ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

Χρήση Πολυφασικού Μοντέλου Μεταφοράς Πετρελοειδών σε Υπόγειο Υδροφορέα και μελέτη Σεναρίων Ανάκτησης με τη χρήση πολλαπλών γεωτρήσεων. Εφαρμογή σε περιοχή του Δυτικού Καναδά

ΑΓΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (επιβλέπων)

ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Χανιά

Μάρτιος 2012

Περιεχόμενα

Πρόλογος 7

Περίληψη 8

1. Η ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ 9

1.1 Τα υπόγεια νερά 9

1.2 Ο υδρολογικός κύκλος 10

1.3 Η σημασία των υπογείων υδάτων στη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων 12

1.4 Υδροφορείς 15

1.5 Ομοιογένεια και Ισοτροπία 21

2. ΜΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ ΥΓΡΑ (NAPLs- Non-Aqueous Phase Liquids) 23

2.1 Οι Γενικές Αρχές Κίνησης των NAPL στην Ακόρεστη Ζώνη 24

2.2 Κατανομή στις Διάφορες Φάσεις 25

2.3 Παράμετροι που Επηρεάζουν τη Μεταφορά του LNAPL 26

2.3.1 Πυκνότητα 27

2.3.2 Ιξώδες 27

2.3.3 Διεπιφανειακή Τάση 27

2.3.4 Διαβρεξιμότητα 28

2.3.5 Τριχοειδής πίεση 29

2.3.6 Κορεσμός και Υπολειμματικός κορεσμός 29

2.3.7 Σχετική Διαπερατότητα 29

2.4 Η Τύχη του LNAPL στο Υπέδαφος 30

2.4.1 Εξάτμιση 30

2.4.2 Διαλυτοποίηση 31

2.4.3 Ρόφηση 32

2.4.4 Βιοαποδόμηση 32

2.5 Μέθοδοι Απορρύπανσης Εδάφους και Υπόγειων Υδάτων 32

2.5.1 Ex situ Τεχνολογίες 33

2.5.1.1 Άντληση και επεξεργασία (pump-and-treat) 33

2.5.1.2 Μέθοδος ανάκτησης ελεύθερου προϊόντος 36

2.5.1.3. Μέθοδος άντλησης εδαφικού αέρα 37

2.5.2 In-situ Τεχνολογίες 38

2.5.2.1 Διαπερατά αντιδρώντα φράγματα 38

2.5.2.2 Air Sparging 39

2.5.2.3 Βιοαναρρόφηση (Bioslurping) 40

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 42

3.1 Φυσικοί Κίνδυνοι 42

3.2 Γεωγραφία του Saskatchewan 42

3.2.1 Φυσική Γεωγραφία 44

3.3 Γεωλογία 44

3.4 Κλίμα 44

3.5 Βιόσφαιρα 45

3.5.1 Χλωρίδα 45

3.5.2 Πανίδα 45

3.5.3 Υδρογραφία 45

3.6 Οικονομία 46

3.7 Περιγραφή του προβλήματος ρύπανσης στην περιοχή μελέτης 46

4.ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ 49

4.1 Εισαγωγή 49

4.2 Μοντέλα Ροής Υπογείων Υδάτων 49

4.3 Πρωτόκολλο Μοντελοποίησης 50

4.4 Βασικές Εξισώσεις των Συστημάτων Υπόγειας Ροής 51

4.5 Αριθμητικές Μέθοδοι των Συστημάτων Υπόγειας Ροής 58

4.6 Το Θεμελιώδες Μοντέλο και ο Σχεδιασμός του Πλέγματος 61

4.6.1 Το Θεμελιώδες Μοντέλο και η κατασκευή του 61

4.7 Είδη μοντέλων 63

4.7.1 Δισδιάστατα χωρικά μοντέλα 63

4.7.2 Ημι-τρισδιάστατα μοντέλα 65

4.7.3 Μοντέλα κάθετων τομών και πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα 65

4.8 Σχεδιασμός του Πλέγματος 66

4.8.1 Προσδιορισμός των παραμέτρων 68

4.9 Οριακές Συνθήκες 70

4.9.1 Είδη Οριακών Συνθηκών 70

4.9.2 Τοποθέτηση των Οριακών Συνθηκών 71

4.9.3 Προσομοίωση των Οριακών Συνθηκών 72

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ 75

5.1 Εισαγωγή 75

5.2 Βασικές Εξισώσεις 76

5.3 Υπολειμματικός κορεσμός NAPL 79

5.3.1 Πτώση επιφάνειας Αερίου - Πετρελαίου 79

5.3.2 Η ανύψωση της επιφάνειας του νερού 80

5.4 Υπολογισμός των απαιτούμενων παραμέτρων 81

5.4.1 Πάχος προϊόντος LNAPL – Πιέσεις 81

5.4.2 Ιδρυτικές Σχέσεις 81

5.4.3 Αρχικές συνθήκες 84

5.4.4 Οριακές Συνθήκες 84

6. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 87

6.1 Στοιχεία εισόδου στο Μοντέλο MOVER 87

6.1.1 Διαδικασία τοποθέτησης δεδομένων στο μοντέλο MOVER 87

6.1.2 Δεδομένα εισόδου 94

6.2 Σενάρια προσομοίωσης 97

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 99

7.1 Σενάριο προσομοίωσης (Α) 99

7.2 Σενάριο προσομοίωσης (Β) 101

7.3 Σενάριο προσομοίωσης (Γ) 104

7.4 Σενάριο προσομοίωσης (Δ) 106

7.5 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων 108

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 109

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 110

Πρόλογος

Η εκπόνησή της διπλωματικής εργασίας δε θα ήταν εφικτή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του Καθηγητή Γεωργίου Π. Καρατζά, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και επιβλέποντος καθηγητή της εργασίας αυτής.
Πολλές ευχαριστίες θα πρέπει να απευθύνω και στην Δρ. Ζωή Δόκου για τον καθοριστικό ρόλο που αποτέλεσε η διαρκής και ουσιαστική συνεργασία μαζί της, είτε για την βοήθεια που πρόσφερε στην συγκέντρωση των δεδομένων, είτε για ιδέες, προτάσεις και διορθώσεις που μου διατύπωσε οι οποίες συνέβαλαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της εργασίας.
Επίσης, εκφράζω την εκτίμησή μου στους υπόλοιπους καθηγητές της εξεταστικής επιτροπής. Πρόκειται για τους Καθηγητές Καλογεράκη Νικόλαο και Νικολαΐδη Νικόλαο.

Περίληψη

Όπως όλοι γνωρίζουμε, το νερό είναι απαραίτητο για τη ζωή αλλά δεν είναι ανεξάντλητο και μάλιστα το υψηλής ποιότητας γλυκό νερό είναι αρκετά δυσεύρετο και σε περιορισμένες ποσότητες. Σε πολλές χώρες του κόσμου υπάρχει ήδη σοβαρό πρόβλημα λειψυδρίας ενώ σε άλλες είναι πολύ χαμηλής ποιότητας. Ο φυσικός αυτός πόρος συνεχώς μειώνεται, κυρίως λόγω της άσκοπης χρήσης του, αλλά και λόγω συνεχών φαινομένων ρύπανσης των υπαρχόντων αποθεμάτων. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί το λόγο που θα χρειαστεί καλύτερη διαχείριση, ελαχιστοποίηση της σπατάλης αλλά και εκκίνηση διαδικασιών αποκατάστασης των μολυσμένων αποθεμάτων. Οι υπόγειοι υδροφορείς είναι από τις σημαντικότερες πηγές παροχής γλυκού νερού, έτσι η ανάγκη για την προστασία τους γίνεται όλο και περισσότερο επιτακτική.

Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο την Μοντελοποίηση της ροής, ώστε να επιτευχθεί αποκατάσταση στον υπόγειο υδροφορέα στην περιοχή Cantuar στον Καναδά λόγω διαρροής προϋπάρχουσας δεξαμενής αποθήκευσης νάφθας από την επεξεργασία φυσικού αερίου. Πιο συγκεκριμένα, στη περιοχή μελέτης υπάρχει διαρροή LNAPL (Lighter Non Aqueous Phase Liquid) στον υπόγειο υδροφορέα, που καθιστά το νερό ακατάλληλο για χρήση.

Αρχικά γίνεται μια αναφορά στις βασικές έννοιες της υπόγειας υδραυλικής ενώ στη συνέχεια αναλύεται η ροή των NAPL (Non Aqueous Phase Liquid) και ειδικότερα των LNAPL. Ακολουθεί η περιγραφή της περιοχής μελέτης και παρατίθενται δεδομένα που αφορούν την μορφολογία, το κλίμα και τους φυσικούς πόρους της ευρύτερης περιοχής. Κατόπιν, ακολουθεί η περιγραφή της μοντελοποίησης της ροής και οι εξισώσεις που την αντιπροσωπεύουν, οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης των μαθηματικών μοντέλων και οι αρχικές οριακές συνθήκες.

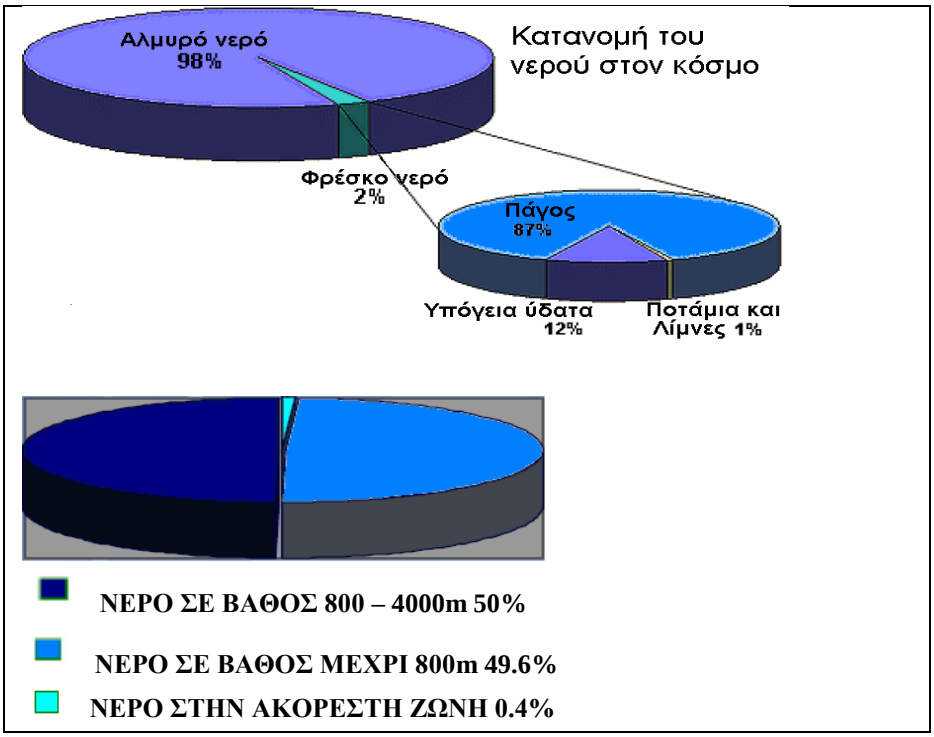
Στην παρούσα μελέτη τη μοντελοποίηση της ροής γίνεται με την εφαρμογή του μοντέλου MOVER (Multiphase areal organic Vacuum Enhanced Recovery simulator) το οποίο προσομοιώνει τη ροή και μεταφορά NAPL στο υπέδαφος καθώς και την ανάκτηση ελεύθερου προϊόντος με την βοήθεια πίεσης κενού. Αρχικά τοποθετούνται τα απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής (υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες, αρχικά υδραυλικά ύψη), ελέγχονται, δημιουργούνται τα απαραίτητα αρχεία, εξάγονται τα αποτελέσματα με βάση διαφορετικά σενάρια και τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης αυτής.

1. Η ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

1.1 Τα υπόγεια νερά

Από μια πρώτη εκτίμηση η συνολική ποσότητα νερού (περίπου ίση με $1370\times10^{15}m^3$) που υπάρχει στη γη φαίνεται ότι είναι υπεραρκετή και ουσιαστικά ανεξάντλητη, όμως λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των υδατικών αυτών πόρων η εικόνα γίνεται τελείως διαφορετική. Ουσιαστικά, το 97.3% της συνολικής αυτής ποσότητας είναι αλμυρό νερό, δηλαδή ακατάλληλο να χρησιμοποιηθεί για οικιακή, αγροτική και βιομηχανική χρήση. Επίσης, το 2.1% αφορά χιόνια και πάγους και αφαιρώντας ένα πολύ μικρό ποσοστό νερού που υπάρχει με μορφή υδρατμών στην ατμόσφαιρα, υπολείπεται τελικά ένα ποσό $8.5\times10^{15}m^3$, που αντιστοιχεί περίπου στο 0.6% του συνόλου. Αποτελεί τον εκμεταλλεύσιμο πόρο σε υγρή κατάσταση. Από το νερό αυτό το 98% είναι υπόγειο νερό, νερό δηλαδή που βρίσκεται αποθηκευμένο ή κινείται στο έδαφος. Σχεδόν η μισή ποσότητα από το υπόγειο αυτό νερό είναι αποθηκευμένη σε πολύ μεγάλα βάθη από την επιφάνεια της γης (>800m) όπου η ποσότητα των περιεχόμενων αλάτων είναι πολύ μεγάλη και από όπου η άντληση του είναι υπερβολικά δαπανηρή. Καθίσταται επομένως σαφές από τα παραπάνω ότι η μεγάλη αξία του διαθέσιμου για εκμετάλλευση νερού οφείλεται κατά κύριο λόγο στην άνιση κατανομή του τόσο χωρικά, σε διάφορες δηλαδή περιοχές της γης, όσο και χρονικά, λαμβάνοντας υπ' όψη τις εποχιακές διακυμάνσεις. Μία σχηματική απεικόνιση ακολουθεί στο σχήμα 1.1 [Λατινόπουλος, 1998].

Η παρουσία των υπόγειων νερών στον υδρολογικό κύκλο είναι ιδιαίτερα σημαντική και χαρακτηρίζεται από την κατακόρυφη διήθηση επιφανειακών νερών από την επιφάνεια του εδάφους προς τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα, την κίνηση εξαιτίας της βαρύτητας του υπόγειου αυτού νερού στην κατεύθυνση των φυσικών κλίσεων και την έξοδο του νερού και πάλι στην επιφάνεια του εδάφους, απευθείας με τη μορφή πηγών ή έμμεσα, τροφοδοτώντας φυσικούς υδάτινους αποδέκτες (λίμνες, θάλασσες, ποτάμια) [Λατινόπουλος, 1998].



Σχήμα 1.1: Η κατανομή του νερού στη Γη [Λατινόπουλος, 1998]

1.2 Ο υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος, ή αλλιώς ο κύκλος του νερού, περιγράφει την παρουσία και την κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια της Γης, καθώς και κάτω και πάνω απ' αυτή. Το νερό της Γης είναι πάντα σε κίνηση και πάντα σε αλλαγή, από την υγρή μορφή στην αέρια ή σε πάγο ξανά και αντίστροφα. Ο κύκλος του νερού λειτουργεί εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια. Η ζωή στη Γη εξαρτάται απ' αυτόν. Η Γη θα ήταν πολύ αφιλόξενο μέρος για τη ζωή χωρίς τον υδρολογικό κύκλο (Σχήμα 1.2).

Σχήμα 1.2: Υδρολογικός κύκλος [Perlman, et al., 2005]

Σαν κύκλος που είναι, ο υδρολογικός κύκλος δεν έχει αρχή, αλλά είναι βολικό να ξεκινήσει κανείς απ' τη θάλασσα. Ο ήλιος, που κινεί τον κύκλο του νερού, θερμαίνει το νερό στη θάλασσα (στους ωκεανούς) το οποίο εν μέρει εξατμίζεται και ανυψώνεται με τη μορφή ατμού στον αέρα. Νερό εξατμίζεται ακόμα από τις λίμνες, τα ποτάμια και το έδαφος. Η διαπνοή των φυτών είναι μια ακόμη λειτουργία που αποδίδει υδρατμούς στην ατμόσφαιρα. Η εξάτμιση και διαπνοή από την ξηρά συχνά δεν διακρίνονται και έτσι μιλούμε για εξατμοσοδιαπνοή. Μια μικρή ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα προέρχεται από την εξάχνωση, μέσω της οποίας μόρια από πάγους και χιόνια μετατρέπονται απευθείας σε υδρατμούς χωρίς να περάσουν από την υγρή μορφή.

Ανοδικά ρεύματα αέρα ανεβάζουν τους υδρατμούς στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου οι μικρότερες πιέσεις που επικρατούν έχουν αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας. Επειδή όμως σε χαμηλή θερμοκρασία ο αέρας δεν μπορεί πια να συγκρατεί όλη τη μάζα των υδρατμών, ένα μέρος τους συμπυκνώνεται και σχηματίζει τα σύννεφα. Τα ρεύματα του αέρα κινούν τα σύννεφα γύρω απ' την υδρόγειο. Παράλληλα τα σταγονίδια νερού που σχηματίζουν τα σύννεφα συγκρούονται και μεγαλώνουν, και τελικά πέφτουν απ' τον ουρανό ως κατακρημνίσματα, η συχνότερη μορφή των οποίων είναι η βροχή. Μια μορφή κατακρημνίσματος είναι το χιόνι, το οποίο όταν συσσωρεύεται σχηματίζει πάγους και παγετώνες. Σε σχετικά θερμότερα κλίματα, όταν έρχεται η άνοιξη, το χιόνι λιώνει και το ξεπαγωμένο νερό ρέει, σχηματίζοντας την απορροή από λιώσιμο του χιονιού. Η μεγαλύτερη ποσότητα κατακρημνισμάτων πέφτει απευθείας στους ωκεανούς [Perlman et al.,2005].

Από την ποσότητα που πέφτει στη στεριά, ένα σημαντικό μέρος καταλήγει και πάλι στους ωκεανούς ρέοντας υπό την επίδραση της βαρύτητας, ως επιφανειακή απορροή. Η μεγαλύτερη

ποσότητα της επιφανειακής απορροής μεταφέρεται στους ωκεανούς από τα ποτάμια, με τη μορφή ροής σε υδατορεύματα. Η επιφανειακή απορροή μπορεί ακόμη να καταλήξει στις λίμνες, που αποτελούν, μαζί με τους ποταμούς, τις κυριότερες αποθήκες γλυκού νερού [Perlman et al., 2005].

Ωστόσο, το νερό των κατακρημνισμάτων δεν ρέει αποκλειστικά μέσα στους ποταμούς. Κάποιες ποσότητες διαπερνούν το έδαφος με τη λειτουργία της διήθησης και σχηματίζουν το υπόγειο νερό. Μέρος του νερού αυτού μπορεί να ξαναβρεί το δρόμο του προς τα επιφανειακά υδάτινα σώματα (και τους ωκεανούς) ως εκφόρτωση υπόγειου νερού. Όταν βρίσκει διόδους προς της επιφάνεια της γης εμφανίζεται με τη μορφή πηγών. Ένα άλλο μέρος του υπόγειου νερού πηγαίνει βαθύτερα και εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν τεράστιες ποσότητες νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ακόμα και το νερό αυτό όμως συνεχίζει να κινείται και με τη πάροδο του χρόνου μέρος του ξαναμπαίνει στους ωκεανούς όπου ο κύκλος του νερού "τελειώνει" ... και "ξεκινάει" [Perlman et al., 2005].

Το Υδρολογικό Ισοζύγιο κάθε φυσικού συστήματος δίνεται από την εξίσωση:

$$P - R - G - E - T = \Delta S \qquad (1.1)$$

όπου

- P ο ρυθμός κατακρήμνισης
- R ο ρυθμός επιφανειακής ροής
- G ο ρυθμός υπόγειας ροής
- E ο ρυθμός εξάτμισης
- T ο ρυθμός διαπνοής
- ΔS η μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης του ύδατος

1.3 Η σημασία των υπογείων υδάτων στη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων

Τις τελευταίες δεκαετίες, εξαιτίας της πληθυσμιακής αλλά και της βιομηχανικής ανάπτυξης, οι ανάγκες σε νερό έχουν αυξηθεί σε παγκόσμια κλίμακα. Από την άλλη μεριά η κατανομή των υδατικών πόρων είναι πολύ ανομοιόμορφη τόσο χωρικά όσο και χρονικά έτσι ώστε να υπάρχει ανάγκη τόσο μεταφοράς όσο και αποθήκευσης νερού για τις περιοχές ή και τις περιόδους όπου παρουσιάζεται ζήτηση όγκων νερού μεγαλύτερη από τα συνολικά διαθέσιμα αποθέματά του.

Το νερό που υπάρχει στη φύση και που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για διάφορες χρήσεις, για ύδρευση πόλεων και χωριών, για άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών και για τη βιομηχανία, βρίσκεται σε δυο μορφές: ως επιφανειακό και ως υπόγειο νερό. Επιφανειακό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών ενώ υπόγειο νερό είναι αυτό που κινείται και αποθηκεύεται μέσα στο έδαφος και ειδικότερα στους πόρους των εδαφών, που για το λόγο αυτό λέγονται και υδροφορείς [Λατινόπουλος, 1998].

Ενώ όμως οι παραπάνω ορισμοί είναι σαφείς και φαίνεται ότι ο διαχωρισμός είναι ξεκάθαρος, στην πραγματικότητα υπάρχει, σε πολλές περιπτώσεις, σύνδεση των δυο αυτών υδατικών πόρων.

Έτσι, όταν η κοίτη μιας λίμνης ή ενός ποταμού, που βρίσκεται σε επαφή με έναν υπόγειο υδροφορέα, δεν είναι τελείως φραγμένη από λεπτόκοκκα υλικά, αν δηλαδή υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ λίμνης ή ποταμού και υδροφορέα, τότε, ανάλογα με το ύψος του νερού στους δυο υδάτινους όγκους, δημιουργείται ροή από ή προς τον υδροφορέα. Κατά συνέπεια, αν με ανθρώπινη επέμβαση ελεγχθεί η στάθμη της λίμνης ή του ποταμού, αυτό συνεπάγεται και έλεγχο της ροής στον υδροφορέα. Ένα άλλο παράδειγμα σύνδεσης επιφανειακών και υπόγειων νερών αφορά στα νερά των πηγών που αναβλύζουν από το έδαφος και στη συνέχεια ρέουν επιφανειακά. Ανεβάζοντας ή κατεβάζοντας τη στάθμη των υπόγειων νερών στη γειτονική περιοχή επηρεάζεται άμεσα και η παροχή των πηγών. Είναι τελικά φανερό ότι η ανθρώπινη επέμβαση στον κύκλο κίνησης του νερού είναι δυνατό να επηρεάσει σημαντικά τη διαδικασία μεταφοράς και αποθήκευσης τόσο επιφανειακών όσο και υπόγειων υδάτινων όγκων.

Ακολουθεί μία γενική συγκριτική ανάλυση σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης των υπόγειων νερών έναντι των επιφανειακών [Λατινόπουλος, 1998].

1. Η άντληση νερού από πηγάδια απαιτεί σχετικά μικρό κόστος κατασκευής και εγκαταστάσεων (γεωτρήσεις, αντλητικά συγκροτήματα) ενώ έχει ένα σημαντικό κόστος λειτουργίας, ιδιαίτερα όταν η άντληση γίνεται από βαθιά υδροφόρα στρώματα. Από την άλλη πλευρά η χρήση επιφανειακών νερών, που αποθηκεύονται σε ταμιευτήρες, μπορεί να έχει ασήμαντα έξοδα λειτουργίας όμως το αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο (υδραυλικές κατασκευές, αγωγοί μεταφοράς, φράγματα) είναι τόσο μεγάλο, ώστε αν αναχθεί σε ετήσια βάση είναι πολύ πιθανό να δώσει ένα ευνοϊκό για τα υπόγεια νερά οικονομικό ισοζύγιο.

2. Ο σχεδιασμός της διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων, εξαιτίας των πολύ μικρών ταχυτήτων κίνησης των υπόγειων νερών -σε αντίθεση με τα επιφανειακά νερά- θα απαιτούσε μακροχρόνια δειγματοληψία, που συνήθως δεν είναι πρακτικά εφικτή. Όμως

εξαιτίας αυτής της αργής κίνησης του νερού αλλά και της πολύ μεγάλης αποθηκευτικής ικανότητας των υδροφορέων ένα περιορισμένης χρονικής κλίμακας δείγμα δεδομένων είναι δυνατό να δώσει μια σαφή εικόνα των αθροιστικών επιπτώσεων από μακροχρόνιες μεταβολές. Αντίθετα, μετρήσεις επιφανειακών νερών, όπου οι μεταβολές είναι πολύ πιο συχνές και απότομες -συνήθως ακολουθούν τον εποχιακό κύκλο- δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία παρά μόνο αν καλύπτουν ένα πολυετές διάστημα δειγματοληψιών.

3. Ακριβώς επειδή όλες οι μεταβολές και γενικά τα στοιχεία τα σχετικά με τα υπόγεια υδατικά αποθέματα είναι πιο δύσκολο να μελετηθούν με επιτόπου έρευνα από ότι τα αντίστοιχα για τα επιφανειακά, παλιότερα υπήρχε μια διστακτικότητα στο σχεδιασμό διαχείρισης των υπόγειων πόρων. Ένα επιπλέον εμπόδιο ήταν και η έλλειψη ειδικών επιστημόνων και ειδικευμένου προσωπικού. Σήμερα όμως τόσο η θεωρητική υποδομή όσο και οι τεχνολογικές δυνατότητες για επιτόπου μετρήσεις έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην υπάρχει ιδιαίτερη πρακτική δυσκολία στην κατασκευή μοντέλων προσομοίωσης της λειτουργίας των υπόγειων υδατικών συστημάτων καθώς και πρόγνωσης μελλοντικών καταστάσεων. Σημαντικό ρόλο βέβαια στην περίπτωση αυτή έχουν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές.

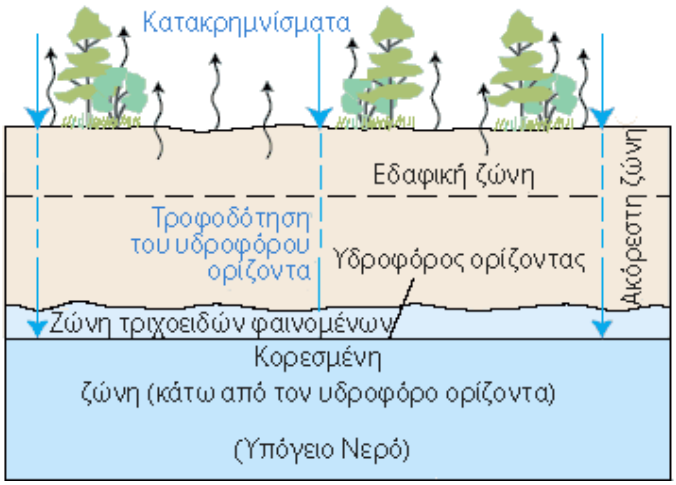
Συνολικά η άποψη που επικρατεί δεν είναι ότι οι υπόγειοι υδατικοί πόροι πλεονεκτούν απόλυτα απέναντι στους επιφανειακούς, αλλά ότι αν σε μια περιοχή συνυπάρχουν τότε η βέλτιστη λύση θα προέλθει από έναν ορθολογικό συνδυασμό και των δυο.

Ταξινόμηση των Υπογείων Υδάτων

Τα υπόγεια ύδατα κατανέμονται σε δύο ζώνες:

- Ακόρεστη ζώνη, είναι η ζώνη του υπεδάφους όπου οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από αέρα και νερό (εκτός από την περίπτωση που καταλαμβάνονται μόνο με νερό – περίπτωση πλημμύρας).
- Κορεσμένη ζώνη, είναι η ζώνη όπου όλοι οι πόροι είναι πλήρεις από νερό και κάτω από υδροστατική πίεση. Η άνω επιφάνεια της ζώνης αυτής είναι ο υδροφόρος ορίζοντας, όπου η υδροστατική πίεση ισούται με την ατμοσφαιρική [Καρατζάς, 2010].

Παρακάτω ακολουθεί μία τυπική σχηματική αναπαράσταση της τομής του εδάφους (Σχήμα 1.3).

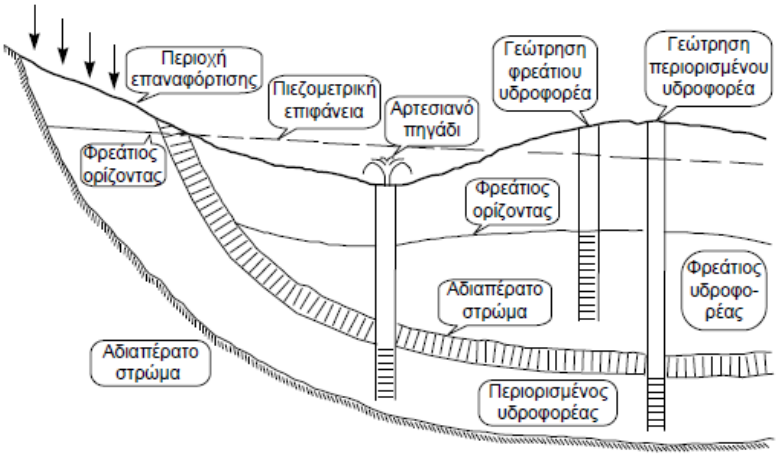


Σχήμα 1.3: Κάθετη τομή Εδάφους [Perlman et al., 2005]

1.4 Υδροφορείς

Μια γεωλογική μονάδα η οποία μπορεί να αποθηκεύσει μία αξιόλογη ποσότητα νερού και να τη μεταφέρει με ρυθμό υδρολογικά σημαντικό ονομάζεται υπόγειος υδροφορέας ή απλώς υδροφορέας [Dingman, 1994]. Ένας διακεκριμένος υδροφορέας έχει χαρακτηριστικά αποθήκευσης και μεταφοράς που μπορούν να θεωρηθούν σχετικά ομοιόμορφα και η κίνηση του νερού σε αυτόν μπορεί να θεωρηθεί ως το πεδίο ροής που προκαλείται από ένα πεδίο δυναμικής ενέργειας με απλή γεωμετρία.

Οι υδροφορείς ταξινομούνται, με βάση τη φύση του άνω ορίου τους, σε δύο κατηγορίες: τους ελεύθερους ή φρεάτιους και τους περιορισμένους, οι οποίοι απεικονίζονται στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Σχηματική παράσταση ελεύθερων και περιορισμένων υδροφορέων. [Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999]

Πιο συγκεκριμένα, οι ελεύθεροι υδροφορείς είναι εκείνοι, στους οποίους το άνω όριο είναι ο υδροφόρος ορίζοντας. Κατά κανόνα το όριο αυτό είναι μεταβλητό στο χρόνο. Η τροφοδοσία τους γίνεται από το νερό που διηθείται άμεσα από το υπερκείμενο έδαφος ή από γειτονικά επιφανειακά υδάτινα σώματα, κινούμενο κατακόρυφα υπό την επίδραση της βαρύτητας.

Οι περιορισμένοι (ή υπό πίεση) υδροφορείς είναι εκείνοι των οποίων τα άνω και κάτω όρια ορίζονται από γεωλογικούς σχηματισμούς πρακτικά αδιαπέρατους. Τα όρια των περιορισμένων υδροφορέων είναι σταθερά στο χρόνο. Η τροφοδοσία τους με νερό γίνεται συνήθως από μία περιοχή τους που έρχεται σε επαφή με το έδαφος χωρίς να μεσολαβεί αδιαπέρατο στρώμα (Σχήμα 1.4). Προφανώς η πίεση στο άνω όριο των περιορισμένων υδροφορέων δεν είναι ίση με την ατμοσφαιρική αλλά μεγαλύτερη. Σε περίπτωση που η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, ο υδροφορέας ονομάζεται αρτεσιανός.

Ασφαλώς οι παραπάνω δύο τύποι υδροφορέων αποτελούν ιδεατές καταστάσεις. Στην πραγματικότητα μπορεί ένας υδροφορέας να εμφανίζει κατά περιοχές χαρακτηριστικά και των δύο κατηγοριών. Εξάλλου τα όρια των υδροφορέων της μιας ή της άλλης κατηγορίας μπορεί να μην είναι αδιαπέρατα (είτε επειδή το σε επαφή γεωλογικό στρώμα έχει μη μηδενική διαπερατότητα, είτε λόγω τοπικών διαρροών σε ρήγματα κτλ.), οπότε μιλούμε για ελεύθερους υδροφορείς με διαρροή και περιορισμένους υδροφορείς με διαρροή [Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999].

Οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν έναν υδροφορέα είναι:

Η έννοια του πορώδους

Ορισμένοι εδαφικοί και γενικότερα γεωλογικοί σχηματισμοί επιτρέπουν τη διείσδυση αλλά και την κυκλοφορία του νερού μέσω αυτών. Από υδραυλική άποψη εντάσσονται στη γενική κατηγορία του πορώδους μέσου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ιζηματογενή, μη πλήρως στερεοποιημένα εδάφη, ή και στερεοποιημένα πετρώματα που έχουν όμως αποκτήσει ρωγμές, είτε από χημική διάβρωση (ασβεστόλιθοι) είτε από ρηγμάτωση (εκρηξιγενή, μεταμορφωσιγενή).

Τα πορώδη μέσα χαρακτηρίζονται από τις στατικές και τις δυναμικές υδραυλικές ιδιότητες τους. Ως «δεξαμενές νερού» έχουν κύριο χαρακτηριστικό τη χωρητικότητά τους, ενώ ως «αγωγοί διέλευσης νερού» χαρακτηρίζονται από τις αντιστάσεις που προβάλλουν στην κίνηση του νερού. Η τεχνική υδρολογία ενδιαφέρεται και για τα δύο αυτά χαρακτηριστικά, με έμφαση στο δυναμικό τους χαρακτήρα (μεταβολές αποθήκευσης, κίνηση νερού).

Το κύριο στατικό χαρακτηριστικό ενός πορώδους μέσου, που επιδρά στις ιδιότητες τόσο της αποθήκευσης, όσο και της αντίστασης στην κίνηση του νερού μέσα σε αυτό, είναι το ογκομετρικό πορώδες, ή απλώς πορώδες, το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των διακένων (V_V) προς το συνολικό όγκο (V_T) του πορώδες μέσου :

$$n = \frac{V_V}{V_T} \tag{1.2}$$

Το πορώδες είναι αδιάστατος αριθμός. Αυτό μπορεί να είναι ομοιογενές από γενική ή υδραυλική άποψη όταν οι γενικές ή οι υδραυλικές ιδιότητες του είναι ανεξάρτητες της θέσης του σημείου αναφοράς (δεν μεταβάλλονται στο χρόνο). Σε αντίθετη περίπτωση είναι ετερογενές [Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999].

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι η κοκκομετρική σύνθεση, η διάταξη και το σχήμα των κόκκων, ενώ χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους φαίνονται στον πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους [Freeze and Cherry, 1979]

Υλικά	**Πορώδες (%)**
Μη διαστρωματοποιημένα υλικά	
Χαλίκια	25-35
Άμμος	25-45
Ιλύς	35-50
Πηλός	45-55
Άμμος και Χαλίκια	20-30
Διαστρωματοποιημένα υλικά	
Αμμόλιθος	5-30
Δομολιτικοί Ασβεστόλιθοι	1-20
Καρστικοί Ασβεστόλιθοι	5-30
Σχιστόλιθος	1-10
Κυστοειδής βασάλτης	10-40
Αποσαθρωμένος βασάλτης	5-30
Πορώδης βράχος	10-60
Φρέσκος γρανίτης και γνευσίτης	0.01-2
Αποσαθρωμένος γρανίτης και γνευσίτης	1-15

Υδραυλική Αγωγιμότητα, Νόμος του Darcy

Οι μικροσκοπικές διαστάσεις των «σωλήνων» μιας υπόγειας ροής σε συνδυασμό με τις πολύ μικρές ταχύτητες ροής οδηγούν κατά κανόνα σε πλήρη υπεροχή των δυνάμεων συνεκτικότητας έναντι των δυνάμεων αδράνειας, δηλαδή σε στρωτή ροή. Το σχετικό μέγεθος των δυνάμεων αδράνειας έναντι των δυνάμεων συνεκτικότητας δίνει ο χαρακτηριστικός (αδιάστατος) αριθμός Reynolds.

$$R = \frac{q\,d}{v} \tag{1.3}$$

Όπου q η παροχή ανά μονάδα γεωμετρικής επιφάνειας κάθετης στη ροή, d η μέση διάμετρος εδαφικών κόκκων, και v η κινηματική συνεκτικότητα του νερού. Πειράματα έδειξαν ότι σε κοκκώδη εδάφη η ροή παραμένει στρωτή, εφόσον ο αριθμός R έχει τιμές μικρότερες της μονάδας, ενώ οι αποκλίσεις δεν είναι σημαντικές για τιμές του R που δεν ξεπερνούν το 10.

Είναι όμως φανερό ότι το πολύπλοκο σχήμα των «σωλήνων» μιας υπόγειας ροής, και γενικότερα, η χαοτική γεωμετρία του δικτύου των πόρων, δεν επιτρέπει την ακριβή μαθηματική αναπαράσταση της ροής στην πραγματική μικροσκοπική κλίμακα της. Για το λόγο αυτό επιχειρήθηκε η μακροσκοπική θεώρηση των αντιστάσεων ου πορώδους μέσου (ως συνόλου) στη ροή, σε αντιστοιχία με το πρόβλημα των συνολικών απωλειών φορτίου σε αγωγούς συναρτήσει των μακροσκοπικών γεωμετρικών δεδομένων (μέσης ταχύτητας).

Τη μακροσκοπική λύση έδωσε πρώτος ο Darcy το 1854, μετά από πειραματική μελέτη. Ο νόμος του Darcy μπορεί να θεωρηθεί συνέπεια της εξίσωσης Navier-Stokes, σε μακροσκοπικό επίπεδο.

Θεωρούμε μία τρισδιάστατη ροή που αναπτύσσεται σε ένα ισότροπο πορώδες μέσο και επιλέγουμε ένα οποιοδήποτε σημείο αναφοράς μέσα στο πεδίο ροής και μία τυχαία διεύθυνση x (η οποία δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με την κύρια διεύθυνση της ροής). Αν στο σημείο αναφοράς υπάρχει μη μηδενική υδραυλική κλίση $\partial h / \partial x$, κατά μήκος της διεύθυνσης x, τότε, σύμφωνα με το νόμο του Darcy, θα υπάρχει και μη μηδενική συνιστώσα ροής προς την κατεύθυνση που μειώνεται το υδραυλικό ύψος, με παροχή ανά μονάδα επιφάνειας q_x, γραμμικά ανάλογη της υδραυλικής κλίσης:

$$q_x = -K\frac{\partial h}{\partial x} \tag{1.4}$$

Η παροχή ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται ειδική παροχή και έχει διαστάσεις ταχύτητας. Ο συντελεστής αναλογίας K έχει επίσης διαστάσεις ταχύτητας, ονομάζεται (κορεσμένη) υδραυλική αγωγιμότητα και αποτελεί μέτρο της ικανότητας ενός ρευστού (εν προκειμένω νερού) να μετακινείται μέσω των διάκενων ενός πορώδους μέσου. Η τιμή της εξαρτάται από το ρευστό, όσο και από το πορώδες μέσο. Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η κίνηση του νερού γίνεται κατά την κατεύθυνση μείωσης του υδραυλικού ύψους.

Ο νόμος του Darcy ισχύει για αριθμούς $R_e<1$, έχει όμως παρατηρηθεί ότι μπορεί να εφαρμοστεί μέχρι και για $R_e=10$, χωρίς σοβαρό σφάλμα. Στην περίπτωση των υπογείων νερών η ροή συμβαίνει με $R_e<1$, γεγονός που εξασφαλίζει τη χρήση του νόμου του Darcy , χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων όπου έχουμε μεγάλη υδραυλική κλίση, όπως κοντά σε

κάποιο φρέαρ άντλησης ή σε περιπτώσεις που υπάρχει τυρβώδης ροή, όπως όταν έχουμε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα [Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999].

Χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας φαίνονται στον πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας [Freeze and Cherry , 1979]

Τύπος εδάφους	Υδραυλική Αγωγιμότητα (cm/s)
Άργιλος	10^{-9} -10^{-6}
Άμμος	10^{-5} -10^{-1}
Χαλίκι	10^{-1}-10^{2}

Ταχύτητα Διήθησης

Η ταχύτητα του Darcy θεωρεί ότι η ροή λαμβάνει χώρα διαμέσου της ολικής επιφάνειας χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψιν το στερεό υλικό και τους πόρους. Σε ένα πορώδες υλικό, όμως, η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και έτσι η πραγματική ταχύτητα ορίζεται ως εξής [Καρατζάς, 2010]:

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} - \frac{K}{n}\frac{dh}{dl} \tag{1.4}$$

όπου

- q_p η ταχύτητα διήθησης (L/T)
- n το πορώδες (αδιάστατο)
- dh η απώλεια φορτίου (L)
- dl το μήκος της στήλης (L)

Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας

Ο όρος της μεταβιβασιμότητας χρησιμοποιείται ευρύτατα στην υπόγεια υδραυλική. Ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο νερό δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται διαμέσου υδροφορέα μοναδιαίου πλάτους με μοναδιαία υδραυλική κλίση.

$$T = K\,b \tag{1.5}$$

όπου

- T ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας (L^2/T)
- K η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)
- b το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα (L)

Η μεταβιβασιμότητα των περιορισμένων υδροφορέων είναι σταθερή, εφόσον το πάχος τους είναι αμετάβλητο. Αντίθετα, η μεταβιβασιμότητα των ελεύθερων υδροφορέων μεταβάλλεται χωρικά, καθώς το πάχος του υδροφορέα εξαρτάται σε κάθε θέση από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα [Καρατζάς, 2010].

Ειδική αποθήκευση, αποθηκευτικότητα

Κάθε μείωση ή αύξηση στην πίεση του νερού σε ένα υδροφορέα συνοδεύεται με αντίστοιχη μείωση ή αύξηση και στον όγκο του νερού που είναι αποθηκευμένο σε αυτόν. Για την ποσοτική έκφραση της σχέσης ανάμεσα στις μεταβολές πίεσης και αποθήκευσης χρησιμοποιούνται δύο εξαρτημένες παράμετροι, η ειδική αποθήκευση S_s και η αποθηκευτικότητα (ή συντελεστής αποθήκευσης) S. Η ειδική αποθήκευση ορίζεται ως ο όγκος νερού που απομακρύνεται από ένα υδροφορέα μετά από μείωση της πίεσης, ανά μονάδα μείωσης του υδραυλικού ύψους, δηλαδή

$$S_s = \frac{\Delta V}{V\,\Delta h} \tag{1.6}$$

Όπου ΔV ο όγκος νερού που απομακρύνεται, V ο όγκος του υδροφορέα και Δh η μείωση του υδραυλικού ύψους. Αντίστοιχα, η αποθηκευτικότητα ορίζεται ως ο όγκος νερού που απομακρύνεται από ένα υδροφορέα ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα και ανά μονάδα μείωσης του υδραυλικού ύψους, δηλαδή

$$S_s = \frac{\Delta V}{F\,\Delta h} \tag{1.7}$$

Όπου F η οριζόντια επιφάνεια του υδροφορέα. Είναι φανερό ότι η ειδική αποθήκευση έχει διαστάσεις [L^{-1}], ενώ η αποθηκευτικότητα είναι αδιάστατο μέγεθος, και τα δύο μεγέθη συνδέονται με τη σχέση

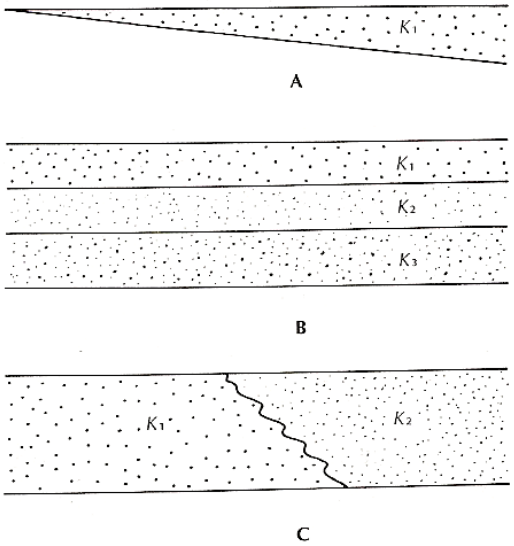
$$S = b\,S_s \tag{1.8}$$

Όπου b το πάχος του υδροφορέα [Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999].

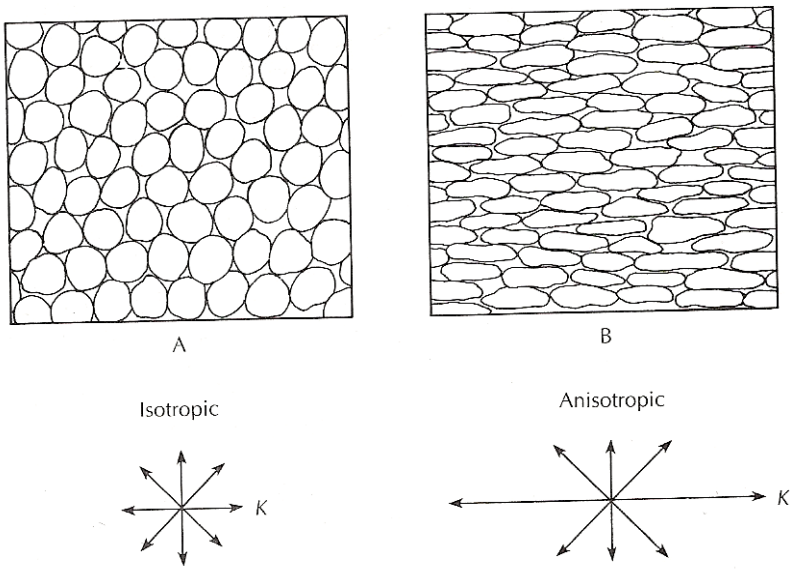
1.5 Ομοιογένεια και Ισοτροπία

Ομοιογενής καλείται ένας υδροφορέας ο οποίος έχει τις ίδιες ιδιότητες σε όλα τα σημεία. Σε ετερογενείς σχηματισμούς, οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά. Ένα παράδειγμα θα ήταν μια αλλαγή στο πάχος. Για ένα πορώδες μέσο ακόμη και αν πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα, και η ειδική αποθηκευτικότητα παραμένουν σταθερές, η αλλαγή στο πάχος θα έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των υδραυλικών ιδιοτήτων. Το Σχήμα 1.5 απεικονίζει παραδείγματα ετερογένειας σε κλαστικά ιζηματογενή εδάφη.

Σε ένα πορώδες μέσο που έχει δημιουργηθεί από σφαίρες της ίδιας διαμέτρου οι οποίες έχουν διαταχθεί στο χώρο ομοιόμορφα, η γεωμετρία των κενών είναι η ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι, η διαπερατότητα για το πορώδες είναι η ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις και το έδαφος ονομάζεται ισότροπο. Αντιθέτως, αν η γεωμετρία των κενών δεν είναι ομοιόμορφη, μπορεί να υπάρξει μια κατεύθυνση στην οποία η εσωτερική διαπερατότητα είναι μεγαλύτερη. Έτσι το μέσο ονομάζεται ανισότροπο. Το σχήμα 1.6 απεικονίζει παραδείγματα ισότροπου και ανισότροπου μέσου [Fetter, 1988].



Σχήμα 1.5: A: Ετερογενής σχηματισμός αποτελούμενος από ιζηματογενή υλικό σε μορφή σφήνας, B: Ετερογενής σχηματισμός αποτελούμενος από τρία στρώματα ιζηματογενών υλικών τα οποία έχουν διαφορετικές υδραυλικές αγωγιμότητες, C: Ετερογενής σχηματισμός αποτελούμενος από ιζηματογενή υλικά με διαφορετικές υδραυλικές αγωγιμότητες τα οποία ακολουθούν το ένα το άλλο [Fetter, 1988]



Σχήμα 1.6: Το σχήμα των κόκκων και ο προσανατολισμός μπορούν να επηρεάσουν την ισοτροπία ή την ανισοτροπία ενός εδάφους [Fetter, 1988]

2. ΜΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ ΥΓΡΑ (NAPLs- Non-Aqueous Phase Liquids)

Τα μη υδατικής φάσης υγρά NAPL (Non Aqueous Phase Liquids) όταν βρίσκονται σε επαφή με το νερό ή με τον αέρα, σχηματίζουν μία ξεχωριστή φάση και δεν αναμιγνύονται με αυτά. Οι διαφορές που υπάρχουν στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του νερού και του NAPL έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας φυσικής διεπιφάνειας μεταξύ των ρευστών, που εμποδίζει την ανάμιξη τους.

Τα NAPLs διακρίνονται σε ελαφρύτερα-από το νερό μη υδατικής φάσης υγρά (LNAPLs: Lighter-than-water Non-Aqueous Phase Liquids,) π.χ. κεροζίνη, βενζίνη, τολουένιο και σε πυκνότερα-από το νερό μη υδατικής φάσης υγρά (DNAPLs: Denser-than-water Non-Aqueous Phase Liquids,) π.χ. τριχλωροαιθυλένιο, τριχλωροαιθάνιο, διχλωροβενζίνη. Τα NAPLs παρουσιάζουν ειδικά προβλήματα για τον κατασκευαστή του μοντέλου επειδή η μεταφορά τους στο υπέδαφος είναι δύσκολο να προσομοιωθεί και επειδή μπορεί να ακολουθήσουν ακανόνιστα μονοπάτια ροής σε ετερογενή πορώδη μέσα. Η διαρροή κάτω από δεξαμενές αποθήκευσης βενζίνης για παράδειγμα είναι ένα βασικό πρόβλημα που παρατηρείται συχνά.

Τα LNAPLs δημιουργούν συχνά προβλήματα ρύπανσης, που σχετίζονται με την έκλυση διαφόρων πετρελαιοειδών στο έδαφος, στο υπέδαφος και στα υπόγεια νερά. Τα προϊόντα αυτά είναι συνήθως σύνθετα μίγματα οργανικών ενώσεων, οι οποίες έχουν διαφορετικές διαλυτότητες στο νερό. Ορισμένα συστατικά (π.χ. αιθέρες, αλκοόλες) χαρακτηρίζονται από υψηλές διαλυτότητες, ενώ άλλα (π.χ. βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο) από χαμηλές διαλυτότητες [Schnoor, 2003].

Ο πίνακας 2.1 δίνει μία σύντομη σύνοψη των πυκνοτήτων και διαλυτοτήτων τυπικών NAPL. Σε γενικές γραμμές τα LNAPLs αντιπροσωπεύουν μία σημαντική αιτία μακροπρόθεσμης ρύπανσης των υπογείων νερών σε πολλά πεδία [Newell, Acree et al., U.S. EPA].

Πίνακας 2.1: Πυκνότητες και Διαλυτότητες των NAPLs [Schnoor, 2003]

Υγρά	Πυκνότητα στους 15 ^{0}C, g cm^{-3}	Διαλυτότητα στους 10 ^{0}C, mg L^{-1}
LNAPL		
Μέσα αποστάγματα (καύσιμο πετρέλαιο)	0.82–0.86	3–8
Πετρελαϊκά αποστάγματα (καύσιμο τζετ)	0.77–0.83	10–150
Βενζίνη	0.72–0.78	150–300
Αργό πετρέλαιο	0.80–0.88	3–25
DNAPL		
Τριχλωροαιθυλένιο (TCE)	1.46	1,070
Τετραχλωροαιθυλένιο (PCE)	1.62	160
1,1,1- τριχλωροαιθάνιο (TCA)	1.32	1,700
Διχλωρομεθάνιο (CH_2Cl_2)	1.33	13,200
Χλωροφόρμιο ($CHCl_3$)	1.49	8,200
Τετραχλωράνθρακας (CCl_4)	1.59	785
Creosote (ναφθαλένιο, φαινανθρένιο, κ.λ.π)	1.11	20

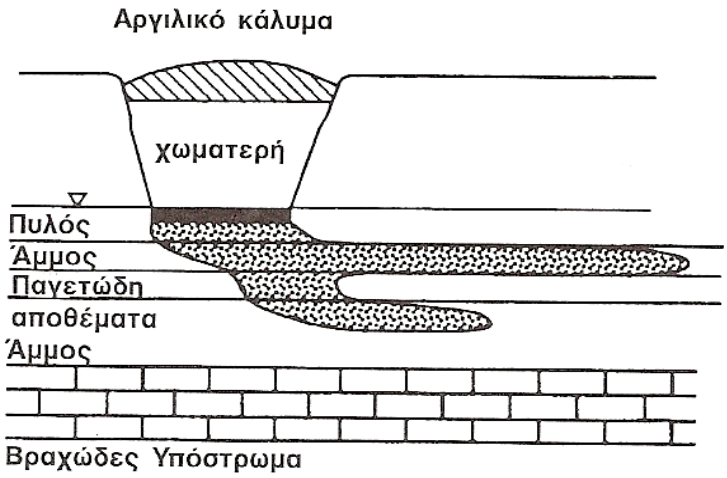
2.1 Οι Γενικές Αρχές Κίνησης των NAPL στην Ακόρεστη Ζώνη

Οι ετερογένειες προσθέτουν δυσκολίες στην μοντελοποίηση του υπόγειου νερού. Το σχήμα 2.1 δείχνει πόσο ακόμη και τα διαλυμένα συστατικά μπορεί να τείνουν να ακολουθήσουν μονοπάτια ροής που είναι δύσκολο να προσδιοριστούν από την επιφάνεια όταν παίρνονται δείγματα. Η «δαχτυλική αποτύπωση» των πλούμιων είναι συνήθης σε ιζηματογενείς αποθέσεις ή στρωματοποιημένους αλλουβιακούς σχηματισμούς. Προσεκτική ανάλυση των καρότων γεωτρήσεων (boring logs) είναι απαραίτητη για την κατανόηση της γεωλογίας και των δυνατών μονοπατιών μεταφοράς των ρυπαντών [Schnoor, 2003].

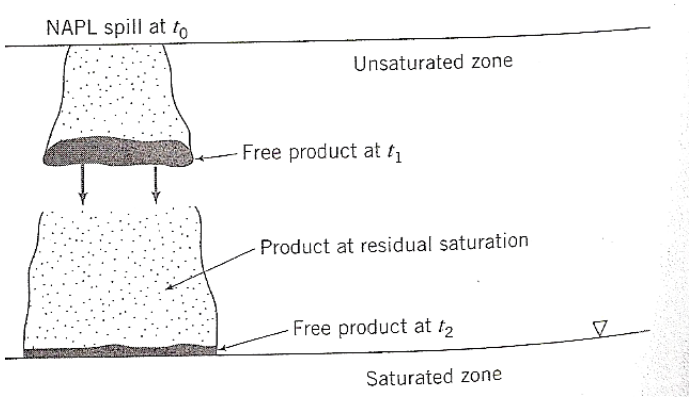
Εξετάζοντας τη διαρροή LNAPL ή DNAPL στην επιφάνεια του εδάφους παρατηρείται ότι με το χρόνο, το ελεύθερο προϊόν διηθείται προς τα κάτω, μέσω της ακόρεστης ζώνης προς τον υδροφόρο ορίζοντα. Η πιο σπουδαία διαδικασία που επηρεάζει την κίνηση του ελεύθερου προϊόντος προς τα κάτω είναι η βαρύτητα. Υποθέτοντας ότι στην ακόρεστη ζώνη το νερό των κόκκων του εδάφους είναι το ρευστό διαβροχής και ότι το υγρό μη υδατικής φάσης (NAPL) διαβρέχει το νερό και τον αέρα, το NAPL δεν αντικαθιστά το νερό από την επιφάνεια αλλά κινείται μεταξύ των πόρων όταν ο κορεσμός υπερβαίνει τον υπολειμματικό κορεσμό. Το NAPL εκτοπίζει το εδαφικό νερό και τον αέρα των πόρων όταν αυτά δεν είναι ισχυρά συνδεδεμένα με το έδαφος.

Αρκετοί σημαντικοί παράγοντες ελέγχουν τη ροή των NAPLs. Στην περίπτωση μη συνεχούς πηγής, ο όγκος του ελεύθερου προϊόντος μειώνεται βαθμιαία. Έτσι, αν η διαρροή είναι σχετικά μικρή, η διήθηση στην ακόρεστη ζώνη θα σταματήσει όταν ο συνολικός όγκος διαρροής βρίσκεται στον υπολειμματικό κορεσμό. Η κύρια απειλή για τα υπόγεια ύδατα από μικρές διαρροές είναι η συνεχής διάλυση του NAPL από τη διήθηση και η κίνηση της αέριας φάσης στην ακόρεστη ζώνη.

Το σχήμα 2.2 δείχνει ότι το NAPL τείνει να εξαπλώνεται οριζόντια καθώς κινείται προς τα κάτω. Αυτή η εξάπλωση οφείλεται στις τριχοειδείς δυνάμεις, οι οποίες λειτουργούν μαζί με τις δυνάμεις βαρύτητας για τον έλεγχο της κίνησης του. Η παρουσία στρωμάτων με διαφορετικές υδραυλικές αγωγιμότητες επηρεάζει επίσης την εξάπλωση του NAPL. Ακόμη και ένα σχετικά λεπτό, χαμηλής διαπερατότητας στρώμα θα αναστέλλει την διήθηση προς τα κάτω και θα αναγκάσει το προϊόν να κινηθεί πλευρικά. Εάν ένα τέτοιο στρώμα είναι συνεχές, το NAPL θα εξαπλωθεί μόνο εντός της ακόρεστης ζώνης. Ενώ εάν το στρώμα είναι ασυνεχές, το NAPL τελικά θα διαχυθεί και θα συνεχίσει να κινείται προς τον υδροφόρο ορίζοντα [Domenico and Schwartz, 1998]. Όταν φτάσουν στον υδροφόρο ορίζοντα, τα μεν LNAPLs επικάθονται και επιπλέουν πάνω σε αυτόν, τα δε DNAPLs συνεχίζουν την καθοδική πορεία τους μέχρι να συναντήσουν κάποιο στρώμα μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας και να δημιουργήσουν «λίμνες» ελεύθερου προϊόντος, που αποτελούν μακροχρόνια πηγή ρύπανσης των υπογείων υδάτων.



Σχήμα 2.1: «Δακτυλικά Αποτυπώματα» του πλουμίου του διαλυμένου ρυπαντή κάτω από ένα χώρο ταφής με διαρροή. Το πλούμιο ακολουθεί τις μονάδες άμμου όπου οι τιμές K_x είναι υψηλότερες. [Schnoor, 2003]

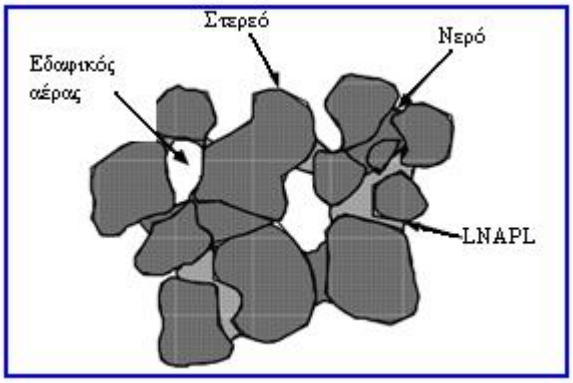


Σχήμα 2.2: Διείσδυση NAPL προς την ακόρεστη ζώνη. Όσο ο ρύπος κινείται προς τα κάτω, η ποσότητα της κινητής φάσης του ρύπου μειώνεται και αυξάνεται η ποσότητα που παγιδεύεται ως υπολειμματικός κορεσμός [Domenico and Schwartz, 1998].

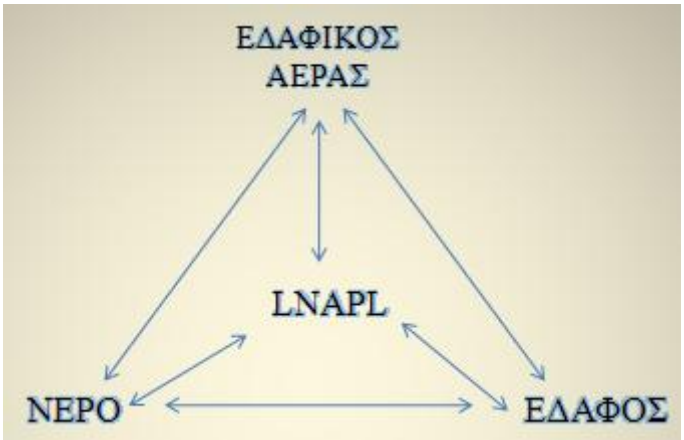
2.2 Κατανομή στις Διάφορες Φάσεις

Τα μη υδατικής φάσης υγρά μπορούν να βρίσκονται στο υπέδαφος σε οποιαδήποτε από τις τέσσερις φάσεις, δηλαδή στην υδατική, στην αέρια, στην οργανική και στην στερεά φάση (Σχήμα 2.3). Τα συστατικά του NAPL κατανέμονται και μετακινούνται από τη μία φάση στην άλλη, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως για παράδειγμα η διάλυση τους στα υπόγεια ύδατα (Σχήμα 2.4). Το ίδιο μόριο είναι δυνατό να προσροφάται σε μία στερεή επιφάνεια και στη συνέχεια να εκροφάται και να ελευθερώνεται στα υπόγεια ύδατα. Η τάση, που

παρουσιάζει μία ουσία (ρυπαντής) να κατανέμεται στις διάφορες φάσεις περιγράφεται από σταθερές κατανομής, όπως είναι η σταθερά K_n για την κατανομή μεταξύ του αέρα και του NAPL και η σταθερά K_d για την κατανομή μεταξύ της στερεάς και της υδατικής φάσης. Οι σταθερές αυτές εξαρτώνται από τις ιδιότητες και του ρύπου αλλά και του [Huling and Weaver, 1991; Hohener and Surbeck, 2004].



Σχήμα 2.3: Οι ρύποι στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους μπορεί να βρίσκονται σε τέσσερις φυσικές καταστάσεις: ως αέρια, ροφημένοι στη στερεά επιφάνεια των πόρων, διαλυμένοι στο νερό των πόρων ή ως ελεύθερη φάση [τροποποιημένο από Huling and Weaver, 1991].



Σχήμα 2.4: Κατανομή των LNAPL μεταξύ των τεσσάρων φάσεων οι οποίες είναι πιθανές να υπάρξουν στην ακόρεστη ζώνη [τροποποιημένο από Newell et al., 1995]

2.3 Παράμετροι που Επηρεάζουν τη Μεταφορά του LNAPL

Ορισμένοι παράμετροι οι οποίοι επηρεάζουν την μεταφορά του LNAPL στο υπέδαφος αναλύονται παρακάτω. Στην πραγματικότητα όμως η κίνηση του ρύπου είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθεί, καθώς οι ιδιότητες του εδάφους αλλά και του πλουμίου εξαρτώνται από διάφορους

παράγοντες οι οποίοι δεν μπορούν να είναι ακριβείς. Ωστόσο, σε επίπεδο πόρων, που αποτελεί πιο απλοποιημένη περίπτωση οι παράμετροι που επηρεάζουν τη μεταφορά και την κατανομή του NAPL είναι οι εξής:

2.3.1 Πυκνότητα

Η πυκνότητα ρ (density) ενός ρευστού ορίζεται ως η μάζα του ανά μονάδα όγκου. Για να ορίσουμε την πυκνότητα σε ένα σημείο, διατηρούμε τη μάζα Δm του ρευστού, που περιέχεται σε ένα μικρό όγκο ΔV, που περικλείει το σημείο, δια του ΔV και παίρνουμε το όριο καθώς το ΔV πλησιάζει την τιμή ε^3, όπου είναι μεγάλο σε σύγκριση με την μέση απόσταση μεταξύ των μορίων:

$$\rho = \lim_{\Delta V \to \varepsilon^3} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{2.1}$$

Η πυκνότητα των περισσότερων ρευστών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας [Streeter et al., 1993].

2.3.2 Ιξώδες

Το ιξώδες είναι η ιδιότητα εκείνη του ρευστού, που του δίνει τη δυνατότητα να αντιστέκεται σε διάτμηση. Η αντίσταση ενός ρευστού σε διάτμηση εξαρτάται από τη συνοχή του και από την ταχύτητα μεταφοράς της μοριακής ορμής. Στα υγρά, οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων είναι πολύ μικρότερες από ότι στα αέρια και, επομένως, οι δυνάμεις συνοχής είναι πολύ μεγαλύτερες. Στα υγρά, το ιξώδες οφείλεται κυρίως στις δυνάμεις συνοχής και επειδή αυτές μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, μειώνεται και το ιξώδες. Το ιξώδες είναι πρακτικά ανεξάρτητο από την πίεση και εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία [Streeter et al., 1993].

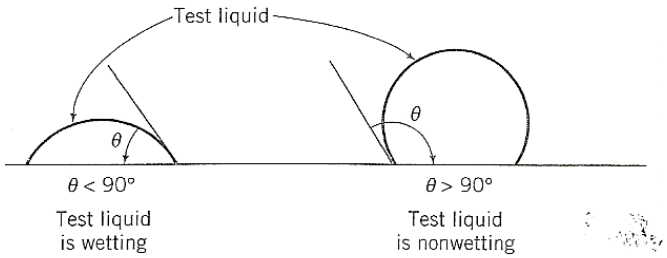
2.3.3 Διεπιφανειακή Τάση

Η μη-αναμιξιμότητα νερού-υδρογονανθράκων συνεπάγεται την ύπαρξη ανάμεσά τους μιας διακριτής διεπιφάνειας. Τα μόρια καθενός από τα ρευστά που δεν βρίσκονται στη διεπιφάνεια δέχονται από τα γειτονικά τους μόρια και ασκούν σε αυτά συμμετρικές δυνάμεις, ενώ τα μόρια στη διεπιφάνεια δέχονται ασύμμετρες δυνάμεις με αποτέλεσμα το σύστημα να συμπεριφέρεται ως οι δύο φάσεις να διαχωρίζονται από μια μεμβράνη. Ως επιφανειακή τάση ορίζεται η δύναμη ανά μονάδα μήκους η οποία είναι απαραίτητη για να διατηρηθεί η επαφή μεταξύ των επιφανειών των δύο ρευστών. Έχει διαστάσεις δύναμης ανά μονάδα μήκους και συνήθως αναφέρεται σε μονάδες CGS (dyne/cm).

Η εμφάνιση της επιφανειακής τάσης τείνει πάντα να συρρικνώσει την οριακή επιφάνεια των υγρών. Οριακές επιφάνειες είναι: η ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, οι επιφάνειες των τοιχωμάτων του δοχείου μέσα στο οποίο περιέχεται το υγρό, η εσωτερική επιφάνεια του αγωγού μέσα στον οποίο ρέει το υγρό και η διεπιφάνεια που το χωρίζει από άλλο υγρό ή αέριο. Στην περίπτωση μη-αναμίξιμων υγρών (όπως πετρέλαιο-νερό) η τάση στη διεπιφάνεια αναφέρεται συνήθως ως διεπιφανειακή τάση σ (interfacial tension) και αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα μόνο των συστημάτων στα οποία απαντάται διεπιφάνεια (π.χ. πετρέλαιο-νερό, ή αέριο-νερό) [Σταματάκη, 2005].

2.3.4 Διαβρεξιμότητα

Διαβρεξιμότητα είναι η τάση ενός υγρού να προσελκύεται σε μια επιφάνεια. Σύμφωνα με Demond και Roberts (1987), το μόνο άμεσο μέτρο της διαβροχής είναι η γωνία επαφής μεταξύ τους. Η ιδέα της γωνίας επαφής μπορεί να απεικονιστεί με ένα πείραμα στο οποίο μια επιφάνεια, όπως ένα κομμάτι γυαλί είναι βυθισμένο σε ένα ρευστό αναφοράς, όπως το νερό, και μια σταγόνα από υγρό δοκιμής τοποθετείται στην επιφάνεια του. Η εφαπτομένη στο σημείο όπου και τα τρία στοιχεία (επιφάνεια, ρευστό αναφοράς, και υγρό δοκιμής) είναι σε επαφή, δίνει τη γωνία επαφής. Μία γωνία επαφής $<90^o$ σημαίνει ότι το υγρό δοκιμής διαβρέχεται, ενώ μία γωνία επαφής $>90^o$ σημαίνει ότι το ρευστό αναφοράς διαβρέχεται και το υγρό δοκιμής δεν διαβρέχεται (Σχήμα 2.5) [Domenico and Schwartz, 1998].



Σχήμα 2.5: Ορισμός διαβρεξιμότητας βάσει της γωνίας επαφής [Domenico and Schwartz, 1998].

Η διαβρεξιμότητα είναι μοναδική για συγκεκριμένους τύπους στερεών και υγρών. Ωστόσο, υπάρχουν μερικές γενικεύσεις όπως:

- Το νερό είναι πάντα το υγρό διαβροχής σε σχέση με το πετρέλαιο ή τον αέρα στο πορώδες μέσο.
- Το πετρέλαιο είναι το υγρό διαβροχής όταν συνδυάζεται με τον αέρα, αλλά όχι όταν συνδυάζεται με το νερό.

- Το πετρέλαιο είναι το υγρό διαβροχής σε οργανική ύλη (τύρφη ή χούμο) σε σχέση είτε με το νερό είτε με τον αέρα.
- Ο χαρακτήρας διαβροχής των οργανικών ρύπων παραμένει αβέβαιος.

2.3.5 Τριχοειδής πίεση

Η πίεση στις δύο πλευρές της διεπιφάνειας δύο μη-αναμίξιμων, ηρεμούντων υγρών δεν είναι η ίδια αν ληφθεί υπόψη και η διεπιφανειακή τάση. Μεγαλύτερη είναι η πίεση του υγρού που βρίσκεται στην κοίλη πλευρά της διεπιφάνειας. Χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα μία σταγόνα πετρελαίου σε νερό, η καμπυλότητα της επιφάνειας υποδηλώνει ότι η πίεση της πετρελαϊκής φάσης P_o είναι μεγαλύτερη της πίεσης της υδατικής φάσης P_w. Η διαφορά πίεσης των δύο φάσεων ονομάζεται τριχοειδής πίεση (Capillary Pressure-P_{cap}) [Σταματάκη, 2005].

Τρία βασικά χαρακτηριστικά της τριχοειδούς πίεσης είναι :

1. Είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους των πόρων (εκφρασμένου μέσω της ακτίνας r).
2. Είναι αντιστρόφως ανάλογη του κορεσμού σε νερό (διαβρέχον ρευστό)
3. Εξαρτάται από τη φύση και των δύο ρευστών.

2.3.6 Κορεσμός και Υπολειμματικός κορεσμός

Κορεσμός ορίζεται το σχετικό κλάσμα του συνολικού χώρου των πόρων που περιέχουν ένα υγρό (π.χ. NAPL) προς τον αντίστοιχο όγκο των κενών του πορώδους μέσου.

Υπολειμματικός κορεσμός θεωρείται το σημείο εκείνο στο οποίο το συνεχές LNAPL γίνεται ασυνεχές και ακινητοποιείται από τις τριχοειδείς δυνάμεις. Αντιπροσωπεύει μία εστία συνεχούς ρύπανσης για το υπέδαφος και τα υπόγεια ύδατα, η οποία συγκρατείται με ισχυρές δυνάμεις στους πόρους του εδάφους και δεν είναι δυνατό να αφαιρεθεί με τις σύγχρονες μεθόδους αποκατάστασης του εδάφους.

Διάφοροι παράγοντες όπως είναι το πορώδες, οι ιδιότητες της διαβρεξιμότητας των ρευστών και των στερεών του εδάφους, οι υδραυλικές βαθμίδες, η διεπιφανειακή τάση, το ιξώδες η πυκνότητα μπορούν να επηρεάσουν τον υπολειμματικό κορεσμό [Newell et al., 1995].

2.3.7 Σχετική Διαπερατότητα

Ως ειδική ή απόλυτη διαπερατότητα (specific or absolute permeability) ορίζεται η ικανότητα του πορώδους μέσου να επιτρέπει σε ένα ρευστό με το οποίο είναι κορεσμένο να ρέει μέσω των

πόρων του. Οι σχετικές διαπερατότητες πετρελαίου και νερού ορίζονται ως ο λόγος της ενεργούς διαπερατότητας κάθε φάσης προς την απόλυτη διαπερατότητα [Σταματάκη, 2005].

Οι τιμές της σχετικής διαπερατότητας κυμαίνονται μεταξύ του 0 και του 1. Θεωρώντας ένα υποθετικό σύστημα νερό/ LNAPL, παρατηρείται ότι τα δύο υγρά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους έτσι ώστε να μειωθεί η κινητικότητα και των δύο. Επιπλέον, παρατηρείται ότι υπάρχει ένα ελάχιστο επίπεδο κορεσμού, το οποίο πρέπει να επιτευχθεί ώστε η διαπερατότητα σε ένα υγρό να μην είναι μηδενική. Το όριο αυτό στην τιμή του κορεσμού ονομάζεται υπολειμματικός κορεσμός [Newell et al., 1995].

2.4 Η Τύχη του LNAPL στο Υπέδαφος

Η μεταφορά και τύχη των χημικών ουσιών που απαρτίζουν τα LNAPL και κατανέμονται ανάμεσα στις τέσσερις φάσεις (αέρας, νερό, στερεά και οργανικά) επηρεάζονται από διάφορες διεργασίες που μπορούν να διαφοροποιήσουν την σύσταση τους. Οι διεργασίες αυτές είναι η εξάτμιση, η διαλυτοποίηση, η ρόφηση, και η αποδόμηση.

2.4.1 Εξάτμιση

Ως εξάτμιση ορίζεται η μετάβαση χημικών ουσιών από τη στερεή ή την υγρή φάση στην αέρια. Εξαρτάται άμεσα από τη διαλυτότητα, το μοριακό βάρος, την τάση ατμών και τη σταθερά Henry των ρύπων που υπάρχουν στο υπέδαφος, καθώς επίσης και από τα χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Η εξάτμιση παίζει σημαντικό ρόλο στην τύχη και τη μεταφορά των ρύπων στο υπέδαφος για τους ακόλουθους λόγους [Γιδαράκος, Αϊβαλιώτη, 2005]:

- Προκαλεί την απομάκρυνση οργανικών ρύπων από την διαλυμένη φάση (υπόγειο νερό)
- Είναι δυνατόν να προκαλέσει μεταφορά των ρύπων από την κορεσμένη στην ακόρεστη ζώνη και στη συνέχεια στην ατμόσφαιρα
- Μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία εύφλεκτων αερίων στην ακόρεστη ζώνη με κίνδυνο ανάφλεξης ή ακόμη και έκρηξης.

Σύμφωνα με το νόμο του Henry η μερική πίεση των ατμών μιας ουσίας, πάνω από την επιφάνεια του υγρού μέσα στο οποίο είναι διαλυμένη, είναι ανάλογη της συγκέντρωσής της στο διάλυμα:

$$P_i = K_H X_i \tag{2.2}$$

Όπου P_i, είναι η μερική πίεση της χημικής ουσίας στην αέρια φάση (atm), X_i, είναι η συγκέντρωση της χημικής ουσίας i στο νερό (mol/m^3) και, K_H, είναι η σταθερά Henry (atm·m^3/mol). Ο νόμος του Henry ισχύει για ελάχιστα διαλυτές μη ηλεκτρολυτικές ενώσεις όπου η αέρια φάση θεωρείται ιδανική [Noggle, 1985]. Η τάση μιας ουσίας να εξατμιστεί αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η σταθερά του νόμου του Henry.

2.4.2 Διαλυτοποίηση

Η διαλυτότητα αναφέρεται στην ποσότητα της μάζας της διαλυμένης ουσίας ανά μονάδα όγκου του διαλύματος, μετριέται σε mg / L και συχνά θεωρείται ως η μέγιστη συγκέντρωση που μπορεί να επιτευχθεί σε ένα ρυπασμένο όγκο. Ο πίνακας 2.1 δείχνει ότι οι διαλυτότητες μπορεί να κυμαίνονται μεταξύ αρκετών τάξεων μεγέθους. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις είναι σπάνια τόσο υψηλές όσο υποδεικνύουν οι διαλυτότητες. Αρκετοί παράγοντες είναι υπεύθυνοι για αυτό, συμπεριλαμβανομένης της ετερογένειας, της σύνθετης κίνησης λόγω διάλυσης και της ανάμειξης υδάτων διαφορετικών συγκεντρώσεων. Η αποτελεσματική διαλυτότητα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$S_i^{\,e} = x_i S_i \tag{2.4}$$

όπου, S_i^e, είναι η αποτελεσματική διαλυτότητα του συστατικού i στο νερό, x_i, είναι το γραμμομοριακό κλάσμα του συστατικού i στο μίγμα NAPL και, S_i, είναι η διαλυτότητα του καθαρού συστατικού στο νερό [Domenico and Schwartz, 1998].

Η θερμοκρασία, η πίεση, το pH και η αλληλεπίδραση άλλων ουσιών είναι κάποιοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν την διαλυτότητα. Αν και η διαλυτότητα στο νερό των περισσότερων οργανικών ενώσεων αυξάνεται με τη θερμοκρασία, η διεύθυνση και το μέγεθος της σχέσης θερμοκρασίας-διαλυτότητας μεταβάλλονται. Παρόμοια, η επίδραση της συνύπαρξης και άλλων διαλυτών στη διαλυτότητα, εξαρτάται από την ειδική ανάμιξη των ουσιών και τις συγκεντρώσεις. Γενικά, η διαλυτότητα των οργανικών ενώσεων στο νερό μειώνεται με αύξηση της αλατότητας. Όμως, το διαλυμένο οργανικό υλικό, όπως τα φουλβικά και χουμικά οξέα, παρατηρείται ότι αυξάνει τη διαλυτότητα των υδρόφοβων οργανικών ενώσεων στο νερό [Lyman et al., 1982; Chiou et al., 1986].

Σε γενικές γραμμές, οι μεγάλοι ρυθμοί διαλυτοποίησης είναι πιθανό να συνδέονται με αυξημένες ταχύτητες ροής στον υδροφόρο ορίζοντα, μεγάλες τιμές κορεσμού και αυξημένη επιφάνεια επαφής μεταξύ NAPL και νερού [Mercer and Cohen, 1990].

2.4.3 Ρόφηση

Η συσσώρευσης μιας χημικής ουσίας σε μια διεπιφάνεια (π.χ. εδαφικών σωματιδίων-υπόγειου νερού) χαρακτηρίζεται ως προσρόφηση. Γενικά όμως υπάρχουν τρείς διαφορετικοί όροι που συνδέονται με το φαινόμενο αυτό: η προσρόφηση, η απορρόφηση και η ρόφηση. Η προσρόφηση ορίζεται ως η συσσώρευση μιας ουσίας σε μία διεπιφάνεια, η απορρόφηση ως η κατανομή μιας ουσίας μεταξύ δύο φάσεων, ενώ η ρόφηση περιλαμβάνει την προσρόφηση και την απορρόφηση [Γιδαράκος, Αϊβαλιώτη, 2005].

Η διαλυτότητα, η ιοντική φόρτιση, η πολικότητα , το pH αλλά και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό είναι μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της ρόφησης σε ρυπασμένα πεδία. Το προσροφημένο NAPL είναι ένα μικρό ποσοστό σε σχέση με την συνολική ποσότητα του ρύπου, με την μεγαλύτερη μάζα από αυτό να βρίσκεται στην οργανική φάση [Newell et al., 1995].

2.4.4 Βιοαποδόμηση

Όταν η ρυπασμένη περιοχή βρίσκεται μέσα στο υδροφόρο στρώμα, η διαθεσιμότητα του οξυγόνου γίνεται ένα ιδιαίτερα κρίσιμο πρόβλημα για την αερόβια βιοαποδόμηση των οργανικών ρύπων. Πολλά από τα συστατικά του NAPL υφίστανται βιολογική αποδόμηση όταν βρίσκονται στην υδατική φάση, όμως δεν έχει παρατηρηθεί ποτέ αποδόμηση στην καθαρή φάση του NAPL καθώς οι μικροοργανισμοί δεν δύναται να επιβιώσουν μέσα σε αυτή [Newell et al., 1995].

2.5 Μέθοδοι Απορρύπανσης Εδάφους και Υπόγειων Υδάτων

Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων αποτελεί ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα, λόγω της ευρείας χρήσης του υπόγειου νερού για ύδρευση και άρδευση, καθώς επίσης και της αλληλεπίδρασης του με επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες (π.χ. λίμνες, ποτάμια), που έρχονται σε επαφή με τον άνθρωπο και την πανίδα. Η άντληση και η χρήση ρυπασμένου νερού έχει οδηγήσει πολλές φορές στο παρελθόν σε επιδημίες και σοβαρές ομαδικές ασθένειες.

Ως εκ τούτου, η ανάγκη για προστασία και ανάπτυξη κατάλληλων τεχνολογιών αποκατάστασης υπόγειων υδάτων έχει από καιρό αποτελέσει πρωτεύον ζήτημα σε ολόκληρο τον κόσμο. Στη σημερινή εποχή υπάρχουν αρκετά συστήματα επεξεργασίας υπόγειων υδάτων, τα οποία έχουν διαφορετικούς στόχους εξυγίανσης, όπως για παράδειγμα τον περιορισμό της εξάπλωσης της υφιστάμενης ρύπανσης, την απομόνωση της πηγής ρύπανσης ή την απομάκρυνση των ρύπων από το υπόγειο νερό. Τα συστήματα αυτά σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες αποκατάστασης

ρυπασμένων εδαφών, είναι δυνατόν να σχηματίσουν μια ολοκληρωμένη ασπίδα προστασίας του υπόγειου περιβάλλοντος.

Ο κυριότερος διαχωρισμός των τεχνολογιών αποκατάστασης υπόγειων υδάτων είναι σε in-situ και σε ex-situ, ανάλογα με το αν εφαρμόζεται απευθείας στο υπέδαφος ή αν πρόκειται για άντληση του ρυπασμένου νερού. Πέρα από αυτόν τον διαχωρισμό, μπορεί να πραγματοποιηθεί κατάταξη αυτών βάσει του είδους των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα για την απομάκρυνση των υφιστάμενων ρύπων, οπότε προκύπτουν οι φυσικές και οι χημικές.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι βασικότερες τεχνολογίες αποκατάστασης υπόγειων υδάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα και κατά κύριο λόγο αφορούν τα μη υδατικής φάσης υγρά (NAPL).

2.5.1 Ex situ Τεχνολογίες

2.5.1.1 Άντληση και επεξεργασία (pump-and-treat)

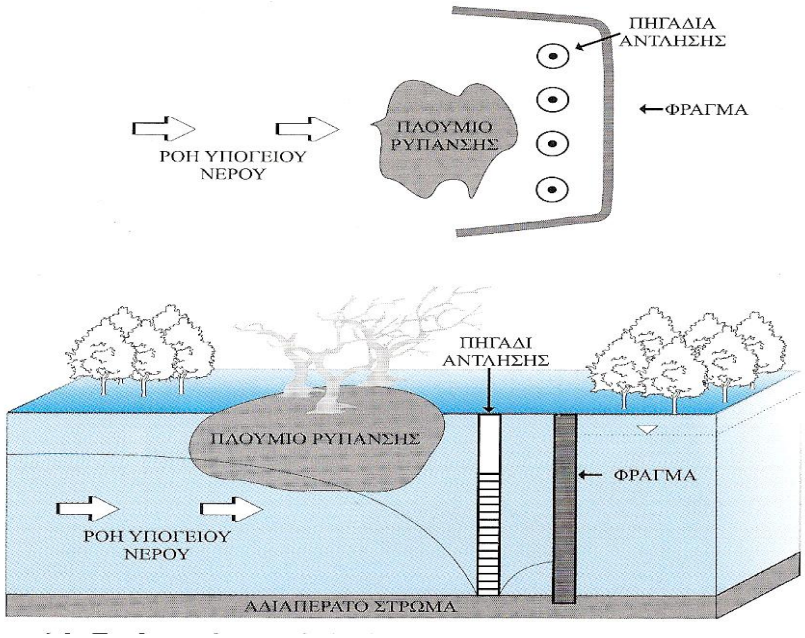
Για πολλά χρόνια η τεχνολογία της άντλησης και υπέργειας επεξεργασίας του υπόγειου νερού αποτελούσε τη μοναδική μέθοδο η οποία εφαρμοζόταν για την αποκατάσταση των ρυπασμένων υδροφορέων και την εξυγίανση των υπόγειων υδάτων. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι το ρυπασμένο υπόγειο νερό αντλείται και μεταφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους, όπου επεξεργάζεται και στη συνέχεια επανατοποθετείται στο υπέδαφος ή καταλήγει σε επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες. Η τεχνολογία της άντλησης και επεξεργασίας του υπόγειου νερού επιτυγχάνει πολύ ικανοποιητικό βαθμό καθαρισμού και ταυτόχρονα περιορίζει την εξάπλωση της ήδη υπάρχουσας ρύπανσης [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005].

Η τεχνολογία άντλησης και επεξεργασίας μπορεί να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί σε ένα ρυπασμένο πεδίο με δύο βασικούς τρόπους, έτσι ώστε να επιτυγχάνει πρώτον τον περιορισμό του υπάρχοντος πλουμίου ρύπανσης και δεύτερον την εξυγίανση του υπόγειου νερού.

Πιο συγκεκριμένα, για να περιοριστεί η εξάπλωση του υπάρχοντος πλουμίου, χρησιμοποιούνται πηγάδια άντλησης και πηγάδια διοχέτευσης νερού στον υπόγειο υδροφορέα, τα οποία έχουν ως στόχο την αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής και τον έλεγχο της. Οι ρυθμοί άντλησης είναι γενικά μικροί και συχνά χρησιμοποιούνται φράγματα, ανάντη και κατάντη της πηγής ρύπανσης, για ακόμη μεγαλύτερο περιορισμό του υπάρχοντος πλουμίου (Σχήμα 2.6).

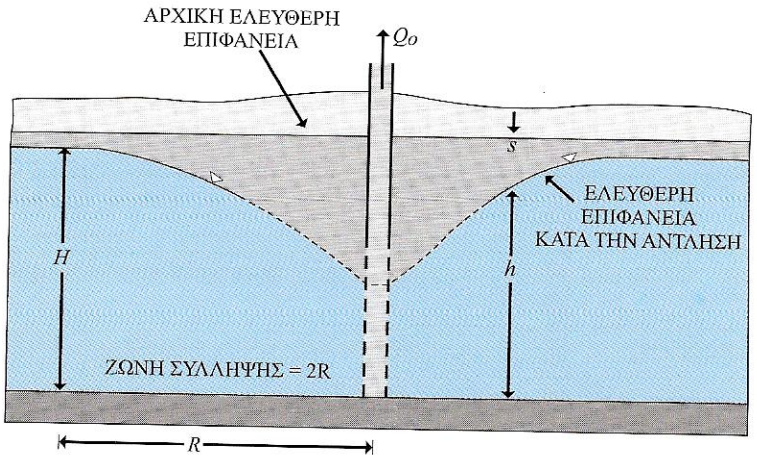
Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση, η άντληση του υπόγειου νερού γίνεται με μεγάλους ρυθμούς με στόχο τον τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφορέα με μεγάλες ποσότητες επεξεργασμένου νερού [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005].

Για το σωστό σχεδιασμό συστημάτων άντλησης και επεξεργασίας απαιτείται καλή γνώση της υδρογεωλογίας της περιοχής καθώς και της έκτασης του υφιστάμενου πλουμίου ρύπανσης.



Σχήμα 2.6: Συνδυασμός πηγαδιών άντλησης και φραγμάτων για περιορισμό υφιστάμενου πλουμίου ρύπανσης [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005]

Η ζώνη σύλληψης η οποία αποτελεί την απόσταση γύρω από ένα πηγάδι άντλησης στην οποία πραγματοποιείται ροή του υπόγειου νερού προς αυτό στην οποία παρατηρείται ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα είναι η σημαντικότερη σχεδιαστική παράμετρος για την τεχνολογία της άντλησης και επεξεργασίας. (Σχήμα 2.7). Η ακτίνα της ζώνης σύλληψης θα καθορίσει τον αριθμό των απαιτούμενων πηγαδιών άντλησης και την τοποθέτηση τους στη ρυπασμένη περιοχή και επηρεάζεται κυρίως από τον ρυθμό άντλησης [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005].



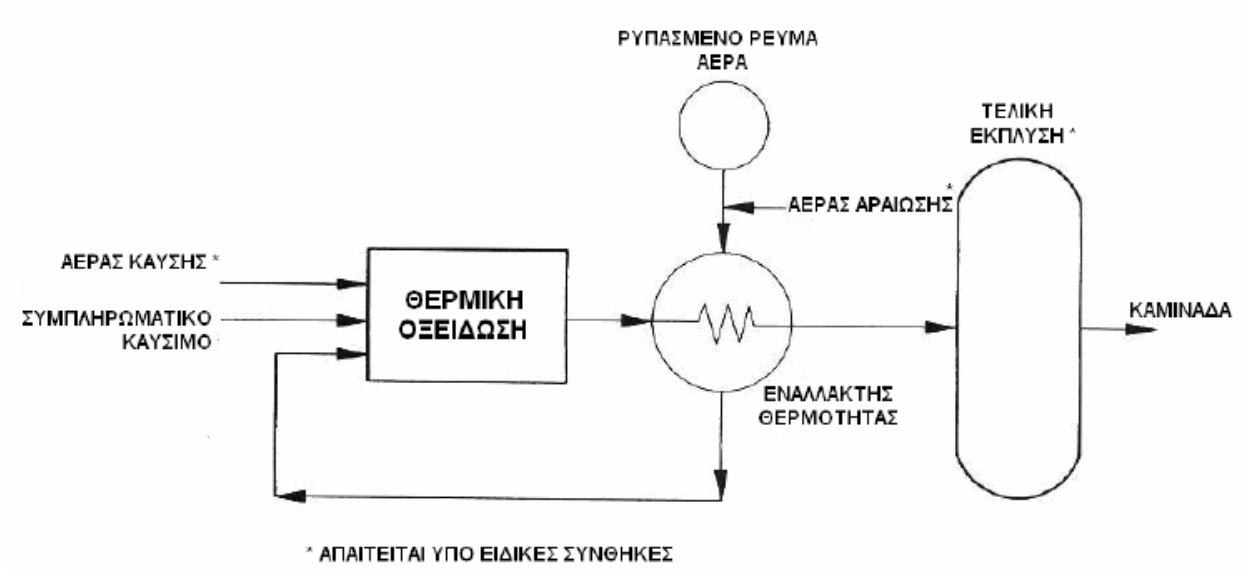
Σχήμα 2.7: Τυπική μορφή ζώνης σύλληψης ενός πηγαδιού άντλησης [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005]

Δύο από τις μεθόδους περαιτέρω επεξεργασίας μετά από την άντληση είναι η εκφύσηση με αέρα (air stripping) και η θερμική οξείδωση.

Η μέθοδος εκφύσησης με αέρα πραγματοποιείται με διοχέτευση αέρα στο ρυπασμένο νερό ενισχύοντας την εξάτμιση των διαφόρων συστατικών (μεταφορά από την υγρή φάση στην αέρια). Σύμφωνα με μελέτες, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και οικονομική στην απομάκρυνση πτητικών οργανικών ρύπων από υπόγεια ύδατα με σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις (<200mg/L).

Η διαδικασίας της έκφυσης πραγματοποιείται συνήθως σε πύργους, στους οποίους η τροφοδοσία του ρυπασμένου νερού γίνεται απο την κορυφή και κατανέμεται ομοιόμορφα με τη βοήθεια δακτυλίων ή αυλακιών, ενώ ο αέρας μπορεί να διοχετεύεται κάθετα ή οριζόντια στη ροή του νερού [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005].

Η μέθοδος της θερμικής οξείδωσης βασίζεται στη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για την οξείδωση των πτητικών ενώσεων σε αβλαβή τελικά προϊόντα. Οι συνθήκες αυτές επιτυγχάνονται με τη θέρμανση του αέρα παρουσία οξυγόνου σε θερμοκρασίες 650-870°C. Η θερμική οξείδωση εφαρμόζεται κυρίως όταν υπάρχει υψηλό φορτίο ρύπων στο αέριο ρεύμα. Για συγκεντρώσεις ρύπων >12000 ppm, η θερμοκρασία λειτουργίας επιτυγχάνεται λόγω έκλυσης θερμικής ενέργειας κατά την οξείδωση των οργανικών ενώ για συγκεντρώσεις <12000 ppm απαιτείται συνήθως προσθήκη καυσίμου ώστε να μπορεί να διατηρηθεί η σωστή θερμοκρασία λειτουργίας [Πανταζίδου κ.α., 2004]. Στο σχήμα 2.8 φαίνεται μία τυπική εγκατάσταση θερμικής οξείδωσης.

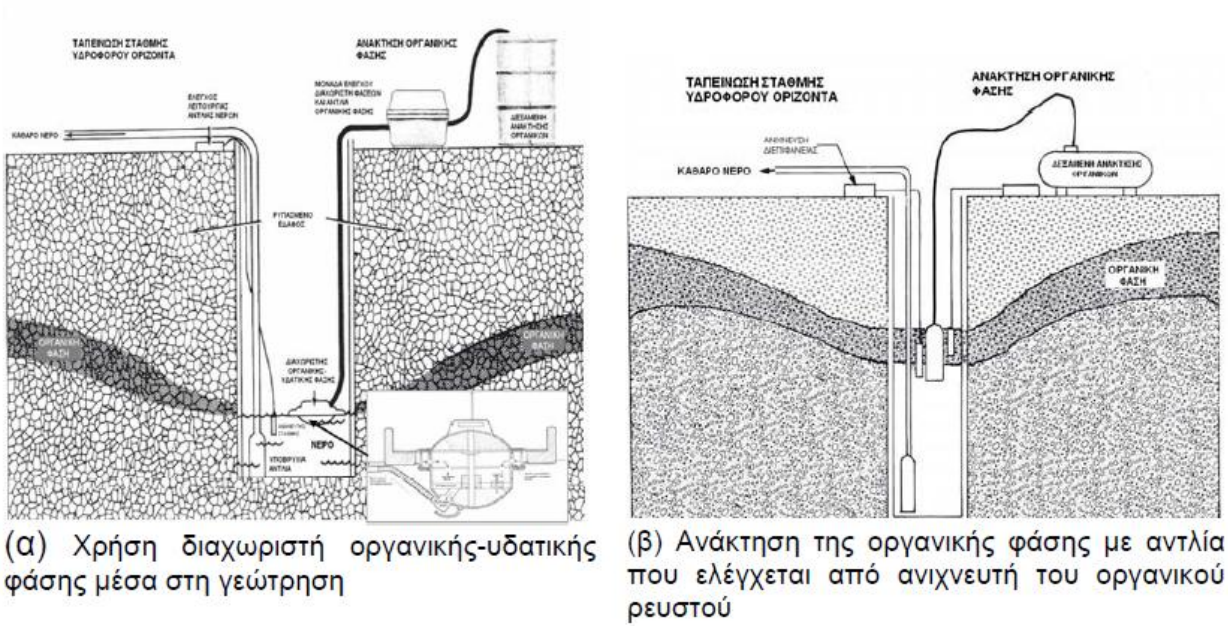


Σχήμα 2.8: Διάγραμμα ροής τυπικής εγκατάστασης θερμικής οξείδωσης [Πανταζίδου κ.α., 2004]

2.5.1.2 Μέθοδος ανάκτησης ελεύθερου προϊόντος

Οι υδρογονάνθρακες που επιπλέουν μπορούν να απομακρυνθούν με την χρήση γεωτρήσεων στις οποίες υπάρχει άντληση του ελεύθερου προϊόντος με παράλληλη ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα. Η άντληση των νερών πρέπει να γίνεται με όση ταχύτητα απαιτείται για να παρεμποδιστεί η εξάπλωση της οργανικής κηλίδας.

Στην περίπτωση που η αντλία που χρησιμοποιείται απομακρύνει και την οργανική φάση αλλά και το νερό, τότε ο διαχωρισμός τους γίνεται σε επιφανειακές εγκαταστάσεις. Συνήθως όμως χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές αντλίες, μία για την άντληση της οργανικής φάσης και μία για την άντληση νερού. Για να είναι εύκολος και αποτελεσματικός ο διαχωρισμός των φάσεων εφαρμόζεται μέσα στην γεώτρηση κατάλληλο φίλτρο το οποίο διαχωρίζει την οργανική φάση από το νερό (Σχήμα 2.9α) ή χρησιμοποιείται αντλία η οποία βυθίζεται μόνον μέσα στην οργανική φάση με τη βοήθεια ενός ανιχνευτή (Σχήμα 2.9β) [Πανταζίδου κ.α., 2004].



(α) Χρήση διαχωριστή οργανικής-υδατικής φάσης μέσα στη γεώτρηση

(β) Ανάκτηση της οργανικής φάσης με αντλία που ελέγχεται από ανιχνευτή του οργανικού ρευστού

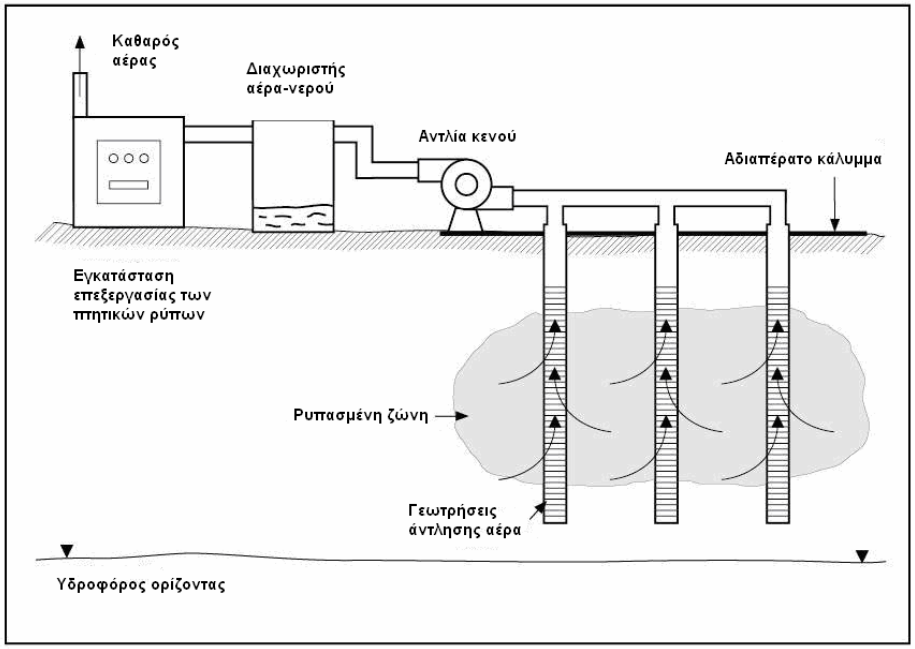
Σχήμα 2.9: Διαρροή οργανικής φάσης προς το υδροφόρο στρώμα [Πανταζίδου κ.α., 2004]

2.5.1.3. Μέθοδος άντλησης εδαφικού αέρα

Για την άντληση πτητικών και ημιπτητικών οργανικών ουσιών από την ακόρεστη ζώνη χρησιμοποιείται ευρέως η μέθοδος άντλησης εδαφικού αέρα (SVE, Soil Vapor Extraction). Στο πορώδες της ακόρεστης ζώνης δημιουργείται ροή αέρα ώστε να επιταχυνθεί η εξάτμιση των ρύπων οι οποίοι μπορεί να βρίσκονται στη μορφή ελεύθερης οργανικής φάσης, διαλυμένοι στο νερό ή ροφημένοι στην επιφάνεια των στερεών σωματιδίων. Στη συνέχεια, το ρεύμα του αέρα που μεταφέρει τους ρύπους αντλείται στην επιφάνεια και υποβάλλεται σε επεξεργασία.

Τα βασικά στοιχεία μιας τυπικής εγκατάστασης άντλησης εδαφικού αέρα (ΑΕΑ) παρουσιάζονται στο σχήμα 2.10.

Γεωτρήσεις τοποθετούνται μέσα στην ρυπασμένη ακόρεστη ζώνη σε κατάλληλες αποστάσεις, στις οποίες τοποθετείται ένας διάτρητος σωλήνας στο κέντρο και ένα διαπερατό υλικό πληρώσεως περιφερειακά π.χ. χαλίκι ή χοντρή άμμος. Οι σωλήνες συνδέονται στην επιφάνεια με μία αντλία κενού. Η αντλία αυτή δημιουργεί υποπίεση και εξασφαλίζει τη συνεχή ροή του αέρα δια μέσου της ακόρεστης ζώνης. Ο αέρας που αντλείται στην επιφάνεια μεταφέρεται σε μονάδα διαχωρισμού της υδατικής φάσης και στη συνέχεια σε μονάδα επεξεργασίας των οργανικών ρύπων [Πανταζίδου κ.α., 2004].



Σχήμα 2.10: Αναπαράσταση τυπικής εγκατάστασης άντλησης εδαφικού αέρα [Πανταζίδου κ.α., 2004]

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας άντλησης εδαφικού αέρα είναι τα ακόλουθα:

• Εφαρμόζεται επιτόπου στη ρυπασμένη περιοχή, χωρίς να απαιτείται εκσκαφή και μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα ακόμη και κάτω από κτήρια ή άλλες κατασκευές.

• Ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι απλός και χαμηλού κόστους.

• Συνδυάζεται εύκολα με άλλες τεχνικές (άντληση της ελεύθερης οργανικής φάσης, βιοαερισμός, αεροδιασκορπισμός κτλ) [Πανταζίδου κ.α., 2004].

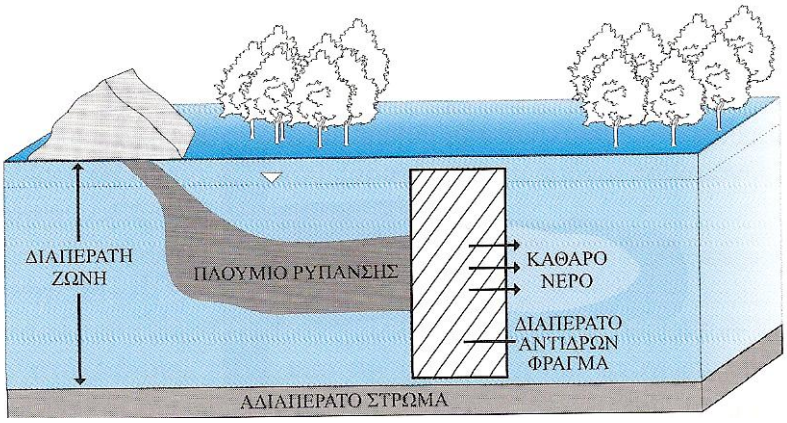
Στην παρούσα μελέτη γίνεται συνδυασμός της μεθόδου άντλησης της ελεύθερης οργανικής φάσης με την παραπάνω μέθοδο άντλησης εδαφικού αέρα.

2.5.2 In-situ Τεχνολογίες

2.5.2.1 Διαπερατά αντιδρώντα φράγματα

Μια σχετικά πρόσφατη τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση των υπόγειων υδάτων είναι τα διαπερατά αντιδρώντα φράγματα (Permeable Reactive Barriers-

PRB). Αποτελείται από κάθετους «τοίχους», οι οποίοι τοποθετούνται κατάντη της πηγής ρύπανσης και αποτελούνται από διαπερατά αντιδρώντα υλικά. Τα υλικά αυτά δεδομένου ότι είναι διαπερατά επιτρέπουν τη διέλευση του νερού ενώ παράλληλα συγκρατούν και μετασχηματίζουν τους διάφορους ρύπους (Σχήμα 2.11), λειτουργώντας ως ένα είδος φίλτρου καθαρισμού του ρυπασμένου υπόγειου νερού [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005].



Σχήμα 2.11: Βασική ιδέα εξυγίανσης υπόγειων υδάτων με χρήση διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005].

Τα υπάρχοντα συστήματα διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, στους τάφρους υψηλής διαπερατότητας (permeable reactive trench) και στα φράγματα και πύλες (funnel and gate).

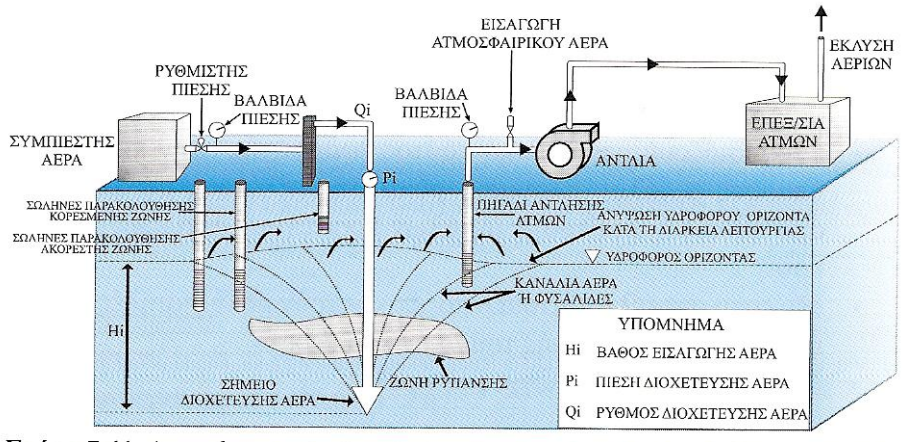
2.5.2.2 Air Sparging

Μια ακόμη in-situ τεχνολογία εξυγίανσης υπόγειων υδάτων είναι η μέθοδος air sparging η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για την απομάκρυνση οργανικών πτητικών ενώσεων. Κατα την εφαρμογή της μεθόδου αυτής διοχετεύεται αέρας μέσα στο υπέδαφος με στόχο την εξάτμιση των υφιστάμενων ρύπων και την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005].

Μία προσέγγιση της μεθόδου που χρησιμοποιείται και αφορά την απομάκρυνση πτητικών οργανικών ενώσεων από την κορεσμένη ζώνη, περιλαμβάνει τη χρήση μεμονωμένων πηγαδιών διοχέτευσης αέρα, τα οποία τοποθετούνται σε όλη τη ζώνη ρύπανσης. Τα πηγάδια καταλήγουν σε ένα στενό διάκενο, που τοποθετείται στον πυθμένα του υδροφορέα ή κάτω από το βαθύτερο ρυπασμένο τμήμα του υδροφορέα, από το οποίο γίνεται η εισαγωγή αέρα (Σχήμα 2.12)

Ο συμπιεσμένος αέρας που εισέρχεται μέσα από το πηγάδι, ρέει ακτινικά προς τα έξω και προς τα πάνω, μέσα στο έδαφος, με αποτέλεσμα την εξάτμιση των πτητικών συστατικών που είναι είτε διαλυμένα στο υπόγειο νερό ή προσροφημένα στην επιφάνεια των κόκκων του εδάφους. Η διαδικασία εισαγωγής αέρα, καθώς αυξάνει τα ποσοστά του οξυγόνου βοηθάει στη

βιοαποικοδόμηση των ρυπαντών και αυξάνει την πιθανότητα διάλυσης και εξάτμισης των DNAPL. Με την σωστή τοποθέτηση των πηγαδιών αυξάνεται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου και τα συσσωρευμένα DNAPL και τα συσσωματώματά του μπορούν να μειωθούν δραστικά [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005].



Σχήμα 2.12: Απεικόνιση της τεχνολογίας air sparging για την εξυγίανση της κορεσμένης ζώνης και της in-situ άντλησης ατμών από την κορεσμένη ζώνη [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005]

2.5.2.3 Βιοαναρρόφηση (Bioslurping)

Μια από τις πιο πρόσφατες μεθόδους εξυγίανσης υπόγειων υδάτων αποτελεί η βιοαναρρόφηση, η οποία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην αποκατάσταση υδροφορέων που έχουν ρυπανθεί από πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες. Η μέθοδος της βιοαναρρόφησης συνδυάζει τρείς διαφορετικές διεργασίες, με σκοπό να εξυγιάνει και το έδαφος αλλά και τα υπόγεια ύδατα. Αυτές οι διεργασίες είναι:

- ✓ η άντληση της ελεύθερης φάσης (LNAPL) υπό κενό
- ✓ η άντληση του εδαφικού αέρα (soil vapor extraction) και
- ✓ ο βιοαερισμός (bioventing)

Με τη διεργασία άντλησης της ελεύθερης φάσης υπό κενό, επιτυγχάνεται η ανάκτηση των υφιστάμενων ποσοτήτων ελαιωδών που «επιπλέουν» στον υπόγειο υδροφορέα, με όσο το δυνατόν μικρότερη άντληση υπόγειου νερού, ενώ οι τεχνολογίες της άντλησης εδαφικού αέρα και του βιοαερισμού της ακόρεστης ζώνης έχουν ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της διαδικασίας βιοαποικοδόμησης των LNAPL [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005].

Για την απομάκρυνση των ελαφριών πετρελαϊκών υδρογονανθράκων χρησιμοποιούνται ειδικά πηγάδια, τα οποία διαθέτουν διάτρητο περίβλημα στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο βάθος

του οποίου τοποθετείται με μία αντλία κενού. Η ασκούμενη υποπίεση έχει ως αποτέλεσμα την άντληση της υφιστάμενης ελεύθερης φάσης, μικρών ποσοτήτων υπόγειου νερού και εδαφικού αέρα [Γιδαράκος και Αϊβαλιώτη, 2005].

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το Cantuar είναι μια περιοχή που ανήκει στο Saskatchewan, η οποία είναι περιοχή του Καναδά, με μέσο υψόμετρο 731 μέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η περιοχή είναι αραιοκατοικημένη με 1 κάτοικο ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο (km^2). Η πλησιέστερη πόλη με κατοίκους άνω των 50.000 απέχει περίπου τρείς ώρες και σαράντα λεπτά (3:40 ώρες) με την τοπική συγκοινωνία.

3.1 Φυσικοί Κίνδυνοι

Πίνακας 3.1

Σεισμοί	Πλημμύρες	Ξηρασία	Κατακρημνίσεις	Ηφαίστεια	Κυκλώνες
20 %	0 %	70 %	0 %	0 %	0 %

Στην περιοχή Cantuar υπάρχει μικρή επίδραση από σεισμούς (κατά μέσο όρο ένας κάθε 50 χρόνια), με εμφανίσεις σε μικρότερο από πέντε Ρίχτερ(<5). Επίσης υπάρχει μια μέτρια έως υψηλή εμφάνιση περιόδων με ακραία ξηρασία.

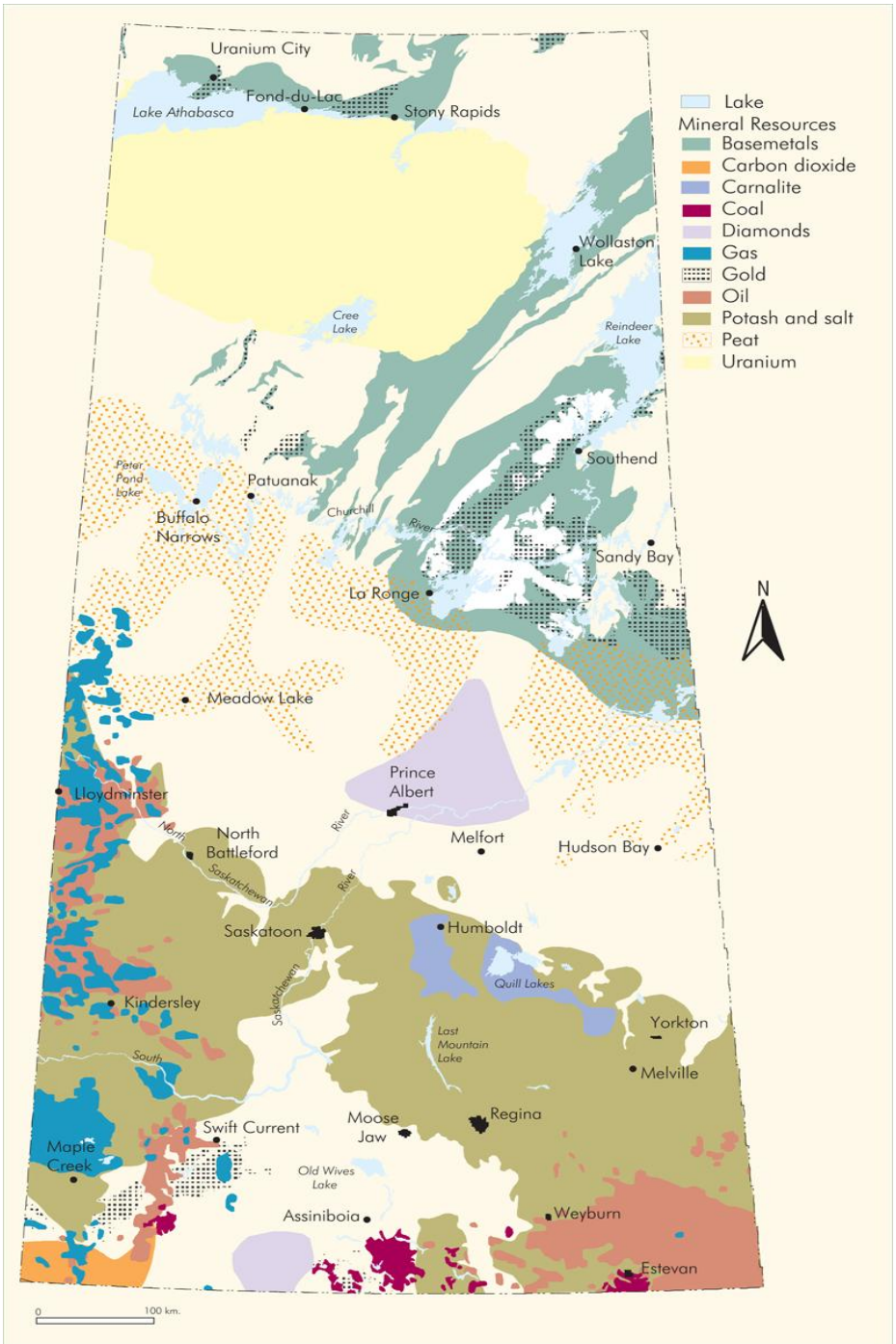
3.2 Γεωγραφία του Saskatchewan

Η γεωγραφία του Saskatchewan, είναι μοναδική μεταξύ των επαρχιών του Καναδά. Είναι η μόνη περιοχή της οποίας τα σύνορα δεν βασίζονται σε φυσικά χαρακτηριστικά, όπως λίμνες, ποταμούς ή λεκάνες απορροής. Τα σύνορα του Saskatchewan, τα οποία σχηματίζουν τραπεζοειδές, προσδιορίστηκαν το 1905, όταν ορίσθηκε ως καναδική επαρχία. Ο πληθυσμός το 2006 ήταν 968.157 , περίπου κατά 1% μείωση από το 2001 [http://www.statcan.gc.ca]. Το Saskatchewan έχει συνολική έκταση 651.036 τετραγωνικά χιλιόμετρα (251.366 τετραγωνικά μίλια) από τα οποία 591.670 km^2 (228.450 τετραγωνικά μίλια) είναι έδαφος και τα 59.366 km^2 (22.921 τετραγωνικά μίλια) είναι νερό [www.nrcan.gc.ca].

Το Saskatchewan μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις περιοχές: τα λιβάδια (μέρος της Great Plains) στα νότια, το πάρκο με τις λεύκες στο κέντρο, και το αρκτικό δάσος στο βόρειο μέρος της περιοχής Canadian Shield. Κύρια ποτάμια του είναι ο Assiniboine ποταμός, ο Βόρειος και ο Νότιος Saskatchewan ποταμός.

Η οικονομία του Saskatchewan βασίζεται στην αφθονία του σε φυσικούς πόρους, κυρίως στο πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, τον άνθρακα, το ανθρακικό κάλιο, το ουράνιο και τα δάση, και τη

γεωργία (σιτάρι και άλλα δημητριακά, και της εκτροφής ζώων).Ένας γενικός χάρτης με τους φυσικούς πόρους παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 [Reeves et al., 2005].



Σχήμα 3.1: Γενικός χάρτης του Saskatchewan

3.2.1 Φυσική Γεωγραφία

Το Saskatchewan έχει κατά προσέγγιση τραπεζοειδές σχήμα. Τα Δυτικά σύνορα του είναι παράλληλα με τον 4° μεσημβρινό ή τις 110° δυτικού γεωγραφικού μήκους, που χωρίζει το Saskatchewan από την επαρχία της Αλμπέρτα. Τα ανατολικά σύνορα του είναι δυτικά του μεσημβρινού και είναι μια ακανόνιστη γραμμή. [Thomson, 1977]. Τα νότια σύνορα είναι τα σύνορα Καναδά - Ηνωμένων Πολιτειών. Τα Northwest Territories είναι βόρεια του $60^{ου}$ παραλλήλου και αποτελεί τα βόρεια σύνορα της επαρχίας [www.nrcan.gc.ca].

3.3 Γεωλογία

Στην περιοχή Canadian shield υπάρχει η ιζηματογενής λεκάνη Athabasca. Επιπτώσεις από πτώσεις μετεωριτών έχουν αλλάξει τους φυσικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Κατά την διάρκεια της Τεταρτογενούς περιόδου έγιναν οι πιο πρόσφατες γεωλογικές διεργασίες κατά την οποία παγετώδη γεγονότα επηρέασαν τα λιβάδια [www.er.gov.sk.ca]. Υπάρχουν έξι αξιοσημείωτοι κρατήρες από μετεωρίτες ή κομήτες στο Saskatchewan. Το έδαφος στην περιοχή είναι πλούσιο σε ασβεστολιθικά εδάφη πλούσια σε οργανική ύλη, με καφέ χρώμα, χαρακτηριστικό για τα ημίξηρα κλίματα με αγρωστώδη.

3.4 Κλίμα

Όντας στο κέντρο της Βόρειας Αμερικής, το Saskatchewan δεν δέχεται μεγάλες ποσότητες νερού και κατά συνέπεια έχει ένα ήπιο ηπειρωτικό κλίμα, με ζεστά καλοκαίρια και κρύους χειμώνες, που σημαίνει ότι το ετήσιο εύρος της θερμοκρασίας μπορεί να είναι έως και 65°C. Κατά μέσο όρο, το Saskatchewan έχει 211 ημέρες το χρόνο κατά τις οποίες η θερμοκρασία πέφτει κάτω από το μηδέν. Οι καταιγίδες από χαλάζι ή οι καταιγίδες με υψηλή βροχόπτωση και οι ανεμοστρόβιλοι είναι γεγονότα του καλοκαιριού. Στην περιοχή Midale η θερμοκρασία ανήλθε στους 45°C (113°F) στις 5 Ιουλίου 1937, και είναι η υψηλότερη θερμοκρασία που έχει καταγραφεί στον Καναδά [Cote, 2005]

Σε σύγκριση με βάση τις μέσες τιμές από το σύνολο των δεκατριών καναδικών επαρχιών, το Saskatchewan είναι η πιο ηλιόλουστη επαρχία (2206 ώρες ανά έτος), έχει τη δεύτερη χαμηλότερη ετήσια χιονόπτωση (145 cm), την τέταρτη χαμηλότερη συνολική βροχόπτωση (428 mm) και το δεύτερο πιο ζεστό καλοκαίρι (22,5°C). Ο αριθμός των ημερών χωρίς πάγο κυμαίνεται από 95 ημέρες στα βόρεια (Prince Albert) για να φθάσει έως και τις 124 ημέρες στα νότια (Estevan) [www.er.gov.sk.ca].

3.5 Βιόσφαιρα

3.5.1 Χλωρίδα

Η χλωρίδα του Saskatchewan περιλαμβάνει τραχεόφυτα, καθώς και άλλα είδη φυτών και φυτικών οργανισμών, όπως φύκη, λειχήνες και άλλους μύκητες και βρύα [www.usask.ca]. Το Saskatchewan δεσμεύεται για την προστασία των ειδών υπό εξαφάνιση στον Καναδά. Η περίοδος καλλιέργειας έχει μελετηθεί και ταξινομηθεί σε ζώνες δυσκολίας ανάλογα με τη διάρκεια της περιόδου καλλιέργειας και τις κλιματολογικές συνθήκες [www.er.gov.sk.ca].

3.5.2 Πανίδα

Η πανίδα του Saskatchewan περιλαμβάνει πολλά χερσαία και υδρόβια είδη. Από τον μεγάλο αριθμό των ασπόνδυλων και σπονδυλωτών, δύο έχουν επιλεγεί ως σύμβολα του Saskatchewan, το White-tailed ελάφι και η Sharp-tailed πέρδικα [www.er.gov.sk.ca]. Σήμερα, τα οικοσυστήματα του Saskatchewan περιλαμβάνουν από την αρκτική τούνδρα στο βόρειο Saskatchewan μέχρι πάρκα με λεύκες, και χορτολιβαδικές εκτάσεις [www.biodiversity.sk.ca, 2002]. Η πανίδα της περιοχής κατοικεί σε περιοχές μοναδικές για τις δικές τους συγκεκριμένες και διάφορες μεθόδους αναπαραγωγής, τις απαιτήσεις για τροφή και φωλιά. [Thorpe et al, 1999]. Έχοντας μεγάλες εκτάσεις γης και νερού, και εξ' αιτίας τις μικρής πυκνότητας του πληθυσμού, οι οικοπεριοχές του Saskatchewan παρέχουν σημαντικό βιότοπο για πολλά ζώα, και για αυτά που απειλούνται με εξαφάνιση και για αυτά που δεν απειλούνται. Μια ευρεία ποικιλία των ενδιαιτημάτων της άγριας ζωής διατηρείται ως πάρκα και προστατεύει την τροφή και τις περιοχές αναπαραγωγής των προστατευόμενων και των ενδογενών ειδών της πανίδας του Saskatchewan [Storer,1989; Atton et al. 1969].

3.5.3 Υδρογραφία

Η συνολική έκταση του γλυκού νερού είναι 59.366 τετραγωνικά χιλιόμετρα (km^2). [www.nrcan.gc.ca]. Υπάρχουν δύο κύριες λεκάνες απορροής ποταμών, των ποταμών Nelson και Churchill, οι οποίοι απορρέουν στην περιοχή Hudson Bay [Benke, 2005].

Υπάρχουν πάνω από 10.000 λίμνες σε ολόκληρο το Saskatchewan, με κύρια περιοχή στα βόρεια [www.usask.ca]. Η μεγαλύτερη λίμνη του Saskatchewan είναι η λίμνη Athabasca που βρίσκεται στα σύνορα του Saskatchewan με την Alberta. Η δεύτερη σε μέγεθος είναι η λίμνη Reindeer που βρίσκεται στα σύνορα του Saskatchewan με την Manitoba. Άλλες λίμνες με αξιοσημείωτο μέγεθος είναι οι Wollaston, Cree, Frobisher, και η Lac La Ronge [www.webcitation.org]. Το

βαθύτερο σημείο του νερού βρίσκεται στα 220 μέτρα στην Λίμνη Reindeer, το οποίο δημιουργήθηκε από πρόσκρουση μετεωρίτη [Harper, 2006)].
Στο Saskatchewan επίσης διατηρούνται υγρότοποι οι οποίοι είναι βυθισμένοι μερικώς σε περιοχές της γης [www.nrcan.gc.ca]. Επίσης στα κανάλια νερού του Saskatchewan, υπάρχουν βάλτοι, καθώς και λίμνες αλμυρού νερού [Hammer, 1986].

3.6 Οικονομία

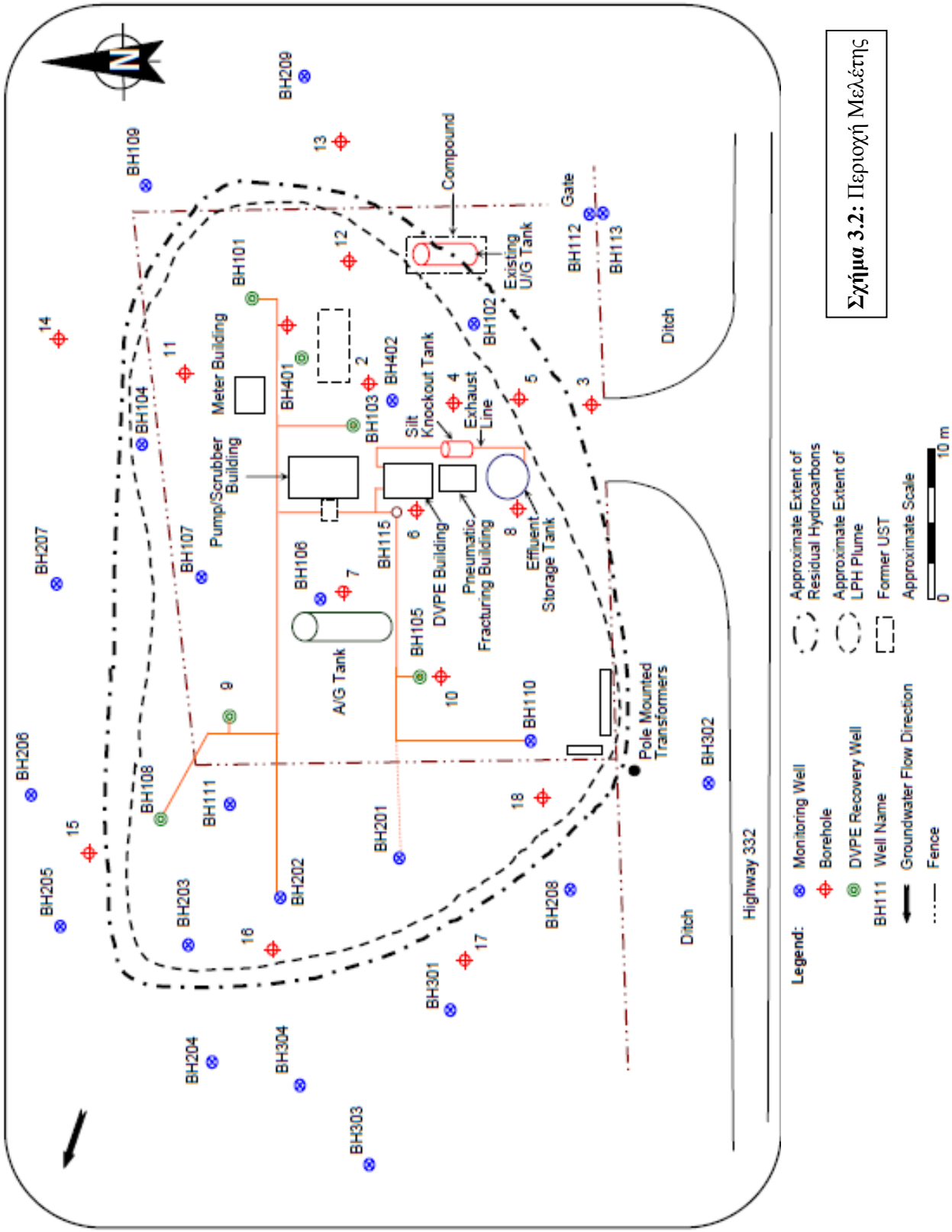
Η οικονομία του Saskatchewan έχει συσχετιστεί με τη γεωργία. Σύμφωνα με την κυβέρνηση του Saskatchewan, περίπου το 95% όλων των ειδών που παράγονται στο Saskatchewan, εξαρτώνται από τους βασικούς πόρους που διατίθενται εντός της επαρχίας. Τα διάφορα δημητριακά, τα ζώα της φάρμας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, το κάλιο, το ουράνιο, το ξύλο και οι βιομηχανίες διανομής τους τροφοδοτούν την οικονομία [www.er.gov.sk.ca]. Το ακαθάριστο εγχώριο προϊόν (ΑΕΠ) του Saskatchewan για το έτος 2006 ήταν περίπου 45.922.000.000 δολάρια [www.statcan.gc.ca].

3.7 Περιγραφή του προβλήματος ρύπανσης στην περιοχή μελέτης

Στην περιοχή μελέτης βρισκόταν εργοστάσιο επεξεργασίας φυσικού αερίου όπου γινόταν η απομάκρυνση συμπυκνώματος νάφθας από το φυσικό αέριο πριν τη διοχέτευση του στον αγωγό μεταφοράς. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εργοστασίου τα υγρά απόβλητα της διαδικασίας απομάκρυνσης που περιείχαν το συμπύκνωμα νάφθας αποθηκεύονταν σε παλιότερη υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης (UST). Λόγω διαρροής από την δεξαμενή τα τελευταία χρόνια, η περιοχή έχει ρυπανθεί. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, μια σειρά από έρευνες πεδίου έχουν διεξαχθεί για να εξεταστούν οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής και τα προβλήματα που σχετίζονται με τη ρύπανση. Το λεπτομερές σχέδιο της τοποθεσίας φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Η ροή των υπογείων υδάτων είναι προς τα βορειοδυτικά, η οποία καθορίστηκε από τα αποτελέσματα πολλών ερευνών του πεδίου. Η δεξαμενή η οποία ήταν ανάντη της περιοχής μελέτης είχε διαρροές περίπου 55 m^3 προϊόντων πετρελαίου πριν από την αφαίρεση της. Διάφορες μορφές ρύπων βρέθηκαν στις κατευθύνσεις κατάντη της πηγής, και περιλαμβάνουν ελεύθερο προϊόν, υδρογονάνθρακες σε φάση ατμών, διαλυμένους υδρογονάνθρακες στα υπόγεια ύδατα και παγιδευμένους υδρογονάνθρακες στο έδαφος [Qin et al, 2008].
Η ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων σε αυτή την περιοχή έχει θέσει σε σοβαρό κίνδυνο τις γύρω κοινότητες. Κατάλληλες ενέργειες αποκατάστασης ήταν αναγκαίες για την

άμβλυνση αυτού του είδους κινδύνων. Για το λόγο αυτό, δράσεις με την μέθοδο της διπλής αναρρόφησης (DPVE) έγιναν για να καθαριστεί η περιοχή. Ωστόσο, ένα από τα κύρια προβλήματα που συνδέονται με τη διαδικασία της αποκατάστασης είναι η έλλειψη γνώσεων για τις διαδικασίες που ελέγχουν τη ροή των υγρών και τη μεταφορά των ρύπων. Αυτή η έλλειψη γνώσεων μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη διακύμανση των εξόδων. Επιπλέον, οι επιπτώσεις της μολυσμένης περιοχής στις γύρω περιοχές θα πρέπει να καθοριστούν ποσοτικά. Πολλά ερωτήματα πρέπει να απαντηθούν, όπως: «Υπάρχει κίνδυνος για τον υποδοχέα;» και «Πόσο σοβαρό είναι αυτό;». Ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους υπάρχει αυτή η έλλειψη ποσοτικοποίησης του κινδύνου, είναι η έλλειψη αποτελεσματικών συστημάτων προσομοίωσης που συνδέουν τις συνθήκες τοποθεσίας / πηγής με την ποιότητα του εδάφους / των υπόγειων υδάτων. Ως εκ τούτου, τα μαθηματικά μοντέλα είναι επιθυμητά για να κατανοηθούν καλύτερα οι κίνδυνοι από τη ρύπανση και οι επιπτώσεις των διαφόρων στρατηγικών αποκατάστασης. Επίσης, είναι επωφελή για την βελτιστοποίηση των μέτρων για τη διαχείριση των περιοχών [Qin et al., 2008; Li et al., 2003].

Σε αυτή τη μελέτη, δεδομένα ρύπανσης της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία ενός πολυφασικού μοντέλου μεταφοράς πετρελοειδών στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής και τη μελέτη σεναρίων ανάκτησης με τη χρήση πολλαπλών γεωτρήσεων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας δισδιάστατος (2-D) προσομοιωτής ροής για την μοντελοποίηση των επιδόσεων της μεθόδου ανάκτησης ελεύθερου προϊόντος με τη βοήθεια πίεσης κενού (vacuum-enhanced free product recovery).
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αναλυτικά η περιοχή μελέτης (Σχήμα 3.2)



Σχήμα 3.2: Περιοχή Μελέτης

4.ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Συχνά, οι μηχανικοί που ασχολούνται με τα υπόγεια ύδατα καλούνται να προβλέψουν τη συμπεριφορά και την εξέλιξη των συστημάτων υπόγειας ροής. Όμως, κάποιες φορές η εμπειρία και η γνώση των μηχανικών δεν αρκούν, αφού ο υπολογισμός όλων των παραμέτρων που σχετίζονται με την υπόγεια ροή πολύπλοκων συστημάτων είναι μια διαδικασία σύνθετη και χρονοβόρα. Σήμερα, το βέλτιστο διαθέσιμο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών – υδρογεωλόγων είναι η χρησιμοποίηση ενός μοντέλου ροής υπογείων υδάτων.

4.2 Μοντέλα Ροής Υπογείων Υδάτων

Γενικά, με τον όρο «μοντέλο» εννοούμε ένα μαθηματικό εργαλείο το οποίο παρέχει μια προσεγγιστική περιγραφή μιας κατάστασης που συναντάται στο πεδίο. Η μοντελοποίηση βοηθά στην αποδοτικότερη χρήση και οργάνωση των δεδομένων του πεδίου και εκτελεί περίπλοκες αναλύσεις, οι οποίες οδηγούν σε βάσιμες προβλέψεις για την μελλοντική κατάσταση του συστήματος που μελετάται.

Τα μοντέλα μπορεί να είναι είτε φυσικά, οπότε η προσομοίωση της υπόγειας ροής είναι άμεση, είτε μαθηματικά, οπότε η προσομοίωση της υπόγειας ροής είναι έμμεση. Στην περίπτωση των μαθηματικών μοντέλων η ροή περιγράφεται μέσω μιας βασικής (κυρίαρχης) εξίσωσης, η οποία αναπαριστά τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στο σύστημα, σε συνδυασμό με επιμέρους εξισώσεις, οι οποίες αποτελούν τις οριακές συνθήκες. Επίσης, όταν το πρόβλημα είναι μη σταθερό χρονικά (χρονοεξαρτώμενα προβλήματα), είναι απαραίτητη η δημιουργία και μιας ακόμη εξίσωσης που θα περιγράφει τις αρχικές συνθήκες του συστήματος.

Τα μαθηματικά μοντέλα επιλύονται με αναλυτικό ή με αριθμητικό τρόπο. Και στις δύο περιπτώσεις η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι απαραίτητη. Όταν οι υποθέσεις που γίνονται για να εξάγουμε την αναλυτική λύση είναι πολύ απλουστευμένες για το υπό εξέταση πρόβλημα, τότε προτιμάται η χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου. Γενικά, όσο λιγότερες είναι οι απλουστευτικές παραδοχές που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του μοντέλου, τόσο πιο περίπλοκο είναι αυτό [Anderson and Woessner, 1992].

4.3 Πρωτόκολλο Μοντελοποίησης

Όταν κριθεί απαραίτητη η χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου για την αντιμετώπιση ενός σύνθετου προβλήματος υπόγειας ροής, τότε ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα του «πρωτοκόλλου μοντελοποίησης» για την κατασκευή του μοντέλου:

- Καθορισμός του σκοπού ανάπτυξης του συγκεκριμένου αριθμητικού μοντέλου. Ο σκοπός θα καθορίσει τις βασικές εξισώσεις και τον κώδικα που θα χρησιμοποιηθεί.

- Ανάπτυξη του θεμελιώδους μοντέλου του συστήματος, το οποίο βασίζεται στη συλλογή δεδομένων από το πεδίο.

- Επιλογή των βασικών (κυρίαρχων) εξισώσεων και του υπολογιστικού κώδικα που θα χρησιμοποιεί το μοντέλο. Στο στάδιο αυτό γίνεται και επαλήθευση του υπολογιστικού κώδικα, με σύγκριση ορισμένων αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν σε σχέση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν ύστερα από αναλυτικούς υπολογισμούς.

- Σχεδιασμός του μοντέλου (σχεδιασμός πλέγματος, επιλογή χρονικού βήματος, καθορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών κ.λπ.).

- Βαθμονόμηση - ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου και επαλήθευση των αποτελεσμάτων του.

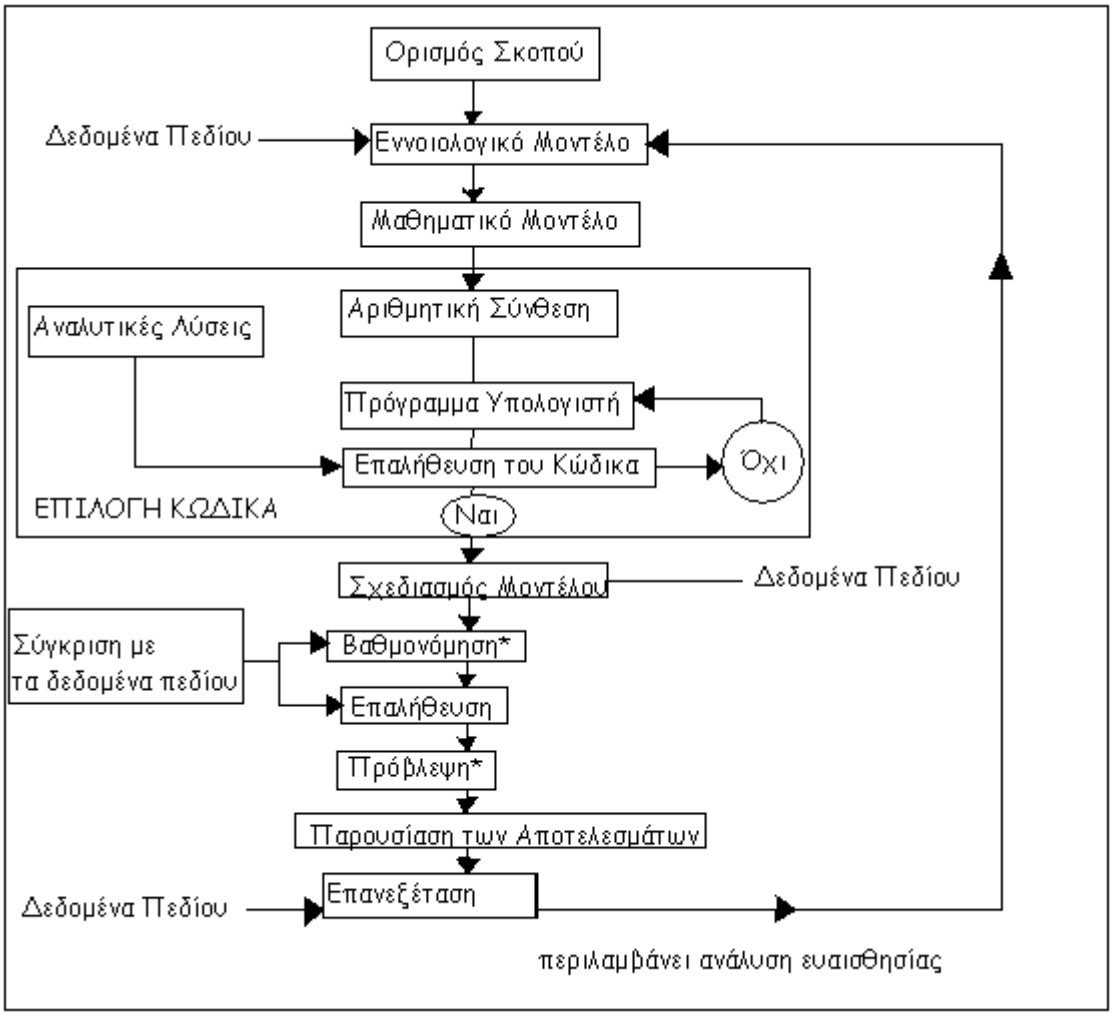
- Πρόβλεψη και εφαρμογή διάφορων εναλλακτικών μελλοντικών σεναρίων σχετικά με την κατάσταση του συστήματος. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει ανάλυση ευαισθησίας για να υπολογίζεται ο βαθμός της αβεβαιότητας που αντιστοιχεί σε κάθε σενάριο.

- Παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

- Επανεξέταση του αριθμητικού μοντέλου, η οποία πραγματοποιείται μερικά χρόνια αργότερα. Νέα δεδομένα πεδίου εισάγονται στο μοντέλο για να ελεγχθεί εάν οι προβλέψεις που είχαν γίνει ήταν σωστές.

- Ξανασχεδιάζεται το αριθμητικό μοντέλο, βασιζόμενο πλέον στα νέα δεδομένα [Fetter, 1988].

Παραστατικά το πρωτόκολλο μοντελοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Πρωτόκολλο μοντελοποίησης [Anderson and Woessner , 1992]

4.4 Βασικές Εξισώσεις των Συστημάτων Υπόγειας Ροής

Μια ολοκληρωμένη μαθηματική περιγραφή ενός μοντέλου περιλαμβάνει τον καθορισμό των κυρίαρχων εξισώσεων, των οριακών συνθηκών και των αρχικών συνθηκών, εάν το πρόβλημα που εξετάζουμε δεν είναι χρονικά σταθερό.

Υπάρχουν δύο βασικές απόψεις για την προσέγγιση ενός συστήματος υπόγειας ροής [Anderson and Woessner, 1992]:

➢ Η άποψη του υδροφορέα, η οποία βασίζεται στην έννοια του περιορισμένου και του ελεύθερου υδροφορέα. Χρησιμοποιείται κυρίως στην ανάλυση της ροής όταν υπάρχουν πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση πολλών αναλυτικών λύσεων, όπως αυτές των Thiem, Theis και Jacob. Η παραδοχή που γίνεται είναι ότι η υπόγεια ροή διαμέσου του υδροφορέα είναι αυστηρά

οριζόντια, ενώ διαμέσου των αδιαπέρατων στρωμάτων είναι αυστηρά κάθετη. Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι σταθερή όταν ο υδροφορέας είναι ομοιογενής και σταθερού πάχους. Αντίθετα, η μεταβιβασιμότητα ενός ελεύθερου υδροφορέα πάντα μεταβάλλεται χωρικά διότι το πάχος του υδροφορέα εξαρτάται από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα σε κάθε σημείο.

Η άποψη του υδροφορέα προσομοιώνει τη ροή σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς ως δισδιάστατη, ενώ σε περιορισμένους υδροφορείς με διαρροή ως τρισδιάστατη. Το ποσό της διαρροής εξαρτάται από την κλίση του αδιαπέρατου στρώματος, το πάχος του και την υδραυλική του αγωγιμότητα. Η προσομοίωση των αδιαπέρατων στρωμάτων δεν είναι αρκετά ξεκάθαρη κατά την μοντελοποίηση, γι' αυτό τα υδραυλικά ύψη δεν υπολογίζονται στα στρώματα αυτά.

Στην άποψη του υδροφορέα η γενική μορφή της βασικής εξίσωσης είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(T_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) = S\frac{\partial h}{\partial t} - R + L \qquad (4.1)$$

όπου

$$L = -K_z^{'} \frac{h_{\pi\eta\gamma\eta\varsigma} - h}{b^{'}}$$

και

- h το υδραυλικό ύψος
- T_x, T_y οι συνιστώσες της μεταβιβασιμότητας στους άξονες x, y αντίστοιχα
- S ο συντελεστής αποθηκευτικότητας
- R ο όρος της πηγής / καταβόθρας, ο οποίος είναι θετικός στην περίπτωση εμπλουτισμού και αρνητικός στην περίπτωση άντλησης
- L η διαρροή διαμέσου του αδιαπέρατου στρώματος
- $K_z^{'}$ η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος
- b΄ το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος

- $h_{πηγής}$ το υδραυλικό ύψος στην πηγή

Η εξίσωση 4.1 εφαρμόζεται σε περιορισμένους υδροφορείς και οι όροι στο αριστερό μέρος αναφέρονται στην οριζόντια ροή διαμέσου του υδροφορέα.

Η εφαρμογή της εξίσωσης 4.1 σε ελεύθερο υδροφορέα γίνεται αφού ακολουθηθούν οι παραδοχές Dupuit σύμφωνα με τις οποίες: (1) οι γραμμές της ροής είναι οριζόντιες, ενώ οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες και (2) η οριζόντια υδραυλική κλίση ισούται με την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας και είναι ανεξάρτητη του βάθους.

Για τις συνιστώσες της μεταβιβασιμότητας ισχύει $T_x = K_x \cdot h$ και $T_y = K_y \cdot h$. Ο όρος της διαρροής συνήθως είναι μηδενικός.

➢ Στην άποψη του συστήματος ροής δεν εξετάζεται τόσο το είδος των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων, αλλά κυρίως ασχολείται με την κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής των υδραυλικών υψών, των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των αποθηκευτικών ιδιοτήτων σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Σύμφωνα με την άποψη αυτή η ροή μπορεί να θεωρηθεί δισδιάστατη ή τρισδιάστατη.

Στην άποψη του συστήματος ροής η γενική μορφή της βασικής εξίσωσης είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) = S_c \frac{\partial h}{\partial z} - R^* \qquad (4.2)$$

όπου

- K_x, K_y, K_z οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες x, y, z αντίστοιχα

- S_s η ειδική αποθηκευτικότητα

- R* ο γενικός όρος που αναφέρεται στην πηγή / καταβόθρα, ο οποίος είναι θετικός στην περίπτωση εμπλουτισμού και αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου. Για προσομοίωση άντλησης $R^* = -W$.

Εξίσωση Boussinesq

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν η εξίσωση (4.1) χρησιμοποιείται για προσομοίωση ελεύθερων υδροφορέων, λαμβάνεται συνήθως $T_x = K_x \cdot h$ και $T_y = K_y \cdot h$ όπου h είναι το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.1) προκύπτει η μη γραμμική εξίσωση Boussinesq:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y}\right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \tag{4.3}$$

όπου το L είναι μηδέν και ο συντελεστής αποθήκευσης είναι ίσος με την ειδική αποθηκευτικότητα.

Επειδή όμως ισχύει και ότι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h^2}{\partial x} &= 2h\frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h^2}{\partial y} &= 2h\frac{\partial h}{\partial y} \end{aligned} \tag{4.4}$$

Η εξίσωση (4.3) παίρνει τη μορφή:

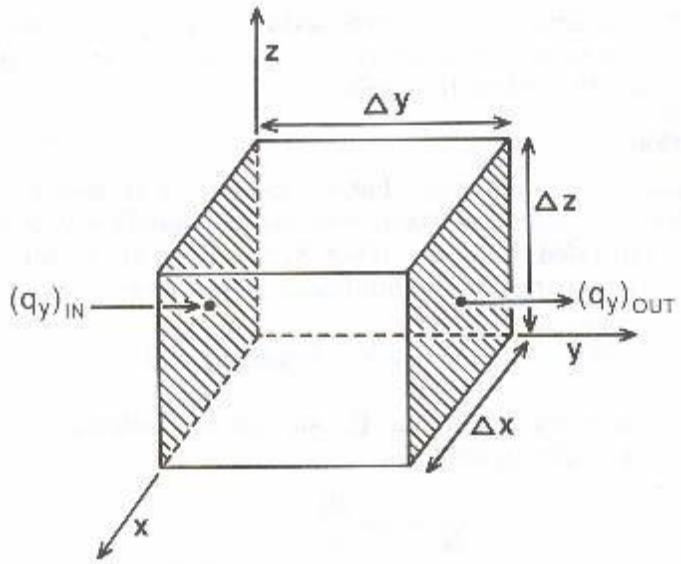
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y}\right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \tag{4.5}$$

Η εξίσωση (4.4) είναι μη γραμμική επειδή ο όρος h είναι υψωμένος στη δεύτερη δύναμη στο αριστερό μέλος της εξίσωσης ενώ είναι στην πρώτη δύναμη στο δεξί. Αν και έχουν αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι για τη λύση της μη γραμμικής εξίσωσης, υπάρχει πιο εύκολος τρόπος να λυθεί το πρόβλημα. Αν είναι γνωστή μια τιμή του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα η εξίσωση μπορεί να γραμμικοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα αριθμητικό μοντέλο [Fetter, 1988].

Παραγώγιση των Εξισώσεων του Συστήματος

Η Εξίσωση 4.2 παραγωγίζεται από τη μαθηματική σύνδεση ενός υδατικού ισοζυγίου με το νόμο του Darcy. Η παραγώγιση γίνεται παραδοσιακά με τη χρήση ενός κύβου αναφοράς από πορώδες υλικό το οποίο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό των ιδιοτήτων του

πορώδους μέσου ενώ ταυτόχρονα είναι και αρκετά μικρό ώστε η αλλαγή του ρεύματος μέσα στον όγκο ελέγχου να είναι πολύ μικρή (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2. Ο μοναδιαίος όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται στην παραγώγιση των εξισώσεων του συστήματος. [Anderson and Woessner, 1992]

Αυτός ο κύβος από πορώδες υλικό είναι γνωστός ως μοναδιαίος όγκος του πορώδους υλικού (Representative Elementary Volume – REV). Ο όγκος του ισούται με Δx Δy Δz. Η ροή του ύδατος μέσα από τον όγκο ελέγχου εκφράζεται από το ρυθμό άντλησης (q), όπου q είναι ένα διάνυσμα που μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα των τριών συνιστωσών του qx, qy και qz. Δηλαδή:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \tag{4.6}$$

όπου i_x, i_y και i_z τα μοναδιαία διανύσματα των αξόνων x, y και z αντίστοιχα.

Το υδατικό ισοζύγιο (αρχή διατήρησης της μάζας) δηλώνει ότι:

Έξοδος – Είσοδος = Αλλαγή στην Αποθήκευση (4.7)

Θεωρώντας τη ροή κατά μήκος του άξονα y του όγκου ελέγχου, η εισροή διέρχεται από επιφάνεια Δx·Δz και ισούται με $(q_y)_{IN}$ ενώ η εκροή είναι $(q_y)_{OUT}$. Ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής ισούται με:

$$\left[\left(q_y\right)_{OUT} - \left(q_y\right)_{IN}\right] \cdot \Delta x \cdot \Delta y \tag{4.8}$$

ή αλλιώς

$$\frac{(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}}{\Delta y}(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \tag{4.9}$$

και μετατρέποντας την εξίσωση σε μερική διαφορική η αλλαγή του ρυθμού ροής κατά μήκος του άξονα y είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y}(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \tag{4.10}$$

Αντίστοιχες είναι και οι εξισώσεις της αλλαγής του ρυθμού ροής κατά μήκος των αξόνων x και z. Η ολική μεταβολή του ρυθμού ροής ισούται με την αλλαγή στην αποθήκευση και εκφράζεται ως:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right)\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \text{αλλαγή στην αποθήκευση} \tag{4.11}$$

για να επιτραπεί επίσης η ύπαρξη μιας καταβόθρας (πηγάδι άντλησης) ή μιας πηγής (πηγάδι εμπλουτισμού) μέσα στον όγκο ελέγχου προστίθεται και ένας όρος R*ΔxΔyΔz ο οποίος θεωρείται θετικός όταν πρόκειται για πηγή.

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \pm R^*\right)\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \text{αλλαγή στην αποθήκευση} \tag{4.12}$$

Από το δεξί μέλος της (4.7) η αλλαγή στην αποθήκευση ισούται με την ειδική αποθηκευτικότητα S_s, η οποία ορίζεται ως ο όγκος αποθηκευμένου νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής υδραυλικού ύψους και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = -\frac{\Delta V}{\Delta h \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \tag{4.13}$$

Η παραδοχή που γίνεται είναι ότι το ΔV είναι θετικό όταν το Δh είναι αρνητικό, ή αλλιώς ότι νερό απελευθερώνεται όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται. Ο ρυθμός αλλαγής της αποθήκευσης στον όγκο ελέγχου είναι:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t}\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \tag{4.14}$$

Από το συνδυασμό των (4.12) και (4.14) και διαίρεσή τους δια ΔxΔyΔz προκύπτει η τελική μορφή του ισοζυγίου μάζας του νερού:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \tag{4.15}$$

Η εξίσωση όμως αυτή έχει πολύ περιορισμένη χρήση αφού το q δεν είναι άμεσα μετρήσιμο. Όμως ο νόμος του Darcy δίνει μια σχέση μεταξύ των q και h και το υδραυλικό ύψος h είναι φυσικά άμεσα μετρήσιμο. Για τις τρεις διαστάσεις ο νόμος του Darcy γράφεται:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$
$$q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \qquad (4.16)$$
$$q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Όταν οι εξισώσεις (4.16) αντικατασταθούν στην (4.15) προκύπτει η (4.2). Η εξίσωση (4.1) παράγεται από την (4.2) θέτοντας $\partial h / \partial x = 0$, πολλαπλασιάζοντας με το b, προσθέτοντας τον όρο της διαρροής και θέτοντας $b \cdot S_s = S$ και $b \cdot R^* = R$.

Στις εξισώσεις (4.1) και (4.2) θεωρείται ότι τα K_x, K_y και K_z (ή T_x, T_y) είναι συγγραμμικά με τους άξονες x, y και z. Αν η γεωλογία είναι τέτοια που να μην επιτρέπει την ευθυγράμμιση των κύριων διευθύνσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης του συστήματος που χρησιμοποιεί όλα τα στοιχεία του πίνακα της υδραυλικής αγωγιμότητας ($\overline{K}$) που γράφεται ως εξής:

$$\overline{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \qquad (4.17)$$

Τα στοιχεία του πίνακα μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια ενός τεστ άντλησης, αλλά όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές, γίνεται στροφή των συντεταγμένων με τέτοιο τρόπο ώστε να μηδενίζονται τα στοιχεία του πίνακα που βρίσκονται εκτός της κύριας διαγωνίου. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων για ολόκληρη της περιοχή μελέτης και τοπικά συστήματα συντεταγμένων για κάθε κελί ή στοιχείο του πλέγματος. Στα τοπικά συστήματα τα στοιχεία εκτός της κύριας διαγωνίου είναι μηδενικά. Μέσω της στροφής των συντεταγμένων είναι δυνατό να μετατραπούν εξισώσεις σχετικές με τα κύρια στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο τοπικό σύστημα αντίστοιχες με στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο καθολικό σύστημα. [Fetter, 1988].

Όταν τα κύρια στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι συγγραμμικά με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων τα στοιχεία εκτός διαγωνίου είναι μηδενικά και ο δεύτερος δείκτης μπορεί να παραλειφθεί όπως στην εξίσωση (4.2). Οι εξισώσεις (4.1) και (4.2) υποθέτουν επίσης

ότι η πυκνότητα είναι σταθερή. Η ροή που εξαρτάται από την πυκνότητα είναι μια περιπλοκή στα προβλήματα που εμπεριέχουν αλμυρό νερό, αμιγείς ρυπαντές και διάφορους αναμειγμένους ρυπαντές. Αν οι επιδράσεις της πυκνότητας είναι σημαντικές, απαιτείται μια διαφορετική κύρια εξίσωση και ένας ειδικός αριθμητικός κώδικας [Anderson and Woessner, 1992].

4.5 Αριθμητικές Μέθοδοι των Συστημάτων Υπόγειας Ροής

Αν απλοποιηθούν οι εξισώσεις (4.1) και (4.2) μπορούν να λυθούν αναλυτικά. Οι απλοποιήσεις συνήθως περιλαμβάνουν υποθέσεις ομοιογένειας και μονοδιάστατης ή δισδιάστατης ροής. Εκτός από τις εφαρμογές σε υδραυλική πηγαδιών, οι αναλυτικές λύσεις δε χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές. Οι αριθμητικές λύσεις είναι πολύ πιο ευπροσάρμοστες και μέσω των υπολογιστών πιο εύκολες στη χρήση από τις πιο σύνθετες αναλυτικές λύσεις.

Στην προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιούνται συνήθως οι παρακάτω πέντε κατηγορίες μοντέλων: i) πεπερασμένων διαφορών, ii) πεπερασμένων στοιχείων, iii) ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών, iv) η μέθοδος ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης και v) αναλυτικά στοιχεία. Από αυτές οι δύο τελευταίες είναι σχετικά νέες τεχνικές και δεν είναι ευρέως διαδεδομένες. Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών είναι στενά συνδεδεμένη με εκείνη των πεπερασμένων στοιχείων. Οι πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία είναι οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι για επίλυση προβλημάτων ροής.

Ένα πρόγραμμα υπολογιστή, λύνει μία ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων που δημιουργούνται από προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων (εξίσωση του συστήματος, οριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες) οι οποίες αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο. Οι τεχνικές προσέγγισης όπως στις πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία ενεργούν στο μαθηματικό μοντέλο και το μετατρέπουν σε μια μορφή που να μπορεί να λυθεί γρήγορα από έναν υπολογιστή. Η ομάδα των αλγεβρικών εξισώσεων που παράγεται με τον τρόπο αυτό μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση πινάκων.

Η επιλογή ανάμεσα σε πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία εξαρτάται από το προς επίλυση πρόβλημα και την προτίμηση του χρήστη. Οι πεπερασμένες διαφορές είναι εύκολες στην κατανόηση και τον προγραμματισμό. Γενικά, απαιτούν λιγότερα στοιχεία για την κατασκευή του πλέγματος. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι καλύτερα στην προσέγγιση ορίων ακανόνιστου σχήματος από ότι οι πεπερασμένες διαφορές. (Οι ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές όμως μπορούν να χειριστούν τα ακανόνιστα όρια όπως και τα πεπερασμένα στοιχεία.) Είναι ευκολότερο να προσαρμοστεί το μέγεθος των μεμονωμένων στοιχείων όπως και η τοποθεσία των ορίων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διευκολύνοντας τη διερεύνηση

της επίδρασης που έχει στη λύση η διάταξη στο χώρο των κόμβων. Τα πεπερασμένα στοιχεία διαχειρίζονται επίσης καλύτερα τα εσωτερικά όρια όπως οι ελαττωματικές ζώνες και μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα σημειακές πηγές ή καταβόθρες, επιφάνειες με διαρροή και κινούμενους υδροφόρους ορίζοντες από ότι οι πεπερασμένες διαφορές. Για άλλους τύπους προβλημάτων η επιλογή μιας μεθόδου προσέγγισης βασίζεται συνήθως στην προτίμηση του χρήστη. Αν και κατά καιρούς έχουν υπάρξει άρθρα που υποστηρίζουν τη μία ή την άλλη μέθοδο, οι κρίσεις τους δεν είναι αντικειμενικές και πιο σωστή φαντάζει η γνώμη του Gray (1984) ότι «κάθε μέθοδος έχει ειδικά χαρακτηριστικά που μπορούν να είναι επιθυμητά για μια συγκεκριμένη εφαρμογή».

Αν και έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων – αν το πρόβλημα έχει κόμβους ανά ίσα διαστήματα οι παραγόμενες από τις δύο μεθόδους αλγεβρικές εξισώσεις είναι οι ίδιες – οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορές. Κυριότερη είναι η θεμελιώδης διαφορά φιλοσοφίας. Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών υπολογίζουν μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο που είναι επίσης και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού γύρω από τον κόμβο αυτό. Δε γίνεται καμία υπόθεση για τον τρόπο που μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Αντίθετα, τα πεπερασμένα στοιχεία ορίζουν ακριβώς τη μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε ένα στοιχείο με τη βοήθεια πολλαπλασιαστικών (βασικών) συναρτήσεων. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται για ευκολία από τους κόμβους, αλλά το υδραυλικό ύψος ορίζεται παντού μέσω βασικών συναρτήσεων.

Η γενική μορφή της έκφρασης των πεπερασμένων διαφορών για την εξίσωση (4.2) γράφεται για το υπολογιστικό μόριο του σχήματος 4.3.α ως εξής:

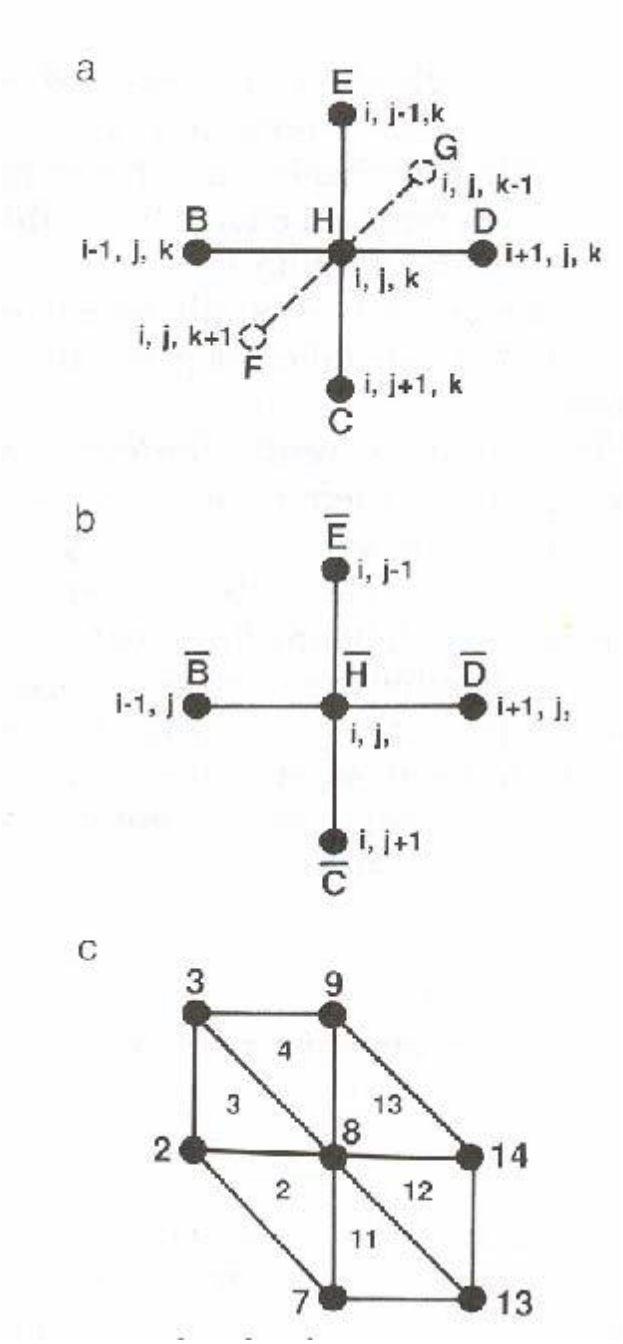
$$Bh_{i-1,j,k} + Ch_{i,j+1,k} + Dh_{i+1,j,k} + Eh_{i,j-1,k} + Fh_{i,j,k+1} + Gh_{i,j,k-1} + Hh_{i,j,k} = RHS_{i,j,k} \qquad (4.18)$$

Η εξίσωση για το υδραυλικό ύψος στον κόμβο i, j, k ($h_{i,j,k}$) εμπεριέχει το υδραυλικό ύψος στον ίδιο τον κόμβο καθώς και τα υδραυλικά ύψη στους έξι γειτονικούς κόμβους. Κάθε υδραυλικό ύψος πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή (B, C, D, E, F, G ή H) ο οποίος είναι μια συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ των κόμβων. Ο συντελεστής H είναι επίσης συνάρτηση του όρου της αποθήκευσης. Ο όρος $RHS_{i,\ j,\ k}$ περιλαμβάνει την αποθήκευση και τους όρους εμπλουτισμού στο δεξί μέλος της εξίσωσης. Μια εξίσωση δισδιάστατης ροής για το σχήμα 4.3.β γράφεται:

$$\overline{B}h_{i-1,j} + \overline{C}h_{i,j+1} + \overline{D}h_{i+1,j} + \overline{E}h_{i,j-1} + \overline{H}h_{i,j} = RHS_{i,j} \qquad (4.19)$$

όπου τα B, C, D, E και H είναι συντελεστές. Και οι δύο παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφούν ως εξισώσεις πινάκων υπό την μορφή [A]{h}= {f}, όπου [A] ο πίνακας συντελεστών,

{h} το διάνυσμα των άγνωστων υδραυλικών υψών και {f} το διάνυσμα των όρων του δεξιού μέλους (RHS) της εξίσωσης. [Anderson and Woessner, 1992]



Σχήμα 4.3: Υπολογιστικά στοιχεία: a. Τρισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών, b. Δισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών, c. Κομμάτι με έξι πεπερασμένα στοιχεία γύρω από τον κόμβο 8 [Anderson και Woessner, 1992]

4.6 Το Θεμελιώδες Μοντέλο και ο Σχεδιασμός του Πλέγματος

4.6.1 Το Θεμελιώδες Μοντέλο και η κατασκευή του

Θεμελιώδες μοντέλο είναι η εικονική αναπαράσταση του συστήματος της υπόγειας ροής, συχνά με τη μορφή ενός διαγράμματος συστημάτων ή τομών. Η φύση του θεμελιώδους μοντέλου θα καθορίσει τις διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου και το σχέδιο του πλέγματος.

Ο στόχος της κατασκευής του θεμελιώδους μοντέλου είναι να απλοποιήσει το πρόβλημα του πεδίου και να οργανώσει τη συσχετιζόμενη πληροφορία πεδίου, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να αναλυθεί πιο εύκολα. Η απλοποίηση είναι απαραίτητη γιατί δεν είναι εφικτή η πλήρης ανακατασκευή του συστήματος πεδίου.

Το πρώτο βήμα στο σχηματισμό του θεμελιώδους μοντέλου είναι ο ορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος, π.χ. ο καθορισμός των ορίων του μοντέλου. Τα αριθμητικά μοντέλα απαιτούν οριακές συνθήκες, έτσι που το υδραυλικό ύψος ή η ροή να καθορίζεται κατά μήκος. Όποτε είναι δυνατόν, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τα φυσικά υδρογεωλογικά όρια σαν όρια του μοντέλου. Παρόλα αυτά, για κάποια προβλήματα μπορεί να είναι αναγκαίο να περιοριστεί το πεδίο του προβλήματος σε μικρότερο από αυτό που περικλείεται από τα φυσικά όρια του υδροφορέα. Τα πραγματικά υδρογεωλογικά όρια του συστήματος θα πρέπει να καθορίζονται όταν σχηματίζεται το θεμελιώδες μοντέλο. Υπάρχουν τρία βήματα στην κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου.: 1) καθορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων, 2) εκτίμηση υδατικού αποθέματος, 3) ορισμός του συστήματος ροής.

Καθορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων

Η γεωλογική πληροφορία, που περιλαμβάνει γεωλογικούς χάρτες και τομές, και πηγάδια συνδυάζεται με πληροφορίες σχετικές με τις υδρογεωλογικές ιδιότητες για να ορίσουν τις υδροστρωματογραφικές μονάδες για το θεμελιώδες μοντέλο. Στην μοντελοποίηση τοπικών συστημάτων ροής, οι υδροφορείς και τα περιοριστικά στρώματα ορίζονται χρησιμοποιώντας το μοντέλο της υδροστρωματογραφικής μονάδας που εισήγαγε ο Maxey (1964) και επανεκτίμησε ο Seaber (1988). Απλά, οι υδροστρωματογραφικές μονάδες περιλαμβάνουν γεωλογικές μονάδες παρόμοιων υδρογεωλογικών ιδιοτήτων.

Διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί μπορούν να συνδυαστούν σε μία απλή υδροστρωματογραφική μονάδα ή ένας γεωλογικός σχηματισμός μπορεί να διαιρεθεί σε υδροφορείς και περιοριστικές μονάδες.

Οι γεωλόγοι βασίζονται πάνω σε υδροστρωματογραφικές πληροφορίες και σε μια κατανόηση της ιστορίας της εναπόθεσης για να βοηθήσουν στην επανακατασκευή του περιβάλλοντος της

εναπόθεσης. Τα μοντέλα φάσεων είναι βοηθητικά σε αυτή την ανάλυση. Φάσεις είναι μια μονάδα από υλικό με παρόμοιες φυσικές ιδιότητες που εναποτέθηκε στο ίδιο γεωλογικό περιβάλλον. Τα μοντέλα φάσεων είναι θεμελιώδη μοντέλα της αναμενόμενης κατανομής των φάσεων. Η γνώση της ιστορίας της εναπόθεσης μιας περιοχής μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη της εμφάνισης τύπων ιζήματος όταν δεν υπάρχει πλούσια γεωλογική πληροφορία. Οι γεωλογικές φάσεις μπορούν τότε να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των υδροστρωματογραφικών μονάδων.

Η έννοια της υδροστρωματογραφικής μονάδας είναι χρήσιμη κυρίως για προσομοίωση γεωλογικών συστημάτων σε τοπική κλίμακα. Σε μικρότερες κλίμακες, κάποιος θα ήθελε να ομαδοποιήσει γειτονικές γεωλογικές μονάδες παρόμοιων υδρογεωλογικών ιδιοτήτων μέσα σε τοπικά ορισμένες υδροστρωματογραφικές μονάδες. Στην πράξη, παρόλα αυτά, αυτό είναι δύσκολο να γίνει γιατί απαιτούνται λεπτομερείς ειδικές πληροφορίες για την στρωματογραφία και την υδραυλική αγωγιμότητα, για να οριστούν οι υδροστρωματογραφικές μονάδες σε αυτή την κλίμακα. Τέτοιες λεπτομερείς πληροφορίες είναι σπάνια διαθέσιμες. Τα μοντέλα φάσεων είναι περιορισμένης χρήσης εδώ γιατί είναι ιδανικές περιλήψεις των περιβαλλόντων εναπόθεσης, παριστάνοντας μια σύνθεση των χαρακτηριστικών πολλών παρόμοιων περιβαλλόντων. Δεν παριστάνουν, όμως, τα χαρακτηριστικά καμιάς τοποθεσίας.

Εκτίμηση υδατικού αποθέματος

Οι πηγές του νερού προς το σύστημα καθώς και οι αναμενόμενες διευθύνσεις ροής και τα σημεία εξόδου θα πρέπει να είναι τμήμα του θεμελιώδους μοντέλου. Οι εκτιμώμενες στο πεδίο εισροές μπορούν να περιλαμβάνουν εμπλουτισμό του υπογείου νερού από βροχόπτωση, επιφανειακή ροή ή εμπλουτισμό από επιφανειακά υδάτινα στρώματα. Οι εκροές μπορούν να περιλαμβάνουν πηγές, χαμηλή ροή προς χείμαρρους, εξατμισοδιαπνοή και άντληση. Η υπόγεια ροή μπορεί να συμβαίνει και σαν εισροή και σαν εκροή.

Καθορισμός του συστήματος ροής

Η υδροστρωματογραφία αποτελεί το πλαίσιο εργασίας του θεμελιώδους μοντέλου. Η υδρολογική πληροφορία χρησιμοποιείται για να αντιληφθούμε την κίνηση των υπογείων υδάτων μέσα στο σύστημα. Η υδρολογική πληροφορία για την κατακρήμνιση, την εξάτμιση και την επιφανειακή απορροή, καθώς και πληροφορίες για το υδραυλικό ύψος και τη γεωχημεία, χρησιμοποιούνται σε αυτήν την ανάλυση. Οι μετρήσεις για τα επίπεδα του νερού χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της γενικής κατεύθυνσης της υπόγειας ροής, της θέσης των περιοχών εμπλουτισμού και άντλησης, και της σύνδεσης ανάμεσα στους υδροφορείς και στα συστήματα επιφανειακών υδάτων. Ο καθορισμός του συστήματος ροής μπορεί να βασιστεί μόνο

σε φυσικά υδρολογικά στοιχεία, αλλά συνίσταται η χρήση γεωχημικών στοιχείων όποτε είναι δυνατό για να ενδυναμωθεί το θεμελιώδες μοντέλο.

Στοιχεία χημείας νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προκύψουν οι διευθύνσεις ροής, για να ταυτοποιηθούν οι πηγές και οι ποσότητες εμπλουτισμού, να εκτιμηθούν οι ρυθμοί υπόγειας ροής και να οριστούν τα τοπικά, ενδιάμεσα και περιφερειακά συστήματα ροής. Οι χημικές αναλύσεις συνήθως περιλαμβάνουν τις συγκεντρώσεις των κυρίων κατιόντων (Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^{+}) και ανιόντων (SO_4^{-2}, HCO_3^{-}, Cl^{-}), θερμοκρασία, και pH. Ανάλογα με το σκοπό της χημικής μελέτης, οι αναλύσεις μπορούν ακόμα να περιλαμβάνουν ίχνη μετάλλων, σταθερά και ραδιενεργά ισότοπα, και οργανικά μίγματα [Anderson and Woessner, 1992].

4.7 Είδη μοντέλων

4.7.1 Δισδιάστατα χωρικά μοντέλα

Οι δισδιάστατες χωρικές προσομοιώσεις μπορούν να μελετήσουν τέσσερις διαφορετικούς τύπους υδροφορέων. Αυτοί είναι οι περιορισμένοι υδροφορείς, οι περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή, οι ελεύθεροι υδροφορείς και οι μικτοί υδροφορείς.

Περιορισμένοι υδροφορείς

Κατά την προσομοίωση περιορισμένων υδροφορέων, η μεταβιβασιμότητα και ο συντελεστής αποθήκευσης καθορίζονται για κάθε κόμβο, κελί ή στοιχείο. Μεταβολή στη μεταβιβασιμότητα μπορεί να αντιπροσωπεύει αλλαγές είτε στην υδραυλική αγωγιμότητα, είτε στο πάχος του υδροφορέα. Σε ένα δισδιάστατο χωρικό μοντέλο, η ανισοτροπία στη μεταβιβασιμότητα εκπροσωπείται από τη διαφορά ανάμεσα στη μεταβιβασιμότητα στους άξονες x και y (T_x και T_y). Τα στοιχεία εισόδου στο μοντέλο μπορούν να αποτελούνται από τους δύο πίνακες μεταβιβασιμότητας ή από τον πίνακα T_x και έναν ανισοτροπικό παράγοντα που υπολογίζει τον πίνακα T_y από τον πίνακα T_x. Η μεταβιβασιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί από βιβλιογραφικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και εκτιμήσεις του πάχους του υδροφορέα. Οι τιμές για τη μεταβιβασιμότητα και το συντελεστή αποθήκευσης γενικά παίρνονται από αποτελέσματα των τεστ άντλησης. Ο συντελεστής αποθήκευσης μπορεί να υπολογιστεί από εκτιμήσεις της ειδικής αποθήκευσης [Anderson and Woessner, 1992].

Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή

Σε ένα περιορισμένο σύστημα με διαρροή, το περιοριστικό στρώμα και ο γειτονικός υδροφορέας που τροφοδοτεί με διαρροή τον περιορισμένο υδροφορέα δεν αντιπροσωπεύονται σαφώς στο

μοντέλο αλλά προσομοιώνονται μέσω ενός όρου διαρροής. Ο όρος διαρροής είναι μια συνάρτηση του λόγου της κατακόρυφης υδραυλικής αγωγιμότητας (K_z') του περιοριστικού στρώματος προς το πάχος του περιοριστικού στρώματος (b')

$$f(L)= K_z'/ b' \tag{4.20}$$

Πίνακες καθορίζουν τις τιμές της διαρροής και την κατανομή του υδραυλικού ύψους στον υδροφορέα-πηγή. Απαιτούνται επίσης, η μεταβιβασιμότητα και ο συντελεστής αποθήκευσης του περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή.

Η πηγή του νερού προς τον υδροφορέα μπορεί να είναι ένας άλλος περιορισμένος υδροφορέας ή ένας ελεύθερος υδροφορέας ή ακόμα και ένα επιφανειακό υδάτινο σώμα . Το μοντέλο γενικά θεωρεί ότι το υδραυλικό ύψος στην πηγή ποικίλει με το χρόνο. Με άλλα λόγια, οι υδρολογικές πιέσεις στον υδροφορέα με διαρροή δεν έχουν καμιά επιρροή στο υδραυλικό ύψος στον υδροφορέα πηγή.

Άλλη παραδοχή που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση περιορισμένων υδροφορέων με διαρροή σε δισδιάστατα χωρικά μοντέλα, είναι ότι δεν υπάρχει καμία απελευθέρωση νερού από την αποθήκευση μέσα στο περιοριστικό στρώμα. Η παροδική απελευθέρωση νερού από το περιοριστικό στρώμα μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβαίνει κατά την περίοδο $t_s=S_s'b'^2/2K_z'$, όπου S_s' και K_z' είναι η ειδική αποθήκευση και η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα, αντίστοιχα, του περιοριστικού στρώματος και b' είναι το πάχος του περιοριστικού στρώματος [Anderson and Woessner, 1992].

Ελεύθεροι υδροφορείς

Οι περισσότερες εφαρμογές που περιλαμβάνουν ελεύθερους υδροφορείς χρησιμοποιούν τις παραδοχές του Dupuit, οι οποίες εξασφαλίζουν την οριζόντια ροή απαιτώντας να μην υπάρχει αλλαγή στο υδραυλικό ύψος με το βάθος. Η χρήση των παραδοχών του Dupuit, πρακτικά, μετατρέπει ένα τρισδιάστατο πρόβλημα σε δισδιάστατο χωρικό πρόβλημα και ένα πρόβλημα δισδιάστατου προφίλ σε μονοδιάστατο πρόβλημα. Το μοντέλο υπολογίζει την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα για κάθε κόμβο. Οι προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν ελεύθερο υδροφορέα απαιτούν πίνακες που να καθορίζουν την υδραυλική αγωγιμότητα, την ειδική απόδοση και την ανύψωση του επιπέδου αναφοράς. Επειδή η προσομοίωση γίνεται συνήθως από δισδιάστατη χωρική σκοπιά, οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας θα πρέπει να υπολογίζονται κατά μέσον όρο κατακόρυφα ή να παίρνονται από τεστ άντλησης. Η ειδική απόδοση μπορεί επίσης να αποκτηθεί από τεστ άντλησης αλλά αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Η ειδική απόδοση ποικίλει από 0,1 ως 0,4. Δεδομένης αυτής της μικρής διακύμανσης των πιθανών

τιμών για την ειδική απόδοση, είναι σύνηθες να επιλέγεται μια τιμή μέσα από αυτό το εύρος και μετά να ελέγχεται η ευαισθησία του μοντέλου στην ειδική απόδοση.

Μικτά συστήματα υδροφορέων

Ένα μικτό σύστημα υδροφορέων αποτελείται από κάποιο συνδυασμό των παραπάνω τριών τύπων υδροφορέων. Ένας υδροφορέας μπορεί να ποικίλει χωρικά από ελεύθερες σε περιορισμένες συνθήκες. Ή ένας υδροφορέας μπορεί να υποστεί μετατροπή από περιορισμένες σε ελεύθερες συνθήκες, σαν αποτέλεσμα άντλησης.

4.7.2 Ημι-τρισδιάστατα μοντέλα

Ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο προσομοιώνει μια σειρά από υδροφορείς με ενδιάμεσα περιοριστικά στρώματα. Όπως στα δισδιάστατα χωρικά μοντέλα περιορισμένων υδροφορέων με διαρροή, τα περιοριστικά στρώματα δεν παριστάνονται σαφώς σε ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο, ούτε υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη στα περιοριστικά στρώματα. Η επίδραση ενός περιοριστικού στρώματος προσομοιώνεται μέσω ενός όρου διαρροής ($L_{i,j}$) που αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη ροή ανάμεσα σε δύο υδροφορείς. Ο όρος διαρροής είναι μια συνάρτηση του συντελεστή διαρροής όπως εκφράζεται στην Εξίσωση (4.20) και της διαφοράς υδραυλικού ύψους κατά μήκος του περιοριστικού στρώματος (Εξίσωση 4.1). Η απελευθέρωση νερού από την αποθηκευτικότητα μέσω του περιοριστικού στρώματος τυπικά δε λαμβάνεται υπόψη σ' αυτήν την προσέγγιση. Σε ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο, το υδραυλικό ύψος στη μονάδα πάνω από το ανώτερο περιοριστικό στρώμα, συνήθως ελεύθερος υδροφορέας, μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από το μοντέλο. Οι κώδικες που σχεδιάστηκαν για την αντιμετώπιση ημι-τρισδιάστατων συνθηκών συζητούνται από τους Aral(1989), Walton (1989), και Hemker-van Elburg (1987).

Η αγνόηση της οριζόντιας ροής στα περιοριστικά στρώματα προκαλεί μια διαφορά στα υδραυλικά ύψη των μοντελοποιημένων στρωμάτων μικρότερη από 5%, όταν η αντίθεση στην υδραυλική αγωγιμότητα ανάμεσα στον υδροφορέα και στα περιοριστικά στρώματα είναι τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους . Όταν η αντίθεση στην υδραυλική αγωγιμότητα ανάμεσα στον υδροφορέα και στα περιοριστικά στρώματα είναι μικρότερη από δύο τάξεις μεγέθους, πρέπει να προτιμηθεί ένα πλήρως τρισδιάστατο μοντέλο [Anderson and Woessner, 1992].

4.7.3 Μοντέλα κάθετων τομών και πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα

Τα δισδιάστατα μοντέλα κάθετων τομών και τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούν την άποψη του συστήματος ροής. Τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα έχουν κατ' ουσία τις ίδιες

απαιτήσεις σε πίνακες όπως και τα δισδιάστατα χωρικά μοντέλα εκτός του ότι οι παράμετροι πρέπει να καθορίζονται για κάθε στρώμα του μοντέλου. Τα μοντέλα κάθετων τομών είναι μια ειδική τάξη μοντέλων στα οποία τα στοιχεία εισόδου μπορούν να συντεθούν παρόμοια με τα δισδιάστατα χωρικά (περιορισμένα) μοντέλα ή με τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα.

Τα μοντέλα κάθετων τομών και τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν ελεύθερους υδροφορείς όταν οι κατακόρυφες κλίσεις του υδραυλικού ύψους είναι σημαντικές. Σε αυτά τα μοντέλα, ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελεί μέρος του ορίου. Και τα δύο μοντέλα, πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων, μπορούν να προσομοιώσουν υδροφορείς σε προφίλ, αλλά η κίνηση του υδροφόρου ορίζοντα χειρίζεται πιο εύκολα με ένα μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου.

Τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραστήσουν παροδική απελευθέρωση νερού από την αποθηκευτικότητα μέσω των περιοριστικών στρωμάτων, περιλαμβάνοντας το περιοριστικό στρώμα σαν στρώμα με προσδιορισμένη τιμή ειδικής αποθηκευτικότητας. Η απελευθέρωση νερού από την αποθηκευτικότητα μέσω των ενδιάμεσων στρωμάτων περιλαμβάνεται σαν μια επιλογή σε κάποιους κώδικες [Anderson and Woessner, 1992].

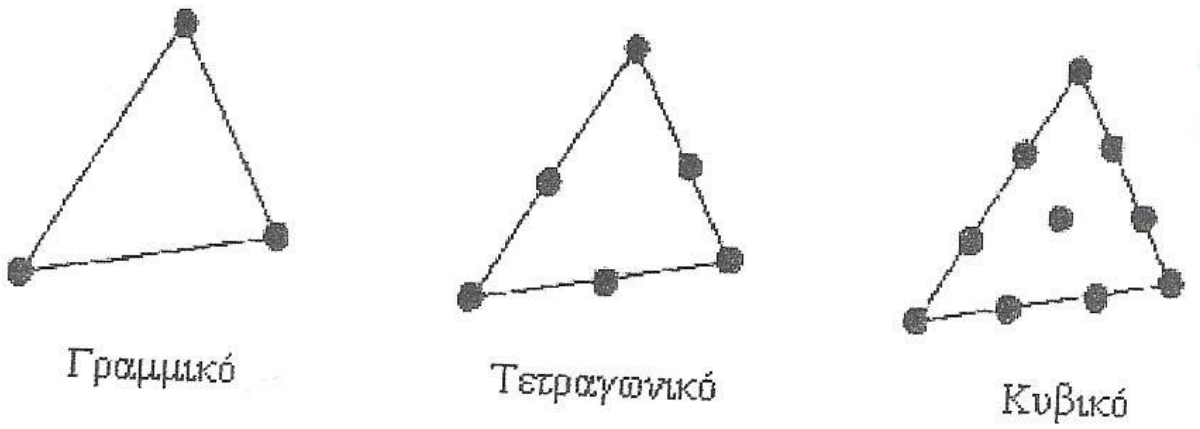
4.8 Σχεδιασμός του Πλέγματος

Το πλέγμα των κόμβων μαζί με τα κελιά των πεπερασμένων διαφορών ή στοιχείων, συνιστούν το πλαίσιο εργασίας του αριθμητικού μοντέλου. Το θεμελιώδες μοντέλο και ο τύπος του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζουν τις συνολικές διαστάσεις του πλέγματος. Η απόσταση μεταξύ των κόμβων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η αναμενόμενη καμπυλότητα του υδροφόρου ορίζοντα, η μεταβολή των υδραυλικών υψών, η μεταβλητότητα ορισμένων από τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, η έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος και οι μεταβολές στους ρυθμούς άντλησης και εμπλουτισμού.

Στα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών ανήκουν τα στοιχειο-κεντρικά και τα δικτυο-κεντρικά πλέγματα. Η διαφορά αυτών έγκειται κυρίως στον τρόπο με τον οποίο χειρίζονται τις οριακές συνθήκες. Στα στοιχειο-κεντρικά πλέγματα οι οριακές συνθήκες τοποθετούνται πάντα στις άκρες του τετραγώνου, ενώ στα δικτυο-κεντρικά οι οριακές συνθήκες συμπίπτουν με τον κόμβο. Οι κόμβοι ονομάζονται με τη χρήση δεικτών (i, j, k), οι οποίοι προσδιορίζουν τη θέση τους στη γραμμή, τη στήλη και το στρώμα του πλέγματος αντίστοιχα. Οι κόμβοι τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε οι αποστάσεις Δx, Δy, Δz να είναι σταθερές, αλλά όχι απαραίτητα ίσες μεταξύ τους. Συνήθως, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ακανόνιστου πλέγματος με μικρές αποστάσεις

κόμβων όταν θέλουμε να αποτυπώσουμε επιμέρους περιοχές (εντός της περιοχής ενδιαφέροντος), όπου αναμένονται απότομες υδραυλικές κλίσεις (π.χ. κοντά σε πηγάδια άντλησης) ή άλλα σημαντικά υδρολογικά χαρακτηριστικά. Όταν εισάγεται ένα μικρότερο πλέγμα στο εσωτερικό του βασικού πλέγματος, πιθανώς να είναι απαραίτητο να αυξηθούν οι αποστάσεις ανάμεσα στους κόμβους, αφού το πλέγμα επεκτείνεται εκτός των ορίων. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών κατά κανόνα ορίζεται ότι για να επεκταθεί το πλέγμα, η αύξηση της απόστασης μεταξύ των κόμβων δεν πρέπει να ξεπερνά περισσότερο από 1,5 φορές την προηγούμενη απόσταση.

Τα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπουν μεγαλύτερη ευχέρεια στο σχεδιασμό του πλέγματος. Το είδος της παρεμβολικής συνάρτησης, η οποία υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη μέσα στο στοιχείο, καθορίζει εάν αυτό θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό (Σχήμα 4.4). Το γραμμικό στοιχείο είναι αυτό το οποίο χρησιμοποιείται περισσότερο.



Σχήμα 4.4: Δισδιάστατα τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία [Anderson and Woessner 1992]

Ένα βασικό μειονέκτημα των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι η εισαγωγή των δεδομένων που απαιτούνται για τον ορισμό του πλέγματος είναι δυσκολότερη και περισσότερο επίπονη, από ότι στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών. Κάθε κόμβος και κάθε στοιχείο πρέπει να είναι αριθμημένο και επίσης οι συντεταγμένες θέσης κάθε κόμβου (x, y, z) και ο αριθμός αυτού πρέπει να είναι συσχετισμένα με κάθε στοιχείο που πρόκειται να εισαχθεί στο μοντέλο. Η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει κάθε στοιχείο ξεχωριστά και στη συνέχεια συνδυάζει τις εξισώσεις όλων των στοιχείων σε μία γενική εξίσωση. Κατά τον σχεδιασμό του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε ισοτροπικά υλικά, για την ελαχιστοποίηση των αριθμητικών σφαλμάτων, απαιτείται ο λόγος της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διάσταση κάθε στοιχείου να είναι κοντά

στη μονάδα. Σε ανισοτροπικά υλικά απαιτείται ο λόγος αυτός να μην ξεπερνά το πέντε [Anderson and Woessner, 1992].

4.8.1 Προσδιορισμός των παραμέτρων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα υπόγειας ροής διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Φυσικά δεδομένα, τα οποία καθορίζουν τη γεωμετρία του συστήματος (π.χ. το πάχος και την έκταση των υδροστρωματογραφικών μονάδων). Τέτοια δεδομένα είναι:
  - ✓ Γεωλογικοί χάρτες και διατομές που απεικονίζουν την έκταση και τα όρια του συστήματος.
  - ✓ Τοπογραφικοί χάρτες που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τα επιφανειακά νερά.
  - ✓ Χάρτες που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με το υψόμετρο και το πάχος των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων.
  - ✓ Χάρτες που απεικονίζουν την έκταση και τα όρια των λιμνών και των ποταμών.
- Υδρογεωλογικά δεδομένα, τα οποία είναι απαραίτητα για τη διατύπωση του θεμελιώδους μοντέλου και για τον έλεγχο της βαθμονόμησής του. Τέτοια δεδομένα είναι:
  - ✓ Στάθμη του ύδατος και ποτενσιομετρικοί χάρτες των υδροφορέων.
  - ✓ Χάρτες και διατομές που περιέχουν πληροφορίες για την υδραυλική αγωγιμότητα και την αποθηκευτικότητα.
  - ✓ Χωρική και χρονική κατανομή του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής και της υπόγειας επαναφόρτισης, αλληλεπίδραση επιφανειακού και υπογείου νερού, υπόγεια άντληση και φυσική υπόγεια επαναφόρτιση.

Η συγκέντρωση όλων αυτών των στοιχείων είναι αρκετά επίπονη διαδικασία και σε πολλές περιπτώσεις, εκτός από τα δεδομένα που χρησιμοποιούμε από ήδη υπάρχουσες μελέτες, είναι απαραίτητη και η επί-τόπου εργασία στο πεδίο.

Όταν γίνεται προσομοίωση ανισοτροπικών μέσων πρέπει η υδραυλική αγωγιμότητα να εκφράζεται και στις τρεις συνιστώσες K_x, K_y, K_z. Συχνά, η ανισοτροπία υπολογίζεται βάσει ενός ρυθμού ανισοτροπίας. Πιο συγκεκριμένα, η οριζόντια ανισοτροπία αναπαριστάται από το λόγο μεταξύ των K_x και K_y, ενώ η κάθετη από το λόγο μεταξύ των K_x και K_z.

Σε σχετικά μικρή κλίμακα εντοπίζονται στο πεδίο ισοτροπικές υδρογεωλογικές μονάδες. Η μοντελοποίηση των γεωλογικών μονάδων σε τόσο μικρή κλίμακα είναι πολύ δύσκολη. Όταν το πάχος του στρώματος του μοντέλου (B_{ij}) είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του ισοτροπικού στρώματος (b_{ij}), τότε η υδρολογικά ισοδύναμη οριζόντια και κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος του μοντέλου μπορεί να υπολογιστεί από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\left(K_x\right)_{i,j} = \sum_{k=1}^{m} \frac{K_{i,j,k} b_{i,j,k}}{B_{i,j}} \tag{4.21}$$

$$\left(K_z\right)_{i,j} = \frac{B_{i,j}}{\sum_{k=1}^{m} b_{i,j,k} / K_{i,j,k}} \tag{4.22}$$

$$B_{i,j} = \sum_{k=1}^{m} b_{i,j,k} \tag{4.23}$$

Η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα των υδροστρωματογραφικών μονάδων ελέγχει τη ροή του νερού ανάμεσα στα στρώματα. Η παρακάτω εξίσωση, η οποία αποδίδεται στον Theis, διορθώνει τις επιδράσεις από την στρωματοποίηση κεκλιμένων στρωματογραφικών μονάδων. Οι μονάδες αυτές στη μοντελοποίηση προσομοιώνονται ως οριζόντια στρώματα.

$$\frac{K_x}{K_y} = \frac{R}{1-(1-R)\cos^2 A} \tag{4.24}$$

όπου

- K_x η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση x (L/T)
- K_y η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση y (L/T)

- R ο λόγος της υδραυλικής αγωγιμότητας στη διεύθυνση x προς την υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση y

- A η γωνία της κλίσης

Οι υδρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν την άντληση, την επαναφόρτιση και την εξατμισοδιαπνοή. Από αυτές ευκολότερα εκτιμώνται οι ρυθμοί άντλησης, ενώ η επαναφόρτιση είναι μια παράμετρος η τιμή της οποίας εκτιμάται δύσκολα. Πληροφορίες σχετικά με την εξατμισοδιαπνοή συλλέγονται από μετρήσεις στο πεδίο με λυσίμετρα [Anderson and Woessner, 1992].

Μεταφορά των παραμέτρων στο Πλέγμα

Για τη μεταφορά των δεδομένων του πεδίου στο πλέγμα απαιτείται αρχικά η τροποποίηση των τιμών των διάφορων παραμέτρων, ώστε να είναι συμβατές με την κλίμακα του μοντέλου. Στη συνέχεια, εισάγονται οι ιδιότητες των υδροφορέων σε κάθε υδροστρωματογραφική μονάδα του θεμελιώδους μοντέλου. Επίσης, σε κάθε κόμβο καθορίζεται το πάχος της αντίστοιχης υδροστρωματογραφικής μονάδας. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται η τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο, η οποία αποτελεί και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού. Στα στοιχείο - κεντρικά πλέγματα, οι ιδιότητες των υδροφορέων και οι υδρολογικές παράμετροι αποδίδονται στο τετράγωνο που περιβάλλει τον κόμβο. Στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων αποδίδονται είτε στον κόμβο είτε στο στοιχείο [Anderson and Woessner, 1992].

4.9 Οριακές Συνθήκες

4.9.1 Είδη Οριακών Συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες είναι μαθηματικές εξισώσεις , οι οποίες καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγο αυτής (ροή) στα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών αποτελεί κρίσιμο βήμα για το σωστό σχεδιασμό του μοντέλου.

Τα φυσικά όρια των συστημάτων υπόγειας ροής δημιουργούνται από την παρουσία αδιαπέρατου βράχου ή μεγάλης μάζας επιφανειακού νερού. Άλλα όρια τα οποία συναντώνται και οφείλονται

στις υδρολογικές συνθήκες της περιοχής, είναι τα υδραυλικά όρια. Αυτά αναπαριστώνται από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών:

- Οριακές συνθήκες 1^{ου} είδους: Συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (συνθήκες Dirichlet), για τις οποίες το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο.
- Οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους: Συνθήκες σταθερής ροής (συνθήκες Neumann), για τις οποίες η ροή διαμέσου του ορίου είναι δεδομένη.
- Οριακές συνθήκες 3^{ου} είδους: Συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος (Cauchy ή μικτές οριακές συνθήκες), για τις οποίες η ροή διαμέσου του ορίου υπολογίζεται από μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους. Καλούνται μικτές, διότι συσχετίζουν τα οριακά υδραυλικά ύψη με τις οριακές συνθήκες ροής.

Η θέση της οριακής συνθήκης μέσα στο πλέγμα εξαρτάται από το είδος του πλέγματος που χρησιμοποιείται (block–centered πλέγμα πεπερασμένων διαφορών, δίκτυο - κεντρικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών ή πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων) [Anderson and Woessner, 1992].

4.9.2 Τοποθέτηση των Οριακών Συνθηκών

Γενικά, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται φυσικά όρια, όταν αυτό είναι εφικτό, διότι αποτελούν σταθερά στοιχεία του συστήματος. Τέτοια όρια, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι αδιαπέραστοι βράχοι, στρώματα στα οποία παρατηρείται διαφορά στην υδραυλική τους αγωγιμότητα κατά δύο τάξεις μεγέθους και στρώματα κατά μήκος του ορίου με μικρή υδραυλική κλίση.

Ορισμένες φορές, όμως, δεν είναι δυνατό ή βολικό ο σχεδιασμός του πλέγματος να περιλαμβάνει και τα φυσικά όρια του συστήματος, διότι η περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να βρίσκεται αρκετά μακριά από αυτά. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται τοπικά χωρίσματα του υπόγειου ύδατος. Τα χωρίσματα τοποθετούνται κοντά σε τοπογραφικά υψώματα και κάτω από αυτά μπορούν να σχηματίσουν μερικώς διαπερατά στρώματα επιφανειακού νερού. Παρόλο που τα υδραυλικά όρια συνήθως δεν αποτελούν σταθερά σημεία του συστήματος ροής, τα τοπικά χωρίσματα υπογείου ύδατος συχνά είναι περισσότερο μόνιμα όρια.

Στα συστήματα ροής γίνεται συνήθως συνδυασμός των οριακών συνθηκών σταθερού υδραυλικού ύψους και σταθερής ροής, ενώ το θεμελιώδες μοντέλο του προβλήματος μπορεί να διατυπωθεί και μόνο με χρήση οριακών συνθηκών ροής.

Εάν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ούτε φυσικά όρια, ούτε τοπικά υπόγεια χωρίσματα, τότε πρέπει να επιλεγούν άλλα υδραυλικά όρια τα οποία καθορίζονται από πληροφορίες σχετικές με τη διαμόρφωση του συστήματος ροής. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον προσδιορισμό

των ορίων αυτών, ώστε να μην προκαλούν σημαντική μεταβολή στη συμπεριφορά του συστήματος.

Τα όρια αυτά, που δεν συμπίπτουν με τα φυσικά όρια, είναι δύο ειδών [Anderson and Woessner, 1992]:

- Απομακρυσμένα όρια. Σε μια προσωρινή προσομοίωση τα όρια μπορούν αυθαίρετα να τοποθετηθούν πολύ μακριά από το κέντρο του πλέγματος, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζονται από τις διάφορες πιέσεις του συστήματος. Έτσι, τα υδραυλικά ύψη και η ροή γύρω από τα όρια αυτά δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης.
- Υδραυλικά όρια. Τα όρια αυτά τοποθετούνται ώστε να δημιουργήσουν μια μικρότερη περιοχή ενδιαφέροντος και μπορεί να είναι όρια σταθερού υδραυλικού ύψους, μηδενικής ή σταθερής ροής.

Οι υδραυλικές οριακές συνθήκες μπορούν να καθοριστούν μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως Τηλεπισκοπική Βελτίωση Δικτύου (TMR), η οποία εισήχθη από τον Ward (1987).

4.9.3 Προσομοίωση των Οριακών Συνθηκών

Στα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και στα δικτυο-κεντρικά πλέγματα πεπερασμένων διαφορών, οι κόμβοι συμπίπτουν με τις θέσεις των ορίων. Στα block-centered πλέγματα πεπερασμένων διαφορών, τα όρια σταθερού υδραυλικού ύψους τοποθετούνται ακριβώς επάνω στους κόμβους, ενώ οι οριακές συνθήκες της ροής στις εξωτερικές πλευρές των τετραγώνων.

Οριακές συνθήκες 1^{ου} είδους - Σταθερό Υδραυλικό Ύψος:

Στις οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους η προσομοίωση γίνεται θέτοντας το υδραυλικό ύψος στους κόμβους ίσο με γνωστές τιμές που έχουν μετρηθεί. Εάν το όριο είναι ποτάμι, το υδραυλικό ύψος κατά μήκος αυτού θα μεταβάλλεται χωρικά, ενώ στην περίπτωση λίμνης ή πηγής/δεξαμενής το όριο χαρακτηρίζεται από συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους. Πρέπει να τονιστεί ότι τα όρια σταθερού υδραυλικού ύψους αναπαριστούν ανεξάντλητες πηγές νερού. Κάποιες φορές, βέβαια, είναι δυνατόν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης να μεταβληθεί το υδραυλικό ύψος στο όριο, δίνοντας όμως μία νέα τιμή που να μπορεί να δικαιολογηθεί.

Οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους- Σταθερή ροή:

Οι οριακές συνθήκες σταθερής ροής χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη ροή επιφανειακού νερού, τη ροή από πηγές, την υπόγεια ροή και τη διαρροή από και προς υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς. Όταν είναι δυνατό, προτιμάται η χρησιμοποίηση οριακών συνθηκών σταθερού υδραυλικού ύψους από ότι σταθερής ροής, διότι είναι πολύ ευκολότερη η μέτρηση της στάθμης του ύδατος παρά της ροής και διότι βοηθούν στην πραγματοποίηση της βαθμονόμησης. Υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις στις οποίες συνιστάται η χρησιμοποίηση οριακών συνθηκών σταθερής ροής, όπως για παράδειγμα όταν η ροή σε ένα σύστημα είναι σταθερή, ενώ τα υδραυλικά ύψη κατά μήκος του ορίου αναμένεται να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών, οι οριακές συνθήκες σταθερής ροής προσομοιώνονται με τη τοποθέτηση πηγαδιών τα οποία αντλούν ή εμπλουτίζουν με νερό τον υδροφορέα με συγκεκριμένο ρυθμό, ενώ στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ο χρήστης καθορίζει τη ροή σε ένα τμήμα του ορίου ανάμεσα σε δύο κόμβους.

Οριακές συνθήκες 3^{ου} είδους - Συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος:

Η ροή διαμέσου του ορίου εξαρτάται από τη διαφορά ανάμεσα στην τιμή του υδραυλικού ύψους που καθορίζεται από τον χρήστη στην μία πλευρά του ορίου, και στην τιμή η οποία υπολογίζεται από το μοντέλο στην άλλη πλευρά του ορίου. Τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και στοιχείων χειρίζονται με παρόμοιο τρόπο τις οριακές συνθήκες αυτού του είδους, με τη διαφορά ότι στα πρώτα υπολογίζεται η ροή σε κάθε κελί, ενώ στα δεύτερα σε κάθε κόμβο [Anderson and Woessner, 1992].

Η διαρροή από και προς ένα ποτάμι, λίμνη ή πηγή/δεξαμενή μπορεί να προσομοιωθεί με τη χρήση οριακών συνθηκών 3^{ου} είδους. Ο ρυθμός διαρροής υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L = Q_L / A = K'_z / b' \left(h_{\pi\eta\gamma\acute{\eta}\varsigma} - h \right) \tag{4.25}$$

όπου

- Q_L η ογκομετρική παροχή
- A η επιφάνεια του κελιού διαμέσου της οποίας λαμβάνει χώρα η ροή

- $h_{πηγής}$ το υδραυλικό ύψος στην πηγή (π.χ. λίμνη ή ποτάμι)

- h το υδραυλικό ύψος στον ακριβώς υποκείμενο ή σε γειτονικό της πηγής υδροφορέα

- K'_z η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος που διαχωρίζει τον υδροφορέα από την πηγή

- b΄ το πάχος του στρώματος που διαχωρίζει τον υδροφορέα από την πηγή

Η εξατμισοδιαπνοή κατά μήκος του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί και αυτή να αναπαρασταθεί με χρήση οριακών συνθηκών 3^{ου} είδους, όπου η ροή είναι ανάλογη του βάθους του νερού κάτω από την επιφάνεια.

Οριακές συνθήκες Μηδενικής Ροής:

Οι συνθήκες αυτές εμφανίζονται όταν η ροή κατά μήκος του ορίου είναι μηδενική. Ένα τέτοιο όριο μπορεί να αναπαριστά αδιαπέραστο βράχο, αδιαπέραστη «ελαττωματική» ζώνη, υπόγειο χώρισμα ή το στρώμα που δημιουργείται όταν το γλυκό νερό ενός παράκτιου υδροφορέα έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό.

Τα περισσότερα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων θεωρούν αυτόματα μηδενική ροή γύρω από τα όρια του μοντέλου, και αυτό τροποποιείται μόνο όταν ο χρήστης ενεργοποιήσει κάποιο άλλο είδος οριακών συνθηκών [Anderson and Woessner, 1992].

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Το μοντέλο MOVER (Multiphase areal organic Vaccum Enhanced Recovery simulator) προσομοιώνει τη ροή και μεταφορά NAPL στο υπέδαφος καθώς και την ανάκτηση ελεύθερου προϊόντος με τη βοήθεια πίεσης κενού. Αναλυτικά αποτελείται από τις εξής ενότητες (modules):

1. Την ενότητα του MOVER η οποία προσομοιώνει τη ροή και μεταφορά LNAPL στο υπέδαφος καθώς και την ανάκτηση ελεύθερου προϊόντος με τη βοήθεια πίεσης κενού σε ελεύθερους υδροφορείς μετά από διαρροή LNAPL σε μια εγκατάσταση. Μπορεί επίσης να προσομοιώσει ανάκτηση NAPL με skimmers και χαντάκια υπό στατική αέρια φάση. Το μοντέλο MOVER μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του αριθμού, της τοποθεσίας, και των ποσοστών ανάκτησης των πηγαδιών άντλησης για το νερό, το πετρέλαιο και του εδαφικού αέρα.

2. Την ενότητα του MOVER η οποία γράφει αρχεία εισόδου για το μοντέλο BIOF&T που προσομοιώνει τη μεταφορά της διαλυτής φάσης NAPL στον υπόγειο υδροφορέα.

Η πρώτη ενότητα του MOVER υποθέτει συνθήκες σχεδόν ισορροπίας στην κάθετη κατεύθυνση. Αυτό μειώνει την μη γραμμικότητα του μοντέλου και μετατρέπει ένα 3-D σε ένα 2-D πρόβλημα, μειώνοντας δραστικά τον υπολογιστικό χρόνο προσομοίωσης.

Στην παρούσα εγασία χρησιμοποιήθηκε μόνο η πρώτη ενότητα του μοντέλου.

Το λογισμικό αυτό συνοδεύεται από ένα φιλικό προς το χρήστη προ-επεξεργαστή, έναν επεξεργαστή για σχεδιασμό του πλέγματος και έναν επεξεργαστή για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τα δύο πρώτα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία αρχείων με τα δεδομένα εισόδου για το MOVER και περιέχουν ενότητες για την εισαγωγή των δεδομένων του πλέγματος, την κατανομή για ετερογενή και ανισότροπα εδάφη, τον καθορισμό των αρχικών υδραυλικών υψών, της ροής, των οριακών συνθηκών πηγής / καταβόθρας για το νερό, το πετρέλαιο και τον αέρα, καθώς και τις συγκεντρώσεις και τις οριακές συνθήκες έκχυσης/άντλησης για μεταφορά πολλαπλών ρυπαντών.

Η απαιτούμενη είσοδος για ανάλυση της ροής αποτελείται από τις αρχικές επιφάνειες αέρα-πετρελαίου P_{ao} και αέρα-νερού P_{aw}, τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους, τις ιδιότητες των ρευστών, από τις παραμέτρους ολοκλήρωσης ως προς το χρόνο, τις οριακές συνθήκες και τις παραμέτρους του πλέγματος. Το μοντέλο του van Genuchten, μαζί με τις παραμέτρους των ρευστών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του όγκου στη φάση του νερού και του πετρελαίου. Για αναλύσεις μεταφοράς, πρόσθετα στοιχεία εισόδου είναι ο συντελεστής

διασποράς για το πορώδες μέσο, η διαλυτότητα των ειδών, οι παράμετροι βιοαποικοδόμησης, ο συντελεστής διάχυσης, ο συντελεστής κατανομής και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας (απαιτείται μόνο για περιπτώσεις ρηγματοποιημένων υδροφορέων).

Η έξοδος του MOVER περιλαμβάνει μια λίστα με τις παραμέτρους εισόδου, τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες, και τη συνδεσιμότητα των κόμβων του πλέγματος. Περιλαμβάνει επίσης τις προσομοιωμένες πιέσεις για τις φάσεις του πετρελαίου, αέρα και νερού, τις ταχύτητες και για τις τρείς φάσεις σε κάθε κόμβο, το συνολικό όγκο του νερού και του πετρελαίου ως προς τον χρόνο, και τα ποσοστά ανάκτησης/έκχυσης για το νερό και το πετρέλαιο για κάθε θέση πηγής/καταβόθρας ως προς το χρόνο. Επίσης υπολογίζονται ο όγκος του ελεύθερου πετρελαίου, του υπολλειματικού πετρελαίου και οι χωρικές κατανομές τους ως συνάρτηση του χρόνου. Για προσομοιώσεις μεταφοράς, οι συγκεντρώσεις των ειδών σε κάθε κόμβο και η συνολική μάζα των ειδών στην υγρή, τη στερεά, την αέρια και την φάση των υδρογονανθράκων υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα . Οι προσομοιώσεις ροής και μεταφοράς μπορούν να γίνουν σε στάδια, αφού το MOVER δημιουργεί ένα βοηθητικό αρχείο στο τέλος της τρέχουσας φάσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει τις αρχικές συνθήκες για το επόμενο βήμα (restart option) [DAEM, 1996-7].

5.2 Βασικές Εξισώσεις

Οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας για το νερό (w) και NAPL (o) για ασυμπίεστα υγρά και συμπιεσμένα αέρια (α) μπορεί να γραφτεί ως:

$$\phi \frac{\partial S_w}{\partial t} = -\frac{\partial q_{w_i}}{\partial x_i} \qquad [5.1a]$$

$$\phi \frac{\partial S_o}{\partial t} = -\frac{\partial q_{o_i}}{\partial x_i} \qquad [5.1b]$$

$$\phi \frac{\partial \rho_\alpha S_\alpha}{\partial t} = -\frac{\partial \rho_\alpha q_{\alpha_i}}{\partial x_i} \qquad [5.1c]$$

Οι ταχύτητες Darcy στην p-φάση (όπου p = w, o, α για το νερό, πετρέλαιο και το αέριο)ορίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_{p_i} = -K_{p_{ij}} \left(\frac{\partial \psi_p}{\partial x_j} + \rho_{rp} u_j \right) \qquad [5.2]$$

Όπου $K_{p_{ij}}$ είναι ο συντελεστής αγωγιμότητας για την p-φάση, $\psi_p = \frac{P_p}{g\rho_w^*}$ είναι το ισοδύναμο ύψος νερού σε κάθε φάση p, P_p είναι η πίεση για την κάθε p-φάση, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, και ρ_w^* είναι η πυκνότητα του καθαρού νερού, $\rho_{rp} = \frac{\rho_p}{\rho_w^*}$ είναι το ειδικό βάρος για την κάθε p-φάση, ρ_p είναι η πυκνότητα για τη κάθε p-φάση, και $u_j = \frac{\partial z}{\partial x_j}$ είναι ένα βαρυτικό διάνυσμα που μετριέται θετικά προς τα πάνω και z είναι η ανύψωση, φ είναι το πορώδες και S_p είναι ο κορεσμός στην κάθε p-φάση.

Από την ολοκλήρωση της εξίσωσης 5.2 στην κατεύθυνση z μεταξύ του κατώτερου ορίου του υδροφορέα (z_L) και του άνω ορίου που ισούται με το άνω όριο της αιχμής των τριχοειδών φαινομένων (z_u), με την παραδοχή της κάθετης ισορροπίας προκύπτουν οι παρακάτω οριζόντιες, ροές:

$$Q_{wx_i} = -T_{w_{ij}} \frac{\partial Z_{aw}}{\partial x_j} \qquad [5.3a]$$

$$Q_{ox_i} = -T_{o_{ij}} \frac{\partial Z_{ao}}{\partial x_j} \qquad [5.3b]$$

$$Q_{ax_i} = -T_{a_{ij}} \frac{\partial Z_{aa}}{\partial x_j} \qquad [5.3c]$$

όπου, Q_{wx_i}, Q_{ox_i}, Q_{ax_i} είναι οι οριζόντιες κάθετα ολοκληρωμένες ροές [L^2T^{-1}] για το νερό, το πετρέλαιο και το αέριο, αντίστοιχα σε x_i (i = 1,2) κατευθύνσεις, $T_{w_{ij}}$, $T_{o_{ij}}$ και $T_{a_{ij}}$ είναι οι τανυστές μεταβιβασιμότητας στην υγρή φάση του νερού, του πετρελαίου και του αερίου αντίστοιχα.

Η εξίσωση του ισοζυγίου του όγκου για το νερό, το πετρέλαιο και το αέριο κάθετα ολοκληρωμένη μπορεί να εκφραστεί ως :

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(T_{w_{ij}} \frac{\partial Z_{aw}}{\partial x_j} \right) + R_w \qquad [5.4a]$$

$$\frac{\partial V_o}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(T_{o_{ij}} \frac{\partial Z_{ao}}{\partial x_j} \right) + R_o \qquad [5.4b]$$

$$\frac{\partial V_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(T_{a_{ij}} \frac{\partial Z_{aa}}{\partial x_j} \right) + R_a \qquad [5.4c]$$

όπου V_w = ειδικός όγκος [L] του νερού, V_o = ειδικός όγκος [L] των NAPL και V_a = ειδικός όγκος [L] των αερίων και εκφράζονται ως:

$$V_w = \int_{Z_L}^{Z_u} \phi S_w dz \qquad V_o = \int_{Z_L}^{Z_u} \phi S_o dz \qquad V_a = \int_{P_{ao}}^{Z_s} \phi S_a z \qquad [5.5]$$

Υπό την προϋπόθεση κάθετης ισορροπίας, το ύψος της επιφάνειας πετρελαίου-αέρα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Z_{aw} = Z_{ow} + \rho_{ro} H_o \qquad [5.6]$$

Όπου $H_o = Z_{ao} - Z_{ow}$

Η μεταβιβασιμότητα για το νερό και το πετρέλαιο εκφράζονται ως:

$$T_{p_{ij}} = \int_{Z_L}^{Z_u} k_{rp} K_{sp_{ij}} dz \qquad [5.7a]$$

Η μεταβιβασιμότητα για το αέριο είναι:

$$T_{a_{ij}} = \int_{P_{ao}}^{Z_s} k_{ra} K_{so_{ij}} dz \qquad [5.7b]$$

όπου, K_{rp} είναι η σχετική διαπερατότητα της φάσης p, $K_{sw_{ij}}$ ο τανυστής της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας, $K_{so_{ij}} = \frac{\rho_{r_o} K_{sw_{ij}}}{n_{ro}}$, $K_{sa_{ij}} = \frac{\rho_{r_a} K_{sw_{ij}}}{n_{ra}}$, z_u *and* z_L είναι τα κάτω και άνω όρια ολοκλήρωσης για τις φάσεις του νερού και του πετρελαίου, Z_s είναι το ύψος της επιφάνειας του εδάφους, n_{ro} είναι ο λόγος του δυναμικού ιξώδες του πετρελαίου στο νερό και n_{ra} είναι ο λόγος του δυναμικού ιξώδες του αερίου στο νερό. R_p είναι ο ρυθμός πηγής / καταβόθρας, P = w, o για τις φάσεις νερού και πετρελαίου, και P_{ao} είναι το ύψος της διεπιφάνειας μεταξύ αέρα-πετρελαίου, αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις [5.4α], [5.4β], και [5.4c] μπορούν να γραφτούν ως:

$$C_{ww}\frac{\partial Z_{aw}}{\partial t} + C_{wo}\frac{\partial Z_{ao}}{\partial t} + C_{wa}\frac{\partial Z_{aa}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(T_{w_{ij}}\frac{\partial Z_{aw}}{\partial x_j}\right) + R_w \qquad [5.8a]$$

$$C_{ow}\frac{\partial Z_{aw}}{\partial t} + C_{oo}\frac{\partial Z_{ao}}{\partial t} + C_{oa}\frac{\partial Z_{aa}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(T_{o_{ij}}\frac{\partial Z_{ao}}{\partial x_j}\right) + R_o \qquad [5.8b]$$

$$C_{ao}\frac{\partial Z_{ao}}{\partial t} + C_{aa}\frac{\partial Z_{aa}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(T_{a_{ij}}\frac{\partial Z_{aa}}{\partial x_j}\right) + R_a \qquad [5.8c]$$

όπου $C_{p_q} = \frac{\partial V_p}{\partial Z_{aq}}$ είναι οι χωρητικότητες των ρευστών, q = w, o, α για το νερό, το πετρέλαιο και το αέριο, αντίστοιχα [DAEM, 1996-7].

5.3 Υπολειμματικός κορεσμός NAPL

5.3.1 Πτώση επιφάνειας Αερίου - Πετρελαίου

Όταν η επιφάνεια αέρα-πετρελαίου πέφτει, P_{ao}, το πετρέλαιο παγιδεύεται στην ακόρεστη ζώνη. Ο μέγιστος ειδικός όγκος του πετρελαίου που παγιδεύεται στην ακόρεστη ζώνη είναι

$$V_{um} = S_{og}\,\phi\,\Delta P_{ao} \qquad [5.9a]$$

$$P_{ao} = Z_{ao} - h_a \qquad [5.9b]$$

Όπου S_{og} είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος υπολειμματικός κορεσμός στην ακόρεστη ζώνη και ΔP_{ao} είναι η αλλαγή στο υψόμετρο P_{ao}. Ο όρος S_{og} μπορεί να εκφραστεί ως

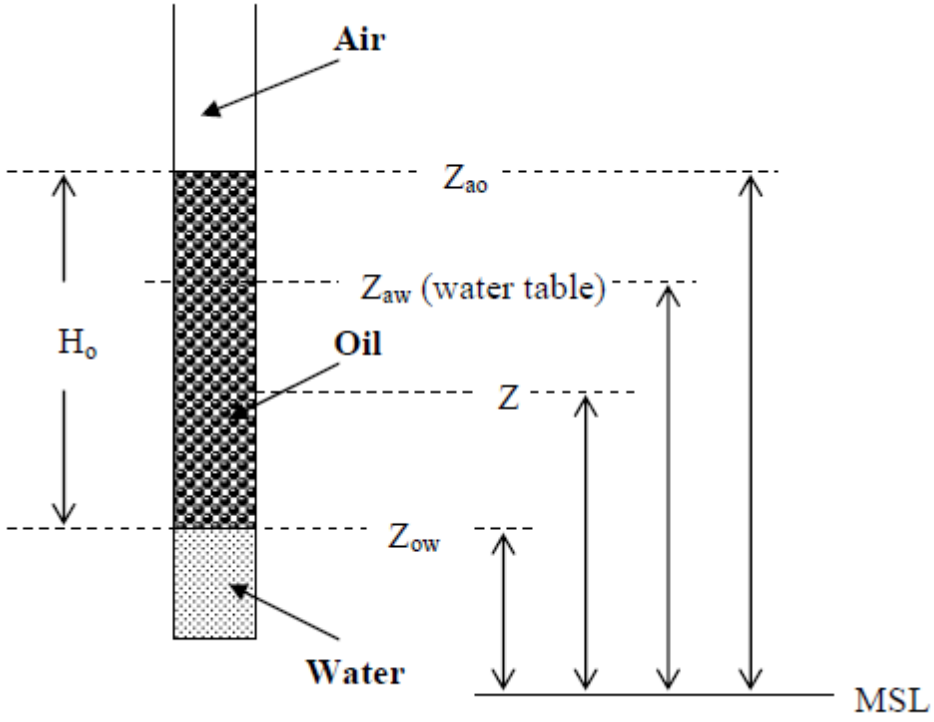
$$S_{og} = F_g \, S_m \left(1 - S_m\right) \qquad [5.10]$$

Όπου το F_g μπορεί να κυμαίνεται από 0,2 έως 0,5. Ο ειδικός όγκος παγιδευμένου πετρελαίου στην ακόρεστη ζώνη V_u μπορεί να εκφραστεί ως:

$$V_u = Min\left(V_{um}, V_{ua}\right) \qquad [5.11]$$

Όπου V_{ua} είναι ο πραγματικός ειδικός όγκος του πετρελαίου που υπάρχει στην ακόρεστη ζώνη [DAEM, 1996-7].

Το σχήμα 5.1 απεικονίζει την ισορροπία μεταξύ των φάσεων του νερού και του πετρελαίου σε ένα πηγάδι παρατήρησης.



Σχήμα 5.1: Πηγάδι παρατήρησης στο οποίο οι φάσεις του νερού και του πετρελαίου βρίσκονται σε κάθετη ισορροπία [Li et al., 2003]

5.3.2 Η ανύψωση της επιφάνειας του νερού

Όταν η επιφάνεια του πετρελαίου-νερού, Z_{ow}, ανεβαίνει, το πετρέλαιο είναι παγιδευμένο στην κορεσμένη ζώνη. Ο μέγιστος ειδικός όγκος του πετρελαίου παγιδευμένου στη ζώνη κορεσμού μπορεί να εκφραστεί ως

$$V_{sm} = S_{or}\,\phi\,\Delta Z_{ow} \qquad [5.12]$$

Όπου ΔZ_{ow} είναι η αλλαγή στο ύψος Z_{ow}. S_{or} είναι ο μέγιστος υπολειμματικός κορεσμός στην κορεσμένη ζώνη και μπορεί να εκφραστεί ως

$$S_{or} = F_r(1 - S_m) \qquad [5.13]$$

Όπου το F_r κυμαίνεται από 0,2 έως 0,5. Ο ειδικός όγκος του παγιδευμένου πετρελαίου στην κορεσμένη ζώνη V_s , μπορεί να εκφραστεί ως

$$V_s = Min(V_{sm}, V_{sa}) \qquad [5.14]$$

Όπου V_{sa} είναι ο πραγματικός ειδικός όγκος του πετρελαίου που βρίσκεται στην περιοχή ΔZ_{ow} της ακόρεστης ζώνης [DAEM, 1996-7].

5.4 Υπολογισμός των απαιτούμενων παραμέτρων

5.4.1 Πάχος προϊόντος LNAPL – Πιέσεις

Η στάθμη του υγρού P_{ao} και P_{aw} σχετίζονται με το πάχος του προϊόντος H_o ως:

$$H_o = \frac{P_{ao} - P_{aw}}{1 - \rho_{ro}} \qquad [5.15]$$

Η πίεση της κάθε φάση σε υψόμετρο Z σχετίζεται με τη στάθμη του υγρού P_{aw} και P_{ao} ως

$$\Psi_w = (Z_{aw} - Z) \qquad [5.16a]$$
$$\Psi_o = \rho_{ro}(Z_{ao} - Z) \qquad [5.16b]$$

Όπου $P_{aw} = Z_{aw}-h_a$, $P_{ao} = Z_{ao}-h_a/\rho_o$, και h_a = ισοδύναμο ύψος αερίου στην υγρή φάση.

Κάθετες κατανομές κορεσμού του νερού και του πετρελαίου υπολογίζονται (για διάφορες τιμές H_o και h_a και διαφορετικούς συνδυασμούς Z_{ao} και Z_{aw}) από την κάθετη κατανομή της ψ_w και ψ_o χρησιμοποιώντας και στις τρεις φάσεις τις ιδρυτικές σχέσεις πίεσης-κορεσμού οι οποίες εξηγούνται στην επόμενη ενότητα [DAEM, 1996-7].

5.4.2 Ιδρυτικές Σχέσεις

Οι σχέσεις μεταξύ πίεσης-κορεσμού περιγράφονται από μία τριφασική επέκταση του μοντέλου van Genuchten, 1980 που λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις του παγιδευμένου NAPL.

Πριν από την εμφάνιση του πετρελαίου σε μια δεδομένη θέση, το σύστημα αντιμετωπίζεται ως ένα σύστημα δύο φάσεων αέρα-νερού που περιγράφεται από την εξίσωση van Genuchten (1980):

$$\bar{S}_w = \left[1 + (a\psi_{aw})^n\right]^{-m} \qquad [5.17]$$

Όπου $\bar{S}_w = (S_w - S_m)/(1 - S_m)$ είναι ο «αποτελεσματικός» κορεσμός ύδατος, S_m είναι ο «αμείωτος» κορεσμός ύδατος, α [L^{-1}] και n [-] είναι παράμετροι του πορώδες μέσου, $m = 1 - \frac{1}{n}$ και $\psi_{aw} = h_a - \psi_w$ είναι η τριχοειδής πίεση αέρα-νερού.

Μετά την εμφάνιση του πετρελαίου στην περιοχή, το σύστημα περιγράφεται από τις παρακάτω τριφασικές σχέσεις:

$$\bar{\bar{S}}_w = \left[1 + (a\beta_{ow}\psi_{ow})^n\right]^{-m} \qquad [5.18]$$

$$\bar{S}_t = \left[1 + (a\beta_{ao}\psi_{ao})^n\right]^{-m} \qquad [5.19]$$

Όπου $\bar{\bar{S}}_w$ είναι ο φαινομενικός κορεσμός ύδατος, $\bar{S}_t$ είναι ο συνολικός αποτελεσματικός κορεσμός του υγρού, $\psi_{ow} = \psi_o - \psi_w$ είναι η τριχοειδής πίεση πετρελαίου-νερού, $\psi_{ao} = h_a - \psi_o$ είναι η τριχοειδής πίεση αέρα-πετρελαίου, β_{ao} είναι ένας συντελεστής που μπορεί να προσεγγιστεί από το λόγο της επιφανειακής τάσης του νερού προς την επιφανειακή τάση του πετρελαίου και β_{ow} είναι ένας συντελεστής που προσεγγίζεται από το λόγο της επιφανειακής τάσης του νερού προς την διεπιφανειακή τάση πετρελαίου-νερού.

Ο φαινομενικός κορεσμός του νερού δίνεται από τον τύπο:

$$\bar{\bar{S}}_w = \bar{S}_w + \bar{S}_{ot} \qquad [5.20]$$

Όπου $\bar{S}_{ot}$ είναι ο αποτελεσματικός παγιδευμένος κορεσμός πετρελαίου. Μια επιλογή έχει προστεθεί για την εκτίμηση του $\bar{S}_{ot}$ χρησιμοποιώντας την εμπειρική σχέση του Land (1968):

$$\bar{S}_{ot} = \left\{ \frac{1 - \bar{S}_w^{\min}}{1 + R_{ow}\left(1 - \bar{S}_w^{\min}\right)} - \frac{1 - \bar{\bar{S}}_w}{1 + R_{ow}\left(1 - \bar{\bar{S}}_w\right)} \right\} \quad for\ \bar{\bar{S}}_w > \bar{S}_w^{\min} \qquad [5.21a]$$

$$= 0 \qquad for\ \bar{\bar{S}}_w \le \bar{S}_w^{\min} \qquad [5.21b]$$

Όπου $R_{ow} = \frac{1}{\bar{S}_{or}} - 1$ [5.22]

Όπου $\bar{S}_{or}$ είναι ο μέγιστος αποτελεσματικός υπολειμματικός κορεσμός πετρελαίου, όπου ο αποτελεσματικός κορεσμός πετρελαίου εκφράζεται με την μορφή $\frac{S_o}{1-S_m}$. Ο ελάχιστος αποτελεσματικός κορεσμός ύδατος, $\bar{S}_w^{\min}$ ορίζεται ως ο ελάχιστος αποτελεσματικός κορεσμός του νερού που προέκυψε σε μια δεδομένη τοποθεσία από την στιγμή της αλλαγής από τις δύο φάσεις αέρα-νερού σε τριφασικό σύστημα αέρα-πετρελαίου-νερού. Ο πραγματικός κορεσμός νερού και πετρελαίου μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$S_w = (1-S_m)\left(\bar{\bar{S}}_w - \bar{S}_{ot}\right) + S_m \qquad [5.23]$$

Και

$$S_o = (1-S_m)\bar{S}_t + S_m - S_w \qquad for\ Z_{ow} < Z < Z_u \qquad [5.24a]$$

$$S_o = 0 \qquad for\ Z < Z_{ow}\ or\ Z > Z_u \qquad [5.24b]$$

Οι εξισώσεις [5.15] μέσω των [5.24] μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστούν η κατακόρυφη κατανομή του ελεύθερη προϊόντος υδρογονανθράκων και του πετρελαίου που παγιδεύεται στην κορεσμένη ζώνη.

Η κάθετη ολοκλήρωση του προφίλ κορεσμού σε κάθε φάση δίνει τον ειδικό όγκο νερού, V_W, τον ειδικό όγκο ελεύθερου προϊόντος πετρελαίου, V_o και τον ειδικό όγκο παγιδευμένου πετρελαίου V_{ts} στην κορεσμένη ζώνη, ως:

$$V_w^* = \int_{Z_L}^{Z_u} \phi S_w(Z)\,dz \qquad [5.25a]$$

$$V_{of} = \int_{Z_{ow}}^{Z_u} \phi S_{of}(Z)\,dz \qquad [5.25b]$$

$$V_{ts} = \int_{Z_{ow}}^{Z_u} \phi S_{ot}(Z)\,dz \qquad [5.25c]$$

Όπου Z_u είναι το ανώτερο ύψος του προφίλ κατανομής υδρογονανθράκων στην περιοχή και δίνεται από:

$$Z_u = Z_{ow} + \frac{\rho_{ro}\beta_{ao}H_o}{\rho_{ro}\beta_{ao} - (1-\rho_{ro})\beta_{ow}} \qquad [5.26]$$

Όπου ρ_{ro} είναι το ειδικό βάρος του πετρελαίου.

Οι εξισώσεις [5.26] δίνουν το φαινομενικό ειδικό όγκο του νερού V_W^* και τον ειδικό όγκο του ελεύθερου και του υδραυλικά ενωμένου NAPL, V_{of}. Οι φαινομενικές ικανότητες των ρευστών:

$\frac{\partial V_w^*}{\partial z_{aw}}, \frac{\partial V_w^*}{\partial z_{ao}}, \frac{\partial V_w^*}{\partial z_{aa}}, \frac{\partial V_{of}}{\partial z_{aw}}, \frac{\partial V_{of}}{\partial z_{ao}}, \frac{\partial V_{of}}{\partial z_{aa}}, \frac{\partial V_a}{\partial z_{ao}}, \kappa\alpha\iota \frac{\partial V_a}{\partial z_{aa}}$ καθορίζονται αριθμητικά και τοποθετούνται σε πίνακες εσωτερικά από το MOVER για H_o και h_α συνδυασμούς. Η μεταβιβασιμότητα στη φάση του νερού, του πετρελαίου και του αερίου υπολογίζονται από την εξίσωση [5.7]

Εφόσον $V_w = V_w^* - V_{ot}$ και $V_o = V_{of} + V_{ot}$, οι ικανότητες των ρευστών υπολογίζονται ως:

$$C_{ww} = \frac{\partial V_w^*}{\partial Z_{aw}} - \frac{\partial V_{ot}}{\partial Z_{aw}} \qquad [5.27a]$$

$$C_{wo} = \frac{\partial V_w^*}{\partial Z_{ao}} - \frac{\partial V_{ot}}{\partial Z_{ao}} \qquad [5.27b]$$

$$C_{ow} = \frac{\partial V_{of}}{\partial Z_{aw}} + \frac{\partial V_{ot}}{\partial Z_{aw}} \qquad [5.27c]$$

$$C_{oo} = \frac{\partial V_{of}}{\partial Z_{ao}} + \frac{\partial V_{ot}}{\partial Z_{ao}} \qquad [5.27d]$$

Όπου V_{ot} είναι ο παγιδευμένος ειδικός όγκος πετρελαίου, [L] [DAEM, 1996-7].

5.4.3 Αρχικές συνθήκες

Οι εξισώσεις [5.28a], [5.28b] και [5.28c] περιγράφουν τις αρχικές συνθήκες για το νερό, το πετρέλαιο και το αέριο, αντίστοιχα.

$$Z_{aw}(x_i, 0) = Z_{aw}^0 \qquad [5.28a]$$

$$Z_{ao}(x_i, 0) = Z_{ao}^0 \qquad [5.28b]$$

$$Z_{aa}(x_i, 0) = Z_{aa}^0 \qquad [5.28c]$$

5.4.4 Οριακές Συνθήκες

Οι εξισώσεις [5.29a, [5.29b] και [5.29c] περιγράφουν οριακές συνθήκες τύπου-1 για το νερό, το πετρέλαιο και το αέριο, αντίστοιχα, στο τμήμα S_1, και οι εξισώσεις [5.30a], [5.30b] και [5.30c]

περιγράφουν οριακές συνθήκες ροής για το νερό, το πετρέλαιο και το αέριο με κάθετη ολοκλήρωση της κανονικής ροής για το νερό, το πετρέλαιο και το αέριο ίση με Q_{wf}, Q_{of}, Q_{af}, αντίστοιχα, στην περιοχή S2.

$$Z_{aw}(x_i,t) = Z_{aw1}(x_i) \qquad t>0 \quad on \quad S_1 \qquad [5.29a]$$

$$Z_{ao}(x_i,t) = Z_{ao1}(x_i) \qquad t>0 \quad on \quad S_1 \qquad [5.29b]$$

$$Z_{aa}(x_i,t) = Z_{aa1}(x_i) \qquad t>0 \quad on \quad S_1 \qquad [5.29c]$$

$$T_{w_{ij}} \frac{\partial Z_{aw}}{\partial x_i} = Q_{wf}(t) \qquad t>0 \quad on \quad S_2 \qquad [5.30a]$$

$$T_{o_{ij}} \frac{\partial Z_{ao}}{\partial x_i} = Q_{of}(t) \qquad t>0 \quad on \quad S_2 \qquad [5.30b]$$

$$T_{a_{ij}} \frac{\partial Z_{aa}}{\partial x_i} = Q_{af}(t) \qquad t>0 \quad on \quad S_2 \qquad [5.30c]$$

Οριακή συνθήκη πηγής / καταβόθρας (Source/sink boundary condition)

Υδατική Φάση

Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον ρυθμό άντλησης νερού (+) ή εμπλουτισμού (-) στους κόμβους. Με το/τα πηγάδια άντλησης, εάν η προσομοίωση της επιφάνειας αέρα-νερού (P_{aw}) στην τοποθεσία του πηγαδιού πέσει κάτω από το ύψος που βρίσκεται η αντλία, ένα όριο τύπου-1 προσδιορίζεται εσωτερικά με το P_{aw} να ισούται με το P_e της αντλίας ανύψωσης. Αλλά αν το προσομοιωμένο ογκομετρικό ποσοστό είναι μικρότερο του μηδενός γεγονός που δηλώνει εμπλουτισμό (που θα προκύψει, εάν το P_{aw} σε κόμβους γύρω από το πηγάδι πέφτει κάτω από P_{aw} στο πηγάδι), δεν εφαρμόζεται οριακή συνθήκη τύπου-1.

Φάση Πετρελαίου

Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον ρυθμό άντλησης (ή έκχυσης) πετρελαίου $\left[\frac{L^3}{T}\right]$ στους κόμβους. Όταν το υπολογιζόμενο ποσοστό ανάκτησης του πετρελαίου είναι μικρότερο από το καθορισμένο ρυθμό άντλησης, το MOVER επιβάλλει οριακή συνθήκη τύπου-1 στο πηγάδι με $P_{ao} = P_{aw}$.

Τεχνικές επίλυσης

Οι εξισώσεις 5.8α και 5.8b για τις φάσεις του νερού και του πετρελαίου, αντίστοιχα, συνδυάζονται και επιλύονται ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

του Galerkin. Η διαδικασία προσέγγισης Galerkin έχει αναφερθεί από τους Huyakorn και Pinder, 1983, Katyal και King, 1987. Η επίλυση της εξίσωσης που αφορά την αέρια φάση [5.8c] δεν συνδυάζεται άμεσα (coupled) με τις λύσεις για το νερό και το πετρέλαιο. Το MOVER χρησιμοποιεί δισδιάστατα (2-D) ορθογώνια ή ισοπαραμετρικά στοιχεία για να προσομοιώσει με ακρίβεια τα φυσικά όρια. Κατά τη διάρκεια κάθε χρονικού βήματος, μία λύση για τη φάση του αερίου σε σταθερή κατάσταση προσδιορίζεται για τις τρέχουσες οριακές συνθήκες. Αυτό οδηγεί σε πιο αποτελεσματική και σταθερή λύση. Αυτή η υπόθεση είναι λογική, διότι οι πιέσεις στην αέρια φάση φτάνουν σε σταθερή κατάσταση αρκετά γρήγορα σε σύγκριση με τη συνολική περίοδο ανάκτησης του ελεύθερου προϊόντος [DAEM, 1996-7].

6. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1 Στοιχεία εισόδου στο Μοντέλο MOVER

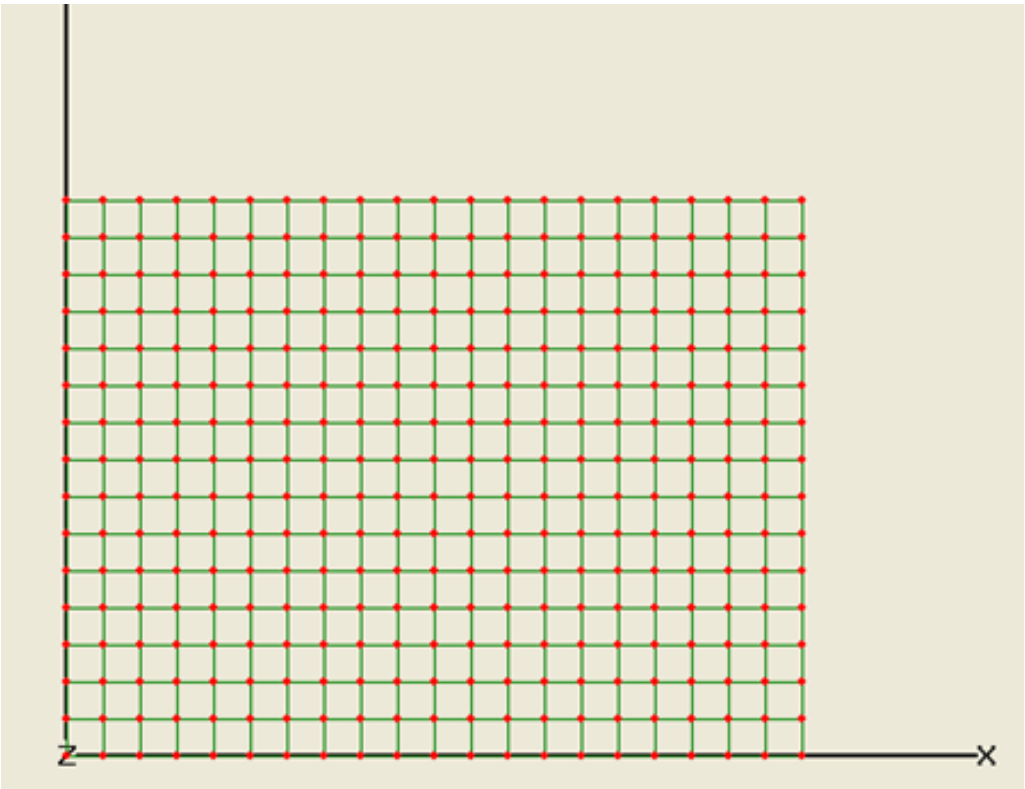
Για τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και μεταφοράς NAPL, το μοντέλο MOVER απαιτεί την εισαγωγή δεδομένων που αφορούν στην υδρογεωλογία της περιοχής (υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες κλπ.), στον τύπο του υδροφορέα, στις οριακές και αρχικές συνθήκες, καθώς και στον χρόνο προσομοίωσης. Το μοντέλο υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη, το πάχος του ελεύθερου προϊόντος, καθώς και την πίεση του αέρα.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, θεωρήθηκε μία ευρύτερη περιοχή στη περιοχή Cantuar, η οποία είχε ρυπανθεί λόγω διαρροών από μία υπάρχουσα δεξαμενή αποθήκευσης νάφθας, στην οποία έχουν τοποθετηθεί πηγάδια άντλησης και πηγάδια παρατήρησης, και εξετάζεται τόσο η μεταφορά της ρύπανσης από την πηγή προς την ευρύτερη περιοχή, όσο και η μεταβολή στα υδραυλικά ύψη ύστερα από την εφαρμογή της μεθόδου ανάκτησης με τη βοήθεια πίεσης κενού. Τα υδρογεωλογικά δεδομένα που εισάγουμε στο μοντέλο, ελήφθησαν από τον Qin et al. (2008).

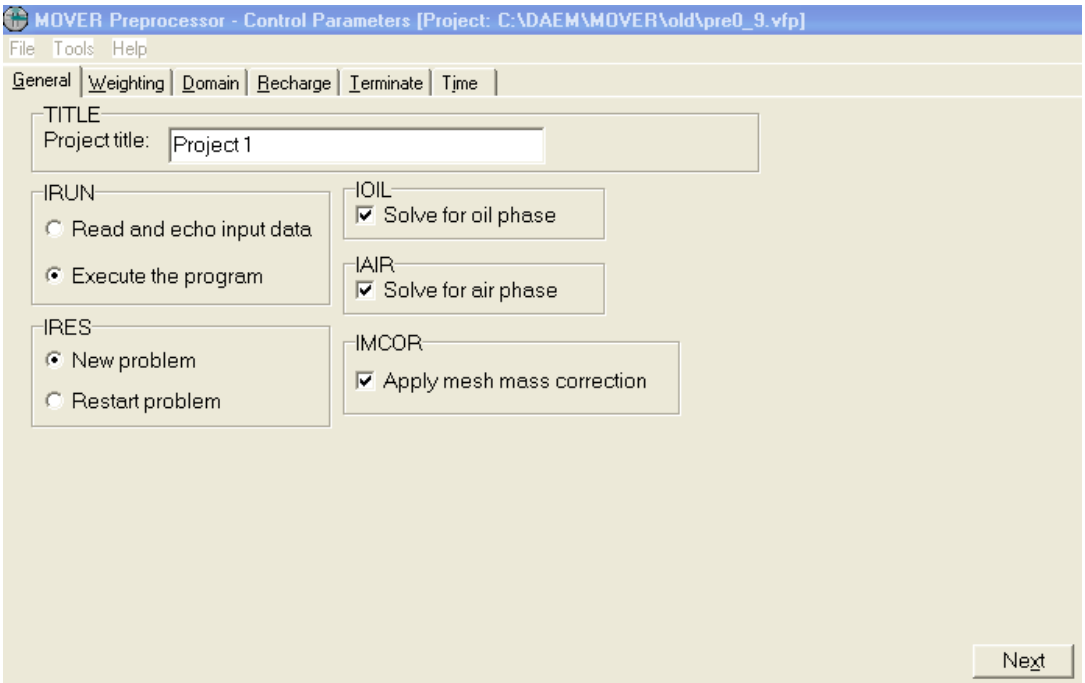
6.1.1 Διαδικασία τοποθέτησης δεδομένων στο μοντέλο MOVER

Αρχικά στο μοντέλο πρέπει να προσδιοριστεί η περιοχή μελέτης δημιουργώντας το πλέγμα στο mesh editor (Σχήμα 6.1).

Στη συνέχεια τοποθετούνται οι γενικές ρυθμίσεις κατά τις οποίες ο χειριστής μπορεί να επιλέξει για ποιες φάσεις θέλει να τρέξει το μοντέλο και αν θέλει να δημιουργήσει καινούργιο πρόβλημα ή να κάνει επανέναρξη (Σχήμα 6.2).

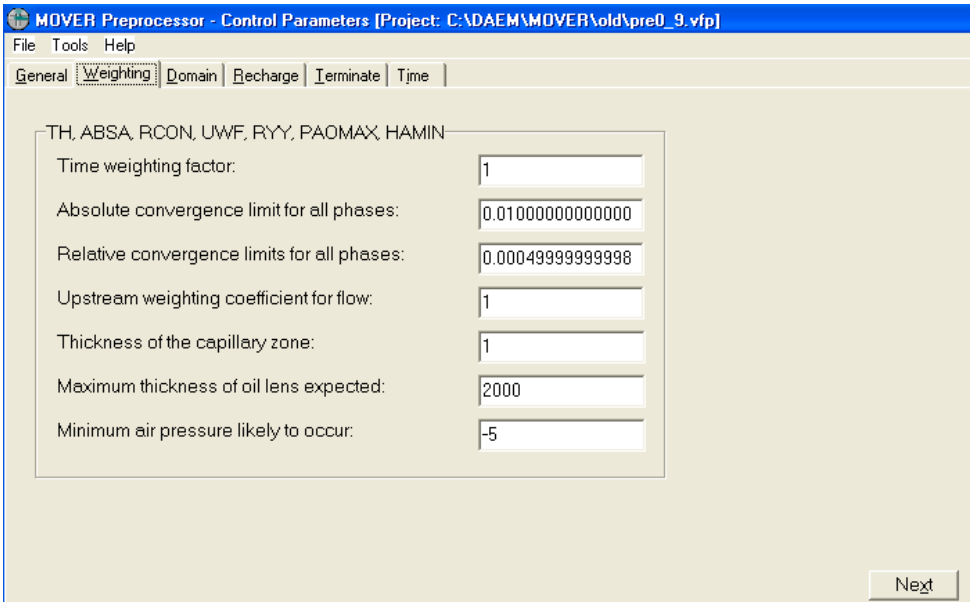


Σχήμα 6.1: Η δημιουργία του πλέγματος στο mesh editor



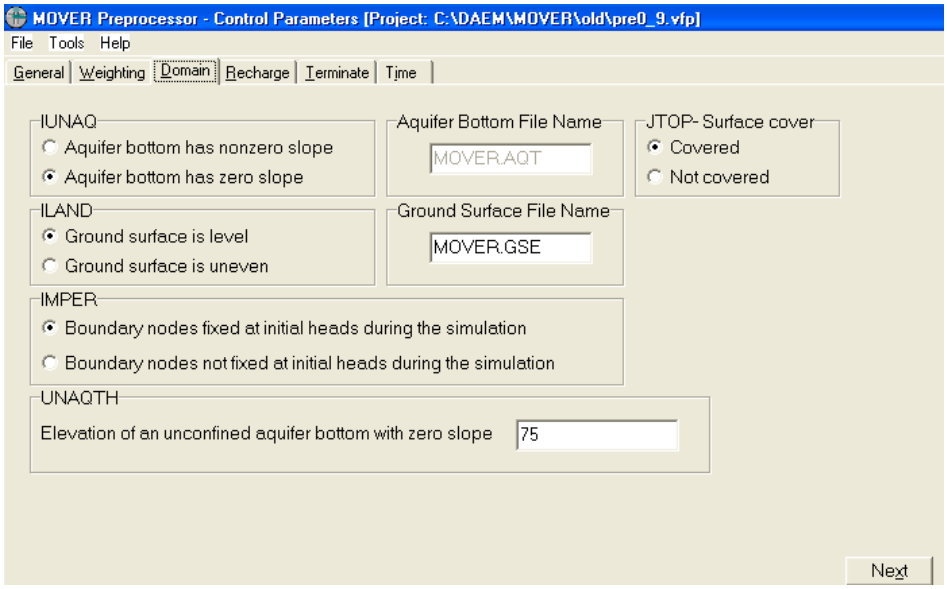
Σχήμα 6.2: Γενικές ρυθμίσεις στον pre processor

Στη συνέχεια τοποθετούνται οι παράμετροι που αφορούν το μέγιστο υδραυλικό ύψος, την ελάχιστη πίεση του αέρα η οποία είναι πιθανή να παρουσιαστεί (Σχήμα 6.3).



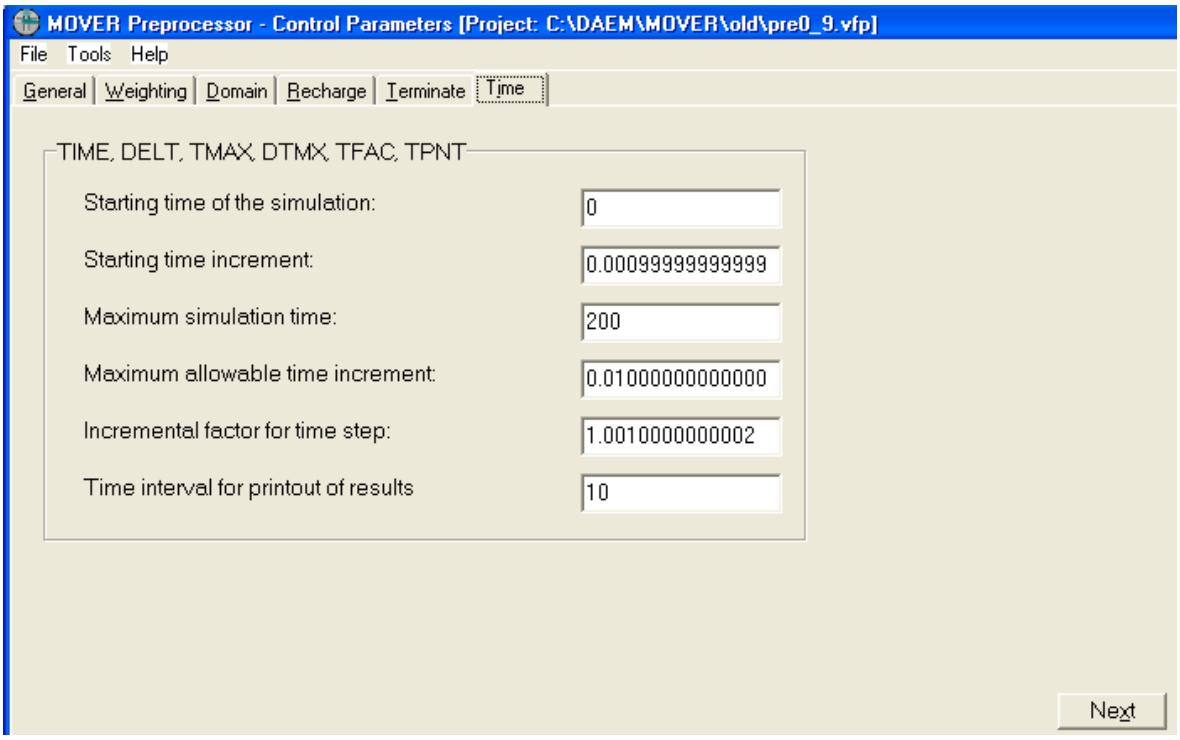
Σχήμα 6.3: Γενικές παράμετροι που αφορούν το αρχικό υδραυλικό ύψος, την ελάχιστη πίεση του αέρα

Ύστερα ακολουθεί η τοποθέτηση κάποιον παραμέτρων που αφορούν την μορφολογία του εδάφους (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4: Γεωμορφολογικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης

Πρέπει να οριστεί ο συνολικός χρόνος που θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση, το αρχικό χρονικό βήμα καθώς και η προσαύξηση του για κάθε επανάληψη που πραγματοποιείται κατά την επίλυση του προβλήματος (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5: Επιλογές για το χρόνο προσομοίωσης και των βημάτων

Στην συνέχεια γίνεται η προσθήκη των πηγαδιών με τις συντεταγμένες τους και τα ύψη του νερού και του ελεύθερου προϊόντος σε αυτά (Σχήμα 6.6). τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο ως αρχικές συνθήκες.

MOVER Preprocessor - Monitoring Wells [Project: C:\DAEM\MOVER\old\pre0_9.vfp]

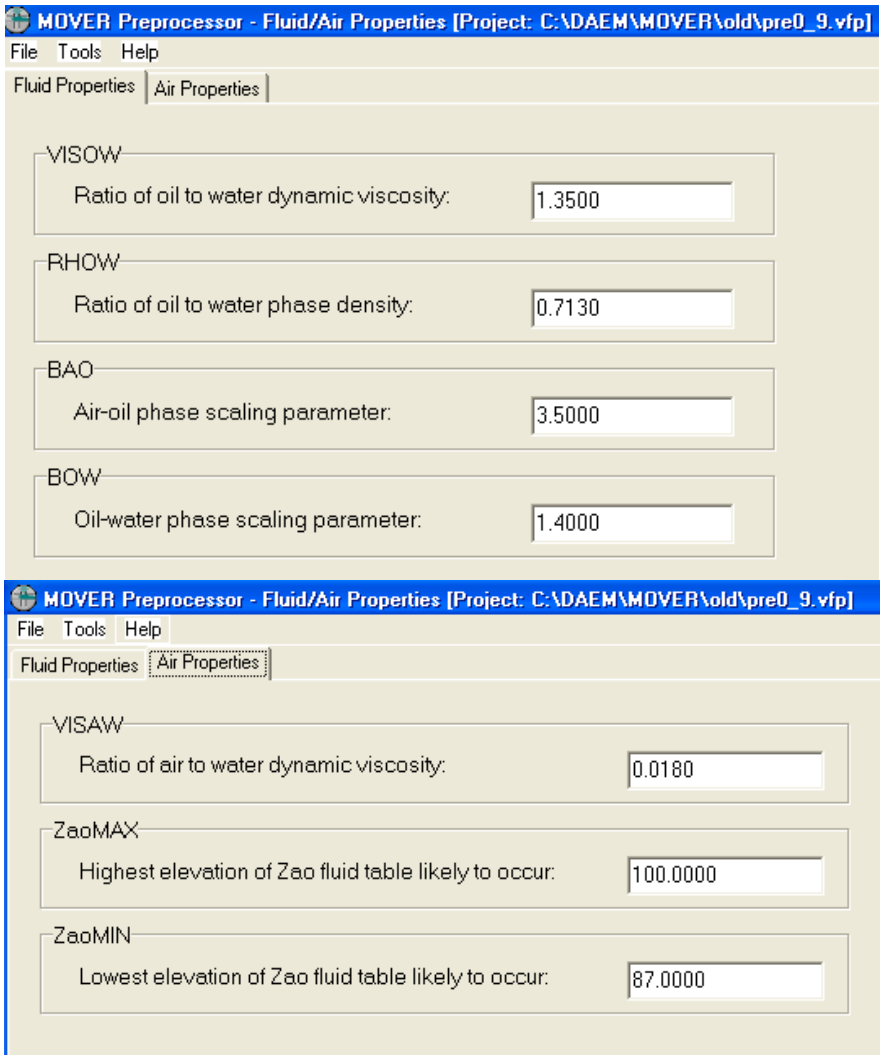
File Tools Help

Import... Monitoring Wells

Name	X	Y	Zao	Zow
BH303	8	20	87.40000000002	87.40000000002
BH304	12	28	87.55000000004	87.55000000004
BH204	12	32	87.81999999994	87.81999999994
BH301	16	20	87.80000000004	87.80000000004
BH203	16	36	87.93999999994	87.90000000002
BH205	16	44	88.5	87.69999999995
BH202	20	32	88.19200000003	88
BH111	24	36	90.40000000002	88.11999999999
BH206	24	48	88.09999999997	88.09999999997
BH208	28	16	88.19999999995	88.19999999995
BH201	28	24	89.5	88.19999999995
BH302	36	8	88.59999999997	88.59999999997
BH110	36	20	88.88800000003	88.48999999999
BH110	36	20	88.88800000003	88.48999999999
BH207	36	52	88.48999999999	88.48999999999
BH107	40	40	88.95499999995	88.94999999995
BH106	44	36	88.90099999995	88.69999999995
BH104	48	48	88.58799999998	88.56999999994
BH402	56	36	88.90000000002	88.90000000002
BH102	60	32	89.30000000004	89.30000000004
BH109	64	52	89.58999999996	89.58999999996
BH209	72	44	89.60999999998	89.60999999998
BH103	52	36	90.57299999997	88.80000000004
BH105	40	28	96	88.38000000000
BH108	24	40	92	88
BH401	56	40	90.90000000002	88.80000000004
BH101	60	44	89.92500000004	89.19999999995

Σχήμα 6.6: Τα πηγάδια που βρίσκονται στην περιοχή τοποθετούνται στον pre processor

Ύστερα στην καρτέλα Air/Fluid Properties εισάγονται δεδομένα την πυκνότητα, το ιξώδες του πετρελαίου και του αέρα στο νερό, την υψηλότερη και την χαμηλότερη τιμή του ύψους της επιφάνειας αέρα-πετρελαίου. (Σχήμα 6.7)



Σχήμα 6.7: Παράμετροι που αφορούν το πετρέλαιο και τον αέρα

Και τέλος καθορίζονται τα όρια της περιοχής με τα υδραυλικά ύψη που παρατηρούνται εκεί (τύπου 1) και τα όρια για τα πηγάδια άντλησης (τύπου 2) (Σχήμα 6.8). Οι οριακές συνθήκες πρώτου είδους για τη ροή λαμβάνονται από μετρήσεις στο πεδίο και είναι 87.3 m στα αριστερά και 91.5 m στα δεξιά της περιοχής προσομοίωσης. Επίσης συνθήκη πρώτου είδους είναι και η άντληση αέρα με ρυθμό στα -5m. Το πάχος του ελεύθερου προϊόντος είναι 1.3 m και λαμβάνεται από την μελέτη του Qin et al. (2008). Οι οριακές συνθήκες δεύτερου είδους είναι οι ρυθμοί άντλησης για το πετρέλαιο και το νερό, οι οποίες και αυτές πρέπει να τοποθετηθούν στον pre processor (Σχήμα 6.8).

MOVER Preprocessor - Boundary Schedules [Project: C:\DAEM\MOVER\old\pre0_9.vfp]

File Tools Help

Flow Type 1 | Flow Type 2

Number	Name	Time	Value	Time	Value	Time	Value	Time	Value
1	left boundary	0.0000	87.3000	9999.0000	87.3000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	right boundary	0.0000	91.0000	9999.0000	91.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	air1	0.0000	-5.0000	9999.0000	-5.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

MOVER Preprocessor - Boundary Schedules [Project: C:\DAEM\MOVER\old\pre0_9.vfp]

File Tools Help

Flow Type 1 | Flow Type 2

Number	Name	Time	Value	Time	Value	Time	Value	Time	Value
4	oil	0.0000	5.0000	1.0000	5.0000	200.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	water	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	200.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Σχήμα 6.8: Καθορισμός των οριακών συνθηκών 1^{ου} και 2^{ου} είδους

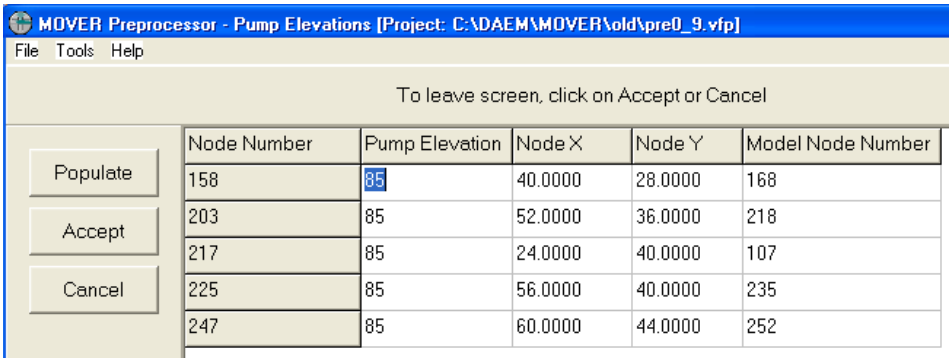
Στην συνέχεια πρέπει να ολοκληρωθεί το mesh αρχείο. Ανοίγει ο mesh editor και τοποθετούνται οι οριακές συνθήκες στους κόμβους που αντιστοιχούν σε κάθε συνθήκη (Σχήμα 6.9).

	X	Y	Z	"Soil Type"	"Type 1 Flow BC Water"	"Type 1 Flow BC Oil	"Type 1 Fl	"Type 2 Fl	"Type 2 Fl	"Type 2 Fl	"Recharge Zone"
138	44.00	24.00	0.00	soil1							
139	48.00	24.00	0.00	soil1							
140	52.00	24.00	0.00	soil1							
141	56.00	24.00	0.00	soil1							
142	60.00	24.00	0.00	soil1							
143	64.00	24.00	0.00	soil1							
144	68.00	24.00	0.00	soil1							
145	72.00	24.00	0.00	soil1							
146	76.00	24.00	0.00	soil1							
147	80.00	24.00	0.00	soil1	right boundary						
148	0.00	28.00	0.00	soil1	left boundary						
149	4.00	28.00	0.00	soil1							
150	8.00	28.00	0.00	soil1							
151	12.00	28.00	0.00	soil1							
152	16.00	28.00	0.00	soil1							
153	20.00	28.00	0.00	soil1							
154	24.00	28.00	0.00	soil1							
155	28.00	28.00	0.00	soil1							
156	32.00	28.00	0.00	soil1							
157	36.00	28.00	0.00	soil1							
158	40.00	28.00	0.00	soil1			air1	water	oil		
159	44.00	28.00	0.00	soil1							
160	48.00	28.00	0.00	soil1							

Σχήμα 6.9: Τοποθέτηση οριακών συνθηκών στο αρχείο mesh

Αυτό σημαίνει ότι το σημείο με συντεταγμένες για παράδειγμα 80,24 βρίσκεται στο δεξιότερο άκρο της περιοχής και του έχει οριστεί ότι το υδραυλικό ύψος εκεί ανέρχεται στα 87.3m και στο σημείο με συντεταγμένες 40,28 υπάρχει πηγάδι άντλησης νερού, πετρελαίου και αέρα. Έτσι έχει δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο αρχείο του mesh, το οποίο πρέπει να τοποθετηθεί στον pre

processor και επιλέγοντας την καρτέλα pump elevations και επιλέγοντας populate θα εμφανιστούν τα πηγάδια άντλησης (Σχήμα 6.10).



Node Number	Pump Elevation	Node X	Node Y	Model Node Number
158	85	40.0000	28.0000	168
203	85	52.0000	36.0000	218
217	85	24.0000	40.0000	107
225	85	56.0000	40.0000	235
247	85	60.0000	44.0000	252

Σχήμα 6.10 : Εμφάνιση των πηγαδιών άντλησης στον pre processor

Για να τρέξει το πρόβλημα επιλέγεται στην καρτέλα tools το Runner, και αποθηκεύεται με το όνομα που θα του δοθεί.

Το τρίτο μέρος για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι η χρήση του post processor, στην μπάρα εργαλείων του οποίου επιλέγεται το Contouring, ανοίγει ο χρήστης όποιο αρχείο έχει αποθηκεύσει και έχει τρέξει πρώτα στον pre processor και στη συνέχεια επιλέγει το F που είναι για τη ροή και μπορεί να επιλέξει όποιο διάγραμμα θέλει να αποθηκεύσει και για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, ώστε να του δείξει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο πρόγραμμα Surfer.

6.1.2 Δεδομένα εισόδου

Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της ροής στην περιοχή μελέτης έχουν ληφθεί από τους Qin et al. (2008). Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 6.1) δίνονται συγκεντρωτικά τα δεδομένα εισόδου.

Πίνακας 6.1: Παράμετροι οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση (Qin et al., 2008)

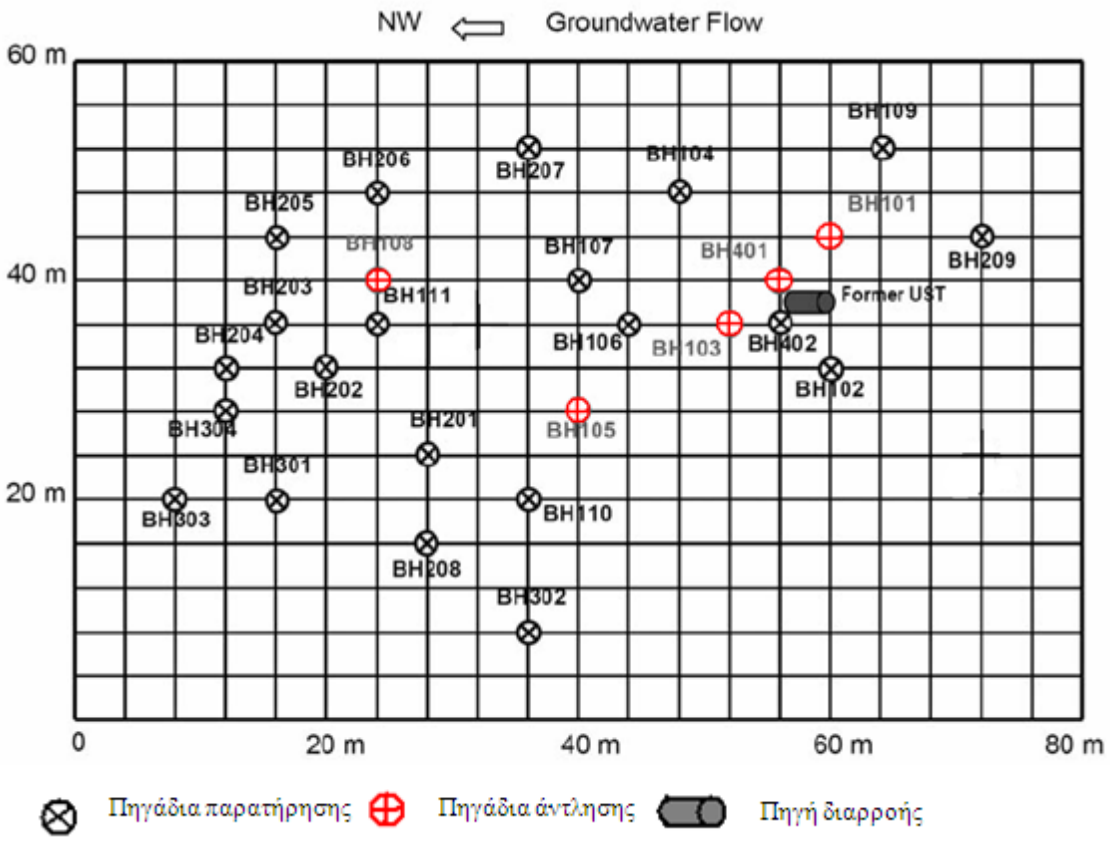
Παράμετρος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδα
Πυκνότητα υδρογονάνθρακα	ρ_o	0.713	gr/cm^3
Λόγος του δυναμικού ιξώδες του πετρελαίου στο νερό	n_{ro}	1.35	-
Λόγος του δυναμικού ιξώδες του αερίου στο νερό	n_{ra}	0.018	-
Υδραυλική αγωγιμότητα	K_{sw}	0.90	m/day
Πορώδες	φ	0.30	-
Υπολειμματικός κορεσμός νερού	S_m	0.10	-
Παράμετρος van Genuchten	α	2.2	m^{-1}
Παράμετρος van Genuchten	n	1.41	-
Συντελεστής προσέγγισης του λόγου επιφανειακής τάσης του νερού προς την επιφανειακή τάση του πετρελαίου	β_{ao}	3.5	-
Συντελεστής προσέγγισης του λόγο επιφανειακής τάσης του νερού προς την επιφανειακή τάση πετρελαίου-νερού	β_{ow}	1.4	-
Μέγιστος επιτρεπόμενος υπολειμματικός κορεσμός	S_{og}	0.10	-
Μέγιστος πιθανός βαθμός vacuum	H_{max}	-5	m
Ύψος της ακόρεστης ζώνης		75	m
Μέγιστο ύψος της επιφάνειας αέρα-πετρελαίου που είναι πιθανή	Z_{aomax}	100	m
Ελάχιστο ύψος της επιφάνειας αέρα-πετρελαίου που είναι πιθανή	Z_{aomin}	87	m
Μέγιστο πάχος πετρελαίου που είναι πιθανό	V_{max}	2000	mm

Επίσης στον πίνακα 6.2 φαίνονται τα αρχικά ύψη του ελεύθερου προϊόντος στα πηγάδια παρατήρησης και στα πηγάδια άντλησης [Qin et al., 2008].

Πίνακας 6.2: Υδραυλικά ύψη για το ελεύθερο προϊόν στα πηγάδια

Όνομα πηγαδιού	Ύψος επιφάνειας νερού-πετρελαίου Z_{ow} (m)	Ύψος της επιφάνειας αέρα-πετρελαίου Z_{ao} (m)
BH101	89.2	89.925
BH102	89.3	89.3
BH103	88.8	90.573
BH104	88.57	88.588
BH105	88.38	96
BH106	88.7	88.901
BH107	88.95	88.955
BH108	88	92
BH109	89.59	89.59
BH110	88.49	88.888
BH111	88.12	90.4
BH201	88.2	89.5
BH202	88	88.192
BH203	87.9	87.94
BH204	87.82	87.82
BH205	87.7	88.5
BH206	88.1	88.1
BH207	88.49	88.49
BH208	88.2	88.2
BH209	89.61	89.61
BH301	87.8	87.8
BH302	88.6	88.6
BH303	87.4	87.4
BH304	87.55	87.55
BH401	88.8	90.9
BH402	88.9	88.9

Δεδομένου ότι η προσομοίωση θα εξετάσει την μακροπρόθεσμη μεταφορά ρύπων υπόγεια, υπό διάφορες στρατηγικές αποκατάστασης, θεωρείται μία σχετικά μεγάλη περιοχή για την προσομοίωση η οποία ξεπερνά τα όρια της αρχικής μολυσμένης περιοχής. Η περιοχή θεωρείται δισδιάστατη με διαστάσεις 80 × 60 m^2 (Σχήμα 6.11). Η περιοχή απαρτίζεται από 20 x 15 κελιά τα οποία έχουν διαστάσεις 4 x 4 m στους άξονες x και y. Ο συνολικός αριθμός των κελιών είναι 300 (20 x 15) και το έδαφος αποτελείται κυρίως από ιλυώδες άργιλο.



Σχήμα 6.11: Πλέγμα περιοχής μελέτης με τα πηγάδια παρατήρησης και άντλησης

6.2 Σενάρια προσομοίωσης

Μετά από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης βρέθηκαν διάφορες φάσεις υδρογονανθράκων. Αυτές περιλαμβάνουν υδρογονάνθρακες σε φάση ατμών στην ακόρεστη ζώνη, παγιδευμένοι υδρογονάνθρακες στο έδαφος, ελεύθερο προϊόν στον υδροφόρο ορίζοντα και διαλυμένοι υδρογονάνθρακες στα υπόγεια ύδατα. Το μέγιστο πάχος του ελεύθερου προϊόντος που βρέθηκε ανέρχεται στα 1.3m. Για να αφαιρεθεί το ελεύθερο προϊόν χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία της ανάκτησης ελεύθερου προϊόντος με τη βοήθεια πίεσης κενού. Το πρόγραμμα αποκατάστασης διεξήχθη για 120 ημέρες αρχικά και για άλλες 60 ημέρες στη συνέχεια, ώστε να επέλθει η μέγιστη μείωση του ρύπου.

Τα υπόγεια ύδατα της περιοχής μπορούν να χρησιμεύσουν για οικιακή χρήση, άρδρευση και κτηνοτροφία και για αυτό το λόγο επιχειρείται η βέλτιστη αποκατάσταση.

Ο δισδιάστατος προσομοιωτής δημιουργήθηκε με σκοπό να είναι δυνατή η εξέταση της μεταφοράς LNAPL καθώς και την αξιολόγηση σεναρίων αποκατάστασης.

Μια σειρά από σενάρια προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν για να προβλεφθούν οι χρονικές και χωρικές κατανομές της μεταφοράς των ρύπων τους κάτω από διαφορετικές επιλογές αποκατάστασης. Τα ακόλουθα τρία σενάρια δημιουργήθηκαν με την προϋπόθεση ότι δεν θα πραγματοποιηθεί περαιτέρω αποκατάσταση στο μέλλον:

(Α) Εάν δεν υπάρχει περαιτέρω αποκατάσταση στην περιοχή, τι θα συμβεί ύστερα από 30, 70, 120 και 200 ημέρες;

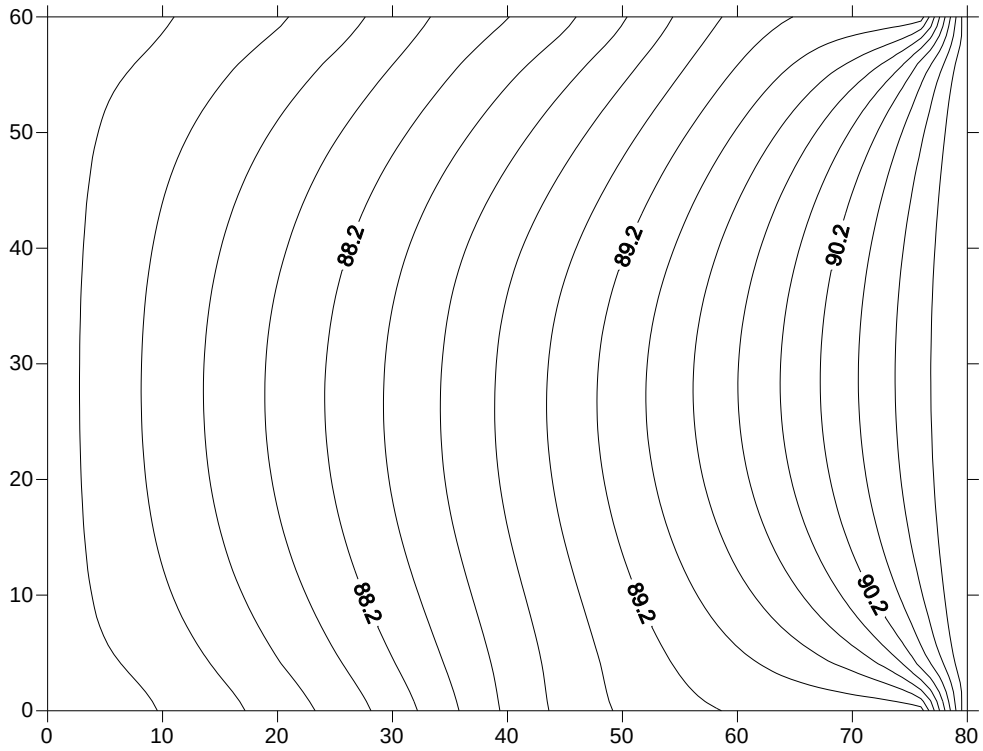
(Β) Εάν πραγματοποιηθεί αποκατάσταση με ρυθμούς άντλησης πετρελαίου 0.3 m^3/d και νερού 0.3 m^3/d , τι θα συμβεί ύστερα από 30, 70 και 120 ημέρες;

(Γ) Εάν πραγματοποιηθεί αποκατάσταση με ρυθμούς άντλησης πετρελαίου 5 m^3/d και νερού 3 m^3/d, τι θα συμβεί ύστερα από 30 ,70 και 120 ημέρες;

(Δ) Εάν πραγματοποιηθεί αποκατάσταση με ρυθμούς άντλησης πετρελαίου 5 m^3/d και νερού 3 m^3/d, τι θα συμβεί ύστερα από 200 ημέρες;

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα τέσσερα σενάρια δημιουργήθηκαν με σκοπό την πρόβλεψη της ρύπανσης για την περιοχή στο μέλλον. Αρχικά όμως πρέπει να αναφερθεί και να παρασταθεί σχηματικά η ροή που επικρατεί στον υδροφορέα (Σχήμα 7.1).



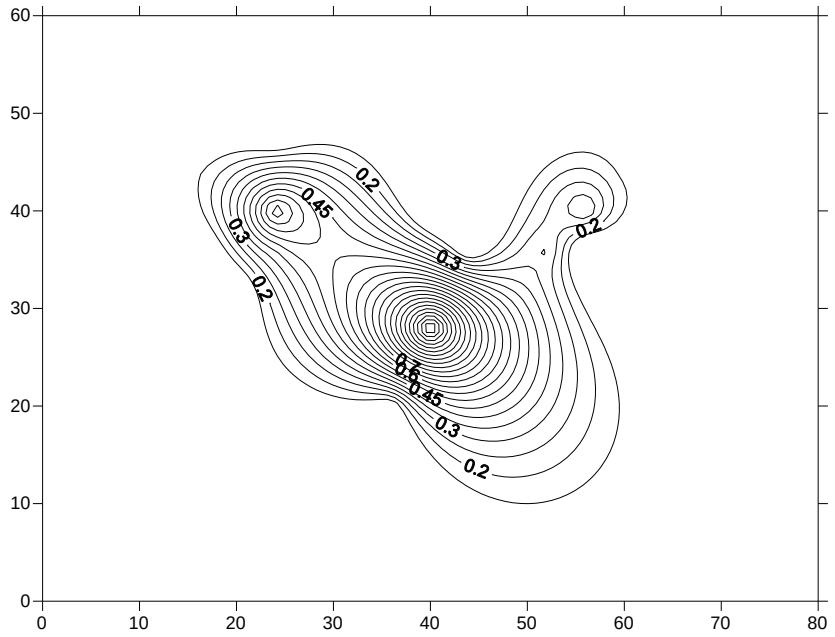
Σχήμα 7.1: Υδραυλική κλίση της περιοχής μελέτης

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα η ροή κατευθύνεται προς το αριστερό όριο της περιοχής μελέτης.

7.1 Σενάριο προσομοίωσης (Α)

Στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι δεν θα υπάρξουν περαιτέρω προσπάθειες αποκατάστασης της περιοχής. Το σενάριο αυτό λειτουργεί ως μέσο σύγκρισης για τα υπόλοιπα σενάρια. Οπότε βάσει των αρχικών δεδομένων παρουσιάζονται οι αρχικές και οι τελικές ποσότητες του υδρογονάνθρακα στην περιοχή ύστερα από πάροδο 30, 70, 120 και 200 ημερών.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 7.2) παρουσιάζεται η αρχική κατάσταση που επικρατεί όσον αφορά το πάχος του ελεύθερου προϊόντος.

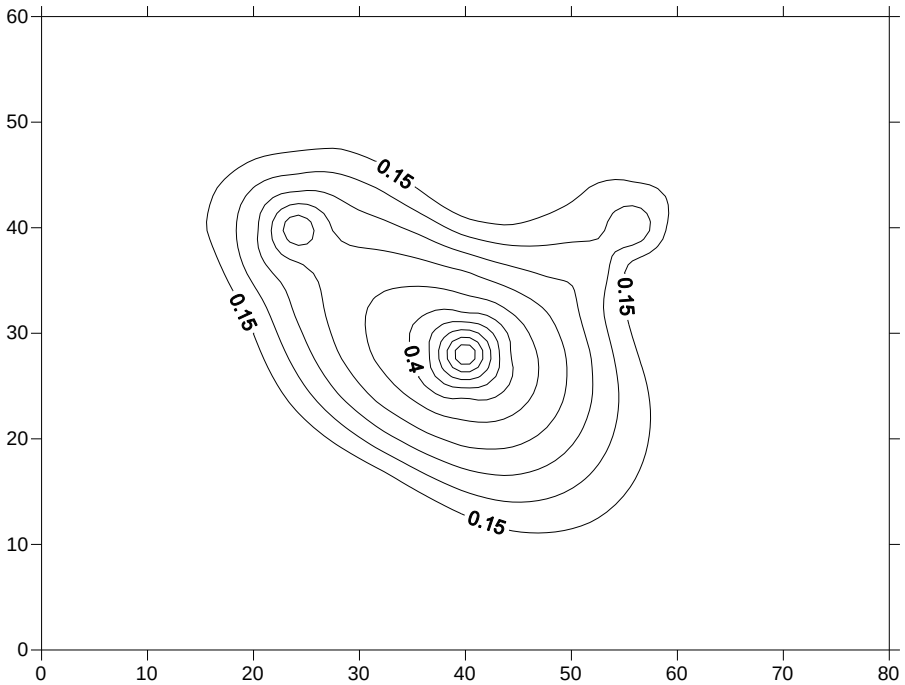


Σχήμα 7.2: Αρχικό πάχος του ελεύθερου προϊόντος στη περιοχή

Το παραπάνω σχήμα δείχνει ότι η μέγιστη τιμή που παρουσιάζεται για το πάχος του στρώματος του LNAPL στο πεδίο ανέρχεται στα 1.3m.

Δεδομένων των ιδιοτήτων του εδάφους και ύστερα από την χρήση του μοντέλου για χρόνο προσομοίωσης ίσο με 200 ημέρες η εξάπλωση του ρύπου παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 7.3). Το μέγιστο πάχος του LNAPL που παρατηρείται είναι 0.65m.

Ύστερα από χρόνο προσομοίωσης 30,70, 120 και 200 ημερών χωρίς άντληση του LNAPL έχουμε μέγιστο πάχος στοιβάδας του ρύπου ίσο με 0.65m και για αυτό το λόγο δεν θεωρήθηκε απαραίτητο να παρουσιαστούν τα διαγράμματα για το πάχος της στοιβάδας του NAPL σε όλες τις χρονικές στιγμές.



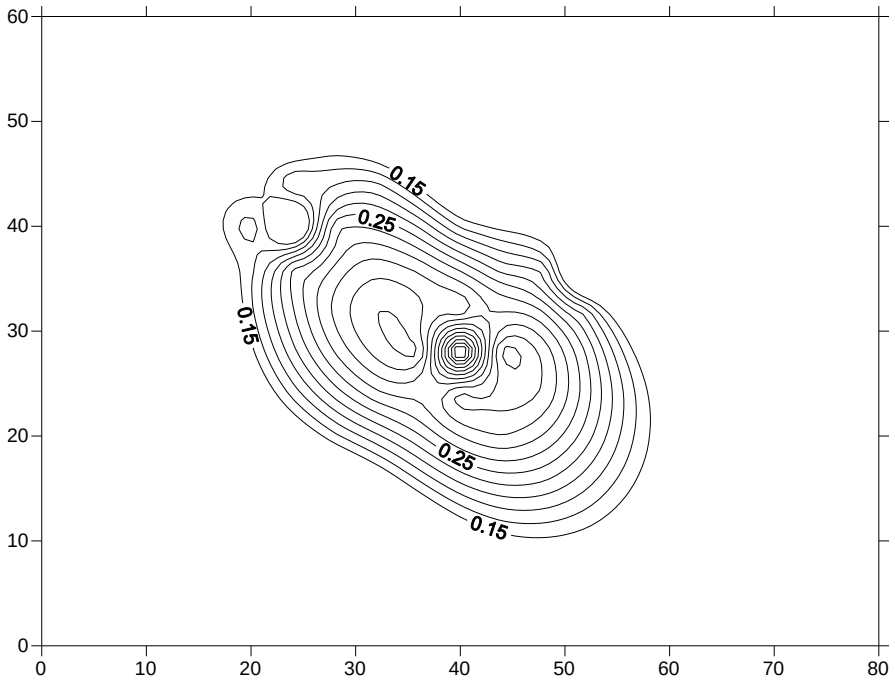
Σχήμα 7.3: Πάχος του ελεύθερου προϊόντος χωρίς καμία επεξεργασία μετά από πάροδο 200 ημερών

Αυτές οι μηδαμινές διαφορές που υπάρχουν στην εξάπλωση του ρύπου χωρίς επεξεργασία μεταξύ των τεσσάρων βημάτων εξηγείται από το γεγονός ότι ο υδροφορέας έχει πολύ μικρές ταχύτητες ροής, με αποτέλεσμα το χρονικό διάστημα των 200 ημερών να θεωρείται ελάχιστο ώστε να υπάρχουν εμφανείς διαφορές μεταξύ τους. Παρόλα αυτά φαίνεται ότι η αλλαγή επέρχεται εντός των 30 πρώτων ημερών. Αυτό συμβαίνει διότι στο σημείο με το μέγιστο αρχικό πάχος του ελεύθερου προϊόντος βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος εντός του υδροφορέα, με αποτέλεσμα να είναι πιο γρήγορη αρχικά η μετακίνηση του.

7.2 Σενάριο προσομοίωσης (Β)

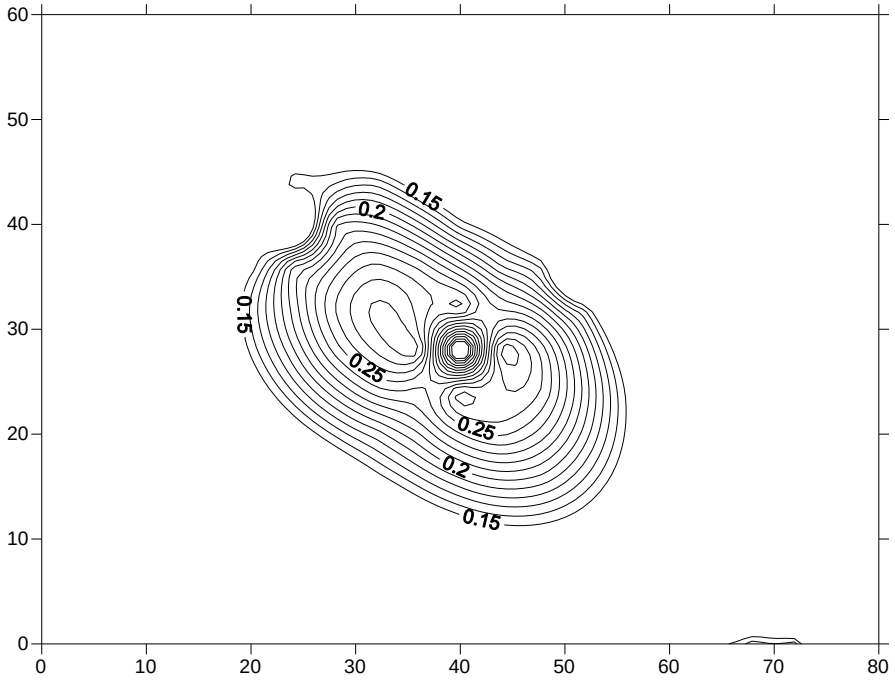
Στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι γίνεται άντληση της ελαιώδους φάσης με ρυθμό Q_o=0.3m^3/d καθώς και του νερού με ρυθμό Q_w=0.3m^3/d. Με βάση αυτά τα δεδομένα παρουσιάζονται οι τελικές ποσότητες του υδρογονάνθρακα στην περιοχή ύστερα από πάροδο 30, 70 και 120 ημερών.

Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζεται το πάχος του ελεύθερου προϊόντος μετά από άντληση 30 ημερών με τους ρυθμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το μέγιστο πάχος της στοιβάδας του LNAPL ανέρχεται στα 0.35m. Ο ρύπος λόγω υδραυλικής κλίσης τείνει να κινηθεί προς τα αριστερά αλλά τα πηγάδια άντλησης είναι τοποθετημένα στα κατάλληλα σημεία ώστε να μην τον αφήνουν να εξαπλωθεί.



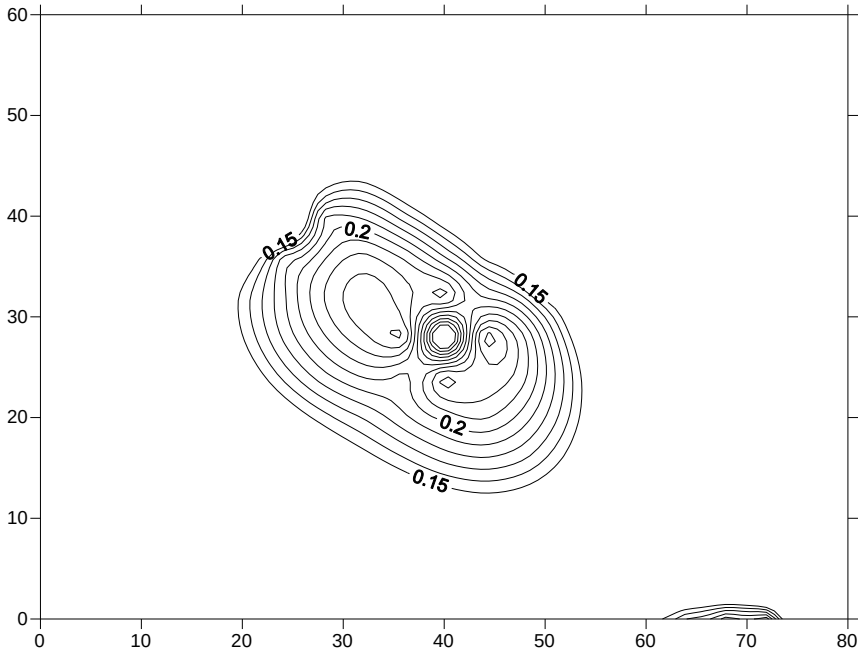
Σχήμα 7.4: Πάχος του ελεύθερου προϊόντος μετά από πάροδο 30 ημερών (Σενάριο Β)

Ύστερα από χρόνο προσομοίωσης 70 ημερών με ρυθμό άντλησης του LNAPL Q_o=0.3m^3/d και άντλησης του αέρα με ρυθμό Q_w=0.3m^3/d έχουμε μέγιστο πάχος στοιβάδας του ρύπου ίσο με 0.29m (Σχήμα 7.5).



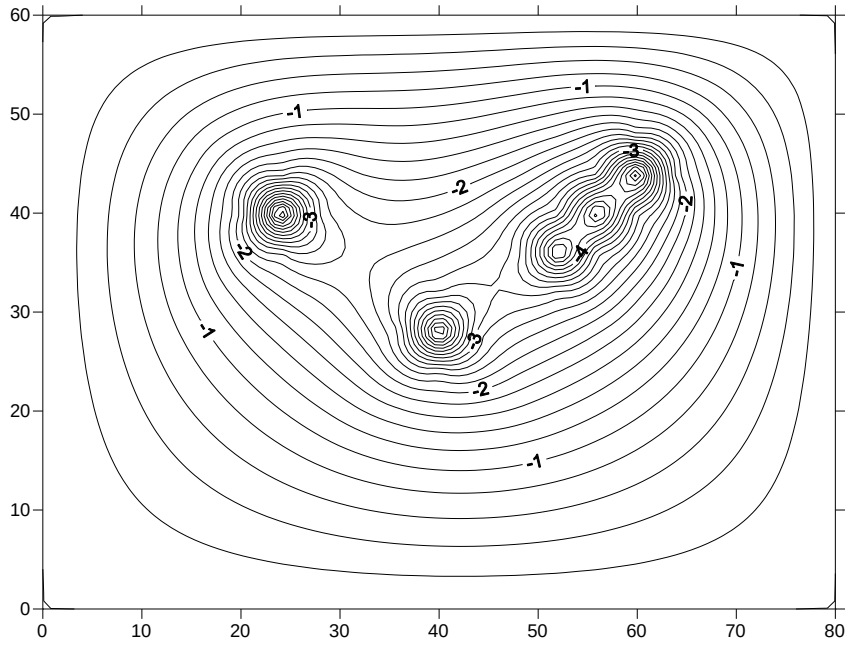
Σχήμα 7.5: Πάχος του ελεύθερου προϊόντος μετά από πάροδο 70 ημερών (Σενάριο Β)

Μετά από 120 ημέρες το πάχος που παρατηρείται είναι επίσης 0.25m (Σχήμα 7.6).



Σχήμα 7.6: Πάχος του ελεύθερου προϊόντος μετά από πάροδο 120 ημερών (Σενάριο Β)

Επίσης παρακάτω απεικονίζεται και το γράφημα που αφορά την πίεση της αέριας φάσης μετά από 120 ημέρες (Σχήμα 7.7).

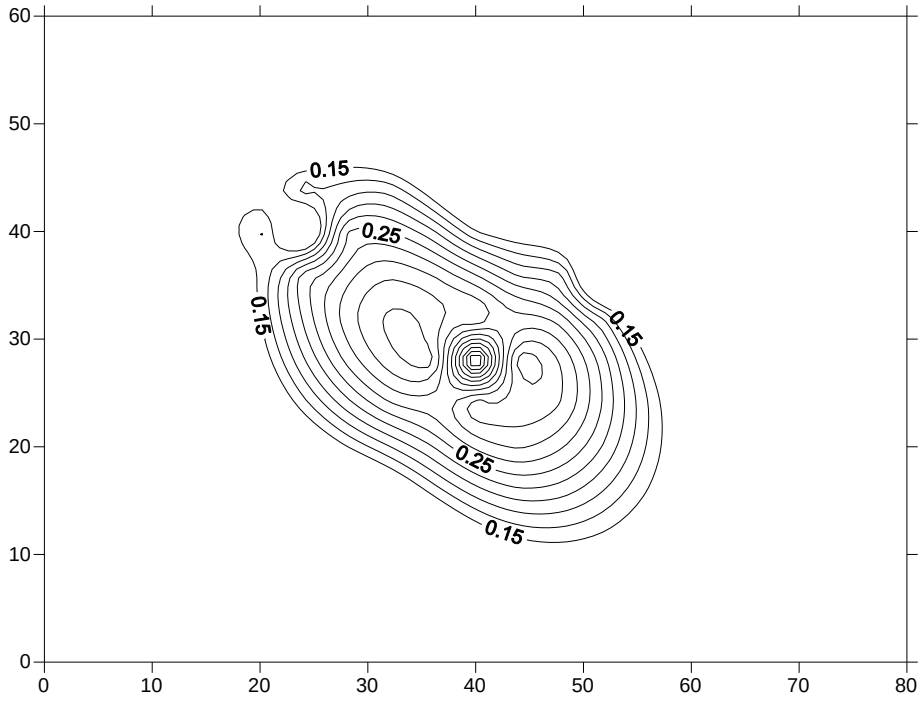


Σχήμα 7.7: Πίεση της αέριας φάσης μετά από 120 ημέρες αποκατάστασης

7.3 Σενάριο προσομοίωσης (Γ)

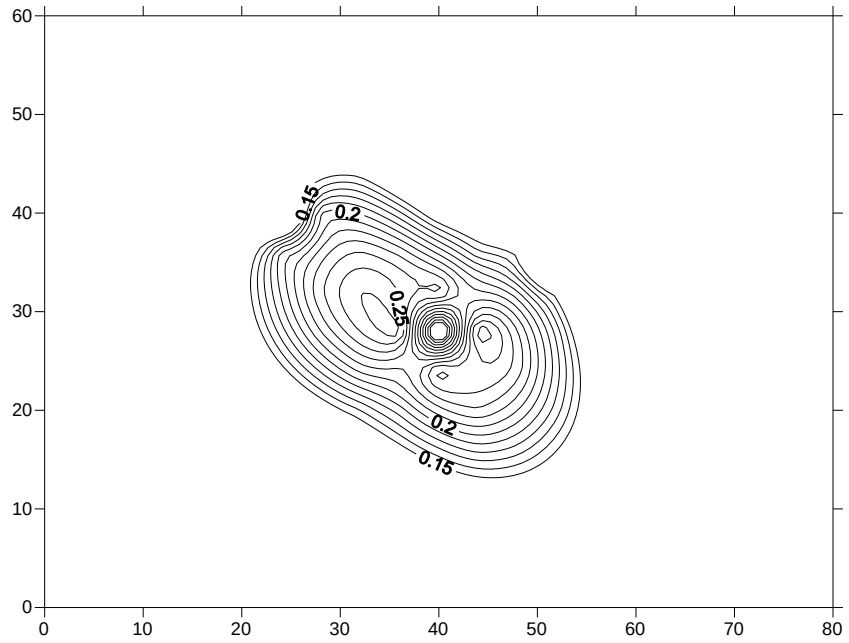
Για να μειωθεί το πάχος του ελεύθερου προϊόντος στον υδροφορέα, αυξάνεται ο βαθμός άντλησης των πηγαδιών. Στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι γίνεται άντληση της ελαιώδους φάσης με ρυθμό Q_o=5m^3/d καθώς και του νερού με ρυθμό Q_w=1m^3/d. Με βάση αυτά τα δεδομένα παρουσιάζονται οι τελικές ποσότητες του υδρογονάνθρακα στην περιοχή ύστερα από πάροδο 30, 70 και 120 ημερών.

Στο Σχήμα 7.8 παρουσιάζεται το πάχος του ελεύθερου προϊόντος μετά από άντληση 30 ημερών με τους ρυθμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το μέγιστο πάχος της στοιβάδας του LNAPL ανέρχεται στα 0.35m.



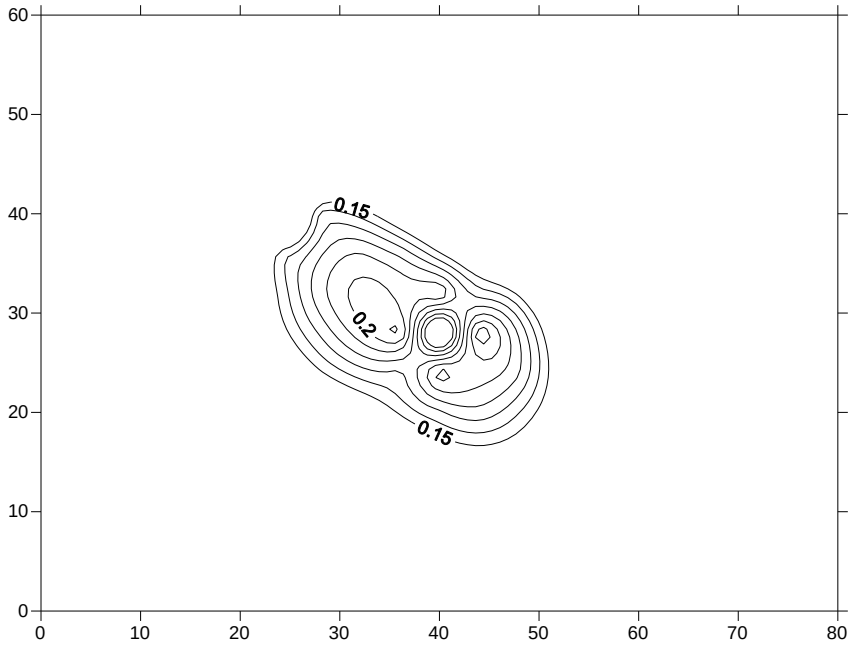
Σχήμα 7.8: Πάχος του ελεύθερου προϊόντος μετά από πάροδο 30 ημερών (Σενάριο Α)

Ύστερα από χρόνο προσομοίωσης 70 ημερών με ρυθμό άντλησης του LNAPL Q_o=5m^3/d και άντλησης του αέρα με ρυθμό Q_w=1m^3/d έχουμε μέγιστο πάχος στοιβάδας του ρύπου ίσο με 0.27m (Σχήμα 7.9).



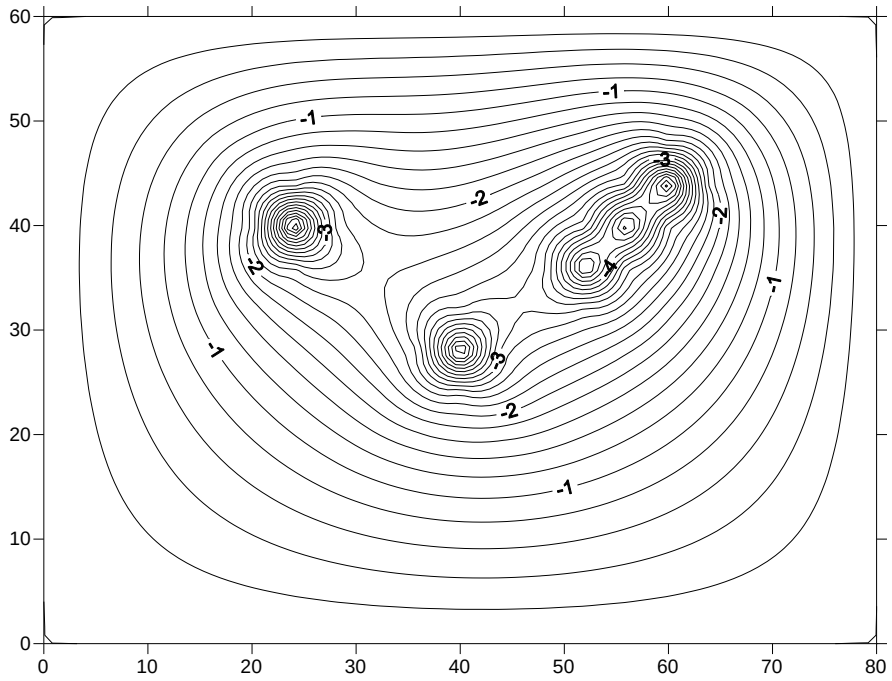
Σχήμα 7.9: Πάχος του ελεύθερου προϊόντος μετά από πάροδο 70 ημερών (Σενάριο Γ)

Μετά από 120 ημέρες το πάχος που παρατηρείται είναι επίσης 0.22m (Σχήμα 7.10).



Σχήμα 7.10: Πάχος του ελεύθερου προϊόντος μετά από πάροδο 120 ημερών (Σενάριο Γ)

Και τέλος παρακάτω απεικονίζεται και το γράφημα που αφορά την πίεση της αέριας φάσης μετά από 120 ημέρες (Σχήμα 7.11).



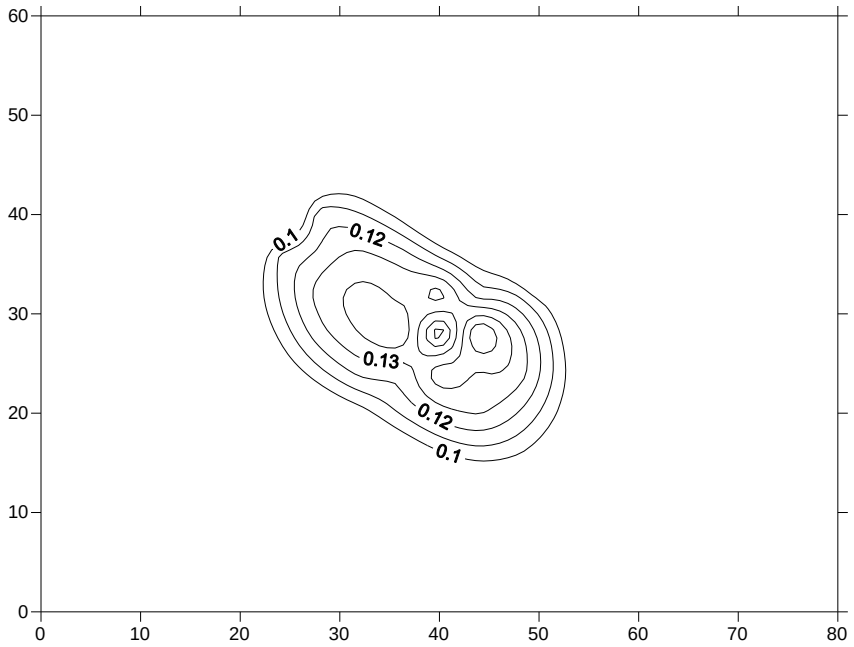
Σχήμα 7.11: Πίεση της αέριας φάσης μετά από 120 ημέρες αποκατάστασης

Η πίεση όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα είναι -5m στα πηγάδια άντλησης και όσο απομακρύνεται από αυτά μειώνεται σταδιακά.

7.4 Σενάριο προσομοίωσης (Δ)

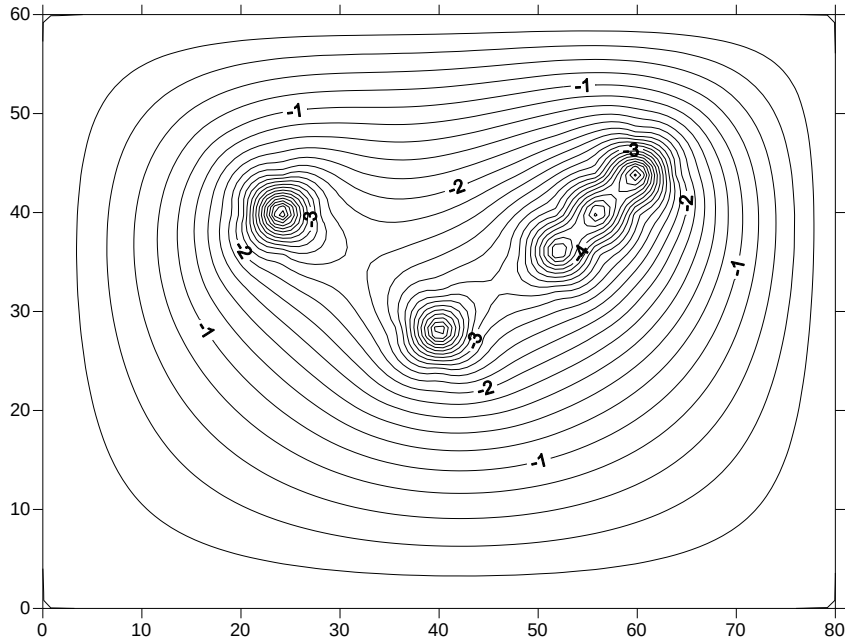
Για την βελτίωση των αποτελεσμάτων στην περιοχή μελέτης, στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι γίνεται άντληση της ελαιώδους φάσης με ρυθμό Q_o=5m^3/d καθώς και του νερού με ρυθμό Q_w=1m^3/d, όπως και στο Σενάριο (Γ) αλλά η προσομοίωση γίνεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Με βάση αυτά τα δεδομένα παρουσιάζονται οι τελικές ποσότητες του υδρογονάνθρακα στην περιοχή ύστερα από πάροδο 200 ημερών. Η κατάσταση που επικρατεί ύστερα από την εφαρμογή αυτού του σεναρίου είναι σαφώς πιο βελτιωμένη από τα προηγούμενα σενάρια, με ελάχιστο πάχος στρώματος LNAPL να παραμένει μετά από την πάροδο των 200 ημερών. Για την ακρίβεια, το υπολειπόμενο LNAPL δεν είναι δυνατόν να αφαιρεθεί καθώς βρίσκεται παγιδευμένο.

Στο Σχήμα 7.12 παρουσιάζεται το πάχος του ελεύθερου προϊόντος μετά από άντληση 200 ημερών με τους ρυθμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το μέγιστο πάχος της στοιβάδας του LNAPL ανέρχεται στα 0.16m η οποία είναι πολύ χαμηλή τιμή, τόσο χαμηλή που δεν επιχειρείται περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 7.12: Πάχος του ελεύθερου προϊόντος μετά από πάροδο 200 ημερών (Σενάριο Δ)

Και τέλος παρακάτω απεικονίζεται και το γράφημα που αφορά την πίεση της αέριας φάσης μετά από 200 ημέρες (Σχήμα 7.13).



Σχήμα 7.13: Πίεση της αέριας φάσης μετά από 200 ημέρες αποκατάστασης (Σενάριο Δ)

7.5 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα δεδομένα για κάθε ένα από τα σενάρια που δημιουργήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα από παρουσιάστηκαν ύστερα από την εφαρμογή τους (Πίνακας 7.1).

Πίνακας 7.1 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Σενάρια	Συνθήκες άντλησης	T=30 d	Τα=70 d	T=120 d	T=200 d
Σενάριο (Α)	Q_0=0 m^3/d, Q_w=0 m^3/d	H_{max}=0.65 m	H_{max}=0.65 m	H_{max}=0.65 m	
Σενάριο (Β)	Q_0=0.3m^3/d, Q_w=0.3m^3/d	H_{max}=0.35 m	H_{max}=0.29 m	H_{max}=0.25 m	
Σενάριο (Γ)	Q_0=5 m^3/d, Q_w=3 m^3/d	H_{max}=0.35 m	H_{max}=0.27 m	H_{max}=0.22 m	
Σενάριο (Δ)	Q_0=5 m^3/d, Q_w=3 m^3/d				H_{max}=0.16 m

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος ρύπανσης στην περιοχή Cantuar λόγω διαρροής μίας δεξαμενής αποθήκευσης νάφθας η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη ρύπανση του υπόγειου υδροφορέα, απαιτείται εξυγίανση αυτού. Παρόλο που στο παρελθόν έχουν εφαρμοστεί μέθοδοι αποκατάστασης του υδροφορέα, μία ποσότητα LNAPL έχει παραμείνει και έχει ρυπάνει το νερό το οποίο δεν είναι πλέον κατάλληλο για χρήση από τις γύρω περιοχές.

Η εφαρμογή του μοντέλου MOVER παρέχει στον χρήστη ένα εύχρηστο περιβάλλον εργασίας, το οποίο είναι ικανό να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό συνάγεται από την σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν με άλλα αποτελέσματα που έχουν διεξαχθεί από άλλους μελετητές.

Η μεθοδολογία που εφαρμόσθηκε παρέχει ένα πλαίσιο εργασίας ώστε να προστατευτούν τα υπόγεια αποθέματα ύδατος. Σε γενικές γραμμές τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή του μοντέλου ήταν θετικά. Εξετάσθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια με διαφορετικούς ρυθμούς άντλησης και διαφορετικούς χρόνους προσομοίωσης. Θα μπορούσαν να έχουν δημιουργηθεί επιπλέον σενάρια, αλλά θεωρήθηκε περιττό μιας και τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά.

Από τα σενάρια που αναλύθηκαν παραπάνω φαίνεται ότι το μοντέλο που βελτιστοποιεί τα αποτελέσματα για το εναπομένον πάχος του ελεύθερου προϊόντος είναι το σενάριο (Δ). Παρόλα αυτά και τα προηγούμενα σενάρια προσομοίωσης έχουν αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Η διαφορά που εμφανίζεται στο σενάριο (Δ), οφείλεται στον χρόνο προσομοίωσης. Φαίνεται ότι οι ρυθμοί άντλησης δεν παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, και αυτό γιατί οι ταχύτητες που επικρατούν στον υδροφορέα είναι πολύ χαμηλές, με αποτέλεσμα την αργή εξάπλωση του ρύπου.

Επίσης, επειδή το αρχικό πάχος του ελεύθερου προϊόντος είναι σχετικά χαμηλό (1.3m), δεν υπάρχει νόημα να χρησιμοποιηθούν μεγάλοι ρυθμοί άντλησης, καθώς μετά από ένα μικρό διάστημα άντλησης το προϊόν δεν είναι διαθέσιμο. Αυτό σημαίνει ότι μέχρι να δημιουργηθεί πτώση του υδροφορέα με την διαδικασία της άντλησης νερού και να αρχίσει και πάλι να συσσωρεύεται ο ρύπος, η άντληση δεν έχει νόημα. Αυτό αποδεικνύεται και από το γεγονός ότι με μία αύξηση στον χρόνο που πραγματοποιείται η προσομοίωση, τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν ήταν ακόμη καλύτερα.

Εν κατακλείδι, η προσομοίωση ήταν επιτυχής και τα σενάρια προσομοίωσης επαρκή για την εξυγίανση του υδροφορέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γιδαράκος Ε. και Αϊβαλιώτη Μ, Τεχνολογίες Αποκατάστασης Εδαφών και Υπόγειων Υδάτων από Επικίνδυνους Ρύπους, Εκδόσεις Ζυγός, 2005
- Λατινόπουλος Π., Υδραυλική των υπογείων υδάτων, Α.Π.Θ., 1998
- Καρατζάς Γ.Π., Σημειώσεις του μαθήματος Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, 2010
- Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, Σημειώσεις του μαθήματος Τεχνική Υδρολογία, ΕΜΠ, 1999
- Πανταζίδου Μ., Ξενίδης Α., Παπασιώπη Ν., Σημειώσεις του μαθήματος Αποκατάσταση Ρυπασμένων Χώρων, ΕΜΠ, 2004
- Σταματάκη, Σημειώσεις του μαθήματος Μηχανική Πετρελαίων του τμήματος Μεταλλειολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 2005
- Anderson M.P., Woessner W.W., Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Adjective Transport, Academic Press, 1992
- Chiou C.T., Malcolm R.L., Brinton T.I. and Kile D.E., Water solubility enhancement of some organic pollutants and pesticides by dissolved humic and fulvic acids, 1986
- Cote M., Encyclopedia of Saskatchewan, 2005
- DAEM, MOVER, Technical Documentation & User Guide, 1996-7
- Dingman S.L., Σημειώσεις του μαθήματος Physical Hydrology, University of New Hampshire, 1994
- Domenico P.A. and Schwartz F.W., Physical and Chemical Hydrogeology, Wiley, 1998.
- Fetter C.W., Applied Hydrogeology, Second Edition, Merrill, 1988
- Fetter C.W., Contamination Hydrology, Second edition, Prentice Hall, 1999
- Freeze A.R., Cherry J.A., Groundwater, A Division of Simon and Achuster Englewood Cliffs, Prentice Hall Inc., 1979
- Hammer U.T., Saline Lake Ecosystems of the World, Dr W. Junk Publishers, 1986
- Hohener P. and Surbeck H., Radon-222 as a tracer for Nonaqueous Phase Liquids in the Vadose Zone: Experiments and Analytical Model, 2004

- Huling, S.G., and J.W. Weaver, Dense Nonaqueous Phase Liquids, EPA/540/4-91/002., 1991
- Li J.B., Development of an inexact environmental modeling system for the management of petroleum-contaminated sites, 2003
- Lyman W.J., Reehl W.F. and Rosenblatt D.H., Handbook of Chemical Property Estimation Methods-Environmental Behavior of Organic Compounds, McGraw-Hill, 1982
- Maher, F.J. Atton et al., Atlas of Saskatchewan, University of Saskatchewan, 1969
- Mercer J.W. and Cohen R.M., A review of immiscible fluids in the subsurface: Properties, models, characterization and remediation, J. Contam. Hydrol., 1990
- Navy Environmental Health Center – Environmental Programs, 2003
- Newell C.J., Acree C.D., Ross R.R. and Hulling S.G., Light Nonaqueous Phase Liquids, Ground Water Issue,. EPA 540/S-95/500, U.S. EPA, 1995
- Noggle J., Physical Chemistry, Little, Brown and Co, Boston Mass, 1985
- Nyer, E.K,. Groundwater Treatment Technology, Van Nostrand Reinhold, NY, USA, 1992
- Perlman H., Μακρόπουλος Χ., και Κουτσογιάννης Δ., Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ, 2005
- Qin X.S. , Huang G.H., Zeng G.M. and Chankma A., Simulation-based optimization of dual-phase vacuum extraction to remove non aqueous phase liquids in subsurface, 2008
- Reeves P. et al., Encyclopedia of Saskatchewan, 2005
- Schnoor J.L., Περιβαλλοντικά μοντέλα- Τύχη και Μεταφορά Ρύπων στον Αέρα, Νερό και Έδαφος, εκδόσεις Τζιόλα, 2003
- Senn R.B. and Johnson M.S., Interpretation of gas chromatographic data in subsurface hydrocarbon investigations, Ground Water Monit. Rev., 1987
- Storer J.E. , Geological History of Saskatchewan, RSM, 1989
- Streeter et al., Μηχανική Ρευστών, Fountas, 1993
- Thomson M.M., «Canada's Prime Meridian». Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, 1977
- T. Wapple, K. Fung, B. Barry, Wilson M. Wildlife. A.B. Didiuk, A.S., B. Gollop, J. Merkowsky, P. Jonker (Millennium ed.). Saskatchewan: University of Saskatchewan, 1998.

Διαδίκτυο

- www.statcan.gc.ca
- www.er.gov.sk.ca
- www.usask.ca
- www.biodiversity.sk.ca
- www.nrcan.gc.ca
- www.webcitation.org
- www.esask.uregina.ca