στην περιοχή που εκτείνεται νότια της λιμνοθάλασσας και φαίνεται στις τομογραφίες J, K, D' (2011), F' (2011) και στις μετρήσεις των παροδικών πεδίων TEM-4 και L1 έως L5.

- Το ανατολικό τμήμα της περιοχής, δεν έχει πιθανώς προσβληθεί από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς. Ωστόσο, η δειγματοληψία του υπόγειου νερού, στη μεταπτυχιακή εργασία της Κεσόγλου, φανερώνει την ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου νερού κάτω από τη στάθμη της θάλασσας και τις υψηλές τιμές συγκεντρώσεων των διαλυμένων στερεών, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της περιεκτικότητας των χλωριόντων.



Σχήμα 7.25 Επιμήκη παράλληλα ρέματα που δείχνουν τεκτονική δραστηριότητα α) από τους Νέους Επιβάτες έως και το Αγγελοχώρι, β) στο βόρειο τμήμα του Αγγελοχωρίου.



Σχήμα 7.26 Το σύνολο γεωφυσικών μετρήσεων και των γεωτρήσεων στην περιοχή του Αγγελοχωρίου σε τρισδιάστατη μορφή.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας ήταν ο εντοπισμός του φαινομένου υφαλμύρισης, με τη χρήση των γεωφυσικών μεθόδων, στην περιοχή του Αγγελοχωρίου. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) και των παροδικών πεδίων (TEM), ώστε να ανιχνευθεί το αλμυρό νερό στους υπόγειους υδροφορείς.

Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 14 ηλεκτρικές τομογραφίες και 9 μετρήσεις TEM, καλύπτοντας σχεδόν όλη την έκταση της περιοχής. Έπειτα, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις γεωτρήσεις που έχουν υλοποιηθεί, σε συνδυασμό με αυτά της Κεσόγλου (2011), για τον εντοπισμό των υφάλμυρων υδροφόρων στρωμάτων, στην περιοχή μελέτης.

Το Αγγελοχώρι περιβάλλεται από θάλασσα σε τρεις πλευρές του, βόρεια, δυτικά και νότια. Από γεωλογικής άποψης, η περιοχή καλύπτεται από Τεταρτογενείς αποθέσεις και Νεογενή ιζήματα, τα οποία περιλαμβάνουν άμμους, χαλίκια, αργίλους, ψαμμίτες, μάργες και ασβεστόλιθους. Η κύρια υδροφορία αναπτύσσεται σε στρώματα ψαμμιτών, μάργας, άμμου, χαλικιών ή και αργίλους. Σε μεγαλύτερα βάθη (<150) εντοπίζεται, ο υπό πίεση υδροφορέας που συναντάται στους ίδιους σχηματισμούς.

Από την έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιοχή, διαπιστώνεται ότι:

- Η περιοχή του Αγγελοχωρίου πλήττεται από το φαινόμενο της υφαλμύρισης, το οποίο εξαπλώνεται βαθύτερα στην ενδοχώρα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών τομογραφιών, διακρίνονται τρεις ορίζοντες αλμυρού νερού.
- Ο πρώτος ορίζοντας, εντοπίζεται βόρεια του χωριού, στις τομές B, C, D, E, F και στη μέτρηση TEM-2. Οι υφάλμυροι σχηματισμοί συναντώνται σε ένα εύρος 50-90 m και μπορεί να ξεπερνούν τα 180 m βάθος (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το υψόμετρο της περιοχής). Στην ηλεκτρική τομογραφία D, εμφανίζονται επίσης, υφάλμυρα στρώματα σε βάθη πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, τα οποία πιθανώς αντιστοιχούν σε εγκλωβισμένο παλιό αλμυρό νερό. Στην περίπτωση του πρώτου ορίζοντα, φαίνεται ότι η διείσδυση αρχίζει από τα βόρεια παράκτια της περιοχής μελέτης.

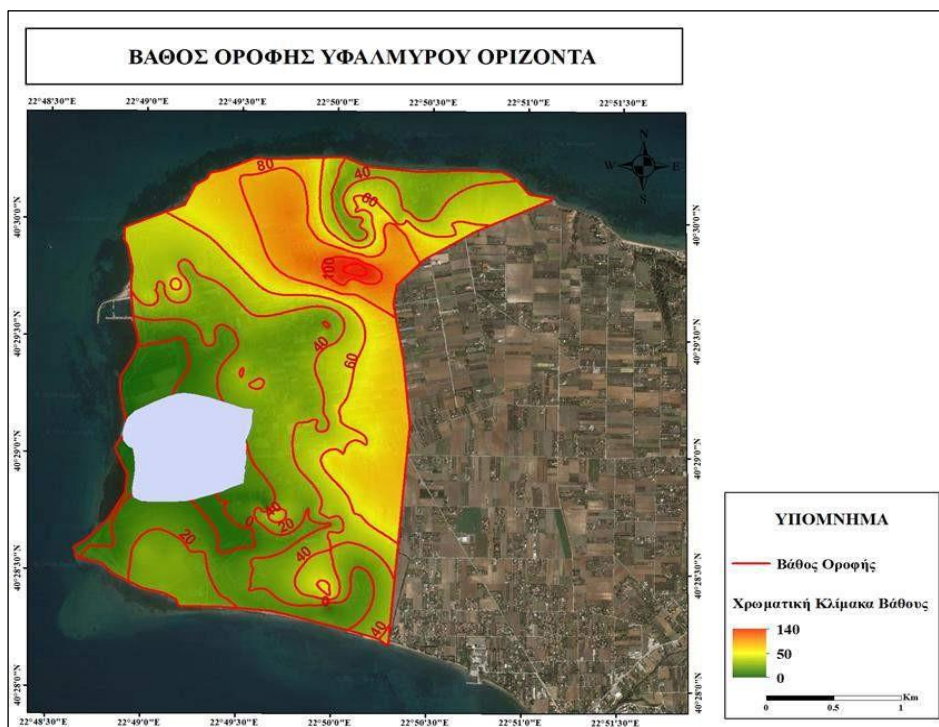
Ο δεύτερος υφάλμυρος ορίζοντας, αποτυπώνεται στις τομές H, N, I, στις παλαιότερες C', I' και στη γεωτρήση T7, και εντοπίζεται βόρεια και ανατολικά των αλυκών και της λιμνοθάλασσας του Αγγελοχωρίου. Με βάση τα στοιχεία των γεωηλεκτρικών μοντέλων και των γεωτρήσεων, το υφάλμυρο νερό εμφανίζεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (0-30 m) και μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 150 m βάθος. Ακόμη φαίνεται ότι η διείσδυση του θαλασσινού νερού γίνεται από το δυτικό τμήμα της περιοχής.

Τέλος, ο τρίτος ορίζοντας υφαλμύρισης, βρίσκεται νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης και απεικονίζεται στις τομές J, K, στις D' (2011), F' (2011) και στις μετρήσεις των παροδικών πεδίων TEM-4 και L1 έως L5. Το θαλασσινό νερό εντοπίζεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και μπορεί να καταλήγει έως τα 150 m βάθος. Ο ορίζοντας διεισδύει στους σχηματισμούς από το νοτιοδυτικό μέρος της περιοχής.

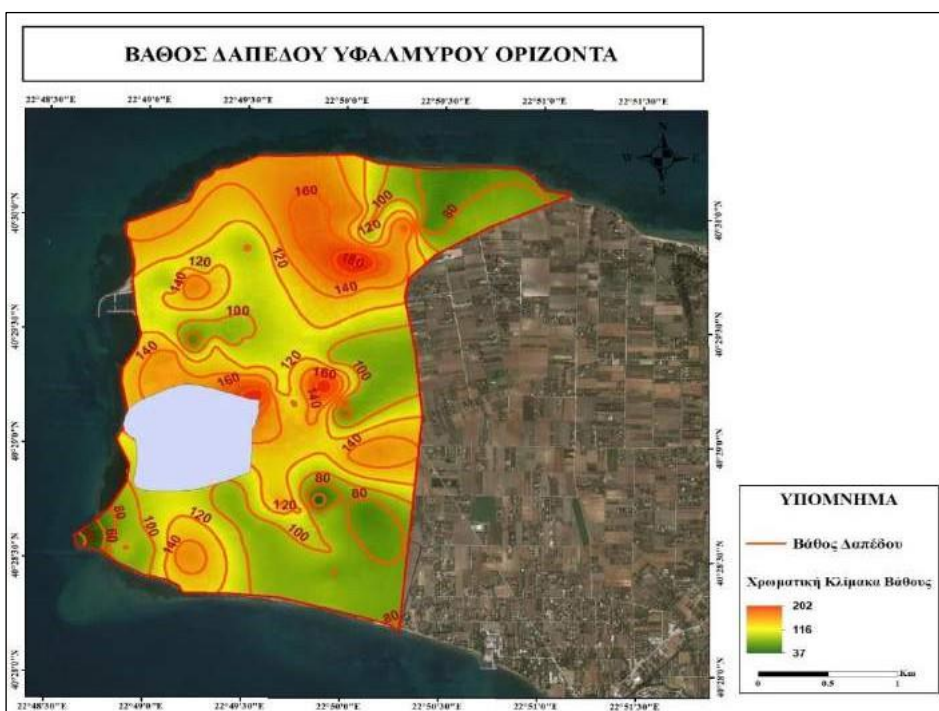
- Η διείσδυση του θαλασσινού νερού είναι εντονότερη στη δυτική πλευρά της περιοχής, γύρω από τη λιμνοθάλασσα αλλά δεν περιορίζεται τοπικά, όπως θα ήταν αναμενόμενο.
- Το βορειοανατολικό και το νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής που βρέχεται από θάλασσα, φαίνεται ότι δεν έχει προσβληθεί από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς. Παρόλα αυτά χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για να επιβεβαιωθεί η ποιότητα των υπόγειων υδάτων.
- Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων για την ποιότητα του νερού της Κεσόγλου (2011), προκύπτει ότι όλα τα δείγματα νερού έχουν επηρεαστεί από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού, ενώ παρατηρούνται γενικά υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, περιεκτικότητας των χλωριόντων και διαλυμένων στερεών. Ειδικότερα, οι γεωτρήσεις G6 και G7 ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια των παραμέτρων και χαρακτηρίζουν το υπόγειο νερό ως ρυπασμένο. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα νερά των γεωτρήσεων χαρακτηρίζονται ως σκληρά, με αποτέλεσμα να είναι ακατάλληλα για πόση.

Στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών τομογραφιών και των TEM, παρουσιάζονται τα εκτιμώμενα βάθη του υφάλμυρου νερού, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το υψόμετρο της περιοχής. Στο Σχήμα 8.1 απεικονίζεται το βάθος που συναντάται ο υφάλμυρος σχηματισμός (βάθος οροφής), ενώ στο Σχήμα 8.2, το βάθος μέχρι το οποίο εκτείνεται (βάθος δαπέδου). Τέλος, ακολουθεί το Σχήμα 8.3, στο οποίο

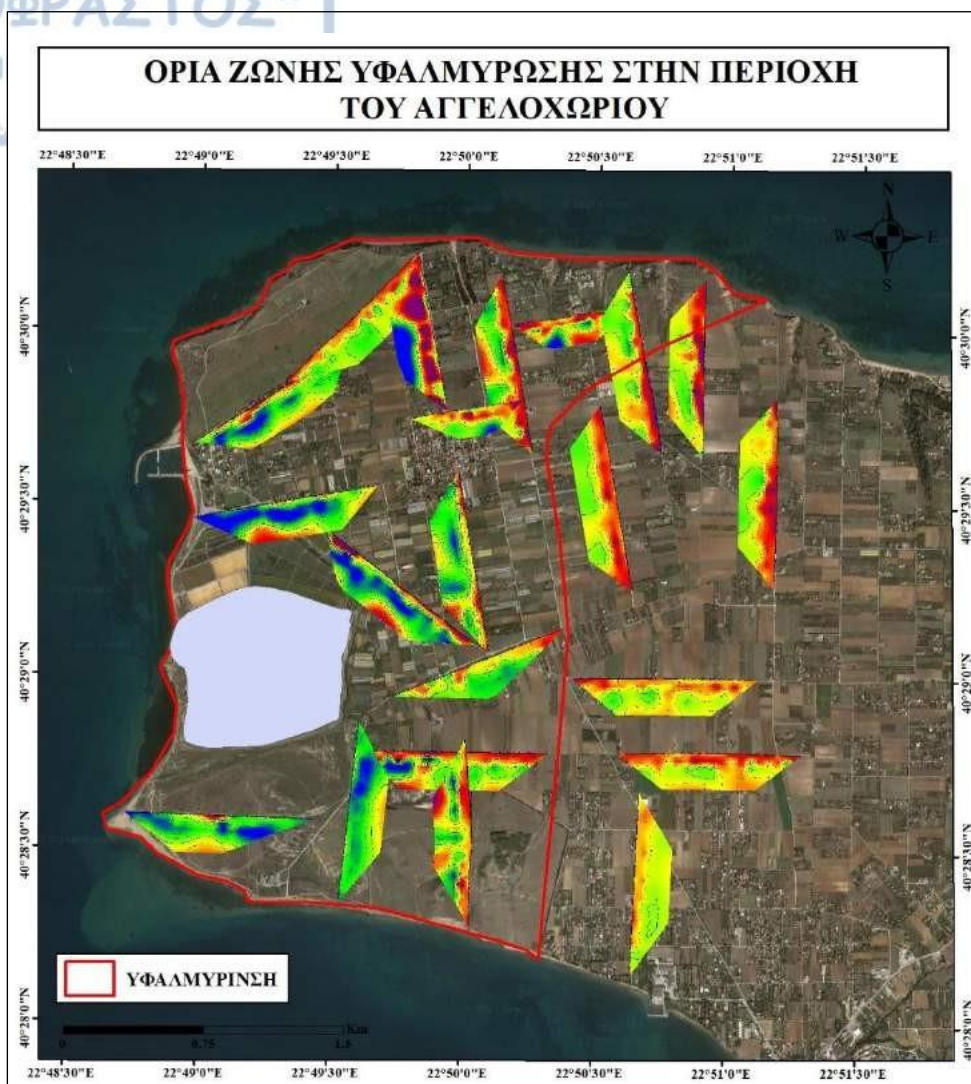
αποτυπώνεται τόσο το σύνολο των ηλεκτρικών τομογραφιών που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή του Αγγελοχωρίου, όσο και η οριοθέτηση της εκτιμώμενης ζώνης υφάλμυρης.



Σχήμα 8.1 Εκτιμώμενο βάθος οροφής του υφάλμυρου ορίζοντα.



Σχήμα 8.2 Εκτιμώμενο βάθος δαπέδου του υφάλμυρου ορίζοντα.



Σχήμα 8.3 Ενδεικτική οριοθέτηση της ζώνης υφαλμύρισης στην περιοχή του Αγγελοχωρίου.

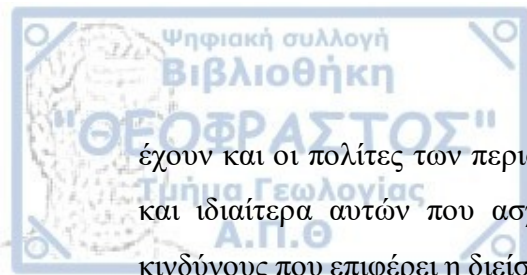
Για την πρόληψη και την αντιμετώπιση του φαινομένου υφαλμύρισης, απαραίτητος παράγοντας είναι η λήψη κατάλληλων μέτρων από την πολιτεία. Στην περιοχή του Αγγελοχωρίου και γενικότερα στα παράκτια υδατικά υπόγεια συστήματα που έχει προσδιορισθεί ότι η κακή ποιοτική τους κατάσταση οφείλεται σε φαινόμενα υφαλμύρισης, είναι αναγκαία η σύνταξη ειδικών υδρογεωλογικών μελετών, με σκοπό την ακριβή οριοθέτηση της ζώνης υφαλμύρισης, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για την αποκατάσταση των υπόγειων υδάτων. Παρ' όλα αυτά, μέχρις ότου πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία, σύμφωνα με το μέτρο «Καθορισμός και οριοθέτηση περιοχών υδατικών υπόγειων συστημάτων που παρουσιάζουν κακή ποιοτική κατάσταση λόγω υφαλμύρισης ή παρουσιάζουν τοπική υφαλμύριση» (Αποκεντρωμένη Διοίκηση Μακεδονίας Θράκης (2023): 2^η Αναθεώρηση Σχεδίων Διαχείρισης των Λεκανών

Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (EL10)), ισχύουν τα ακόλουθα:

- Απαγορεύεται η κατασκευή νέων έργων αξιοποίησης υδατικών πόρων (γεωτρήσεις, πηγάδια κλπ.) για νέες χρήσεις ύδατος, καθώς και της επέκτασης αδειών υφιστάμενων χρήσεων ύδατος, εντός της ζώνης πλάτους 5.000 m από τη θάλασσα.
- Στις ζώνες αυτές, μπορεί να δίνεται άδεια μόνο για ύδρευση. Εξαίρεση αποτελούν οι γεωτρήσεις υδατοκαλλιεργειών, οι υδροληψίες αφαλάτωσης, πλήρωσης κολυμβητικών δεξαμενών και πυρασφάλειας που βρίσκονται σε απόσταση έως 50 m από την ακτογραμμή και εξετάζονται από το Συμβούλιο Υδάτων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης.
- Στις μη αδειοδοτημένες, αλλά και στις υφιστάμενες υδροληψίες, κατά την έκδοση ή ανανέωση της άδειας χρήσης νερού, τίθεται όρος να προσκομιστεί χημική ανάλυση, η οποία θα περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των παραμέτρων της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού, της περιεκτικότητας σε ολικά διαλυμένα στερεά, ιόντων χλωρίου και νατρίου.
- Για την έκδοση άδειας νέων έργων αξιοποίησης υδάτινων πόρων (π.χ. γεωτρήσεων) ή επέκτασης των υφιστάμενων, για τις απαγορευμένες ζώνες, πρέπει να συνοδεύεται από Ειδική Υδρογεωλογική Μελέτη στην οποία θα περιγράφονται και θα αξιολογούνται οι επικρατούσες τοπικά υδρογεωλογικές συνθήκες. Επίσης, πρέπει να γίνεται συλλογή και αξιολόγηση των ποιοτικών στοιχείων σε απόσταση έως και 500 m περιμετρικά του σημείου υδροληψίας. Η αρμόδια Διεύθυνση Υδάτων ελέγχει την πληρότητα της Ειδικής Υδρογεωλογικής Μελέτης και αποφασίζει τη χορήγηση ή μη της άδειας εκτέλεσης έργου.

Ωστόσο, παρόλο που τίθενται σε εφαρμογή τα μέτρα που προαναφέρθηκαν, η διείσδυση του θαλασσινού νερού συνεχίζει να εξαπλώνεται βαθύτερα στην ενδοχώρα. Οι υφιστάμενες γεωτρήσεις που λειτουργούν στην περιοχή, δεν ελέγχονται για την ποιότητα του αντλούμενου νερού αλλά και ούτε αν έχει ληφθεί κάποιο μέτρο που θα περιορίζει την αντλούμενη παροχή. Ακόμη, οι ιδιώτες των υφιστάμενων γεωτρήσεων δεν είναι υποχρεωμένοι με βάση νόμου, να εκτελούν χημικές αναλύσεις για την ποιότητα του αντλούμενου νερού.

Συμπερασματικά, για την αποτελεσματικότητα του περιορισμού και της αποκατάστασης του φαινομένου υφαλμύρισης πέραν του κράτους, σημαντική ευθύνη



έχουν και οι πολίτες των περιοχών αυτών. Είναι αναγκαία η ενημέρωση των κατοίκων και ιδιαίτερα αυτών που ασχολούνται με τη βιομηχανία και τη γεωργία, για τους κινδύνους που επιφέρει η διείσδυση του θαλασσινού νερού στα παράκτια υπόγεια ύδατα. Με αυτόν τρόπο, αλλά και με τη δραστηριοποίηση των δημόσιων τοπικών φορέων, είναι εφικτό να ληφθούν άμεσα μέτρα για τον περιορισμό της ανεξέλεγκτης άντλησης του υπόγειου νερού, η οποία ευνοεί την επέκταση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Αλμπανάκης Κ., Αβραμίδη Ν., Κόρου Θ., και Βουβαλίδης Κ., (1999). Η παράκτια γεωμορφολογία των ανατολικών ακτών του Θερμαϊκού Κόλπου στο νομό Θεσσαλονίκης και οι διαταραχές της ισορροπίας από ανθρωπογενείς παράγοντες. Πρακτικά 5ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρίας. Αθήνα 11-13/11/1999.
- Βουδούρης Κ., (2003). Υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων από διείσδυση θαλασσινού νερού. Σημειώσεις του μαθήματος Εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειου νερού. Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης Κ., Νίκας Κ., και Αντωνάκος Α., (2004). Μελέτη της εξέλιξης του μετώπου υφαλμύρωσης σε παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες. Η περίπτωση του παράκτιου τμήματος της ΒΔ Αχαΐας. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμος XXXVI, 2004 Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004.
- Βουδούρης, Κ., (2009). Υδρογεωλογία περιβάλλοντος, υπόγεια νερά και περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Βουδούρης, Κ., Βενετσάνου Π., Θεοδορούδης Π., Καζάκης Ν., Κασάπη Κ., Λιάμη Ε., Μαρίνος Β. και Σουλβέστρου Ι., (2014): Έρευνα υδατικού δυναμικού του Δήμου Θερμαϊκού, Νομού Θεσσαλονίκης, Τελική έκθεση ερευνητικού προγράμματος, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.
- ΕΑΓΜΕ (Πρώην ΙΓΜΕ). Γεωλογικοί Χάρτες, Φύλλο Θεσσαλονίκης (1978) & Φύλλο Επανομής (1969).
- Ζερβοπούλου, Α., (2010): Νεοτεκτονικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης σε σχέση με τα εδάφη θεμελίωσης, (Διδακτορική διατριβή). Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.
- Καζάκης Ν., (2013). Εκτίμηση της της διακινδύνευσης του υπόγειου νερού στην εξωτερική ρύπανση στη Λεκάνη του Ανθεμούντα. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.
- Καλλέργης, Γ., (2000). Εφαρμοσμένη και περιβαλλοντική υδρογεωλογία. Δεύτερος Τόμος. Έκδόσεις ΤΕΕ.
- Κάρμης Π., (2003). Αυτοματοποιημένη ερμηνεία ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου παροδικών πεδίων. Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής και Γεωθερμίας.



Ψιλοβίκος Α., Συρίδης Γ. και Χαχαμίδου Ε., (1988). Παράκτια φαινόμενα στη χερσόνησο Κασσάνδρα της Χαλκιδικής. Δελτίο Ελλ. Γεωλ. Εταιρ. XX. Αθήνα.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Archie, G. E., (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 146,54–62.

Badon-Ghyben, W., (1888). Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Tijdschrift Koninklijk Instituut van Ingenieurs, the Hague, Netherlands.

Bear, J., (1979). Hydraulics of groundwater, McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. McGraw-Hill, New York.

BTSK Geophysical Instruments. WTEM-2 Medium-Deep/Deep TEM Exploration System User's Manual. Source: www.btsk.cn

Constable, S. Parker, R., and Constable, C., (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, 52, 289-300.

Eaton, P. A. and Hohmann, G. H., (1987). "An evaluation of electromagnetic methods in the presence of geologic noise," GEOPHYSICS 52: 1106-1126.

Glover, R. E., (1964). The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer in Sea Water in coastal aquifers in U.S. Geological survey water supply paper 1613.

Grant, F.S. and West, G.E., (1965). Interpretation Theory in Applied Geophysics. McGraw-Hill, New York.

Hafi, Z.B., (1998). Hydrochemical evaluation of the coastal Quaternary aquifer east of Tripoli, Libya. Journal of African Earth Sciences, Vol. 26, No 4, 643-648.

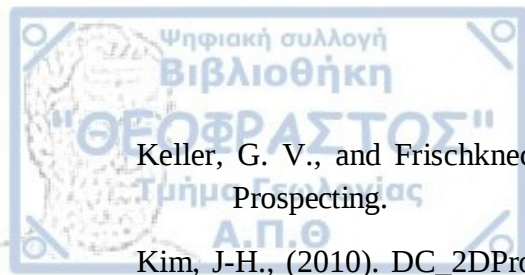
Herzberg, A. Die (1901). Wasserversorgung einiger Nordseebaden. Zeitung fur Gasbeleuchtung und Wasserversorgung.

Hubbard, S. and Rubin, Y., (2005). Introduction to Hydrogeophysics, Springer Netherlands.

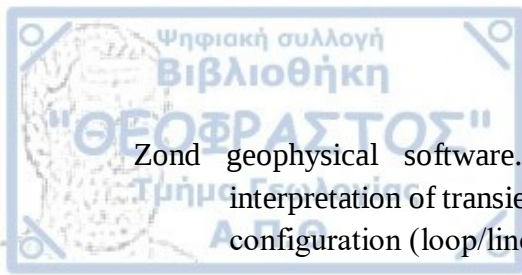
Iris Instruments. Prosys II User manual. Source: www.iris-instruments.com

Jupp, D., and Vozoff, K., (1975). Stable iterative methods for the inversion of geophysical data. Geophys. J. R. astr. Soc., 42,957-976.

Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I., (2002). An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science Ltd., Oxford.



- Keller, G. V., and Frischknecht, F. C., (1996). Electrical Methods in Geophysical Prospecting.
- Kim, J-H., (2010). DC_2DPro V. 0.99 User's Guide. Geoelectric Imaging Laboratory Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM).
- Lanczos, C., (1960). Linear differential operators. D. Van Nostrad Company Ltd.
- Lawson, C. and Hanson, R., (1974). Solving least squares problems. Pentice-Hall.
- Lines L. R. and Treitel S., (1984). Tutorial: a review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. Geophysical Prospecting, 32,159-186.
- Marquadt, D. W., (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. J. Soc. Indust. Appl. Math., 11,431-441.
- Nabighian, M. N., (1979). Quasi-static transient response of a conducting half-space; an approximate representation. Geophysics 1979 44: 1700–1705
- Nabighian, M.N. and Macnae, J.C., (1991). Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods, Electromagnetic methods in applied geophysics, Vol. 2, Application, Parts A and B, Society of Exploration Geophysicists.
- Nwankwoala, H. and Udom, G., (2009). Hydrogeophysics: An overview of general concepts, applications and future perspectives. Scientia Africana. 7. 54-63.
- Pavlou, A., Soulios, G., Dimopoulos, G, Tsokas, G., Mattas, C., Kazakis, N. and Voudouris, K., (2013). Groundwater quality of the coastal aquifers in the eastern part of Thermaikos gulf (from Aggelochori to Kallikrateia). Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. XLVII 2013 Proceedings of the 13th International Congress, Chania, Sept. 2013.
- Kirsch, R. (Ed.), (2006). Groundwater Geophysics A Tool for Hydrogeology, Springer.
- Smith, R. S. and Keating, P. B., (1996). "The usefulness of multicomponent, time-domain airborne electromagnetic measurements," GEOPHYSICS 61: 74-81.
- Spies, B. R. and Frischknecht, F. C., (1991). 'Electromagnetic Sounding', in M. N. Nabighian (ed.), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, 2, Society of Exploration Geophysicists.
- Tikhonov, A. N., (1963). Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method. Soviet Mathematics, 4, 1035-1038.
- Todd, D.K., (1980). Groundwater Hydrology. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Tsourlos, P., (1995). Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. Ph.D. Thesis, Department of Electronics, University of York.
- Ward, S.H., (1990). Resistivity and Induced Polarization Methods in Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.



Zond geophysical software. ZONDTEM1D, program for one-dimensional data interpretation of transient electromagnetic method using arbitrary source-receiver configuration (loop/line/dipole), user's manual. Source: zond-geo.com.

NΟΜΟΘΕΣΙΑ

Αποκεντρωμένη Διοίκηση Μακεδονίας – Θράκης, Γενική Διεύθυνση Χωροταξικής & Περιβαλλοντικής Πολιτικής & Διεύθυνση Υδάτων Κεντρικής Μακεδονίας. (2019). 2η Αναθεώρηση Σχεδίων Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (EL10), Επισκόπηση των σημαντικών θεμάτων διαχείρισης των υδατικών πόρων.

wfdver.ypeka.gr/

Αποκεντρωμένη Διοίκηση Μακεδονίας Θράκης Γενική Διεύθυνση Χωροταξικής & Περιβαλλοντικής Πολιτικής & Διεύθυνση Υδάτων Κεντρικής Μακεδονίας. (2023). 2η Αναθεώρηση Σχεδίων Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (EL10), Προγράμματα βασικών και συμπληρωματικών μέτρων συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης του κόστους σε σχέση με την αποδοτικότητά τους, Ιούνιος 2023.

ΝΟΜΟΣ 3199/2003. Προστασία και διαχείριση των υδάτων - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000.

ΝΟΜΟΣ ΥΠ'ΑΡΙΘ.3937 ΦΕΚ Α 60/31.3.2011. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑΣ.

www.kodiko.gr/

Οδηγία 92/43/ΕΟΚ (1992). Οδηγία των Οικοτόπων της Ευρωπαϊκής Κοινότητας (περιοχές Natura) eur-lex.europa.eu .

Οδηγία 2000/60/EK (2000) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων eur-lex.europa.eu .

Οδηγία 2006/118/EK (2006) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση. eur-lex.europa.eu

Οδηγία 2009/147/EK (2009) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου περί της διατηρήσεως των αγρίων πτηνών. ypen.gov.gr/

Οδηγία (ΕΕ) 2020/2184 (2020) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης (αναδιτύπωση). eur-lex.europa.eu

Π.Δ. 51/2007 (ΦΕΚ 54/Α' 8.3.2007). Καθορισμός μέτρων και διαδικασιών για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2000/60/ΕΚ «για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων» του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000. www.elinyae.gr/

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΥΔΑΤΩΝ. ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΩΝ
ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ) "Εκθεση εφαρμογής της Οδηγίας 2006/118/ΕΚ
"σχετικά με την προστασία των υπογείων υδάτων από τη ρύπανση και την
υποβάθμιση" και της ΚΥΑ 39626/2208/Ε130/2009 του Υδατικού Διαμερίσματος
Κεντρικής Μακεδονίας (GR10). wfdver.ypeka.gr/

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας & Γενική Γραμματεία Φυσικού Περιβάλλοντος
& Υδάτων & Γενική Διεύθυνση Υδάτων. Τεχνικές Προδιαγραφές Μελετών
Ζωνών Υφαλμύρισης Υπόγειων Υδροφορέων Σύμφωνα με τις Απαιτήσεις
Σχεδίων Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών της Οδηγίας
2000/60/ΕΚ. wfdver.ypeka.gr

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας & Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017a). 1η
Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού
Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (ΕΛ 10). Αναλυτικό Κείμενο
Τεκμηρίωσης. Χαρακτηρισμός και αξιολόγηση/ταξινόμηση της κατάστασης των
Υπόγειων Υδατικών Συστημάτων. wfdver.ypeka.gr

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας & Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017b). 1η
Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού
Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (ΕΛ 10). Αναλυτικό Κείμενο
Τεκμηρίωσης. Επικαιροποίηση Μητρώου Προστατευόμενων Περιοχών.
wfdver.ypeka.gr

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας & Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017a). 1η
Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού
Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (ΕΛ 10) Αναλυτικό Κείμενο
Τεκμηρίωσης. Καθορισμός των περιβαλλοντικών στόχων,
συμπεριλαμβανομένων των "εξαιρέσεων" από την επίτευξη των στόχων.
wfdver.ypeka.gr

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας & Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017b). 1η
Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού
Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (ΕΛ 10). Αναλυτικό Κείμενο
Τεκμηρίωσης. Προγράμματα βασικών και συμπληρωματικών μέτρων,
συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης του κόστους τους σε σχέση με την
αποδοτικότητά τους. wfdver.ypeka.gr

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017c). 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (EL 10) Αναλυτικό Κείμενο Τεκμηρίωσης. Χαρακτηρισμός, τυπολογία, τυπο-χαρακτηριστικές συνθήκες αναφορές και αξιολόγηση/ ταξινόμηση της κατάστασης όλων των κατηγοριών επιφανειακών υδατικών συστημάτων. wfdver.ypeka.gr

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017d). 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (EL 10) Αναλυτικό Κείμενο Τεκμηρίωσης .Αναλυτικό Κείμενο Τεκμηρίωσης 1ης Αναθεώρησης ΣΔΛΑΠ Κεντρικής Μακεδονίας (EL10). Καθορισμός των περιβαλλοντικών στόχων, συμπεριλαμβανομένων των "εξαιρέσεων" από την επίτευξη των στόχων (Παραδοτέο Π10). wfdver.ypeka.gr

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- Φορέας διαχείρισης προστατευόμενων περιοχών Θερμαϊκού κόλπου, <https://axiosdelta.gr/>
- Cadence System Analysis, <https://resources.system-analysis.cadence.com/>
- Chongqing Benteng Digital Control Technical Institute (CQBTSK), www.cqbtsk.com
- Περιοδικό «Ελληνικό Πανόραμα», <https://www.elliniko-panorama.gr/>
- Ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια «Βικιπαίδεια», <https://el.wikipedia.org/>
- Επίσημη ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, <https://european-union.europa.eu/>
- ΕΥΑΘ Α.Ε, <https://www.eyath.gr/>
- «Φάρος του Θερμαϊκού», ιστότοπος ειδήσεων, <http://farosthermaikou.blogspot.com/>
- Geophysical equipment manufacturer, www.iris-instruments.com/
- Περιοδικό «parallaxi», <https://parallaximag.gr/>
- Ελληνικές αλυκές ΑΕ , <https://saltworks.gr/>
- Ιστότοπος του Δήμου Θερμαϊκού, www.thermaikos.gr/
- Περιοδικό «Travel», <https://www.travel.gr/>
- Εταιρεία συστημάτων πληροφορικής, <https://www.treecomp.gr/>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας , <https://ypen.gov.gr/>
- U.S. Environmental Protection Agency, <https://archive.epa.gov/>
- ZOND geophysical software interpretation package, <http://zond-geo.com>