



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

*ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ*

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**‘ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΚΑΙ ΖΩΝΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ – ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ  
ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ’**

ΚΟΥΚΑΔΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

**Εξεταστική επιτροπή**

Καρατζάς Γεώργιος, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Κ (επιβλέπων)

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Π.Κ

Καλογεράκης Νικόλαος, Καθηγητής Π.Κ

ΧΑΝΙΑ

Μάρτιος 2005



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Μετά την περάτωση της μεταπτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιο Καρατζά για την ανάθεση της εργασίας και τη συνεχή επιστημονική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Τον κ. Αντώνιο Βαφείδη Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για την άρτια επιστημονική συνεργασία και τη βοήθεια σε όλα τα στάδια πραγματοποίησης της εργασίας καθώς και τον κ. Νικόλαο Καλογεράκη Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Την κ. Μαρία Παπαδοπούλου Dr. Πολιτικό Μηχανικό του Πανεπιστημίου Πάτρας για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που προσέφερε σε όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Την κ. Μαρία Ευδοξία Επίκουρη καθηγήτρια του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη βοήθειά της στην εύρεση περιβαλλοντικών νόμων και διατάξεων.

Το εργαστήριο Αναλυτικής και Περιβαλλοντικής Χημείας του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης για τις χημικές αναλύσεις που πραγματοποίησαν.

Την κ. Χορευτάκη Γ. υποψήφια μεταπτυχιακό καθώς και τους κ. Hamdan H., Ανδρονικίδη Ν., Κρητικάκη Γ., Οικονόμου Ν. και Σπανουδάκη Ν. υποψήφιους διδάκτορες του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη συλλογή των γεωφυσικών δεδομένων και τη συνεχή υποστήριξή τους.

Την οικογένειά μου για την ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν σε όλα τα στάδια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η καθιέρωση των γεωφυσικών μεθόδων στη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής υφάλμυρου ύδατος σε παράκτιο υδροφορέα της βιομηχανικής ζώνης (ΒΙΠΕ) του Ηρακλείου Κρήτης. Η γεωφυσική μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκε ώστε να χαρτογραφηθεί η γεωλογία της περιοχής με τα επικείμενα ρήγματα και να εντοπιστεί το μέτωπο υφαλμύρωσης. Η πολυπλοκότητα για προσομοίωση της παράκτιας ζώνης ενισχύεται από τον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο, ο οποίος αποτελεί το υπόβαθρο της περιοχής. Η μοντελοποίηση εντούτοις της υφάλμυρης ροής απαιτεί γνώση βασικών υδρογεωλογικών παραμέτρων, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα και το πορώδες των γεωλογικών σχηματισμών. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική μελέτη, η οποία σε συνδυασμό με τις ηλεκτρικές μετρήσεις συνέβαλλε στην πρόταση κάποιων αρχικών τιμών για τις εν λόγω παραμέτρους. Το τρισδιάστατο υδρογεωλογικό μοντέλο που προέκυψε τελικά για τον παράκτιο υδροφορέα εντοπίζει την υφάλμυρη ζώνη σε μεγάλο τμήμα της υπό μελέτη περιοχής, η οποία φαίνεται να προέρχεται από ρήγμα που εντοπίζεται στα ανατολικά του χώρου και εκτείνεται μέχρι την ακτογραμμή. Η κύρια υφάλμυρη ζώνη επιβεβαιώνεται επίσης από μετρήσεις χλωριόντων, ιόντων καλίου και νατρίου από παρακείμενες γεωτρήσεις.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΔΟΜΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....</b>	<b>1</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΜΒΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ - ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ.....</b>	<b>4</b>
1.1 Εισαγωγή: Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.....	4
1.2 Μοντελοποίηση υπόγειας ροής υδάτων με συνδυασμό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και Γεωφυσικών Μεθόδων .....	5
1.3 Γεωφυσική και Περιβάλλον.....	6
1.4 Εφαρμοσμένη γεωφυσική στη μελέτη της ρύπανσης εδαφών και υπογείων υδάτων .....	8
1.5 Περιγραφή γεωφυσικής τεχνολογίας .....	8
1.5.1 Μέθοδος Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων .....	9
1.5.2 Σεισμική Ανάκλαση.....	9
1.5.3 Σεισμική Διάθλαση.....	10
1.5.4 Πολυκάναλη ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh .....	10
1.5.5 Μαγνητικές μέθοδοι .....	11
1.5.6 Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού.....	11
1.5.7 Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας .....	12
1.5.8 Βαρυτική μέθοδος.....	12
1.5.9 Γεωραντάρ .....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ.....</b>	<b>15</b>
2.1 Εισαγωγή αριθμητικών μοντέλων στην επιστήμη της υδρολογίας .....	15
2.2 Κατασκευή και εφαρμογή των αριθμητικών μοντέλων.....	15
2.3 Αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης .....	16
2.3.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών .....	16
2.3.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων .....	19
2.4 Αδυναμίες μοντέλων ροής.....	20
2.5 Θεμελιώδης Εξίσωση Ροής.....	21
2.6 Θεμελιώδης Εξίσωση Μεταφοράς Μάζας.....	23

2.6.1 Μεταφορά λόγω διαφοράς συγκεντρώσεως – Διάχυση .....	24
2.6.2 Συμμεταφορά .....	25
2.6.3 Μηχανική Διασπορά.....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ARGUS</b>	
<b>ONE ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΛΥΣΗΣ PTC.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Προσομοίωση υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2 Σχεδιαστικό Πρόγραμμα «Argus One» .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3 Ο αλγόριθμος λύσης « PTC ».....</b>	<b>29</b>
<b>3.4 Θεμελιώδης εξίσωση επίλυσης του αλγορίθμου .....</b>	<b>30</b>
3.4.1 Εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στον αλγόριθμο «PTC» .....	31
3.4.2 Εφαρμογή των πεπερασμένων διαφορών στον αλγόριθμο «PTC» .....	33
3.4.2.1 Η κάθετη παράγωγος .....	33
3.4.2.1 Η παράγωγος του χρόνου .....	34
<b>3.5 Αρχικές – Συνοριακές συνθήκες.....</b>	<b>35</b>
<b>3.6 Στάδια δημιουργίας ενός μοντέλου υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας με</b>	
<b>χρήση του προγράμματος «Argus One» .....</b>	<b>37</b>
3.6.1 Εισαγωγή δεδομένων .....	37
3.6.2 Διαμόρφωση του αλγορίθμου «PTC» .....	37
3.6.2.1 Γενικά (General) .....	37
3.6.2.2 Διαφορετικές Περίοδοι (Stresses).....	38
3.6.3 Εισαγωγή και μορφοποίηση ψηφιοποιημένου χάρτη .....	40
3.6.4 Προσδιορισμός των ορίων – γεωμετρίας του μοντέλου .....	41
3.6.5 Προσδιορισμός πυκνότητας διακριτοποίησης.....	43
3.6.6 Καθορισμός του πυθμένα του ταμιευτήρα .....	43
3.6.7 Απεικόνιση ισοϋψών στο χάρτη .....	43
3.6.8 Καθορισμός υδρογεωλογικών παραμέτρων .....	45
3.6.8.1 Υδραυλική αγωγιμότητα.....	45
3.6.8.2 Βροχόπτωση .....	45
3.6.8.3 Πορώδες.....	46
3.6.9 Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών.....	46
3.6.10 Διακριτοποίηση του μοντέλου .....	47
3.6.11 Εκτέλεση του αλγορίθμου .....	48
3.6.12 Εξαγωγή αποτελεσμάτων .....	49
3.6.13 Επανααξιολόγηση του μοντέλου (Calibration).....	49

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗ ΒΙΠΕ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ, ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ.....</b>	<b>50</b>
4.1 Σκοπός έρευνας .....	50
4.2 Περιγραφή περιοχής μελέτης.....	50
4.3 Γεωλογία ΒΙΠΕ Ηρακλείου .....	52
4.4 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	53
4.4.1 Εισαγωγή .....	53
4.4.2 Ηλεκτρική τομογραφία .....	56
4.4.3 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση εδαφών .....	57
4.4.4 Συλλογή δεδομένων .....	58
4.5 Ερμηνεία ηλεκτρικών τομογραφιών .....	59
4.6 Σύγκριση των γεωτρήσεων που ήδη υπάρχουν στην περιοχή με τις γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας.....	64
4.7 Προτάσεις .....	65
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟ ΤΗΣ ΒΙΠΕ.....</b>	<b>68</b>
5.1 Εισαγωγή .....	68
5.2 Εκτίμηση της διαπερατότητας από ιδιότητες του υλικού του σχηματισμού ....	74
5.3 Δευτερογενές Πορώδες .....	76
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΖΩΝΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ.....</b>	<b>83</b>
6.1 Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης σε υπόγειους υδροφορείς.....	83
6.2 Χαρακτηριστικά ροής του υπό μελέτη υδροφορέα.....	84
6.3 Αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης.....	88
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>95</b>
7.1 Συμπεράσματα .....	95
7.2 Προτάσεις .....	98
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....</b>	<b>100</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΥΚΤΙΟ.....</b>	<b>104</b>

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## Δομή μεταπτυχιακής διατριβής

Στην παρούσα διατριβή, το Κεφάλαιο 1 περιγράφει περιληπτικά τη δομή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), προκειμένου να κατανοηθεί η οικονομία χρόνου, κόστους και επίλυσης πολύπλοκων υδρογεωλογικών προβλημάτων που πραγματοποιείται μέσω ενός ψηφιοποιημένου συστήματος. Η βάση δεδομένων ενός Γ.Σ.Π εμπλουτίζεται από τις πληροφορίες που προσκομίζουν οι γεωφυσικές μέθοδοι, σχετικά με τη γεωλογική χαρτογράφηση και μία αρχική εκτίμηση των χαρακτηριστικών υδρογεωλογικών παραμέτρων των σχηματισμών, γρήγορα και με χαμηλό κόστος. Στο Κεφάλαιο 1 δίνεται παράλληλα ιδιαίτερη έμφαση στην αποτελεσματικότητα των γεωφυσικών μεθόδων στον περιβαλλοντικό τομέα. Αναφέρεται η συνεισφορά παραδοσιακών γεωφυσικών τεχνικών στη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων και στην ανίχνευση ρύπανσης εδαφών και υπογείων υδάτων. Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφονται συνοπτικά οι γεωφυσικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι αριθμητικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στην προσομοίωση της υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων στο υπέδαφος. Τονίζεται η ανάγκη για εφαρμογή των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών, καθώς ένα υδρογεωλογικό πρόβλημα είναι πολυσύνθετο και δύσκολο να επιλυθεί με απλές αλγεβρικές εξισώσεις. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρατίθενται και αναλύονται οι εξισώσεις ροής και μεταφοράς μάζας που χρησιμοποιούνται στην επιστήμη της υδρογεωλογίας.



Το Κεφάλαιο 3 ασχολείται με την αναλυτική περιγραφή του σχεδιαστικού προγράμματος «Argus One» και του αλγορίθμου «PTC» που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της ροής στον υπό μελέτη υφάλμυρο υδροφορέα. Περιγράφεται αλγεβρικά ο τρόπος επίλυσης του αλγορίθμου κατά τη διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων-διαφορών και παρουσιάζονται όλα τα στάδια που απαιτούνται για την εισαγωγή των απαραίτητων υδρογεωλογικών και υδραυλικών παραμέτρων στο πρόγραμμα. Παράλληλα, περιγράφεται ο τρόπος εισαγωγής των διαφόρων πηγαδίων άντλησης ή έγχυσης ύδατος που ενδέχεται να υπάρχουν στην περιοχή. Η επίλυση του αλγορίθμου πραγματοποιείται εύκολα και γρήγορα, αφού προηγηθεί διακριτοποίηση του χώρου ενδιαφέροντος.

Το Κεφάλαιο 4 περιγράφει την περιοχή μελέτης και τη γεωφυσική διασκόπηση που πραγματοποιήθηκε. Ο υπό μελέτη χώρος βρίσκεται στη βιομηχανική ζώνη του Ηρακλείου Κρήτης. Πρόκειται για έναν παράκτιο υδροφορέα, στον οποίο οι υπερ-εντατικές αντλήσεις έχουν δημιουργήσει πρόβλημα υφαλμύρωσης. Η παρούσα μελέτη ανήκει σε πρόγραμμα του Γ΄ ΚΠΣ 2000-06 σχετικά με την προστασία υπόγειων υδροφορέων από υφαλμύρωση μέσω εμπλουτισμού με επεξεργασμένα βιομηχανικά απόβλητα. Προβλέπεται επίσης η ανάπτυξη τεχνολογιών για τη βιώσιμη διαχείριση ιλύων από μονάδες καθαρισμού βιομηχανικών αποβλήτων. Σχετικά με τη γεωφυσική μέθοδο, περιγράφεται αναλυτικά η αρχή λειτουργίας της μεθόδου ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που πραγματοποιήθηκε, οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό μίας ηλεκτρικής διασκόπησης καθώς και ο τρόπος συλλογής των δεδομένων από τις τρεις γεωηλεκτρικές τομές. Οι γεωηλεκτρικές τομές χαρτογράφησαν γεωλογικά το χώρο μελέτης, εντόπισαν πιθανά ρήγματα, προσδιόρισαν τη ζώνη υφαλμύρωσης και τελικά συνέβαλλαν στην επιλογή θέσης γεωτρήσεων για την προστασία του παράκτιου υδροφορέα.

Το Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τις μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους των γεωλογικών σχηματισμών της ΒΙΠΕ. Αποτελεί το δυσκολότερο κεφάλαιο της μεταπτυχιακής διατριβής, εξαιτίας της πολυπλοκότητας των σχέσεων που ισχύουν για καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους και τη μη-ύπαρξη πληροφοριών από διαγραφίες και δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στο χώρο μελέτης. Η βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε, προκειμένου να καθοριστούν οι κατάλληλες σχέσεις, απέδειξε την πολυπλοκότητα μοντελοποίησης ρηγματωμένης περιοχής. Το συγκεκριμένο πρόβλημα

είναι κυρίαρχο στη βιομηχανία του πετρελαίου, από την οποία προέρχονται οι περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές. Η βιβλιογραφική επομένως έρευνα, η οποία αποτέλεσε σημαντικό κομμάτι της εργασίας, απέδωσε τελικά και συνέβαλλε στον καθορισμό της επιθυμητής σχέσης για τη μοντελοποίηση της περιοχής. Το στάδιο αυτό ήταν ουσιώδες για την προσομοίωση της υπόγειας ροής του υφάλμυρου ύδατος, καθώς προσέφερε μία αρχική εκτίμηση για τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους των γεωλογικών σχηματισμών.

Το Κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα για την προσομοίωση της υπόγειας ροής στη ΒΙΠΕ Ηρακλείου. Η μοντελοποίηση της περιοχής με την εισαγωγή των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών και πληροφοριών μέσω παρακείμενων γεωτρήσεων απέφερε στοιχεία σχετικά με τα υδραυλικά ύψη που παρατηρούνται στο χώρο μελέτης. Το υφάλμυρο νερό έχει διεισδύσει σε μεγάλο τμήμα της περιοχής και φαίνεται να προέρχεται από ρήγμα που εντοπίζεται στα ανατολικά του χώρου και εκτείνεται μέχρι την ακτογραμμή. Στα νοτιοανατολικά του μοντέλου προσομοίωσης παρατηρείται ροή γλυκού νερού από την ενδοχώρα, η οποία αποτρέπει την εξάπλωση της υφάλμυρης ζώνης σε ολόκληρο το χώρο μελέτης. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις ιόντων χλωρίου, καλίου και νατρίου, οι οποίες απέδειξαν πολύ αυξημένες συγκεντρώσεις στο σύνολο της βιομηχανικής περιοχής, με κύριο επίκεντρο το νότιο σύνορο της περιοχής.

Το Κεφάλαιο 7 αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο της μεταπτυχιακής εργασίας, το οποίο πραγματεύεται τα συμπεράσματα που απορρέουν σχετικά με τη γεωφυσική διασκόπηση που έλαβε χώρα και τη ροή του υφάλμυρου ύδατος στη ΒΙΠΕ Ηρακλείου. Επισημαίνεται ο ρόλος των γεωφυσικών μεθόδων τόσο στο γεωλογικό χαρακτηρισμό και στη χαρτογράφηση του μετώπου υφαλμύρωσης όσο και στην εύρεση των απαραίτητων υδρογεωλογικών σχέσεων, για αρχική εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους των γεωλογικών σχηματισμών. Η προσομοίωση τέλος της υπόγειας ροής εντόπισε την προβληματική περιοχή και ανέδειξε το ρόλο του ρήγματος ως την κύρια δίοδο υφάλμυρου νερού προς την ενδοχώρα. Γενικά, η Βιομηχανική Περιοχή του Ηρακλείου χαρακτηρίζεται ως μία έντονα καρστικοποιημένη περιοχή, στην οποία τα ρήγματα παίζουν τον κυρίαρχο ρόλο στην υπόγεια ροή των υδάτων.

# ΣΥΜΒΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ - ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

## 1.1 Εισαγωγή: Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.) είναι μία σχετικά νέα τεχνολογία, η οποία συμβάλλει στην εισαγωγή, επεξεργασία, διαχείριση, αποθήκευση και τελικά παρουσίαση πληροφοριών που αφορούν στο χώρο και στις δραστηριότητες που επιτελούνται σε αυτόν. Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός Γ.Σ.Π. είναι αφενός η δομημένη γεωγραφική πληροφορία, εφόσον κάθε αντικείμενο στο χώρο προσδιορίζεται με βάση το σχήμα του, τη θέση ως προς ένα σύστημα αναφοράς και τις ιδιότητές του, και αφετέρου ο συνδυασμός της χαρτογραφικής και στατιστικής πληροφορίας.

Γενικά, ως Γ.Σ.Π. ορίζεται η σύνδεση ενός γεωγραφικού αρχείου μίας περιοχής (π.χ. χάρτη) με βάσεις ποιοτικών και ποσοτικών πληροφοριών για τη συγκεκριμένη περιοχή. Ο αντίστοιχος αγγλικός όρος που χρησιμοποιείται ευρύτατα είναι GIS – Geographic Information System.

Ένα Γ.Σ.Π., όπως κάθε ηλεκτρονικό σύστημα πληροφοριών, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία καθιστούν αναμφισβήτητη την αναγκαιότητα της χρήσης του στο σχεδιασμό ενός χώρου (Μπούτζουκα, 2004). Από τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

- Δυνατότητα καταγραφής και επεξεργασίας μεγάλου όγκου πληροφοριών
- Ταχύτητα αναζήτησης συγκεκριμένων στοιχείων
- Δυνατότητα ταυτόχρονης παρουσίασης διαφορετικών πληροφοριών, μέσω της υπέρθεσης διαφόρων θεματικών χαρτών (π.χ. σε ένα χάρτη μπορούν να

απεικονίζονται ταυτόχρονα οι ισοϋψείς, το οδικό δίκτυο, οι καλλιέργειες, η υπόγεια ρύπανση κ.α.)

- Δυνατότητα παραγωγής θεματικών χαρτών τόσο της υφιστάμενης κατάστασης όσο και σεναρίων μελλοντικής εξέλιξής της

Τέλος, ένα Γ.Σ.Π. μπορεί να χρησιμοποιηθεί από πολλούς φορείς καθώς έχει δυνατότητες εφαρμογής σε μεγάλο αριθμό πεδίων, όπως:

- Περιφερειακός και Αστικός προγραμματισμός
- Κτηματολόγιο
- Συγκοινωνίες – Μεταφορές
- Δίκτυα κοινής ωφελείας
- Περιβάλλον
- Εκπαίδευση – Υγεία – Πρόνοια
- Έκδοση χαρτών
- Προβολή έργων

## **1.2 Μοντελοποίηση υπόγειας ροής υδάτων με συνδυασμό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και Γεωφυσικών Μεθόδων**

Η εισαγωγή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Γ.Σ.Π) στη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής προσφέρει τη δυνατότητα για καλύτερη οργάνωση, ποσοτικοποίηση καθώς και ερμηνεία μεγάλου όγκου υδρογεωλογικών δεδομένων.

Ο προσδιορισμός των απαραίτητων πληροφοριών για την κατασκευή ενός αξιόπιστου υδρολογικού μοντέλου αποτελεί μία χρονοβόρα διαδικασία και συχνά απαιτείται η επεξεργασία δεδομένων μεγάλου όγκου. Συνήθως, εκτός από τη γνώση πολύπλοκων υδρογεωλογικών στοιχείων, όπως για παράδειγμα τα υδραυλικά ύψη, το πορώδες και η υδραυλική αγωγιμότητα των γεωλογικών σχηματισμών, επιβάλλεται η σωστή πληροφόρηση για τις σχεδιαστικές παραμέτρους του μοντέλου, όπως η τοποθεσία των γεωτρήσεων, οι τιμές άντλησης ή έγχυσης ύδατος, ακόμη και βοηθητικά στοιχεία όπως οι συνοριακές συνθήκες της περιοχής μελέτης.

Στην πραγματικότητα, όλες αυτές οι πληροφορίες μεταβάλλονται τόσο χωρικά όσο και χρονικά, με αποτέλεσμα το εγχείρημα για προσομοίωση της υπόγειας ροής να καθίσταται ακόμη δυσκολότερο. Με την ανάπτυξη όμως της τεχνολογίας πάνω στα

σχεδιαστικά προγράμματα των υπολογιστών, αρκετές από τις παραπάνω πληροφορίες είναι πλέον διαθέσιμες είτε σε βάσεις δεδομένων είτε σε χάρτες, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την επεξεργασία τους μέσω των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του συστήματος GIS σχετικά με τη μοντελοποίηση της υπόγειας κίνησης των υδάτων είναι ότι επιτρέπει στο χρήστη με απλό τρόπο να καταχωρεί σε μία κατάλληλη βάση δεδομένων τα χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας, όπως αυτά συλλέχθηκαν έπειτα από μετρήσεις ή από προηγούμενες μελέτες. Στη συνέχεια, ακολουθεί η σύνδεση των διαθέσιμων πληροφοριών με τη θέση τους πάνω στους ψηφιοποιημένους χάρτες. Με τον τρόπο επομένως αυτό δημιουργούνται τελικά απλοί ή συνδυαστικοί θεματικοί χάρτες, οι οποίοι προσφέρουν τη δυνατότητα συστηματικής ανάλυσης και ερμηνείας των υδρογεωλογικών δεδομένων. Πρόκειται συνεπώς για ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων.

Φυσικά για την ορθή μοντελοποίηση μίας υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας θα πρέπει να εισαχθούν στο μοντέλο οι κατάλληλες παράμετροι, οι οποίες σχετίζονται με υδρογεωλογικούς παράγοντες της περιοχής. Το πορώδες, η διαπερατότητα, η υδραυλική αγωγιμότητα αποτελούν στοιχεία ουσιώδη για την προσομοίωση του υπό μελέτη φυσικού συστήματος.

Λύση στο πολύπλοκο πρόβλημα εύρεσης των υδρογεωλογικών παραμέτρων μπορεί να προσφέρει η επιστήμη της Περιβαλλοντικής Γεωφυσικής. Η εν λόγω επιστήμη εφαρμόζεται με επιτυχία στην ανίχνευση και οριοθέτηση των γεωλογικών σχηματισμών ενός χώρου μελέτης. Ειδικότερα, η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι σε θέση να προσφέρει σαφή συμπεράσματα άμεσα και αξιόπιστα. Με τη χρήση επομένως των απαραίτητων γεωφυσικών μεθόδων και διαγραφιών (well-logs) είναι δυνατόν να καθοριστεί η γεωλογία της περιοχής και κατά συνέπεια μέσω των προτεινόμενων γεωτρήσεων να προσδιοριστούν οι υδρογεωλογικές παράμετροι, οι οποίες είναι ουσιώδεις για τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής.

### **1.3 Γεωφυσική και Περιβάλλον**

Ο όρος γεωφυσική διασκόπηση αναφέρεται στη μελέτη της δομής των απρόσιτων στην άμεση παρατήρηση γεωλογικών στρωμάτων του φλοιού της γης. Αυτό επιτυγχάνεται με βάση νόμους της φυσικής και συγκεκριμένα με πραγματοποίηση μετρήσεων χαρακτηριστικών φυσικών μεγεθών του υπεδάφους.

Τα τελευταία χρόνια οι γεωφυσικές μέθοδοι παρουσίασαν σημαντική τεχνολογική άνθιση, με αποτέλεσμα να εφαρμόζονται στην απεικόνιση της υπεδάφειας δομής. Έχουν καθιερωθεί πλέον σε τομείς όπως η μεταλλευτική έρευνα, η ανίχνευση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, η εφαρμοσμένη μηχανική και η αρχαιομετρία. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραδοσιακές γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονταν στην ανίχνευση μεταλλευμάτων και πετρελαίου βρίσκουν πια πρόσφορο έδαφος στον εντοπισμό της υπεδάφειας ρύπανσης. Πρόσφατα αναπτύχθηκε ένας καινούριος κλάδος της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, ο οποίος πραγματεύεται κατά κύριο λόγο περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν στην ανίχνευση και χαρτογράφηση ρύπανσης σε εδάφη και υπόγεια νερά. Η Περιβαλλοντική Γεωφυσική εμφανίζει αυξημένες δυνατότητες στη γρήγορη, μη-καταστρεπτική αξιολόγηση των ορίων μίας ρυπασμένης περιοχής, καθώς επίσης και στη χαρτογράφηση της γεωλογικής δομής του υπεδάφους.

Οι γεωφυσικές τεχνικές επιτρέπουν την παρακολούθηση των συνθηκών του υπεδάφους, προκειμένου να διαπιστωθεί η περαιτέρω ρύπανση. Με τις πληροφορίες παράλληλα που προσδίδουν μειώνουν αισθητά το κόστος του γεωτρητικού προγράμματος, καθώς με τη διεξαγωγή τους στο αρχικό στάδιο της μελέτης διαφωτίζουν τόσο την κατάσταση της υπεδάφειας ρύπανσης όσο και τη στρωμάτωση του υπεδάφους.

Περιβαλλοντικά προβλήματα όπως ο εντοπισμός διαρροών καυσίμου από υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης, η ανίχνευση και οριοθέτηση εγκαταλελειμμένων χωματερών, η εύρεση θαμμένων απορριμμάτων, η μελέτη και κατανομή της ρύπανσης (contaminant plumes) στο υπόγειο νερό, η μελέτη προβλημάτων υφαλμύρωσης αλλά και η παρακολούθηση μέτρων αποκατάστασης του προβλήματος, αντιμετωπίζονται πλέον με μεγαλύτερη ευκολία, μειωμένο κόστος και ασφαλή αποτελέσματα με τη βοήθεια της εφαρμοσμένης γεωφυσικής (Oteri 1981, Ross et al. 1990, De Lima et al. 1995, Fitterman 1996, Sauck et al. 1998, Atekwana et al. 2000, Buselli and Lu 2001, Orlando et al. 2001) (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002).

#### **1.4 Εφαρμοσμένη γεωφυσική στη μελέτη της ρύπανσης εδαφών και υπογείων υδάτων**

Οι γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται στην ανίχνευση της υπεδάφειας ρύπανσης και στον έλεγχο της ποιότητας των υπογείων υδάτων ποικίλουν. Η επιλογή τους εξαρτάται κάθε φορά από τον επιθυμητό στόχο και τη φύση του προβλήματος που μελετάται. Ειδικότερα, οι μέθοδοι της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του γεωραντάρ είναι σε θέση να ανιχνεύσουν άμεσα την παρουσία ρύπανσης στο υπέδαφος, μετρώντας τη μεταβολή στην αγωγιμότητα του υπεδάφους, η οποία προκαλείται από τους ρυπογόνους παράγοντες. Αντίθετα, άλλες γεωφυσικές τεχνικές όπως η σεισμική ανάκλαση - διάθλαση και η μαγνητομετρία δεν είναι κατάλληλα εργαλεία για την “άμεση” ανίχνευση της ρύπανσης. Εντούτοις, προσδίδουν πληροφορίες στην αναγνώριση των λιθολογικών χαρακτηριστικών και συνθηκών του υπεδάφους, οι οποίες με τη σειρά τους συμβάλλουν στην εξάπλωση της ρύπανσης.

Στις περιπτώσεις αυτές, η γεωφυσική χρησιμοποιείται ως εργαλείο “έμμεσης” ανίχνευσης υπεδάφειας ρύπανσης. Ενδεικτικά αναφέρονται αρκετές περιπτώσεις στις οποίες η ρύπανση υπογείου νερού είτε ανιχνεύεται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, ώστε να μη μπορεί να επηρεάσει την ηλεκτρική αντίσταση ή αγωγιμότητα του νερού, είτε δεν επηρεάζει αισθητά καμία από τις φυσικές ιδιότητες του υγιούς πετρώματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η γεωφυσική χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό των γεωλογικών παραμέτρων του υπεδάφους. Η συγκεκριμένη εφαρμογή επιτυγχάνει τη σκιαγράφηση της ρύπανσης υπογείου νερού με έναν πιο έμμεσο τρόπο ή τουλάχιστον εξασφαλίζει καλύτερη καθοδήγηση ως προς την τοποθεσία εγκατάστασης των γεωτρήσεων παρακολούθησης.

Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι η ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων δεν αποτελεί πάντοτε ένα εύκολο ή απλό εγχείρημα, και για το λόγο αυτό απαιτείται η συμβολή περισσότερων από μίας γεωφυσικών μεθόδων ή άλλων επιστημών (υδρογεωλογία, γεωλογία, γεωχημεία) (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002).

#### **1.5 Περιγραφή γεωφυσικής τεχνολογίας**

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται στην ανίχνευση και οριοθέτηση υπεδάφειων περιοχών ρύπανσης (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος 2002). Αυτές περιλαμβάνουν:

- Μέθοδος Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων (Electromagnetometry)
- Σεισμική Ανάκλαση (Seismic Reflection)
- Σεισμική Διάθλαση (Seismic Refraction)
- Μαγνητικές μέθοδοι (Magnetometry)
- Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού (Self Potential)
- Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization)
- Βαρυτική μέθοδος (Gravity)
- Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)
- Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Electrical Resistivity)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σκοπός της παρούσας αναφοράς δεν είναι η εκτενής παρουσίαση των γεωφυσικών μεθόδων, αλλά μία συνοπτική περιγραφή τους, προκειμένου να κατανοήσει ο αναγνώστης τις βασικές αρχές λειτουργίας τους. Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία χρησιμοποιήθηκε για το γεωλογικό χαρακτηρισμό της Βιομηχανικής Περιοχής του Ηρακλείου Κρήτης και την οριοθέτηση της ζώνης υφαλμύρωσης, περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

### **1.5.1 Μέθοδος Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων**

Η μέθοδος Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων βασίζεται στη μέτρηση της απόκρισης ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου το οποίο προκαλείται μέσα στη γη. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής (κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας) στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο χαμηλών συχνοτήτων που παράγεται από έναν πομπό προκαλεί τη ροή ρεύματος μέσα σε ηλεκτρικά αγωγά υλικά του εδάφους. Το παραγόμενο αυτό ρεύμα προκαλεί με τη σειρά του ένα δευτερεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο επιστρέφει στην επιφάνεια. Τελικά, ένας δέκτης ανιχνεύει το δευτερεύον πεδίο όταν το πρωτεύον είναι μηδενικό και μετράει τη χρονική μεταβολή της έντασής του.

### **1.5.2 Σεισμική Ανάκλαση**

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στους νόμους διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, τα οποία παράγονται τεχνητά στην επιφάνεια της γης. Τα κύματα κατά τη διαδρομή τους



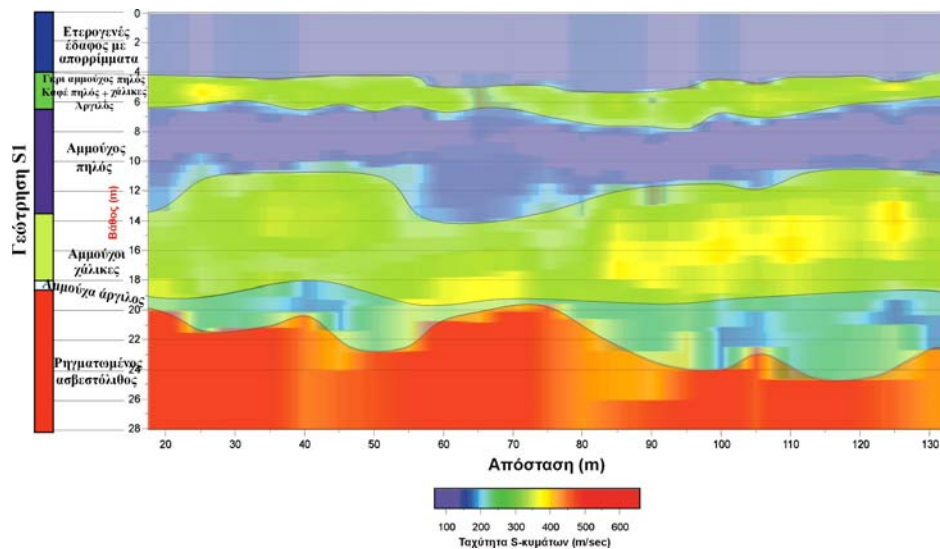
μέσα στο υπέδαφος ανακλώνται πάνω σε ασυνέχειες που βρίσκονται μέσα στο φλοιό της γης και κυρίως στα επιφανειακά στρώματά του. Τα απευθείας και τα ανακλώμενα κύματα καταγράφονται από γεώφωνα που τοποθετούνται σε σχετικά μικρές αποστάσεις από το σημείο παραγωγής των ελαστικών κυμάτων. Η μέθοδος της Σεισμικής Ανάκλασης συμβάλλει στη χαρτογράφηση δομών που βρίσκονται σε σημαντικά βάθη, με την ίδια σχεδόν ακρίβεια με την οποία χαρτογραφούνται και οι επιφανειακές δομές.

### **1.5.3 Σεισμική Διάθλαση**

Η Σεισμική Διάθλαση βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των απευθείας κυμάτων και των κυμάτων διάθλασης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται οι χρόνοι διαδρομής των κυμάτων, προκειμένου να καθοριστούν οι ταχύτητές τους στα επιφανειακά στρώματα του υπεδάφους. Η μέθοδος της διάθλασης δεν είναι τόσο ακριβής όσο αυτή της ανάκλασης και παρουσιάζει μεγαλύτερες δυσκολίες κατά την ερμηνεία των μετρήσεων. Παρόλα αυτά, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί μπορεί να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σε περιοχές μορφολογικών ανωμαλιών, όπου δεν εφαρμόζονται εύκολα άλλες μέθοδοι.

### **1.5.4 Πολυκάναλη ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh**

Η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων περιλαμβάνει τη λήψη καταγραφών πλούσιων σε επιφανειακά κύματα Rayleigh και την αντιστροφή των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς τους, για τον καθορισμό της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων κατανεμημένης με το βάθος. Η μεθοδολογία της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι δυνατό να χωριστεί σε δύο διακριτά στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, από τις σεισμικές καταγραφές κοινής πηγής προκύπτουν οι πειραματικές καμπύλες διασποράς. Στο δεύτερο στάδιο προσδιορίζονται οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς για οριζόντια στρωματωμένο εδαφικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας μία κατάλληλη τεχνική. Τροποποιώντας επαναληπτικά το εδαφικό μοντέλο επιτυγχάνεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης διασποράς στην πειραματική (αντιστροφή) και προσδιορίζεται το τελικό εδαφικό μοντέλο (κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων με το βάθος). Η πληροφορία αυτή αντιστοιχείται στο κέντρο της διάταξης των γεωφώνων.



**Σχήμα 1.2:** Αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή σεισμικής μεθόδου των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh (MASW) στην περιοχή Γένοβα Ιταλίας. Η επεξεργασία των δεδομένων αποκάλυψε έξι γεωλογικά στρώματα, εκ των οποίων το πρώτο στρώμα στα αρχικά 4m. οριοθετεί τη ρυπογόνο περιοχή. Οι αρχικές ενδείξεις επιβεβαιώθηκαν από παρακείμενη γεώτρηση SI (Κρητικάκης, 2004).

### 1.5.5 Μαγνητικές μέθοδοι

Οι μαγνητικές μέθοδοι βασίζονται στη μέτρηση μεταβολών του μαγνητικού πεδίου της γης, οι οποίες οφείλονται στην παρουσία μαγνητικών σωμάτων στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού. Οι μεταβολές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον σχετίζονται με μαγνητικές ανωμαλίες μικρής κλίμακας στην επιφάνεια της γης (τοπικές μεταβολές της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου). Η αποτελεσματικότητα των μεθόδων αυτών περιορίζεται από παρεμβολές (θόρυβος), οι οποίες οφείλονται σε διακυμάνσεις που προκαλούνται από κτίρια, σιδερένιες κατασκευές, οχήματα κτλ.

### 1.5.6 Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού

Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μετρήσεις του δυναμικού, το οποίο προέρχεται από φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα τοπικού χαρακτήρα. Τα ρεύματα αυτά είτε έχουν ηλεκτροκινητική προέλευση είτε παράγονται με ηλεκτροχημική δράση. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της τάσης χρησιμοποιούνται κατάλληλα βολτόμετρα ή γαλβανόμετρα. Οι μετρήσεις της τάσης πραγματοποιούνται με δύο βασικούς τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, η τάση υπολογίζεται σε διάφορα μέρη οριζόντιας γραμμής η οποία διασχίζει την περιοχή μελέτης. Οι αποστάσεις μεταξύ των

ηλεκτροδίων διατηρούνται σταθερές και στο τέλος υπολογίζεται η βαθμίδα του δυναμικού. Κατά το δεύτερο τρόπο, το ένα ηλεκτρόδιο παραμένει σε σταθερή θέση ενώ με το άλλο εντοπίζονται σημεία τα οποία εμφανίζουν το ίδιο δυναμικό με αυτό του ακίνητου ηλεκτροδίου.

### **1.5.7 Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας**

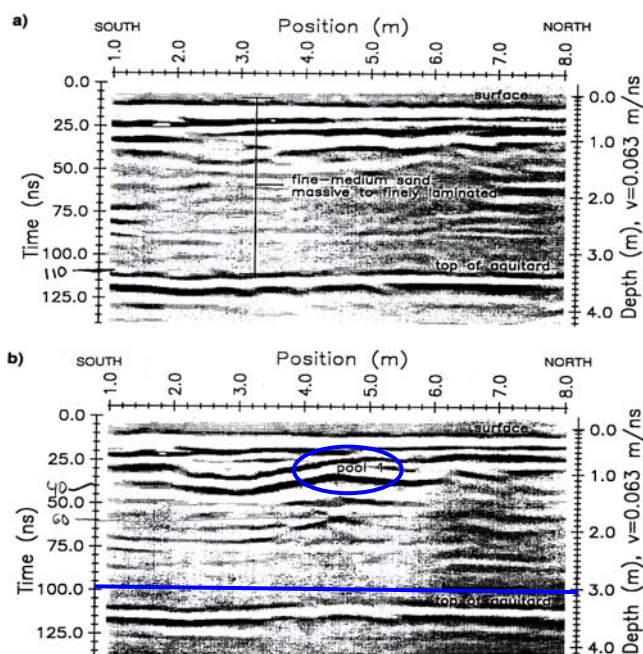
Όταν το συνεχές ρεύμα που διαβιβάζεται στη γη μέσω δύο ηλεκτροδίων διακοπεί απότομα, η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων δεν μηδενίζεται αμέσως. Αντίθετα, αρχίζει να ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο και περνούν αρκετά δευτερόλεπτα έως ότου αυτή μηδενιστεί. Το γεγονός οφείλεται στην ικανότητα του υπεδάφους να λειτουργεί ως πυκνωτής και να συσσωρεύει ηλεκτρικά φορτία. Η επαγόμενη πολικότητα οφείλεται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και μπορεί να δημιουργηθεί από κόκκους μεταλλικών ορυκτών που βρίσκονται σε πορώδη πετρώματα ή από την τάση που αναπτύσσεται ανάμεσα στις επιφάνειες επαφής ορισμένων πετρωμάτων με ηλεκτρολύτες. Με τις μετρήσεις επαγόμενης πολικότητας δύο είναι οι ποσότητες που υπολογίζονται: η φορτιστικότητα και η πολικότητα.

### **1.5.8 Βαρυτική μέθοδος**

Στις διασκοπήσεις με τη βαρυτική μέθοδο μετράται η επιτάχυνση της βαρύτητας με βαρυτόμετρα στην επιφάνεια της γης. Ο στόχος είναι να εντοπιστεί η επίδραση που προκαλείται στο βαρυτικό πεδίο από τη μεταβολή της πυκνότητας στα γεωλογικά στρώματα. Η ένταση του πεδίου βαρύτητας ή η επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης εξαρτάται κύρια από το μέγεθος και το σχήμα καθώς και από τη μάζα και την ταχύτητα περιστροφής της γης. Επομένως, πριν από την ερμηνεία των βαρυτικών δεδομένων επιβάλλεται η πραγματοποίηση διορθώσεων στις μετρήσεις, προκειμένου να αντισταθμιστούν αυτές οι επιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η διάκριση πολύ μικρών αλλαγών στην επιτάχυνση της βαρύτητας, οι οποίες προσδίδουν πληροφορίες για την πλευρική μεταβολή της πυκνότητας των πετρωμάτων.

### 1.5.9 Γεωραντάρ

Το σύστημα του γεωραντάρ εκπέμπει έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό στο υπό έρευνα υλικό. Ο παλμός, που διαρκεί μερικά νανοδευτερόλεπτα ( $10^{-9}$  sec), «ταξιδεύει» στο υπέδαφος μέχρι να συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Ένα μέρος της ενέργειας του παλμού διαδίδεται στο δεύτερο στρώμα ενώ ένα μέρος ανακλάται στην επιφάνεια, οπότε και επιστρέφει στην κεραία του δέκτη. Στη συνέχεια το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης προωθείται στη μονάδα ελέγχου, όπου καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του κύματος. Η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο υπέδαφος είναι συνάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης και της συχνότητας εκπομπής της κεραίας του πομπού.



**Σχήμα 1.3:** Δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά μήκος μίας γραμμής μελέτης γεωραντάρ: (a) πριν από την έγχυση τετραχλωροαιθυλενίου (PCE) και (b) 24 ώρες μετά την έγχυση. Παρατηρείται μία πρώτη λίμνη ρύπων DNAPL που σχηματίζεται καθώς και ο υδροφόρος ορίζοντας (Brewster et al., 1995).

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει ότι κάθε μία από τις γεωφυσικές μεθόδους εφαρμόζεται για συγκεκριμένο σκοπό, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες και τον επιθυμητό στόχο της μελέτης. Στα πλαίσια μίας γεωφυσικής διασκόπησης πραγματοποιούνται κατά κύριο λόγο οι περισσότερες μέθοδοι,

προκειμένου να συγκριθούν τα μεταξύ τους αποτελέσματα και να προκύψει η καλύτερη δυνατή λύση. Ιδιαίτερα για περιβαλλοντικές έρευνες, προτιμάται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία είναι άμεση και προσφέρει αξιόπιστα συμπεράσματα σχετικά με την παρουσία ή όχι ρύπων στο υπέδαφος και στα υπόγεια νερά. Η μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών αποτελεί έναν παράγοντα, ο οποίος επηρεάζεται άμεσα από την παρουσία ρυπογόνων ουσιών. Η μέθοδος της ηλεκτρικής χαρτογράφησης εφαρμόζεται κυρίως για μία αρχική χαρτογράφηση της γεωλογίας της υπό μελέτη περιοχής σε σχετικά μικρά βάθη, ενώ η ηλεκτρική τομογραφία προσφέρει επιπλέον λεπτομέρεια όσον αφορά τόσο τη γεωλογία όσο και την παρουσία υφάλμυρων ζωνών και ρυπασμένων εδαφών.

Η μέθοδος του γεωραντάρ ενδείκνυται σε περιπτώσεις ρύπανσης του υπεδάφους από υδρογονάνθρακες που επιπλέουν πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα (LNAPL). Ο υδροφόρος ορίζοντας και οι ρυπαντές εντοπίζονται ως χαρακτηριστικές ανωμαλίες που παρατηρούνται κατά την επεξεργασία του σήματος.

Οι σεισμικές μέθοδοι και ιδιαίτερα η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh μπορούν να προσδιορίσουν ρυπασμένα εδάφη σε σχετικά μικρά βάθη. Φυσικά ο κύριος ρόλος των σεισμικών μεθόδων είναι η χαρτογράφηση του γεωλογικού υποβάθρου, το οποίο τελικά αποτελεί τον κύριο παράγοντα για τη μεταφορά ενός ρυπαντή. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται και στον περιβαλλοντικό τομέα.

Οι ηλεκτρομαγνητικές τέλος μέθοδοι προσφέρουν μία πρώτη εικόνα σχετικά με τη μεταβολή των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους και μπορούν να προτείνουν μία αρχική εκτίμηση της γεωλογικής κατάστασης. Συνήθως προηγούνται των υπολοίπων γεωφυσικών μεθόδων, καθώς πραγματοποιούνται αρκετά γρήγορα και μπορούν να προτείνουν περιοχές όπου θα επικεντρωθεί η αναλυτικότερη έρευνα. Το μειονέκτημα τους είναι ότι μπορούν να δώσουν πληροφορίες σε μειωμένα βάθη (περίπου 6m.) σε αντίθεση με τις σεισμικές μεθόδους και τις ηλεκτρικές τομογραφίες, των οποίων το βάθος διασκόπησης, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες, μπορεί να ξεπεράσει και τα 100m.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ

### 2.1 Εισαγωγή αριθμητικών μοντέλων στην επιστήμη της υδρολογίας

Τα μοντέλα ροής για τα υπόγεια ύδατα περιγράφουν μαθηματικά τη συμπεριφορά ενός φυσικού συστήματος, όσον αφορά στην κίνηση των υπογείων νερών και στη μεταφορά ρύπων σε αυτά. Η ανάγκη για χρήση αριθμητικών μεθόδων προκύπτει από την αδυναμία των αναλυτικών λύσεων να καλύψουν με αξιοπιστία τα πρακτικά προβλήματα που προκύπτουν από την προσομοίωση ενός πολύπλοκου φυσικού συστήματος. Ειδικά, όταν πρόκειται για δισδιάστατα και τρισδιάστατα προβλήματα δεν είναι δυνατόν να βρεθούν άμεσες αναλυτικές λύσεις για τις γενικές μορφές των εξισώσεων. Ακόμη όμως και όταν πρόκειται για ένα σχετικά απλό σύστημα με ακανόνιστη εντούτοις γεωμετρία και έντονη ετερογένεια, το πρόβλημα εξακολουθεί να είναι δύσκολο.

Τα μαθηματικά επομένως μοντέλα αποτελούν χρήσιμα εργαλεία στην έρευνα των υπογείων υδάτων, καθώς επιτρέπουν την προσομοίωση σύνθετων κυρίως φαινομένων σχετικών με υπόγειες ροές, όπως είναι η εκμετάλλευση υπογείων πόρων, η προστασία από υπαλμύρωση παράκτιων υδροφορέων κλπ.

### 2.2 Κατασκευή και εφαρμογή των αριθμητικών μοντέλων

Πριν αρχίσει ο σχεδιασμός ενός αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης κάποιου φυσικού συστήματος, είναι ανάγκη να καθοριστούν οι υδρογεωλογικές παράμετροι που

διέπουν την περιοχή. Κατόπιν, πρέπει να προσδιοριστούν οι κύριες φυσικές διεργασίες που επικρατούν και να επιλεγούν ανάλογα οι φυσικοί νόμοι που τις διέπουν. Οι νόμοι αυτοί συνήθως εκφράζονται με μαθηματικό τρόπο μέσω διαφορικών εξισώσεων. Το μαθηματικό επομένως πρόβλημα καθορίζεται πλήρως όταν περιγραφούν οι φυσικοί νόμοι με τις κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις και παράλληλα καθοριστούν με σαφήνεια τα όρια και οι οριακές συνθήκες του μοντέλου, έπειτα από τις απαραίτητες υδρογεωλογικές έρευνες.

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων με αριθμητικές μεθόδους επιτυγχάνεται με διακριτοποίηση του συστήματος και προσέγγιση των διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικές σε έναν πεπερασμένο αριθμό σημείων πεδίου. Η αριθμητική συνεπώς λύση του μαθηματικού προβλήματος επικεντρώνεται στην επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων, οι οποίες για πραγματικά προβλήματα πεδίου είναι συνήθως της τάξης των χιλιάδων. Η διαδικασία της επίλυσης πραγματοποιείται με έναν αριθμητικό κώδικα – αλγόριθμο, κατασκευασμένο έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του χρήστη για ορθολογική μοντελοποίηση της περιοχής.

## 2.3 Αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης

### 2.3.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί την παλαιότερη μέθοδο διακριτοποίησης των διαφορικών εξισώσεων. Στόχος της μεθόδου είναι η μετατροπή της διαφορικής εξίσωσης σε εξίσωση διαφορών, δηλαδή σε μία αλγεβρική εξίσωση. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται με την προσέγγιση μερικών παραγώγων με όρους διαφορών. Ακόμη όμως και στην παραπάνω μετατροπή υπεισέρχεται ένα σφάλμα, το οποίο όταν είναι μεγάλο καθιστά αναξιόπιστη τη μοντελοποίηση. Η προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών γίνεται με χρήση της σειράς Taylor:

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x_0} * \Delta x + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x_0} * (\Delta x)^2 + \dots \quad (2.1)$$

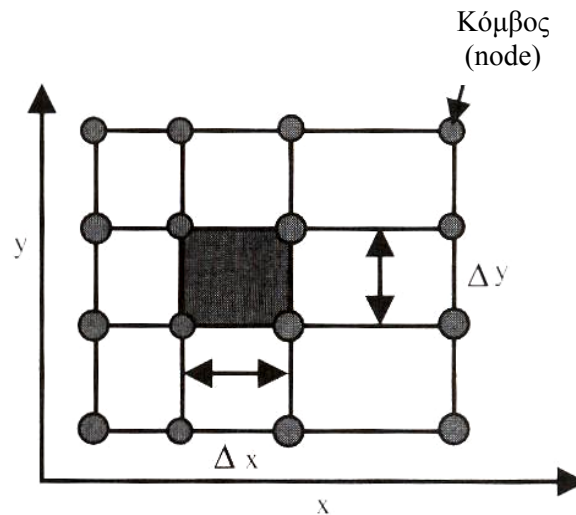
όπου, το  $\Delta x$  αντιστοιχεί σε αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής  $x$  (Σχήμα 2.1).



Επομένως, η πρώτη παράγωγος σε ένα σημείο  $x$  μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση

ίση με τον όρο  $\frac{df}{dx}\bigg|_{x_0} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$  με κάποιο σφάλμα, το οποίο αντιστοιχεί

στον παράγοντα  $\frac{1}{2!} \frac{d^2 f}{dx^2}\bigg|_{x_0} * (\Delta x)$ .



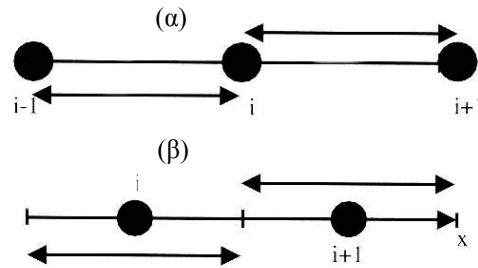
**Σχήμα 2.1:** Απεικόνιση 2D διακριτοποίησης σε κানাβο. Τα  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  παριστάνουν την αύξηση στις ανεξάρτητες μεταβλητές  $x$  και  $y$ . Οι δε κύκλοι αντιστοιχούν στους κόμβους του συστήματος (Pinder, 2002).

Εύκολα συνεπώς συμπεραίνεται ότι όταν η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης  $f$  είναι μεγάλη ή αντίστοιχα το βήμα διακριτοποίησης  $\Delta x$  είναι μεγάλο, το σφάλμα που θα

προκύψει κατά την προσέγγιση του λόγου  $\frac{1}{2!} \frac{d^2 f}{dx^2}\bigg|_{x_0} * (\Delta x)$  θα είναι με τη σειρά του και αυτό αυξημένο.

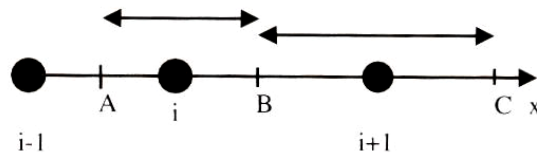
Φυσικά πριν από την αριθμητική διακριτοποίηση της διαφορικής εξίσωσης πρέπει να προηγηθεί η διακριτοποίηση του πεδίου ροής. Αν θεωρηθεί ένα δισδιάστατο πρόβλημα ορισμένο στο επίπεδο  $x$ - $y$ , τότε η διακριτοποίησή του υλοποιείται με τη χάραξη ενός ορθογωνικού δικτύου γραμμών (κানাβος). Οι ισοδιαστάσεις του κανάβου  $\Delta x_i$  και  $\Delta y_i$  ορίζονται ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και είναι δυνατόν είτε να αυξάνονται είτε να μειώνονται. Αντίστοιχα για τα μη μόνιμα προβλήματα ροής, το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης τους διακριτοποιείται επίσης σε χρονικά βήματα  $\Delta t_k$ .

Στη αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια σχετικά με την τοποθέτηση των κόμβων. Το πρώτο θεωρεί τους κόμβους (nodes) στα άκρα του στοιχείου και το δεύτερο στη μέση (finite-volume elements) (Σχήμα 2.2). Η εξίσωση της ροής θα είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις, ανεξάρτητα εάν η διακριτοποίηση είναι η συνήθης ή με τους κόμβους στη μέση.



**Σχήμα 2.2:** Δύο πιθανά σενάρια σχετικά με την τοποθέτηση των κόμβων στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Το (α) θεωρεί τους κόμβους στα άκρα του μοντέλου, ενώ το (β) στη μέση (Pinder, 2002).

Η μοναδική διαφορά προκύπτει όταν κατά το δεύτερο σενάριο τα βήματα της διακριτοποίησης δεν είναι τα ίδια  $\Delta x_i \neq \Delta x_{i+1}$ . Στην περίπτωση αυτή, η τοποθέτηση των κόμβων στη μέση παρουσιάζεται ευνοϊκότερη σε σχέση με την κλασσική (Σχήμα 2.3).



**Σχήμα 2.3:** Τοποθέτηση των κόμβων στη μέση (body-centered) του μοντέλου, με μεταβλητό όμως βήμα διακριτοποίησης (Pinder, 2002).

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα δύο και τριών διαστάσεων. Σε γενικές όμως γραμμές δε θεωρείται η καλύτερη μέθοδος προσομοίωσης, καθώς οι βρόχοι του κανάβου περιορίζονται σε ορθογωνικά στοιχεία, τα οποία δεν είναι σε θέση να καλύψουν πλήρως έναν ασύμμετρο ταμιευτήρα.

### 2.3.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

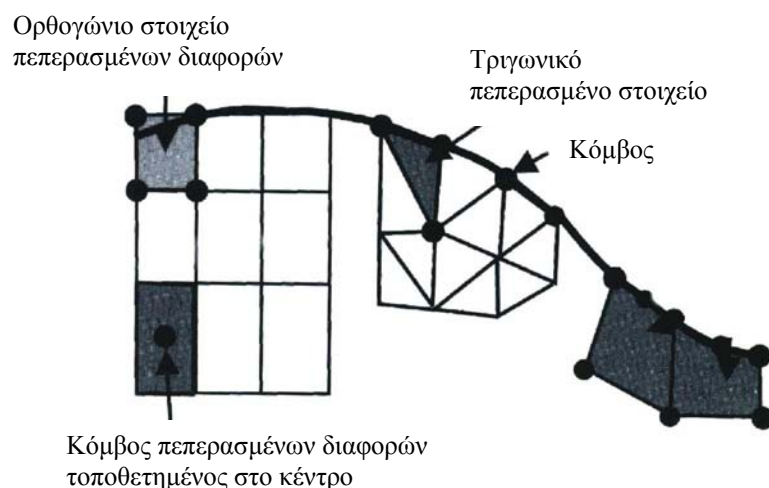
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνει τη διακριτοποίηση του πεδίου ροής σε έναν αριθμό στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά, σε αντίθεση με τον περιορισμό σε ορθογώνια που υπήρχε στις πεπερασμένες διαφορές, μπορούν να έχουν διάφορα επίπεδα σχήματα. Τα πλέον εύχρηστα είναι τα τριγωνικά, τα οποία μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα ανομοιογενείς υδροφορείς (Σχήμα 2.4).

Στα πεπερασμένα στοιχεία η άγνωστη συνάρτηση  $h(x)$  σε σταθερή κατάσταση ροής, προσεγγίζεται σε μία διάσταση από την ακόλουθη εξίσωση:

$$h(x) \sim \hat{h}(x) = \sum_{i=1}^I h_i \varphi(x_i) \quad (2.2)$$

όπου,  $h_i = 1, \dots, I$  είναι σταθερές, οι οποίες αποτελούν τελικά τις τιμές του υδραυλικού ύψους στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων (Pinder, 2002).

Μετά την κατασκευή του κανάβου στη μέθοδο αυτή, ακολουθεί η επιλογή μίας συνάρτησης παρεμβολής η οποία περιγράφει τη μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής  $\varphi = \varphi(x,y)$  σε κάθε στοιχείο, σαν συνάρτηση των τιμών της στους κόμβους. Η συνάρτηση είναι συνήθως ένα πολυώνυμο του Lagrange, βαθμού μικρότερου του τέσσερα. Στη συνέχεια με την ένωση όλων των πεπερασμένων στοιχείων, οι διάφορες επιμέρους συναρτήσεις παρεμβολής αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και τελικά προσεγγίζεται το συνολικό πρόβλημα.



**Σχήμα 2.4:** Δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών (Pinder, 2002).

Κατά τη μέθοδο αυτή δεν είναι δυνατή η επιλογή των κόμβων στα άκρα ή στη μέση του στοιχείου. Οι κόμβοι τοποθετούνται πάντα στην άκρη των στοιχείων. Τα βασικά πλεονεκτήματα της μοντελοποίησης με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

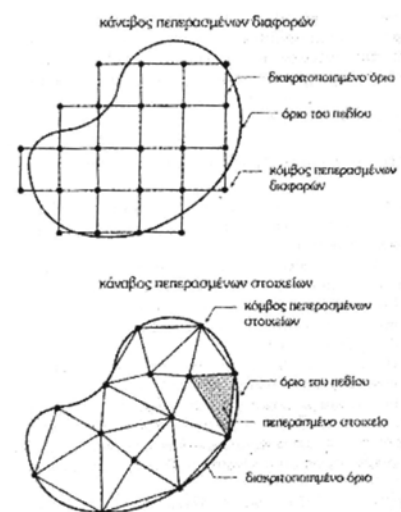
- Αναπαράσταση με λεπτομέρεια των ακανόνιστων γεωμετρικών ορίων και οριακών συνθηκών των πεδίων.
- Αντιπροσωπευτικότερη προσομοίωση των περιοχών στις οποίες αναμένονται έντονες μεταβολές του φορτίου, με τοπική μόνο πύκνωση του δικτύου διακριτοποίησης στα σημεία αυτά.

Παρά τα άνωθεν πλεονεκτήματα, η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ικανότητα του επεξεργαστή για επίλυση των εξισώσεων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη δημιουργία λιγότερο κανονικοποιημένων πινάκων με τη μέθοδο αυτή, σε σχέση με τις πεπερασμένες διαφορές. Σαν αποτέλεσμα, αρκετοί αποτελεσματικοί αλγόριθμοι που εφαρμόζονται στις διαφορές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία στα πεπερασμένα στοιχεία (Pinder, 2002).

## 2.4 Αδυναμίες μοντέλων ροής

Κατά τη μοντελοποίηση ενός φυσικού συστήματος είναι λογικό να παρατηρούνται διάφορες αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Η κυριότερη αιτία πηγάζει από τη μειωμένη πολλές φορές δυνατότητα των μοντέλων να προσομοιώσουν την πολύπλοκη κίνηση των υπογείων υδάτων και των ρύπων στο υπέδαφος. Το γεγονός όμως ότι κάθε φυσικό σύστημα αποτελεί ένα σύνθετο και πολυδιάστατο μοντέλο, δικαιολογεί την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Προκειμένου επομένως να περιγραφεί το σύστημα, ο χρήστης καταφεύγει αναγκαστικά σε διάφορες παραδοχές και απλοποιήσεις, ώστε η μαθηματική απεικόνιση να είναι όσο το δυνατόν απλούστερη και παράλληλα πλησιέστερη στην πραγματικότητα.

**Σχήμα 2.5:** Κάναβοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων (Pinder, 2002).



Το τελικό αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μοντέλων ροής, τα οποία αν και προσομοιώνουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο ένα φυσικό σύστημα, αποκλίνουν αναπόφευκτα κατά μικρό ή μεγάλο βαθμό από την πραγματικότητα.

Φυσικά στις αδυναμίες των μοντέλων ροής πρέπει να προστεθούν τα σφάλματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις στο πεδίο. Είναι γνωστό ότι οι μετρήσεις που λαμβάνονται δεν είναι πάντοτε αντιπροσωπευτικές ολόκληρου του χώρου μελέτης και πολλές φορές χρειάζεται να γενικευτεί η πληροφορία για όλη την περιοχή, γεγονός που εμπεριέχει κινδύνους. Η αβεβαιότητα αυτή όσον αφορά στις τιμές των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο μοντέλο είναι λογικό να οδηγεί σε αδυναμία ακριβούς προσομοίωσης του φυσικού συστήματος.

## 2.5 Θεμελιώδης Εξίσωση Ροής

Η μοντελοποίηση ενός συστήματος υπόγειας ροής απαιτεί μία σειρά υδρογεωλογικών πληροφοριών, όπως είναι οι διάφορες παράμετροι που υπεισέρχονται στο μοντέλο, οι τάσεις που ασκούνται σε αυτό αλλά και οι διάφορες οριακές συνθήκες που πρέπει αρχικά να καθοριστούν. Όλοι αυτοί οι παράγοντες εισέρχονται στη θεμελιώδη εξίσωση της υπόγειας ροής, η οποία έχει την εξής μορφή:

$$\nabla q = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} - Q \Rightarrow q = -K \nabla h$$

$$\nabla K \nabla h = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + Q$$
(2.3)

όπου,

$K$  η υδραυλική αγωγιμότητα ( $LT^{-1}$ ),

$h$  το υδραυλικό ύψος του υπογείου νερού (L),

$S_s$  ο συντελεστής ειδικής αποθήκευσης ( $L^{-1}$ ),

$Q$  ένας όρος σχετικός με την εκροή ή την κατείσδυση ( π.χ παράγοντας βύθισης που μπορεί να αντιστοιχεί σε μία γεώτρηση ή στη βροχόπτωση).

Εάν ο παράγοντας  $Q$  περιγραφεί αναλυτικά, προκύπτει η εξίσωση:  $Q = I + \delta(x-x_i)$  \*  $w_i$ , όπου το  $I$  αντιστοιχεί στη βροχόπτωση και το  $w_i$  στην άντληση ή στην επανέγχυση ρευστού στη γεώτρηση στο σημείο  $x_i$ . Το σύμβολο  $\delta(x-x_i)$  παριστάνει τη συνάρτηση

δέλτα του Dirac και χρησιμοποιείται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να προσδιοριστεί ο παράγοντας  $w_i$  (Pinder, 2002).

Για την επίλυση επομένως της εξίσωσης ροής υπογείου ύδατος, πρέπει να είναι γνωστές οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας  $K$ , της ειδικής αποθηκευτικής ικανότητας  $S$  και τέλος του πάχους των γεωλογικών σχηματισμών  $h$ . Στην περίπτωση που πρόκειται για ένα δισδιάστατο μοντέλο, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ο παράγοντας της μεταβιβαστικότητας (transmissivity  $T$ ), ο οποίος ισούται με το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πάχους του γεωλογικού σχηματισμού στο εκάστοτε σημείο ( $T = K h$ ).

Η υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  είναι ένας τανυστής δεύτερης τάξης, ο οποίος σε γενική μορφή γράφεται ως εξής:

$$\begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Στην περίπτωση που όλες οι συνιστώσες του τανυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι διαφορετικές μεταξύ τους, ο υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως ανισότροπος (anisotropic). Στην αντίθετη περίπτωση κατά την οποία το σύστημα αξόνων της υδραυλικής αγωγιμότητας συμπίπτει με τους κύριους άξονες και οι τιμές των  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  είναι ταυτόσημες, πρόκειται για έναν ισότροπο υδροφορέα (isotropic). Αντίστοιχα ορίζονται οι χαρακτηρισμοί ομογενής – ετερογενής (homogeneous – heterogeneous) υδροφορέας, όταν ο τανυστής είναι σταθερός στο χώρο ή μεταβάλλεται.

Έπειτα από την αναλυτική έκφραση της υδραυλικής αγωγιμότητας σε έναν πίνακα 3x3, ο νόμος του Darcy παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Η συνιστώσα επομένως της ροής κατά την  $x$  διεύθυνση εκφράζεται από τη σχέση:

$$q_x = - \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} + K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

Κατά ανάλογο τρόπο γράφονται οι συνιστώσες της ροής σε όλες τις διευθύνσεις.

Από την παραπάνω εξίσωση συνεπάγεται ότι στην περίπτωση ανισότροπου υδροφορέα η ροή σε οποιαδήποτε διεύθυνση εξαρτάται και από τις τρεις συνιστώσες του υδραυλικού ύψους. Αντίθετα σε έναν ισότροπο υδροφορέα η εξίσωση ροής απλοποιείται κατά πολύ, εφόσον χρησιμοποιείται μονάχα μία τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας

$$\text{Εξίσωση ροής για ισότροπο μέσο: } q = -K \frac{\partial h}{\partial x} - K \frac{\partial h}{\partial y} - K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.7)$$

Αξίζει εντούτοις να σημειωθεί ότι η διάσταση  $z$ , κατά μήκος της οποίας πραγματοποιείται η ροή και η μεταφορά μάζας δεν είναι ασήμαντη. Ακόμη και όταν πρόκειται για έναν υδροφορέα ομογενή στην κάθετη διεύθυνση, η ροή κατά μήκος αυτής μπορεί να παίζει καθοριστικό ρόλο. Γι' αυτόν το λόγο, θα πρέπει πάντοτε να ερευνάται κατά πόσο η μη-χρησιμοποίηση της ροής στην τρίτη διεύθυνση μεταβάλλει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του μοντέλου (Pinder, 2002).

## 2.6 Θεμελιώδης Εξίσωση Μεταφοράς Μάζας

Προκειμένου να προσομοιωθεί η μεταφορά μάζας σε περίπτωση κατά την οποία πραγματοποιείται έγχυση ουσίας στον υπόγειο υδροφορέα, γίνεται χρήση της εξίσωσης

$$\text{μεταφοράς μάζας: } \left[ \varepsilon + E(c) \frac{\partial c}{\partial t} \right] + \nabla \tilde{q} + Qc_0 = 0 \quad (2.8)$$

όπου,

$\varepsilon$  το πορώδες,

$E(c)$  μία συνάρτηση που περιγράφει τη χημική προσρόφηση,

$\tilde{q}$  η μεταφορά της μάζας των ρύπων στο υπόγειο νερό,

$c$  η συγκέντρωση των ρύπων,

$Q$  η έγχυση του νερού στο περιβάλλον,

$c_0$  η συγκέντρωση των μεταφερόμενων ρύπων κατά την έγχυση.

### 2.6.1 Μεταφορά λόγω διαφοράς συγκεντρώσεως – Διάχυση

Μία διαλυμένη ουσία στο νερό κινείται από μία περιοχή υψηλής συγκεντρώσεως προς μία άλλη περιοχή χαμηλής συγκεντρώσεως. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως μοριακή διάχυση ή απλά διάχυση (diffusion) και λαμβάνει χώρα όσο υπάρχει μεταβολή συγκεντρώσεως, ακόμη και στην περίπτωση που το υγρό δεν κινείται.

Η μάζα του υγρού που διαχύνεται είναι ανάλογη της διαφοράς (κλίσης) των συγκεντρώσεων και μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του Fick ως

$$\text{εξής: } F = -D_d \frac{dC}{dx} \quad (2.9)$$

όπου,

$F$  η ροή μάζας της διαλυμένης ουσίας ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου,

$D_d$  μία σταθερά της διάχυσης ( $L^2T^{-1}$ ),

$C$  η συγκεντρώση της διαλυμένης ουσίας ( $ML^{-3}$ ),

$\frac{dC}{dx}$  η μεταβολή της συγκεντρώσεως ( $MT^3L^{-1}$ ).

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η κίνηση πραγματοποιείται από περιοχές μεγάλης συγκεντρώσεως προς περιοχές μικρότερης συγκεντρώσεως.

Σε συστήματα στα οποία η συγκεντρώση μεταβάλλεται με το χρόνο,

$$\text{εφαρμόζεται ο δεύτερος νόμος του Fick: } \frac{\partial C}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.10)$$

όπου,

$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$  η αλλαγή της συγκεντρώσεως με το χρόνο ( $MTL^{-3}$ ).

Σε πορώδη υλικά η διάχυση δεν είναι δυνατόν να προχωρήσει τόσο γρήγορα όσο στο νερό, καθώς τα ιόντα πρέπει να ακολουθήσουν μακρύτερες διαδρομές προκειμένου να ταξιδεύουν γύρω από τους πόρους. Για να εξηγηθεί το φαινόμενο αυτό, χρησιμοποιείται η πραγματική σταθερά διάχυσης  $D^*$  (effective diffusion coefficient):

$$D^* = \omega D_d \quad (2.11)$$

όπου,  $\omega$  είναι μία σταθερά που σχετίζεται με τη στροφή ή ελικοειδή κίνηση (στρεβλότητα – tortuosity). Η στρεβλότητα  $T$  είναι ένας παράγοντας που εξαρτάται από



το σχήμα της γραμμής ροής που ακολουθούν τα μόρια του νερού στα πορώδη υλικά (Καρατζάς, 2004).

### 2.6.2 Συμμεταφορά

Οι διαλυμένες ουσίες μεταφέρονται με τη ροή των υπογείων υδάτων, διαδικασία γνωστή ως συμμεταφορά (advection). Η ποσότητα της ουσίας που μεταφέρεται αποτελεί συνάρτηση της συγκέντρωσής της στα υπόγεια ύδατα καθώς και της ποσότητας του νερού της υπόγειας ροής. Όταν πρόκειται για μονοδιάστατη ροή σε μία κατά πλάτος τομή του πορώδους υλικού, η ποσότητα του νερού της υπόγειας ροής ισούται με τη μέση γραμμική ταχύτητα πολλαπλασιασμένη με το ενεργό πορώδες. Μέση γραμμική ταχύτητα  $v_x$  (average linear velocity) είναι η τιμή της ροής (flux) του νερού σε μία κατά πλάτος τομή ενός πορώδους υλικού και όχι η μέση τιμή της ταχύτητας στην οποία τα μόρια του νερού κινούνται κατά μήκος των γραμμών ροής, η οποία είναι μεγαλύτερη από τη μέση γραμμική ταχύτητα που οφείλεται στη στρέβλωση. Το ενεργό πορώδες (effective porosity)  $n_e$  είναι το πορώδες δια μέσω του οποίου υφίσταται ροή. Νεκροί πόροι δεν περιλαμβάνονται στο ενεργό πορώδες.

$$v_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl} \quad (2.12)$$

όπου,

$v_x$  η μέση γραμμική ταχύτητα ( $LT^{-1}$ ),

$K$  η υδραυλική αγωγιμότητα ( $LT^{-1}$ ),

$n_e$  το ενεργό πορώδες,

$\frac{dh}{dl}$  η υδραυλική κλίση ( $LL^{-1}$ ).

Η μονοδιάστατη ροή μάζας  $F_x$  λόγω οριζόντιας μεταφοράς ισούται με την ποσότητα του ύδατος που ρέει πολλαπλασιασμένη με τη συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:  $F_x = v_x n_e C$  (2.13)

Η μονοδιάστατη εξίσωση οριζόντιας μεταφοράς είναι:  $\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x \frac{\partial C}{\partial x}$  (2.14)

Λόγω της ετερογένειας των γεωλογικών υλικών η μεταφορά ουσιών σε διαφορετικά στρώματα έχει σαν αποτέλεσμα να προκύπτουν καμπύλες συγκέντρωσης διαλυμένης ουσίας με ποικίλες τιμές σε κάθε στρώμα. Εάν ληφθεί δείγμα νερού από γεώτρηση που

εισχωρεί σε μερικά στρώματα με σκοπό την καταγραφή μίας διαλυμένης μολυσματικής ουσίας, τότε το δείγμα του νερού θα αποτελεί σύνθεση από νερό κάθε γεωλογικού στρώματος. Εξαιτίας της μεταφοράς διαλυμένων ουσιών με διαφορετικές ταχύτητες σε κάθε στρώμα, το σύνθετο δείγμα θα αποτελεί μείγμα από μολυσμένο νερό προερχόμενο από ένα στρώμα και από μη μολυσμένο υπόγειο νερό προερχόμενο από διαφορετικό γεωλογικό στρώμα. Στο σύνθετο δείγμα η συγκέντρωση της μολυσματικής ουσίας θα είναι μικρότερη από αυτή που πραγματικά είναι στην πηγή της μόλυνσης (Καρατζάς, 2004).

### 2.6.3 Μηχανική Διασπορά

Τα υπόγεια ύδατα κινούνται με ταχύτητες οι οποίες μπορεί να είναι είτε μικρότερες είτε μεγαλύτερες από τη μέση γραμμική ταχύτητα. Σε μακροσκοπική κλίμακα τρεις είναι οι βασικότερες αιτίες του παραπάνω φαινομένου:

1. Η ταχύτητα του υγρού καθώς κινείται διά μέσου των πόρων είναι μεγαλύτερη στο μέσο σε σχέση με το μήκος των πλευρών των πόρων.
2. Μερικά από τα μόρια του υγρού ταξιδεύουν στο πορώδες υλικό κατά μήκος μεγαλύτερων διαδρομών σε σύγκριση με άλλα μόρια τα οποία εκτελούν την ίδια γραμμική απόσταση.
3. Μερικοί πόροι είναι μεγαλύτεροι από άλλους, επιτρέποντας στο υγρό να κινείται γρηγορότερα.

Εάν όλα τα υπόγεια ύδατα που περιέχουν διαλυμένες ουσίες ταξίδευαν με ακριβώς την ίδια τιμή, το νερό που δεν περιέχει διαλυμένη ουσία θα μπορούσε να αντικατασταθεί και να δημιουργηθεί μία ασυνεχής διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο υδάτων. Παρόλα αυτά, εξαιτίας των ουσιών που εισέρχονται και αναμιγνύονται στα μονοπάτια της ροής, το νερό δεν ταξιδεύει με την ίδια ταχύτητα. Η εν λόγω ανάμιξη ονομάζεται μηχανική διασπορά (mechanical dispersion) και φέρει ως αποτέλεσμα τη διάλυση των ουσιών στη ροή.

Η ανάμιξη που πραγματοποιείται κατά μήκος των διαδρομών της ροής ονομάζεται διαμήκης διασπορά (longitudinal dispersion). Το μέτωπο όμως της διαλυμένης ουσίας εξαπλώνεται και σε διευθύνσεις κάθετα με τη διεύθυνση της ροής, με αποτέλεσμα να παρατηρείται και εγκάρσια διασπορά (transverse dispersion) (Καρατζάς, 2004).

Εάν υποτεθεί ότι η μηχανική διασπορά μπορεί να περιγραφεί από το νόμο διάχυσης του Fick (§ εξ. 2.9, 2,10) και ότι η ποσότητα της μηχανικής διασποράς είναι συνάρτηση της μέσης γραμμικής ταχύτητας, τότε εισάγεται μία σταθερά που ονομάζεται συντελεστής δυναμικής διασποράς (dynamic dispersivity)  $\alpha_i$  πολλαπλασιασμένη με τη μέση γραμμική ταχύτητα. Εάν η κύρια κατεύθυνση ροής είναι η  $i$  τότε ισχύουν οι ακόλουθοι ορισμοί:

- Συντελεστής επιμήκους μηχανικής διασποράς (coefficient of longitudinal mechanical dispersion):  $\alpha_i * v_i$

όπου,

$v_i$  η μέση γραμμική ταχύτητα στην κατεύθυνση  $i$  ( $LT^{-1}$ ),

$\alpha_i$  ο συντελεστής δυναμικής διασποράς (dynamic dispersivity) στην κατεύθυνση  $i$  (L).

- Συντελεστής εγκάρσιας μηχανικής διασποράς (coefficient of transverse mechanical dispersion):  $\alpha_j * v_i$

όπου,

$v_i$  η μέση γραμμική ταχύτητα στην κατεύθυνση  $i$  ( $LT^{-1}$ ),

$\alpha_j$  ο συντελεστής δυναμικής διασποράς (dynamic dispersivity) στην κατεύθυνση  $j$  (L).

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ARGUS ONE ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΛΥΣΗΣ PTC

#### 3.1 Προσομοίωση υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή σχεδιάστηκε σε περιβάλλον Windows, με τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται στις βασικές ανάγκες για την περιγραφή και μοντελοποίηση τόσο της υπόγειας ροής όσο και της μεταφοράς των ρύπων στο υπέδαφος. Αποτελείται από δύο βασικά τμήματα (Pinder, 2002):

- Ένα περιβάλλον εισαγωγής γεωγραφικών πληροφοριών ονομαζόμενο «Argus One» (GIS environment).
- Έναν αλγόριθμο, «PTC - Princeton Transport Code», που περιγράφει και επιλύει τις εξισώσεις ροής του υπογείου ύδατος καθώς και τη μεταφορά ρυπογόνου μάζας.

Τα δύο επιμέρους τμήματα «Argus One» και «PTC» συνεργάζονται μεταξύ τους μέσω μίας ρουτίνας (plug-in extension, PIE).

#### 3.2 Σχεδιαστικό Πρόγραμμα «Argus One»

Το «Argus One» είναι ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) που δημιουργεί πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και πλέγματα πεπερασμένων διαφορών με έναν εύκολο τρόπο, καθώς επιτρέπει στο χρήστη την απλή γραφική απεικόνιση δεδομένων και αποτελεσμάτων. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής ψηφιοποιημένων χαρτών και την επεξεργασία της περιοχής που παρουσιάζει ενδιαφέρον. Επίσης, μέσω του «Argus One» είναι δυνατόν να συνδυαστούν

διαφορετικές μεταβλητές είτε στο σύνολο του πλέγματος είτε σε συγκεκριμένα σημεία (τιμές αρχικών - οριακών συνθηκών, συγκεντρώσεων κλπ.). Σε κάθε περίπτωση, πρόκειται για ένα πρόγραμμα το οποίο απεικονίζει γραφικά την κάθε πληροφορία που εισάγεται από το χρήστη, με αποτέλεσμα την απλοποίηση στη μελέτη της περιοχής. Φυσικά, ο ρόλος του «Argus One» είναι ουσιώδης αλλά κυρίως βοηθητικός, καθώς το κύριο κομμάτι της μοντελοποίησης της υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας σε έναν υπόγειο υδροφορέα βασίζεται στον αλγόριθμο «PTC».

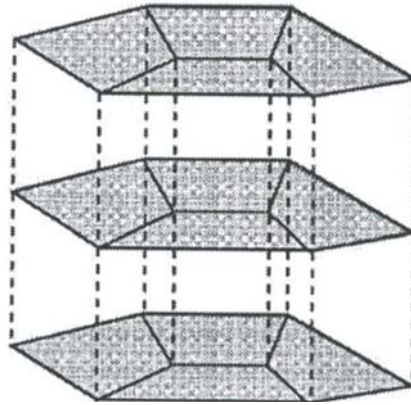
### **3.3 Ο αλγόριθμος λύσης « PTC »**

Ο Princeton Transport Code (PTC) αποτελεί έναν κώδικα επίλυσης τόσο της ροής του υπογείου ύδατος στις τρεις διαστάσεις όσο και της μεταφοράς μάζας σε υπόγειους υδροφορείς. Ο αλγόριθμος είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77 και συνεργάζεται με το «Argus One» για την έκδοση των αποτελεσμάτων. Στην ουσία το πρόγραμμα «Argus One» αποτελεί το εργαλείο που απλοποιεί τη χρήση του «PTC».

Είναι γνωστό ότι η εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων είναι απαραίτητη για την επίλυση ενός συστήματος πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν κατά τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας. Όταν μάλιστα πρόκειται για συστήματα κλίμακας πεδίου, τα οποία περιλαμβάνουν τριών διαστάσεων εξισώσεις,, απαιτείται τεράστια υπολογιστική ισχύς για την αριθμητική τους επίλυση. Ο αλγόριθμος «PTC» βασίζεται σε έναν αλγόριθμο διαχωρισμού, ο οποίος επιλύει τις εξισώσεις των τριών διαστάσεων και ταυτόχρονα περιορίζει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο.

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος διαχωρίζει το μοντέλο σε παράλληλα περίπου οριζόντια στρώματα. Σε κάθε στρώμα πραγματοποιείται διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε να αναπαρασταθούν με ακρίβεια οι γεωμετρικές ανωμαλίες που παρουσιάζονται σε ακανόνιστα συστήματα. Αφού έχει πραγματοποιηθεί αυτή η ακριβής γεωμετρική διακριτοποίηση, τα στρώματα ενώνονται κάθετα μεταξύ τους μέσω μίας διακριτοποίησης πεπερασμένων διαφορών (Σχήμα 4.1). Στη διάρκεια επομένως μίας ορισμένου χρόνου επανάληψης, όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο επιλύονται ξεχωριστά όλοι οι οριζόντιοι διαχωρισμοί πεπερασμένων στοιχείων, ενώ κατά το δεύτερο επιλύονται οι κάθετες

εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες συνδέουν τα διάφορα επίπεδα που σχηματίζουν τα οριζόντια στρώματα.



**Σχήμα 3.1:** Απεικόνιση τρόπου επίλυσης του αλγορίθμου «PTC». Ο αλγόριθμος διαχωρίζει τα οριζόντια στρώματα με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία. Στη συνέχεια, τα στρώματα ενώνονται κάθετα και διακριτοποιούνται με πεπερασμένες διαφορές (Κανελλόπουλος, 2003).

### 3.4 Θεμελιώδης εξίσωση επίλυσης του αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος λύσης «PTC» καθορίζει τα χαρακτηριστικά ροής του συστήματος υπογείων υδάτων, επιλύοντας ως προς το υδραυλικό ύψος την ακόλουθη μερική διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (3.1)$$

όπου,

$h$  το υδραυλικό ύψος (L),

$K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  η υδραυλική αγωγιμότητα στην x-y-z οριζόντια διεύθυνση (LT<sup>-1</sup>),

$S$  ο συντελεστής ειδικής αποθήκευσης (L<sup>-1</sup>),

$Q_i$  ένας όρος σχετικός με την εκροή ή την κατείσδυση στην περιοχή  $i$ ,

$\delta( )$  η συνάρτηση δέλτα του Dirac,

$r$  ο αριθμός των σημείων εκροής ή κατείσδυσης.

Η παραπάνω εξίσωση επιλύεται αριθμητικά από τον αλγόριθμο «PTC» με χρήση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.

### 3.4.1 Εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στον αλγόριθμο «PTC»

Όπως προαναφέρθηκε ο αλγόριθμος λύσης επιλύει την εξίσωση ροής σε δύο στάδια, σε οριζόντια και σε κάθετη διεύθυνση. Η επίλυση κατά την οριζόντια διεύθυνση πραγματοποιείται με προσέγγιση των όρων της εξίσωσης (3.1) που περιέχουν παραγώγους των  $x$  και  $y$  με πεπερασμένα στοιχεία. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρεί την ύπαρξη ενός άπειρου αθροίσματος συναρτήσεων, οι οποίες αναπαριστούν με ακρίβεια τη λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την υπόγεια ροή. Μία πεπερασμένη προσέγγιση του υδραυλικού ύψους  $h(x, y, z)$  είναι η

$$\text{εξής: } h(x, y, z) \approx \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (3.2)$$

όπου,

$h$  το υδραυλικό ύψος (L),

$\hat{h}$  η προσεγγιστική σειρά του  $h$  (L),

$h_i$  ένας μη καθορισμένος συντελεστής (L),

$w_i$  μία βασική συνάρτηση (αδιάστατη),

$N$  ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η προσεγγιστική σειρά (3.2) παρέχει μία ακριβής αναπαράσταση καθώς το  $N$  τείνει στο άπειρο, δηλαδή το  $\hat{h}$  προσεγγίζει το  $h$ . Μία προσεκτική επιλογή των συναρτήσεων  $w_i$  οδηγεί στην τοποθέτηση των μη καθορισμένων συντελεστών  $h_i$  στους κόμβους του συστήματος ( $x, y, z$ ), αναπαριστώντας πλέον με τον τρόπο αυτό τις τιμές του υδραυλικού ύψους  $h$ . Ένας τρόπος αύξησης της υπολογιστικής ικανότητας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρησιμοποίηση τμηματικής προσέγγισης (piecewise) συνεχών βασικών συναρτήσεων, οι οποίες είναι μη μηδενικές μόνο πάνω από μία μικρή περιοχή του συνόλου. Παρότι υπάρχουν αρκετοί τύποι βασικών συναρτήσεων, ο αλγόριθμος «PTC» χρησιμοποιεί γραμμικές, τμηματικές βασικές προσεγγίσεις (piecewise linear basis functions) μεταξύ γειτονικών κόμβων πεπερασμένων στοιχείων.

Σημειώνεται ότι κατά την παραγωγή της συνάρτησης  $h$  (3.1) ο διαφορικός τελεστής  $L$  ισούται με το μηδέν. Όταν όμως το  $L$  λειτουργεί στην προσεγγιστική πλέον συνάρτηση  $\hat{h}$  εισάγεται ένα σφάλμα. Επομένως, η εξίσωση (3.2) γράφεται ως εξής:

$$L(h) = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{και } L(\hat{h}) = R \quad \text{με } R \text{ το υπολλειματικό σφάλμα} \quad (3.4)$$

Η επίλυση της εξίσωσης (3.2) επιτυγχάνεται μέσω της ελαχιστοποίησης του σφάλματος  $R$ . Για το λόγο αυτό θεωρείται μία σειρά συναρτήσεων  $w_j$ . Εάν το σφάλμα  $R$  αναγκαστεί να είναι δευτέρου βαθμού σε όλες τις πιθανές τιμές των  $w_j$ , τότε στην ουσία το  $R$  συγκλίνει στο μηδέν και επομένως επιτυγχάνεται η λύση της εξίσωσης (3.2):

$$L(\hat{h}) = L(h) \quad \text{όταν } R = 0 \quad (3.5)$$

Ο αλγόριθμος «PTC» χρησιμοποιεί την ίδια ομάδα συναρτήσεων για τις συναρτήσεις βάρους  $w_j$  (weighting functions) όπως και για τις βασικές συναρτήσεις  $w_i$  (basis functions). Δυστυχώς, η συνθήκη (3.5) πραγματοποιείται μονάχα όταν το  $N$  προσεγγίζει το άπειρο και όταν οι υπολογιστές χρησιμοποιούν άπειρους αριθμούς. Για το λόγο αυτό, θεωρείται μία υποομάδα άπειρων αριθμών  $w_i = 1, 2, \dots, N$ , η οποία καθιστά τη λύση της εξίσωσης (3.1) προσεγγιστική και όχι απόλυτα ακριβής. Οι παραπάνω  $N$  υποθέσεις εκφράζονται ως εξής:

$$\iint_{\Omega} L(\hat{h}) w_i dx dy = 0 \quad \text{με } i = 1, 2, \dots, N \quad (3.6)$$

όπου, η περιοχή ολοκλήρωσης  $\Omega$  καλύπτει ολόκληρη την οριζόντια τομή της περιοχής όπου παρατηρείται η ροή.

Σύμφωνα με τον ορισμό της εξίσωσης (3.2), κάθε συνάρτηση βάρους γράφεται ως:

$$\iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \right) - S \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} + Q \right] w_i dx dy = 0 \quad (3.7)$$

Η ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης στις δύο διαστάσεις x-y σύμφωνα με το θεώρημα του Green έχει το ακόλουθο αποτέλεσμα:

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \frac{\partial w_i}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \frac{\partial w_i}{\partial y} \right] dx dy - \int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma - \\ & \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \right) \right] w_i dx dy + \iint_{\Omega} \left[ S \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} - Q \right] w_i dx dy = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$



όπου,  $l_x$  και  $l_y$  είναι τα ημίτονα κατεύθυνσης ανάμεσα στο κανονικό και στο κάθετο σύνορο  $\sigma$  (το  $d\sigma$  αντιστοιχεί σε ένα απειροελάχιστο μήκος κατά μήκος του συνόρου).

Η αντικατάσταση της (3.2) στην εξίσωση (3.8) επιτυγχάνει τελικά τη διακριτοποίηση της (3.1) σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων:

$$\iint_{\Omega} \left[ K_{xx} \left( \sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial x} \right) \frac{\partial w_i}{\partial x} + K_{yy} \left( \sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial y} \right) \frac{\partial w_i}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i + \right. \\ \left. S \frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i - Q w_i \right] dx dy - \int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = 0 \quad (3.9)$$

όπου,  $i = 1, 2, \dots, N$ . Η ποσότητα μέσα στις αγκύλες αντιστοιχεί στην οριζόντια ροή. Η εξίσωση (3.9) για τη ροή αυτή οδηγεί τελικά σε  $N$  εξισώσεις με  $N$  άγνωστους συντελεστές (υδραυλικά ύψη), όπως ορίζονται από την (3.2). Η μέθοδος όμως των πεπερασμένων στοιχείων μετατρέπει τις παραγώγους των άγνωστων αρχικά υδραυλικών υψών ως προς  $x$  και  $y$  σε παραγώγους γνωστών συναρτήσεων βάσης (Babu et al., 1997).

### 3.4.2 Εφαρμογή των πεπερασμένων διαφορών στον αλγόριθμο «PTC»

#### 3.4.2.1 Η κάθετη παράγωγος

Μετά την οριζόντια επίλυση της εξίσωσης ροής από τον αλγόριθμο «PTC», επιλύεται και η κάθετη διακριτοποίηση με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Η εξίσωση (3.9) μπορεί να γραφεί υπό μορφή πινάκων ως εξής:

$$Ah + B \frac{\partial h}{\partial t} - v + f = 0 \quad (3.10)$$

όπου, τα  $A$  και  $B$  αναπαριστούν τετραγωνικούς πίνακες  $N \times N$  και οι παράγοντες  $\frac{\partial h}{\partial t}$ ,  $h$ ,  $v$  και  $f$  είναι διανύσματα μήκους  $N$ .

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[ K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy = 0 \quad (3.11)$$

$$B_{ig} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (3.12)$$

$$f_i = -\iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (3.13)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[ \iint \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{xx} \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (3.14)$$

### 3.4.2.1 Η παράγωγος του χρόνου

Η κάθετη διακριτοποίηση επιτυγχάνεται με την αναπαραγωγή των οριζόντιων κανάβων πεπερασμένων στοιχείων σε στρώματα με τους κόμβους τοποθετημένους ο ένας επάνω στον άλλο (Σχήμα 3.1). Αυτό σημαίνει ότι κατά την κάθετη διεύθυνση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία μονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών προκειμένου να προσεγγιστεί η εξίσωση (3.14). Χρησιμοποιώντας το  $k$  ως έναν κάθετο δείκτη (vertical index) και το  $k$  να ισούται με τη μονάδα στο κατώτερο στρώμα, η προσέγγιση αυτή γράφεται υπό μορφή πινάκων ως εξής:

$$v \equiv C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k (h_k - h_{k+1}) \quad (3.15)$$

όπου, οι ιδιότητες του αρμονικού μέσου (harmonic mean) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $C_k^+$  και του κάθετου όρου (vertical term) ανάμεσα στα στρώματα  $k$ ,  $k+1$  και  $k$ ,  $k-1$ .

$$C_{ij;k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \frac{2}{\Delta z_k [\Delta z_{k+1} / (K_{zz})_k + \Delta z_k / (K_{zz})_{k+1}]} w_i w_j dx dy \quad (3.16)$$

όπου, το  $\Delta z_k$  αντιστοιχεί στο πάχος του στρώματος  $k$  στο σημείο της διακριτοποίησης. Η αντικατάσταση στη συνέχεια της (3.16) στην (3.10) δίνει το παρακάτω αποτέλεσμα:

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - \left[ C_h^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1}) \right] + f = 0 \quad (3.17)$$

όπου, ο παράγοντας  $h_k$  αντιπροσωπεύει το διάνυσμα  $h$  του υδραυλικού ύψους στο στρώμα  $k$ ,  $k = 1, 2, \dots, M$  με  $M$  να είναι ο αριθμός των στρωμάτων κατά τη διεύθυνση  $z$ .

Αποδεικνύεται ότι μία προς τα πίσω προσέγγιση της χρονικής παραγώγου (backward finite approximation) κατά τις πεπερασμένες διαφορές παρέχει μία ακριβή λύση στο πρόβλημα της υπόγειας ροής. Κατά την προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται ένα σύστημα

διόρθωσης πρώτης τάξης, ώστε να επιτευχθεί η προσέγγιση της χρονικής παραγώγου και οι χωρικές παράγωγοι της (3.17) γράφονται πλέον για το νέο επίπεδο χρόνου:

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t} [h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t] - [C_h^+(h_{k+1} - h_k) - C_h^-(h_k - h_{k-1})]^{t+\Delta t} + f_k^t = 0 \quad (3.18)$$

Η εφαρμογή του παραπάνω συστήματος για κάθε επίπεδο οδηγεί στην πλήρη διακριτοποίηση της (3.1), παρέχοντας  $M \times N$  εξισώσεις με  $N$  τις άγνωστες παραμέτρους της (3.2) για κάθε ένα από τα  $M$  επίπεδα (Babu et al., 1997).

### 3.5 Αρχικές – Συνοριακές συνθήκες

Η μοναδική λύση που προκύπτει από την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, προϋποθέτει τον καθορισμό συγκεκριμένων αρχικών και οριακών συνθηκών. Οι αρχικές συνθήκες περιγράφουν την τιμή μίας παραμέτρου τη χρονική στιγμή ίση με το μηδέν (π.χ. αρχική συγκέντρωση ενός ρύπου τη στιγμή της έκχυσης), ενώ οι συνοριακές συνθήκες ορίζουν την αλληλεπίδραση της υπό μελέτη περιοχής με το εξωτερικό της περιβάλλον.

Για την επίλυση της εξίσωσης ροής και μεταφοράς μάζας, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τρεις δυνατούς τύπους συνοριακών συνθηκών:

$$1. \text{ Τύπος I (First type - Dirichlet): } h(x) = h_0(x), x \in \partial\Omega_1 \quad (3.19)$$

όπου, το ύψος  $h_0$  αντιστοιχεί σε σταθερό υδραυλικό ύψος κατά μήκος του συνοριακού τμήματος  $\partial\Omega_1$  της περιοχής μοντελοποίησης  $\Omega$ .

Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη μπορεί να είναι μία συνάρτηση του χρόνου, σε περίπτωση που είναι γνωστή η συμπεριφορά ενός φαινομένου σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ως παράδειγμα αναφέρεται η προσομοίωση της υδάτινης επιφάνειας της θάλασσας κατά τη διάρκεια μίας παλίρροιας.

$$2. \text{ Τύπος II (Second type - Neumann): } \frac{\partial h(x)}{\partial n} = \frac{\partial h(x)}{\partial n} \Big|_0, x \in \partial\Omega_2 \quad (3.20)$$

όπου, το  $\frac{\partial h(x)}{\partial n} \Big|_0$  αντιστοιχεί στην κλίση του υδραυλικού ύψους κάθετη στο συνοριακό τμήμα  $\partial\Omega$ .

Η συγκεκριμένη εξίσωση όταν συνδυάζεται με την υδραυλική αγωγιμότητα παρέχει μία έκφραση της ροής:  $q_n(x) = -K \frac{\partial h(x)}{\partial n}$  (3.21)

όπου, το  $q_n$  αντιστοιχεί στην καθορισμένη ροή κατά μήκος του συνόρου  $\partial\Omega_2$ .

3. Τύπος III (*Third type - Robbins*):  $\alpha h(x) + \beta \frac{\partial h(x)}{\partial n} = C_0, x \in \partial\Omega_3$  (3.22)

όπου, το  $C_0$  αντιστοιχεί στην τιμή μίας συγκεκριμένης συνάρτησης κατά μήκος του συνόρου  $\partial\Omega$  και οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$  είναι πάλι καθορισμένες συναρτήσεις.

Η τρίτη συνοριακή συνθήκη χρησιμοποιείται για τον καθορισμό ενός φυσικού ορίου σε μία μακρινή απόσταση από τα σύνορα του μοντέλου, σε περίπτωση είτε ελλιπών υδρογεωλογικών πληροφοριών κατά μήκος του πραγματικού συνόρου είτε μειωμένης υπολογιστικής ικανότητας για μοντελοποίηση μεγαλύτερης περιοχής. Η μορφή που έχει η εξίσωση τότε είναι η εξής:  $K \frac{\partial h(x)}{\partial n} = k(h_0(x) - h(x))$  (3.23)

Η τιμή του  $h_0$  αντιστοιχεί σε γνωστές τιμές παραμέτρων μακριά από το μοντέλο (υψόμετρο, υδραυλικό ύψος) και κατά επέκταση ο συντελεστής  $k$  μπορεί να παριστάνει την απόσταση από το σύνορο του μοντέλου ή κάποια άλλη σχετικά με το  $h_0$  παράμετρο.

Οι παραπάνω συνοριακές συνθήκες εφαρμόζονται και στην περίπτωση μεταφοράς μάζας, με τη διαφορά ότι αντί για υδραυλικά ύψη εισάγονται στις εξισώσεις οι συγκεντρώσεις της ουσίας. Ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών σε κάθε σημείο κατά μήκος του μοντέλου είναι απαραίτητο στοιχείο για την προσομοίωση μίας περιοχής, καθώς οι συνθήκες ποικίλλουν ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του χώρου μελέτης. Η προεπιλεγμένη συνοριακή συνθήκη στο πρόγραμμα «Argus One» για όλες τις ροές είναι η μηδενική, γεγονός που συνεπάγεται περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο πυθμένα και πλευρές (Pinder, 2002, Καρατζάς 2004).

### **3.6 Στάδια δημιουργίας ενός μοντέλου υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας με χρήση του προγράμματος «Argus One»**

#### **3.6.1 Εισαγωγή δεδομένων**

Το πρώτο βήμα στη δημιουργία του υδρολογικού μοντέλου μίας περιοχής μελέτης είναι η εισαγωγή στο πρόγραμμα όλων των απαραίτητων πληροφοριών. Σε περίπτωση κατά την οποία ο χρήστης επιθυμεί να εμφανιστεί απλώς στην οθόνη κάποιο προηγούμενο μοντέλο, ενεργοποιεί την εντολή «*File – Open*». Εάν όμως σκοπός του είναι η δημιουργία ενός καινούριου μοντέλου, τότε από την εντολή «*PIEs*» επιλέγει «*New PTC Project*».

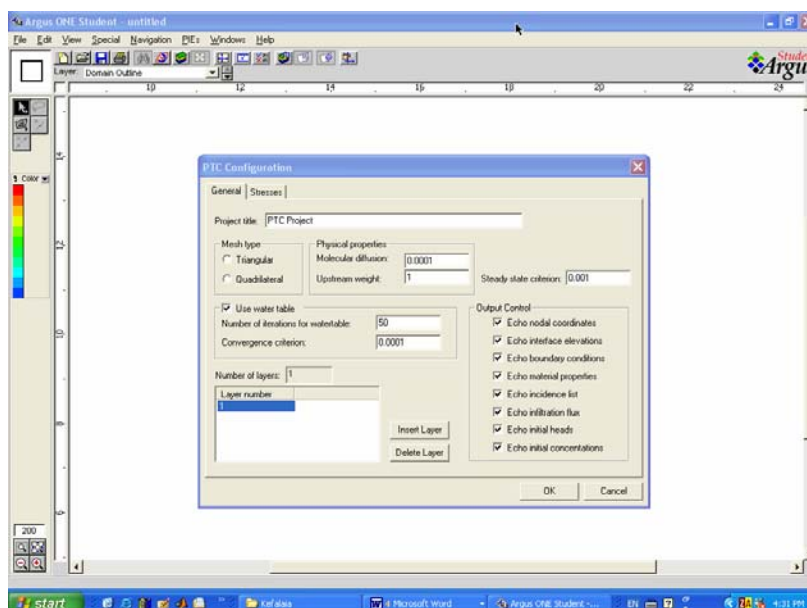
Συγκεκριμένα, από την εντολή «*PIEs*» δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τη δημιουργία ενός νέου μοντέλου (*New PTC Project*), να μορφοποιήσει κάποιο προηγούμενο (*Edit Project Info*) ή τέλος να θέσει σε λειτουργία τον αλγόριθμο (*Run PTC*), προκειμένου να εξαχθούν γραφικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το μοντέλο ροής και μεταφοράς μάζας.

#### **3.6.2 Διαμόρφωση του αλγορίθμου «PTC»**

##### **3.6.2.1 Γενικά (General)**

Μετά την επιλογή για δημιουργία ενός νέου μοντέλου, εισέρχεται στο χρήστη η δυνατότητα να ονομάσει το μοντέλο (*Project title*), να ορίσει τον τύπο της διακριτοποίησης (με βάση τριγωνικά ή τετραγωνικά στοιχεία), ακόμη και να καθορίσει εάν ο υδροφορέας της περιοχής μοντελοποίησης είναι περιορισμένος ή όχι (*confined or unconfined*) (Σχήμα 4.2).

Στο συγκεκριμένο παράθυρο δίνεται παράλληλα η δυνατότητα για προσδιορισμό των γεωλογικών στρωμάτων που αποτελούν το μοντέλο. Ο χρήστης δηλαδή είναι σε θέση να καθορίσει τον αριθμό των στρωμάτων, να προσθέσει ή να αφαιρέσει στρώματα ανάλογα με το επιθυμητό σενάριο.



**Σχήμα 3.2:** Απεικόνιση του σχεδιαστικού περιβάλλοντος «Argus One». Στο παράθυρο διακρίνονται διάφορες επιλογές για καθορισμό του είδους της διακριτοποίησης, για χρήση ελεύθερου ή περιορισμένου υδροφορέα ακόμη και για εισαγωγή περισσότερων του ενός γεωλογικών στρωμάτων.

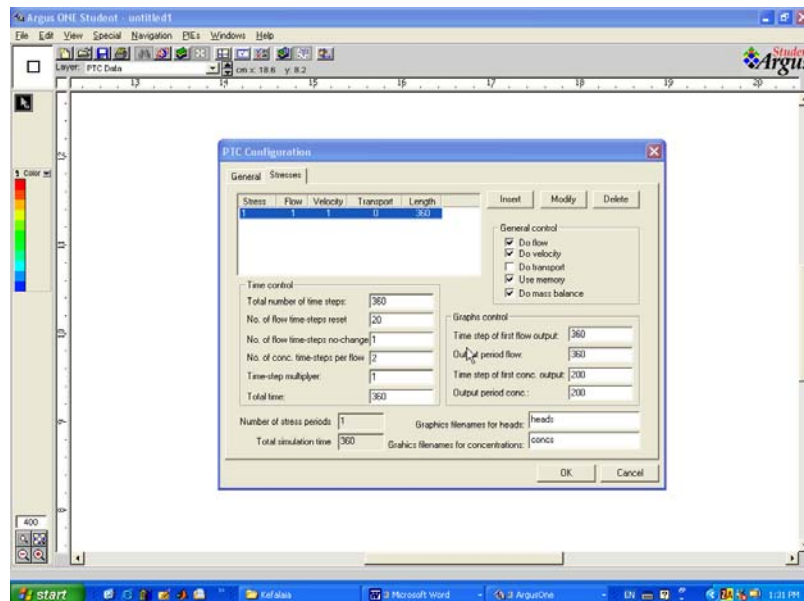
Η επιλογή για το κριτήριο σταθερής κατάστασης (*steady state criterion*) αφορά μία τιμή, η οποία καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη αλλαγή μεταξύ των υπολογισμένων χρονικών βημάτων. Η τιμή αυτή θα πιστοποιεί ότι το σύστημα έχει φτάσει σε σταθερή κατάσταση.

### 3.6.2.2 Διαφορετικές Περίοδοι (Stresses)

Η εντολή αυτή ενεργοποιεί μία επιπλέον σειρά επιλογών, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη διαμόρφωση του αλγορίθμου «PTC». Συγκεκριμένα μέσω μίας σειράς εντολών (*General control*), ο χρήστης είναι σε θέση να επιλέξει εάν το μοντέλο πρόκειται να προσομοιωθεί με την εξίσωση της ροής (*Do flow*) ή την εξίσωση μεταφοράς μάζας (*Do transport*), ή ακόμα εάν απαιτείται υπολογισμός της ταχύτητας (*Do velocity*). Η εντολή για τη χρησιμοποίηση υπολογιστικής μνήμης (*Use memory*) πρέπει πάντοτε να εκτελείται, ενώ ο έλεγχος μάζας (*Do mass balance*) αποτελεί μία προαιρετική επιλογή.

Οι χρονικές παράμετροι (*Time control*) που πρέπει να καθοριστούν σε αυτό το στάδιο, αποτελούν ένα σημαντικό βήμα για την επίλυση του αλγορίθμου υπό τις δεδομένες κάθε φορά συνθήκες. Στην επιλογή για τον ολικό χρόνο που απαιτείται (*total*

time) ο χρήστης καταγράφει την τιμή σε μονάδες χρόνου, προκειμένου να ολοκληρωθεί η προσομοίωση. Ο ολικός αριθμός χρονικών βημάτων (*total number of time steps*) καθορίζει τα χρονικά βήματα, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ώστε να προσομοιωθεί ο ολικός χρόνος. Το πηλίκο του ολικού χρόνου με τον αριθμό των χρονικών βημάτων θα καθορίσει το χρονικό βήμα  $\Delta t$ , με την προϋπόθεση ότι αυτό παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.



**Σχήμα 3.3:** Απεικόνιση των επιλογών που παρέχονται για τις διαφορετικές περιόδους.

Κατά τον υπολογισμό όμως της ροής, είναι προτιμότερο να αυξάνεται το μέγεθος του χρονικού βήματος  $\Delta t$ , καθώς το σύστημα του υπογείου νερού προσεγγίζει σε συνθήκες σταθερής κατάστασης. Η αύξηση επιτυγχάνεται με την εντολή για χρησιμοποίηση ενός πολλαπλασιαστή χρονικού βήματος (*time-step multiplier*). Εάν ο χρήστης επιθυμεί να τροποποιήσει το χρονικό βήμα μετά από κάθε  $n$  χρονικά βήματα, τότε η τιμή του  $n$  εισάγεται στην επιλογή για επαναπροσδιορισμό των χρονικών βημάτων στην επίλυση της εξίσωσης ροής (*No. of flow time-steps reset*). Εάν πάλι ο στόχος του χρήστη είναι να σταματήσει η αύξηση των χρονικών βημάτων έπειτα από  $m$  χρονικά βήματα, τότε η επιθυμητή τιμή του  $m$  καταγράφεται στον αριθμό των χρονικών βημάτων που απαιτούνται, προκειμένου να μην πραγματοποιηθεί καμία περαιτέρω αλλαγή (*No. of flow time-steps no-change*). Κατά παρόμοιο τρόπο, το πρόγραμμα επιτρέπει την εξαγωγή των γραφικών αποτελεσμάτων οποιαδήποτε χρονική στιγμή επιλέξει ο χρήστης (Σχήμα 3.3).

### 3.6.3 Εισαγωγή και μορφοποίηση ψηφιοποιημένου χάρτη

Για τον καθορισμό των ορίων ενός μοντέλου, πρέπει καταρχήν να εισαχθεί στο πρόγραμμα κάποιος ψηφιοποιημένος χάρτης. Ο χάρτης αυτός θα περιλαμβάνει φυσικά την περιοχή και θα δίνει πληροφορίες για τα διάφορα γεωγραφικά μήκη και πλάτη του χώρου ενδιαφέροντος, για τις υψομετρικές διαφορές, για τυχόν γεωτρήσεις και γενικά για οποιοδήποτε στοιχείο που μπορεί να συμβάλλει στη σωστή οριοθέτηση του χώρου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο τοπογραφικοί χάρτες. Σε κάθε περίπτωση όμως είναι απαραίτητοι και γεωλογικοί, υδρολογικοί χάρτες, οι οποίοι προσφέρουν μία αξιόπιστη εικόνα του γεωλογικού υποβάθρου και της κίνησης των υπογείων υδάτων.

Η εισαγωγή του χάρτη πραγματοποιείται είτε με την εντολή «*File – Import Maps*», οπότε το αρχείο έχει προέκταση .dxf, είτε με την εντολή «*Place Image*» σε μορφή εικόνας .bmp ή .gif. Το επόμενο βήμα έπεται από την εισαγωγή του επιλεγμένου χάρτη είναι η προεπεξεργασία του με τρόπο, ώστε οι μονάδες που απεικονίζονται στο πάνω και αριστερό μέρος του σχεδιαστικού παραθύρου να αντιστοιχούν κατά προτίμηση σε μέτρα (ή οποιαδήποτε άλλη μονάδα επιθυμεί ο χρήστης) και να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα (η επιλογή της μονάδας μήκους που θα χρησιμοποιηθεί ενεργοποιείται από την εντολή «*Special – Scale & Units*»).

Είναι επομένως απαραίτητη μία αριθμητική σχέση, η οποία θα μετατρέπει τις συντεταγμένες που εμφανίζονται αρχικά στο πρόγραμμα στις πραγματικές συντεταγμένες πεδίου. Για το σκοπό αυτό, ο χρήστης καλείται να υπολογίσει μία απόσταση που θα επιλέξει στο χάρτη με δύο τρόπους. Αρχικά μέσω του προγράμματος, τοποθετώντας δηλαδή τον κέρσορα στην αρχή και στο τέλος της επιλεγμένης απόστασης, και κατά δεύτερον με υπολογισμό της ίδιας απόστασης από τον τοπογραφικό πλέον χάρτη και βάση της κλίμακάς του.

Στη συνέχεια, και βάση της εντολής «*Special – Rotate and scale*», είναι απαραίτητη η τοποθέτηση ενός αριθμού επί της εκατό στην κατάλληλη επιλογή, ο οποίος στην ουσία θα μειώνει ή θα αυξάνει την κλίμακα του χάρτη στο πρόγραμμα, προκειμένου να ανταποκριθεί στις πραγματικές συντεταγμένες. Ο συγκεκριμένος αριθμός προκύπτει εάν διαιρεθεί η πραγματική απόσταση στον τοπογραφικό χάρτη με την μετρούμενη απόσταση από το πρόγραμμα και κατόπιν πολλαπλασιαστεί με το εκατό. Ο αριθμός αυτός θα πρέπει να εφαρμοστεί πλέον σε όλο το πρόγραμμα (*Entire*



document), προκειμένου όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο να έχουν πλέον τις πραγματικές συντεταγμένες .

### 3.6.4 Προσδιορισμός των ορίων – γεωμετρίας του μοντέλου

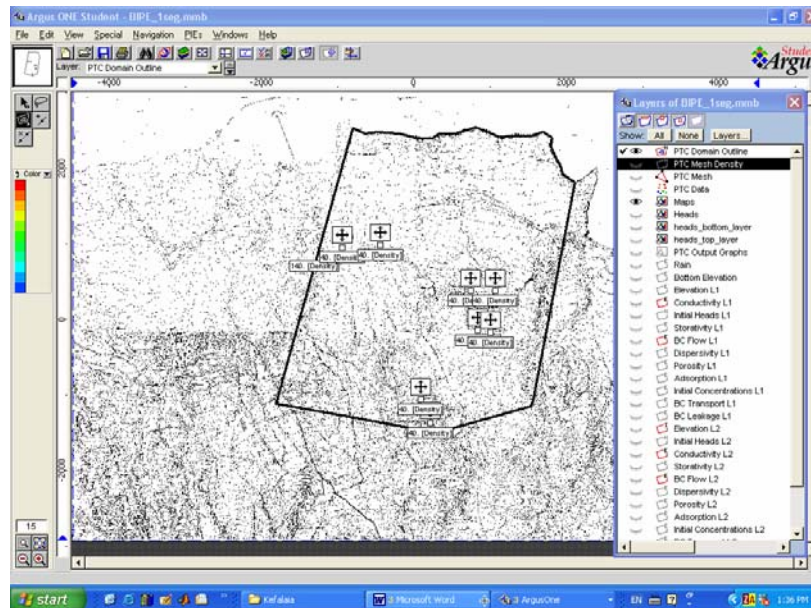
Η οριοθέτηση της περιοχής που θα μελετηθεί αποτελεί το δεύτερο σημαντικό βήμα, έπειτα από τη σωστή μετατροπή των μονάδων στο χάρτη. Η γεωμετρία του χώρου που θα μοντελοποιηθεί είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς με τον τρόπο αυτό περικλείεται ο χώρος μελέτης και το πρόβλημα περιορίζεται σε μικρότερη περιοχή. Φυσικά, οι διαστάσεις του μοντέλου δεν θα πρέπει να ανταποκρίνονται μονάχα στις ανάγκες της προσομοίωσης για ροή και μεταφορά ρύπων στην παρούσα κατάσταση. Η ρύπανση είναι συχνά δυνατόν να επεκτείνεται πέρα από τα υπάρχοντα όρια του μοντέλου, το οποίο μακροπρόθεσμα δεν θα έχει κάποια πρακτική σημασία (μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων που αντλούν με αποτέλεσμα ο κώνος πτώσης να αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου). Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, τα όρια του μοντέλου πρέπει να επεκτείνονται πέραν αυτών που απαιτούνται μονάχα για την παρούσα προσομοίωση.

Ανάλογη προσοχή πρέπει επίσης να δοθεί στην υπολογιστική ικανότητα του εκάστοτε επεξεργαστή. Στην περίπτωση κατά την οποία ο επεξεργαστής είναι μειωμένων δυνατοτήτων, η μοντελοποίηση μίας αρκετά μεγάλης περιοχής είναι ανέφικτη. Το γεγονός αυτό επιφέρει σπατάλη χρόνου και άμεσων αποτελεσμάτων στο χρήστη.

Για να οριοθετηθεί η περιοχή με το κατάλληλο σχεδιαστικό εργαλείο, απαιτείται η ενεργοποίηση του εικονιδίου με την ένδειξη «Layers». Η συγκεκριμένη εντολή αποκαλύπτει μία σειρά από σχεδιαστικά, και όχι γεωλογικά ή υδρολογικά, στρώματα. Το καθένα από τα στρώματα αυτά, ανάλογα με τον τίτλο του, επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει σε διαφορετικό φύλλο εργασίας κάθε φορά, διαφορετικές πληροφορίες. Για παράδειγμα στο φύλλο εργασίας με τον τίτλο «Porosity» μπορούν να καταχωρηθούν οι πληροφορίες για το πορώδες της περιοχής, ενώ στο φύλλο «Conductivity» η υδραυλική αγωγιμότητα των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών.

Φυσικά πρέπει να σημειωθεί ότι τα διάφορα φύλλα εργασίας είναι δυνατόν να αναφέρονται σε δύο, τρία ή και παραπάνω γεωλογικά στρώματα (L1, L2, L3), ανάλογα με τον αριθμό που ορίστηκε αρχικά από το χρήστη. Η ένδειξη επομένως L1 αναφέρεται στο πρώτο γεωλογικό στρώμα και στα φύλλα εργασίας (Layers) που του αντιστοιχούν.

Ακριβώς δίπλα από την ονομασία κάθε φύλλου εργασίας βρίσκεται ένα σύμβολο (μάτι), το οποίο κάθε φορά μπορεί να ενεργοποιείται ή να απενεργοποιείται με ένα κλικ του κέρσορα. Με τον τρόπο αυτό, οι πληροφορίες που έχουν καταχωρηθεί σε ένα ενεργοποιημένο παράθυρο είναι ορατές από το χρήστη, ενώ οι υπόλοιπες που αντιστοιχούν σε διαφορετικά φύλλα εργασίας, τα οποία είναι απενεργοποιημένα, δεν εμφανίζονται (Σχήμα 4.4).



**Σχήμα 3.4:** Απεικόνιση σχεδιαστικών στρωμάτων (Layers) στο δεξί τμήμα του σχεδιαστικού παραθύρου. Στο ίδιο παράθυρο απεικονίζονται ο τοπογραφικός χάρτης ενός χώρου (ΒΠΠΕ Ηρακλείου), η οροθετημένη περιοχή μελέτης με το κατάλληλο σχεδιαστικό εργαλείο και τέλος τα πηγάδια άντλησης-έγχυσης που εντοπίζονται στην περιοχή.

Προκειμένου τέλος να οριστούν τα όρια του μοντέλου, επιλέγεται το φύλλο εργασίας «PTC Domain Outline» και το σχεδιαστικό εργαλείο που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4 και είναι κατάλληλο για δημιουργία κλειστών επιφανειών. Με τον τρόπο αυτό, οδηγώντας το ποντίκι του υπολογιστή κατά μήκος του επιθυμητού ορίου, προσδιορίζονται τα όρια του μοντέλου. Στην περίπτωση απεικόνισης γεωτρήσεων, ο χρήστης επιλέγει τη σημειακή πηγή, αντί της κλειστής γραμμής που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση επιφανειών.

Όσον αφορά στο ερώτημα σχετικά με τη σωστή επιλογή των ορίων, αυτά είναι προτιμότερο να ταυτίζονται με κάποια καλά ορισμένα και διακριτά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής (λίμνες, ποτάμια, ωκεανοί, αδιαπέρατα γεωλογικοί σχηματισμοί, ανθρωπογενείς επεμβάσεις). Εφόσον το μοντέλο απομονώνεται από την

υπόλοιπη περιοχή μέσω των ορίων του, είναι αναγκαίο οι τιμές που θα δοθούν στα όρια αυτά να είναι μεγέθη, τα οποία είτε είναι γνωστά είτε μπορούν να υπολογιστούν εύκολα.

### **3.6.5 Προσδιορισμός πυκνότητας διακριτοποίησης**

Αν και η διακριτοποίηση αποτελεί ένα στάδιο πριν από την εκτέλεση του αλγορίθμου «PTC», ο χρήστης καλείται αμέσως μετά την οριοθέτηση της περιοχής να ορίσει τον παράγοντα πυκνότητα (*Density*). Η πυκνότητα αντιστοιχεί στο μέγεθος που θα έχουν οι τριγωνικοί βρόχοι, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν αργότερα στη διακριτοποίηση. Εάν για παράδειγμα το μήκος ολόκληρης της περιοχής μελέτης κατά την οριζόντια διεύθυνση είναι 10 μονάδες, η τιμή 1 για την πυκνότητα του μοντέλου σημαίνει ότι το κάθε στοιχείο θα έχει μήκος ίσο με τη μονάδα. Η παράμετρος επομένως αυτή παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς η σωστή επιλογή της τιμής της αυξάνει και την ακρίβεια κατά την επίλυση του αλγορίθμου.

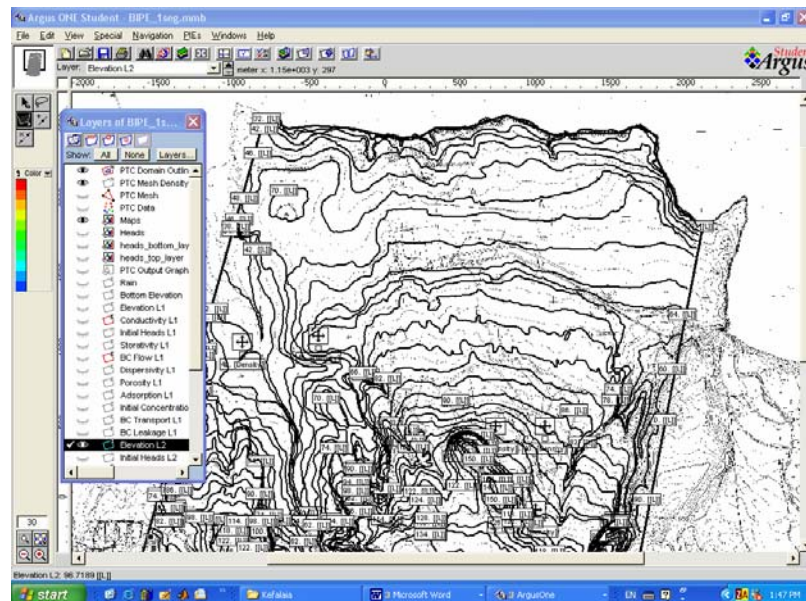
### **3.6.6 Καθορισμός του πυθμένα του ταμιευτήρα**

Για τη μοντελοποίηση μίας περιοχής πρέπει καταρχήν να οριστούν το ανώτερο και κατώτερο όριο του υδροφορέα, ο οποίος πρόκειται να προσομοιωθεί. Η διαφορά μεταξύ των δύο ορίων αντιστοιχεί στο πάχος του επικείμενου υδροφορέα. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα θεωρεί όλα τα υψόμετρα ως προς την επιφάνεια του πυθμένα. Επειδή όμως συνήθως ο πυθμένας του υδροφορέα δεν ταυτίζεται με την επιφάνεια της θάλασσας, θα πρέπει αυτή η διαφορά να επισημανθεί κατά τη μοντελοποίηση. Με επιλογή επομένως του φύλλου εργασίας «*Bottom Elevation*», αναφέρεται σε μέτρα το ύψος του πυθμένα του υδροφορέα.

### **3.6.7 Απεικόνιση ισοϋψών στο χάρτη**

Οι περιπτώσεις κατά τις οποίες οι υψομετρικές διαφορές μίας περιοχής είναι μηδαμινές είναι ελάχιστες και αφορούν κατά κύριο λόγο περιορισμένου μεγέθους μοντέλα. Σε γενικές γραμμές τα διάφορα υψόμετρα, τα οποία αναπαρίστανται στους τοπογραφικούς χάρτες, θα πρέπει να αποδίδονται σωστά. Για το σκοπό αυτό πρέπει

καταρχήν να επιλεγεί από τα διάφορα στρώματα (*Layers*), εκείνο που σχετίζεται με την αναπαράσταση των υψομέτρων και φέρει τον τίτλο «*Elevations*»..



**Σχήμα 3.5:** Στο αντίστοιχο σχεδιαστικό παράθυρο (*Elevation L2*) πραγματοποιείται η εισαγωγή των ισοϋψών της περιοχής με το κατάλληλο εργαλείο.

Για το σχεδιασμό των ισοϋψών επιλέγεται το σχεδιαστικό εργαλείο που αντιστοιχεί σε ανοικτές γραμμές, με τη βοήθεια του οποίου ο χρήστης ακολουθώντας απλά με τον κέρσορα τις υψομετρικές διαφορές στο χάρτη είναι σε θέση να τις απεικονίσει στο πρόγραμμα (Σχήμα 3.5). Αν και πρόκειται για μία αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, ειδικά όταν η μοντελοποίηση αφορά μία μεγάλη περιοχή, προσφέρει καλύτερη προσομοίωση του χώρου μελέτης.

Σχετικά με τις τιμές των ισοϋψών που καταγράφονται στο πρόγραμμα (έπειτα από διπλό κλικ του κέρσορα στο τέλος της γραμμής), πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές δεν αντιστοιχούν στις πραγματικές τιμές που αντικατοπτρίζονται στον τοπογραφικό χάρτη. Στην πράξη, οι ισοϋψείς υπολογίζονται με βάση την επιφάνεια της θάλασσας. Στην περίπτωση όμως αυτή, επειδή τα υψόμετρα υπολογίζονται σε σχέση με το κατώτερο τμήμα του υδροφορέα (πυθμένας), ο οποίος βρίσκεται για παράδειγμα 30m. κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, στις ισοϋψείς προστίθεται τελικά η τιμή 30 κατά την εισαγωγή τους στο μοντέλο.

Μετά την εισαγωγή των κατάλληλων υψομέτρων ακολουθεί η επιλογή μεθόδου παρεμβολής (*Interpolation method*), έτσι ώστε να αντιστοιχεί συγκεκριμένη πλέον τιμή ακόμη και σε περιοχές των οποίων το υψόμετρο δεν είναι επακριβώς γνωστό.

### **3.6.8 Καθορισμός υδρογεωλογικών παραμέτρων**

#### **3.6.8.1 Υδραυλική αγωγιμότητα**

Η υδραυλική αγωγιμότητα καθορίζει την ευκολία με την οποία ένα ρευστό ρέει μέσα σε ένα γεωλογικό σχηματισμό. Είναι λογικό ότι διαφορετικά πετρώματα φέρουν διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας, ανάλογα κάθε φορά με τις συνθήκες σχηματισμού τους. Για την εισαγωγή επομένως και αυτής της παραμέτρου στο μοντέλο, ο χρήστης καλείται να διαιρέσει της περιοχή ενδιαφέροντος σε τμήματα ανάλογα με την υδραυλική αγωγιμότητα του κάθε σχηματισμού. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας την κλειστή σχεδιαστική γραμμή και στη συνέχεια το στρώμα με την ένδειξη «*Conductivity*», στο οποίο πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και στις τρεις διαστάσεις  $x$ ,  $y$  και  $z$  (οι μονάδες είναι συνήθως  $m/day$ ).

Συνήθως από τις μετρήσεις λαμβάνεται η οριζόντια τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, η οποία κατόπιν θεωρείται ότι ταυτίζεται με την κατακόρυφη. Η δε συνιστώσα κατά τον άξονα  $z$  εκτιμάται ότι είναι δέκα (10) φορές μικρότερη από τις άλλες ισότιμες συνιστώσες.

#### **3.6.8.2 Βροχόπτωση**

Η εισαγωγή της συγκεκριμένης τιμής λαμβάνεται κυρίως από μετεωρολογικούς σταθμούς ή αγροτικούς συνεταιρισμούς και παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα εισαγωγής στο μοντέλο μίας ακόμη παραμέτρου για την καλύτερη προσομοίωση της περιοχής. Η βροχόπτωση θεωρείται ότι επηρεάζει μονάχα το πρώτο γεωλογικό στρώμα και προσδιορίζεται στο πρόγραμμα με ενεργοποίηση του φύλλου εργασίας με τον τίτλο «*Rainfall*». Με την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της βροχόπτωσης κατά περιόδους (ορίζονται αρχικά ανάλογα με τις απαιτήσεις του μοντέλου), η προσομοίωση είναι δυνατόν να διακριθεί σε χειμερινή και θερινή περίοδο.

### 3.6.8.3 Πορώδες

Το πορώδες αποτελεί μία σημαντική ιδιότητα των σχηματισμών, η οποία είναι απαραίτητο να καθορίζεται κάθε φορά στο μοντέλο. Ο προσδιορισμός του γίνεται συνήθως με δειγματοληπτικές μετρήσεις ή διαγραφίες μέσα σε γεωτρήσεις. Στο πρόγραμμα «Argus One» εισάγεται απλά με την ενεργοποίηση του φύλλου εργασίας «Porosity» και την καταγραφή της κατάλληλης τιμής σε αυτό.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί η επίδραση του πορώδους και της διαπερατότητας στα υδρολογικά χαρακτηριστικά ενός υλικού. Ως παράδειγμα αναφέρεται η άργιλος, η οποία αν και χαρακτηρίζεται από μικρό μέγεθος πόρων έχει μεγάλο πορώδες. Το αποτέλεσμα όμως των μικρών πόρων είναι η δυσκολία που παρατηρείται στην κίνηση του ύδατος. Οι αργιλοί επομένως σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως υλικά μικρής διαπερατότητας και κατά επέκταση χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητες είναι ανάλογες, πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι ταυτόσημες και απαιτείται η χρήση μαθηματικής σχέσης για τη μετατροπή από τη μία παράμετρο στην άλλη.

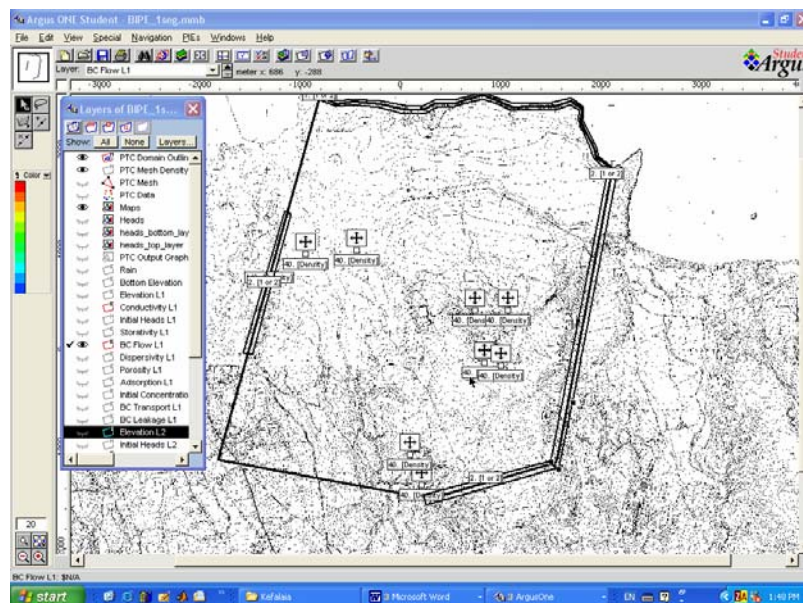
### 3.6.9 Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, υπάρχουν τρία είδη συνοριακών συνθηκών. Η εφαρμογή της κατάλληλης συνοριακής συνθήκης πραγματοποιείται με ενεργοποίηση του φύλλου εργασίας «BC Flow L1» ή «BC Transport L1» (εάν πρόκειται για προσομοίωση ροής ή μεταφοράς μάζας) και την κατασκευή μίας κλειστής πολυγωνικής γραμμής κατά μήκος του τμήματος του μοντέλου όπου και θα εφαρμοστεί. Με το τέλος της εργασίας, εμφανίζεται στην οθόνη του προγράμματος η δυνατότητα προσδιορισμού της κατάλληλης συνοριακής συνθήκης (BC Type L1 or L2). Ο χρήστης είναι δυνατόν να επιλέξει συνθήκη πρώτου είδους (L1), εάν πρόκειται για σταθερά υδραυλικά ύψη, δευτέρου είδους (L2), εάν πρόκειται για καθορισμένη ροή ύδατος ή ακόμη και τρίτου είδους (L3) σε περίπτωση γνώσης υδρογεωλογικών πληροφοριών έξω από τα σύνορα του μοντέλου (Σχήμα 3.6). Σε κάθε περίπτωση πάντως, πρέπει να καθοριστεί η τιμή του υδραυλικού ύψους ή της ροής (BC Stress). Θετικό πρόσημο στην τιμή της ροής υποδεικνύει κίνηση του νερού από μικρότερες σε μεγαλύτερες τιμές.



Εκτός από την εφαρμογή συνοριακών συνθηκών στα όρια του μοντέλου, ο χρήστης καλείται να καθορίσει αντίστοιχες τιμές και σε σημειακές πηγές που βρίσκονται εντός της περιοχής μοντελοποίησης. Τα πηγάδια και τα σημεία έγχυσης ρύπων αποτελούν μία ανάλογη περίπτωση και η εφαρμογή συνοριακών συνθηκών πραγματοποιείται με τη διαδικασία που αναφέρθηκε πρωτύτερα. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα πηγάδια αντιστοιχούν πάντοτε σε συνοριακή συνθήκη δευτέρου είδους ( $L2$ ) και στην περίπτωση που αντλούν η τιμή της ροής λαμβάνει αρνητικό πρόσημο.

Ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών αποτελεί το τελευταίο στάδιο πριν τη διακριτοποίηση του μοντέλου της περιοχής. Απαραίτητο βήμα στο σημείο αυτό, αποτελεί η μεταφορά όλων των σημειακών πηγών (πηγάδια) στο φύλλο εργασίας «*PTC Domain Outline*». Αυτό επιτυγχάνεται με επιλογή των σημειακών πηγών και εφαρμογή της εντολής αντιγραφή (*copy*) από το φύλλο «*BC Flow L1*» ή «*BC Transport L1*» στο φύλλο εργασίας «*PTC Domain Outline*» με επικόλληση (*paste*).



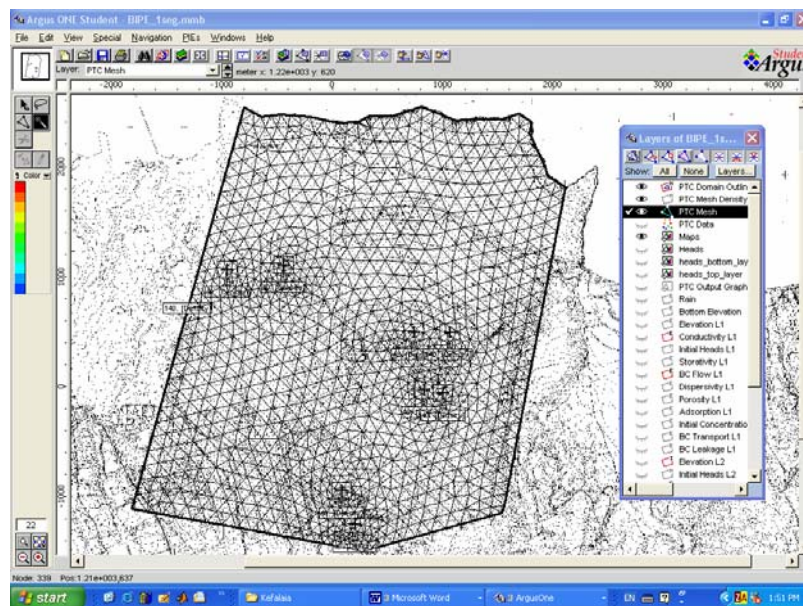
**Σχήμα 3.6:** Με επιλογή του κατάλληλου σχεδιαστικού παραθύρου (*BC Flow*), είναι δυνατή η εφαρμογή των απαραίτητων συνοριακών συνθηκών σε επιλεγμένες περιοχές του μοντέλου.

### 3.6.10 Διακριτοποίηση του μοντέλου

Η διακριτοποίηση του μοντέλου αποτελεί μία σημαντική διαδικασία στην προσομοίωση, καθώς ολόκληρος ο χώρος ενδιαφέροντος διαιρείται σε επιμέρους τριγωνικούς βρόχους, οι οποίοι ενίοτε μπορεί να είναι και πυκνότεροι (πηγάδια ή άλλα

σημεία όπου αναμένεται μεγαλύτερο ενδιαφέρον) (Σχήμα 3.7). Η διακριτοποίηση πραγματοποιείται επιλέγοντας το φύλλο εργασίας «PTC Mesh» και το κατάλληλο σχεδιαστικό εργαλείο (*magic wand*).

Η όλη διαδικασία γίνεται αυτόματα από τον υπολογιστή. Σε περίπτωση όμως κατά την οποία ο χρήστης δεν είναι ικανοποιημένος με την πυκνότητα (μέγεθος) των βρόχων, έχει τη δυνατότητα επιστροφής στην κατάλληλη εντολή (*PTC Domain Outline – Density*) και μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την αρχική τιμή που είχε ορίσει..



**Σχήμα 3.7:** Στο συγκεκριμένο παράθυρο εμφανίζεται μία αρχική διακριτοποίηση που πραγματοποιήθηκε στη Βιομηχανική περιοχή Ηρακλείου. Παρατηρείται πύκνωση των τριγωνικών στοιχείων στα σημεία εκείνα όπου είναι τοποθετημένα τα πηγάδια.

Μετά το τέλος της διακριτοποίησης, ο χρήστης καλείται μέσω των εντολών «*Special - Renumber – Optimize bandwidth*» να βελτιστοποιήσει τον αριθμό των κόμβων που χρησιμοποιούνται στην επίλυση της αλγεβρικής εξίσωσης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί και ο υπολογιστικός χρόνος (Pinder, 2002).

### 3.6.11 Εκτέλεση του αλγορίθμου

Αφού εφαρμοστούν προσεκτικά όλα τα στάδια που απαιτούνται για την εισαγωγή των απαραίτητων πληροφοριών στο πρόγραμμα, ακολουθεί η εκτέλεση του αλγορίθμου «PTC». Η διαδικασία λοιπόν ολοκληρώνεται με επιλογή της εντολής «*PIEs – Run PTC*», οπότε και επιλύονται οι αλγεβρικές εξισώσεις.



### 3.6.12 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αποτελεί την ευκολότερη διαδικασία για γρήγορη και σωστή ερμηνεία των χαρακτηριστικών του υδροφορέα. Για την απεικόνιση της ροής (υδραυλικά ύψη) ή της μεταφοράς μάζας (συγκεντρώσεις), ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τα κατάλληλα αρχεία (*flow - concentration*). Το μεγάλο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου προγράμματος είναι ακριβώς η γραφική αναπαράσταση των δεδομένων, γεγονός που επιτρέπει στο χρήστη άμεση οπτική επαφή και κατανόηση της κατάστασης που επικρατεί στο υπέδαφος.

Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων λαμβάνει χώρα με επιλογή του φύλλου εργασίας «*PTC Data*» και ακολούθως των εντολών «*File – Import PTC Data – Text file*». Τα γραφικά αποτελέσματα είναι προτιμότερο να αποθηκεύονται κάθε φορά σε ξεχωριστά φύλλα εργασίας που δημιουργούνται από το χρήστη (*Hydraulic heads* για τα υδραυλικά ύψη ή *Concentrations* για την απεικόνιση των συγκεντρώσεων του ρύπου). Με επιλογή λοιπόν του κατάλληλου σχεδιαστικού εργαλείου, τόσο για τα ύψη όσο και για τις συγκεντρώσεις, απεικονίζονται γραφικά στο πρόγραμμα οι μεταβολές και για τις δύο παραμέτρους.

### 3.6.13 Επανααξιολόγηση του μοντέλου (Calibration)

Συχνά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση του αλγορίθμου και τη γραφική τους ερμηνεία είναι αντικρουόμενα με τις παρατηρήσεις στο πεδίο. Είναι επίσης δυνατόν, η προσομοίωση να παρουσιάζει ελλείψεις και κενά, γεγονός το οποίο προφανώς οφείλεται στη λανθασμένη επιλογή υδρογεωλογικών παραμέτρων και συνοριακών συνθηκών. Στην περίπτωση αυτή, ο χρήστης καλείται να επαναπροσδιορίσει τις τιμές που είχε αρχικά εισάγει στο μοντέλο ή ακόμα και τον τύπο των συνοριακών συνθηκών που είχε επιλέξει. Φυσικά, η όλη διαδικασία είναι αρκετά δύσκολη, καθώς μία αλλαγή σε μία παράμετρο είναι δυνατόν να επιφέρει μεγαλύτερο κόστος παρά όφελος. Το θετικό όμως του προγράμματος και του κώδικα επίλυσης «*PTC*», είναι η γρήγορη προσομοίωση ακόμη και σχετικά μεγάλων συστημάτων. Σε γενικές γραμμές, όταν παρατηρούνται διαφοροποιήσεις μεγάλης κλίμακας στο μοντέλο το πρόβλημα θα πρέπει να αναζητηθεί στις συνοριακές συνθήκες. Μία άλλη πιθανή λύση προκύπτει με μείωση κατά το μισό τόσο του χωρικού όσο και του χρονικού βήματος ( $\Delta x - \Delta t$ ) που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς.

# ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗ ΒΙΠΕ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ, ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ

### 4.1 Σκοπός έρευνας

Η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη ΒΙΠΕ Ηρακλείου έχει ως στόχο τη χαρτογράφηση των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους στην περιοχή μελέτης, όπου παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της υφαλμύρωσης (salinity zone). Ιδιαίτερα, η γεωφυσική έρευνα στοχεύει στον προσδιορισμό των υφάλμυρων ζωνών που έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας των εντατικών αντλήσεων από γεωτρήσεις της περιοχής. Τέλος, σύμφωνα με τις ερμηνευμένες γεωηλεκτρικές τομές που καθορίζουν την εξάπλωση των γεωλογικών σχηματισμών τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση υποδεικνύονται θέσεις ερευνητικών γεωτρήσεων για την παρακολούθηση και αντιμετώπιση του προβλήματος.

Η παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια προγράμματος του Γ΄ ΚΠΣ 2000-06 σχετικά με την προστασία υπόγειων υδροφορέων από υφαλμύρωση μέσω εμπλουτισμού με επεξεργασμένα βιομηχανικά απόβλητα. Προβλέπεται επίσης η ανάπτυξη τεχνολογιών για τη βιώσιμη διαχείριση ιλύων από μονάδες καθαρισμού βιομηχανικών αποβλήτων.

### 4.2 Περιγραφή περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη βιομηχανική ζώνη (ΒΙ.ΠΕ) Ηρακλείου, η οποία απέχει περίπου 1.5km. από την ακτογραμμή. Το ανάγλυφο της περιοχής είναι σχετικά ομαλό, με μία τάση αύξησης του υψομέτρου προς το νότο. Η περιοχή

ενδιαφέροντος οριοθετείται στα νότια από το εργοστάσιο της Coca-Cola, στα ανατολικά από το χώρο του Κεραμοποιείου Μεταξά, στα δυτικά από τη μονάδα Βιολογικού καθαρισμού και τέλος στα βόρεια από την αντιπροσωπία αυτοκινήτων της Opel.

Στα πλαίσια του προγράμματος για εύρεση των υφάλμυρων ζωνών σχεδιάστηκε γεωφυσική διασκόπηση, η οποία περιελάμβανε τρεις γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας συνολικού μήκους 1310m. Η μονάδα βιολογικού καθαρισμού βρίσκεται πλησίον της θέσης όπου τέμνονται οι γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας T2 και T3 (Σχήμα 4.1). Όλες οι γραμμές μελέτης πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος των κεντρικών δρόμων της βιομηχανικής ζώνης (Σχήμα 4.2).



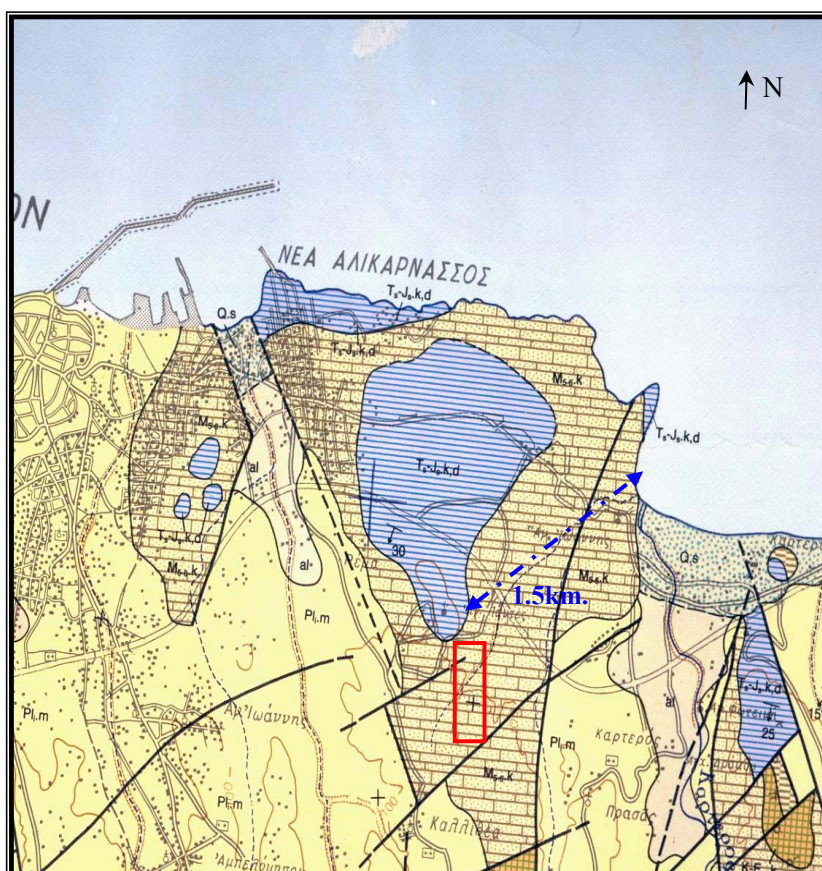
**Σχήμα 4.1:** Τοπογραφικός χάρτης περιοχής μελέτης και γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας (T1, T2, T3). Στο χάρτη διακρίνονται επίσης κάποιες από τις υπάρχουσες γεωτρήσεις (Θέσεις 1, 2, 3, 4) και η μονάδα του βιολογικού καθαρισμού.



**Σχήμα 4.2:** Φωτογραφία της περιοχής μελέτης, στην οποία εικονίζεται η δεύτερη γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας T2 (άσπρη διακεκομμένη γραμμή).

### 4.3 Γεωλογία ΒΙΠΕ Ηρακλείου

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος είναι οι ακόλουθοι:



**Σχήμα 4.3:** Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης. Η περιοχή στο κόκκινο πλαίσιο οριοθετεί το χώρο πραγματοποίησης της γεωφυσικής διασκόπησης.

- α) Βιοκλαστικοί υφαλώδεις ασβεστόλιθοι του Νεογενούς (Σχηματισμός Αγ. Βαρβάρας): Πρόκειται κατά κύριο λόγο για μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, εντός των οποίων ενίοτε παρεμβάλλονται γύψος ή κροκαλοπαγής γύψος. Οι φυλλώδεις μάργες συχνά περιέχουν φυτικά λείψανα και υπολείμματα ψαριών.
- β) Ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τριπόλεως: Πρόκειται για ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες που αποτελούν τη βάση του τεκτονικού καλύμματος.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι τόσο ανατολικά όσο και δυτικά της ακτογραμμής εντοπίζονται αλλουβιακές αποθέσεις (al), θαλάσσιες άμμοι (Qs) και έντονη παρουσία ρηγμάτων, τα οποία φτάνουν μέχρι την ενδοχώρα. Σύμφωνα με στοιχεία παρακείμενων γεωτρήσεων η βιομηχανική ζώνη του Ηρακλείου αντιμετωπίζει έντονο πρόβλημα υφαλμύρωσης. Συγκεκριμένα, οι τρεις γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη θέση 1 (Μεταξάς Παλιές) έφτασαν μέχρι βάθους περίπου 80m. και υπέδειξαν ότι οι υπερκείμενοι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι έχουν πάχος που φθάνει μέχρι τα 70m. Τρεις πιο πρόσφατες γεωτρήσεις στη θέση 2 (Μεταξάς Νέες) καθώς και γεωτρήσεις της ETBA στις θέσεις 3 και 4 (Σχήμα 4.1) εντόπισαν το υφάλμυρο νερό στα 85m. περίπου.

#### **4.4 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης**

##### **4.4.1 Εισαγωγή**

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι έχουν σαν στόχο τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Η μετρούμενη ποσότητα είναι η ηλεκτρική τάση, από την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη από τις ηλεκτρικές μεθόδους. Έχει σκοπό τον καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, ή καλύτερα την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος που ονομάζεται γεωηλεκτρική δομή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων. Εφόσον το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους, είναι δυνατόν από τις μετρήσεις του δυναμικού να καθοριστεί τελικά και η υπεδάφεια δομή.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$  είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που

υπολογίζεται από τη σχέση:  $\rho = \frac{RA}{L}$  (4.1)

όπου,

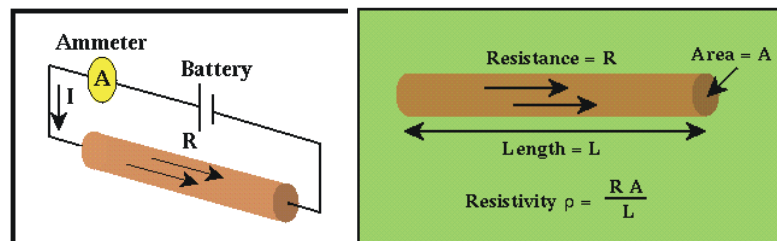
$R$  η αντίσταση κυλινδρικού αγωγού στα άκρα του οποίου εφαρμόζεται

ρεύμα έντασης  $I$ ,

$A$  το εμβαδόν επιφάνειας αγωγού,

$L$  το μήκος κυλινδρικού αγωγού.

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων SI είναι το  $\Omega\text{m}$ . Μερικές φορές χρησιμοποιείται και η μονάδα  $\Omega\text{cm}$  όπου  $1 \Omega\text{m} = 100 \Omega\text{cm}$ . Το αντίστροφο,  $\sigma = 1/\rho$ , της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος, με μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα το Siemens/m.



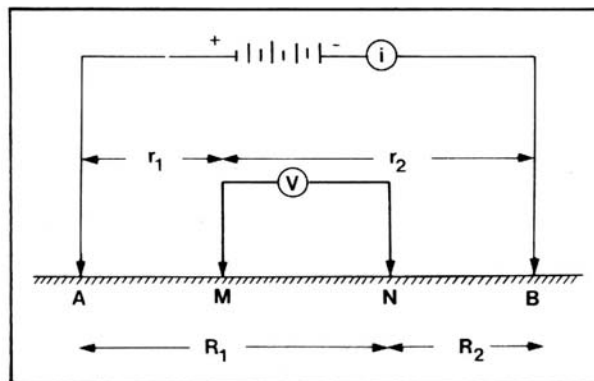
**Σχήμα 4.4:** Σχηματική απεικόνιση υπολογισμού της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων με βάση το νόμο του Ohm.

Το Σχήμα 4.5 αντιπροσωπεύει μία τυπική διάταξη ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Υπάρχουν τα ηλεκτρόδια ρεύματος AB που είναι συνδεδεμένα με το αμπερόμετρο για την μέτρηση της έντασης του ρεύματος που εισάγεται στο υπέδαφος, ενώ τα ηλεκτρόδια MN είναι τα ηλεκτρόδια τάσης που συνδέονται με βολτόμετρο για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού. Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm προκύπτει ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad (4.2)$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει θεωρώντας ότι τα επιφανειακά στρώματα της γης είναι ομογενή. Η παραδοχή όμως αυτή δεν ισχύει, καθώς η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δεν είναι σταθερή σε αυτά. Επομένως, η αντίσταση που υπολογίζεται από την

προηγούμενη σχέση εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα και ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ( $\rho_a$ ). Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος και από τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων. Ο υπολογισμός της είναι πολύ σημαντικός και οδηγεί στον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, μέσω κατάλληλων υπολογιστικών προγραμμάτων.



**Σχήμα 4.5:** Διάταξη ηλεκτροδίων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) (Παπαζάχος, 1986).

Υπάρχουν πολλές διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται σήμερα στην υπαιθρο ανάλογα με την περιοχή, το μέγεθος των δομών που αναμένονται, τον εξοπλισμό και την εξοικείωση του προσωπικού. Στη διάταξη Wenner ισχύει  $AM = MN = NB = a$  δηλαδή τα ηλεκτρόδια διατάσσονται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις (Σχήμα 4.6). Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση στη διάταξη αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (4.3)$$

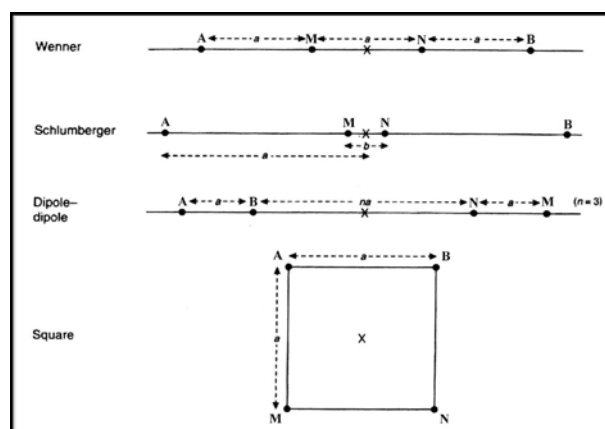
Οι κυριότεροι παράγοντες για την επιλογή της διάταξης στην ηλεκτρική τομογραφία είναι το μέγιστο βάθος διασκόπησης και η διακριτική τους ικανότητα. Οι διατάξεις στις οποίες χρησιμοποιούνται δίπολα (διπόλου – διπόλου, πόλου – διπόλου) έχουν μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης για συγκεκριμένο ανάπτυγμα ηλεκτροδίων σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Παρόλα αυτά, οι διατάξεις Wenner, Schlumberger και διπόλου – διπόλου έχουν καλύτερη διακριτική ικανότητα στο ίδιο βάθος σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις.

#### 4.4.2 Ηλεκτρική τομογραφία

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στην ηλεκτρική τομογραφία η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, εντοπίζοντας με τον τρόπο αυτό ασυνέχειες και ρήγματα κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών.

Μία σειρά από μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας τη διάταξη των ηλεκτροδίων από θέση σε θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Συλλέγονται επομένως τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της γραμμής μελέτης και για διάφορα βάθη και τελικά δημιουργείται μια ψευδοτομή του υπεδάφους. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται επεξεργασία των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για τον υπολογισμό προσεγγιστικών τιμών της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Στη συγκεκριμένη γεωφυσική διασκόπηση επιλέχτηκε ο συνδυασμός διατάξεων Wenner - Schlumberger για την πραγματοποίηση των ηλεκτρικών μετρήσεων, καθώς παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης χαρτογράφησης του υπεδάφους και μεγαλύτερης διεισδυτικής ικανότητας. Στην περίπτωση αυτή τα ηλεκτρόδια δυναμικού MN παραμένουν σταθερά και ταυτόχρονα η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος AB αυξάνεται μετακινώντας τα ως προς το κέντρο της διάταξης.



**Σχήμα 4.6:** Διατάξεις ηλεκτροδίων (Παπαζάχος, 1986).



#### 4.4.3 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση εδαφών

Χαρακτηριστικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, οι οποίες προέκυψαν από γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις αναφοράς σε θέσεις όπου τα πετρώματα εμφανίζονται στην επιφάνεια καθώς και από προηγούμενες μελέτες (Βαφείδης και συνεργάτες 1991), συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

**Πίνακας 4.1.** Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων (Βαφείδης και συνεργάτες, 1991).

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ( $\Omega\text{m}$ )
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Άργιλοι	2-20
Μάργες	20-60
Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Φλύσχης	0-80
Σχιστόλιθοι - Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500

#### 4.4.4 Συλλογή δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε τρεις ηλεκτρικές γραμμές με τη διάταξη Wenner - Schlumberger. Η απόσταση  $a$  μεταξύ των ηλεκτροδίων ήταν 10m. Στην πρώτη γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας T1 το βάθος διασκόπησης έφτασε στα 100m. περίπου. Αντίστοιχα στη δεύτερη (T2) και τρίτη (T3) γεωηλεκτρική τομή, τα βάθη διασκόπησης ήταν 131m. για την T2 και 101m. για την T3.

Η συλλογή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το όργανο Sting R1. Η ένταση του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος κυμαινόταν από 1-100 mA. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό πακέτο Res2Dinv ver3.2 (Loke et al. 1994). Οι θέσεις των γραμμών ηλεκτρικής τομογραφίας απεικονίζονται στο Σχήμα 4.1.



*Σχήμα 4.7: Το όργανο Sting R1.*

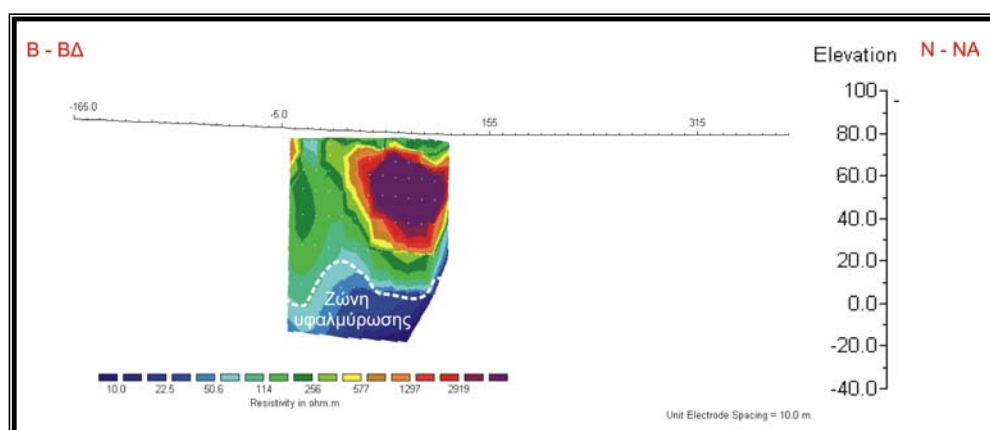


*Σχήμα 4.8: Συλλογή μετρήσεων στη ΒΙΠΕ Ηρακλείου.*

#### 4. 5 Ερμηνεία ηλεκτρικών τομογραφιών

Η πρώτη γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας (T1) μήκους 120m. και διεύθυνσης BBA-NNA βρίσκεται στο βορειότερο τμήμα της περιοχής μελέτης. Όσον αφορά στο γεωηλεκτρικό μοντέλο, παρατηρούνται τα εξής (Σχήμα 4.9):

- 1) Εμφανίζεται πλευρική μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Οι αυξημένες τιμές της προς ανατολάς αντιστοιχούν σε πιο συνεκτικούς ασβεστόλιθους. Αντίθετα οι μειωμένες τιμές προς δυσμάς, πιθανόν να οφείλονται σε ζώνη ρηγμάτωσης.
- 2) Παρατηρείται δραστική μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε απόλυτο υψόμετρο που αντιστοιχεί στο επίπεδο της θάλασσας. Αυτή η μείωση οφείλεται στη διείσδυση του θαλασσινού νερού. Η τελευταία παρατήρηση είναι σε συμφωνία με τις παρακείμενες γεωτρήσεις στη Θέση 3.

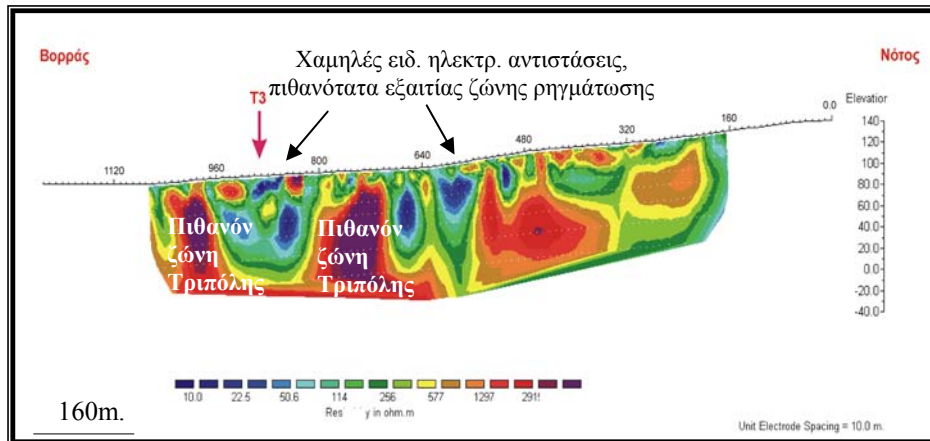


**Σχήμα 4.9:** Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή T1 με κατεύθυνση BBA-NNA.

Η γεωηλεκτρική τομή για τη δεύτερη γραμμή (T2) μήκους 900m. και διεύθυνσης από νότο προς βορρά απεικονίζεται στο Σχήμα 4.10. Η εν λόγω γεωηλεκτρική τομή εμφανίζει σημαντική πλευρική μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Συγκεκριμένα, για οριζόντια απόσταση από 160 έως 560m. παρατηρείται εύρος τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 500-1300Ωm., τιμές οι οποίες αντιστοιχούν σε μαργαϊκούς ασβεστόλιθους του Νεογενούς.

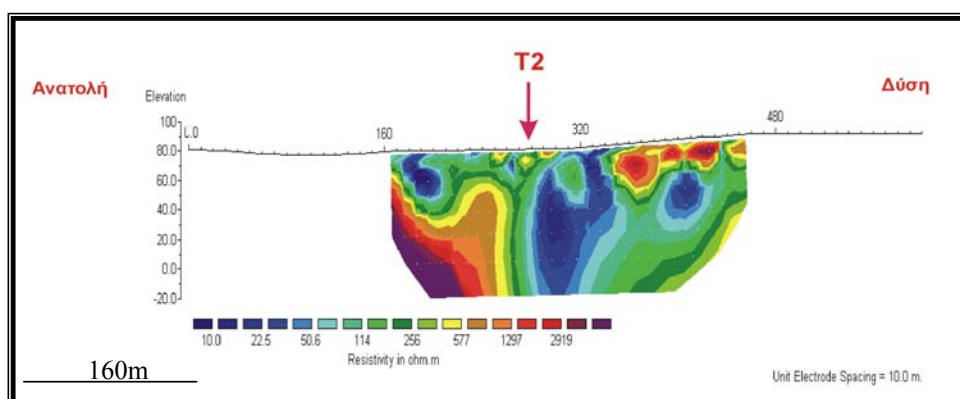
Ωστόσο, προς βορρά εμφανίζονται δύο ζώνες χαμηλών αντιστάσεων (10-50Ωm) στα 550-680m. και στα 810-960m. από την αρχή της ηλεκτρικής γραμμής, οι οποίες πιθανόν να συμπίπτουν με ζώνες ρηγμάτωσης ή με κάποια άλλα αξιοσημείωτα γεωλογικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Οι ενδείξεις αυτές επιβεβαιώνονται από το

γεωλογικό χάρτη της περιοχής, στον οποίο εμφανίζεται ένα ακόμη ρήγμα που εντοπίζεται νότια της γραμμής και σε απόσταση μερικών δεκάδων μέτρων από αυτή (Σχήμα 4.12). Οι υψηλές αντιστάσεις ( $>1300\Omega\text{m}$ ) στις περιοχές από 700-780m. και από 980-1050m. αντιστοιχούν πιθανότατα σε ασβεστόλιθους της ζώνης της Τρίπολης.

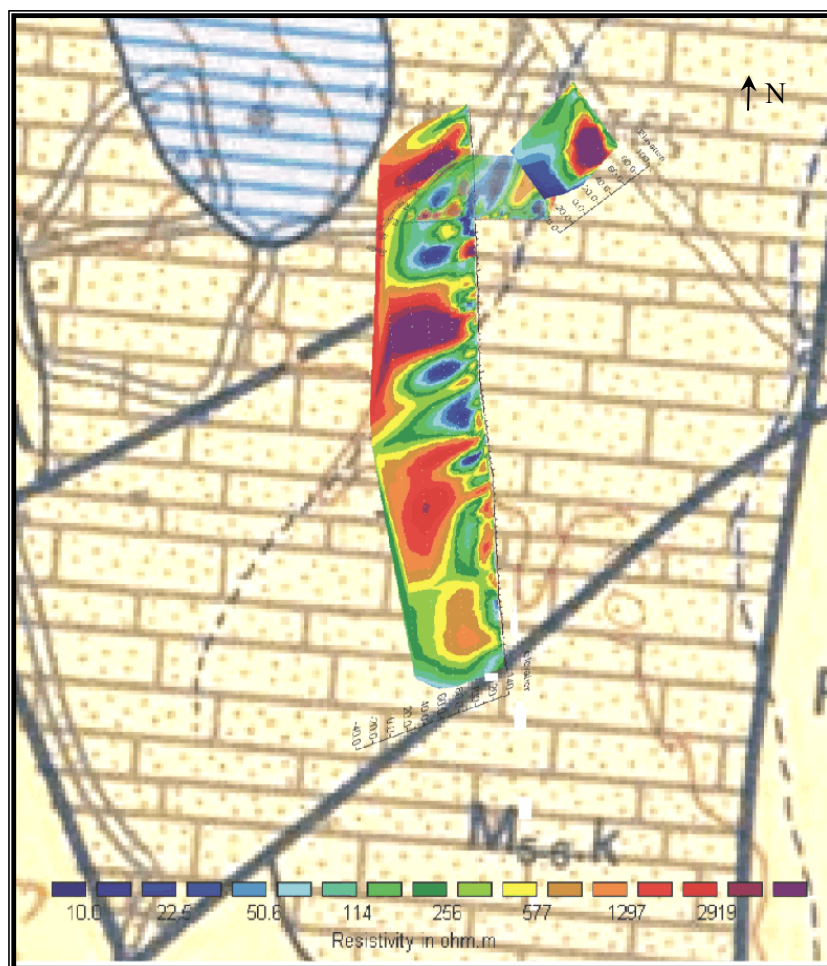


**Σχήμα 4.10:** Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή T2 με κατεύθυνση από νότο προς βορρά. Στο σχήμα απεικονίζεται και το σημείο τομής της με τη γραμμή T3.

Η τρίτη γραμμή T3 μήκους 290m. πραγματοποιήθηκε με διεύθυνση από ανατολή προς δύση και είναι κάθετη προς τη γραμμή T2. Στη συμβολή των τομών T2 και T3 παρατηρείται η ίδια ζώνη χαμηλών αντιστάσεων (Σχήμα 4.11), ενώ προς ανατολώς η T3 εμφανίζει γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλης ηλεκτρικής αντίστασης που πιθανόν να αντιστοιχούν σε ασβεστόλιθους της ζώνης της Τρίπολης σε συμφωνία με τη γραμμή T2.



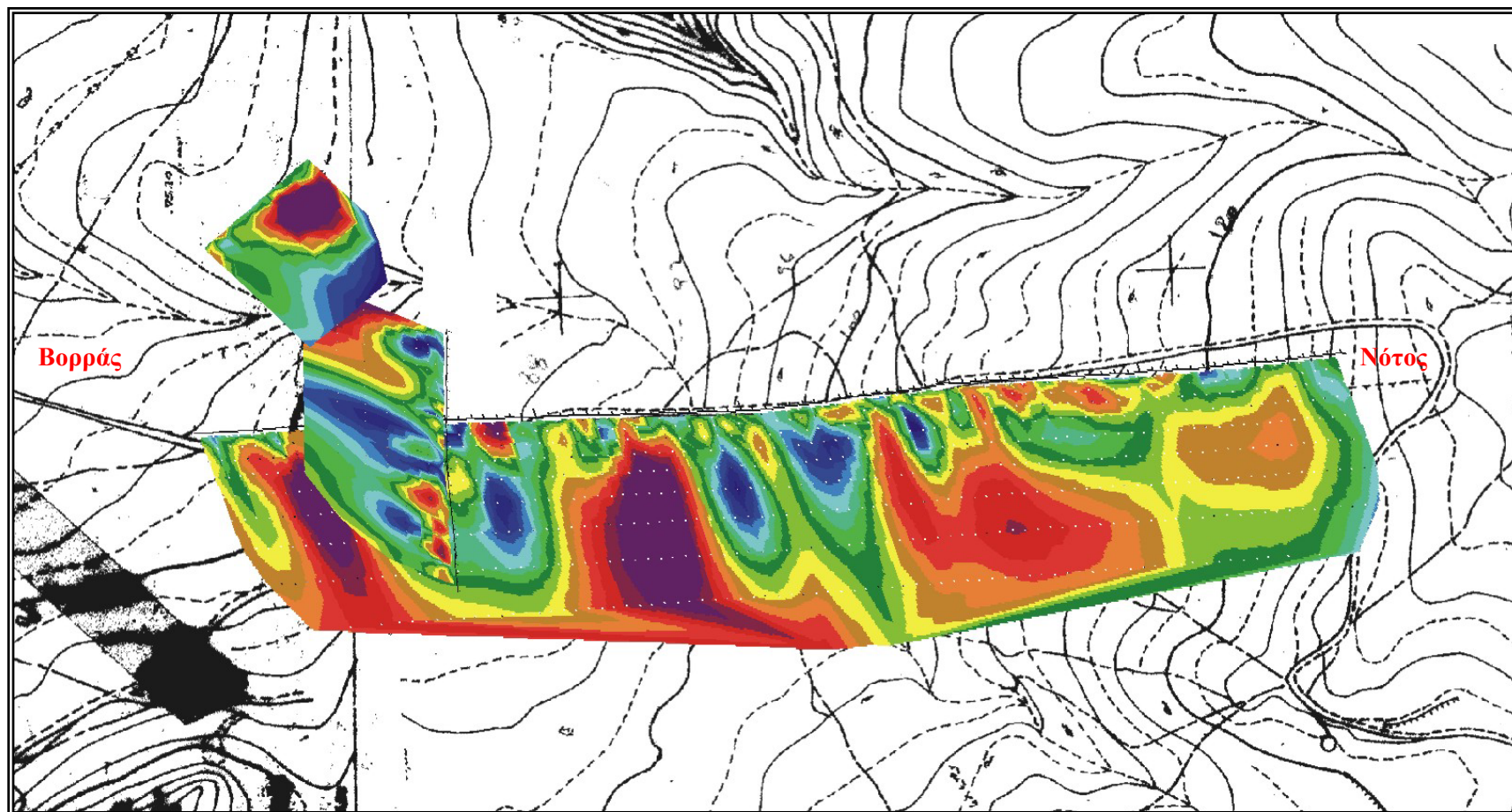
**Σχήμα 4.11:** Γεωηλεκτρική τομή για τη γραμμή T3 με κατεύθυνση από ανατολή προς δύση. Στο σχήμα απεικονίζεται και το σημείο τομής της με τη γραμμή T2.



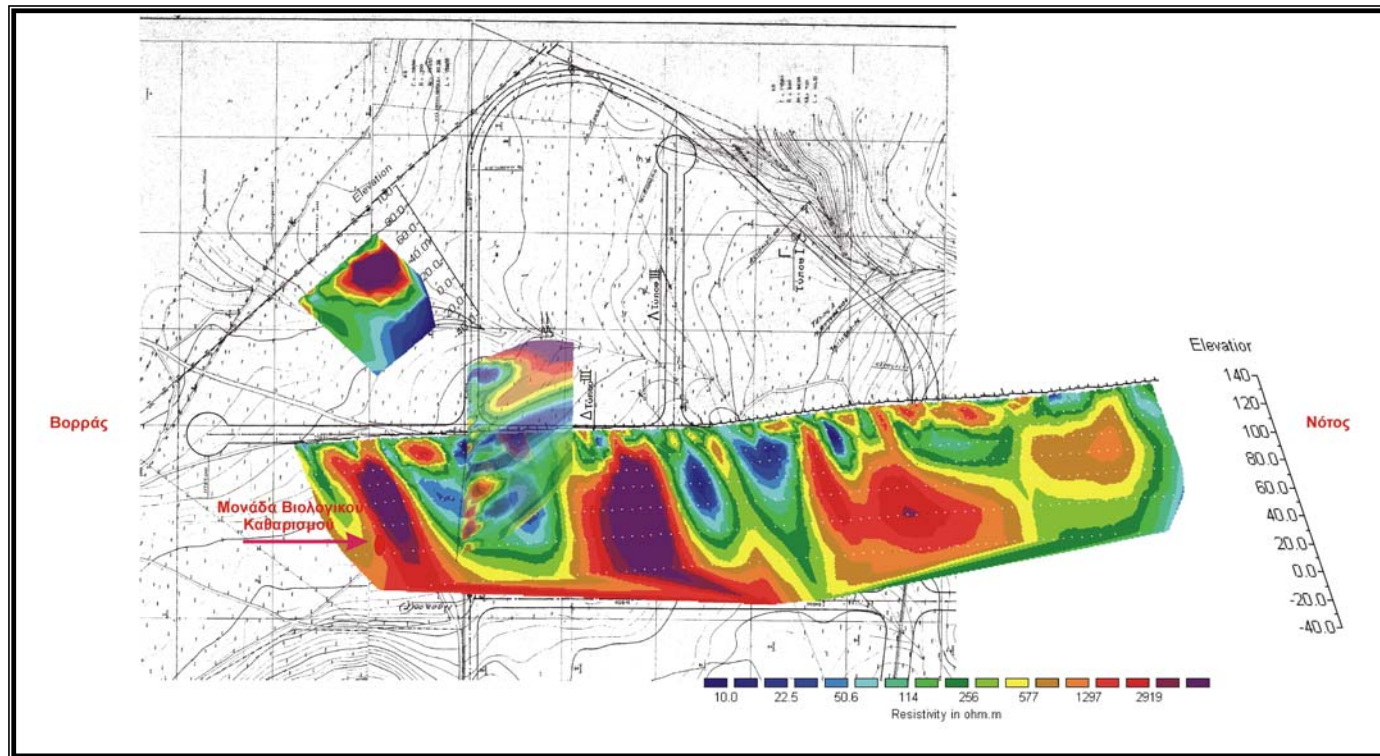
**Σχήμα 4.12:** Υπέρθεση των τριών ηλεκτρικών τομογραφιών στο γεωλογικό χάρτη του χώρου μελέτης. Οι έντονες μαύρες γραμμές αντιπροσωπεύουν ρήγματα, ενώ η διακεκομμένη γραμμή ρέμα της περιοχής.

Όλες οι γεωηλεκτρικές τομές που παρουσιάζονται έχουν υποστεί τοπογραφική διόρθωση, λαμβάνοντας υπόψη το υψόμετρο όπου βρίσκονταν προκειμένου να αποδοθεί σωστά η γεωηλεκτρική τομή του υπεδάφους (βλ. Παράρτημα Α).





*Σχήμα 4.13: Υπέρθωση των 3 γεωηλεκτρικών τομών (T1, T2, T3) πάνω στον τοπογραφικό χάρτη της περιοχής.*



**Σχήμα 4.14:** Λεπτομερής υπέρθεση των 3 γεωηλεκτρικών τομών (T1, T2, T3) πάνω στον τοπογραφικό χάρτη της περιοχής.

#### 4.6 Σύγκριση των γεωτρήσεων που ήδη υπάρχουν στην περιοχή με τις γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις τρεις γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας προσφέρουν μία αντιπροσωπευτική εικόνα της γεωλογικής δομής στην περιοχή όπου παρατηρείται υφαλμύρωση. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκαν δύο ζώνες ρηγμάτωσης στην ηλεκτρική γραμμή T2 (βλ. § 4.5.1), οι οποίες επιβεβαιώθηκαν από επιτόπια παρατήρηση. Παράλληλα, χαμηλές τιμές που παρατηρήθηκαν στη γεωηλεκτρική τομή T2 και σε οριζόντια απόσταση 550-700m. από την αρχή της ηλεκτρικής γραμμής συμπίπτουν με ρεματιά που εμφανίζεται στο γεωλογικό και τοπογραφικό χάρτη της περιοχής (βλ. Σχήματα 4.12 και 4.13).

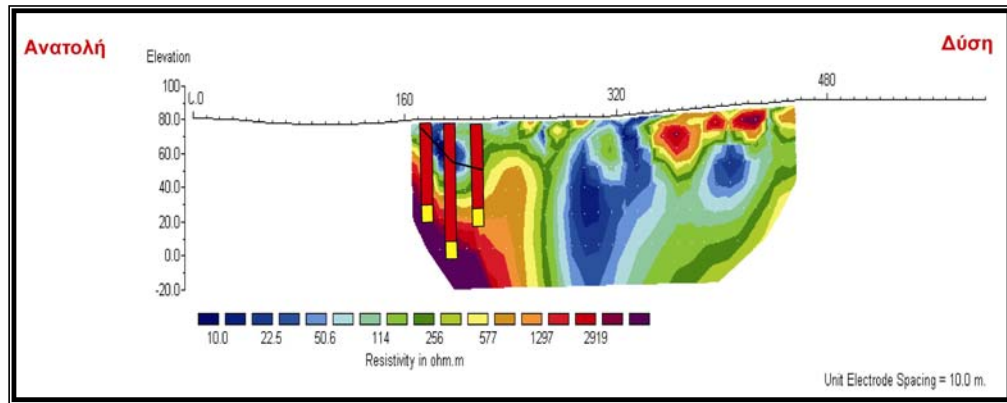
Σχετικά με το μέτωπο της υφαλμύρωσης, αρχικά επισημάνθηκε από τις γεωφυσικές μετρήσεις μία περιοχή ιδιαίτερα μειωμένων τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία είχε αποδοθεί στη διείσδυση του θαλασσινού νερού. Από γεωτρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή μελέτης συμπεραίνεται ότι όντως υπάρχει πρόβλημα υφαλμύρωσης. Ιδιαίτερα, οι γεωτρήσεις που διεξήχθησαν στις Θέσεις 2, 3 και 4 (Σχήμα 4.1) εντόπισαν υφάλμυρο νερό σε βάθος 85, 80 και 95m. αντίστοιχα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τις μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας, μόνο η πρώτη ηλεκτρική γραμμή T1 παρουσιάζει ενδείξεις για ζώνη υφαλμύρωσης. Αντίθετα, στις επόμενες γραμμές T2 και T3 δεν παρουσιάστηκε κάποια αξιοσημείωτη ένδειξη. Σύμφωνα επομένως με τα στοιχεία από τις παρακείμενες γεωτρήσεις και την γεωφυσική έρευνα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ζώνη υφαλμύρωσης επικεντρώνεται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, ξεκινώντας από το μέσο περίπου της T1 και επεκτεινόμενη προς τις γεωτρήσεις στις Θέσεις 3 και 4. Το υφάλμυρο νερό συναντάται στην T1 σε βάθος 80m. περίπου, στη Θέση 2 από τα 85m. και στις Θέσεις 3 και 4 στα 80 και 95m. αντίστοιχα. Το υφάλμυρο νερό φαίνεται επομένως να συναντάται κυρίως προς τα νοτιοανατολικά.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι γεωτρήσεις στη Θέση 1 δεν εντόπισαν υφαλμύρωση, μέχρι τουλάχιστον το βάθος στο οποίο έφτασαν. Η περιοχή επομένως που πραγματοποιήθηκαν οι γραμμές T2 και T3 δε φαίνεται μέχρι στιγμής να αντιμετωπίζει πρόβλημα. Πιθανόν τα ρήγματα που υπάρχουν στον ευρύτερο χώρο να έχουν περιορίσει το πρόβλημα υφαλμύρωσης μονάχα σε ένα τμήμα της ΒΠΠΕ. Για τη



βαθμονόμηση των γεωφυσικών στοιχείων, παρόλο που δεν είναι γνωστή η ακριβής θέση και ισαπόσταση των τριών γεωτρήσεων στη Θέση 1, τα γεωτρητικά δεδομένα τοποθετήθηκαν ενδεικτικά πάνω στη γεωηλεκτρική τομή T3 (Σχήμα 4.15).



**Σχήμα 4.15:** Υπέρθεση των τριών γεωτρήσεων στη θέση 1 πάνω στη γεωηλεκτρική τομή T3. Το κόκκινο χρώμα στις γεωτρήσεις αντιστοιχεί σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο, το κίτρινο σε ασβεστόλιθο της ζώνης της Τρίπολης και η μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στη θέση ρήγματος, όπως αναφέρεται στις γεωτρήσεις.

Παρατηρείται μία καλή συσχέτιση των γεωτρητικών πληροφοριών με τη γεωηλεκτρική τομή T3. Συγκεκριμένα, το γεωηλεκτρικό στρώμα με αυξημένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συμπίπτει με τον ασβεστόλιθο της Τρίπολης (δολομίτης – κίτρινο χρώμα), που διατρήθηκε και στις τρεις γεωτρήσεις.

#### 4.7 Προτάσεις

Εφόσον η υφαλμύρωση εντοπίστηκε στο τμήμα της περιοχής μελέτης ανατολικά από τον κεντρικό δρόμο, προτείνεται η διεξαγωγή των ερευνητικών γεωτρήσεων και των γεωφυσικών διαγραφιών πάνω στη γραμμή της ηλεκτρικής τομογραφίας T1 (Σχήμα 4.16). Οι θέσεις των ερευνητικών γεωτρήσεων Γ1, Γ2 και Γ3 ως προς την οριζόντια απόσταση και το υψόμετρό τους στο γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων HATT οριοθετούνται ως εξής:

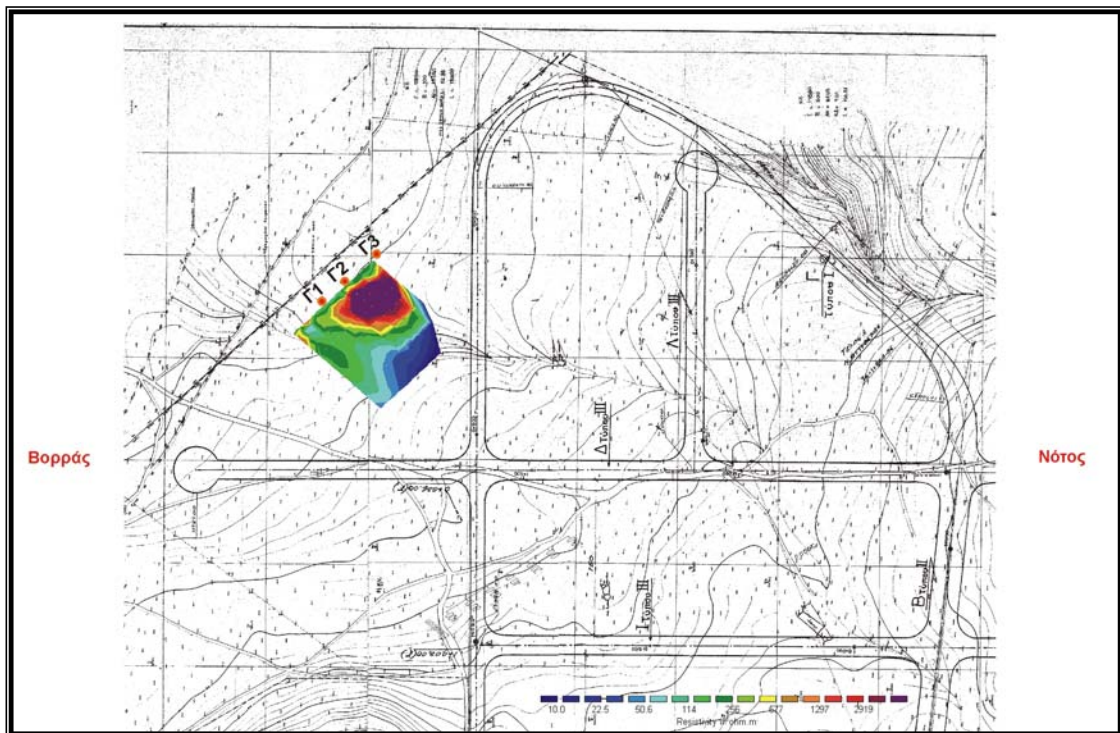
Γ1 (X: 19280 m., Y: 8180 m.)

Γ2 (X: 19320 m., Y: 8160 m.)

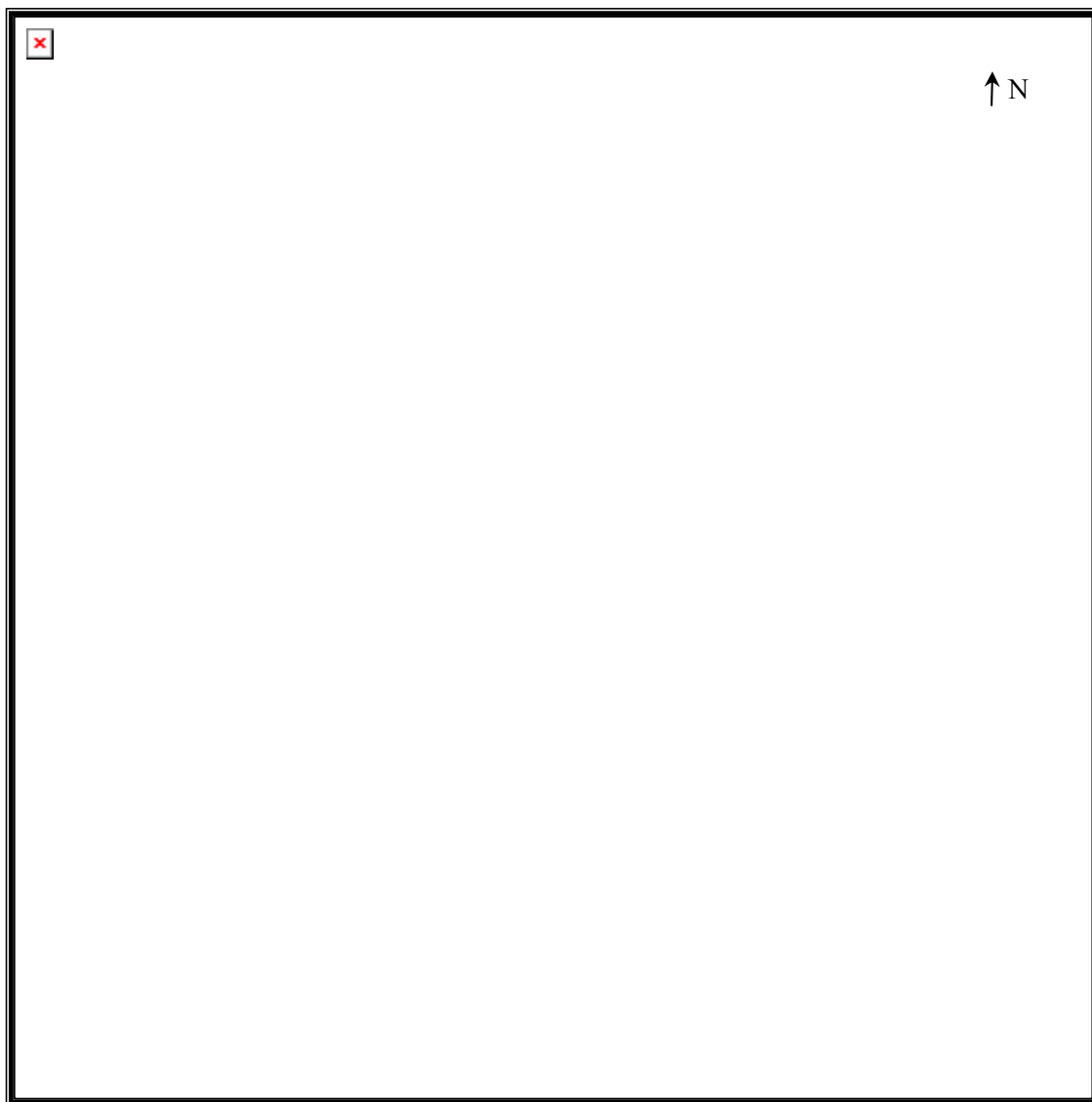
Γ3 (X: 19340 m., Y: 8095 m.)

Στην ίδια περιοχή είναι προτιμότερο να τοποθετηθούν και οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την αποκατάσταση της περιοχής από το πρόβλημα της υφαλμύρωσης. Η μονάδα εξάλλου του βιολογικού καθαρισμού, από την οποία θα προκύπτουν οι επεξεργασμένες ιλύς, βρίσκεται πλησίον της T1. Είναι πολύ πιθανόν οι αρχικές ερευνητικές γεωτρήσεις να χρησιμοποιηθούν τελικά ως γεωτρήσεις εμπλουτισμού, προκειμένου να μειωθεί το κόστος.

Θα ήταν φυσικά προτιμότερο να διεξαχθούν επιπλέον γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας εντός της περιοχής που πλέον οριοθετήθηκε ως προβληματική. Δυστυχώς όμως ο περιορισμένος χώρος στο τμήμα του Κεραμοποΐιου Μεταξά δεν επιτρέπει μεγάλους μήκους αναπτύγματα στα ηλεκτρόδια ρεύματος, προκειμένου να μελετηθεί η γεωλογική στρωμάτωση στα επιθυμητά βάθη. Παρόλα αυτά, προτείνεται επανάληψη των αρχικών ηλεκτρικών τομογραφιών αφού θα έχει ξεκινήσει ο εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφορέα, ώστε να επιβεβαιωθεί η επιτυχία της μεθόδου τεχνητού εμπλουτισμού για τον περιορισμό της υφαλμύρωσης.



**Σχήμα 4.16:** Απεικόνιση των τριών ερευνητικών γεωτρήσεων (G1, G2, G3) πάνω στην T1, οι οποίες στη συνέχεια πιθανόν να χρησιμοποιηθούν και ως γεωτρήσεις εμπλουτισμού. Η γεώτρηση G1 εντοπίζεται στο μέσο της γραμμής και οι G2, G3 απέχουν αντίστοιχα 40m. και 80 m. από το μέσο.



***Σχήμα 4.17:** Προσδιορισμός των τριών ερευνητικών γεωτρήσεων ( $\Gamma 1$ ,  $\Gamma 2$ ,  $\Gamma 3$ ) καθώς και της μονάδας βιολογικού καθαρισμού πάνω στον ευρύτερο τοπογραφικό χάρτη της περιοχής.*

# ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟ ΤΗΣ ΒΙΠΕ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ

### 5.1 Εισαγωγή

Ένα από τα βασικά αντικείμενα μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η σύνδεση μεταξύ γεωλογικών και υδρογεωλογικών παραμέτρων της περιοχής μελέτης. Όπως διαπιστώθηκε από την περιγραφή του προγράμματος «Argus One», πρωταρχικό στοιχείο για τη μοντελοποίηση μίας περιοχής είναι η εισαγωγή στο πρόγραμμα των κατάλληλων υδρογεωλογικών παραμέτρων. Το πρόβλημα είναι ότι τις περισσότερες φορές τα στοιχεία αυτά είτε είναι σημειακά και απαιτούν υψηλού κόστους διαδικασίες (pumping tests) είτε, στη συνήθη περίπτωση, δεν υπάρχουν καθόλου. Δεν είναι επομένως δυνατόν να μοντελοποιηθεί μία περιοχή όταν απουσιάζουν βασικές παράμετροι για το χώρο μελέτης.

Ήδη κατά την περιγραφή του προγράμματος «Argus One», διαπιστώθηκε ότι τα σημαντικότερα στοιχεία που απαιτούνται για το μοντέλο είναι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας των επιμέρους γεωλογικών σχηματισμών καθώς και οι αντίστοιχες τιμές του πορώδους. Οι εκάστοτε συνοριακές συνθήκες (BCFlow 1 ή 2) αποτελούν έναν ευέλικτο παράγοντα, η τιμή του οποίου μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τα πρώτα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο.

Το πρόβλημα συνεπώς που τίθεται είναι ο προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους με τη συμβολή των γεωφυσικών μεθόδων. Σε αρχικό στάδιο, η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας προσέφερε αρκετά στοιχεία σχετικά με τη γεωλογία, την ανάδειξη ρηγμάτων και υφάλμυρων ζωνών καθώς και την υπόδειξη

θέσεων για τις γεωτρήσεις. Σε δεύτερο στάδιο, πρέπει να εκτιμηθεί η υδραυλική αγωγιμότητα και το πορώδες, ώστε η μοντελοποίηση της ΒΙΠΕ Ηρακλείου να είναι πλέον εφικτή.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται πληθώρα άρθρων (Heigold et al. 1979, Mazac et al. 1987, Kelly et al. 1984, Niwas et al. 1984, Nunes et al. 1998, Louis et al. 1982), τα οποία εφαρμόζουν γεωφυσικές μεθόδους για το γεωλογικό χαρακτηρισμό μίας περιοχής και στη συνέχεια τεστ άντλησης για την εύρεση της υδραυλικής αγωγιμότητας των σχηματισμών. Στην περίπτωση όμως της ΒΙΠΕ, τα τεστ άντλησης προγραμματίζεται να πραγματοποιηθούν στο μέλλον. Στην πορεία της βιβλιογραφικής έρευνας διαπιστώθηκε ότι η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της ακόλουθης μαθηματικής σχέσης που συνδέει την παράμετρο αυτή και τη διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών (Huddert, 1940):

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} \quad (5.1)$$

όπου,

$K$  η υδραυλική αγωγιμότητα του σχηματισμού (m/sec),

$k$  η διαπερατότητα ( $m^2$ ),

$\gamma$  το ειδικό βάρος του ρευστού ( $N/m^2$ ),

$\mu$  το ιξώδες του ( $kg/m \cdot sec$ ).

Οι παράμετροι  $\gamma$  και  $\mu$  μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν από κατάλληλους πίνακες, ανάλογα με την εκάστοτε θερμοκρασία του ρευστού ( $^{\circ}C$ ). Αντίθετα, η τιμή της διαπερατότητας θα πρέπει να καθοριστεί με τη βοήθεια των γεωφυσικών πληροφοριών.

Στη βιβλιογραφία είναι γνωστός ο πρώτος νόμος του Archie (1942) ανάμεσα στο πορώδες  $\phi$  και τη διαπερατότητα  $k$ :  $k = a_2 \phi^{b_2}$  (5.2)

Οι σταθερές  $a_2$  και  $b_2$  είναι χαρακτηριστικές του εκάστοτε πετρώματος. Με τη βοήθεια επομένως της (5.2), η (5.1) τροποποιείται ως εξής:

$$K = a_2 \phi^{b_2} \frac{\gamma}{\mu} \quad (5.3)$$

Στην (5.3) το πορώδες  $\phi$  μπορεί να αντικατασταθεί από το συντελεστή σχηματισμού  $F$ . Ο Archie (1942) έπειτα από πειράματα σε δείγματα διαφορετικής λιθολογικής σύστασης και διαφορετικού πορώδους πρότεινε την ακόλουθη σχέση, η οποία συνδέει το πορώδες  $\phi$  με το συντελεστή σχηματισμού  $F$ :

$$F = a \frac{I}{\varphi^m} \Rightarrow \varphi = \sqrt[m]{\frac{a}{F}} \quad (5.4)$$

Η παράμετρος  $m$  ονομάζεται συντελεστής διαγένεσης ή τσιμέντωσης (cementation factor). Η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 1 (για ασύνδετα πετρώματα) και 3 (για συμπαγή πετρώματα). Αντίθετα, η τιμή του συντελεστή  $a$  εξαρτάται από τη γεωμετρία των πόρων (σκολιότητα – tortuosity factor).

Τέλος, για το συντελεστή σχηματισμού  $F$  ισχύει ο παρακάτω ορισμός:

$$F = \frac{R_0}{R_w} \quad (5.5)$$

Η τιμή του  $R_0$  αντιστοιχεί στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση σχηματισμού 100% κορεσμένου σε νερό ( $\Omega m$ ) και το  $R_w$  στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση του νερού του σχηματισμού ( $\Omega m$ ).

Ενδεικτική τιμή του  $R_0$  στην περίπτωση της ΒΠΠΕ Ηρακλείου για το μαργαϊκό ασβεστόλιθο είναι τα  $50 \Omega m$ , μία μέση δηλαδή τιμή που αντιστοιχεί στο σχηματισμό πλήρως κορεσμένο σε νερό (βλ. Σχήμα 4.9). Αντίστοιχα, το  $R_w$  ισούται με  $2,7 \Omega m$  στους  $17^\circ C$ . Η συγκεκριμένη τιμή προέκυψε έπειτα από μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα νερού της ΒΠΠΕ στους  $25^\circ C$ . Το εύρος των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 επιβεβαιώνει ότι όντως πρόκειται για υφάλμυρο νερό ( $1600-4800 \mu S/cm$  για υφαλμύρωση).

Όσον αφορά στη θερμοκρασία εδάφους ( $17^\circ C$ ), τα μετεωρολογικά στοιχεία της ΕΜΥ για το μήνα Μάρτιο οπότε και πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές μετρήσεις, αναφέρουν θερμοκρασία αέρα  $13,5^\circ C$ . Η μέση ετήσια θερμοκρασία του υπογείου νερού σε μικρά βάθη είναι κατά  $1-2^\circ C$  μεγαλύτερη από αυτή του αέρα ( $15,5^\circ C$ ). Σε αυτή την τιμή παρατηρείται αύξηση κατά μέσο όρο  $2,5^\circ C$  κάθε  $100m$  ( $\approx 17^\circ C$ )

Με τη βοήθεια των (5.4) και (5.5), η σχέση (5.3) τροποποιείται τελικά ως εξής:

$$K = a_2 \left( \sqrt[m]{\frac{a R_w}{R_0}} \right)^{b_2} \frac{\gamma}{\mu} \quad (5.6)$$

**Πίνακας 5.1.** Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης υφάλμυρου ύδατος από τη ΒΙΠΕ Ηρακλείου.

Γεωτρήσεις Μεταξά (ΑΚΕΚ)			
	Δείγμα 1	Δείγμα 2	Δείγμα 3
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (25 $^{\circ}\text{C}$ )	2610	2040	3480
Rw ( $\Omega\text{m}$ ) (25 $^{\circ}\text{C}$ )	3,83	4,9	2,88
Rw ( $\Omega\text{m}$ ) (17 $^{\circ}\text{C}$ )	2,60	3,3	1,95

Παρατηρείται συνεπώς ότι το αρχικό πρόβλημα εύρεσης μίας μαθηματικής σχέσης ανάμεσα στην υδραυλική αγωγιμότητα και στην ηλεκτρική αγωγιμότητα ανάγεται πλέον σε πρόβλημα εύρεσης των παραμέτρων  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $\alpha$  και  $m$ . Ανάλογη λύση σε πρόβλημα εύρεσης της υδραυλικής αγωγιμότητας σε γρανιτικά πετρώματα προτάθηκε από τους Heigold et al. 1979. Στην περίπτωση αυτή, οι αντίστοιχες σταθερές προσδιορίστηκαν από δειγματοληπτικές μετρήσεις και στη συνέχεια η υδραυλική αγωγιμότητα επιβεβαιώθηκε από τεστ άντλησης.

Σύμφωνα με την αντίστοιχη βιβλιογραφία η τιμή του  $\alpha$  είναι μεγαλύτερη ή ίση με τη μονάδα για ασβεστόλιθους ή γενικά για πετρώματα που χαρακτηρίζονται από ρήγματα (Salem et al. 2001, Katsube et al. 1987). Στην παρούσα εργασία το  $\alpha$  θεωρείται ίσο με τη μονάδα. Κατά ανάλογο τρόπο οι Kwader et al. 1985 αναφέρουν ότι ο συντελεστής διαγένεσης  $m$  κυμαίνεται από 1,6-1,8 για ασβεστόλιθους (clean limestones) και από 1,8-2 για δολομιτικούς ασβεστόλιθους (dolomitic limestones).

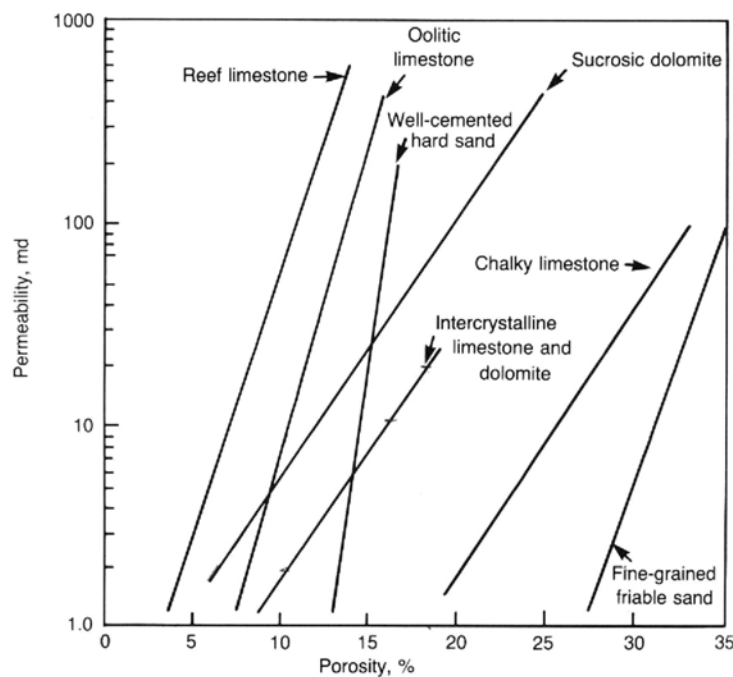
**Πίνακας 5.2.** Τυπικές τιμές συντελεστή διαγένεσης  $m$  για ορισμένους τύπους πετρωμάτων (Kwader et al. 1985).

Είδος Σχηματισμού	Συντελεστής Διαγένεσης $m$
Ελαφρά συμπιεσμένες άμμοι	1,4 - 1,5
Καθαροί Ασβεστόλιθοι	1,6 - 1,8
Δολομιτικοί Ασβεστόλιθοι	1,8 - 2,0
Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι	2,2 - 2,4

Για την εκτίμηση των παραμέτρων  $a_2$  και  $b_2$  υπολογίζεται ο λογάριθμος της εξίσωσης (5.2):  $\log k = \log a_2 + b_2 \log \varphi$ . Η σχέση αυτή είναι εξίσωση της μορφής  $y = \alpha x + \beta$ , όπου ο συντελεστής  $\alpha$  ισούται με το  $b_2$  και ο συντελεστής  $\beta$  αντίστοιχα με  $\log a_2$ .

( $\alpha = b_2$  και  $\beta = \log a_2$ ) όταν  $y = \log k$  και  $x = \log \phi$ . Εάν επομένως η παραπάνω σχέση παρασταθεί γραφικά, τότε παριστάνεται από ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση και η τομή με τον  $y$ -άξονα αντιστοιχούν στα  $b_2$  και  $\log a_2$ .

Από βιβλιογραφία (Dewan J. 1983), έχουν βρεθεί πειραματικά μία σειρά από ημιλογαριθμικές ευθείες για διαφορετικούς σχηματισμούς και για διάφορες τιμές πορώδους και διαπερατότητας (Σχήμα 5.1). Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. § 4.3), η ΒΙΠΕ Ηρακλείου χαρακτηρίζεται γεωλογικά από μαργαϊκό ασβεστόλιθο και από ασβεστόλιθο της ζώνης της Τρίπολης. Με επιλογή επομένως των ευθειών «chalky limestone» (μαργαϊκός) και «intercrystalline limestone and dolomite» (Τρίπολη) καθώς και μία σειράς σημείων πάνω στις ευθείες αυτές, προκύπτουν δύο γραφικές παραστάσεις με  $y = \log k$  και  $x = \log \phi$  και προσδιορίζονται τελικά οι τιμές για τις ζητούμενες σταθερές  $a_2$  και  $b_2$ .



**Σχήμα 5.1:** Πειραματικές καμπύλες πορώδους – διαπερατότητας, που προέκυψαν έπειτα από εργαστηριακές δοκιμές για διάφορους τύπους πετρωμάτων. Οι ευθείες «chalky limestone» και «intercrystalline limestone and dolomite» χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των σταθερών  $a_2$  και  $b_2$  (Dewan 1983).

Οι ευθείες που προκύπτουν τελικά για τους δύο τύπους πετρωμάτων είναι:

- Μαργαϊκός ασβεστόλιθος:  $y = 7,8356x - 10,319$
- Ασβεστόλιθος Τριπόλεως:  $y = 3,5618x - 11,197$



Σύμφωνα λοιπόν με όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει ο Πίνακας 5.3 για τις ζητούμενες σταθερές και τελικά για τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας των δύο γεωλογικών σχηματισμών.

**Πίνακας 5.3.** Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για τους σχηματισμούς της ΒΙΠΕ Ηρακλείου, σύμφωνα με το Σχήμα 5.1 και τη σχέση 5.6.

	Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος	Ασβεστόλιθος Τριπόλεως
m	1,8	2,0
a <sub>2</sub>	4,8*10 <sup>-11</sup>	6,35*10 <sup>-12</sup>
b <sub>2</sub>	7,8356	3,5618
R <sub>w</sub> (Ωm)	2,7	2,7
R <sub>0</sub> (Ωm)	50	80
γ (N/m <sup>3</sup> )	9794,4	9794,4
μ (kg/m*sec)	0,001083	0,001083
K (m/sec)	<b>1,32*10<sup>-9</sup></b>	<b>1,37*10<sup>-7</sup></b>

Δεδομένου των υψηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων που παρουσιάζει ο ασβεστόλιθος Τρίπολης (>800Ωm), επιλέγεται η τιμή του  $R_0 = 80\Omega m$  στην περίπτωση που ο έντονα καρστικοποιημένος σχηματισμός είναι κορεσμένος σε νερό. Οι παραπάνω τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι αντιπροσωπευτικές για τους σχηματισμούς που αντιστοιχούν σε υγιής ασβεστολίθους και δε λαμβάνουν υπόψη ρηγματώσεις. Εντούτοις, μία προσεκτικότερη εξέταση του γεωλογικού χάρτη της περιοχής πιστοποιεί ότι η ΒΙΠΕ Ηρακλείου βρίσκεται όντως εντός ρηγματωμένου ασβεστόλιθου (βλ. § 4.3).

Προηγούμενα τεστ άντλησης που πραγματοποιήθηκαν στον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο του Ηρακλείου (Κλειδοπούλου, 2003), παρείχαν τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας της τάξης των 10<sup>-4</sup> m/sec για τον ασβεστόλιθο της Τρίπολης. Η τιμή αυτή είναι τρεις τάξεις μεγαλύτερη από την τιμή που προσδιορίστηκε με βάση τον Πίνακα 5.3. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό, καθώς τα ρήγματα επιτρέπουν τη διόδο μεγαλύτερης ποσότητας νερού μέσα στους σχηματισμούς με αποτέλεσμα να αυξάνουν και την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας.

## 5.2 Εκτίμηση της διαπερατότητας από ιδιότητες του υλικού του σχηματισμού

Ενώ αρχικά βρέθηκε μία μαθηματική συσχέτιση ανάμεσα στην υδραυλική αγωγιμότητα και στη διαπερατότητα των σχηματισμών, τελικά αποδείχτηκε ότι οι τιμές που προσδιορίστηκαν, αν και λογικές, δεν είναι αντιπροσωπευτικές για τα ρηγματωμένα πετρώματα. Το πρόβλημα επομένως στην περίπτωση αυτή είναι οι αρχικές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες ισχύουν μονάχα για υγιή πετρώματα και όχι για καρστικοποιημένους σχηματισμούς.

Η μοντελοποίηση μίας καρστικοποιημένης περιοχής αποτελεί ένα πολύπλοκο εγχείρημα, το οποίο ακόμη μελετάται. Στη βιβλιογραφία (Aguilera 1998, Byrnes et al. 2004) υπάρχουν συγκεκριμένα άρθρα που ασχολούνται με το πρόβλημα, τα οποία κατά κύριο λόγο σχετίζονται με την έρευνα του πετρελαίου. Ο τομέας αυτός ασχολείται ευρύτατα με το θέμα, καθώς οι ρηγματωμένοι ασβεστόλιθοι είναι συχνά ταμιευτήρες στο πετρέλαιο. Ιδιαίτερα, ο καθορισμός των παραμέτρων  $m$ ,  $a_2$  και  $b_2$  είναι ουσιώδους σημασίας, αφού μία λανθασμένη εκτίμηση των σταθερών οδηγεί σε εσφαλμένα συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό κορεσμού του πετρώματος σε νερό και πετρέλαιο.

Αν και η τελική μαθηματική σχέση (5.6) για τον καθορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας ισχύει, το ερώτημα που τίθεται πλέον είναι ποια εξίσωση χαρακτηρίζει τη σχέση ανάμεσα στη διαπερατότητα και στο πορώδες. Φυσικά, η εκθετική σχέση (5.2) δεν ισχύει πια. Ταυτόχρονα όμως, θα πρέπει να βρεθεί και η κατάλληλη τιμή του συντελεστή διαγένεσης  $m$ , η οποία θα ισχύει για ρηγματωμένους σχηματισμούς.

Τα πιο πολλά άρθρα στη βιβλιογραφία αναφέρουν κάποιες μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες συνδέουν τη διαπερατότητα με χαρακτηριστικά του υλικού του σχηματισμού, όπως για παράδειγμα τη διάμετρο του κόκκου, την ειδική του επιφάνεια ή τη γεωμετρία των πόρων. Η πιο γνωστή σχέση είναι των Kozeny – Carman:

$$- \quad k(cm^2) = \frac{\varphi}{K_{\infty} S_s^2} \quad (5.7)$$

όπου,

$K_{\infty} = \tau S_{hf}$  με  $\tau$  τη σκολιότητα (tortuosity),

$S_{hf}$  ο συντελεστής σχήματος των πόρων (shape factor),

$S_s = \frac{6(1 - \varphi)}{D}$  με  $D$  τη διάμετρο του κόκκου.

$$- \quad k(cm^2) = \frac{\varphi^3}{5(1-\varphi)^2 S^2} : \text{Τροποποιημένη εξίσωση Kozeny-Carman} \quad (5.8)$$

όπου,

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m 4\pi r_i^2 N_i}{\sum_{i=1}^m \frac{4}{3}\pi r_i^3 N_i} = 3 \sum_{i=1}^m \frac{V_i}{r_i} \quad \text{η ειδική επιφάνεια του κόκκου.}$$

$$- \quad k(mD) = \frac{D^2 \varphi}{32 \left(\frac{L_e}{L}\right)^2} : \text{Sigurosson et al. 2000} \quad (5.9)$$

όπου,

$D$  η διάμετρος του λαιμού του πόρου (pore throat),

$\varphi$  το πορώδες,


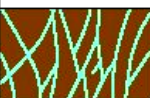













$\frac{L_e}{L}$  το πηλίκιο που περιγράφει τη σκολιότητα.

Παρόλα αυτά, στην περίπτωση της ΒΠΠΕ Ηρακλείου δεν έχουν πραγματοποιηθεί ακόμη δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, έτσι ώστε να υλοποιηθούν οι κατάλληλες δοκιμές και να υπολογιστεί το μέγεθος των κόκκων του υλικού ή η ειδική τους επιφάνεια. Στην περίπτωση δε των ρηγματωμένων σχηματισμών, το πλάτος και η απόσταση μεταξύ των ρωγμών αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα, ο καθορισμός του οποίου θα συνέβαλλε στον προσδιορισμό της διαπερατότητας του σχηματισμού. Στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ειδική κάμερα μέσα στις γεωτρήσεις, προκειμένου να χαρτογραφηθούν οι ρωγμές του πετρώματος (and sonic shear imaging logs).

Εφόσον όμως το παρόν πρόγραμμα σχετικά με την προστασία του υπόγειου υδροφορέα από τη ζώνη υφαλμύρωσης βρίσκεται σε προκαταρκτικό στάδιο, προέχει μία καταρχήν εκτίμηση της διαπερατότητας και κατ' επέκταση της υδραυλικής αγωγιμότητας των γεωλογικών σχηματισμών. Στη συνέχεια, οι ζητούμενες παράμετροι θα εκτιμηθούν ακριβέστερα με τη χρήση διαγραφιών, δειγματοληπτικών μετρήσεων και τελικά τεστ-άντλησης.

### 5.3 Δευτερογενές Πορώδες

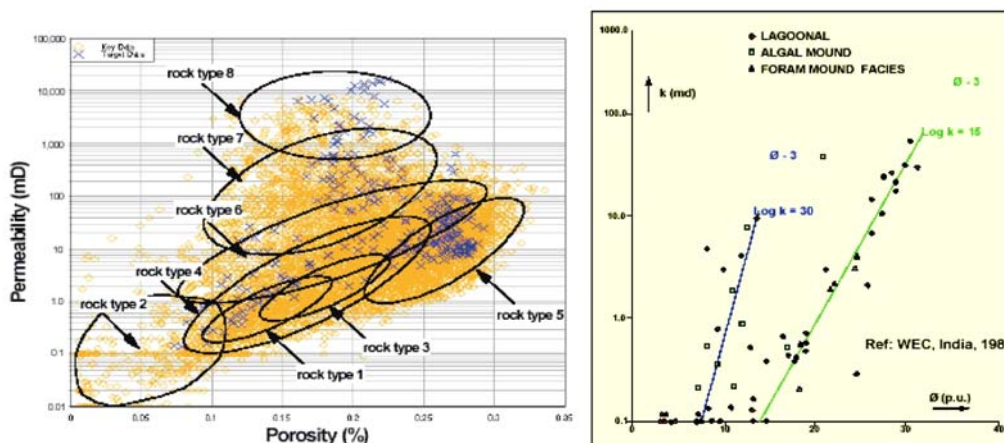
Τα ανθρακικά πετρώματα χαρακτηρίζονται από διαφορετικά είδη πορώδους και παρουσιάζουν διάφορες κατανομές στο μέγεθος των πόρων τους με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεγάλες διακυμάνσεις στην τιμή της διαπερατότητας ακόμη και για το ίδιο συνολικό πορώδες. Ένας από τους πιο συνηθισμένους όρους για την περιγραφή του πορώδους σε ασβεστολιθικό σχηματισμό είναι ο όρος «κενός πόρος» (vug). Ως κενός πόρος χαρακτηρίζεται εκείνος που είναι ορατός με γυμνό μάτι (διάμετρο  $>1/16\text{mm}$ ). Τα κενά και τα κανάλια (channels) είναι συνήθεις μορφές διάκενων που παρατηρούνται στους ασβεστόλιθους. Εντούτοις, διαφέρουν στο σχήμα καθώς ο όρος «κενός πόρος - vug» αποδίδεται κυρίως σε ισομεγέθεις πόρους, ενώ ο όρος «κανάλια – channels» σε πόρους που είναι αρκετά επιμηκυμένοι στη μία ή και στις δύο διαστάσεις. Οι ρωγμές όταν συνυπάρχουν με τα κενά παρέχουν αυξημένες τιμές πορώδους και διαπερατότητας. Συνήθως, δημιουργούνται όταν όξινο νερό διεισδύει εντός των ρωγμών με αποτέλεσμα τη δημιουργία καρστ και κατ' επέκταση παραγωγικών ταμιευτήρων.

Fabric-selective		Not fabric-selective		Fabric-selective or not	
	Interparticle		Fracture		Breccia
	Intraparticle				
	Intercrystal		Channel		Boring
	Moldic		Vug		Burrow
	Fenestral				
	Shelter		Cavern*		Shrinkage
	Growth-framework	*Cavern applies to man-sized or larger pores of channel or vug shapes			

**Σχήμα 5.2.** Ταξινόμηση βασικών τύπων του πορώδους σε ασβεστόλιθους (Choquette and Pray, 1970).

Το υπόγειο νερό που βρίσκεται ανάμεσα στους κόκκους του υλικού καταλαμβάνει το πρωτογενές πορώδες (primary porosity) του γεωλογικού σχηματισμού. Αντίθετα, το νερό μέσα σε ρωγμές σχετίζεται με το δευτερογενές πορώδες. Το δευτερογενές πορώδες προκαλείται κυρίως από τα κενά (vugs), καθώς οι ρωγμές συμβάλλουν μονάχα στο 1–2% του συνολικού πορώδους του σχηματισμού (Aguilera, 1998).

Προκειμένου να διερευνηθεί η ετερογένεια των ασβεστολιθικών σχηματισμών, απαιτείται συνδυασμένη εφαρμογή διαγραφιών, καθώς κάθε μία από αυτές ανταποκρίνεται διαφορετικά στις συνθήκες, ανάλογα με το είδος του πορώδους που μελετάται. Συνήθως για τον καθορισμό του πρωτογενούς πορώδους χρησιμοποιούνται ακουστικές διαγραφίες. Το δευτερογενές πορώδες προσδιορίζεται στη συνέχεια από τη διαφορά του πορώδους από τις ακουστικές διαγραφίες και του πορώδους που υπολογίζεται από τις διαγραφίες νετρονίου ή πυκνότητας.



**Σχήμα 5.3:** Διακυμάνσεις που παρατηρούνται στις τιμές του πορώδους και της διαπερατότητας για διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς (Al-Hanaï et al. 1999).

Οι μηχανικοί ταμειωτήρων χρησιμοποιούν τον όρο «δευτερογενής διαπερατότητα» (secondary permeability) με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και το δευτερογενές πορώδες. Η πρωτογενής διαπερατότητα αναφέρεται στη διαπερατότητα του βράχου, ενώ η δευτερογενής ορίζεται ως το τμήμα εκείνο της συνολικής διαπερατότητας που οφείλεται στις ρωγμές. Η παρουσία ανοικτών (open) και μη-συνεκτικών ρωγμών αυξάνει σημαντικά την τιμή της δευτερογενούς διαπερατότητας και κατ' επέκταση της συνολικής διαπερατότητας. Ιδιαίτερα, αυτού του είδους οι ρωγμές αυξάνουν τη διαπερατότητα σε διεύθυνση παράλληλη με αυτή κατά την οποία αναπτύσσονται. Αντίθετα, σε διεύθυνση κάθετη παρουσιάζουν απειροελάχιστη επίδραση. Στη

βιβλιογραφία (Aguilera, 1998) αναφέρονται και άλλες περιπτώσεις ρωγμών, εν μέρει ή ολοκληρωτικά πληρωμένα με ορυκτά, τα οποία επιδρούν θετικά ή αρνητικά στη διαπερατότητα του σχηματισμού. Ο Aguilera (1998) προτείνει την ακόλουθη σχέση για τον καθορισμό της δευτερογενούς διαπερατότητας:

$$k_f(D) = 54 * 10^6 w_0^2 \quad (5.10)$$

όπου,  $w_0$  είναι το πλάτος της ρωγμής (inches). Σε περίπτωση ύπαρξης αρκετών παράλληλων ρωγμών, η παραπάνω σχέση διαμορφώνεται ως εξής:

$$k(D) = \frac{k_f w_0}{D} \quad (5.11)$$

όπου,  $D$  είναι η απόσταση μεταξύ των ρωγμών.

#### 5.4 Προσδιορισμός συντελεστή διαγένεσης $m$ σε καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους

Ο συντελεστής διαγένεσης  $m$  ποικίλει σημαντικά στους σχηματισμούς γεγονός που επηρεάζει την υδραυλική αγωγιμότητα. Στην περίπτωση επομένως που υπάρχουν ρωγμές, κενά και κανάλια σε ασβεστολιθικό πέτρωμα, η τιμή του  $m$  μεταβάλλεται σημαντικά. Οι Al-Hanai et al. 1999 και Aguilera 1998 υποστηρίζουν ότι οι κενοί πόροι σε ένα ασβεστολιθικό πέτρωμα οδηγούν σε μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή διαγένεσης από ότι θα είχε σε συνήθεις συνθήκες. Αντίθετα, η ύπαρξη ρωγμών ελαττώνει τη τιμή του  $m$ .

**Πίνακας 5.3.** Τιμές συντελεστή διαγένεσης, ανάλογα με τον τύπο των πόρων σε έναν ασβεστολιθικό σχηματισμό (Choquette et al. 1970, Al-Hanai et al. 1999, Aguilera et al. 1998).

Είδος πόρου	Συντελεστής Διαγένεσης
Κρυσταλλικός	2,0
Ρωγμές	1,4
Κενά	2,3
Συνδεδεμένα κενά	> 3

Ο Πίνακας 5.3 παρέχει τυπικές τιμές του  $m$  για διαφορετικά είδη πόρων. Ο συντελεστής διαγένεσης προέκυψε κατόπιν εργαστηριακών μετρήσεων και φυσικά μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσοστό ρωγμών, κενών και άλλων κυρίαρχων πόρων που συμμετέχουν στο πέτρωμα.

Στην περίπτωση της ΒΠΠΕ Ηρακλείου δεν έχουν χαρτογραφηθεί οι ρωγμές και τα κενά στους ασβεστόλιθους. Μία ανάλογη διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα και δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Εφόσον όμως οι ρωγμές αποτελούν μονάχα το 1-2% του συνολικού πορώδους, συμπεραίνεται ότι το κύριο ποσοστό του δευτερογενούς πορώδους θα οφείλεται στα κενά. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο η τιμή  $m = 2,3$  επιλέχθηκε τελικά για την τελική σχέση (5.6) σχετικά με τον προσδιορισμό τη υδραυλικής αγωγιμότητας.

Σύμφωνα με τις τιμές των  $m$ ,  $R_w = 2,7\Omega m$  και  $R_0 = 50\Omega m$  μπορεί να προσδιοριστεί το πορώδες  $\phi$  για το μαργαϊκό ασβεστόλιθο από τη σχέση  $\phi = m\sqrt{\frac{a}{F}}$ . Προκύπτει επομένως  $\phi = 0,3$  (30%). Η ίδια λογική ισχύει για τον προσδιορισμό του πορώδους στον ασβεστόλιθο Τρίπολης με  $R_0 = 80\Omega m$ . Προκύπτει τελικά,  $\phi = 0,23$  (23%).

Όσον αφορά στις σταθερές  $a_2$  και  $b_2$ , οι Bernabe et al. 2003 προτείνουν κάποιες μαθηματικές σχέσεις ανάμεσα στη διαπερατότητα και στο πορώδες για διάφορες συνθήκες σχηματισμού πετρωμάτων (πλαστική συμπίεση για υλικά εδάφους, ελαστική παραμόρφωση κοκκωδών σχηματισμών, επίδραση θερμοκρασίας σε συμπαγή πετρώματα, χημικές διαδικασίες σε συνάρτηση με τη διαγένεση ιζηματογενών πετρωμάτων). Βασιζόμενοι στη συγκεκριμένη προσέγγιση, η αρχική μαθηματική σχέση

$$k = a_2 \phi^{b_2} \text{ τροποποιείται στην ακόλουθη μορφή: } k \approx \phi^{b_2} \quad (5.12)$$

όπου, ο συντελεστής  $b_2$  είναι ένας ακέραιος αριθμός με τιμές στην περιοχή του 20 στην περίπτωση της διαλυτοποίησης των ασβεστολίθων, ενώ το  $a_2$  ισούται με τη μονάδα, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.4.

**Πίνακας 5.4.** Τιμές αδιάστατων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας.

	Μαργαϊκός	Τρίπολης
m	2,3	2,3
a <sub>2</sub>	1	1
b <sub>2</sub>	22	17

Γνωρίζοντας εκ των προτέρων την υδραυλική αγωγιμότητα που αναμένεται στον ασβεστόλιθο Τρίπολης (Κλειδοπούλου, 2003), πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές δοκιμές στη σχέση (5.6), προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι τιμές των συντελεστών. Τελικά, προέκυψε ο ακόλουθος Πίνακας για το μαργαϊκό ασβεστόλιθο και τον ασβεστόλιθο Τρίπολης στη ΒΙΠΕ Ηρακλείου:

**Πίνακας 5.5.** Τελικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για το μαργαϊκό ασβεστόλιθο και ασβεστόλιθο Τρίπολης της ΒΙΠΕ.

	Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος	Ασβεστόλιθος Τρίπολης
m	2,3	2,3
a <sub>2</sub>	1	1
b <sub>2</sub>	22	17
γ (N/m <sup>3</sup> )	9794,4	9794,4
μ (kg/m*sec)	0,001083	0,001083
R <sub>w</sub> (Ωm)	2,7	2,7
R <sub>01</sub> (Ωm)	40	80
R <sub>02</sub> (Ωm)	30	80
K <sub>1</sub> (m/sec)	8,98*10 <sup>-4</sup> (77,6m/day)	1,2*10 <sup>-4</sup> (10,5 m/day)
K <sub>2</sub> (m/sec)	5,73*10 <sup>-5</sup> (4,95 m/day)	1,2*10 <sup>-4</sup> (10,5 m/day)

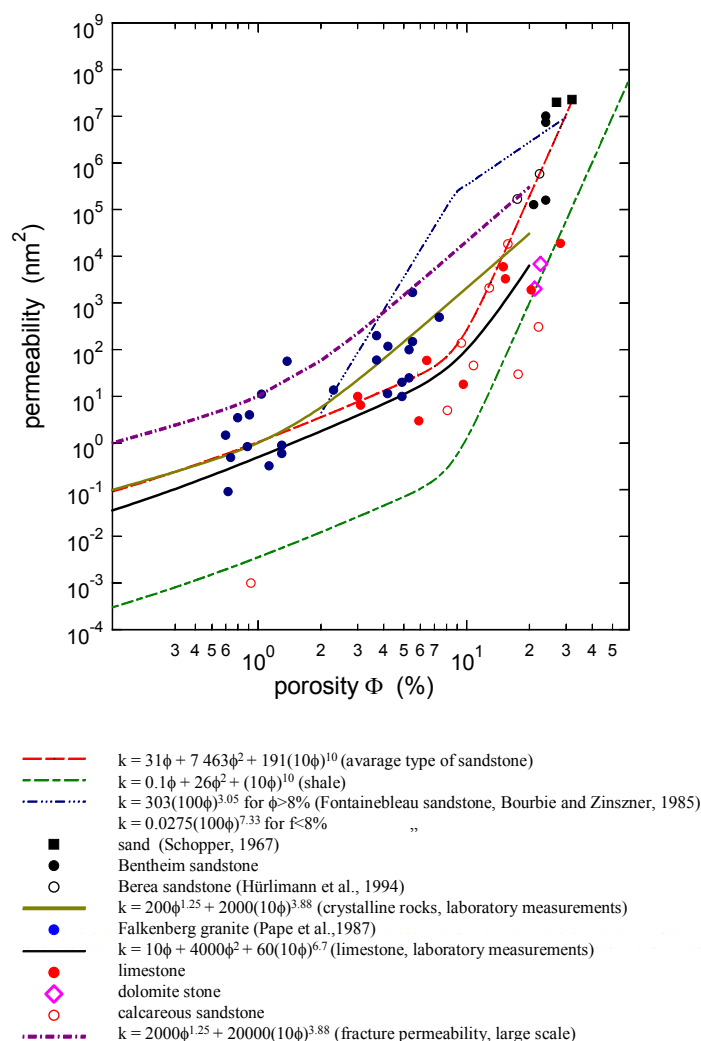
Σχετικά με την εγκυρότητα των τιμών για τη σταθερά  $b_2$  (22 και 17 αντίστοιχα), αναφέρεται ότι πρόσφατη επικοινωνία με το συγγραφέα του άρθρου ‘Permeability – porosity relationships in rocks subjected to various evolution processes’, Bernabe Y. (2003) δικαιολόγησε απόλυτα τη χρήση μεγάλων τιμών στα ασβεστολιθικά πετρώματα. Το εύρος των τιμών αυτών, εφόσον δεν υπάρχει τρόπος προσδιορισμού τους πειραματικά, προτάθηκε να γίνει με διαδοχικές δοκιμές προκειμένου να



πραγματοποιηθεί σύγκλιση μεταξύ των θεωρητικών προσεγγίσεων και των πραγματικών τιμών από παρακείμενα τεστ άντλησης.

Η πρώτη γεωηλεκτρική τομή (βλ. § 4.5.1), στην οποία παρατηρήθηκε το υφάλμυρο νερό εντός του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, παρέχει τη δυνατότητα διαίρεσης της υπό μελέτης περιοχής σε δύο τμήματα, ανάλογα με την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών που παρατηρήθηκε στις μετρήσεις. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν τυπικές τιμές των αντιστάσεων στα  $R_{01} = 30\Omega m$ . (100m.) για τα βαθύτερα τμήματα όπου παρατηρείται έντονη υφαλμύρωση και στα  $R_{02} = 40\Omega m$ . (78m.) για τα πιο ρηχά τμήματα όπου το φαινόμενο παρουσιάζεται με μειωμένη ένταση. Με τον τρόπο αυτό, παρέχεται στο πρόγραμμα «Argus One» η δυνατότητα για καλύτερη διακύμανση στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας εντός του μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Στην περίπτωση του ασβεστόλιθου Τρίπολης δεν είναι δυνατή μία ανάλογη διαδικασία, καθώς οι γεωηλεκτρικές τομές που πραγματοποιήθηκαν εντοπίζονται κατά κύριο λόγο εντός του μαργαϊκού και σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις βρίσκονται στα όρια με τη ζώνη της Τρίπολης (βλ. T2 § 4.5.1).

Προκειμένου να επαληθευτούν οι τιμές του Πίνακα 5.5 για την υδραυλική αγωγιμότητα στον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο, πραγματοποιήθηκε επιπλέον έρευνα ώστε να διαπιστωθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Οι Pape et al. 2000 αναφέρουν σε άρθρο τους πληθώρα μαθηματικών σχέσεων ανάμεσα στη διαπερατότητα και στο πορώδες για διάφορους τύπους πετρωμάτων. Οι σχέσεις αυτές προέκυψαν έπειτα από αρκετά πειράματα, τόσο σε εργαστηριακή όσο και σε μεγαλύτερη κλίμακα. Το Σχήμα 5.4 παρουσιάζει χαρακτηριστικές καμπύλες για διάφορους σχηματισμούς, όπως για ασβεστόλιθους και ρηγματωμένους ασβεστόλιθους.



**Σχήμα 5.4:** Χαρακτηριστικές καμπύλες πορώδους – διαπερατότητας για διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς (Pape et al. 2000).

**Πίνακας 5.6.** Υδραυλική αγωγιμότητα, όπως προέκυψε από δοκιμές σε ασβεστόλιθικά πετρώματα (Pape et al. 2000).

	Ασβεστόλιθος (εργαστηριακές δοκιμές)	Ρηγματωμένος Ασβεστόλιθος (δοκιμές μεγαλύτερης κλίμακας)
$K = k * \gamma/\mu$ (m/sec)	$8,56*10^{-7}$	$1,3*10^{-5}$

Εάν αντικατασταθεί η τιμή του πορώδους  $\phi = 0,23$  που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της ΒΠΠΕ στις σχέσεις του Σχήματος 5.4 για τους ασβεστόλιθους Τρίπολης, τότε προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα τα οποία μπορούν να συσχετιστούν καλά με τις τιμές των Πινάκων 5.3 και 5.5, γεγονός που ισχυροποιεί τις αρχικές παραδοχές σχετικά με την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας.

### ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΖΩΝΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

#### 6.1 Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης σε υπόγειους υδροφορείς

Η πηγή της υφαλμύρωσης ενός υπόγειου υδροφορέα μπορεί να είναι φυσική, όπως το θαλασσινό νερό και η άλμη που βρίσκεται σε κατώτερα γεωλογικά στρώματα ή ανθρωπογενής, όπως το αλάτι που χρησιμοποιείται για την τήξη του πάγου στους δρόμους. Η υφαλμύρωση παρατηρείται πιο συχνά σε παραθαλάσσιες περιοχές μέσα στους υδροφορείς. Όταν σε ένα υδροφορέα εισχωρήσει αλμυρό νερό, τμήμα του αλατιού προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών δυσχεραίνοντας τη διαδικασία αναστροφής και την αποκατάσταση του υδροφορέα. Επιπλέον, η αργή κίνηση του νερού αυξάνει το χρόνο αποκατάστασης. Η αλατότητα στο νερό είναι επικίνδυνη για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων, και καταστρέφει τις καλλιέργειες. Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία “Περί ποιότητας του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης” (ΦΕΚ 892, 11-7-2001) σε συμμόρφωση προς την Οδηγία 98/83/EK του Συμβουλίου της Ε.Ε, η επιτρεπόμενη ποσότητα των χλωριόντων στο πόσιμο νερό είναι 250ppm.

Σχετικά με το μηχανισμό της υφαλμύρωσης, το θαλασσινό νερό λόγω της βαρύτητάς του παρουσιάζει την τάση να κινείται κάτω από το στρώμα του γλυκού νερού. Το γλυκό όμως νερό εμφανίζει μία υδραυλική κλίση που μειώνεται προς την ακτή, με αποτέλεσμα να ρέει προς τη θάλασσα. Αυτή η ορμή του γλυκού νερού εξισορροπεί την κατάσταση αντιστεκόμενη στην κίνηση του θαλασσινού νερού εξαιτίας της πυκνότητας. Χωρίς αυτή τη δύναμη, το θαλασσινό νερό θα συνέχιζε την πορεία του προς το εσωτερικό μέχρι να καταλάβει ολόκληρο τον υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Επειδή όμως αυτή η υδραυλική κλίση υπάρχει πάντα λόγω του εμπλουτισμού από την βροχόπτωση, επιτυγχάνεται μία θέση

ισορροπίας στην ενδοχώρα, όπως παρουσιάζεται στο προφίλ του Σχήματος 6.1. Η άκρη (toe) εμφανίζει το μέγιστο σημείο διείσδυσης. Μία απλή θεωρία που επιτρέπει μία προσέγγιση της διεπιφάνειας παρέχεται από τη σχέση Ghyben-Herzberg:

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \approx 40h_f \quad (6.1)$$

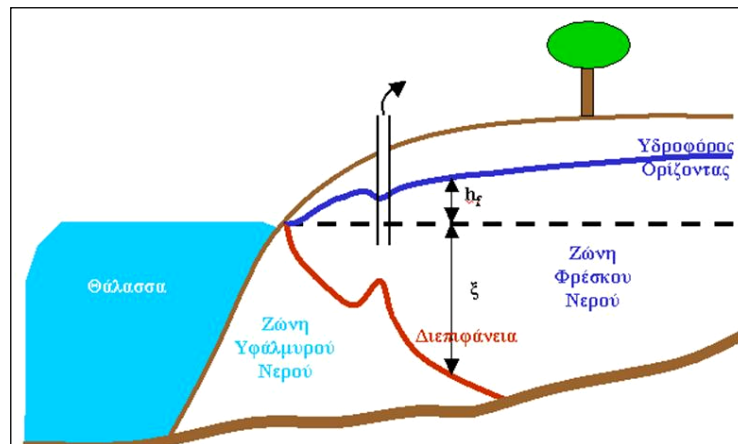
όπου,

$\xi$  η θέση της διεπιφάνειας κάτω από τη στάθμη της θάλασσας (m),

$h_f$  το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας (m),

$\rho_f$  η πυκνότητα του γλυκού νερού (1gr/cm<sup>3</sup>),

$\rho_s$  η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (1,025gr/cm<sup>3</sup>).



**Σχήμα 6.1:** Υφαλμύρωση σε έναν ελεύθερο υδροφορέα ([www.pangea.stanford.edu](http://www.pangea.stanford.edu)).

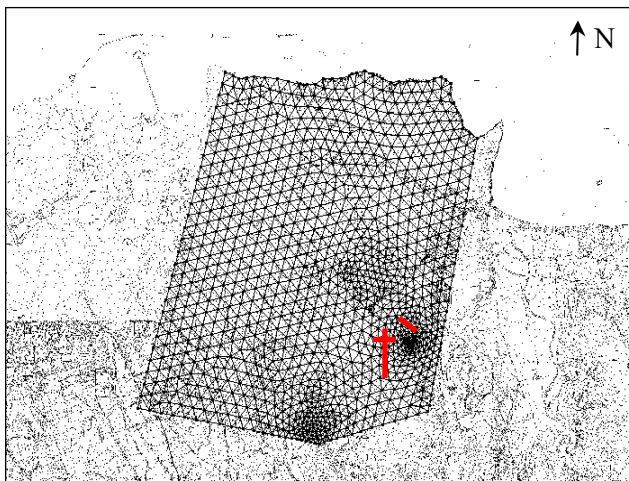
Από τη σχέση (6.1) προκύπτει ότι για κάθε μέτρο (m.) υδραυλικού ύψους του γλυκού νερού πάνω από τη θάλασσα, η διεπιφάνεια ωθείται 40m. προς τα κάτω. Όταν η διεπιφάνεια αγγίζει τον πυθμένα εντοπίζεται η άκρη. Ο λόγος αυτός θα ήταν καθησυχαστικός, αλλά σε παραθαλάσσιες περιοχές με αυξημένη άντληση το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα μειώνεται σημαντικά με αποτέλεσμα το θαλασσινό νερό να εισχωρεί βαθιά μέσα στον υδροφορέα.

## 6.2 Χαρακτηριστικά ροής του υπό μελέτη υδροφορέα

Η εύρεση των παραμέτρων της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους που προσδιορίστηκαν στο Κεφάλαιο 5 επέτρεψαν τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου

μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων – πεπερασμένων διαφορών σχετικά με την υπόγεια ροή του υφάλμυρου ύδατος. Η προσομοίωση της ΒΙΠΕ Ηρακλείου υλοποιήθηκε με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος «Argus One» και του αλγορίθμου λύσης «Princeton Transport Code» (PTC) (Babu et al. 1997). Όπως προαναφέρθηκε, το συγκεκριμένο πρόγραμμα συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του GIS δημιουργώντας πολύπλοκους ψηφιοποιημένους υδρογεωλογικούς χάρτες για τη ροή των υδάτων στο υπέδαφος.

Ο χώρος μελέτης στη ΒΙΠΕ Ηρακλείου χαρακτηρίζεται γεωλογικά από μαργαϊκό ασβεστόλιθο και ασβεστόλιθο της ζώνης της Τρίπολης με έντονη την παρουσία αλλουβιακών αποθέσεων προς τη δύση και την ανατολή καθώς και την παρουσία ρηγμάτων, όπως παρουσιάζεται στο γεωλογικό χάρτη της περιοχής (βλ. Σχήμα 4.3). Για τη μοντελοποίηση της ΒΙΠΕ οριοθετήθηκε ένας χώρος αρκετά μεγαλύτερος από το χώρο όπου πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική διασκόπηση, καθώς σκοπός της προσομοίωσης είναι η υδρογεωλογική μελέτη μίας ευρύτερης περιοχής (Σχήμα 6.2). Το μοντέλο προσομοίωσης περιλαμβάνει το χώρο ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου, δηλαδή τη βιομηχανική ζώνη και τις συνοικίες Ν. Αλικαρνασσού, Αγ. Ιωάννη, Αγ. Πάντων και Καλλιθέας. Στο συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόστηκαν όλα τα στάδια που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3 επί ένα χρόνο (360 ημέρες).

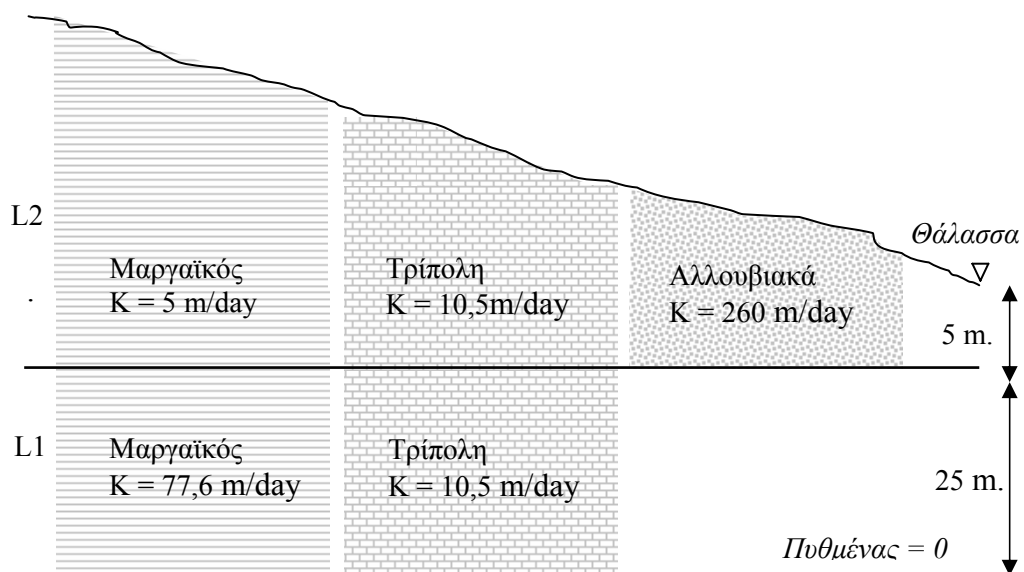


**Σχήμα 6.2:** Διακριτοποίηση της περιοχής μοντελοποίησης (1042 κόμβοι και 1964 τριγωνικά στοιχεία). Οι κόκκινες γραμμές αντιστοιχούν στις ηλεκτρικές τομογραφίες.

Ο υπό-μελέτη παράκτιος υδροφορέας εκτιμάται ότι έχει συνολικό πάχος περίπου 30m. στην ακτογραμμή με μία τάση αύξησης του πάχους του καθώς αυξάνεται και το υψόμετρο. Βρίσκεται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας και η ανώτερη επιφάνειά του

είναι ελεύθερη (μη-περιορισμένος) Η θεώρηση αυτή οδηγεί στην προσθήκη 30m. σε όλες τις ισοϋψείς του χάρτη, προκειμένου να αποδοθούν σωστά τα υψόμετρα ως προς τον υδροφορέα.. Σχετικά με τα στρώματα που αποτελούν τον ταμιευτήρα, αυτά είναι δύο. Το πρώτο στρώμα L1 πάχους 25m. είναι το κατώτερο στρώμα και απαρτίζεται από μαργαϊκό ασβεστόλιθο και από ασβεστόλιθο της Τρίπολης. Αντίστοιχα, το δεύτερο στρώμα L2 έχει πάχος 5m. στην επιφάνεια της θάλασσας και εκτός από τους δύο αναφερόμενους γεωλογικούς σχηματισμούς περιλαμβάνει επίσης αλλουβιακά ιζήματα, όπως είναι εμφανές και στο γεωλογικό χάρτη της περιοχής (Σχήμα 6.3).

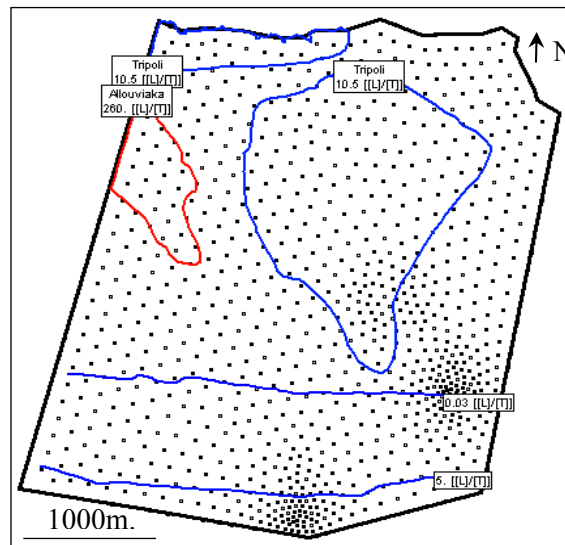
Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και για τα δύο στρώματα είναι οι τιμές που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Το σενάριο των δύο στρωμάτων L1-L2 χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να παρασταθεί ευκρινέστερα η μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους δύο γεωλογικούς σχηματισμούς σε σχέση με το βάθος. Η υδραυλική αγωγιμότητα αποτελεί έναν παράγοντα ο οποίος επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη ροή του υφάλμυρου ύδατος.



**Σχήμα 6.3:** Τομή του υπό μελέτη υδροφορέα.

Προκειμένου να προσομοιωθεί καλύτερα η υπόγεια ροή, πραγματοποιήθηκαν κάποιες επιπλέον διακυμάνσεις μέσα στο στρώμα του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, τόσο για το κατώτερο όσο και για το ανώτερο στρώμα. Ενώ δηλαδή η υπολογισμένη υδραυλική αγωγιμότητα για το L1 είναι 77,6m/day σε όλο το στρώμα, σχεδιάζονται δύο επιπλέον διαβαθμίσεις ώστε να επιτευχθεί ακριβέστερη μοντελοποίηση του υδροφορέα.

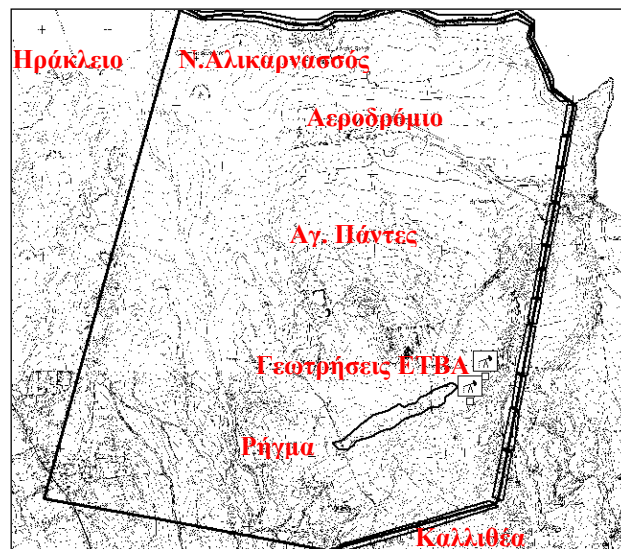
Οι παραπάνω διαβαθμίσεις παρουσιάζουν μία τάση μείωσης των τιμών τους προς το βορρά, καθώς παρακείμενες γεωτρήσεις αποδεικνύουν ότι το υφάλμυρο νερό διεισδύει κυρίως από το νότο, όπου και η υδραυλική αγωγιμότητα των γεωλογικών σχηματισμών αναμένεται μεγαλύτερη. Η ίδια ακριβώς λογική ισχύει και για το στρώμα L2, του οποίου η υδραυλική αγωγιμότητα είναι 5m/day, με αντίστοιχες διαβαθμίσεις στο μεγαλύτερο μέρος του (Σχήμα 6.4).



**Σχήμα 6.4:** Διαβαθμίσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας  $K$  στο μαργαϊκό ασβεστόλιθο, για το ανώτερο στρώμα L2.

Σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στην περιοχή, αυτές επιλέχτηκαν λαμβάνοντας υπόψη τα υδραυτικά ύψη που αναμένονται σε παρακείμενες γεωτρήσεις. Όλες οι ενδείξεις υποδεικνύουν υδραυτικά ύψη κοντά στο επίπεδο της θάλασσας (30m.), στο ανατολικό σύνορο του μοντέλου κατά μήκος του ρήγματος. Το ρήγμα φαίνεται επομένως να αποτελεί την κύρια δίοδο του υφάλμυρου νερού από τη θάλασσα προς την ενδοχώρα. Οι γεωτρήσεις στα νότια του μοντέλου προσομοίωσης δεν έχουν επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από τη ζώνη υφαλμύρωσης, δείχνοντας μία ροή γλυκού πλέον νερού από το εσωτερικό της ενδοχώρας προς την ακτή. Για τους παραπάνω λόγους, επιλέγεται συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους κατά μήκος του ρήγματος και συνθήκη 3<sup>ου</sup> είδους στο νότιο σύνορο, καθώς είναι γνωστές τιμές του υδραυλικού ύψους που βρίσκονται εκτός του μοντέλου προσομοίωσης (Πίνακας 6,1, γεώτρηση 4). Στην επιφάνεια της θάλασσας το υδραυτικό ύψος παραμένει σταθερό και ισούται με 30m., ενώ η περιοχή πλησίον των αλλουβιακών ιζημάτων στα δυτικά χαρακτηρίζεται

και αυτή ως συνθήκη 3<sup>ου</sup> είδους, εφόσον αναμένεται μεγάλη εισροή ύδατος. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι εντός της βιομηχανικής περιοχής και μάλιστα πλησίον των πηγαδιών της ΕΤΒΑ (Σχήμα 4.5) εντοπίζεται ένα επιπλέον ρήγμα, το οποίο είχε επισημανθεί από τη γεωφυσική διασκόπηση και εμφανίζεται και στο γεωλογικό χάρτη (βλ. Σχήμα 4.3). Για το λόγο αυτό στο συγκεκριμένο σημείο εισάγεται συνθήκη 2<sup>ου</sup> είδους με τη μορφή άντλησης, καθώς αναμένεται το ρήγμα να λειτουργεί ως πολλά πηγάδια άντλησης ταυτόχρονα.



**Σχήμα 6.5:** Στο μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζονται οι συνοριακές συνθήκες προς βορρά, ανατολή και νότο. Επίσης, απεικονίζεται το ρήγμα εντός της ΒΙΠΕ και κάποιες ενδεικτικές περιοχές.

### 6.3 Αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης

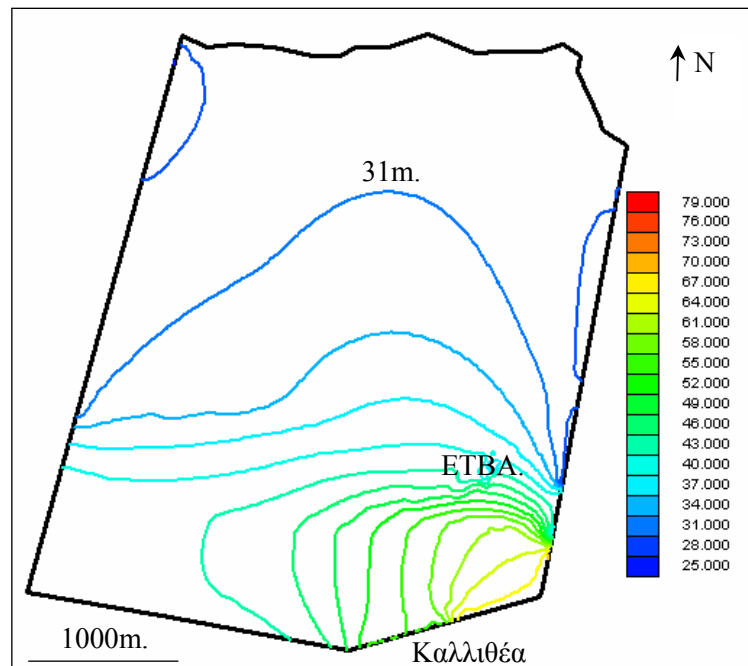
Αν και στην οριοθετημένη περιοχή μελέτης υπάρχουν αρκετές γεωτρήσεις, στην παρούσα κατάσταση θεωρείται ότι αυτές δεν αντλούν προκειμένου να περιοριστεί το μέτωπο της υφαλμύρωσης. Για το λόγο αυτό, δεν τοποθετούνται πηγάδια άντλησης στο μοντέλο. Απλά δηλώνεται η παρουσία κάποιων από αυτών ενδεικτικά, ώστε να επιτευχθεί πύκνωση της διακριτοποίησης στα σημεία αυτά. Η μόνη άντληση που παρατηρείται στο μοντέλο προέρχεται από το ρήγμα εντός της ΒΙΠΕ.

Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του υδραυλικού ύψους (m), οι οποίες έχουν παρατηρηθεί σε παρακείμενες γεωτρήσεις και αυτές που υπολογίστηκαν από τον αλγόριθμο «PTC». Οι θέσεις των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7.



**Πίνακας 6.1.** Τιμές υδραυλικού ύψους.

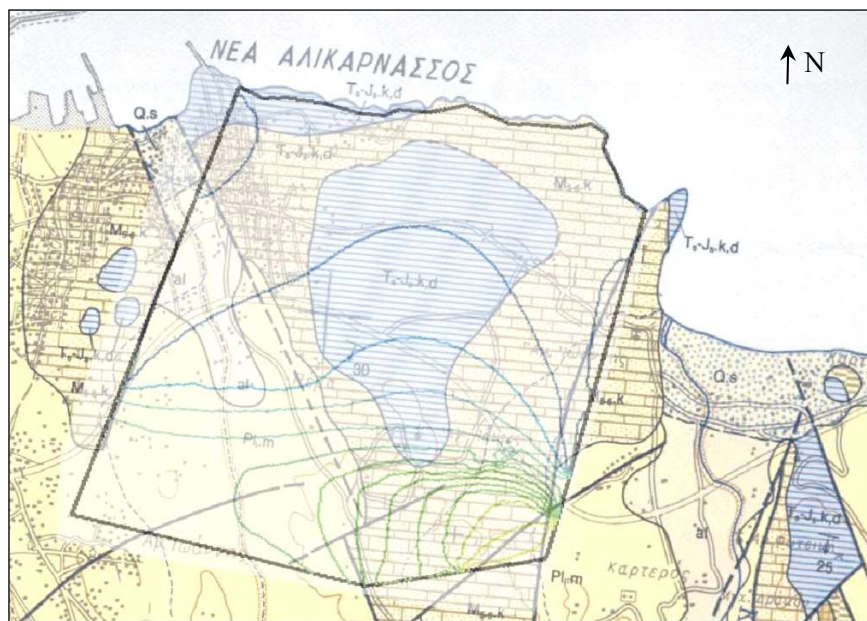
Αριθμός γεώτρησης	Παρατηρούμενες τιμές υδραυλικού ύψους	Υδραυλική ύψη από το μοντέλο προσομοίωσης
1	27	27
2	26	32
3	39	40
4	66	61



**Σχήμα 6.6:** Τιμές του υδραυλικού ύψους (m) για το στρώμα L2.

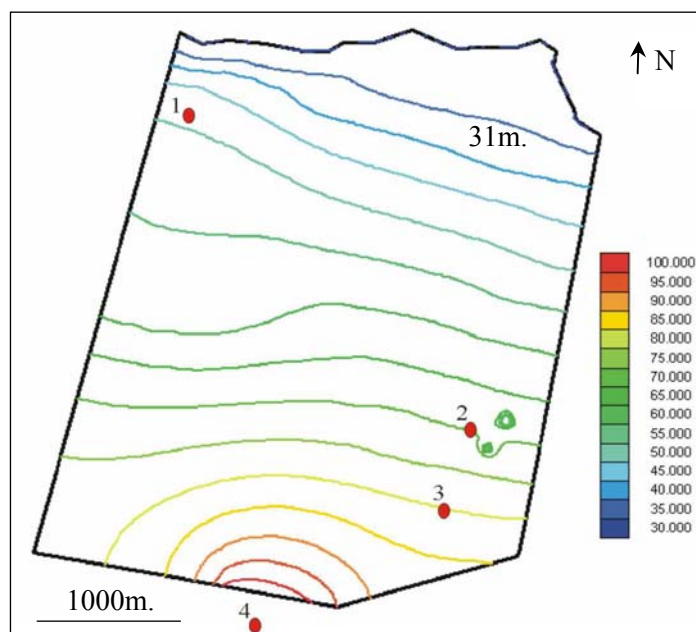
Το πεδίο των υδραυλικών υψών είναι κοινό και για τα δύο στρώματα L1 και L2, εφόσον οι παρατηρήσεις αναφέρουν ότι οι παρακείμενες γεωτρήσεις αντλούν και από τα δύο στρώματα και επιπλέον αυτά συνδέονται μεταξύ τους. Στο Σχήμα παρατηρείται η ευθεία με υδραυλικό ύψος 31m., η οποία σύμφωνα με τη σχέση (6.1) και για  $\xi=30\text{m.}$  (πάχος υδροφορέα), αποτελεί τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού. Η περιοχή επομένως πάνω από αυτή την ευθεία έχει υποστεί υφαλμύρωση εξαιτίας της διείσδυσης του νερού από τη θάλασσα. Παράλληλα,

σύμφωνα με στοιχεία των γεωτρήσεων που βρίσκονται ανατολικότερα του ρήγματος που φτάνει μέχρι τη θάλασσα διαπιστώνονται χαμηλά υδραυλικά ύψη και στο συγκεκριμένο χώρο, γεγονός που πιστοποιεί την είσοδο του θαλασσινού νερού και από το ρήγμα. Ιδιαίτερα, οι γεωτρήσεις της ΕΤΒΑ φαίνεται να αντιμετωπίζουν το σοβαρότερο πρόβλημα, καθώς στα σημεία αυτά το υδραυλικό ύψος είναι πολύ κοντά στη στάθμη της θάλασσας (η μεταβατική ζώνη της υφαλμύρωσης φτάνει μέχρι το σημείο αυτό). Η υφαλμύρωση εντούτοις εξαιτίας του ρήγματος δε φαίνεται να εξαπλώνεται σε όλο το χώρο προς τα νότια, καθώς παρατηρείται διείσδυση γλυκού νερού από την περιοχή κάτω από την Καλλιθέα (βλ. Πίνακας 6.1, γεώτρηση 4). Το μέτωπο επομένως του γλυκού νερού που εμφανίζεται προς τα νότια εμποδίζει την εξάπλωση της υφαλμύρωσης.



**Σχήμα 6.7:** Υπέρθωση του μοντέλου προσομοίωσης για τα υδραυλικά ύψη πάνω στο γεωλογικό χάρτη της περιοχής.

Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζονται τα υδραυλικά ύψη, τα οποία θα προέκυπταν εάν δεν είχε ληφθεί υπόψη ο ρόλος του ανατολικού ρήγματος ως κύρια πηγή εισόδου του θαλασσινού νερού. Στο συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης έχουν εφαρμοστεί απλά συνοριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> είδους κατά μήκος του ανατολικού και δυτικού συνόρου. Η διεπιφάνεια της υφαλμυρής ζώνης (31m.) εντοπίζεται πολύ κοντά στην ακτογραμμή, το οποίο δεν συμφωνεί με τα στοιχεία που αναφέρονται στη γεώτρηση 1.



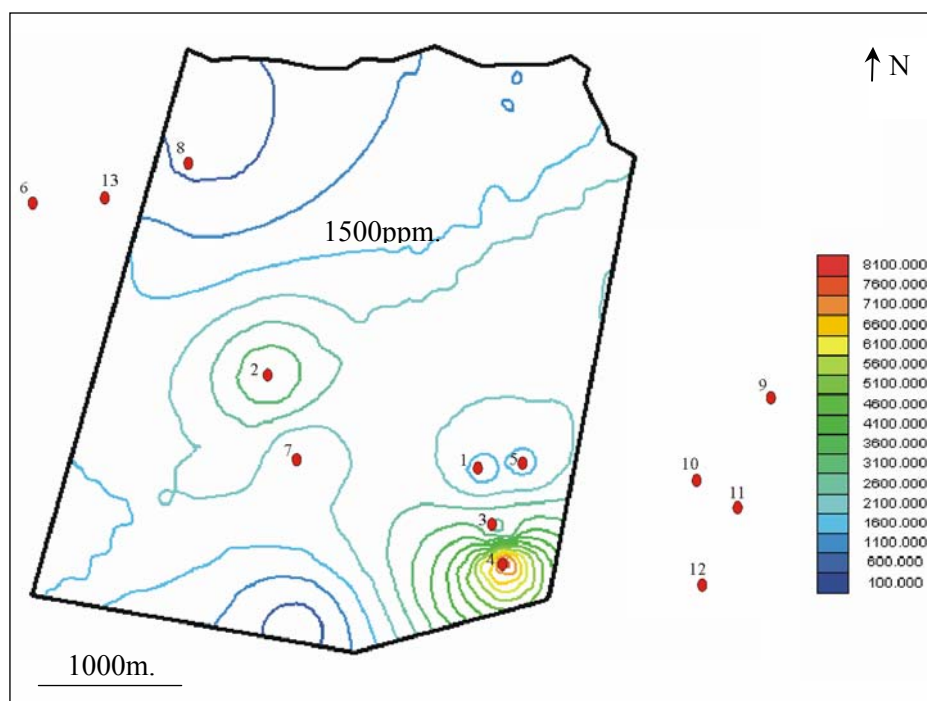
**Σχήμα 6.8:** Τιμές του υδραυλικού ύψους για το στρώμα L2, στην περίπτωση όπου δεν λαμβάνεται υπόψη το ρήγμα προς ανατολάς. Παρουσιάζονται επίσης οι θέσεις των γεωτρήσεων που αναφέρονται στον Πίνακα 6.1.

Στους Πίνακες 6.2, 6.3 και 6.4 παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα νερού από τις γεωτρήσεις της ΒΙΠΕ. Σύμφωνα με καθορισμένα όρια από την ελληνική νομοθεσία (ΦΕΚ 892, 11-7-2001), όλες σχεδόν οι τιμές για τα ιόντα χλωρίου, νατρίου και καλίου ξεπερνούν τις επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις. Η ανώτατη επιτρεπόμενη συγκέντρωση για πόσιμο νερό είναι 12ppm. για τα κατιόντα καλίου ( $K^+$ ) και 200ppm. για τα κατιόντα νατρίου ( $Na^+$ ).

Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η διακύμανση των ιόντων χλωρίου. Είναι εμφανές ότι όλες οι τιμές στα νότια του μοντέλου ξεπερνούν κατά πολύ το όριο των 250ppm. που έχει οριστεί για το πόσιμο νερό. Σύμφωνα επομένως με τις αναλύσεις, ολόκληρη αυτή η περιοχή έχει υποστεί υφαλμύρωση. Το γεγονός, αν και δε συμφωνεί με τις διαπιστώσεις του υδραυλικού ύψους στα νότια του μοντέλου προσομοίωσης, δικαιολογείται από τις ρήψεις χλωριόντων και χημικών ουσιών από παρακείμενα εργοστάσια.

**Πίνακας 6.2.** Μετρήσεις χλωριόντων από παρακείμενες γεωτρήσεις  
(Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Χημείας, Πολυτεχνείο Κρήτης).

Αριθμός δειγμάτων	Συγκέντρωση Cl <sup>-</sup> (ppm)
1	1430
2	3510
3	2490
4	7610
5	1480
6	3180
7	1820
8	562
9	1540
10	4130
11	955
12	946
13	527

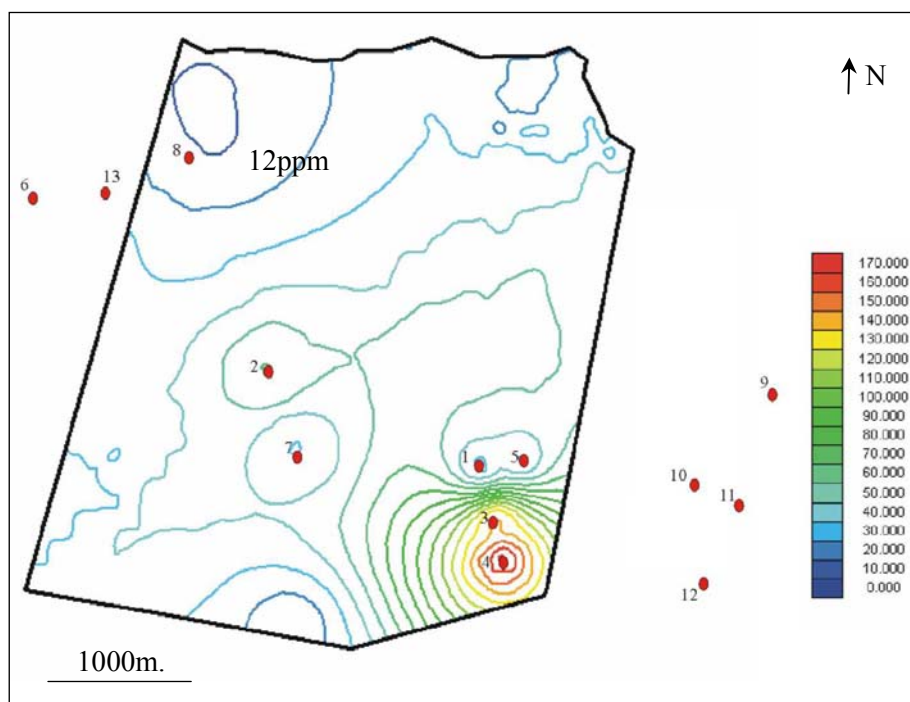


**Σχήμα 6.9:** Διακυμάνσεις συγκέντρωσης Cl<sup>-</sup> στον οριοθετημένο χώρο της ΒΠΠΕ.

Τα ίδια συμπεράσματα απορρέουν για τις καμπύλες που προκύπτουν από τις χημικές αναλύσεις των ιόντων καλίου και νατρίου. Γενικά, φαίνεται ότι ολόκληρη η βιομηχανική περιοχή του Ηρακλείου είναι επιβαρυνμένη τόσο από άποψης υφαλμύρωσης όσο και άλλων χημικών ουσιών.

**Πίνακας 6.3.** Μετρήσεις κατιόντων καλίου από παρακείμενες γεωτρήσεις (Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Χημείας, Πολυτεχνείο Κρήτης).

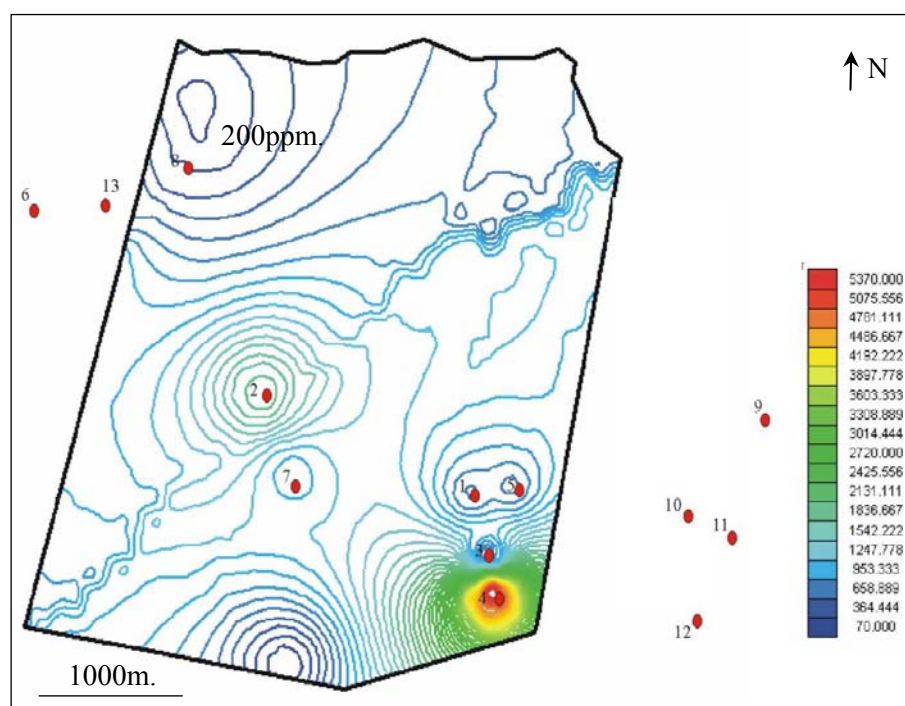
Αριθμός δειγμάτων	Συγκέντρωση $K^+$ (ppm)
1	28,6
2	60,1
3	141
4	169
5	30,5
6	59,4
7	29,7
8	16,7
9	0,31
10	7,47
11	47,2
12	33,8
13	14,2



**Σχήμα 6.10:** Διακυμάνσεις συγκέντρωσης  $K^+$  στον οριοθετημένο χώρο της ΒΙΠΕ.

**Πίνακας 6.4.** Μετρήσεις κατιόντων νατρίου από παρακείμενες γεωτρήσεις  
(Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Χημείας, Πολυτεχνείο Κρήτης).

Αριθμός δειγμάτων	Συγκέντρωση $\text{Na}^+$ (ppm)
1	554
2	1851
3	462
4	5399
5	540
6	1893
7	917
8	281
9	559
10	281
11	1560
12	493
13	283



**Σχήμα 6.11:** Διακυμάνσεις συγκέντρωσης  $\text{Na}^+$  στον οριοθετημένο χώρο της ΒΗΠΕ.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗ ΒΙΠΕ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

#### 7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκε μία προσπάθεια, προκειμένου να αναδειχθεί και να καθιερωθεί ο ρόλος των γεωφυσικών μεθόδων στην προσομοίωση πολύπλοκων υδρογεωλογικών προβλημάτων. Η υπό μελέτη περιοχή αφορά έναν υφάλμυρο υδροφορέα στη βιομηχανική ζώνη του Ηρακλείου και ο τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου μπορεί να επεκταθεί και σε άλλους χώρους, καθώς η υφαλμύρωση αλλά και το γεωλογικό υπόβαθρο είναι στοιχεία κοινά για πολλές περιοχές ειδικά του νομού Ηρακλείου Κρήτης.

Όσον αφορά στη συμβολή της γεωφυσικής διασκόπησης στο γεωλογικό χαρακτηρισμό του υπό μελέτη χώρου, κρίνεται πρωταρχικής σημασίας. Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που πραγματοποιήθηκε απέφερε συμπεράσματα σχετικά με το γεωλογικό υπόβαθρο, την παρουσία ρηγμάτων και τέλος την καθοριστικής σημασίας ανάδειξη των υφάλμυρων ζωνών. Η παρουσία ή όχι της υφαλμύρωσης είναι εμφανής από τη μεταβολή των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους. Φυσικά το πρόβλημα είναι αρκετά πολύπλοκο, καθώς η ΒΙΠΕ Ηρακλείου χαρακτηρίζεται γεωλογικά ως καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος με έντονη την παρουσία ρηγμάτων. Η ανάδειξη επομένως της γεωλογικής στρωμάτωσης και η συσχέτιση των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους με επικείμενα ρήγματα, σε συσχετισμό με το γεωλογική χάρτη της περιοχής, αποτέλεσε



μία δύσκολή διαδικασία. Συγκεκριμένα, οι τρεις ηλεκτρικές τομογραφίες που πραγματοποιήθηκαν υπέδειξαν την παρουσία του μαργαϊκού ασβεστόλιθου στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής αλλά και του ασβεστόλιθου Τρίπολης σε ένα μικρότερο τμήμα. Οι έντονες πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που παρατηρήθηκαν κατά κύριο λόγο στη δεύτερη και μεγαλύτερη γεωηλεκτρική τομή συσχετίστηκαν με πιθανή παρουσία ρηγμάτων και επιβεβαιώθηκαν από επιτόπια παρατήρηση. Η γεωλογική χαρτογράφηση αποτελεί ένα σημαντικό τμήμα του ευρύτερου σχεδίου για την αποκατάσταση της περιοχής, καθώς με σχετικά εύκολο και γρήγορο τρόπο είναι πλέον γνωστές οι επικίνδυνες από γεωλογικής άποψης περιοχές, αλλά και τα πιθανά σημεία για επικείμενες γεωτρήσεις.

Η ζώνη υφαλμύρωσης παρατηρήθηκε μονάχα στην πρώτη γεωηλεκτρική τομή περίπου στο επίπεδο της θάλασσας, όπως είχε διαπιστωθεί και από παρακείμενες γεωτρήσεις. Οι υπόλοιπες δύο τομές δεν παρουσίασαν κάποια σημαντική ένδειξη για διείσδυση υφάλμυρου ύδατος, γεγονός που πιστοποιείται και από κοντινή γεώτρηση. Το μέτωπο επομένως της υφαλμύρωσης, σύμφωνα με τα στοιχεία της γεωφυσικής διασκόπησης, φαίνεται να επικεντρώνεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του υπό μελέτη χώρου.

Το δεύτερο, περισσότερο χρονοβόρο και σημαντικότερο ίσως τμήμα της μεταπτυχιακής διατριβής αποτέλεσε η εύρεση της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής. Η απουσία διαγραφών, τεστ αντλήσεως και δειγματοληπτικών μετρήσεων δυσκόλεψε πολύ το συγκεκριμένο τμήμα της εργασίας, καθώς οι παραπάνω διαδικασίες θα μπορούσαν να διαφωτίσουν περισσότερο την υδρογεωλογία της περιοχής. Φυσικά σκοπός της μελέτης είναι να παρουσιαστεί μία αρχική εκτίμηση των παραπάνω παραμέτρων, προκειμένου να πραγματοποιηθεί στη συνέχεια μία πρώτη και άμεση τρισδιάστατη προσομοίωση της υπόγειας ροής των υδάτων. Ελλείψει επομένως των άνωθεν βοηθητικών διεργασιών, το τμήμα αυτό της εργασίας βασίστηκε στη βιβλιογραφική έρευνα και σε παρόμοιες προσπάθειες που είχαν υλοποιηθεί από ερευνητές. Η προσομοίωση μίας καρστικοποιημένης περιοχής αποδείχτηκε ότι αποτελεί ένα πολυσύνθετο πρόβλημα, το οποίο δεν μπορεί να επιλυθεί με απλό και εύκολο τρόπο, καθώς στη μελέτη υπεισέρχονται πλέον παράγοντες που σχετίζονται με παραμέτρους του ίδιου του πετρώματος και οι οποίες είναι δύσκολο να προσδιοριστούν χωρίς τις απαραίτητες μετρήσεις. Σε τελική παρόλα αυτά φάση και με συνεχή επικοινωνία άλλων ερευνητών,



κατέστη δυνατή η εύρεση της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους για το μαργαϊκό ασβεστόλιθο και τον ασβεστόλιθο Τρίπολης. Οι συγκεκριμένες τιμές βρίσκονται σε συμφωνία με τιμές που προέκυψαν από τεστ άντλησης σε άλλη περιοχή του ρηγματωμένου ασβεστόλιθου του Ηρακλείου.

Το τελικό στάδιο της εργασίας περιλαμβάνει τρισδιάστατη προσομοίωση του υπό μελέτη υδροφορέα, προκειμένου να κατανοηθεί η υπόγεια κίνηση του υφάλμυρου ύδατος. Το σχεδιαστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε «Argus One» και ο αλγόριθμος επίλυσης «PTC» αποτελούν σχετικά εύκολα και αρκετά γρήγορα εργαλεία για την πρόβλεψη της υπόγειας ροής αλλά και της μεταφοράς ρύπων, εάν αυτό χρειαστεί. Το μοναδικό πρόβλημα που προέκυψε οφείλεται στην ταυτοποίηση που έπρεπε να πραγματοποιηθεί ανάμεσα στα στοιχεία του μοντέλου και σε αυτά που ήταν διαθέσιμα από γεωτρήσεις της ΒΙΠΕ. Δυστυχώς, τα διαθέσιμα στοιχεία ήταν λιγοστά και για το λόγο αυτό οι τιμές των συνοριακών συνθηκών καθορίστηκαν μόνο με βάση τις διαθέσιμες γεωτρήσεις. Ο υπό μελέτη υδροφορέας έχει πάχος 30m. στην ακτογραμμή, με τάση αύξησης του πάχους του καθώς αυξάνεται και το υψόμετρο. Σχεδιάστηκε ώστε να αποτελείται από δύο στρώματα, πάχους 25m. και 5m. αντίστοιχα. Τα υδραυλικά ύψη που υπολογίστηκαν και για τα δύο στρώματα του υδροφορέα είναι παρόμοια μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό, καθώς τα στρώματα επικοινωνούν μεταξύ τους και οι παρακείμενες γεωτρήσεις αντλούν και από τα δύο στρώματα.

Η διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού ταυτίζεται με το υδραυλικό ύψος των 31m. Η περιοχή επομένως πάνω από αυτή την ευθεία έχει υποστεί υφαλμύρωση εξαιτίας της διείσδυσης του νερού από τη θάλασσα.. Παράλληλα, σύμφωνα με στοιχεία των γεωτρήσεων που βρίσκονται ανατολικότερα του ρήγματος που φτάνει μέχρι τη θάλασσα διαπιστώνονται χαμηλά υδραυλικά ύψη και στο συγκεκριμένο χώρο, γεγονός που πιστοποιεί την είσοδο του θαλασσινού νερού και από το ρήγμα. Ιδιαίτερο πρόβλημα αντιμετωπίζουν οι γεωτρήσεις της ΕΤΒΑ, αφού στα σημεία αυτά το υδραυλικό ύψος είναι πλησίον της στάθμης της θάλασσας. Η υφαλμύρωση παρόλα αυτά δε φαίνεται να εξαπλώνεται σε όλο το χώρο προς τα νότια, καθώς παρατηρείται διείσδυση γλυκού νερού από την περιοχή που βρίσκεται κάτω από το νότιο σύνορο του μοντέλου, εμποδίζοντας την εξάπλωση της ζώνης υφαλμύρωσης.

Η παρουσία της υφαλμύρωσης επιβεβαιώθηκε παράλληλα από μετρήσεις χλωριόντων που ελήφθησαν από δείγματα νερού της ΒΙΠΕ. Η πλειοψηφία των

συγκεντρώσεων που παρατηρήθηκαν ήταν μεγαλύτερη από την οριακή τιμή των 1500ppm., η οποία είναι ενδεικτική για υφαλμύρωση. Παράλληλα με τις χημικές αναλύσεις χλωριόντων πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις συγκέντρωσης στα ιόντα καλίου και νατρίου, οι τιμές των οποίων αποδεικνύουν ότι το νερό της ΒΙΠΕ ιδιαίτερα στα νότια σύνορα δεν είναι κατάλληλο προς πόση, καθώς οι συγκεντρώσεις ξεπερνούν τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια που έχουν καθοριστεί από την ελληνική νομοθεσία. Οι πολύ αυξημένες τιμές που εμφανίζονται στις χημικές αναλύσεις ιόντων χλωρίου, καλίου και νατρίου στα νότια σύνορα πιθανό να οφείλονται σε ρήψεις χημικών ουσιών από παρακείμενα εργοστάσια.

## 7.2 Προτάσεις

Η εργασία που πραγματοποιήθηκε αποτέλεσε μία πρώτη προσπάθεια προκειμένου να καθιερωθούν οι γεωφυσικές μέθοδοι στη μοντελοποίηση συχνών υδρογεωλογικών προβλημάτων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη είναι αρκετά διαφωτιστικά σχετικά τόσο με το γεωλογικό υπόβαθρο του χώρου όσο και με την υπόγεια κίνηση του υφάλμυρου ύδατος στη Βιομηχανική Περιοχή Ηρακλείου Κρήτης. Παρόμοια προσέγγιση θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ανάλογα προβλήματα, ώστε να προκύψει μία αρχική εκτίμηση του προβλήματος και να αποφευχθούν πολυέξοδες ερευνητικές γεωτρήσεις, τουλάχιστον στο πρώτο στάδιο της μελέτης.

Το πρόβλημα παρόλα αυτά για την εύρεση των απαραίτητων υδρογεωλογικών παραμέτρων, ιδιαίτερα σε μία έντονα ρηγματωμένη περιοχή, είναι αρκετά πολύπλοκο και η βιβλιογραφική έρευνα αποτελεί απλά το πρώτο βήμα. Στη συνέχεια κρίνεται επιτακτική η πραγματοποίηση καταρχήν διαγραφιών (ακουστικών, πορώδους, διαπερατότητας), ώστε να καθοριστεί πλέον με ακρίβεια το πορώδες και η διαπερατότητα των σχηματισμών. Τα δείγματα που θα ληφθούν είναι επίσης δυνατόν να υποστούν κατάλληλες εργαστηριακές δοκιμές, προκειμένου να προσδιοριστούν οι καμπύλες πορώδους-διαπερατότητας για τους συγκεκριμένους γεωλογικούς σχηματισμούς και τη συγκεκριμένη περιοχή. Στη συνέχεια θα ακολουθήσουν τεστ άντλησης για τον καθορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας και σε τελική φάση θα δημιουργηθεί ένα δεύτερο μοντέλο του υφάλμυρου υδροφορέα, το οποίο θα προσφέρει

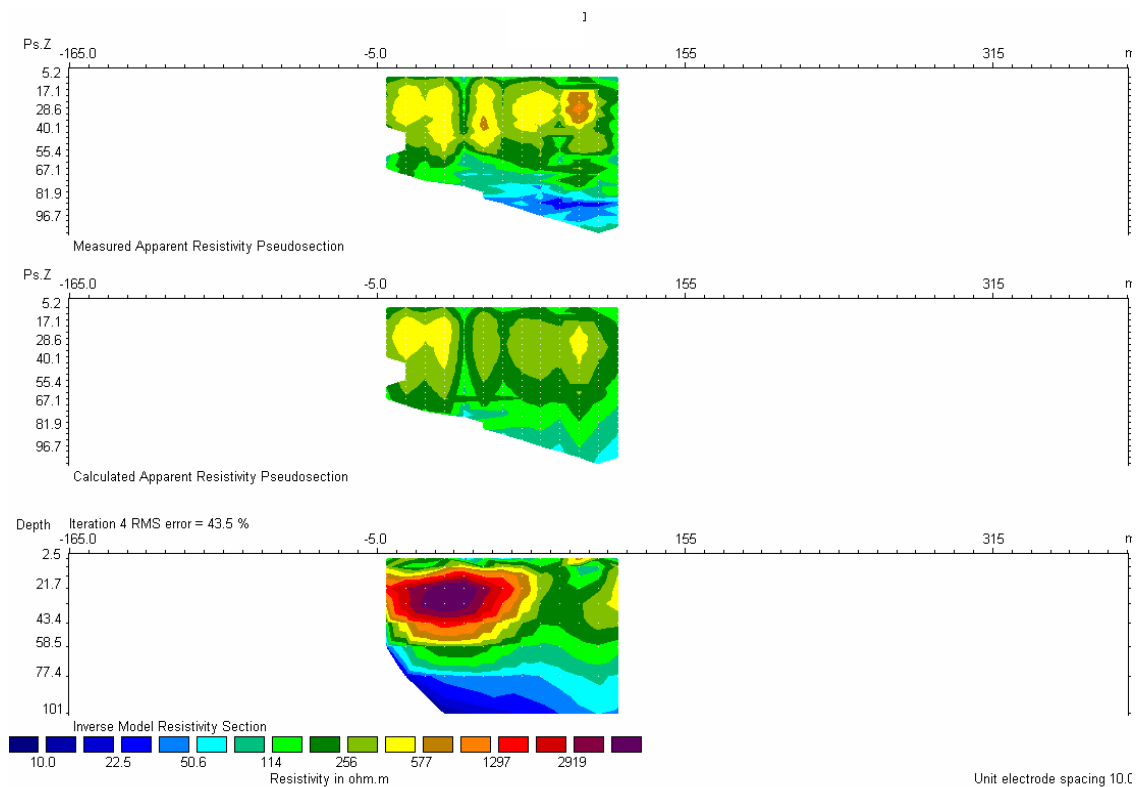
περισσότερες πληροφορίες. Η εργασία αυτή φυσικά αναμένεται να είναι αρκετά χρονοβόρα, αλλά επιβάλλεται για την ορθή μοντελοποίηση της περιοχής.

Σχετικά με τη γεωφυσική διασκόπηση, προτείνεται να επαναληφθούν οι ίδιες ηλεκτρικές τομογραφίες σε μετέπειτα διάστημα του εμπλουτισμού του υδροφορέα. Η πραγματοποίηση ηλεκτρικών μετρήσεων στην ίδια ακριβώς περιοχή θα προσφέρει μία επιπλέον απόδειξη για το ρυθμό αποκατάστασης της υφαλμύρωσης σε σχέση με την παρούσα κατάσταση. Οι γεωτρήσεις παράλληλα που έχουν προταθεί καταρχήν ως ερευνητικές και δειγματοληπτικές, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον ως γεωτρήσεις εμπλουτισμού ώστε να μειωθούν τα έξοδα κατασκευής καινούριων γεωτρήσεων, εφόσον οι προτεινόμενες βρίσκονται ήδη πλησίον της μονάδας βιολογικούκαθαρισμού.

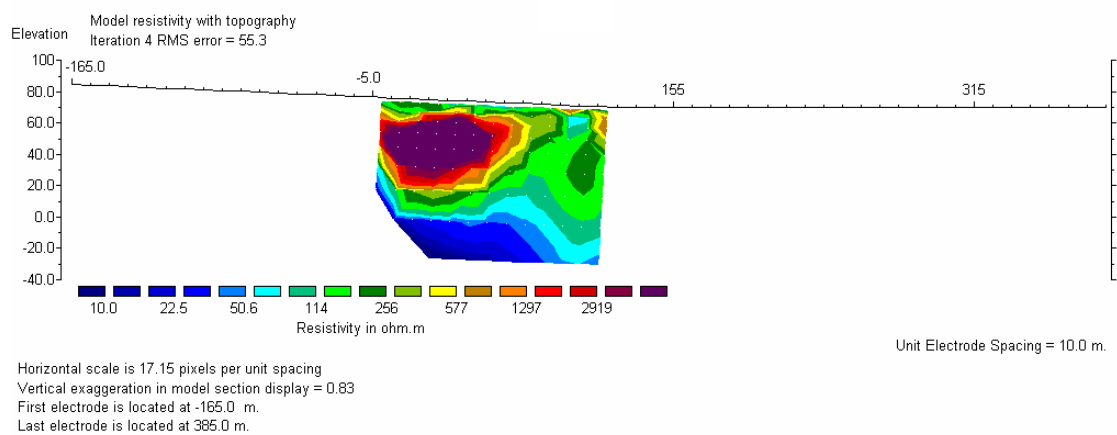
# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**

## **ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ**

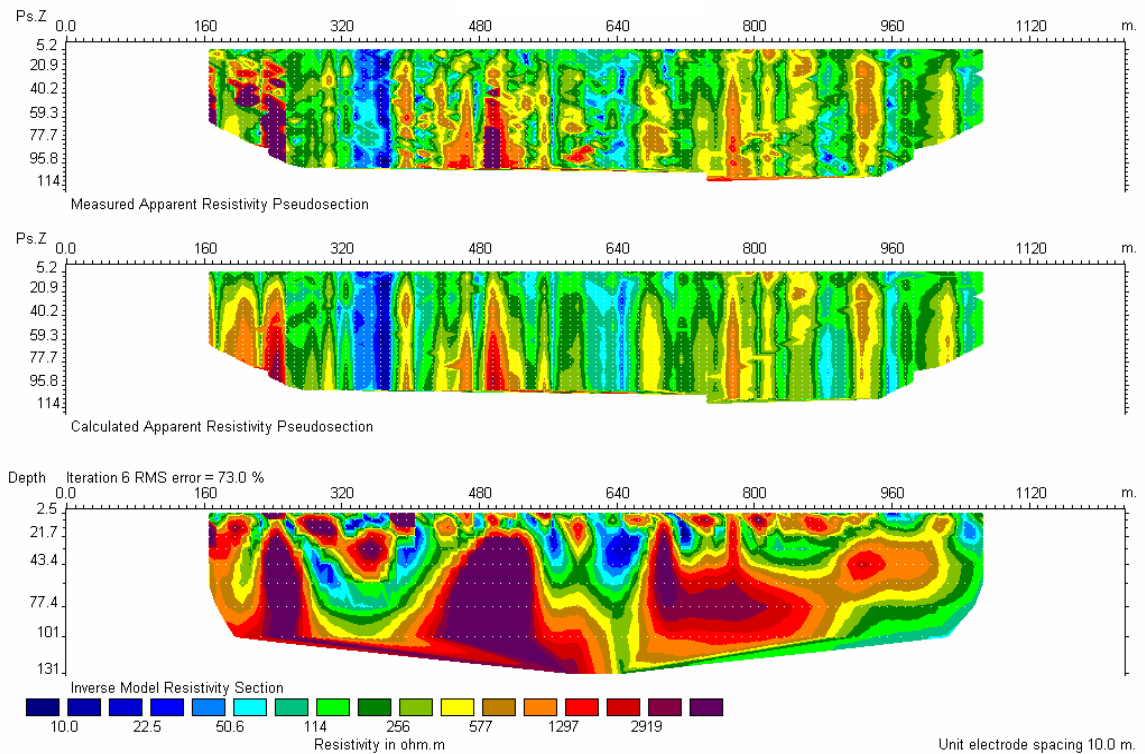
## 1<sup>η</sup> Ηλεκτρική Γραμμή T1



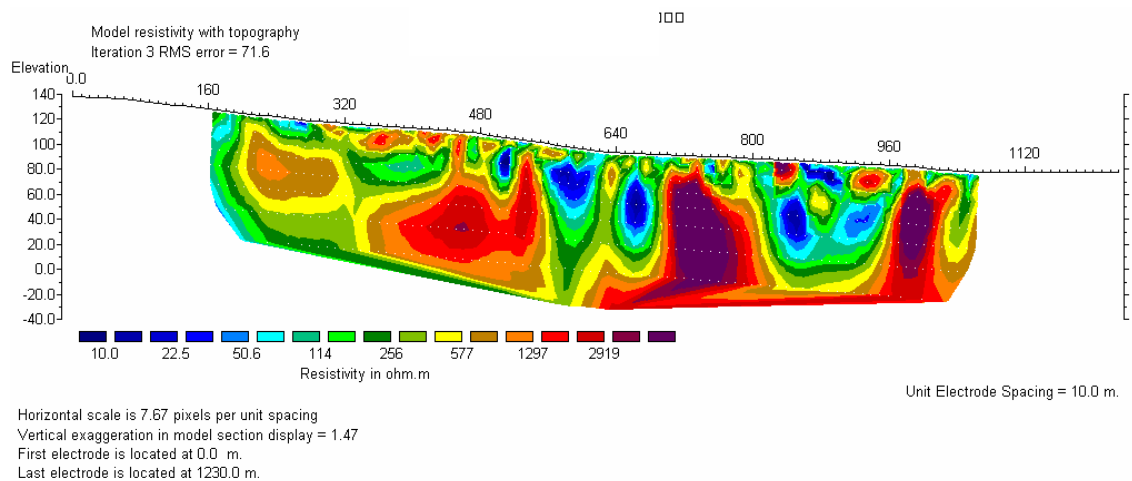
## Τοπογραφική διόρθωση



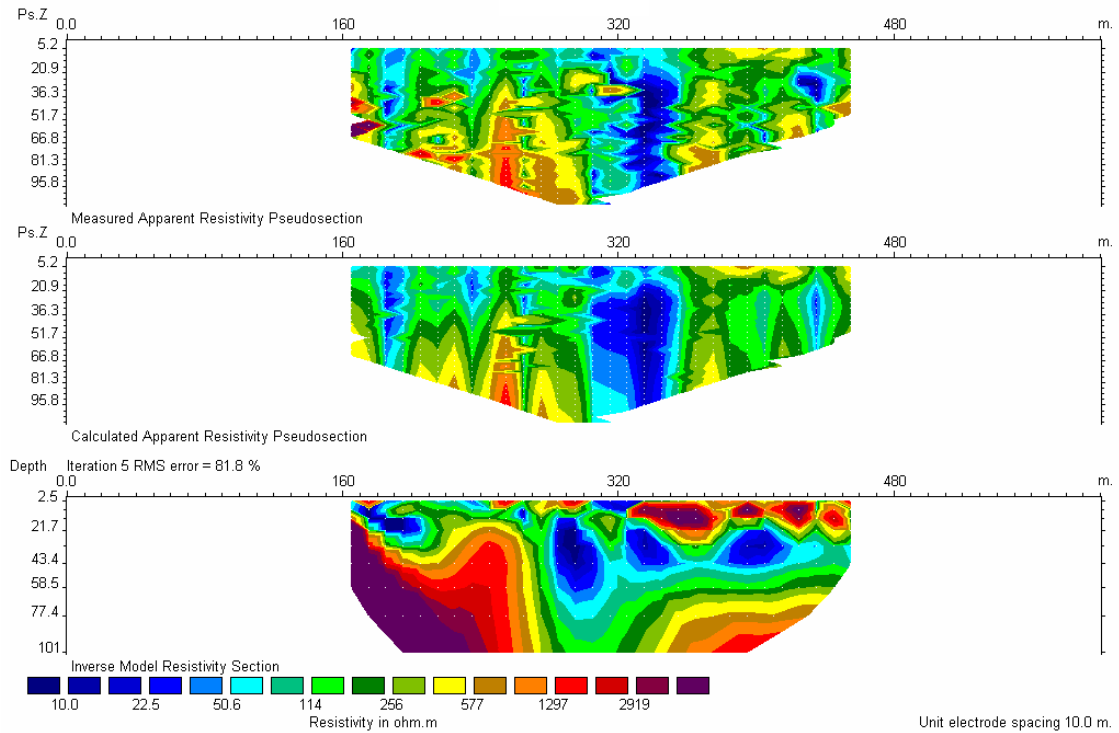
## 2<sup>η</sup> Ηλεκτρική Γραμμή T2



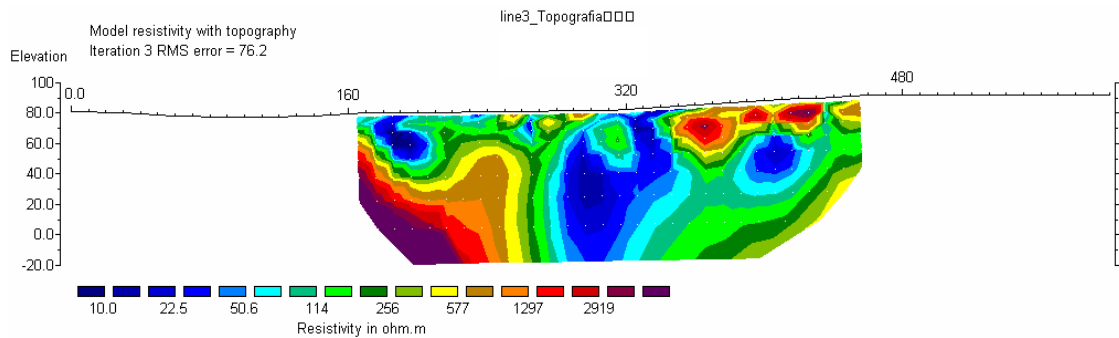
## Τοπογραφική διόρθωση



### 3<sup>η</sup> Ηλεκτρική Γραμμή T3



### Τοπογραφική διόρθωση



Horizontal scale is 15.72 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 0.87  
First electrode is located at 0.0 m.  
Last electrode is located at 600.0 m.

## ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aguilera R. (1998), *Geologic aspects of naturally fractured reservoirs*, The Leading Edge, pp. 1667-1670.
- Ahmed S., Marsily G., Talbot A. (1988), *Combined use of hydraulic and electrical properties of an aquifer in a geostatistical estimation of transmissivity*, Ground Water, 26 (1), issue 1, pp. 78-85.
- Al-Hanai W., Russell S. Duffy, Vassapragada B. (1999), *Carbonate rocks*, ADCO & Schlumberger, International Symposium of the Society of Core Analysts.
- Atekwana E.A., Sauck W.A., Werkema Jr.D.D. (2000). *Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site*, Journal of Applied Geophysics, vol. 44, pp. 167-180.
- Babu D. K., Pinder G. F, Niemi A., Ahlfeld D. P., Stothoff S. A. (1997), *Chemical transport by three-dimensional groundwater flows*, Princeton University, 84-WR-3.
- Bachler Dominique (2003), *Coupled thermal-hydraulic-chemical modeling at the Soultz-sous-Forêts reservoir, France*, PhD paper submitted to the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich.
- Berg C. R. (2004), *Dual and triple porosity models from effective medium theory*.
- Bernabe Y., Mok U., Evans B. (2003), *Permeability – porosity relationships in rocks subjected to various evolution processes*, Pure and Applied Geophysics, vol. 160, pp. 937-960.
- Brewster M., Schneider G., (1993), *Geophysics and solvents. The Borden experiment*, Journal of Leading Edge, pp. 261-270.
- Borus Hajnal (1999), *Einsatz geophysikalischer messverfahren zur abschatzung der hydraulischen durchlassigkeit tonhaltiger sedimente – ein beitrag zum grundwasserschutz*, ‘Integrated geophysical methods used for the calculation of hydraulic conductivity in clay sediments’, PhD paper submitted to the Department of Mathematics and Nature in the University of Christian – Albrechts in Kiel.



- Budd D. A., Vacher H. L. (2004), *Matrix permeability of the confined floridan aquifer, Florida, USA*, J. Hydrology, vol. 12, pp. 531-549.
- Buselli G., Lu K. (2001), *Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods*, J. Appl. Geophysics vol. 48, pp. 11-23.
- Byrnes Alan P., Bhattacharya S. (2004), *Issues with permeability, relative permeability, and capillary pressure architecture and upscaling to accurately model performance of thin, heterogeneous, shallow-shelf carbonate reservoirs in Kansas*, Search and Discovery, Electronic Journal for Exploration and Production Geoscientists.
- Choquette, Pray (1970), *Porosity Logging*.
- De Lima O. A. L., Sato H. K., Porsani M. J. (1995), *Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques*, J. Appl. Geophysics vol. 34. pp. 93-108.
- Dewan J. T. (1983), *Essentials of modern open-hole log interpretation*.
- Dimitrakopoulos R., Dagbert M. (1993), *Sequential modeling of relative indicator variables dealing with multiple lithology types*, Geostatistics Troia '92, pp. 413-424.
- Fitterman David (1996), *Geophysical mapping of the freshwater/saltwater interface in Everglades National Park, Florida*, U. S Geological Survey, Center for Coastal Geology.
- Florea L. J., Paylor R. J. (2002), *Karst GIS advances in Kentucky*, J. Cave and Karst Studies, vol. 64, pp. 58-62.
- Frohlich R., Kelly W. (1985), *The relation between hydraulic transmissivity and transverse resistance in a complicated aquifer of glacial outwash deposits*, J. Hydrology, vol.79, issue 3-4, pp. 215-229.
- Heigold P.C., Gilkeson R., Cartwright K., Reed P.C (1979), *Aquifer transmissivity from surficial electrical measurements*, Ground Water, vol. 17, pp. 338-345.
- Hubbert M. K. (1940), *The theory of groundwater motion*, J. Geol., vol. 48, pp. 785-822.
- Huntley D. (1986), *Relations between permeability and electrical resistivity in granular aquifers*, Ground Water, vol. 24, pp. 466-474.
- Jackson P. D., Smith T. D., Stanford P. N., (1978), *Resistivity – porosity – particle shape relationships for marine sands*, Geophysics, vol. 43, pp. 1250-1268.

- Kalinski R., Kelly E., Bogardi I. (1993), *Combined use of geoelectric sounding and profiling to quantify aquifer protection properties*, Ground Water, vol. 31, issue 4, pp. 538-544.
- Katsube T., Hume J. (1987), *Permeability determination in crystalline rocks using standard geophysical logs*, Geophysics, vol. 52, issue 3, pp. 342-352.
- Kaufmann G. (2003), *A model comparison of karst aquifer evolution for different matrix-flow formulations*, J. Hydrology, vol. 283, pp. 281-289.
- Kelly W. and Reiter P.F (1984), *Influence of anisotropy on relations between electrical and hydraulic properties of aquifers*, Journal of Hydrology, vol. 74, pp. 311-321.
- Kelly W. (1977), *Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity*, Ground Water, vol. 15, pp. 420-424.
- Kovacs A., Perrochet P., Kiraly L., Jeannin P.Y. (2004), *A quantitative method for the characterization of karst aquifers based on spring hydrograph analysis*, J. Hydrology, pp. 1-13.
- Kumar M., Gnanasundar D., Elango L. (2001), *Geophysical studies to determine hydraulic characteristics of an alluvial aquifer*, J. Environmental Hydrology, vol. 9, issue 15.
- Kwader T. (1985), *Estimating aquifer permeability from formation resistivity factors*, Ground Water, vol. 23, pp.762-766.
- Loke, M. H., and Barker, R. D. (1994), *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections*, Extended Abstracts of Papers 5616 FACE Meeting Vienna, Austria 6-10 June 1994, p. 1802.
- Louis I., Karantonis G., Voulgaris N., Louis F.(1982), *Technical report on a geophysical survey at greater Mornos plain and Eupalion plateau*, Ministry of Agriculture, Athens, Greece.
- Maimone M., Fitzgerald R. (2001), *Effective modeling of coastal aquifer systems*, First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers, Morocco.
- Mazac O., Kelly W, Landa I., Landa I. (1987), *Surface geoelectrics for groundwater pollution and protection studies*, J. Hydrology, vol .93, pp. 277-294.
- Mazac O., Kelly W, Landa I. (1985), *A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers*, J. Hydrology, vol. 79, pp. 1-19.

- Mazac O., Kelly W, Landa I. (1979), *On determination of hydraulic conductivity and transmissivity of granular aquifers by vertical electrical sounding*, J. Geological Science Hydrology, vol. 6, pp. 123-139.
- McCune C., Fogler H. S., Kline W. E. (1979), *An experimental technique for obtaining permeability-porosity relationship in acidized porous media*, Ind. Eng. Chem. Fundam., vol. 18, pp. 188-191.
- McDonald R., Davies R. (2003), *Integrated geophysical surveys applied to karstic studies*, Environmental and Engineering Geoscience, vol. 21, pp. 32-35.
- Niwas S., Olivar de Lima (2003), *Aquifer parameter estimation from surface resistivity data*, Ground Water, vol.41, pp.94-99.
- Niwas S., Singhal D. (1984), *Aquifer transmissivity of porous media from resistivity data*, J. Hydrology, vol. 82, pp. 143-153.
- Niwas S., Singhal D. (1981), *Estimation of aquifer transmissivity from Dar-Zarrouk parameters in porous media*, Hydrology, vol. 50, pp. 393-399.
- Nunes L.M. (1998), *Estimativa do campo de permeabilidades potenciais e dos tensores de macrodispersividade em aquiferos heterogeneos a partir de Informacao Geofisica* 'Estimation of permeability fields and microdispersivity tensors in heterogenous aquifer based on geophysical data, MSc paper submitted to the Department of Georesources in the Technical University of Lisbon in Portugal.
- Orlando L., Marchesi E. (2001), *Georadar as a tool to identify and characterize solid waste dump deposits*, J. Appl. Geophysics vol. 48, pp. 163-174.
- Ortega R. M., Espinosa J. G, Spandre R. (1999), *Evaluation of aquifer transmissivity in karst using geophysical well logs*, J. Environmental Hydrology, vol. 7.
- Oteri A.U (1981), *Geoelectric investigation of saline contamination of a chalk aquifer by mine drainage water at Tilmanstone, England*, Geoexploration, vol. 9, pp. 179-192.
- Pape H., Clauser C., Iffland J. (2000), *Variation permeability with porosity in sandstone diagenesis interpreted with a fractal space pore model*, Pure and Applied Geophysics, vol. 157, pp. 603-619.
- Pape H., Clauser C., Iffland J. (1998), *Permeability prediction for reservoir sandstones and basement rocks based on fractal pore space geometry*, SEG Expanded Abstracts.

- Pape H., Schopper J. R., *Relations between physically relevant geometrical properties of a multi-fractal porous system*, Department of Geophysics, Clausthal University of technology, Germany.
- Pinder G., P. (2002), *Groundwater modeling using geographical information systems*, University of Vermont, Canada.
- Ross H. P, Mackelprang C. E, Wright P. M. (1990) *Dipole-dipole electrical resistivity surveys at waste disposal study sites in Northern Utah*, In: Ward, H. (Ed), Geotechnical and Environmental Geophysics. Soc. Explor. Geophysics vol. 2, pp. 145-152.
- Salem H. (2001), *Application of the Kozeny – Carman equation to permeability determination for a glacial outwash aquifer, using grain-size analysis*, Energy Sources, vol. 23, pp. 461-473.
- Salem H. (2001), *Determination of porosity, formation resistivity factor, archie cementation factor, and pore geometry factor for a glacial aquifer*, Energy Sources, vol. 23, pp. 589-596.
- Sauk W.A., Atekwana E.A., Nash M.S. (1998), *High electrical conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques*, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, vol. 2, pp. 203-212.
- Sigurosson O., Guomundsson A., Stefansson V. (2000), *Database on igneous rock properties on icelandic geothermal: Status and unexpected results*, Proceedings of World Geothermal Congress in Japan, pp. 2881-2886.
- Scanlon B. R., Mace R. E., Barrett B. E., Smith B. (2003), *Can we simulate regional groundwater flow in karst systems using equivalent porous media models? Case study, Barton springs, Edwards aquifer, USA*, J. Hydrology, vol. 276, pp. 137-158.
- Wempe Wendy Lynn (2000), *Predicting flow properties using geophysical data: Improving aquifer characterization*, PhD paper submitted to the Department of Geophysics in Stanford.

## ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βαφείδης Α. (2004), *Γεωφυσική διασκόπηση στη βιομηχανική περιοχή Ηρακλείου, Έκθεση γεωφυσικής έρευνας*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Χανιά.
- Βαφείδης Α. (1994), *Αξιολόγηση σχηματισμών με γεωφυσικές μεθόδους*, Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Χανιά.
- Βαφείδης Α., Μονόπωλης, Δ., Αμολοχίτης, Γ., Στειακάκης Μ. (1991), *Γεωφυσική Έρευνα με Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις στην Κοιλάδα του Κερίτη Ποταμού*, Τεχνική έκθεση σχετικά με ανάπτυξη μεθόδων αξιοποίησης των υπόγειων νερών δυτικής Κρήτης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Κανελλόπουλος Δημήτριος (2003), *Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου PTC για τη ροή υπόγειων υδάτων και μεταφοράς νιτρικών στην περιοχή του Κορινθιακού κόλπου*, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά, σελ. 23-33.
- Καρατζάς Γ. (2004), *Ροή υπογείων υδάτων και μεταφορά ρύπων*, Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Υδραυλικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Χανιά.
- Κλειδοπούλου Μ. (2003), *Ροή υπογείων νερών προς υδρομαστευτικά έργα (παράδειγμα υδρομαστευτική στοά στην περιοχή Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης)*, Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Κουκαδάκη Μ., Τζιμούρτος Μ. (2002), *Συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στη μελέτη της ρύπανσης των εδαφών και υπογείων νερών*, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά, σελ. 1-11.
- Κρητικάκης Γ. (2004), *Ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και εφαρμογή σε χώρο απόθεσης απορριμμάτων στη Β. Ιταλία και στη βιομηχανική περιοχή Porto*

*Petroli, Genoa*, Πρακτικά 10<sup>ου</sup> Διεθνές Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Εκτεταμένες Περιλήψεις, Θεσσαλονίκη, σελ.32-33.

Μπούτζουκα Ζ. (2004), *Συμβολή των Γεωγραφικών Συστημάτων στην ερμηνεία γεωφυσικών δεδομένων από τον αρχαιολογικό χώρο της Ιτάνου*, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά, σελ. 1-6.

Παπαζάχος Β. (1986), *Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

## ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

[www.agt.net/public/aguilera/technote.htm](http://www.agt.net/public/aguilera/technote.htm)

[www.beg.utexas.edu](http://www.beg.utexas.edu)

[www.crete-region.gr/](http://www.crete-region.gr/)

[www.emy.gr](http://www.emy.gr)

[www.europa.eu.int](http://www.europa.eu.int)

[www.hygeia-eu.org](http://www.hygeia-eu.org)

<http://faculty.uaeu.ac.ae/~sadooni/reservoir/>

[www.karst.univ-fcomte.fr/abstract.htm](http://www.karst.univ-fcomte.fr/abstract.htm)

[www.larvalbase.org](http://www.larvalbase.org)

[www.naturallyfracturedreservoirs.com](http://www.naturallyfracturedreservoirs.com)

<http://ny.water.usgs.gov>

[www.pangea.stanford.edu](http://www.pangea.stanford.edu)

[www.rike.com/Faulted.htm](http://www.rike.com/Faulted.htm)

<http://sofia.usgs.gov/publications/fs/173-96/index.html>

[www.tulane.edu/~sanelson/geol212/carbonates.htm](http://www.tulane.edu/~sanelson/geol212/carbonates.htm)

[www.speleogenesis.info](http://www.speleogenesis.info)

