



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ
ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΡΛΑΝΤΖΑ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Επιβλέπων : Αριστοτέλης Μαντόγλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το νερό είναι ένα από τα σημαντικότερα φυσικά αγαθά, καθώς αποτελεί βασικό στοιχείο ζωής όχι μόνο για τον άνθρωπο, αλλά και τα ζώα και τα φυτά. Ο συνολικός όγκος νερού που υπάρχει αυτή τη στιγμή στη γη, σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, εκτιμάται γύρω στα $1.370 \times 10^{15} \text{ m}^3$, από το σύνολο του οποίου όμως μόνο το 0.6% αποτελεί αξιοποιήσιμο πόρο, είτε προέρχεται από επιφανειακούς είτε από υπόγειους φορείς. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι το 98% των αξιοποιήσιμων πόρων είναι υπόγειο και μάλιστα από αυτό, μόνο το 50% είναι εκμεταλλεύσιμο καθώς το υπόλοιπο βρίσκεται αποθηκευμένο σε πολύ μεγάλα βάθη (>800m), γεγονός που καθιστά απαγορευτική τη χρήση του εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα αλλά και του ιδιαίτερα υψηλού κόστους άντλησης, όπως είναι κατανοητό.

Επομένως, προκύπτει ότι η διαχείριση των υδατικών πόρων (επιφανειακών και υπόγειων) χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και είναι καταλυτική για την επιβίωση κάθε χώρας. Η χωρική και χρονική ανισοκατανομή καθιστούν το νερό ιδιαίτερος πολύτιμο. Ειδικότερα, όπως είναι γνωστό, η Ελλάδα κατέχει την 11^η θέση στις χώρες με τη μεγαλύτερη ακτογραμμή στα 13.676 χιλιόμετρα, λόγω της ύπαρξης πολλών νησιών (περίπου 2.500, εκ των οποίων τα 165 κατοικούνται), που καλύπτουν το 73% της ακτογραμμής με αντίστοιχη ποικίλη και ιδιόμορφη ανάπτυξη των ακτών. Το 70% περίπου του ελληνικού πληθυσμού κατοικεί στην παράκτια ζώνη ενώ πλήθος δραστηριοτήτων και χρήσεων συγκεντρώνεται σ' αυτήν (κατοικία, αναψυχή και τουρισμός, βιομηχανία, εμπόριο κλπ.). Η αυξημένη ανάγκη κατανάλωσης (αγροτική, τουριστική, οικιακή, βιομηχανική) δε συνάδει συνήθως με τις διαθέσιμες ποσότητες στη συγκεκριμένη περιοχή ή τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Οι απαιτήσεις σε νερό, ιδιαίτερος κατά τους θερινούς μήνες, ειδικά σε νησιά και παράκτιες περιοχές, είναι πολύ υψηλές εξαιτίας του τουρισμού. Η υπεράντληση των παράκτιων υδροφορέων με γεωτρήσεις, με στόχο την κάλυψη των αναγκών, έχει ως συνέπεια την υφαλμύρωση και τη σταδιακή καταστροφή τους, με αποτέλεσμα να μην είναι πλέον χρησιμοποιήσιμοι. Η διαφύλαξη της ποιότητας των περιορισμένων διαθέσιμων υδατικών πόρων προϋποθέτει την ορθολογική χρήση τους. Η αξιοποίηση των παράκτιων υδροφορέων πρέπει να αποτελεί μέρος ενός γενικότερου πλαισίου ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων του νησιού ή της παράκτιας περιοχής, το οποίο να περιλαμβάνει τόσο τα επιφανειακά όσο και τα υπόγεια νερά.

Είναι επομένως σημαντική η προσπάθεια πρόβλεψης της κίνησης του θαλασσινού νερού στο εσωτερικό του παράκτιου υπόγειου υδροφορέα, και ιδιαίτερος η μελέτη της διεπιφάνειας μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού, καθώς η δυναμική της καθορίζει την υφαλμύρωση ή όχι του υδροφορέα. Η παρούσα εργασία εξετάζει δύο ευρέως διαδεδομένες θεωρήσεις για την μορφή της διεπιφάνειας αλμυρού και γλυκού νερού, δηλαδή τη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας μηδενικού πάχους (sharp interface), λόγω της ευκολίας και ταχύτητας στην επίλυση σε ηλεκτρονικούς

υπολογιστές, σύμφωνα με Mantoglou (2003) για περιορισμένο υδροφορέα με καθορισμένα πλευρικά όρια και Strack (1976) για υδροφορέα με ημιάπειρα πλευρικά όρια που θεωρεί μόνο το όριο της ακτής, και την αντίστοιχη για υπόγεια ροή μεταβλητής πυκνότητας (variable density flow) με ζώνη ανάμιξης λόγω διάχυσης άλατος. Η σύγκριση των μεθόδων δίνει ενδιαφέροντα αποτελέσματα όσον αφορά το ποια μέθοδος είναι υπέρ της ασφάλειας και προσομοιώνει ή προσεγγίζει σε μεγαλύτερο βαθμό το φυσικό πρόβλημα. Γίνεται σύγκριση όσον αφορά τη θέση της "σφήνας" που σχηματίζει το αλμυρό νερό στο εσωτερικό του υδροφορέα μεταξύ των δύο θεωρήσεων και την κρίσιμη παροχή άντλησης για ύπαρξη πηγαδιού στο εσωτερικό του υδροφορέα. Τέλος, προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με τη βελτίωση του λόγου πυκνοτήτων αλμυρού και γλυκού νερού για τα μοντέλα απότομης διεπιφάνειας σε σχέση με τα αποτελέσματα προσομοίωσης των μοντέλων μεταβλητής πυκνότητας.

Η συμβολή του Επιβλέποντα Καθηγητή, κ. Μαντόγλου Αριστοτέλη στην εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας υπήρξε καθοριστική. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα για τη συνεργασιμότητά του και τη βοήθεια που μου προσέφερε καθ'όλη τη διάρκεια της μελέτης. Ως γνώστης του αντικειμένου παρείχε την κατάλληλη καθοδήγηση όσον αφορά στο απαιτούμενο γνωστικό υπόβαθρο καθώς και στα διαθέσιμα υπολογιστικά εργαλεία. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Χριστέλη Βασίλειο για την προθυμία που επέδειξε στη διάθεση και την επεξήγηση πληροφοριών σχετικά με το αντικείμενο, την αμέριστη βοήθεια σε όλα τα θέματα που τυχόν προέκυψαν στη διαδικασία, καθώς και για την άριστη συνεργασία που είχαμε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μελέτης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	11
1.2 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	12
1.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	13
2. ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗ	15
2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ	15
2.2. ΑΙΤΙΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ	16
2.3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ	17
2.4. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ.....	18
3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ	21
3.1. ΘΕΩΡΗΣΗ ΑΠΟΤΟΜΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (SHARP INTERFACE).....	21
3.1.1. Προσέγγιση <i>Ghyben - Herzberg</i>	22
3.1.2. Ανάλυση κατά <i>Strack</i>	24
3.1.3. Αναλυτικές σχέσεις κατά <i>Strack</i>	24
3.1.4. Υπαρξη φρέατος άντλησης – Επίλυση κατά <i>Strack</i>	27
3.1.5. Εκτελούμενοι υπολογισμοί.....	30
3.2. ΘΕΩΡΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (VARIABLE DENSITY MODEL)	31
3.2.1. Μαθηματική περιγραφή	32
3.2.2 Νόμος <i>Darcy</i> για την υπόγεια ροή μεταβλητής πυκνότητας	35
3.2.3. Κύρια εξίσωση μεταφοράς διαλυμάτων	38
3.2.4. Αρχικές και οριακές συνθήκες	39
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ	41
4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ HYDROGEOSPHERE	41
4.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ HYDROGEOSPHERE	43
4.3. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ HYDROGEOSPHERE.....	44
4.4. ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	44
4.5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΑΠΟΤΟΜΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	47
4.5.1. Περιγραφή εκτέλεσης λογισμικού <i>HydroGeoSphere</i>	47
4.5.2. Διαδικασία υπολογισμών και αποτελέσματα.....	49
4.6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (VARIABLE DENSITY FLOW)	53

4.6.1. Αλλαγές στην εκτέλεση του λογισμικού <i>HydroGeoSphere</i>	53
4.6.2. Διαδικασία υπολογισμών και αποτελέσματα.....	56
4.7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΣΕΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΠΗΓΑΔΙ ΑΝΤΛΗΣΗΣ.....	69
5.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	69
5.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	70
5.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΆΝΤΛΗΣΗΣ ΓΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ 7 ΚΜ Χ 3 ΚΜ	71
5.3.1. Υπολογισμός κρίσιμης άντλησης με θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (<i>sharp interface</i>) κατά <i>Mantoglou (2003)</i>	71
5.3.2. Υπολογισμός κρίσιμης άντλησης με θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (<i>sharp interface</i>) κατά <i>Strack (1976)</i>	80
5.3.3. Υπολογισμός κρίσιμης άντλησης με θεώρηση υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας (<i>variable density flow</i>)	83
5.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΆΝΤΛΗΣΗΣ ΓΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ 7 ΚΜ Χ 5 ΚΜ	89
5.5. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΗΣΗΣ ΑΠΟΤΟΜΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	93
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	99
6.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΕ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ 7 ΚΜ Χ 3 ΚΜ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΗΓΑΔΙΟΥ ΆΝΤΛΗΣΗΣ	99
6.2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΕ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ 7 ΚΜ Χ 3 ΚΜ ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΗΓΑΔΙΟΥ ΆΝΤΛΗΣΗΣ	100
6.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΕ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ 7 ΚΜ Χ 5 ΚΜ ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΗΓΑΔΙΟΥ ΆΝΤΛΗΣΗΣ	101
6.4. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΈΡΕΥΝΑ.....	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105
ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη ικανοποίησης των αυξημένων απαιτήσεων σε νερό, κυρίως για άρδευση και ύδρευση, αλλά και για άλλες χρήσεις (εμπόριο, βιομηχανία), οδηγεί σε υπεράντληση και υφαλμύρωση των παράκτιων υδροφορέων. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελούν οι νησιωτικές και παράκτιες περιοχές, κυρίως κατά τους θερινούς μήνες όταν η ζήτηση είναι ιδιαίτερος υψηλή εξαιτίας του τουρισμού. Είναι απαραίτητη επομένως η διαχείριση των υδατικών πόρων με την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης, προκειμένου να εξασφαλίζεται η μέγιστη ποσότητα υπόγειου νερού αποφεύγοντας τον κίνδυνο υφαλμύρωσης των φρεάτων, δηλαδή κίνησης αλμυρού νερού προς το εσωτερικό του υδροφορέα.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, η επιστημονική κοινότητα έχει ασχοληθεί κατά το παρελθόν και συνεχίζει να ασχολείται με το πρόβλημα της κατάλληλης προσομοίωσης του υδροφορέα, καθώς και της βελτιστοποίησης των παροχών άντλησης ή τροφοδοσίας (τεχνητός εμπλουτισμός), σε συνδυασμό ή με ξεχωριστές προσεγγίσεις. Κατά τη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρωσης ο πλέον διαδεδομένος τρόπος απόδοσης της διεπιφάνειας είναι η θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας – sharp interface (Emch and Yeh 1998, Cheng & Ouazar 1999, Cheng et al. 2000, Mantoglou 2003), ενώ η άλλη θεώρηση αφορά ζώνη ανάμιξης λόγω υδροδυναμικής διασποράς ή αλλιώς υπόγεια ροή μεταβλητής πυκνότητας (variable density flow). Οι Strack (1976), Bear (1979), και Cheng & Ouazar (1999) παρουσιάζουν και εφαρμόζουν την "Ανάλυση κατά Strack".

Γίνεται αρχικά γενική αναφορά στους υπόγειους υδροφορείς στο σύνολό τους, τη συμπεριφορά των υπόγειων υδάτων σε περιορισμένους υδροφορείς, καθώς και το φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Αναφέρονται οι βασικές αρχές του προβλήματος που αφορούν την διεπιφάνεια και την αλληλεπίδραση αλμυρού και γλυκού νερού σε παράκτιους υπόγειους υδροφορείς, οι πρωταρχικές αιτίες εμφάνισης και όξυνσης του φαινομένου, λόγω ανθρώπινων και μη παραγόντων, καθώς και οι επιπτώσεις του προβλήματος στις πτυχές της καθημερινής ζωής όσον αφορά το τεχνητό και φυσικό περιβάλλον. Επίσης, γίνεται αναφορά σε πιθανούς τρόπους αντιμετώπισης του προβλήματος, ώστε να διαχειρίζεται και ελέγχεται κατάλληλα η διείδυση του αλμυρού νερού στον παράκτιο υπόγειο υδροφορέα.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η θέση της σφήνας σε παράκτιο περιορισμένο υδροφορέα γνωστών διαστάσεων για διάφορες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, σύμφωνα με τη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) κατά Strack (1976) και κατά Mantoglou (2003), με τις διαφορές που έχουν οι δύο προσεγγίσεις στη θεώρηση πλευρικών ορίων, και τη θεώρηση υπόγεια ροής μεταβλητής πυκνότητας (variable density flow). Σε πρώτη φάση ορίζεται ένα απλό μοντέλο προσομοίωσης σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με ίδια τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας και τροφοδοσίας σε όλη του την έκταση, διαστάσεων

7.000 x 3.000 m² και πάχους 50 μέτρων, χωρίς την παρουσία πηγαδιών άντλησης στην έκτασή του.

Με δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τις υδραυλικές παραμέτρους και την τροφοδοσία του και για διάφορες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, δημιουργείται με το λογισμικό HydroGeoSphere το μοντέλο προσομοίωσης. Στη συνέχεια, συντάσσονται ξεχωριστά κατάλληλα προγράμματα για κάθε θεώρηση σε περιβάλλον MATLAB για:

α) τον υπολογισμό της θέσης της σφήνας που σχηματίζει το αλμυρό νερό στο εσωτερικό του υπόγειου υδροφορέα μέσω των κατάλληλων μαθηματικών εξισώσεων, ξεχωριστά για κάθε περίπτωση.

β) την οπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων με αναπαράσταση του υδροφορέα και των ισοχλωρίων ζωνών μέσα στον υδροφορέα, ώστε να γίνει εμφανής η διείσδυση του αλμυρού νερού, καθώς και η θέση της σφήνας. Η αναπαράσταση του υδροφορέα και του φαινομένου της υφαλμύρωσης γίνεται και με τη χρήση των προγραμμάτων TECPLOT και GMS. Επίσης, παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων οι συγκρίσεις μεταξύ των δύο θεωρήσεων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Έπειτα γίνεται η ίδια διαδικασία για υδροφορέα ίδιων διαστάσεων και υδρολογικών χαρακτηριστικών, αλλά με την παρουσία πηγαδιού άντλησης σε συγκεκριμένη θέση. Εξετάζονται οι θεωρήσεις απότομης διεπιφάνειας κατά Strack (1976) και Mantoglou (2003) και η θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας όσον αφορά την εύρεση κρίσιμης παροχής άντλησης πριν υφαλμυρωθεί ο υδροφορέας. Εδώ τίθενται ως αρχικές συνθήκες ροής στο πρόγραμμα του HydroGeoSphere τα αποτελέσματα της πρώτης διαδικασίας χωρίς την ύπαρξη πηγαδιού, όσον αφορά την θεώρηση της μεταβλητής πυκνότητας (variable density).

Γίνονται δοκιμές στη θέση του πηγαδιού, δηλαδή τίθεται στα 1000, 2000 και 3000 m από την ακτή, καθώς και στο ποσοστό παροχής νερού που αντλείται σε κάθε περίπτωση σε σχέση με την πλευρική παροχή του υδροφορέα. Συντάσσονται νέα προγράμματα σε περιβάλλον HydroGeoSphere και MATLAB, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η παρουσία των πηγαδιών. Προκύπτουν ο υπολογισμός της μέγιστης παροχής που απαιτείται σε κάθε θέση και θεώρηση, για να μην υφαλμυρωθεί ο υδροφορέας και η απεικόνιση της κατάστασης για ξεχωριστή δοκιμή κάθε φορά, με απώτερο σκοπό την σύγκριση των παραλλαγών για sharp interface και της μεθόδου variable density. Αυξάνεται τέλος το πλάτος του υδροφορέα στα 5 km και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία, όπως παραπάνω, για εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, όσον αφορά την επίδραση των πλευρικών ορίων στην κρίσιμη άντληση και τη θέση της σφήνας.

Η εξέταση διαφόρων σεναρίων άντλησης οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της διακριτοποίησης του υδροφορέα, των υδρολογικών παραμέτρων του, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, της θέσης του φρέατος και της τιμής την παροχής σε κάθε θέση στην απόδοση του υδροφορέα. Επίσης εξετάζεται

στην περίπτωση της θεώρησης πεπερασμένου πάχους της διεπιφάνειας αλμυρού - γλυκού νερού λόγω υδροδυναμικής διασποράς, η συσχέτιση της απόδοσης του υδροφορέα με τον λόγο της εγκάρσιας και της διαμήκου διασποράς.

Επίσης, εξετάζεται η βελτίωση του λόγου πυκνοτήτων αλμυρού - γλυκού νερού κατά Pool και Carrera (2011) ώστε να διαπιστωθεί αν εφαρμόζοντάς τον στα μοντέλα απότομης διεπιφάνειας, προκύπτουν αποτελέσματα προσομοίωσης πιο κοντά σε αυτά της θεώρησης μεταβλητής πυκνότητας λόγω διάχυσης άλατος, που αντικατοπτρίζουν την πραγματική κατάσταση σε μεγαλύτερο βαθμό.

Τελικά, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τους πρωταρχικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υδροφορέα σε κάθε θεώρηση ξεχωριστά, όσον αφορά την παρουσία ή όχι πηγαδιών άντλησης στην έκτασή του, ενώ γίνονται αναλυτικές συγκρίσεις για τις θεωρήσεις που εξετάζονται (απότομη διεπιφάνεια κατά Strack (1976), κατά Mantoglou (2003) και ροή μεταβλητής πυκνότητας) σε κάθε περίπτωση, ώστε να προκύψει ποια από τις δύο μεθόδους προσομοιάζει ή προσεγγίζει σε μεγαλύτερο βαθμό το φυσικό πρόβλημα, όσον αφορά την υφαλμύρωση.

Λέξεις Κλειδιά: παράκτιος, περιορισμένος υδροφορέας, θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, υπόγεια ροή μεταβλητής πυκνότητας, υδροδυναμική διασπορά, υφαλμύρωση, αλμυρή σφήνα, υδραυλική αγωγιμότητα, πλευρικά όρια, σύγκριση μοντέλων, απόδοση υδροφορέα, μέγιστη παροχή άντλησης.

ABSTRACT

Coastal regions and islands are often touristy so the demand for freshwater during the summer months is especially high. In order to meet the increasing needs of freshwater for irrigation, water supply and other uses, coastal aquifers are intensively pumped triggering saltwater intrusion. Therefore, water resources management based on simulation models is essential so that the maximum groundwater quantity is obtained without saltwater intrusion into the coastal aquifer.

Past research has investigated the problem of aquifer simulation and pumping optimization. A popular approach is based on the sharp interface approximation (Emch and Yeh 1998, Cheng & Quazar 1999, Cheng et al. 2000, Mantoglou 2003). Strack (1976), Bear (1979) and Cheng & Quazar (1999) present and apply Strack's analytical solution for the prediction of saltwater intrusion in coastal aquifers. Another approach is based on variable density flow and solute transport.

The thesis follows the following steps. First, groundwater flow in confined coastal aquifers is presented. The basic principles of saltwater intrusion in coastal aquifers are discussed. Moreover, the basic causes of the saltwater intrusion problem, due to human or other factors are presented. Several ways of dealing with this problem for proper water resources management and saltwater intrusion control in the coastal aquifers is discussed.

Next, the position of the interface between freshwater and saltwater in confined coastal aquifers is investigated, considering the sharp interface approach of Strack (1976) and Mantoglou (2003), and variable density flow. Initially, the aquifer, covering an area of $7 \times 3 \text{ km}^2$ with depth of 50 m is represented by a simple simulation model of rectangular shape and uniform hydraulic conductivity and recharge rate, without the presence of wells. A simulation model based on HydroGeoSphere is developed and applied. Subsequently, specialized programs are developed in MATLAB, in order to:

- a) calculate the exact position of saltwater interface using the required mathematical equations in each approach.
- b) depict the results by showing the hydraulic head and iso-concentration lines in the aquifer. The visual depiction is achieved using TECPLOT and GMS programs.

The results are shown in diagrams for comparing the three approaches.

Next, the same aquifer is studied with a pumping well placed on a specific position. The three approaches examined above are investigated for predicting the position of saltwater interface. The initial conditions of the variable density model in HydroGeoSphere, are based on the results of the first simulation without the presence of wells.

Several runs are conducted by placing the pumping well at a distance of 1000m, 2000m and 3000 m from the coast in order to calculate the maximum pumping rate for each position so that the saltwater interface doesn't reach the well. New runs are conducted in HydroGeoSphere and MATLAB environment and the results are again depicted in the TECPLOT environment. All three approaches (sharp interface: Strack (1976) -Mantoglou (2003), variable density flow) are analyzed and compared.

Next, a new aquifer is examined whose dimensions are 7 km x 5 km, in order to investigate the impact of aquifer dimensions. The examination of various pumping scenarios, lead to useful conclusions regarding the impact which the dimensions of the aquifer, the hydraulic conductivity, the location of the pumping well and the pumping rate have on the position of saltwater interface. Further, the relation of the position of saltwater interface on the maximum pumping rate is analyzed considering longitudinal and transverse dispersion in variable density flow.

Additionally, sharp interface models are improved using a correction factor similarly to Pool and Carrera (2011) regarding the saltwater-freshwater density ratio in order to show that sharp interface models can achieve simulation results similar to those that variable density models produce.

Finally, useful conclusions are drawn for the primary factors affecting the behavior of the aquifer in each approach. The presence of pumping wells and the dimension of side boundaries are considered, while comparisons are made in order to determine which of the three approaches resembles closer the problem of saltwater intrusion.

Keywords: saltwater intrusion, groundwater aquifers, sharp interface, variable density, saltwater interface, pumping wells, coastal aquifers.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής αναφορά στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται η δομή και η οργάνωσή της, δηλαδή τα κεφάλαια, από τα οποία αποτελείται η εργασία, καθώς και περιληπτικά το περιεχόμενό τους.

1.1. Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η παρουσίαση και σύγκριση δύο ευρέως διαδεδομένων τρόπων απόδοσης της διεπιφάνειας μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού κατά τη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρωσης. Εξετάζεται η θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) σύμφωνα με Mantoglou (2003) για περιορισμένο υδροφορέα με πλευρικά όρια και Strack (1976) για ημιάπειρα πλευρικά όρια, σε αντιπαράθεση με τη θεώρηση διεπιφάνειας για υπόγεια ροή μεταβλητής πυκνότητας (variable density flow). Υπολογίζεται η θέση της "σφήνας" που σχηματίζει το αλμυρό νερό στο εσωτερικό του παράκτιου υδροφορέα που μελετάται σύμφωνα με τις δύο θεωρήσεις, καθώς και η κρίσιμη παροχή άντλησης για διάφορες θέσεις πηγαδιού.

Γίνεται εκτενής αναφορά στο πρόβλημα της υφαλμύρωσης, δηλαδή δίνεται ο ορισμός της σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, ενώ εξετάζονται τα συνήθη αίτια πρόκλησης του φαινομένου και οι δυσμενείς επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον αλλά και στην κοινωνικοπολιτική κατάσταση των παράκτιων περιοχών που πλήττει. Τέλος, εξετάζονται πρωτοποριακοί, αλλά και συνήθεις τρόποι αντιμετώπισης για την άμβλυνση του προβλήματος που εφαρμόζονται σε παγκόσμια κλίμακα.

Κατά τη μελέτη του προβλήματος προσομοίωσης και για τις δύο θεωρήσεις, ο υδροφορέας θεωρείται σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με ίδια τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας και επιφανειακής τροφοδοσίας σε όλη του την έκταση. Έπειτα από την πραγματοποίηση μιας βιβλιογραφικής έρευνας σχετικά με αντίστοιχες μελέτες, συντάσσεται ένα σύνολο προγραμμάτων που εκτελείται για διάφορα σενάρια. Σχολιάζεται ποια θεώρηση είναι ακριβέστερη όσον αφορά την προσέγγιση του φυσικού προβλήματος και της πραγματικής εικόνας λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό σχήμα του υδροφορέα και τα ιδιαίτερα υδραυλικά χαρακτηριστικά του, καθώς και ποια θεώρηση είναι υπέρ της ασφάλειας όσον αφορά την κρίσιμη παροχή άντλησης. Τέλος, δοκιμάζεται ο βελτιωμένος λόγος πυκνοτήτων (Pool and Carrera, 2011), ώστε να ελεγχθεί αν τα μοντέλα απότομης διεπιφάνειας παρουσιάζουν αποτελέσματα προσομοίωσης πιο "κοντά" σε αυτά της μεταβλητής πυκνότητας λόγω διάχυσης αλάτων.

Εκτελούνται τα συνταχθέντα προγράμματα για τον υπολογισμό της θέσης της σφήνας στις δύο θεωρήσεις, στην περίπτωση που υπάρχει πηγάδι άντλησης σε συγκεκριμένη θέση κάθε φορά, και στην περίπτωση που δεν υπάρχει άντληση στον

υδροφορέα. Εφαρμόζονται οι δύο θεωρήσεις που αναφέρθηκαν και συγκρίνονται μεταξύ τους, όσον αφορά τη θέση της σφήνας και την παροχή άντλησης που επιτρέπεται για δοκιμαστικές θέσεις πηγαδιού μέσα στον υδροφορέα, σύμφωνα με τις μεθόδους και τους κανόνες της διεθνής βιβλιογραφίας. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ιδιαίτερος ενδιαφέροντα όσον αφορά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου, όσον αφορά το πρόβλημα της υφαλμύρωσης.

1.2 Δομή και Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας

Αρχικά πραγματοποιείται, στο πρώτο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 1), η γενική παρουσίαση του θέματος και των στόχων της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας, όσον αφορά το πρόβλημα που εξετάζεται και τα επιθυμητά συμπεράσματα που αναμένεται να εξαχθούν. Επίσης, εισάγεται η έννοια του γενικού μαθηματικού μοντέλου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 2) επεξηγείται το πρόβλημα της υφαλμύρωσης διεξοδικά. Επομένως αναλύονται οι κυριότερες αιτίες πρόκλησής της σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία και έρευνα, καθώς και οι βασικότερες επιπτώσεις της στο ανθρωπογενές και φυσικό περιβάλλον. Τέλος, αναλύονται μερικοί τρόποι αντιμετώπισής της.

Στο τρίτο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3) παρουσιάζονται οι δύο θεωρήσεις που αφορούν τη διεπιφάνεια, δηλαδή η θεώρηση απότομης διεπιφάνειας μηδενικού πάχους (sharp interface) και η θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους λόγω υδροδυναμικής διασποράς (variable density flow). Στην πρώτη θεώρηση παρουσιάζεται η ανάλυση κατά Strack, στην οποία βασίζεται η μελέτη της κίνησης του μετώπου θαλασσινού νερού αναλόγως της παροχής άντλησης, ενώ παρουσιάζονται οι μαθηματικές εξισώσεις των δύο μοντέλων.

Ακολουθεί το Κεφάλαιο 4, όπου αναλύεται η έννοια της προσομοίωσης και παρουσιάζεται το υπολογιστικό περιβάλλον εργασίας. Περιγράφεται η λειτουργία του προγράμματος HydroGeoSphere και επεξηγείται η χρήση του στον υπολογισμό του δυναμικού και της θέσης της σφήνας του αλμυρού νερού. Παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι υδραυλικές παράμετροι, η τροφοδοσία και οι οριακές συνθήκες του εξεταζόμενου υδροφορέα, χωρίς την ύπαρξη πηγαδιού άντλήσεως. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θέσης της σφήνας για διάφορες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας K , ενώ στην περίπτωση της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας εξετάζονται διάφοροι συνδυασμοί διαμήκους και εγκάρσιας διασποράς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5) παρουσιάζεται η ίδια διαδικασία με του κεφαλαίου 4, αλλά με την ύπαρξη πηγαδιού άντλησης. Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται η θεώρηση sharp interface κατά Mantoglou (2003) και κατά Strack (1976), σύμφωνα με τις διαφορές που έχουν τα δύο μοντέλα, καθώς και variable density μοντέλα. Δοκιμάζονται διάφορες θέσεις τοποθέτησης του πηγαδιού από την ακτή, και γίνονται συγκρίσεις όσον αφορά τις τιμές κρίσιμης παροχής άντλησης, ως ποσοστό

της πλευρικής παροχής τροφοδοσίας του υδροφορέα. Εξετάζεται το μέγιστο ποσοστό πριν υφαιμυρωθεί ο υδροφορέας για τις δύο θεωρήσεις. Έπειτα, αυξάνεται το πλάτος του υδροφορέα και επαναλαμβάνεται η διαδικασία για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση των πλευρικών ορίων στη θέση της σφήνας και την μέγιστη παροχή άντλησης. Τέλος, δοκιμάζεται ο βελτιωμένος λόγος πυκνοτήτων αλμυρού και γλυκού νερού στα μοντέλα απότομης διεπιφάνειας για να καθοριστεί αν μπορούν να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα προσομοίωσης.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, συγκρίνεται η αξιοπιστία και η ακρίβεια με την οποία προσεγγίζουν το φυσικό πρόβλημα οι δύο θεωρήσεις, όσον αφορά τη θέση της σφήνας για διάφορους συνδυασμούς, για την ύπαρξη πηγαδιού αντλήσεως και μη. Παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα συμπεράσματα της μελέτης, όπου αναδεικνύεται η σημασία της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας, αλλά και του λόγου της διαμήκης και της εγκάρσιας διασποράς, όσον αφορά το πρόβλημα της υφαιμύρωσης. Επίσης, γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα βασισμένες στα συμπεράσματα και τις δυσκολίες της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

1.3 Μαθηματικό μοντέλο

Ο Γιαννουλόπουλος (2000) περιγράφει το μαθηματικό μοντέλο ως μια σχέση ή εξίσωση η οποία εκφράζει τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φυσικού συστήματος ή διαδικασίας σε μαθηματική μορφή. Αναπαριστάται με μια συναρτησιακή σχέση της μορφής:

Εξαρτημένη μεταβλητή = f (ανεξάρτητες μεταβλητές, παράμετροι, συναρτήσεις ελέγχου)

Η εξαρτημένη μεταβλητή, περιγράφει την κατάσταση του συστήματος, όπως το δυναμικό, οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι συνήθως διαστάσεις χώρου και χρόνου, ενώ οι συναρτήσεις ελέγχου περιγράφουν εξωτερικές επιδράσεις και τάσεις.

Στην περίπτωση των υπογείων νερών, το μαθηματικό μοντέλο, αποτελείται από μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη λειτουργία του υδροφορέα σχηματισμού, όπως η εξίσωση συνεχείας και ο Νόμος Darcy. Όσον αφορά στο πρόβλημα της υφαιμύρωσης υπεισέρχονται οι εξισώσεις του Strack στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας και οι εξισώσεις διασποράς αλάτων στην περίπτωση μοντέλων μεταβλητής πυκνότητας.

Τα διαδοχικά βήματα που ακολουθούνται για την ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας ενός υπόγειου υδροφορέα είναι τα εξής:

- Ο καθορισμός των στόχων του μοντέλου. Οι στόχοι αυτοί καθορίζουν τις εξισώσεις που επιλέγονται καθώς και το λογισμικό.

- Ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου, το οποίο αποτελεί την περιγραφή των χαρακτηριστικών του υδρογεωλογικού συστήματος. Αναγνωρίζονται τα όρια και η γεωμετρία του υδροφορέα, συγκεντρώνονται τα δεδομένα που αφορούν στις διάφορες υδραυλικές παραμέτρους (π.χ. υδραυλική αγωγιμότητα) καθώς και στις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου (π.χ. τροφοδοσία μέσω κατείσδυσης).
- Επιλογή του κατάλληλου λογισμικού για την επίλυση του αριθμητικού μοντέλου. Τα υπάρχοντα λογισμικά επιλύουν με αριθμητικές μεθόδους το μαθηματικό πρόβλημα ροής στους υπόγειους υδροφορείς.

Ο τρόπος επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το υπό μελέτη πρόβλημα καθορίζει τις δύο υποκατηγορίες των μαθηματικών μοντέλων:



Εικόνα 1.1. Διάκριση Μαθηματικών Μοντέλων
 Πηγή: Γιαννουλόπουλος, 2000

2. ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται διεξοδικά το φαινόμενο της υφαλμύρωσης, δίνοντας ορισμό στο πρόβλημα αυτό, περιγραφή του φαινομένου, τις κυριότερες αιτίες πρόκλησής του, καθώς και τις επιπτώσεις στην παροχή νερού. Τέλος, εξετάζονται οι κυριότεροι τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου αυτού.

2.1. Ορισμός Υφαλμύρωσης

Υφαλμύρωση είναι η εισροή θαλασσινού νερού σε έναν παράκτιο υπόγειο υδροφορέα με αποτέλεσμα τη ρύπανση των νερών με αλάτι, καθώς και την υποβάθμιση της ποιότητας του, γεγονός που έχει ως άμεσες συνέπειες την ποιοτική καταστροφή των γεωτρήσεων.

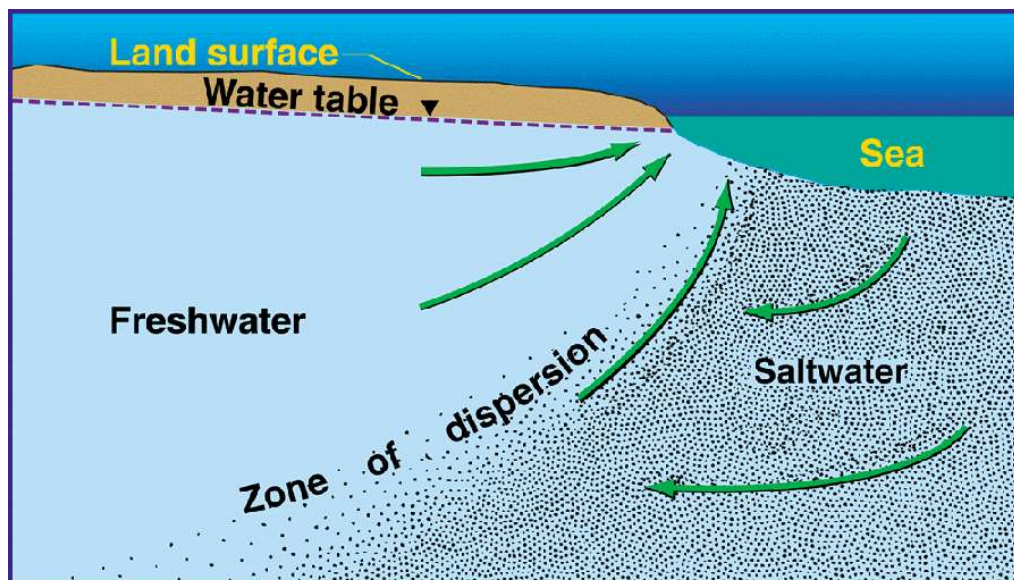
Το φαινόμενο παρατηρείται σε κάποιο βαθμό στους περισσότερους παράκτιους υδροφορείς με συγκεκριμένα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά, λόγω του υδραυλικού ισοζυγίου μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Οι υδροφορείς αυτοί χρησιμοποιούνται εντατικά για την κάλυψη των αναγκών σε νερό σε περιοχές όπου το αξιοποιησιμο επιφανειακό δυναμικό δεν επαρκεί. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα νησιά του Αιγαίου, όπου η αυξημένη τουριστική ανάπτυξη σε συνδυασμό με την ανεπάρκεια υδατικών πόρων καθιστούν αναγκαία την αξιοποίηση του υπόγειου δυναμικού.

Στις παραθαλάσσιες περιοχές, το γλυκό νερό που ρέει από τον υπόγειο υδροφορέα συναντά το αλμυρό νερό από την θάλασσα. Το γλυκό νερό ρέει από τις εσωτερικές περιοχές προς την ακτή όπου η ανύψωση και τα επίπεδα υπόγειων νερών είναι χαμηλότερα. Επειδή το αλμυρό νερό έχει υψηλότερη συγκέντρωση αδιάλυτων αλάτων είναι πιο πυκνό από το γλυκό νερό, προκαλώντας το να έχει υψηλότερο υδραυλικό φορτίο σε σχέση με το γλυκό νερό. Το υδραυλικό φορτίο αναφέρεται στην πίεση υγρού που ασκείται από μια στήλη νερού: μια στήλη νερού με υψηλότερο υδραυλικό φορτίο θα κινηθεί προς μια στήλη νερού με χαμηλότερο υδραυλικό φορτίο, εφόσον οι δύο στήλες έρχονται σε επαφή μεταξύ τους.

Η υψηλή πίεση και η πυκνότητα του αλμυρού νερού το προκαλεί να κινηθεί στο εσωτερικό των παράκτιων υπόγειων υδροφορέων σε σχήμα σφήνας κάτω από την επιφάνεια του γλυκού νερού. Το αλμυρό και το γλυκό νερό συναντιούνται σε μια μεταβατική ζώνη όπου γίνεται ανάμιξη μέσω διασποράς και διάχυσης. Κανονικά η ενδότερη έκταση της σφήνας του θαλασσινού νερού είναι περιορισμένη λόγω της αύξησης των επιπέδων του υπόγειου γλυκού νερού όσο η ανύψωση γης αυξάνεται.

Συγκεκριμένα, στην επαφή αλμυρού και γλυκού νερού δημιουργείται μια μεταβατική ζώνη μεταβαλλόμενης πυκνότητας και ορισμένου πάχους γνωστή ως διεπιφάνεια. Πάνω από αυτή κινείται το ελαφρύτερο γλυκό νερό (ειδικό βάρος 1.000 gr/cm^3) που εξέρχεται προς τη θάλασσα ενώ από κάτω συναντάται το αλμυρό νερό

(ειδικό βάρος 1.025 gr/cm^3). Οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα στη ζώνη αυτή μεταβάλλονται καθώς αλλάζει η πυκνότητα εξαιτίας της μεταβολής της συγκέντρωσης άλατος. Οι Das and Data (1999) μελέτησαν τη «μικτή» αυτή ροή στη ζώνη μεταβαλλόμενης πυκνότητας μέσω του κατάλληλου μοντέλου.



Εικόνα 2.1. Τυπική κίνηση αλμυρού νερού στο εσωτερικό υπόγειο υδροφορέα, όπου είναι εμφανής η δημιουργία "σφήνας".

Πηγή: <http://water.usgs.gov/ogw/gwrp/saltwater/salt.html>

2.2. Αιτίες Πρόκλησης της Υφαλμύρωσης

Η άντληση από υπόγεια ύδατα είναι η πρωταρχική αιτία πρόκλησης της διείσδυσης αλμυρού νερού στο εσωτερικό του υπόγειο υδροφορέα. Το υπόγειο υδατικό δυναμικό είναι η κύρια πηγή πόσιμου νερού σε πολλές παράκτιες περιοχές της Ελλάδας, αλλά και στον κόσμο, και η άντληση αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου στη σύγχρονη εποχή σε σύγκριση με παλαιότερες περιόδους. Στις οριακές συνθήκες, η επέκταση του αλμυρού νερού περαιτέρω στο εσωτερικό του υπόγειο υδροφορέα περιορίζεται από την υψηλότερη πίεση που ασκείται από τη στήλη του γλυκού νερού, λόγω της μεγαλύτερης ανύψωσής του.

Όμως, η ανεξέλεγκτη άντληση νερού από τον υδροφορέα μπορεί να χαμηλώσει το επίπεδο στάθμης του γλυκού νερού, ελαττώνοντας την πίεση που ασκεί η στήλη γλυκού νερού και επιτρέποντας το αλμυρό νερό με τη μεγαλύτερη πυκνότητα να παρεισφρήσει πλευρικά στο εσωτερικό του υδροφορέα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο παράκτιος υδροφορέας στο Cape May του New Jersey, όπου από το 1940 οι αντλήσεις νερού έχουν προκαλέσει την ελάττωση της στάθμης του γλυκού νερού κατά 30 μέτρα, επομένως κάτω από το όριο της θάλασσας, και αναπόφευκτα προκαλεί την ευρεία διείσδυση του αλμυρού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα και την υφαλμύρωση των πηγαδιών παροχής πόσιμου

νερού στην περιοχή αυτή. (Πηγή: <http://pubs.usgs.gov/wri/wri014246/pdf/wrir01-4246.pdf>)

Η άντληση από υπόγειους υδροφορείς μπορεί επίσης να οδηγήσει σε ρύπανση των πηγαδιών προκαλώντας την άνοδο του αλμυρού νερού από τα βάθη του υδροφορέα προς το επίπεδο άντλησης (upwelling ή upconing). Πηγάδια παροχής γλυκού νερού που βρίσκονται πάνω ή κοντά στη σφήνα αλμυρού νερού μπορεί να αντλήσουν αλμυρό νερό προς τα πάνω, δημιουργώντας ένα κώνο αλμυρού νερού που μπορεί να φτάσει το πηγάδι και να το υφαλμυρώσει. Μερικοί υδροφορείς είναι ευαίσθητοι σε τέτοιου είδους συμπεριφορές, όπως ο υδροφορέας στη νότια Florida. Εκεί, αν και ένα σχετικά αδιαπέραστο πέτρωμα διαχωρίζει το γλυκό από το αλμυρό νερό, μεμονωμένες ρωγμές στο πέτρωμα αυτό σπάνε το ημιπερατό στρώμα, προκαλώντας τη διείσδυση αλμυρού νερού στο εσωτερικό του συγκεκριμένου υδροφορέα. (Πηγή: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70003372>)

2.3. Επιπτώσεις στην Παροχή Πόσιμου Νερού

Είναι γεγονός ότι πολλές παράκτιες περιοχές σε όλο τον κόσμο, στις οποίες το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα εδώ και δεκαετίες, αντιμετωπίζουν τεράστια προβλήματα από την ρύπανση των πηγαδιών άντλησης πόσιμου νερού. Οι συνέπειες της υφαλμύρωσης για τα πηγάδια αυτά ποικίλλουν, ανάλογα με την έκταση που έχει καλύψει το αλμυρό νερό στο εσωτερικό του υδροφορέα, τον προβλεπόμενο σκοπό χρήσης του νερού που αντλείται, καθώς και αν η αλατότητα υπερβαίνει τα πρότυπα για την προβλεπόμενη χρήση. Σε ορισμένες περιοχές, όπως στην Πολιτεία της Ουάσιγκτον, η εισβολή φτάνει μόνο σε τμήματα του υδροφορέα και επηρεάζει μόνο ορισμένα πηγάδια νερού. Άλλοι υδροφορείς έχουν αντιμετωπίσει πιο εκτεταμένη ρύπανση αλατότητας, επηρεάζοντας σημαντικά τα αποθέματα των υπόγειων υδάτων για την περιοχή. Για παράδειγμα, στο Cape May του New Jersey, η διείσδυση αλμυρού νερού έχει προκαλέσει την διακοπή άντλησης σε τουλάχιστον 120 γεωτρήσεις ύδρευσης από το 1940 έως σήμερα.

Από την όξυνση του φαινομένου μπορεί να προκληθεί αυξημένη παρουσία καθιζήσεων σε εκτεταμένες περιοχές. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις όμως έχουν και άλλες πτυχές που επηρεάζουν πολλούς τομείς της καθημερινής ζωής. Ειδικότερα, η υφαλμύρωση υπόγειου υδροφορέα έχει ως αποτέλεσμα μεταβολές στην οικονομική, κοινωνική και πολιτική ζωή. Για παράδειγμα, η υφαλμύρωση υδροφορέα απαιτεί την εγκαθίδρυση δικτύου αφαλάτωσης ή εναλλακτικές μορφές άντλησης και καθαρισμού του νερού από το αλάτι, επομένως μπορεί να είναι καταστροφικό για τους οικονομικούς πόρους μιας χώρας ή περιοχής.

Επίσης, η έλλειψη νερού μπορεί να προκαλέσει πληθώρα κοινωνικοπολιτικών προβλημάτων. Πιθανά αποτελέσματα έλλειψης καθαρού νερού μπορεί να προκαλέσουν αυξημένα ποσοστά ανεργίας, φτώχεια σε μεγάλες ομάδες πληθυσμού, αναταραχές ή ακόμα και πόλεμο μεταξύ χωρών, όπως προβλέπεται για το μέλλον από

πολλούς επιστήμονες. Επομένως, το θέμα της υφαλμύρωσης δεν είναι συσχετισμένο μόνο με την άντληση καθαρού νερού, αλλά με όλα τα θέματα που αφορούν την συνύπαρξη ανθρώπων σε μια κοινωνία, άρα απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός και αυξημένη αίσθηση κινδύνου για να διαφυλαχθούν τα κεκτημένα προνόμια που απολαμβάνουν οι άνθρωποι στη σημερινή εποχή.

2.4. Τρόποι Αντιμετώπισης της Υφαλμύρωσης

Έχουν προταθεί αρκετοί τρόποι για τον περιορισμό του προβλήματος της υφαλμύρωσης. Κλειδί όμως για τον έλεγχο της διείσδυσης αλμυρού νερού είναι να διατηρηθεί η κατάλληλη ισορροπία μεταξύ του νερού που αντλείται από τον υδροφορέα και την ποσότητα του νερού που απαιτείται για επαναφόρτιση. Η συνεχής παρακολούθηση της διεπιφάνειας γλυκού και θαλασσινού νερού είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της κατάλληλης τεχνικής διαχείρισης. Στο παρελθόν, πολλές κοινότητες που είχαν πρόβλημα διείσδυσης αλμυρού νερού απλά δημιουργούσαν νέες γεωτρήσεις στην ενδοχώρα, γεγονός που έκανε πιο περίπλοκο το ζήτημα.

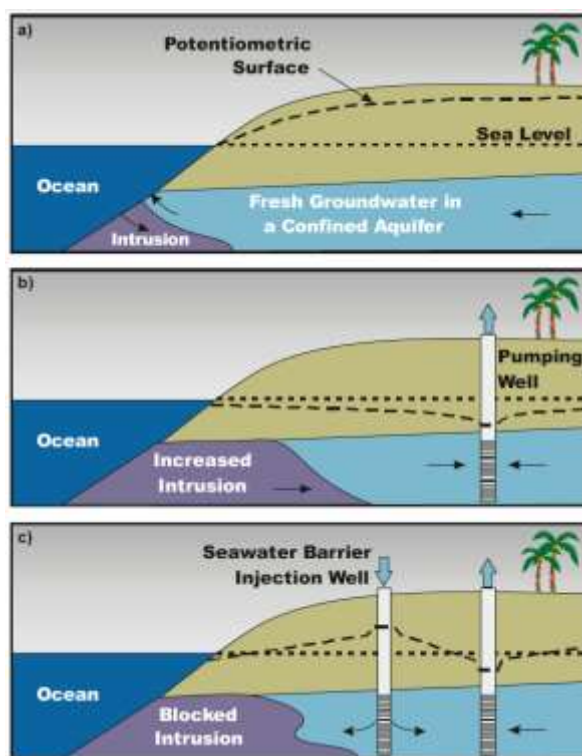
Από τότε, διάφορες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσουν στο πρόβλημα ανησυχίας περί υφαλμύρωσης. Οι προσπάθειες για περιορισμό των αντλήσεων από παράκτιους υδροφορείς είναι οι πιο συνήθεις για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Η χρήση εναλλακτικών πηγών πόσιμου νερού επίσης ενθαρρύνεται συχνά. Όλο και περισσότερες μονάδες αφαλάτωσης αλμυρού νερού εμφανίζονται στις παράκτιες περιοχές σε όλο τον κόσμο. Όταν δεν υπάρχουν άλλες επιλογές για παροχή πόσιμου νερού, οι προσπάθειες για τη διατήρηση των επιπέδων των υπόγειων υδάτων με χρήση επιφανειακών υδάτων και την απορροή ομβρίων, ή με τη χρήση των υδάτων του ποταμού για να επαναφορτίζεται ο υδροφόρος ορίζοντας έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία.

Άλλες μέθοδοι για τον έλεγχο της διείσδυσης αλμυρού νερού, όπως είναι η χρησιμοποίηση πηγαδιών επαναφόρτισης με μεγάλο βάθος, έχουν επίσης επιτυχία. Αυτά τα πηγάδια δημιουργία μια υψηλή ποτενσιομετρική επιφάνεια, η οποία επιτρέπει την άντληση των υπόγειων υδάτων κάτω από το επίπεδο της θάλασσας στην ενδοχώρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα πηγάδια φράγματα έχουν στηθεί κοντά στην ακτή για να αντλούν θαλασσινό νερό και να επαναφορτίζουν μια νέα βαθμίδα γλυκού νερού προς τη θάλασσα.

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, οι υδρολογικές μελέτες και η παρακολούθηση ποιότητας των υδάτων είναι απαραίτητη για να κατανοηθεί καλύτερα η κίνηση και η αλληλεπίδραση του γλυκού νερού και του αλμυρού νερού, και να καθοριστεί η καλύτερη μέθοδος για τη διαχείριση της διείσδυσης αλμυρού νερού. Η χαρτογράφηση της ποτενσιομετρικής επιφάνειας ενός υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τον καθορισμό της κατεύθυνσης της ροής των υπόγειων υδάτων μέσα σε ένα περιορισμένο υδροφορέα. Η σχεδίαση των αυξήσεων της στάθμης του νερού σε ένα χάρτη και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων την

καθορίζει, είναι στην πραγματικότητα ένας χάρτης του υδραυλικού φορτίου στον υδροφόρο ορίζοντα.

Η παρακολούθηση των δικτύων επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση του περιβάλλοντος αλμυρού νερού, ώστε στρατηγικές διαχείρισης να τεθούν σε εφαρμογή. Παρέχει έγκαιρες προειδοποιήσεις της διείσδυσης αλμυρού νερού και παρακολουθεί την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής. Συνολικά, οι κατάλληλες τεχνικές παρακολούθησης των υπογείων υδάτων και διαχείρισης των υπογείων υδάτων, σε συνδυασμό με τη διατήρησή τους απαιτείται για να είναι το φαινόμενο της υφαλμύρωσης υπό έλεγχο, και να διασφαλίσει νέες ποσότητες νερού για τις μελλοντικές γενιές. (Πηγή: <http://www.solinst.com/Res/papers/101C4Salt.html>)



Εικόνα 2.3. Υφαλμύρωση παράκτιου υπόγειου υδροφορέα και αντιμετώπιση με "τοίχο προστασίας" με χρήση πηγαδιών.

Πηγή: <http://www.wrd.org/engineering/seawater-intrusion-los-angeles.php>

Στις παράκτιες περιοχές όπου τα υπόγεια ύδατα χρησιμοποιούνται για πόση ή γεωργικούς σκοπούς, όπως στις λεκάνες της Κεντρικής και Δυτικής ακτής στο Los Angeles (CWCB), η εισβολή μπορεί να είναι ένα σοβαρό πρόβλημα που προκαλεί τελικά το κλείσιμο των πηγαδιών άντλησης ή τελικά απαιτούν μια πολύ ακριβή επεξεργασία αφαλάτωσης για να γίνει δυνατή η πόση του νερού. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, το 1951 η Υπηρεσία Αντιπλημμυρικών Έργων του Los Angeles (LACFCD) χρησιμοποίησε ένα εγκαταλειμμένο πηγάδι στο Manhattan Beach για να εγχυθεί πόσιμο νερό για να ελεγχθεί αν θα μπορούσε να δημιουργηθεί πίεση σε ένα περιορισμένο υδροφορέα για να εμποδίσει την εισβολή (Lipshie και Larson, 1995). Η δοκιμή λειτούργησε, έτσι η LACFCD έκανε επακόλουθες δοκιμές

με πρόσθετα φρεάτια για να δημιουργηθεί με επιτυχία ένα τείχος πίεσεως κατά μήκος της γραμμής των φρεάτων έγχυσης για να ξεπεραστεί η πίεση της εισβολής του θαλασσινού νερού.

Τα πηγάδια αυτά εγχέουν νερό στους υδροφορείς ώστε να κατασκευασθεί μια γραμμή πίεσης ίση ή μεγαλύτερη από τις ανυψώσεις προστασίας που προβλέπονται από την αρχή Ghyben-Herzberg που θα περιγραφεί στο επόμενο υποκεφάλαιο, εμποδίζοντας την εισβολή. Τα έργα φράγματος προστατεύουν με επιτυχία τους υπόγειους υδροφορείς στην CWCB για πάνω από 50 χρόνια. Επί του παρόντος, τόσο το πόσιμο νερό, όσο και ανακυκλωμένα αστικά λύματα επεξεργάζονται με μικροδιήθηση, αντίστροφη όσμωση, και προηγμένες μεθόδους οξείδωσης, και σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται (υπεριώδες φως και υπεροξείδιο του υδρογόνου).

3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι δύο εξεταζόμενες στην παρούσα εργασία μέθοδοι αναπαράστασης του μετώπου θαλασσινού νερού, δηλαδή η θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) και η θεώρηση υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας με ζώνη ανάμιξης λόγω διάχυσης άλατος (variable density). Περιγράφονται οι αναλυτικές σχέσεις των δύο μοντέλων και τα χαρακτηριστικά που τις διέπουν.

Η μοντελοποίηση της υφαλμύρωσης θεωρείται γενικά δύσκολη. Μερικές χαρακτηριστικές δυσκολίες που προκύπτουν είναι:

- Η πιθανή παρουσία ρωγμών στον υδροφορέα, των οποίων η ακριβής θέση είναι άγνωστη, αλλά έχουν μεγάλη επίδραση στην ανάπτυξη της υφαλμύρωσης.
- Η πιθανή παρουσία από μικρής κλίμακας ετερογένειες στις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφόρου ορίζοντα, που μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στην εξέλιξη της διείσδυσης αλμυρού νερού.
- Η αλλαγή των υδραυλικών ιδιοτήτων του υδροφορέα από τη διείσδυση του αλμυρού νερού. Το μίγμα του αλμυρού και γλυκού νερού είναι συχνά υποκορεσμένο όσον αφορά το ασβέστιο, προκαλώντας διάλυση του ασβεστίου στη ζώνη ανάμιξης και την αλλαγή στις υδραυλικές ιδιότητες.
- Η διαδικασία που είναι γνωστή ως ανταλλαγή κατιόντων, η οποία επιβραδύνει την ανάπτυξη της υφαλμύρωσης.
- Το γεγονός ότι η υφαλμύρωση συχνά δεν είναι σε ισορροπία καθιστά πιο δύσκολο να προσομοιαστεί το μοντέλο. Η δυναμική του υδροφορέα τείνει να είναι αργή και χρειάζεται η σφήνα του αλμυρού νερού πολύ χρόνο για να προσαρμοστεί στις αλλαγές. Έτσι, η κατάσταση στον τομέα μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετική από ό, τι θα αναμενόταν.
- Για μακροχρόνια μοντέλα, η μελλοντική αλλαγή του κλίματος αποτελεί ένα μεγάλο άγνωστο. Τα αποτελέσματα συχνά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο της θάλασσας και το ποσοστό αναπλήρωσης. Και τα δύο αναμένεται να αλλάξουν στο μέλλον.

3.1. Θεώρηση Απότομης Διεπιφάνειας (Sharp Interface)

Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος αναπαράστασης του μετώπου θαλασσινού νερού είναι η θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) λόγω της ευκολίας και της γρήγορης διαδικασίας υπολογισμού σε ηλεκτρονικό υπολογιστή

και είναι η πρώτη που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία. Σύμφωνα με την θεώρηση αυτή, η μεταβατική ζώνη μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού έχει μηδενικό πάχος συγκριτικά με το πάχος του υδροφορέα.

Σε κατάσταση φυσικής ισορροπίας (απουσία άντλησης) η διεπιφάνεια αλμυρού και γλυκού νερού παραμένει ακίνητη. Η αυξημένη όμως άντληση γλυκού νερού από πηγάδια - σε τέτοιο βαθμό ώστε οι ρυθμοί της φυσικής επαναπλήρωσης να μην οδηγούν στην αποκατάστασή του υδροφορέα - έχει ως αποτέλεσμα την πτώση του πιεζομετρικού φορτίου και την κίνηση της διεπιφάνειας προς το εσωτερικό μέχρι την επίτευξη νέας κατάστασης ισορροπίας.

Η ποσότητα του γλυκού νερού που εξέρχεται στη θάλασσα και του αλμυρού νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα καθορίζεται από τις τιμές του πιεζομετρικού φορτίου που σχετίζεται άμεσα με τις οριακές συνθήκες, την επιφανειακή τροφοδοσία και την άντληση (Παπαντωνίου, 2003). Οι εξισώσεις γράφονται για κάθε μία φάση χωριστά:

Εξισώσεις για το γλυκό νερό

- Εξίσωση συνέχειας
- Εξισώσεις κίνησης (Νόμος Darcy)

Εξισώσεις για το θαλάσσιο νερό

- Εξίσωση συνέχειας
- Εξισώσεις κίνησης (Νόμος Darcy)

Άγνωστα μεγέθη του προβλήματος είναι:

- πίεση P
- βάθος ζ της διεπιφάνειας από την επιφάνεια της θάλασσας
- ειδικές παροχές (ταχύτητες) q_f και q_s για το γλυκό και αλμυρό νερό αντίστοιχα.

Οι Emch and Yeh (1999), βασιζόμενοι σε προηγούμενες έρευνες, αναφέρουν τους εναλλακτικούς τρόπους εξέτασης του προβλήματος της υφαλμύρωσης:

(α) υπό την προϋπόθεση ότι το θαλασσινό νερό παραμένει ακίνητο, χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις κίνησης του γλυκού, όπως γίνεται και στη συγκεκριμένη εργασία.

(β) επιλύονται ταυτόχρονα οι εξισώσεις ροής για το γλυκό και το θαλασσινό νερό με αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας του προβλήματος.

3.1.1. Προσέγγιση Ghyben - Herzberg

Οι Ghyben και Herzberg ερεύνησαν τη διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού παράκτιων υδροφορέων προκειμένου να σχετίσουν το σχήμα και τη θέση της με υδρολογικές παραμέτρους του υπόγειου νερού. Στην περίπτωση φυσικής ισορροπίας,

η διεπιφάνεια θεωρείται ακίνητη. Το θαλασσινό νερό εντός του υδροφορέα παραμένει ακίνητο ενώ υπάρχει μόνιμη ροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα που υπακούει στην υπόθεση της οριζόντιας ροής (υπόθεση Dupuit). (Νάνου, 2009)

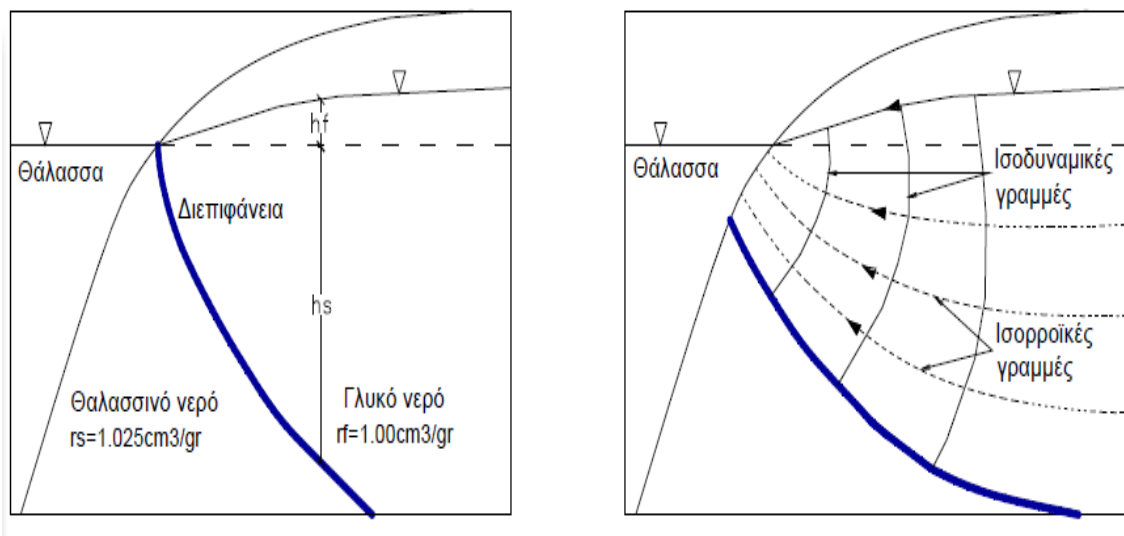
Με δεδομένα το ειδικό βάρος γλυκού (r_f) και αλμυρού νερού (r_s) και το πιεζομετρικό φορτίο σε κάποιο σημείο του υδροφορέα, η θέση της ακίνητης διεπιφάνειας στο σημείο αυτό βρίσκεται σε βάθος:

$$h_s = \frac{1}{\varepsilon} h_f, \text{ όπου } \varepsilon = \frac{r_s - r_f}{r_f}$$

από την επιφάνεια της θάλασσας. Η πυκνότητα του γλυκού νερού είναι περίπου 1.000 gr/cm^3 στους 20° C , ενώ αυτή του θαλασσινού νερού είναι περίπου 1.025 gr/cm^3 . Επομένως, η σχέση γίνεται:

$$h_s = 40 \times h_f$$

Η αναλογία Ghyben-Herzberg αναφέρει ότι αν η στάθμη του γλυκού νερού σε ένα φρεάτιο παράκτιο υδροφορέα χαμηλώσει κατά 1 m, η διεπιφάνεια θαλασσινού νερού θα αυξηθεί κατά 40 m.



Εικόνα 3.1. Παρουσιάζονται η διεπιφάνεια κατά Ghyben-Herzberg και η πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας αντίστοιχα.

Πηγή: <http://www.eolss.net>

Η πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας όμως είναι αρκετά διαφορετική, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1 και γίνεται φανερό ότι: (Νάνου 1999)

- δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής καθώς υπάρχουν κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων. Συνήθως όμως, το μήκος της αλάτινης σφήνας είναι πολύ μεγάλο συγκριτικά με το πάχος του υδροφορέα, οπότε επιτρέπει τη θεώρηση οριζόντιας ροής.

- η προσέγγιση Ghyben Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται διέξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα και η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα.

3.1.2. Ανάλυση κατά Strack

Το γενικό πρόβλημα της κίνησης υπογείων υδάτων σε παράκτιους υδροφορείς είναι πολύπλοκο απαιτώντας πάρα πολλές παραμέτρους που δεν είναι δυνατόν να καθοριστούν εξαιτίας της ανομοιογένειας τους στο χώρο. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η απλοποίηση του προβλήματος και η υιοθέτηση των κατάλληλων παραδοχών ώστε να βγουν ορθά συμπεράσματα με βάση τα υπάρχοντα κάθε φορά δεδομένα (Strack 1976, Bear 1979, Cheng & Ouazar 1999, Cheng et al. 2000, Mantoglou 2003, Mantoglou et al. 2004):

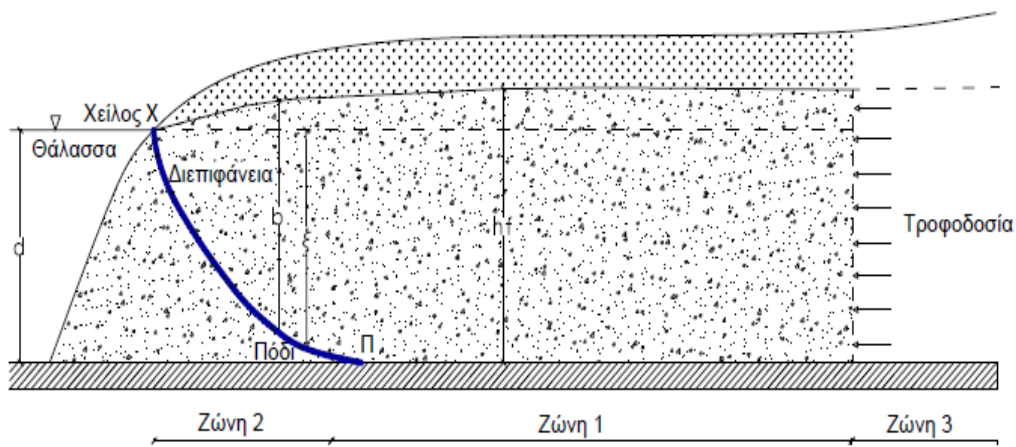
- Ο υδροφορέας είναι ισότροπος και ομογενής με οριζόντιο αδιαπέρατο πυθμένα.
- Παραδοχή της απότομης διεπιφάνειας (sharp interface), θεωρώντας ότι το μέτωπο αλμυρού νερού έχει πρακτικά σταθεροποιηθεί και δε μετακινείται.
- Παραδοχή μόνιμης ροής (steady state), οπότε η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα αγνοείται.
- Παραδοχή οριζόντιας ροής (υπόθεση Dupuit) για το γλυκό νερό ενώ στη ζώνη 2 της εικόνας 3.2, το θαλασσινό θεωρείται ακίνητο.
- Χρησιμοποιείται η σχέση των Ghyben-Herzberg για τον υπολογισμό της μορφής της διεπιφάνειας.

3.1.3. Αναλυτικές σχέσεις κατά Strack

Έστω ένας ομογενής και ισότροπος φρεάτιος παράκτιος υδροφορέας, για τον οποίο γίνεται υπόθεση σταθερής οριζόντιας ροής και απεικονίζεται στο σχήμα 3.2. (Παπαντωνίου, 2003)

- Ως αλμυρή σφήνα ορίζεται το τμήμα του υδροφορέα στο οποίο έχει εισέλθει το θαλασσινό νερό. Οριοθετείται από τη διεπιφάνεια μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού.
- Πόδι (σημείο Π) της αλμυρής σφήνας είναι το σημείο τομής της διεπιφάνειας με τον πυθμένα του υδροφορέα.

- Χείλος (σημείο X) της αλάτινης σφήνας είναι το σημείο τομής της διεπιφάνειας με την επιφάνεια της θάλασσας.



Εικόνα 3.2. Απεικονίζεται ο φρεάτιος υδροφορέας της υπόθεσης.

Πηγή: Παπαντωνίου (2003)

Στην εικόνα 3.2 διακρίνονται ευκρινώς τρεις ζώνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά, οι οποίες είναι:

- Στη ζώνη 1 ο υδροφορέας συμπεριφέρεται ακριβώς όπως ένας φρεάτιος υδροφορέας με αδιαπέρατο υπόβαθρο.
- Στη ζώνη 2 το γλυκό νερό συνυπάρχει με το θαλασσινό. Η διεπιφάνεια αποτελεί το μεταξύ τους όριο με το γλυκό νερό να επιπλέει πάνω από το θαλασσινό καθώς είναι ελαφρύτερο.
- Η ζώνη 3 περιλαμβάνει την περιοχή τροφοδοσίας του υδροφορέα.

Για μόνιμη οριζόντια ροή, η διαφορική εξίσωση συνέχειας στη ζώνη 1 είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot h_f \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \cdot h_f \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.1)$$

Ενώ στη ζώνη 2 γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot b \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \cdot b \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.2)$$

Όπου: h_f = η απόσταση από τον πυθμένα του υδροφορέα έως την ελεύθερη επιφάνεια και b = η απόσταση από τη διεπιφάνεια έως την ελεύθερη επιφάνεια.

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να περιγραφούν από τη γενική εξίσωση:

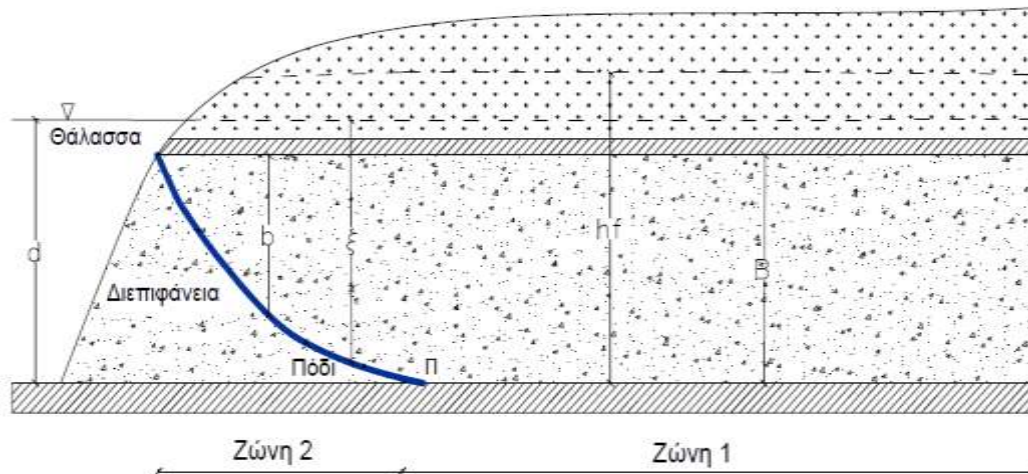
$$\nabla(K \cdot b \cdot \nabla h_f) = 0 \quad (3.3)$$

για φρεάτιο και για περιορισμένο υδροφορέα. Αν N είναι η επιφανειακή τροφοδοσία και Q_w η συνολική άντληση η εξίσωση (3.3) γίνεται :

$$\nabla(K \cdot b \cdot \nabla h_f) + N - Q_w = 0 \quad (3.4)$$

Το πάχος b του γλυκού νερού δεν είναι το ίδιο για τις δύο ζώνες. Το πάχος b αντιστοιχεί στα εξής, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3:

b	$=$	h_f	φρεάτιος υδροφορέας, ζώνη 1
		$h_f - d + \xi$	φρεάτιος υδροφορέας, ζώνη 2
		B	περιορισμένος υδροφορέας, ζώνη 1
		$\xi - d + B$	περιορισμένος υδροφορέας, ζώνη 2



Εικόνα 3.3. Αναπαράσταση περιορισμένου υδροφορέα.

Πηγή: Παπαντωνίου (2003)

Η κατακόρυφη απόσταση ξ της διεπιφάνειας από τη στάθμη της θάλασσας προσδιορίζεται με τη βοήθεια της προσέγγισης Ghyben-Herzberg :

$$h_f - d = \varepsilon \cdot \xi \Rightarrow \xi = \frac{1}{\varepsilon} (h_f - d) \quad (3.5)$$

Το δυναμικό στις ζώνες 1 και 2 ενός παράκτιου υδροφορέα στην περίπτωση μόνιμης οριζόντιας ροής ορίζεται (Strack 1976, Cheng & Ouazar 1999):

Φρεάτιος υδροφορέας:

$$\Phi_{\delta \varepsilon \xi} = \frac{[h_f^2 - (1 + \varepsilon)d^2]}{2} \quad \text{Ζώνη 1} \quad (3.6)$$

$$\Phi_{αρ.} = \frac{1 + \varepsilon}{2\varepsilon(h_f - d)^2} \quad \text{Ζώνη 2}$$

Περιορισμένος υδροφορέας:

$$\Phi_{\delta\varepsilon\xi} = B \cdot h_f + \frac{\varepsilon \cdot B^2}{2} - (1 + \varepsilon)B \cdot d \quad \text{Ζώνη 1} \quad (3.7)$$

$$\Phi_{αρ.} = \frac{1}{2\varepsilon} [h_f + \varepsilon \cdot B - (1 + \varepsilon)d]^2 \quad \text{Ζώνη 2}$$

Οι παραπάνω συναρτήσεις είναι σταθερές μεταξύ των ζωνών 1 και 2.

- Στο πόδι της διεπιφάνειας (σημείο Π) το δυναμικό ροής παίρνει συγκεκριμένη τιμή:

$$\Phi_{\Pi} = \Phi_{αρ} = \Phi_{\delta\varepsilon\xi} = \frac{\varepsilon(1 + \varepsilon)}{2d^2} \quad \text{Φρεάτιος υδροφορέας} \quad (3.8)$$

$$\Phi_{\Pi} = \Phi_{αρ} = \Phi_{\delta\varepsilon\xi} = \frac{\varepsilon}{2B^2} \quad \text{Περιορισμένος υδροφορέας}$$

Οι εξισώσεις (3.4), (3.6), (3.7) ικανοποιούν την εξίσωση (Mantoglou 2003):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + N - Q = 0 \quad (3.9)$$

Στην περίπτωση ομογενούς και ισότροπου υδροφορέα για N (επιφανειακή τροφοδοσία) και Q_w (άντληση), προκύπτει η εξίσωση:

$$K \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) + N - Q_w = 0 \quad (3.10)$$

- Στο χείλος της διεπιφάνειας (σημείο X), $\xi = 0 \Rightarrow h_f = d$, οπότε σύμφωνα με τις (3.6) και (3.7) το δυναμικό θα είναι 0, τόσο για τον φρεάτιο όσο και για τον περιορισμένο υδροφορέα. (Παπαντωνίου, 2003)

3.1.4. Ύπαρξη φρεάτος άντλησης – Επίλυση κατά Strack

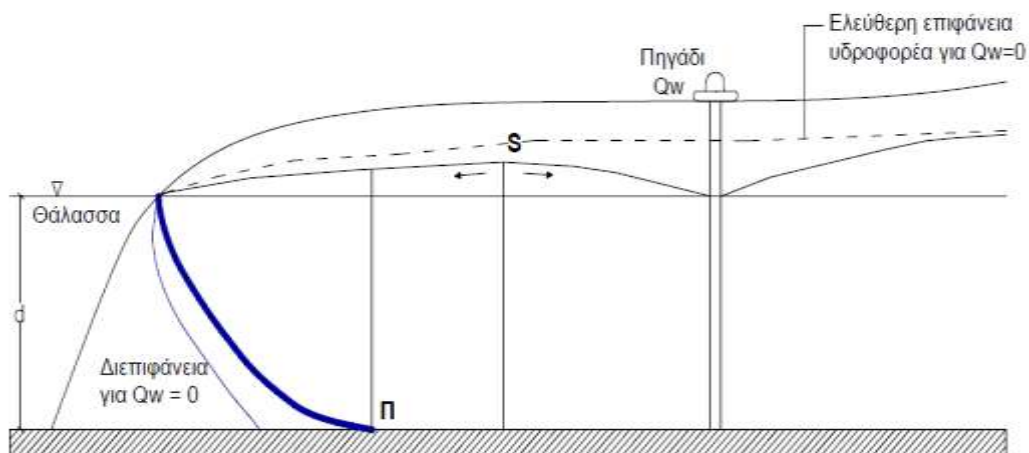
Έστω ένας παράκτιος υδροφορέας ημιαπείρων διαστάσεων στον οποίο η παροχή εισροής ανάντι ανά μονάδα πλάτους είναι q . Σε απόσταση x_w από την ακτή υπάρχει ένα φρέαρ άντλησης Q_w . Το δυναμικό σε κάθε σημείο του υδροφορέα, σύμφωνα με το Strack (1976 και Cheng & Ouazar 1999), υπολογίζεται με τη μέθοδο των εικόνων από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{q}{K}x + \frac{Q_w}{4\pi K} \ln \left[\frac{(x-x_w)^2 + y^2}{(x+x_w)^2 + y^2} \right] \quad (3.11)$$

Η σχέση (3.11) αφορά υδροφορέα ημιαπείρων διαστάσεων. Η θέση του ποδιού της αλάτινης σφήνας υπολογίζεται από τη σχέση (3.12) γνωρίζοντας το δυναμικό από τη (4.8) για φρεάτιο και για περιορισμένο υδροφορέα:

$$\Phi_{toe} = \frac{q}{K}x_{toe} + \frac{Q_w}{4\pi K} \ln \left[\frac{(x_{toe} - x_w)^2 + y^2}{(x_{toe} + x_w)^2 + y^2} \right] \quad (3.12)$$

Γενικότερα, σε φρεάτιο υδροφορέα σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου τυχόν αύξηση της παροχής άντλησης οδηγεί σε μετατόπιση του σημείου Π προς το εσωτερικό του υδροφορέα. Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή της παροχής Q_c για την οποία δημιουργείται μια ασταθής κατάσταση. Ελάχιστη αύξηση της άντλησης ($Q_w > Q_c$) οδηγεί σε απότομη μετακίνηση του ποδιού προς το εσωτερικό του υδροφορέα προκαλώντας υφαλμύρωση του πηγαδιού.



Εικόνα 3.4. Αναπαράσταση φρεάτιου υδροφορέα με άντληση.
Πηγή: Παπαντωνίου (2003)

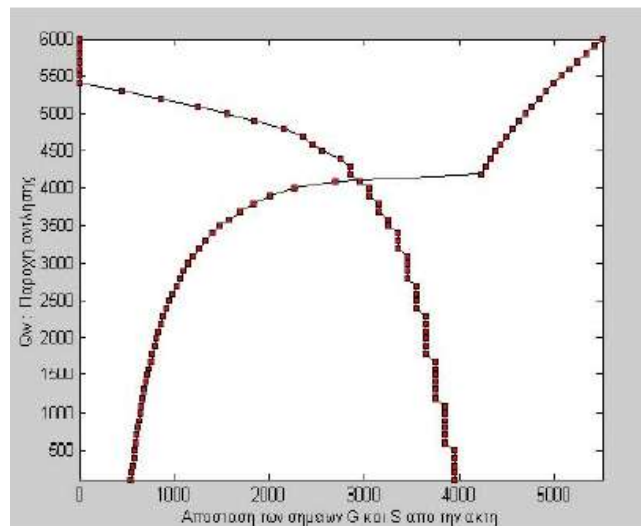
Στην εικόνα 3.4 επισημαίνονται τα σημεία:

- Π: πόδι αλάτινης σφήνας με δυναμικό ίσο με $\varepsilon(1+\varepsilon)/2d^2$
- S: γνωστό στη βιβλιογραφία ως stagnation point. Οριοθετεί την περιοχή τροφοδοσίας του φρεάτος στη ζώνη 2, επισημαίνοντας ουσιαστικά το τέλος του "κόνου ταπείνωσης". Όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα, λειτουργεί ως υπόγειος υδροκρίτης.

Στην εικόνα 3.5 φαίνεται η θέση του σημείου S για διάφορες τιμές της παροχής άντλησης Q_w για ένα παράδειγμα φρεάτιου υδροφορέα, ώστε να κατανοηθεί η συμπεριφορά του stagnation point. Το φρέαρ βρίσκεται σε απόσταση 3.850 m από

την ακτή (Παπαντωνίου, 2003). Παρατηρείται ότι για μικρές τιμές άντλησης (100 έως 500 m³/s), δε δημιουργείται κώνος ταπείνωσης, δηλαδή το x_s είναι ίσο με το x_w . Αύξηση της παροχής έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση του σημείου S προς την ακτή. Για άντληση μεγαλύτερη από 5.300 m³/s δεν υπάρχει πλέον stagnation point, δηλαδή η ελεύθερη επιφάνεια του υδροφορέα βρίσκεται χαμηλότερα από την επιφάνεια της θάλασσας.

Αξίζει να επισημανθεί ότι τα σημεία Π και S παρουσιάζουν αντίθετη συμπεριφορά στην αύξηση της παροχής άντλησης, μετατοπιζόμενα προς το εσωτερικό του υδροφορέα και προς την ακτή αντίστοιχα. Για μικρή παροχή άντλησης τα σημεία G και S βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, η οποία όμως μειώνεται διαδοχικά με αύξηση της παροχής. Στην περίπτωση της κρίσιμης παροχής (σημείο τομής των δύο διαγραμμάτων) το πόδι της αλάτινης σφήνας συμπίπτει με το stagnation point. Επιπλέον αύξηση οδηγεί σε υφαλμύρωση του πηγαδιού όπως αναλύεται και παραπάνω, (Παπαντωνίου, 2003)



Εικόνα 3.5. Απεικονίζονται οι συναρτήσεις $x_{loe} = f(Q_w)$ και $x_s = f(Q_w)$.

Πηγή: Παπαντωνίου, 2003.

Για μεγαλύτερες τιμές παροχής άντλησης οι θέσεις των σημείων G και S είναι απλώς ενδεικτικές. Αυτό συμβαίνει γιατί μεγαλύτερες τιμές της παροχής οδηγούν σε υφαλμύρωση των πηγαδιών. Παύει να ισχύει η θεώρηση της ακίνητης διεπιφάνειας με βάση την οποία γίνεται η επίλυση του Strack. (Παπαντωνίου, 2003)

Επομένως, η κρίσιμη τιμή Q_c της παροχής είναι η μέγιστη δυνατή χωρίς να υφαλμυρωθεί το πηγάδι και δίνεται από τη σχέση (Cheng and Ouazar 1999):

$$\Phi = \frac{q \cdot x_w}{K} \sqrt{1 - \frac{Q_c}{\pi \cdot q \cdot x_w}} + \frac{Q_c}{2\pi K} \ln \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{Q_c}{\pi \cdot q \cdot x_w}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{Q_c}{\pi \cdot q \cdot x_w}}} \quad (3.13)$$

Στη συνέχεια η κρίσιμη απόσταση $x_{toe,max}$ του ποδιού της αλάτινης σφήνας από την ακτή για παροχή άντλησης $Q_w = Q_c$ προσδιορίζεται από :

$$x_{toe,max} = x_s = x_w \sqrt{\frac{1-Q_w}{\pi \cdot q \cdot x_w}} \quad (3.14)$$

Όταν τα πηγάδια άντλησης είναι περισσότερα του ενός και αντλούν ταυτόχρονα, το δυναμικό σύμφωνα με τους Cheng & Quazar (1999) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{q}{K} x + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi K} \ln \frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{(x+x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (3.15)$$

Όπου: Q_i : η παροχή άντλησης κάθε πηγαδιού

x_i, y_i : οι συντεταγμένες κάθε πηγαδιού άντλησης.

Η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων ροής με παρουσία πηγαδιών αναφέρεται σε υδροφορείς ημιαπείρων διαστάσεων. Σε πρακτικά προβλήματα, οι υδροφορείς έχουν πεπερασμένες διαστάσεις και συγκεκριμένα όρια. Η εφαρμογή των παραπάνω αναλυτικών σχέσεων μπορεί να οδηγήσει πολλές φορές σε λανθασμένα αποτελέσματα.

Ο Mantoglou (2003) χρησιμοποιεί τις διαφορικές εξισώσεις του Strack (1976) σε συνδυασμό με τη μέθοδο των εικόνων για να εκτιμήσει, με αναλυτικές σχέσεις, τη συμπεριφορά ενός παράκτιου υδροφορέα πεπερασμένων διαστάσεων ορθογωνίου σχήματος. Στην περίπτωση τυχαίου σχήματος υδροφορέα με μεταβαλλόμενη υδραυλική αγωγιμότητα ή τροφοδοσία, η επίλυση με αναλυτικές σχέσεις είναι αδύνατη (Mantoglou 2003). Εφαρμόζονται τότε αριθμητικές μέθοδοι μέσω των γνωστών μοντέλων SUTRA (Gorelick et al. 1984, Hallaji and Yazicigil 1996, Mantoglou 2003, Mantoglou et al. 2004), SHARP (Emch and Yeh 1998) και MODFLOW.

3.1.5. Εκτελούμενοι υπολογισμοί

Ο προς εξέταση φρεάτιος υδροφορέας θεωρείται ομογενής και ισότροπος, σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Τροφοδοτείται μέσω κατείσδυσης και πλευρικής εισροής συγκεκριμένου μέτρου, ενώ η εξασφάλιση νερού για διάφορες χρήσεις γίνεται μέσω αντλήσεως.

Η μορφή της εξίσωσης (3.10) είναι όμοια με αυτή της εξίσωσης οριζόντιας ροής για ομογενή και ισότροπο περιορισμένο υδροφορέα:

$$T \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) + N - Q_w = 0 \quad (3.16)$$

όπου Φ : το πιεζομετρικό φορτίο.

Οι διαφορές μεταξύ των σχέσεων (3.10) και (3.16) είναι ότι η (3.10) αντί του πιεζομετρικού φορτίου χρησιμοποιεί το δυναμικό και αντί της μεταφορικότητας T , την υδραυλική αγωγιμότητα K . Έτσι για την επίλυσή της μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα λογισμικό επίλυσης των προβλημάτων ροής όπως είναι το HydroGeoSphere.

Το HydroGeoSphere αποτελεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο επίλυσης των προβλημάτων ροής στο υπέδαφος και την επιφάνεια και ιδανικό για την περιγραφή και υπολογισμό της μεταφοράς ρύπων ή ουσιών (αλάτι κλπ) μέσα στον υδατικό πόρο (αναλυτική περιγραφή του προγράμματος σε επόμενο κεφάλαιο). Είναι κατασκευασμένο ώστε να επιλύει προβλήματα ροής τόσο για θεώρηση απότομης διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους (sharp interface), όσο και για προβλήματα μεταβλητής πυκνότητας με διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους (variable density).

Ο κώδικας του προγράμματος αναπτύχθηκε από κοινού από το Groundwater Simulations Group και Hydrogeologic, Inc. Το μοντέλο του υπεδάφους βασίζεται στον κώδικα FRAC3DVS που περιγράφει τρισδιάστατη (3-D) υπόγεια ροή και μεταφορά ρύπων και αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο του Waterloo και το Πανεπιστήμιο του Laval στον Καναδά. Αντίστοιχα, το πρόβλημα της επιφανειακής ροής βασίζεται στο Water Flow Package του προσομοιωτή MODHMS, που είναι μια βελτιωμένη έκδοση του ευρέως γνωστού κώδικα MODFLOW της U.S. Geological Survey.

Μεταξύ άλλων υπολογίζει το υδραυλικό φορτίο σε συγκεκριμένα σημεία του υδροφορέα. Έτσι, το πρόβλημα της υφαλμύρωσης όπως έχει αναλυθεί και επιλυθεί από το Strack ανάγεται σε πρόβλημα οριζόντιας ροής ενός περιορισμένου υδροφορέα του οποίου η μεταφορικότητα τίθεται ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα του εξεταζόμενου φρεατίου υδροφορέα, όσον αφορά τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (sharp interface).

3.2. Θεώρηση Υπόγειας Ροής Μεταβλητής Πυκνότητας (Variable Density Model)

Η ροή μεταβλητής πυκνότητας και η μεταφορά ρύπων σε πορώδη μέσα έχει λάβει αυξανόμενη προσοχή από τη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς η μεταβλητή πυκνότητα υγρών παίζει σημαντικό ρόλο σε πληθώρα περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι αυτό της ρύπανσης υδατικών πόρων με πόσιμο νερό από θαλασσινό νερό με υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένο αλάτι. Το αλμυρό νερό μπορεί να προέρχεται είτε από τη θάλασσα (e.g. Custodio, Bruggeman και Cotecchia 1987), είτε ως αποτέλεσμα εκπλυμάτων υγειονομικής ταφής ή μεθόδων καλλιέργειας (e.g. Simmons et al., 2003).

Τα υπόγεια ύδατα περιέχουν διαλυμένα στοιχεία, όπως το αλάτι που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Σε σχετικά μικρές συγκεντρώσεις, τα διαλυμένα

συστατικά δεν μπορούν να επηρεάσουν την πυκνότητα του υγρού που τα περιέχει. Όταν όμως αυξάνονται οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων ουσιών, τότε οι επιπτώσεις μπορεί να είναι σημαντικές όσον αφορά την πυκνότητα του ρευστού. Όταν οι χωρικές μεταβλητότητες στην πυκνότητα του ρευστού είναι έκδηλες, όπως στους παράκτιους υδροφορείς, η προσπάθεια μελέτης της υπόγειας ροής είναι πιο σύνθετη, επειδή οι αλλαγές στην πυκνότητα μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τη ροή του νερού. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται ακριβής αναπαράσταση της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας για να προβλεφθούν οι ταχύτητες, η πορεία και οι χρόνοι της υπόγειας ροής.

Η θεωρία της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας εξετάζεται εδώ και πολλά χρόνια, ξεκινώντας από την πρώιμη εργασία των Ghyben (1888) και Herzberg (1901). Αργότερα, ο Hubbert (1940) παρουσίασε μια απλή εξίσωση σχετιζόμενη με την ανύψωση της απότομης διεπιφάνειας σε υδραυλικά ύψη γλυκού νερού μετρημένα πάνω στη διεπιφάνεια και στις πυκνότητες του αλμυρού και του γλυκού νερού. Ο Henry (1964) χρησιμοποίησε μια ημιαναλυτική λύση για να καθορίσει την θέση και τη μορφή της διεπιφάνειας υπό τη συνθήκη μιας σταθερής ροής γλυκού νερού προς το όριο της επαφής με τον ωκεανό. Αρκετές άλλες αναλυτικές και αριθμητικές λύσεις έχουν αναπτυχθεί από τότε για το αυθεντικό πρόβλημα του Henry, όπως των Pinder και Cooper (1970), Lee και Cheng (1974), Huyakorn και άλλων (1987), Voss και Souza (1987), και Croucher και O'Sullivan (1995).

Υπάρχει μια ευρεία ποικιλία προγραμμάτων σε δημόσιο και ιδιωτικό τομέα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσομοιάσουν υπόγεια ροή μεταβλητών πυκνοτήτων. Για παράδειγμα, η U.S. Geological Survey (USGS) προσφέρει τον κώδικα SUTRA πεπερασμένων στοιχείων (Voss, 1984) και τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών HST3D (Kipp, 1997) και MOC DENSE (Sanford και Konikow, 1985). Στην παρούσα εργασία, συντάσσεται κώδικας σε περιβάλλον HydroGeoSphere, του οποίου τα χαρακτηριστικά αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο. Επίσης, συντάχθηκε πρόγραμμα σε περιβάλλον MATLAB, ώστε να υπολογίζεται η θέση της σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα.

3.2.1. Μαθηματική περιγραφή

Η ανάπτυξη που παρουσιάζεται εδώ είναι βασισμένη στις συνήθεις υποθέσεις ότι ο νόμος Darcy είναι σε ισχύ. Η βασική έκφραση για συγκεκριμένη αποθηκευτικότητα σε περιορισμένο υδροφορέα είναι επίσης σε ισχύ. Επίσης, μπορεί να υιοθετηθεί η προσέγγιση του νόμου Fick για τη μεταφορά διασποράς και οι κυριαρχούν ισοθερμικές συνθήκες. Το πορώδες μέσο θεωρείται πλήρως κορεσμένο με νερό.

Ένας αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος σε ένα πορώδες μέσο φαίνεται στην εικόνα 3.6. Με βάση την αρχή της διατήρησης μάζας για υγρά και διαλύματα, ο ρυθμός συγκέντρωσης της αποθηκευμένης μάζας στον όγκο αυτό είναι ίσος με το αλγεβρικό άθροισμα των ροών μάζας κατά μήκος των πλευρών του στοιχείου και της

ανταλλαγής μάζας εξαιτίας πηγών. Η μαθηματική έκφραση για τη διατήρηση της μάζας είναι:

$$-\nabla(\rho \cdot \bar{q}) + \bar{\rho} \cdot q_s = \frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} \quad (3.17)$$

όπου: ∇ εκφράζει την κλίση $\partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$,

ρ είναι η πυκνότητα του υγρού [ML^{-3}],

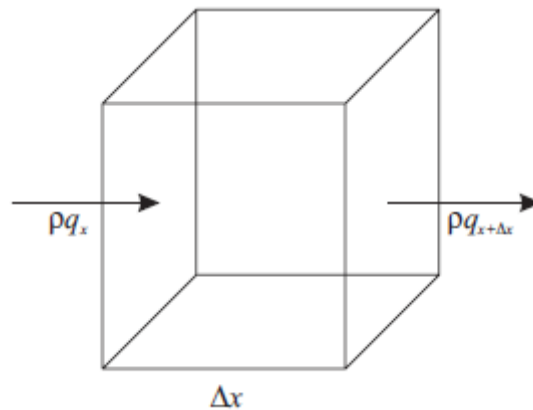
\bar{q} είναι το διάνυσμα εκφόρτισης [LT^{-1}],

$\bar{\rho}$ είναι η πυκνότητα του νερού από εισροή ή εκροή [ML^{-3}],

q_s είναι ο ογκομετρικός ρυθμός ροής ανά μονάδα όγκου ενός υδροφορέα που αντιπροσωπεύει πηγές και καταβόθρες [LT^{-1}],

θ είναι το πορώδες [αδιάστατο],

t είναι ο χρόνος [T].



Εικόνα 3.6. Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος σε πορώδες μέσο.

Πηγή: User's Guide to SEAWAT, 2003.

Το αριστερό μέλος της εξίσωσης είναι η καθαρή ροή μάζας μέσω των πλευρών του στοιχειώδους όγκου συν το ρυθμό με τον οποίο μπαίνει το νερό από πηγές ή απομακρύνεται από καταβόθρες που βρίσκονται στον όγκο. Το δεξί μέλος είναι ο ρυθμός αλλαγής στη μάζα που είναι αποθηκευμένη σε κάποιο χρονικό διάστημα και μπορεί να επεκταθεί ως:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = \rho \frac{\partial\theta}{\partial t} + \theta \frac{\partial\rho}{\partial t} \quad (3.18)$$

Οι αλλαγές του πορώδους περιορίζονται σε αυτές που σχετίζονται με την μεταβολή της πίεσης, επομένως η μεταβολή του πορώδους σε σχέση με το χρόνο είναι:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial\theta}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3.19)$$

Υπό ισοθερμικές συνθήκες, η πυκνότητα του υγρού σχετίζεται με την πίεση του υγρού πορώδους και της συγκέντρωσης του διαλύματος, επομένως η εξίσωση γίνεται:

$$\rho = f(P, C) \quad (3.20)$$

όπου: P είναι η πίεση του υγρού [$ML^{-1}T^{-2}$]

C είναι η συγκέντρωση του διαλύματος [ML^{-3}]

Αλλάζοντας την εξίσωση όσον αφορά το χρόνο:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.21)$$

Ενώ τελικά δίνει:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial \theta}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.22)$$

Οι δύο πρώτοι όροι στο δεξί μέλος της εξίσωση 3.22 αντιπροσωπεύουν το ρυθμό συσσώρευσης μάζας εξαιτίας των επιπτώσεων αποθηκευτικότητας των υπόγειων ροών (για παράδειγμα, εξαιτίας της συμπιεστότητας του υλικού του πορώδους ή της συμπιεστότητας του υγρού). Ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει το ρυθμό συσσώρευσης της μάζας εξαιτίας της μεταβολής της συγκέντρωσης του διαλύματος.

Η σχέση μεταξύ πορώδους, πίεσης και συμπιεστότητας του υλικού του πορώδους δίνεται από τον Bear (1979):

$$\xi = \frac{1}{(1-\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial P} [M^{-1}LT^2] \quad (3.23)$$

Ο συντελεστής συμπιεστότητας καθορίζεται επίσης από τον Bear (1979) ως:

$$\zeta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} [M^{-1}LT^2] \quad (3.24)$$

Επομένως, η εξίσωση γράφεται ως:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = \rho(\xi[1-\theta] + \zeta\theta) \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.25)$$

Ο όρος, $\rho(\xi[1-\theta] + \zeta\theta)$, αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που απελευθερώνεται από τον στοιχειώδη όγκο ενός περιορισμένου ελαστικού υδροφορέα ανά μονάδα μεταβολής της πίεσης:

$$S_p = (\xi[1-\theta] + \zeta\theta) [M^{-1}LT^2] \quad (3.26)$$

Και η τελική εξίσωση ροής, που είναι η γενική διαφορική εξίσωση για υπόγεια ροή μεταβλητής πυκνότητας, σχηματίζεται ως εξής:

$$-\nabla(\rho \cdot \bar{q}) + \bar{\rho} \cdot q_s = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.27)$$

Αν η πυκνότητα είναι σταθερή, ο όρος $\partial \rho / \partial C$ στην εξίσωση είναι μηδενικός. Επομένως, η εξίσωση θα διατηρούσε τη μάζα και τον όγκο του υγρού για ένα σύστημα σταθερής πυκνότητας, αλλά θα διατηρούσε μόνο τον όγκο για ένα σύστημα μεταβλητών πυκνοτήτων. Όπως αναδεικνύει όμως ο Bear (1979), η χρήση εξίσωσης που βασίζεται στην ισορροπία του όγκου είναι ακατάλληλη, ενώ συμπεραίνεται ότι οι ροές μάζας παρά οι ροές όγκων πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν την ροή των υπόγειων νερών εάν η διαφοροποίηση στις πυκνότητες είναι σημαντική.

3.2.2 Νόμος Darcy για την υπόγεια ροή μεταβλητής πυκνότητας

Η γενική μορφή του νόμου Darcy εκφράζεται από τις εξισώσεις:

$$q_x = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3.28)$$

$$q_y = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3.29)$$

$$q_z = -\frac{k_z}{\mu} \left[\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \right] \quad (3.30)$$

Όπου: q_x, q_y, q_z είναι τα επιμέρους στοιχεία της ειδικής παροχής

μ είναι το δυναμικό ιξώδες [$ML^{-1}T^{-1}$],

k_x, k_y, k_z αντιπροσωπεύουν διαπερατότητα στις τρεις κατευθύνσεις [L^2]

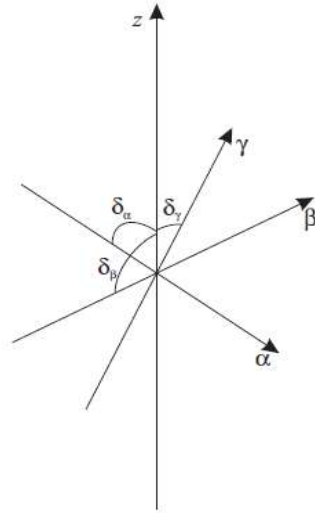
g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας [LT^{-2}].

Σε αυτή τη μορφή, θεωρείται ότι οι τρεις κύριες κατευθύνσεις συμπίπτουν με τους ορθογωνικούς άξονες x, y, z . Ο άξονας των z συντεταγμένων, που αντιπροσωπεύει τον κάθετο άξονα, είναι θετικός προς τα πάνω. Όταν αυτό δεν συμβαίνει, δηλαδή όταν οι άξονες δεν συμπίπτουν με τις κατευθύνσεις, οι εξισώσεις της γενικής μορφής του νόμου Darcy για ροή υπόγειων υδάτων μεταβλητής πυκνότητας είναι:

$$q_\alpha = -\frac{k_\alpha}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial \alpha} + \rho g \cos \delta_\alpha \right) \quad (3.31)$$

$$q_\beta = -\frac{k_\beta}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial \beta} + \rho g \cos \delta_\beta \right) \quad (3.32)$$

$$q_\gamma = -\frac{k_\gamma}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial \gamma} + \rho g \cos \delta_\gamma \right) \quad (3.33)$$



Εικόνα 3.7. Σχέση μεταξύ κατευθύνσεων q και του ορθογωνικού άξονα X, Y, Z .
Πηγή: User's Guide to SEAWAT, 2003.

Η υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση α ορίζεται ως:

$$K_{fa} = \frac{k_a \rho_f g}{\mu_f} \quad (3.34)$$

Επομένως, οι εξισώσεις μετασχηματίζονται σε:

$$q_\alpha = -K_{fa} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right] \quad (3.35)$$

$$q_\beta = -K_{f\beta} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \beta} \right] \quad (3.36)$$

$$q_\gamma = -K_{f\gamma} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right] \quad (3.37)$$

Επιπρόσθετα, σε οριζόντια στρωματοποιημένο υδροφορέα, οι εξισώσεις περιορίζονται σε:

$$q_x = -K_{fx} \frac{\mu_f}{\mu} \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} \right) \quad (3.38)$$

$$q_y = -K_{fy} \frac{\mu_f}{\mu} \left(\frac{\partial h_f}{\partial y} \right) \quad (3.39)$$

$$q_z = -K_{fz} \frac{\mu_f}{\mu} \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho} \right) \quad (3.40)$$

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, ο όρος μ_f/μ στις παραπάνω εξισώσεις μπορεί να θεωρηθεί ίσος με ένα, ενώ μπορεί να θεωρηθεί ότι το ιξώδες του σχηματισμού είναι πρακτικά ίδιο με το αντίστοιχο του γλυκού νερού, αν και οι μεταβολές στην πυκνότητα είναι εμφανείς. Μεταβολές στο ιξώδες οφείλονται κυρίως στις μεταβολές στις θερμοκρασίες του νερού.

Αφού αναπτύχθηκαν οι ορισμοί του υδραυλικού φορτίου και η εφαρμογή του νόμου Darcy σε όρους υδραυλικού φορτίου σε γλυκό νερό, η κύρια εξίσωση για υπόγεια ροή μπορεί να γραφτεί σε όρους ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου γλυκού νερού:

$$-\frac{\partial}{\partial \alpha}(\rho \bar{q}_\alpha) - \frac{\partial}{\partial \beta}(\rho \bar{q}_\beta) - \frac{\partial}{\partial \gamma}(\rho \bar{q}_\gamma) = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} \cdot q_s \quad (3.41)$$

Αντικαθιστώντας με τους όρους που υπολογίστηκαν σε προηγούμενες εξισώσεις τελικά είναι:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{fa} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \beta} \right] \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right] \right) = \rho S_p g \rho_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} \cdot q_s \end{aligned} \quad (3.42)$$

Εδώ γίνεται η υπόθεση ότι ο όρος S_p εμπεριέχει την συμπιεστότητα του νερού, που εξαρτάται από την πυκνότητα ρ του νερού. Επίσης θεωρείται ότι η διαφορά συμπιεστότητας θαλασσινού και γλυκού νερού αμελείται αφού:

$$\zeta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} \cong \zeta_f = \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (3.43)$$

Η συγκεκριμένη αποθηκευτικότητα, σε όρους υδραυλικού φορτίου S_f , ή αλλιώς ο όγκος νερού που απελευθερώνεται σε μια μονάδα όγκου ενός υδροφορέα ανά μονάδα μείωσης του υδραυλικού φορτίου δίνεται από τον Bear (1979) ως:

$$S_f = g \rho_f \left[\zeta (1 - \theta) + \zeta_f \theta \right] \quad (3.44)$$

Επομένως, η τελική εξίσωση ροής όσον αφορά την ροή μεταβλητής πυκνότητας υπόγειων υδάτων γίνεται:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{fa} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \beta} \right] \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right] \right) = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} \cdot q_s \end{aligned} \quad (3.45)$$

3.2.3. Κύρια εξίσωση μεταφοράς διαλυμάτων

Εκτός από την εξίσωση ροής που αναπτύχθηκε παραπάνω, μια δεύτερη διαφορική εξίσωση με μερικές παραγώγους απαιτείται για να περιγραφεί η μεταφορά διαλυμάτων στον υδροφόρο. Η ροή των υπόγειων υδάτων προκαλεί την ανακατανομή της συγκέντρωσης διαλυμάτων και αυτή με τη σειρά της επηρεάζει το πεδίο πυκνοτήτων, επομένως επηρεάζει την κίνηση των υδάτων. Άρα, η κίνηση των υπόγειων υδάτων και η μεταφορά των διαλυμάτων στον υδροφόρο είναι συνδεδεμένες έννοιες και οι δύο εξισώσεις πρέπει να λύνονται συνδυαστικά. Η μάζα του διαλύματος μεταφέρεται σε πορώδη μέσα με τη ροή των υδάτων (οριζόντια μεταφορά), μοριακή διάχυση και μηχανική διασπορά. Περιγράφεται με την εξής εξίσωση (Zheng και Bennett, 1995):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (\bar{v} \cdot C) - \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (3.46)$$

όπου: D είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς [L^2T^{-1}]

\bar{v} είναι η ταχύτητα του υγρού [LT^{-1}]

C_s είναι η συγκέντρωση διαλύματος νερού που εισέρχεται από πηγές ή καταβόθρες [ML^{-3}]

R_k ($k=1, \dots, N$) είναι ο ρυθμός παραγωγής ή φθοράς διαλύματος σε αντίδραση k από N διαφορετικές αντιδράσεις [$ML^{-3}T^{-1}$].

Μια εμπειρική σχέση μεταξύ της πυκνότητας του αλμυρού νερού και της συγκέντρωσης αναπτύχθηκε από τους Baxter και Wallace (1916):

$$\rho = \rho_f + EC \quad (3.47)$$

Όπου: E είναι μια αδιάστατη σταθερά με τιμή 0.7143 για συγκεντρώσεις αλάτων και ισούται με:

$$\frac{\partial \rho}{\partial C} = E \quad (3.48)$$

C είναι η συγκέντρωση άλατος [ML^{-3}]

Επομένως, η τελική εξίσωση γίνεται:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{fa} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \beta} \right] \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{(\rho - \rho_f)}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right] \right) = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} \cdot q_s \end{aligned} \quad (3.49)$$

3.2.4. Αρχικές και οριακές συνθήκες

Οι οριακές και αρχικές συνθήκες πρέπει να ορίζονται συγκεκριμένα για να επιλυθούν οι διαφορικές εξισώσεις για τη ροή και την μεταφορά σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Τα μαθηματικά όρια συνήθως χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: Dirichlet (σταθερό φορτίο ή συγκέντρωση), Neumann (συγκεκριμένη ροή) και Cauchy (ροή εξαρτημένη από φορτίο).

Όριο Dirichlet

Στο όριο Dirichlet (ή αλλιώς Τύπος I) η τιμή του φορτίου ή της συγκέντρωσης είναι καθορισμένο σε όλα τα σημεία κατά μήκος του ορίου. Οι τιμές μπορεί να ποικίλλουν από σημείο σε σημείο ή ανάλογα με το χρόνο αλλά αντιμετωπίζονται ως γνωστές ποσότητες στην εξίσωση ροής. Σε όρους προσομοίωσης ροής, ένα καθορισμένο φορτίο ή συγκέντρωση δηλώνει ότι ροή από και προς το όριο συμβαίνει κατά αναλογία προς τη διαφορά μεταξύ καθορισμένου φορτίου ή συγκέντρωσης στο όριο και του υπολογισμένου φορτίου ή συγκέντρωσης σε σημεία ακριβώς παρακείμενα στο όριο.

Όριο Neumann

Το όριο αυτό (ή τύπος II) αντιπροσωπεύει τη συνθήκη υπό την οποία η κλίση της εξαρτημένης μεταβλητής ορίζεται κανονικά στο όριο. Για ροή υπόγειων υδάτων, αυτή η οριακή συνθήκη καταλήγει σε συγκεκριμένη τιμή παροχής νερού μέσα ή έξω από τη μοντελοποιημένη περιοχή. Αν και η οριακή συνθήκη για μεταφορά διαλυμάτων περιλαμβάνει καθορισμένη παροχή διασποράς, η παροχή μεταφοράς διαλύματος εξαρτάται από την ταχύτητα ροής και την υπολογισμένη συγκέντρωση στο όριο. Επομένως, η συνολική παροχή διαλύματος σε όριο Neumann δεν μπορεί να καθοριστεί πριν την προσομοίωση ροής υπόγειων υδάτων.

Όριο Cauchy

Η συνθήκη ροής εξαρτημένης από το υδραυλικό φορτίο αντιπροσωπεύει ένα όριο Cauchy (ή τύπος III) για την προσομοίωση ροής. Το όριο Cauchy για μεταφορά διαλυμάτων δεν είναι ανάλογο, διότι οι οριακές συνθήκες μπορεί να περιέχουν στοιχεία μεταφοράς και διασποράς, ενώ οι οριακές συνθήκες ροής έχουν στοιχεία ροής και μόνο. Υδραυλικό φορτίο ελέγχου καθορίζεται αλλά σε συγκεκριμένη

υδραυλική διαφορά από το όριο. Το φορτίο στο όριο υπολογίζεται με τη διαδικασία της προσομοίωσης, αλλά συνδέεται με το φορτίο ελέγχου μέσω ενός όρου αγωγιμότητας. Το όριο Cauchy όσον αφορά μεταφορά διαλυμάτων αντιπροσωπεύει ένα όριο όπου η συγκέντρωση και η κλίση της καθορίζονται (Zheng και Bennett, 1995), επομένως η παροχή διασποράς στο όριο καθορίζεται και η παροχή μεταφοράς ποικίλει μόνο στο σημείο που η παροχή στο όριο κατά την προσομοίωση της μεταφοράς ποικίλλει.

Αρχικές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες αντιπροσωπεύουν αρχικές τιμές για την εξαρτημένη μεταβλητή, όπως το υδραυλικό φορτίο γλυκού νερού για ροή υπόγειων υδάτων και συγκέντρωση μεταφοράς διαλυμάτων σε κάποια αρχική χρονική στιγμή έναρξης. Αρχικές συνθήκες για ροή και μεταφορά πρέπει να καθορίζονται για παροδικές προσομοιώσεις.

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό προσομοιώνεται με τη βοήθεια του κατάλληλου λογισμικού η λειτουργία του υπόγειου υδροφορέα. Εξετάζεται το πρόβλημα της υφαλμύρωσης και η πορεία εξέλιξής του για διάφορους συνδυασμούς υδραυλικών παραμέτρων. Εξετάζονται και οι δύο θεωρήσεις προσομοίωσης της διεπιφάνειας αλμυρού και γλυκού νερού και γίνονται συγκρίσεις για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

4.1. Περιγραφή Λογισμικού HydroGeoSphere

Η αποτελεσματική διαχείριση υδατικών πόρων απαιτεί μια εξειδικευμένη γνώση των υδρολογικών διαδικασιών, καθώς και των επιπτώσεις των ρύπων (όπως το αλάτι) στην ποιότητα του νερού. Μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται ευρέως για να προβλεφθεί η κίνηση του νερού, ενώ λαμβάνονται υπόψη οι περιβαλλοντικές και υδρολογικοί παράμετροι. Όμως, τα περισσότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται βασίζονται συχνά σε απλουστεύσεις πάνω σε σύνθετες υδρολογικές διαδικασίες. Αυτά τα μοντέλα ενσωματώνουν περιορισμούς που αφορούν τη χωρική μεταβλητότητα, διάσταση και αλληλεπίδραση διάφορων στοιχείων ροής και διαδικασιών μεταφοράς.

Για να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα που προέκυψαν σε άλλα μοντέλα, αναπτύχθηκε κώδικας για επιφανειακή και υπόγεια ροή από κοινού από το Groundwater Simulations Group και την Hydrogeologic, Inc. Το μοντέλο του υπεδάφους βασίζεται στον κώδικα τρισδιάστατης υπόγειας ροής και μεταφοράς FRAC3DVS των Πανεπιστημίων του Waterloo και Laval. Το μοντέλο υπόγειας ροής βασίζεται στο Surface Water Flow Package του προσομοιωτή MODHMS, που είναι μια αναβάθμιση του ευρέως γνωστού κώδικα MODFLOW της U.S. Geological Survey. Ο κώδικας HydroGeoSphere παρέχει μια ακριβής δυνατότητα προσομοίωσης που συνδυάζει την πλήρως ενσωματωμένη ροή (υδραυλικοί παράμετροι, ποιότητα νερού, υπόγεια ροή) και τις μεταφορικές ιδιότητες με εύχρηστα εργαλεία για την επιτυχή προσομοίωση της υπόγειας ροής. Σύμφωνα με τις ιδιότητες του προγράμματος, το καθιστά ιδανικό εργαλείο για την προσομοίωση υπόγειας ροής και των διαλυμάτων μέσα στο νερό με μια ρεαλιστική προσέγγιση. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε FORTRAN 95 και συντάχθηκε στον Compaq Visual Fortran compiler.

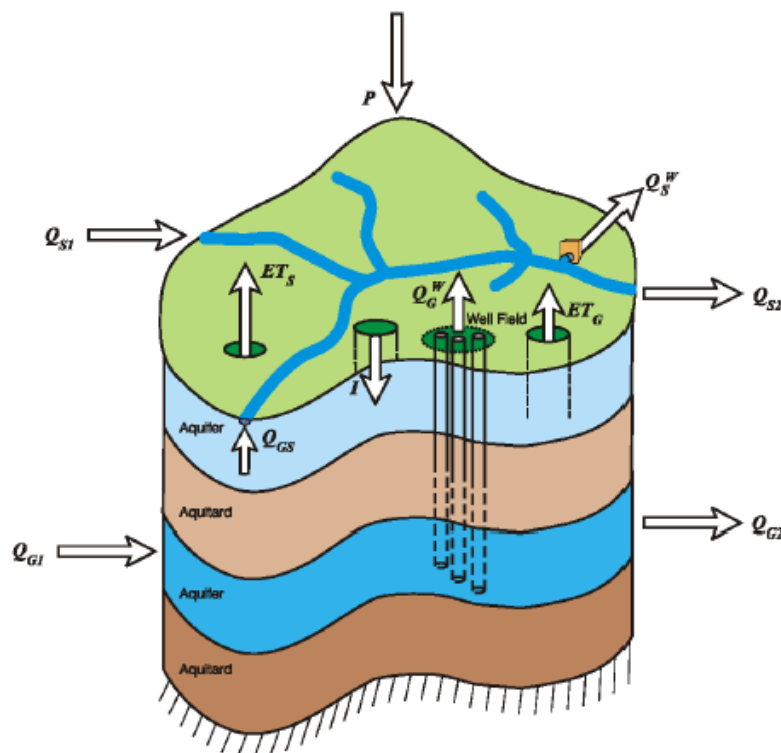
Για την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων ροής εφαρμόζεται η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Πιο αναλυτικά, αρχικά ο μελετητής εισάγει τα δεδομένα (σχήμα, έκταση και είδος υδροφορέα, υδραυλική αγωγιμότητα, μεταφορικότητα, οριακές και αρχικές συνθήκες, αντλήσεις, τροφοδοσία κλπ) στο πρόγραμμα, όπου καταχωρούνται στα αντίστοιχα binary αρχεία, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια από το πρόγραμμα που συντάσσεται σε MATLAB

και ευρίσκεται η θέση της αλμυρής σφίνας. Ο υδροφορέας αναπαριστάται από ένα κάνναβο κατάλληλων διαστάσεων. Σε κάθε κελί του καννάβου αντιστοιχεί συγκεκριμένη τιμή των δεδομένων και των αποτελεσμάτων. Η επίλυση γίνεται με τις μαθηματικές εξισώσεις του HGS, όπως παρουσιάστηκαν ξεχωριστά για κάθε θεώρηση παραπάνω, παράγοντας τα αρχεία με τα αποτελέσματα.

Το HydroGeoSphere βασίζεται σε μια αυστηρή σύλληψη του υδρολογικού συστήματος που περιλαμβάνει επιφανειακά και υπόγεια καθεστώτα ροής με τις αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Το μοντέλο είναι σχεδιασμένο να λαμβάνονται υπόψη όλα τα βασικά συστατικά του υδρολογικού κύκλου (Εικόνα 4.1). Για κάθε χρονικό βήμα, το μοντέλο λύνει ταυτόχρονα τις εξισώσεις υπόγειας ροής και της μεταφοράς μάζας διαλυμένων ουσιών παρέχοντας την πλήρη ισορροπία του νερού. Η ισορροπία ύδατος υπόγειας ροής υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$I = (Q_{G2} - Q_{G1}) + Q_{GS} + ET_G + Q_G^W + \frac{\Delta S_G}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Στην εξίσωση αυτή I είναι το δίχτυ διείσδυσης, Q_{G1} και Q_{G2} είναι η υπόγεια ροή προς το εσωτερικό και το εξωτερικό αντίστοιχα, Q_{GS} είναι η διαδραστική υπόγεια ροή, ET_G είναι η εξατμισοδιαπνοή από το σύστημα υπόγειας ροής, Q_G^W είναι η απομάκρυνση του νερού ξηράς και ΔS_G είναι η αποθήκευση υπόγειου νερού σε βήμα χρόνου Δt .



Εικόνα 4.1. Τυπικός Υδρολογικός Κύκλος.

Πηγή: Viessman και Lewis, 1996

4.2. Ιδιότητες του Λογισμικού HydroGeoSphere

Το λογισμικό HydroGeoSphere περιγράφηκε συνοπτικά στην προηγούμενη παράγραφο. Εδώ, αποτυπώνονται οι κυριότερες ιδιότητες του λογισμικού, καθώς και οι ευρέως διαδεδομένες χρήσεις και εφαρμογές του σε προβλήματα μηχανικής της σημερινής εποχής. Σε όρους ικανότητας προσομοίωσης και υπολογιστικών δυνατοτήτων, ο κώδικας έχει τις εξής ιδιότητες:

- Πλήρης μοντελοποίηση του υδρολογικού κύκλου χρησιμοποιώντας λεπτομερής φυσική της επιφανειακής και υπόγειας ροής σε ένα ολοκληρωμένο κώδικα με 2-D ή 3-D απεικόνιση, ενώ τα δύο καθεστάτα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.
- Η ακριβής οριοθέτηση και εντοπισμός της θέσης του υδροφόρου ορίζοντα, λαμβάνοντας υπόψη τη ροή στην ακόρεστη ζώνη, τις καθυστερήσεις στην απόδοση και τα κάθετα στοιχεία ροής.
- Αυτόματη και σωστή κατανομή του συνολικού ρυθμού ροής ενός πηγαδιού πολλαπλών στρώσεων στους κόμβους πηγαδιού, συμπεριλαμβανομένης της προσομοίωσης της ροής και των διαλυμένων ουσιών σε μια στήλη νερού στο πηγάδι.
- Δυνατότητα μοντελοποίησης μεταφοράς χημικών ουσιών στα πεδία υπόγειας ροής.
- Ακριβής χειρισμός ανταλλαγών υγρού και μάζας μεταξύ των στοιχείων και του πίνακα.
- Παρακολούθηση ισοζυγίου μάζας νερού και διαλυμένων ουσιών.
- Ευέλικτες δυνατότητες προ και μετά επεξεργασίας.

Για εφαρμογές πεδίου και έρευνες, το HydroGeoSphere μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσει συνεχείς προσομοιώσεις σε προβλήματα ευρείας κλίμακας, όπως:

- Ολοκληρωμένη εκτίμηση των υδατικών πόρων.
- Πλήρης υδρολογική ανάλυση, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων της χρήσης γης ή της αλλαγής του κλίματος τόσο σε καθεστάτα επιφανειακών όσο και υπόγειων νερών.
- Ποτάμια υδραυλική ανάλυση.

- Μεταφορά ρύπων σε επιφανειακά και υπόγεια ύδατα.
- Μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρωσης παράκτιων υπόγειων υδροφορέων.

4.3. Λειτουργία Λογισμικού HydroGeosphere

Οι υπολογιστικές μονάδες του HydroGeoSphere είναι βασισμένες στον ευρέως δημοφιλή κώδικα FRAC3DVS. Έτσι, ο συνδεδετικός προσομοιωτής επιφανειακών και υπόγειων ροών έχει διαθέσιμα τα εργαλεία GUI για την παραγωγή καννάβου και εισροών μοντέλου υπόγειας ροής, καθώς και τη δυνατότητα 3-D απεικόνισης (animation) σε περιβάλλον TECPLOT, όπως παρουσιάζεται παρακάτω στην εργασία. Για το χειρισμό χωρικής ανάλυσης των δεδομένων και την απεικόνιση των επιφανειακών υδάτων, εργαλεία του GIS, όπως το ARCVIEW και το ARCFINFORM, μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Οι δομές του βασικού κώδικα και των μεταβλητών εισόδου και εξόδου ακολουθούν τις βασικές αρχές του προαναφερθέντος κώδικα. Υπάρχουν τέσσερα βήματα που εμπλέκονται στην επίλυση ενός δεδομένου προβλήματος χρησιμοποιώντας το HydroGeoSphere:

1. Φτιάξτε τα απαραίτητα στοιχεία δεδομένων για το προ-επεξεργαστή "grok".
2. Εκτελέστε το "grok" για να δημιουργηθούν τα δεδομένα εισόδου για το HydroGeoSphere.
3. Εκτελέστε το HydroGeoSphere για την επίλυση του προβλήματος και τη δημιουργία δεδομένων εξόδου.
4. Μετά-επεξεργασία των δεδομένων εξόδου για οπτική απεικόνιση και ανάλυση των παραγομένων και παραγωγή τεχνικής έκθεσης.

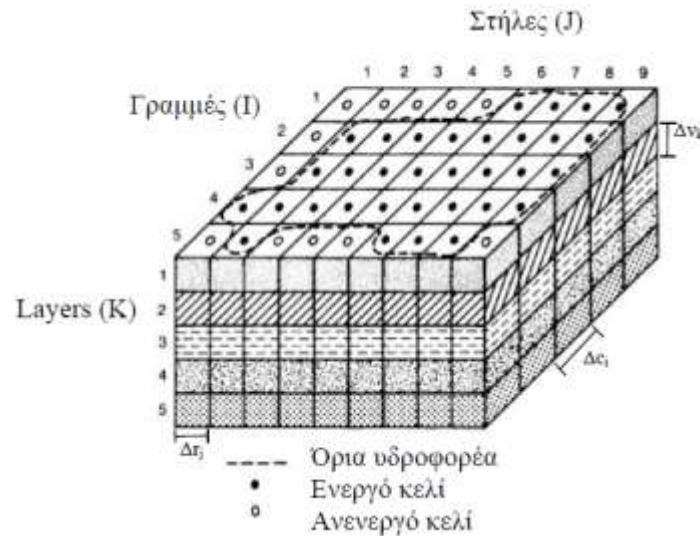
Ως ελάχιστη απαίτηση, στο Βήμα 1 περιλαμβάνεται η δημιουργία δεδομένων εισόδου που περιέχουν πληροφορίες για διακριτοποίηση του υδροφορέα του προβλήματος, καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών για κάθε στοιχείο και προσδιορισμό των οριακών συνθηκών ροής.

4.4. Διακριτοποίηση Υδροφορέα

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται η γενική διακριτοποίηση ενός υδροφορέα για την αριθμητική επίλυση πεπερασμένων διαφορών που πραγματοποιείται στο λογισμικό HydroGeoSphere. Στην εικόνα 4.2 φαίνεται ένας χωρικά διακριτοποιημένος υδροφορέας, ο οποίος αποτελείται από ένα σύνολο φατνίων (κελιών) που συνιστούν ένα τρισδιάστατο κάρναβο. Κάθε φατνίο ορίζεται

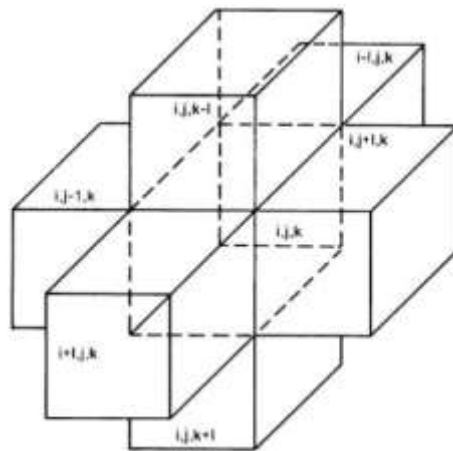
από τρεις παραμέτρους i, j, k , όπου i είναι η σειρά, j η στήλη και k το οριζόντιο επίπεδο στο οποίο ανήκει (layer).

Οι στήλες και οι γραμμές τέμνονται κάθετα μεταξύ τους, ορίζοντας ορθογώνια φαντρία σε κάθε επίπεδο (layer). Οι γραμμές θεωρούνται παράλληλες στον άξονα x και οι στήλες στον άξονα y . Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2, το πλάτος των κελιών κατά τον άξονα x , σε μια συγκεκριμένη στήλη j συμβολίζεται Δx_j . Αντίστοιχα, το πλάτος των κελιών κατά y στη σειρά i είναι Δy_i και το πλάτος κατά z στο επίπεδο k είναι Δz_k .



Εικόνα 4.2. Διακριτοποιημένος υδροφορέας.
 Πηγή: Παπαντωνίου, 2003.

Χρησιμοποιώντας τις οριακές και τις αρχικές συνθήκες η λύση της διακριτοποιημένης εξίσωσης δίνει το πιεζομετρικό φορτίο σε καθορισμένα σημεία του καννάβου που ονομάζονται κόμβοι και είναι τα κέντρα των κελιών.

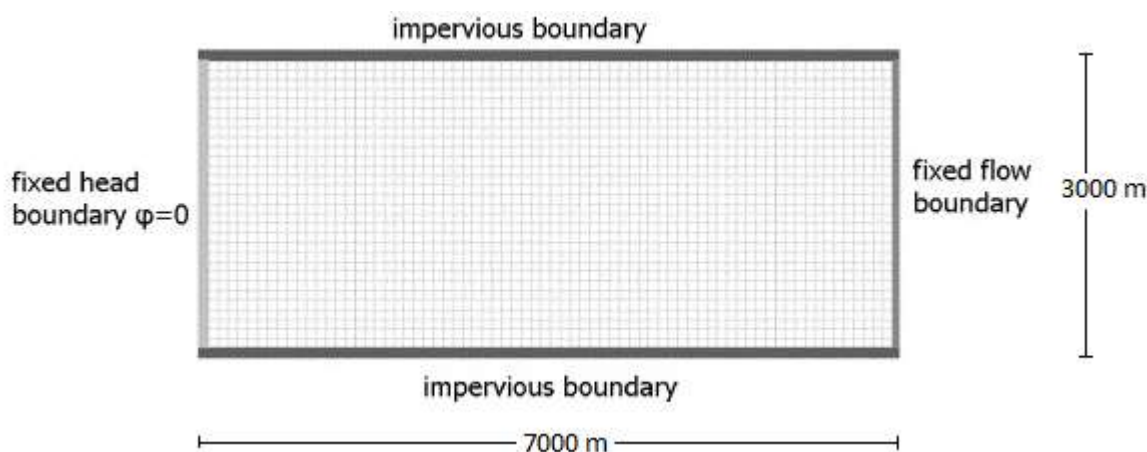


Εικόνα 4.3. Κελί (i,j,k) με τα γειτονικά του.
 Πηγή: Παπαντωνίου, 2003

Για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας επιλέγεται ένα τυχαία ορισμένο παράδειγμα παράκτιου υπόγειου υδροφορέα. Συγκεκριμένα, ο προς προσομοίωση περιορισμένος υδροφορέας θεωρείται σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου μήκους 7000 m και πλάτους 3000 m, ορίζοντας έτσι ένα απλό μοντέλο προσομοίωσης (εικόνα 4.4). Το βάθος μέχρι το αδιαπέρατο στρώμα είναι 50 m και η υδραυλική αγωγιμότητα διαφοροποιείται ανάλογα με τις δοκιμές που πραγματοποιούνται, δηλαδή δίνονται οι τιμές:

$$K = \{1, 2, 5, 10, 15, 20\} \text{ m/day} \quad (4.2)$$

Η μελέτη του συγκεκριμένου υδροφορέα αναφέρεται στην περίπτωση μόνιμης ροής με πλευρική τροφοδοσία. Η τροφοδοσία του γίνεται μέσω πλευρικής εισροής, η οποία είναι σταθερή για όλες τις δοκιμές, είτε υπάρχει πηγάδι άντλησης στην επιφάνεια του υδροφορέα είτε όχι, και ισούται με $1.250 \text{ m}^3/\text{day}$ (όριο δεδομένης εισροής ή συνθήκες Neumann, όπως περιγράφεται σε προηγούμενη ενότητα). Κατάντη ο υδροφορέας συνορεύει με τη θάλασσα (όριο σταθερού φορτίου ή συνθήκες Dirichlet, όπως περιγράφεται σε προηγούμενη ενότητα). Στις άλλες δύο πλευρές ο υδροφορέας περιορίζεται από αδιαπέρατο όριο (όριο δεδομένης εισροής – μηδενικής). Σε αυτό το κεφάλαιο δεν υπάρχουν γεωτρήσεις άντλησης, ώστε αρχικά να γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο θεωρήσεων σε φυσικό πρόβλημα χωρίς άντληση.



Εικόνα 4.4. Εξεταζόμενος υδροφορέας.

Πηγή: Παπαντωνίου, 2003

Ο υδροφόρος σχηματισμός προσομοιώνεται από ένα κάνναβο, σε κάθε κελί του οποίου υπολογίζεται η τιμή του δυναμικού, έπειτα από την πραγματοποίηση μίας επαναληπτικής διαδικασίας. Η εκτέλεση του HydroGeoSphere προϋποθέτει τη γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα, των οριακών και αρχικών συνθηκών καθώς και των υδραυλικών του παραμέτρων. Το "Grok" είναι ένα λογισμικό προεπεξεργασίας και προετοιμασίας των δεδομένων εισόδου στο HydroGeoSphere. Παρέχει ένα "φιλικό" περιβάλλον εργασίας όπου εισάγονται οι απαραίτητες πληροφορίες δημιουργώντας παράλληλα τα αντίστοιχα αρχεία.

Ο εξεταζόμενος παράκτιος υδροφορέας αναπαριστάται από ένα απλό μοντέλο προσομοίωσης σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με ίδια τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας και τροφοδοσίας σε όλη του την έκταση. Βόρεια και νότια οριοθετείται από αδιαπέρατους σχηματισμούς, δυτικά συνορεύει με τη θάλασσα ενώ ανατολικά θεωρείται ότι τροφοδοτείται με σταθερή εισροή.

4.5. Διερεύνηση Προβλήματος με Θεώρηση Απότομης Διεπιφάνειας

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται ο υδροφορέας, όπως ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, όσον αφορά τη θέση της αλμυρής "σφήνας" που σχηματίζει το θαλασσινό νερό στο εσωτερικό του υδροφορέα για διάφορες χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας K . Με τη βοήθεια του λογισμικού HydroGeoSphere επιλύεται αρχικά η θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) για ανάλυση κατά Mantoglou (2003), της οποίας οι βασικές ιδιότητες εξετάστηκαν παραπάνω.

4.5.1. Περιγραφή εκτέλεσης λογισμικού HydroGeoSphere

Αρχικά δίνονται τα δεδομένα στο πρόγραμμα "Grok", τα οποία συσχετίζονται με τις υδραυλικές παραμέτρους του υδροφορέα. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τη θεώρηση sharp interface κατά Mantoglou (2003) συντάσσεται κώδικας, όπου αναφέρονται τα κύρια χαρακτηριστικά του υδροφορέα που εξετάζεται, με τα εξής:

Βήμα 1. Σύνταξη κώδικα σε αρχείο με κατάληξη .mprops

Δίνονται αρχικές τιμές για τις ιδιότητες του υδροφορέα. Επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος μέσου και οι ζώνες προς τροποποίηση. Συγκεκριμένα, δηλώνεται ότι ο υδροφορέας είναι ισότροπος, δηλαδή σε κάθε σημείο του η διαπερατότητα είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$). Η τιμή του K εκφράζει την ευκολία με την οποία ένα ρευστό ρέει μέσα στους πόρους του πορώδους μέσου και εξαρτάται από τη φύση και τις ιδιότητές του. Δίνοντας τον ορισμό αυτό, αυτόματα θεωρείται ότι η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K είναι η ίδια πρακτικά σε όλη την έκταση του πορώδους μέσου.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δίνονται συγκεκριμένες χαρακτηριστικές τιμές στην αγωγιμότητα του υδροφορέα, δηλαδή $K = \{1, 2, 5, 10, 15, 20\}$ m/day, ώστε να εξεταστεί κατά πόσον η θέση της σφήνας επηρεάζεται σημαντικά και με ποιο τρόπο από την τιμή της αγωγιμότητας.

Επίσης, δηλώνεται η τιμή του πορώδους του υδροφορέα που εξετάζεται. Οι τιμές διαφέρουν ανάλογα με τις ιδιότητες του υδροφορέα και το αντίστοιχο πρόβλημα. Το πορώδες (ή ολικό πορώδες) είναι το μέτρο των διάκενων (πόρων) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διάκενων (V_K) προς το συνολικό όγκο του πετρώματος/ εδάφους ($V_{ολ}$):

$$n = \frac{V_K}{V_{oi}} \quad (4.3)$$

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, με βάση τις ιδιότητες του υδροφορέα και τις απαιτήσεις του προβλήματος, ορίζεται η τιμή 0.2, η οποία είναι αμετάβλητη κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Τέλος, ορίζεται η ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφορέα που εξετάζεται. Ως ειδική αποθηκευτικότητα ορίζεται ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα όταν μειωθεί το ύψος πίεσης κατά μία μονάδα. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, με βάση τη φύση και τις ιδιότητες του πορώδους μέσου, ορίζεται η τιμή $1.e-4$, δηλαδή $1.0 * 10^{-4}$ [L⁻¹].

Βήμα 2. Σύνταξη κώδικα σε αρχείο με κατάληξη .grok

Αρχικά ορίζεται και παράγεται ο κάνναβος που θα αναπαριστά από εδώ και πέρα τον εξεταζόμενο υδροφορέα (Grid generation). Για τη sharp θεώρηση, ορίζεται υδροφορέας διαστάσεων 7 km x 3 km (με αφετηρία το 0 σε κάθε άξονα), ενώ η διακριτοποίηση γίνεται ανά 20 m, ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Σε όλες τις δοκιμές η σειρά εντολών παραμένει αμετάβλητη, αν και η διακριτοποίηση σε αυτή τη θεώρηση δεν έχει σημασία στο τελικό εξαγόμενο αποτέλεσμα. Όσον αφορά τις προδιαγραφές του προγράμματος, οι επιθυμητές ακρίβειες επιτυγχάνονται με αναλογία $K/dx = 1/1$ έως $1/5$. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται βήμα 20 m για καλύτερα αποτελέσματα.

Έπειτα, επιλέγονται οι οριακές συνθήκες για τη ροή, όπως αναπτύχθηκε σε ειδική παράγραφο της εργασίας (όρια πρώτης και δεύτερης συνθήκης). Επιλέγεται αρχικά το σύνολο των κόμβων και δίνεται αρχικό υδραυλικό φορτίο ίσο με το 0. Σε επόμενο σημείο, επιλέγονται οι κόμβοι στην πλευρά του υδροφορέα που βρίσκεται σε επαφή με τη θάλασσα. Σε εκείνη την πλευρά δηλώνεται συγκεκριμένο υδραυλικό φορτίο που αφορά τις οριακές συνθήκες ροής (Flow-Boundary conditions) για τους κόμβους αυτούς, ίσο με 0.

Επιλέγεται η αντίθετη πλευρά που τροφοδοτείται με πλευρική παροχή και ορίζεται η πλευρική τροφοδοσία στα $1.250 \text{ m}^3/\text{day}$, συνυπολογίζοντας το πλάτος του (3.000 m) και το βάθος (50 m) του υδροφορέα. Τέλος, δίνεται το σενάριο χρόνων που σε αυτή την περίπτωση είναι 1 μέρα για μόνιμη ροή. Στην άλλη θεώρηση οι επαναλήψεις είναι πολύ περισσότερες, λόγω της δυσκολίας επίτευξης steady-state κατάστασης.

Βήμα 3. Εκτέλεση λογισμικού Grok.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το λογισμικό Grok, όπως και το HydroGeoSphere, εκτελείται και αναπτύσσεται σε MS-DOS, το λειτουργικό σύστημα με περιβάλλον γραμμής εντολών που έχει αναπτυχθεί από την Microsoft. Δίνοντας τη θέση του αρχείου με κατάληξη .grok εκτελείται το πρόγραμμα, παράγοντας κυρίως

αρχεία .eco, δηλαδή binary files. Με την εκτέλεση του .grok, δηλαδή του προεπεξεργαστή, διαβάζονται τα στοιχεία και οι ιδιότητες του υδροφορέα, ώστε να είναι δυνατή η εκτέλεση προσομοίωσης της ροής του νερού με το πρόγραμμα HydroGeoSphere.

Βήμα 4. Εκτέλεση του λογισμικού HydroGeoSphere

Σε αυτό το βήμα εκτελείται το κύριο πρόγραμμα προσομοίωσης ροής σε λειτουργικό σύστημα MS-DOS. Παράγονται αρχεία που περιέχουν πληροφορία για τη θέση της σφήνας, καθώς και για όλες τις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα, όπως το υδραυλικό φορτίο.

Βήμα 5. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων με λογισμικό TECPLOT

Παρέχεται από τις ιδιότητες του λογισμικού HydroGeoSphere η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον TECPLOT. Το λογισμικό αυτό έχει πολλές δυνατότητες απεικόνισης σε 2-D ή 3-D περιβάλλον, ενώ παρουσιάζεται πληθώρα στοιχείων.

Βήμα 6. Εύρεση σφήνας με τη χρήση MATLAB

Επειδή απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια από την εύρεση της σφήνας με τη βοήθεια της γραφικής απεικόνισης, συντάχθηκε κώδικας σε περιβάλλον MATLAB, ώστε να παρουσιάζεται το δυναμικό σε όλους τους κόμβους του υδροφορέα, σύμφωνα με τον κάρναβο που τον προσομοιάζει από τον ορισμό του στο "Grok".

Επειδή ο εξεταζόμενος ρύπος είναι το αλάτι, σύμφωνα με το πάχος και το λόγο πυκνότητας για περιορισμένους υδροφορείς, το δυναμικό που αντιστοιχεί στην αντίστοιχη ζώνη υφαλμύρωσης του υδροφορέα, δηλαδή εκείνη η τιμή δυναμικού για την οποία ο υδροφορέας θεωρείται ότι έχει υφαλμυρωθεί, είναι $\Phi_{ioe} = 31.25m^2$. Επομένως, στον κώδικα που συντάσσεται, δίνεται εντολή να "σαρώνει" το πρόγραμμα τον κάρναβο δυναμικού για την τιμή αυτή και να βρίσκει τη ζώνη σημείων που αντιστοιχούν σε τιμή δυναμικού $\Phi_{ioe} = 31.25m^2$. Γίνεται έλεγχος σε κάθε δοκιμή, ώστε να διαπιστωθεί αν το αποτέλεσμα που δίνει ο κώδικας είναι όμοιο με την γραφική αναπαράσταση του υδροφορέα.

4.5.2. Διαδικασία υπολογισμών και αποτελέσματα

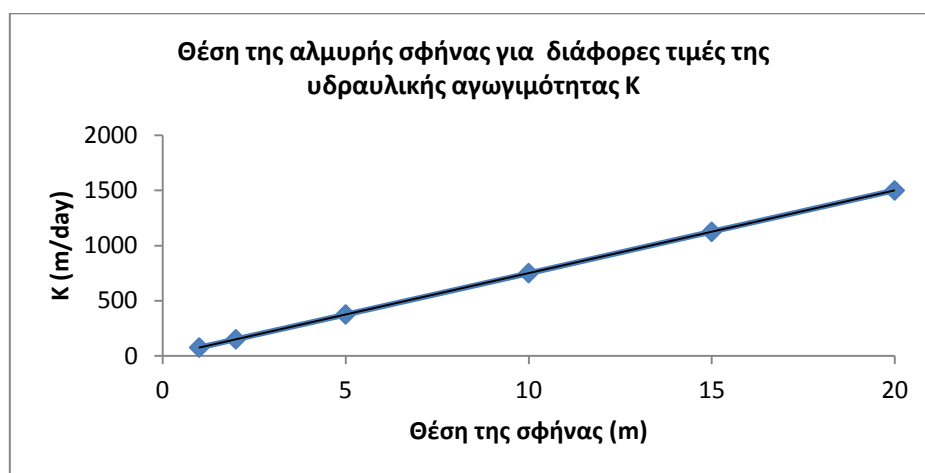
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τη θέση της σφήνας μεταξύ δύο διαφορετικών θεωρήσεων για την μορφή διεπιφάνειας μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού, αυτή της απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) μηδενικού πάχους και την αντίστοιχη που θεωρεί ότι υπάρχει ζώνη ανάμιξης μεταβλητής διασποράς (variable density). Σε αυτή την παράγραφο, εξετάζονται οι δοκιμές και τα αποτελέσματα της πρώτης θεώρησης.

Αρχικά, εξετάζεται η θέση της αλμυρής σφήνας μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα για την θεώρηση sharp interface κατά Mantoglou (2003), δίνοντας διαφορετικές τιμές στην υδραυλική αγωγιμότητα. Επομένως, σύμφωνα με την ανάλυση της διαδικασίας εκτέλεσης του προγράμματος που έγινε παραπάνω, το μόνο στοιχείο που μεταβάλλεται σε αυτή τη σειρά δοκιμών είναι η τιμή του K . Τελικά, προκύπτει πίνακας παρουσίασης των αποτελεσμάτων (4.1), όπου απεικονίζεται για συγκεκριμένες διαστάσεις φατνίου ($20 * 20 \text{ m}^2$) η θέση της σφήνας για κάθε τιμή του K σε ξεχωριστή δοκιμή.

K (m/day)	Θέση Σφήνας από την ακτή (m)
1	75
2	150
5	375
10	750
15	1125
20	1500

Πίνακας 4.1. Απόσταση της ζώνης δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$ από την ακτή για κάθε δοκιμή, δηλαδή για διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας K .

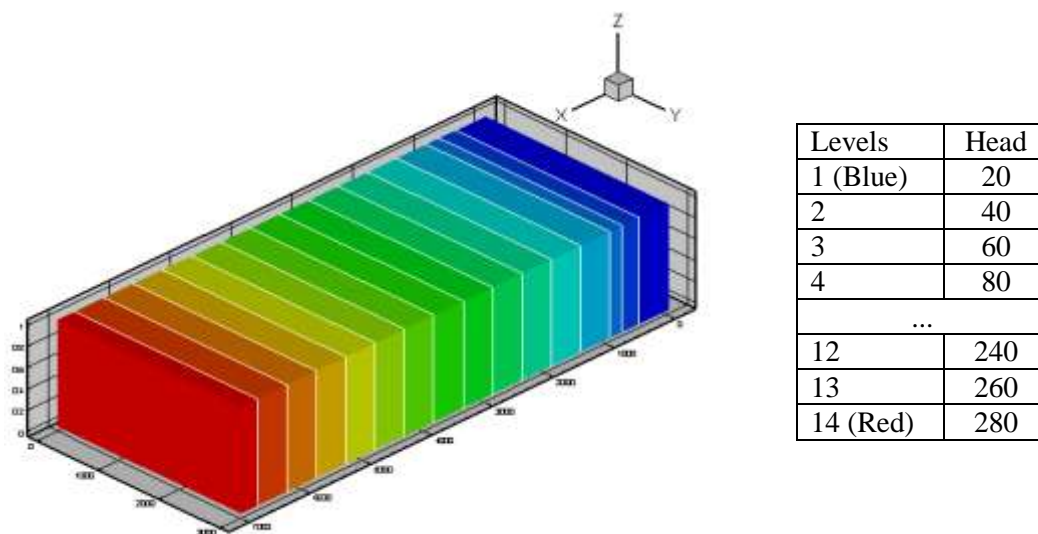
Παρατηρείται ότι για μεγαλύτερες τιμές του K , η απόσταση της ζώνης δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$ από την ακτή (δηλαδή την πλευρά του υδροφορέα που συνορεύει με τη θάλασσα) αυξάνεται δραματικά. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει από την εξέταση των αποτελεσμάτων είναι το γεγονός ότι ενώ για $K = 1 \text{ m/day}$ η σφήνα βρίσκεται σε απόσταση 75 m από την ακτή, για $K = 20 \text{ m/day}$ η θέση της σφήνας βρίσκεται σε 1500 m από την ακτή, δηλαδή για 20πλασιασμό του K , η απόσταση της σφήνας επίσης εικοσαπλασιάζεται. Η ερμηνεία αυτή αποτυπώνεται ξεκάθαρα στο διάγραμμα 4.1.



Διάγραμμα 4.1. Γραφική απεικόνιση μεταβολής της θέσης της σφήνας σε σχέση με τις μεταβολές στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K .

Όπως παρατηρήθηκε από την ερμηνεία των στοιχείων του πίνακα, η θέση της σφήνας με αφετηρία την πλευρά που συνορεύει με τη θάλασσα μεταβάλλεται γραμμικά όσο μεταβάλλεται η υδραυλική αγωγιμότητα. Εκτός από τον έλεγχο μεταξύ αποτελεσμάτων που έδωσε το πρόγραμμα που συντάχθηκε σε MATLAB και της γραφικής απεικόνισης σε TECPLOT, ελέγχθηκε επίσης αν η εικόνα του υδραυλικού φορτίου και του δυναμικού σε περιβάλλον TECPLOT είναι η αναμενόμενη.

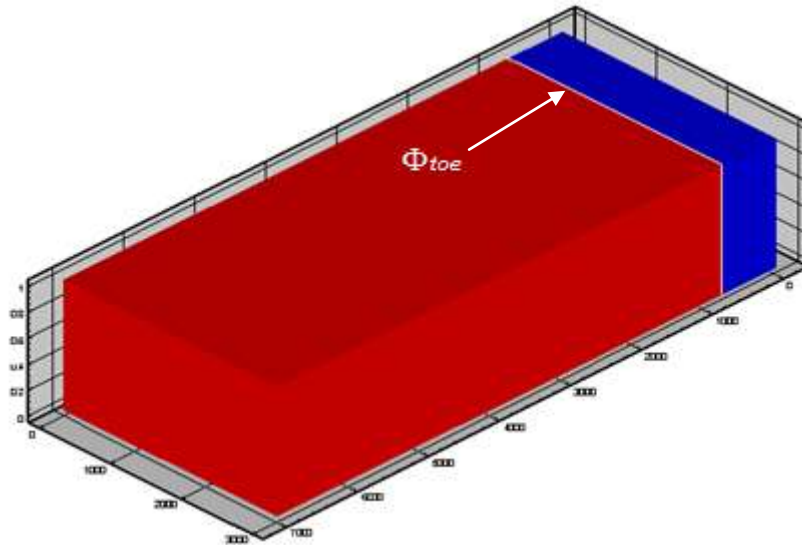
Για την τιμή $K = 10 \text{ m/day}$, για υδροφορέα που προσομοιάζεται από κάνναβο φατνίων διαστάσεων 20 m σε άξονα X και Y , όπου από τον πίνακα εξάγεται η θέση της σφήνας στα 750 m από την ακτή, παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση αρχικά του υδραυλικού φορτίου (hydraulic head) σε περιβάλλον TECPLOT στην εικόνα.



Εικόνα 4.5. Γραφική απεικόνιση υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του υδροφορέα.

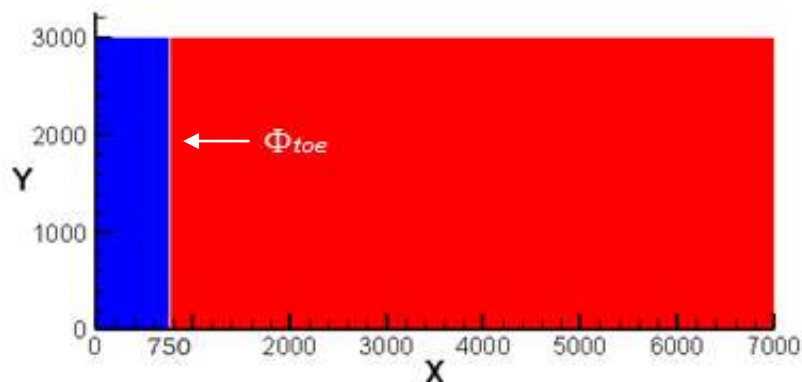
Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι ξεχωριστές ζώνες υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του υδροφορέα. Οι ζώνες που παρουσιάζονται από την μπλε απόχρωση προς την κόκκινη έχουν βήμα υδραυλικού φορτίου 20 m , επομένως ξεκινώντας από υδραυλικό φορτίο 20 m (σκούρα μπλε απόχρωση), με την παρεμβολή της ζώνης $\Phi_{10e} = 31.25 \text{ m}^2$ (δεύτερη ζώνη στο σχήμα), τελικά φτάνει έως τα 280 m (σκούρα κόκκινη απόχρωση).

Στην εικόνα 4.6 απεικονίζεται μόνο η ζώνη $\Phi_{10e} = 31.25 \text{ m}^2$ σε 3-D απεικόνιση για καλύτερη αναγνώριση του φαινομένου της υφαλμύρωσης. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η ζώνη των 31.25 m^2 , ενώ παρατηρείται ότι η θέση της σφήνας είναι όπως ορίζει η διεθνής βιβλιογραφία, δηλαδή η ζώνη έχει μια κλίση προς τα μέσα στην κάτω επιφάνεια του υδροφορέα.



Εικόνα 4.6. 3-D απεικόνιση ζώνης με τιμή $\Phi_{toe} = 31.25m^2$ στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Για να γίνει ο έλεγχος ότι η θέση της σφήνας είναι στα 750 m από την ακτή, όπως προέκυψε από το MATLAB, απεικονίζεται ο υδροφορέας στο TECPLOT σε 2-D περιβάλλον και ελέγχεται αν η θέση της ζώνης Φ_{toe} είναι εκεί που πρέπει. Με αυτό τον τρόπο ελέγχεται η ορθότητα των εντολών του κώδικα που συντάχθηκε σε MATLAB και απεικονίζεται το φυσικό πρόβλημα στην κανονική του μορφή. Όντως, όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα η θέση της αλμυρής σφήνας μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού συναντάται στα 750 m.



Εικόνα 4.7. 2-D απεικόνιση της ζώνης $\Phi_{toe} = 31.25m^2$, δηλαδή της θέσης της σφήνας.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στις άλλες δοκιμές, ενώ οι εικόνες των αποτελεσμάτων είναι αντίστοιχες. Επομένως, το πρωταρχικό συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή τη σειρά δοκιμών είναι ότι η απόσταση της σφήνας από την ακτή αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K , το οποίο συνάδει με τα προηγούμενα αποτελέσματα.

4.6. Διερεύνηση Προβλήματος με Θεώρηση Υπόγειας Ροής Μεταβλητής Πυκνότητας (Variable Density Flow)

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται ο υδροφορέας, όπως ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, όσον αφορά τη θέση της αλμυρής "σφήνας" που σχηματίζει το θαλασσινό νερό στο εσωτερικό του υδροφορέα για διάφορες χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας K , καθώς και για διαφορετικούς συνδυασμούς διαμήκους και εγκάρσιας διασποράς, α_L και α_T αντίστοιχα. Εξετάζεται η θεώρηση υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας (variable density), της οποίας οι βασικές ιδιότητες εξετάστηκαν παραπάνω.

4.6.1. Αλλαγές στην εκτέλεση του λογισμικού HydroGeoSphere

Όπως και στην προηγούμενη θεώρηση, δίνονται τα δεδομένα στο πρόγραμμα "Grok", τα οποία συσχετίζονται με τις υδραυλικές παραμέτρους του υδροφορέα. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τη θεώρηση variable density συντάσσεται κώδικας, όπου αναφέρονται τα κύρια χαρακτηριστικά του υδροφορέα που εξετάζεται, με τα εξής:

Βήμα 1. Σύνταξη κώδικα σε αρχείο με κατάληξη .mprops

Όπως και παραπάνω, επίσης δίνονται αρχικές τιμές για ιδιότητες του υδροφορέα. Δηλώνεται ότι ο υδροφορέας είναι επίσης ισότροπος, δηλαδή σε κάθε σημείο του η διαπερατότητα είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$). Δίνονται συγκεκριμένες χαρακτηριστικές τιμές στην αγωγιμότητα του υδροφορέα, δηλαδή $K = \{1, 2, 5, 10, 15, 20\}$ m/day, ώστε να εξεταστεί κατά πόσον η θέση της σφήνας επηρεάζεται σημαντικά και με ποιο τρόπο από την τιμή της αγωγιμότητας και να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των δύο θεωρήσεων.

Επίσης, δηλώνεται η τιμή του πορώδους του υδροφορέα που εξετάζεται. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, με βάση τις ιδιότητες του υδροφορέα και τις απαιτήσεις του προβλήματος, ορίζεται όπως και πριν η τιμή 0.2, η οποία είναι αμετάβλητη κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Ορίζεται η ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφορέα που εξετάζεται με βάση τη φύση και τις ιδιότητες του πορώδους μέσου στην τιμή $1.e-4$, δηλαδή $1.0 * 10^{-4}$ [L^{-1}].

Η διαφορά με την θεώρηση sharp interface είναι ότι πρέπει να οριστεί η τιμή της διαμήκους και εγκάρσιας μηχανικής διασποράς. Διασπορά ή μηχανική διασπορά (mechanical dispersion) είναι ο μηχανισμός μεταφοράς ρύπων (στη συγκεκριμένη εργασία το αλάτι) εντός της υδάτινης επιφάνειας των εδαφικών πόρων σε διάλυση ή αιώρηση, μεταγωγή (advection) και διάχυση (molecular diffusion). Η κίνηση του ρύπου οφείλεται στην παρουσία αλληλοσυνδεδεμένων πόρων του εδαφικού σκελετού με τυχαίες διευθύνσεις και σχήματα. Η κίνηση του νερού εντός των πόρων μεταβάλλεται ακανόνιστα με αποτέλεσμα να αποκλίνει σημαντικά από τη μέση ταχύτητα υπόγειας ροής. Άρα ο ρύπος διασπείρεται τόσο κατά μήκος (παρασυρόμενος από το νερό) αλλά και εγκάρσια προς τη μέση διεύθυνση κίνησης

του υπόγειου νερού. Αλλάζοντας τις τιμές α_L και α_T , αλλάζει το εύρος ανάμιξης επομένως μεταβάλλεται σημαντικά και η θέση της σφήνας, ειδικά όσον αφορά μεταβολές της διαμήκου διασποράς.

Ο συντελεστής α_L αφορά τη διαμήκη διασπορά και εξαρτάται από την κλίμακα του πεδίου ροής (μεγαλώνει ο συντελεστής όσο μεγαλώνει το πεδίο ροής):

$$D_{3x} = \alpha_L \frac{V_x}{n} = \alpha_L \cdot \bar{V}_x \quad (4.4)$$

Η τιμή του συντελεστή διασποράς εξαρτάται από την τάξη μεγέθους της ταχύτητας κίνησης του υπόγειου νερού. Εξαρτάται από την ταχύτητα μεταγωγής V , από την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους και το μέγεθος της υδραυλικής κλίσης εντός του υδροφορέα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προγράμματος, καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν όταν ισχύει η αναλογία $\alpha_L/K = 1/1$.

Ο συντελεστής α_T αφορά την εγκάρσια διασπορά, ενώ από εργαστηριακές δοκιμές έχει προκύψει ότι ο συντελεστής κυμαίνεται μεταξύ του $\alpha_L/20$ και $\alpha_L/5$:

$$D_{3y} = D_{3z} = \alpha_T \cdot \bar{V}_x \quad (4.5)$$

Στην παρούσα εργασία επιλέγεται αναλογία $\alpha_L/\alpha_T = 10/1$. Γενικότερα, οι αναλογίες μεταξύ των μεγεθών της διασποράς και της υδραυλικής αγωγιμότητας πρέπει να τηρούνται για την εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

Βήμα 2. Σύνταξη κώδικα σε αρχείο με κατάληξη .grok

Αρχικά ορίζεται και παράγεται ο ίδιος κάρναβος που θα αναπαριστά από εδώ και πέρα τον εξεταζόμενο υδροφορέα (Grid generation). Για τη θεώρηση αυτή, ορίζεται υδροφορέας διαστάσεων 7 km x 3 km (με αφετηρία το 0 σε κάθε άξονα) και βάθους 50 m (αφετηρία -10 m στην πάνω επιφάνεια του υδροφορέα και στάθμη -60 m στην κάτω, ώστε να μην ταυτίζεται το πάνω όριο με την φυσική επιφάνεια), ενώ η διακριτοποίηση στους άξονες X και Y μεταβάλλεται ανάλογα με τη δοκιμή, ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα και να τηρούνται οι προδιαγραφές καλής χρήσης του λογισμικού. Αύξηση των dx και dy σημαίνει επίσης ότι ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται σημαντικά.

Όσον αφορά το σενάριο χρόνων, έγιναν δοκιμές για 30-60 χρόνια, αλλά παρατηρήθηκε ότι η ροή δεν ήταν μόνιμη και η σφήνα "μετακινούνταν". Έπειτα από πολλές δοκιμές τελικά διαπιστώθηκε ότι το σενάριο χρόνων (output times) έπρεπε να τεθεί στο διάστημα 300-400 χρόνων, λόγω της δυσκολίας επίτευξης steady-state κατάστασης. Επίσης, ορίζεται ο τύπος ρύπου που εξετάζεται, εδώ το αλάτι, και οι ιδιότητες του, καθώς και ο συντελεστής διάχυσης που αντιστοιχεί. Δίνονται οι ιδιότητες της μεταφοράς ρύπου, δηλαδή η μέγιστη πυκνότητα, το ανεκτό σφάλμα και η συγκέντρωση.

Έπειτα, επιλέγονται οι αρχικές συνθήκες ροής. Πρόκειται για υπόγεια ροή, επομένως δίνονται τιμές για σταθερή και μη μόνιμη ροή, αφού πρόκειται για τις αρχικές τιμές του προβλήματος για να δοθεί λύση. Εδώ, επιλέγεται να δοθεί πρακτικά μηδενικό υδραυλικό φορτίο στους κόμβους που βρίσκονται σε επαφή με τη θάλασσα. Επίσης, δίνονται αρχικές συνθήκες για τη μεταφορά, δηλαδή δίνεται μηδενική αρχική συγκέντρωση στους κόμβους.

Τέλος, δίνονται οι οριακές συνθήκες για τη ροή και τη μεταφορά, όπως αναπτύχθηκε σε ειδική παράγραφο της εργασίας (όρια πρώτης και δεύτερης συνθήκης). Επιλέγονται οι κόμβοι στην πλευρά του υδροφορέα που βρίσκεται σε επαφή με τη θάλασσα. Σε εκείνη την πλευρά δηλώνεται συγκεκριμένο υδραυλικό φορτίο που αφορά τις οριακές συνθήκες ροής (Flow-Boundary conditions) για τους κόμβους αυτούς, ίσο με 0.25 m στο πάνω όριο και 1.5 στο κάτω.

Επιλέγεται η αντίθετη πλευρά που τροφοδοτείται με πλευρική παροχή και ορίζεται η πλευρική τροφοδοσία στα $1.250 \text{ m}^3/\text{day}$, όπως και στη sharp θεώρηση για να είναι δυνατή η σύγκριση, συνυπολογίζοντας το πλάτος του (3.000 m) και το βάθος (50 m) του υδροφορέα.

Βήμα 3. Εκτέλεση λογισμικού Grok.

Το λογισμικό Grok εκτελείται σε MS-DOS. Δίνοντας τη θέση του αρχείου με κατάληξη .grok εκτελείται το πρόγραμμα, παράγοντας κυρίως αρχεία .eco, δηλαδή binary files. Με την εκτέλεση του .grok, δηλαδή του προ-επεξεργαστή, διαβάζονται τα στοιχεία και οι ιδιότητες του υδροφορέα, ώστε να είναι δυνατή η εκτέλεση προσομοίωσης της ροής του νερού με το πρόγραμμα HydroGeoSphere.

Βήμα 4. Εκτέλεση του λογισμικού HydroGeoSphere

Σε αυτό το βήμα εκτελείται το κύριο πρόγραμμα προσομοίωσης ροής σε λειτουργικό σύστημα MS-DOS. Παράγονται αρχεία που περιέχουν πληροφορία για τη θέση της σφήνας, καθώς και για όλες τις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα, όπως το υδραυλικό φορτίο.

Βήμα 5. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων με λογισμικό TECPLOT

Παρέχεται από τις ιδιότητες του λογισμικού HydroGeoSphere η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον TECPLOT. Το λογισμικό αυτό έχει πολλές δυνατότητες απεικόνισης σε 2-D ή 3-D περιβάλλον, ενώ παρουσιάζεται πληθώρα στοιχείων.

Βήμα 6. Εύρεση σφήνας με τη χρήση MATLAB

Επειδή απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια από την εύρεση της σφήνας με τη βοήθεια της γραφικής απεικόνισης, συντάχθηκε νέος κώδικας σε περιβάλλον MATLAB, διαφοροποιημένος σε σχέση με την θεώρηση sharp interface, ώστε να

παρουσιάζεται το δυναμικό σε όλους τους κόμβους του υδροφορέα, σύμφωνα με τον κάρναβο που τον προσομοιάζει από τον ορισμό του στο "Grok".

Επειδή ο εξεταζόμενος ρύπος είναι το αλάτι, η ισοχλώρια συγκέντρωσης 100 mg/L επιλέγεται ως όριο ποσιμότητας για το νερό σε διαχειριστικά προβλήματα παράκτιων υδροφορέων. Επομένως, στον κώδικα που συντάσσεται, δίνεται εντολή να "σαρώνει" το πρόγραμμα τον κάρναβο δυναμικού για την τιμή αυτή και να βρίσκει τη ζώνη σημείων που αντιστοιχούν σε τιμή 100 mg/L. Γίνεται έλεγχος σε κάθε δοκιμή, ώστε να διαπιστωθεί αν το αποτέλεσμα που δίνει ο κώδικας είναι όμοιο με την γραφική αναπαράσταση του υδροφορέα.

4.6.2. Διαδικασία υπολογισμών και αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τη θέση της σφήνας μεταξύ δύο διαφορετικών θεωρήσεων για την μορφή διεπιφάνειας αλμυρού και γλυκού νερού, αυτή της απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) μηδενικού πάχους και την αντίστοιχη που θεωρεί ότι υπάρχει ζώνη ανάμιξης μεταβλητής διασποράς (variable density). Εδώ, εξετάζονται οι δοκιμές και τα αποτελέσματα της δεύτερης θεώρησης.

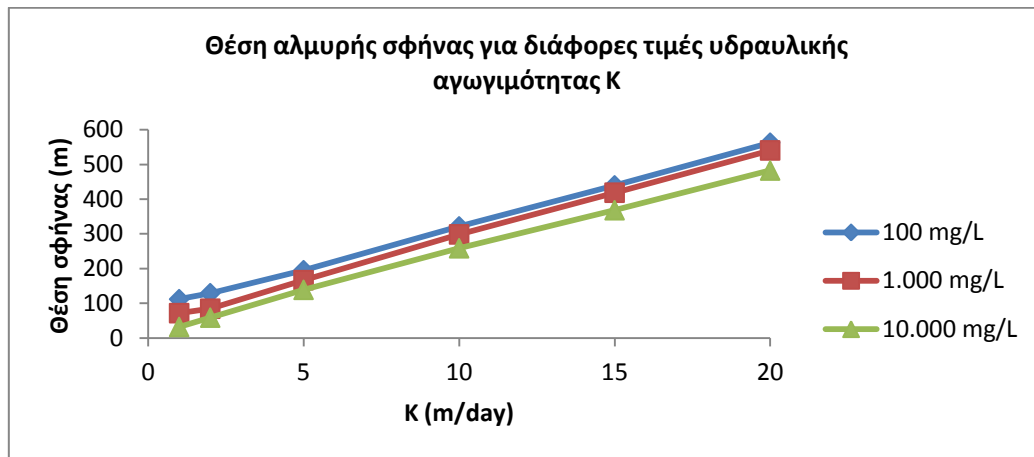
Αρχικά, εξετάζεται η θέση της αλμυρής σφήνας μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα για την θεώρηση variable density, δίνοντας διαφορετικές τιμές στην υδραυλική αγωγιμότητα και στο σετ εγκάρσιας και διαμήκους διασποράς. Επομένως, προκύπτουν 5 σετ δοκιμών. Τελικά, προκύπτουν οι πίνακες παρουσίασης των αποτελεσμάτων, όπου απεικονίζεται για συγκεκριμένες διαστάσεις φατνίου η θέση της σφήνας για κάθε τιμή του K σε ξεχωριστή δοκιμή. Επίσης, έγιναν δοκιμές για ισοχλώριες συγκέντρωσης 1.000 mg/L και 10.000 mg/L, καθώς αποτελούν χαρακτηριστικές τιμές αλλά και για έλεγχο των αποτελεσμάτων.

Αποτελέσματα προσομοιώσεων για: $\alpha_L = 20$, $\alpha_T = 2$ ($dx = dy = 20$ m)

K (m/day)	Απόσταση αλμυρής σφήνας από ακτή (ισοχλώρια 100 mg/L) (m)	Θέση σφήνας (1.000 mg/L) (m)	Θέση σφήνας (10.000 mg/L) (m)
1	111,8	71,5	31,8
2	129	84,3	58,7
5	195,2	166,5	138,8
10	321,5	298,5	258,5
15	439,8	418,6	368,2
20	562,8	540,5	482,6

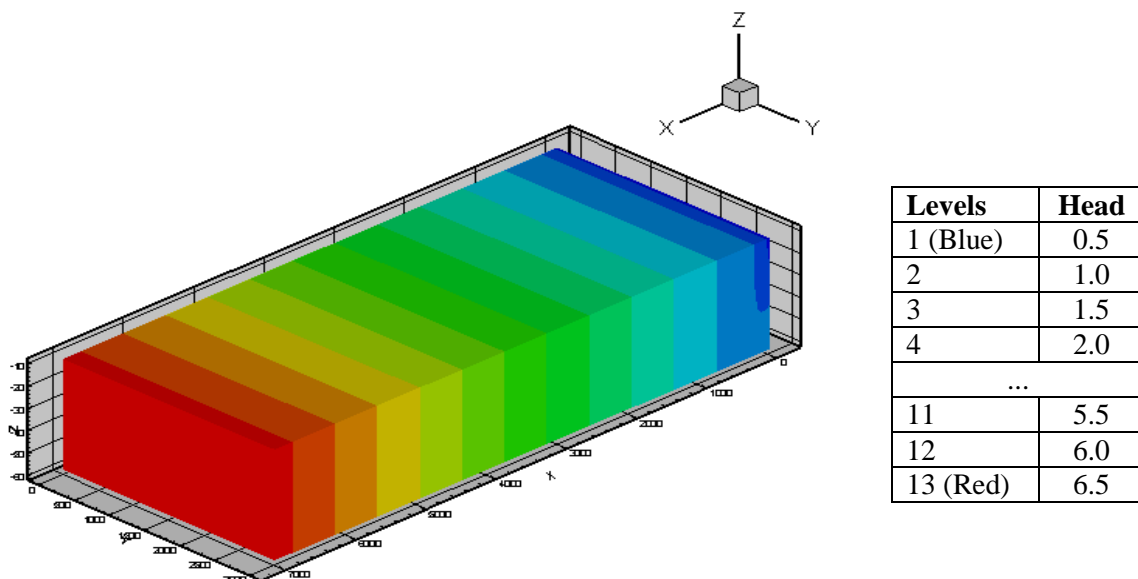
Πίνακας 4.2. Απόσταση της ισοχλώριας συγκέντρωσης 100, 1.000 και 10.000 mg/L από την ακτή για διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας K.

Παρατηρείται ότι για μεγαλύτερες τιμές του K , η απόσταση της εκάστοτε ισοχλώριας συγκέντρωσης από την ακτή (δηλαδή την πλευρά του υδροφορέα που συνορεύει με τη θάλασσα) αυξάνεται.



Διάγραμμα 4.2. Γραφική απεικόνιση μεταβολής της θέσης της σφήνας σε σχέση με τις μεταβολές στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K ($\alpha_L/\alpha_T = 20/2$).

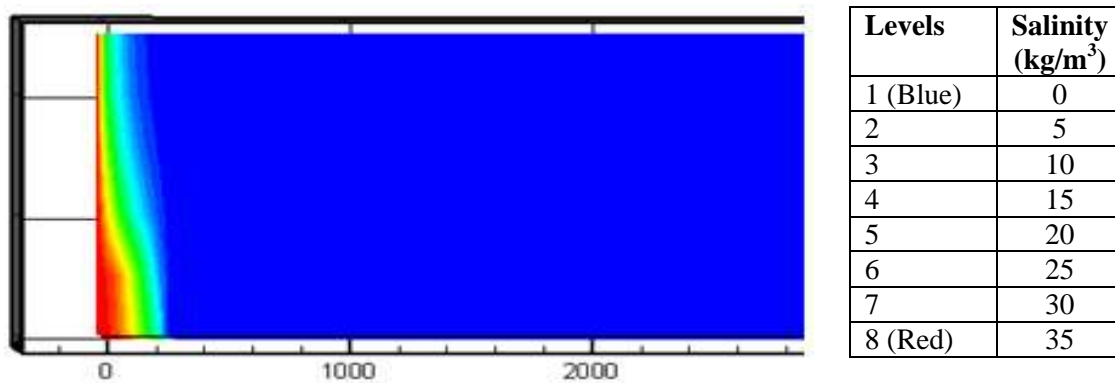
Παρατηρείται ότι και οι τρεις ισοχλώριες έχουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά την κλίση και την μεταβολή τους για τις εκάστοτε μεταβολές του K . Όσον αφορά την ισοχλώρια των 10.000 mg/L παρατηρείται ότι για τις μεγαλύτερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας δεν ακολουθεί επακριβώς το πρότυπο των άλλων δύο και έχει ελάχιστα μικρότερο ρυθμό μεταβολής για τις τιμές αυτές. Όπως παρατηρήθηκε από την ερμηνεία των στοιχείων του πίνακα, η θέση της σφήνας με αφετηρία την πλευρά που συνορεύει με τη θάλασσα αυξάνεται όσο μεταβάλλεται η υδραυλική αγωγιμότητα. Ελέγχθηκε επίσης αν η εικόνα του υδραυλικού φορτίου και του δυναμικού σε περιβάλλον TECPLOT είναι η αναμενόμενη.



Εικόνα 4.8. Γραφική απεικόνιση υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του υδροφορέα.

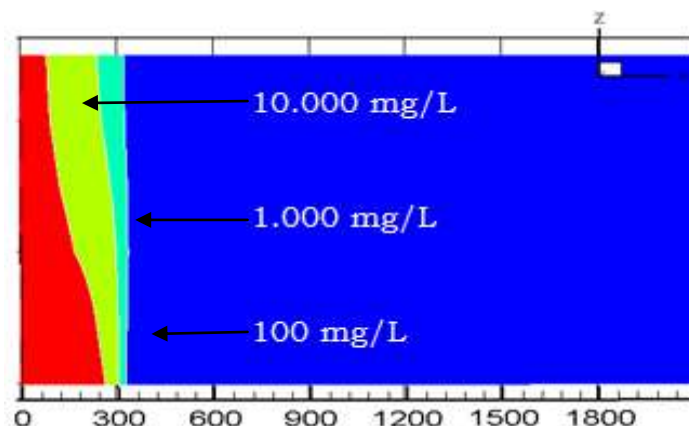
Για την τιμή $K = 10 \text{ m/day}$, από τον πίνακα εξάγεται η θέση της σφήνας στα 321,5 m από την ακτή, παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση αρχικά του υδραυλικού φορτίου (hydraulic head) σε περιβάλλον TECPLOT στην εικόνα 4.8.

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι ξεχωριστές ζώνες υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του υδροφορέα. Οι ζώνες που παρουσιάζονται από την μπλε απόχρωση προς την κόκκινη έχουν βήμα υδραυλικού φορτίου 0.5 m, επομένως ξεκινώντας από υδραυλικό φορτίο 0.25 m (σκούρα μπλε απόχρωση), που τέθηκε ως οριακή συνθήκη, φτάνει σε μέγιστο (max) φορτίο 6.71 m. Επομένως, η απεικόνιση του φορτίου είναι σύμφωνη με αυτή που αναμένονταν. Στην εικόνα 4.9 απεικονίζεται το σετ των ισοχλώραίων στο εσωτερικό του υδροφορέα με βήμα 0.05.



Εικόνα 4.9. Απεικόνιση ισοχλώραίων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Γίνεται έλεγχος ότι η θέση της σφήνας είναι στα 321,5 m από την ακτή, όπως προέκυψε από το MATLAB και απεικονίζεται ο υδροφορέας στο TECPLOT σε 3-D περιβάλλον. Όντως, η θέση της σφήνας υπολογίζεται στην απόσταση αυτή. Στην εικόνα απεικονίζονται με κόκκινο, κίτρινο και γαλάζιο χρώμα οι ισοχλώριες συγκέντρωσης 10.000, 1.000 και 100 mg/L αντίστοιχα.



Εικόνα 4.10. Απεικόνιση των ισοχλώραίων συγκέντρωσης 100, 1.000, 10.000 mg/L.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στις άλλες δοκιμές αυτού του σετ, ενώ οι εικόνες των αποτελεσμάτων είναι αντίστοιχες. Επομένως, το πρωταρχικό

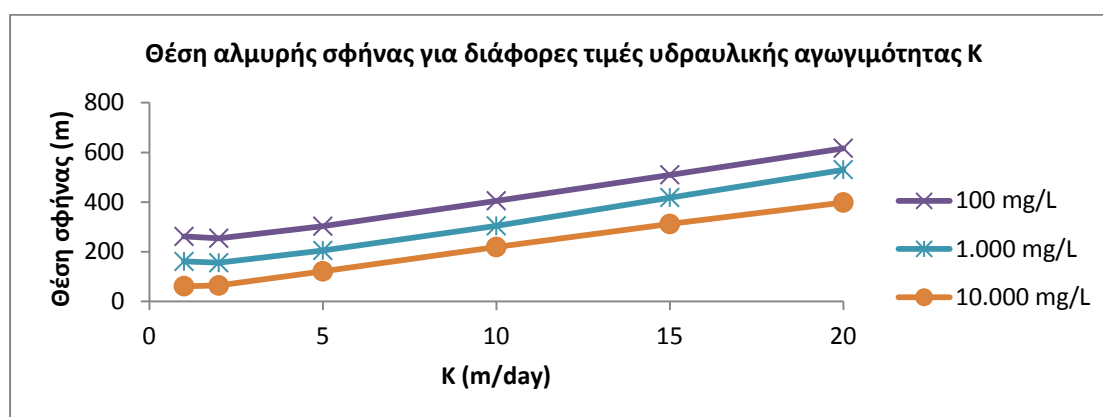
συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή τη σειρά δοκιμών είναι το γεγονός ότι η απόσταση της σφήνας από την ακτή αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K .

Αποτελέσματα προσομοιώσεων για: $\alpha_L = 50$, $\alpha_T = 2$ ($dx = 50$ m, $dy = 20$ m)

K (m/day)	Απόσταση αλμυρής σφήνας από ακτή (ισοχλώρια 100 mg/L) (m)	Θέση σφήνας (1.000 mg/L)	Θέση σφήνας (10.000 mg/L)
1	261,5	160,7	61,3
2	254	155,5	64
5	302,5	205	121
10	405	304	218,8
15	509,7	418	311,6
20	616,5	530,2	398,1

Πίνακας 4.3. Απόσταση της ισοχλώριας συγκέντρωσης 100, 1.000 και 10.000 mg/L από την ακτή για διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας K .

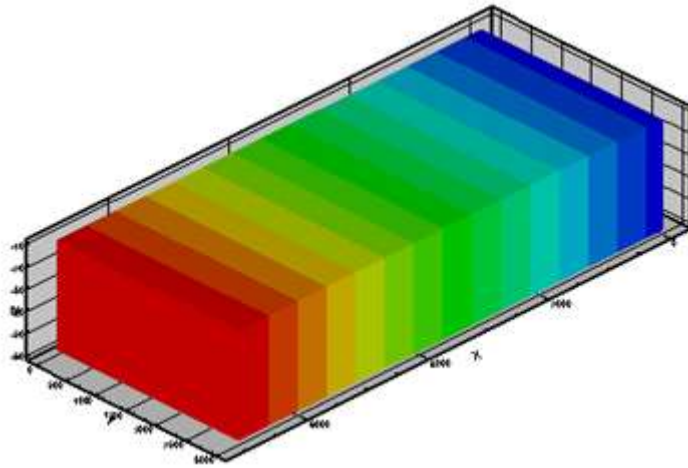
Σε αυτό το σετ αποτελεσμάτων προσομοιώσεων παρατηρείται ότι για τις ισοχλώριες συγκεντρώσεως 100 και 1.000 mg/L, για μεταβολή $K = 1 - 2$ m/day, η θέση της σφήνας μετακινείται προς την ακτή παρά προς το εσωτερικό του υδροφορέα όπως αναμενόταν. Αντίθετα, η ισοχλώρια συγκέντρωσεως 10.000 mg/L ακολουθεί τη συμπεριφορά του προηγούμενου σετ. Για τις υπόλοιπες μεταβολές του K , η απόσταση της εκάστοτε ισοχλώριας συγκέντρωσης από την ακτή (δηλαδή την πλευρά του υδροφορέα που συνορεύει με τη θάλασσα) αυξάνεται. Η νέα αυτή συμπεριφορά της αλμυρής σφήνας πιθανόν να οφείλεται στην πολυπλοκότητα του φαινομένου της υφαλμύρωσης και της κίνησης του θαλασσινού νερού στο εσωτερικό παράκτιου υδροφορέα. Σχηματικά:



Διάγραμμα 4.3. Γραφική απεικόνιση μεταβολής της θέσης της σφήνας σε σχέση με τις μεταβολές στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K ($\alpha_L/\alpha_T = 50/2$).

Παρατηρείται ότι και οι ισοχλώριες συγκεντρώσεως 100 και 1.000 mg/L έχουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά την κλίση και την μεταβολή τους για τις εκάστοτε μεταβολές του K . Όσον αφορά την ισοχλώρια των 10.000 mg/L

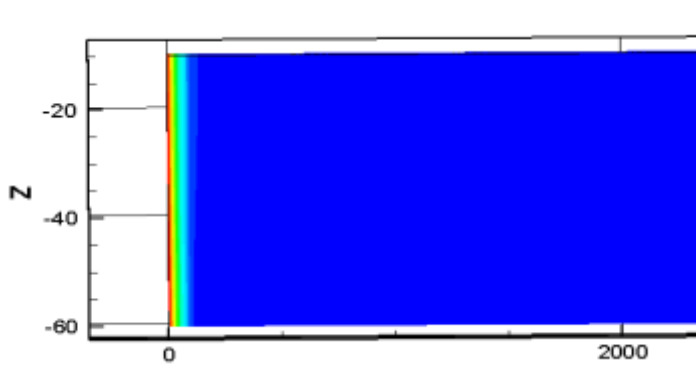
παρατηρείται ότι έχει παντού αύξουσα πορεία ενώ για τις μεγαλύτερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας δεν ακολουθεί επακριβώς το πρότυπο των άλλων δύο και έχει ελάχιστα μικρότερο ρυθμό μεταβολής για τις τιμές αυτές. Εκτιμήθηκε ότι ήταν αναγκαία η παρατήρηση του υδραυλικού φορτίου και των ισοχλωρίων για τη δοκιμή $K = 2 \text{ m/day}$, όπου η σφήνα βρίσκεται στα 261,5 m.



Levels	Head
1 (Blue)	0.5
2	1.0
3	1.5
4	2.0
...	
11	5.5
12	6.0
13 (Red)	6.5

Εικόνα 4.11. Γραφική απεικόνιση υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του υδροφορέα.

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι ξεχωριστές ζώνες υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του υδροφορέα. Οι ζώνες που παρουσιάζονται από την μπλε απόχρωση προς την κόκκινη έχουν βήμα υδραυλικού φορτίου 2 m, επομένως ξεκινώντας από υδραυλικό φορτίο 0.25 m (σκούρα μπλε απόχρωση), που τέθηκε ως οριακή συνθήκη, φτάνει σε μέγιστο (max) φορτίο 28 m. Επομένως, η απεικόνιση του φορτίου δεν ακολουθεί τα πρότυπα των υπόλοιπων δοκιμών για διαφορετικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας. Στην εικόνα 4.12 απεικονίζεται το σετ των ισοχλωρίων στο εσωτερικό του υδροφορέα με βήμα 0.05, με ελάχιστη τιμή το 0 και μέγιστη το 1.



Levels	Salinity (kg/m ³)
1 (Blue)	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8 (Red)	35

Εικόνα 4.12. Απεικόνιση ισοχλωρίων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Παρατηρείται ότι δεν έχουν τη συνηθισμένη μορφή που αναμενόταν, αλλά είναι σχεδόν κάθετες στον υδροφορέα. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στις άλλες δοκιμές αυτού του σετ, ενώ οι εικόνες των αποτελεσμάτων στις υπόλοιπες δοκιμές είναι πιο κοντά στο συνηθισμένο τρόπο απεικόνισης. Επομένως, το πρωταρχικό

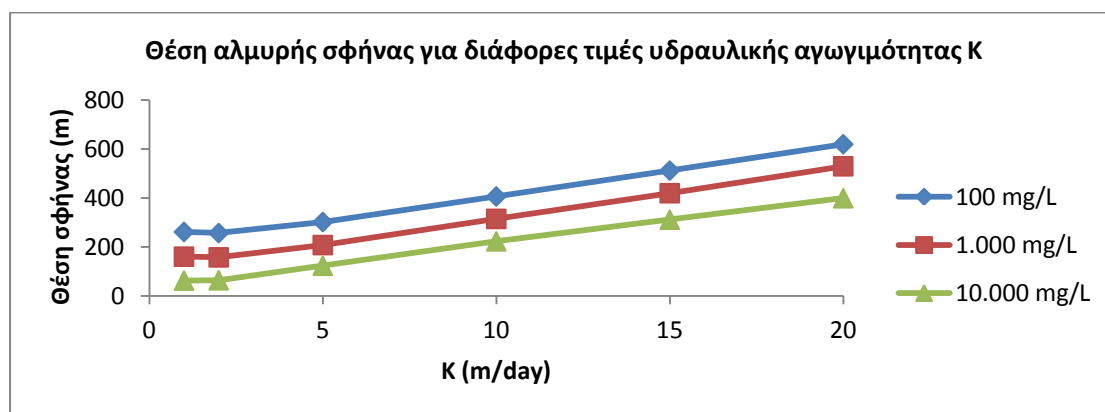
συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή τη σειρά δοκιμών είναι το γεγονός ότι για συγκεκριμένο συνδυασμό $[(K, \alpha_L, \alpha_T, dx, dy) = (2, 50, 2, 50, 20)]$ τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν ακολουθούν τα πρότυπα των περισσότερων δοκιμών. Το αποτέλεσμα αυτό πιθανώς οφείλεται στην επίδραση συγκεκριμένων τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας στην θέση της αλμυρής σφήνας, καθώς παρατηρείται ότι για ορισμένες τιμές του K η σφήνα μετακινείται προς την ακτή, ενώ οι ισοχλώριες είναι κάθετες ή σε ορισμένες περιπτώσεις και με αντίθετη κλίση προς τον υδροφόρο, αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα πάνω στο θέμα αυτό.

Αποτελέσματα προσομοιώσεων για: $\alpha_L = 50, \alpha_T = 5$ ($dx = dy = 50$ m)

K (m/day)	Απόσταση αλμυρής σφήνας από ακτή (ισοχλώρια 100 mg/L) (m)	Θέση σφήνας (1.000 mg/L)	Θέση σφήνας (10.000 mg/L)
1	262,05	160,9	63,2
2	257,3	158	64,5
5	302,5	208,3	123,9
10	406,7	315,2	223,5
15	512,5	420,2	312,2
20	620,2	530,3	399,6

Πίνακας 4.4. Απόσταση της ισοχλώριας συγκέντρωσης 100, 1.000 και 10.000 mg/L από την ακτή για διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας K .

Σε αυτό το σετ αποτελεσμάτων προσομοιώσεων παρατηρείται ότι όπως και πριν για μεταβολή $K = 1 - 2$ m/day, η θέση της σφήνας μετακινείται προς την ακτή παρά προς το εσωτερικό του υδροφορέα. Για τις υπόλοιπες μεταβολές του K , η απόσταση της ισοχλώριας συγκέντρωσης από την ακτή αυξάνεται. Σχηματικά:



Διάγραμμα 4.4. Γραφική απεικόνιση μεταβολής της θέσης της σφήνας σε σχέση με τις μεταβολές στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K ($\alpha_L/\alpha_T = 50/5$).

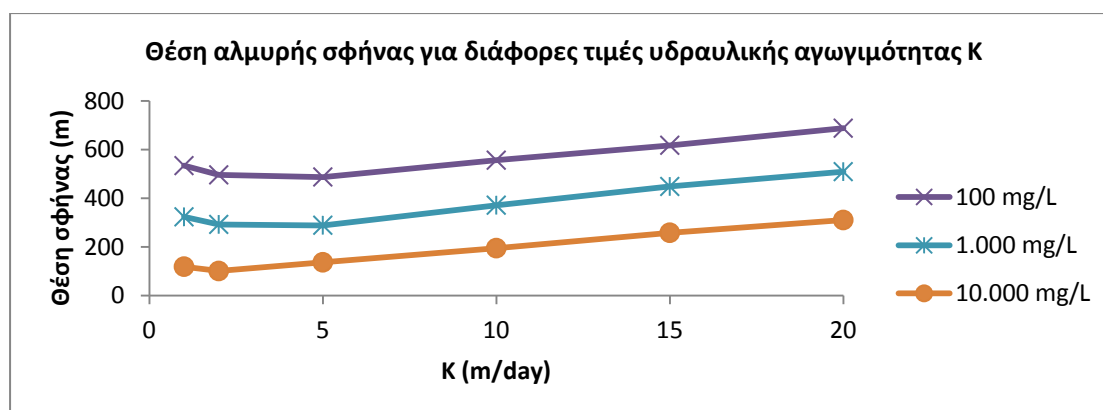
Παρατηρείται ότι και οι ισοχλώριες συγκεντρώσεως 100 και 1.000 mg/L έχουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά την κλίση και την μεταβολή τους για τις εκάστοτε μεταβολές του K .

Αποτελέσματα προσομοιώσεων για: $\alpha_L = 100$, $\alpha_T = 5$ ($dx = 100$ m, $dy = 50$ m)

K (m/day)	Απόσταση αλμυρής σφήνας από ακτή (ισοχλώρια 100 mg/L) (m)	Θέση σφήνας (1.000 mg/L)	Θέση σφήνας (10.000 mg/L)
1	534,1	323,7	118,9
2	496,2	292,5	101,1
5	487,5	289	136,8
10	556,5	371,5	195
15	617,8	448,5	258,3
20	688	509,3	310,6

Πίνακας 4.5. Απόσταση της ισοχλώριας συγκέντρωσης 100, 1.000 και 10.000 mg/L από την ακτή για διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας K.

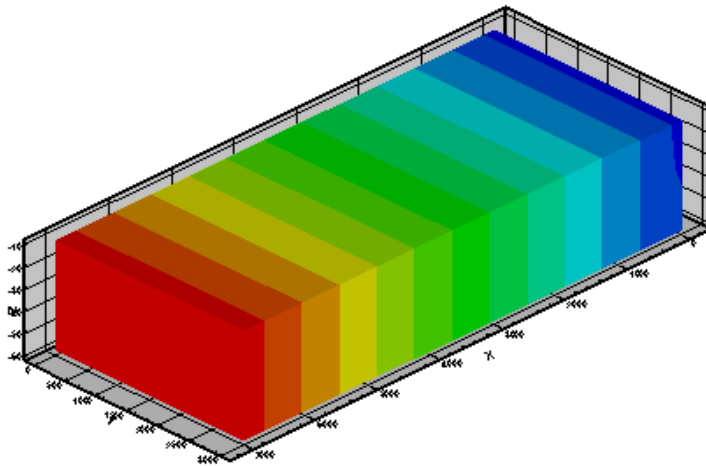
Σε αυτό το σετ αποτελεσμάτων προσομοιώσεων παρατηρείται ότι για τις ισοχλώριες συγκεντρώσεως 100 και 1.000 mg/L, για μεταβολή $K = 1 - 2 - 5$ m/day, η θέση της σφήνας μεταβάλλεται προς την ακτή παρά προς το εσωτερικό του υδροφορέα όπως αναμενόταν. Επομένως, ενώ στο προηγούμενο σετ μόνο για την πρώτη μεταβολή εμφανιζόταν το φαινόμενο, σε αυτό το σετ, δύο τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας παρουσιάζουν πρόβλημα. Αντίθετα, η ισοχλώρια συγκεντρώσεως 10.000 mg/L παρουσιάζει το φαινόμενο μόνο για τιμή $K = 2$ m/day. Για τις υπόλοιπες μεταβολές του K, η απόσταση της εκάστοτε ισοχλώριας συγκέντρωσης από την ακτή (δηλαδή την πλευρά του υδροφορέα που συνορεύει με τη θάλασσα) αυξάνεται. Σχηματικά:



Διάγραμμα 4.5. Γραφική απεικόνιση μεταβολής της θέσης της σφήνας σε σχέση με τις μεταβολές στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K ($\alpha_L/\alpha_T = 100/5$).

Παρατηρείται ότι και οι ισοχλώριες συγκεντρώσεως 100 και 1.000 mg/L έχουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά την κλίση και την μεταβολή τους για τις εκάστοτε μεταβολές του K. Όσον αφορά την ισοχλώρια των 10.000 mg/L παρατηρείται ότι έχει παντού αύξουσα πορεία ενώ για τις μεγαλύτερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας δεν ακολουθεί επακριβώς το πρότυπο των άλλων δύο και έχει ελάχιστα μικρότερο ρυθμό μεταβολής για τις τιμές αυτές. Εκτιμήθηκε ότι ήταν

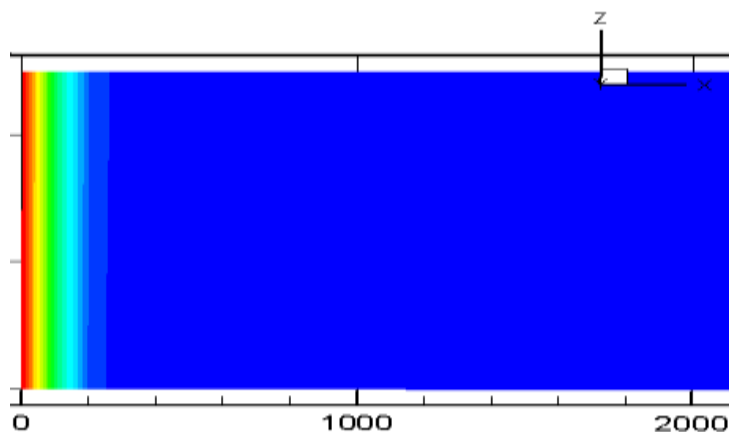
αναγκαία η παρατήρηση του υδραυλικού φορτίου και των ισοχλωρίων για τη δοκιμή $K = 5 \text{ m/day}$, όπου η σφήνα βρίσκεται στα 487,5 m.



Levels	Head
1 (Blue)	0.5
2	1.0
3	1.5
4	2.0
...	
11	5.5
12	6.0
13 (Red)	6.5

Εικόνα 4.13. Γραφική απεικόνιση υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του υδροφορέα.

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι ξεχωριστές ζώνες υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του υδροφορέα. Οι ζώνες που παρουσιάζονται από την μπλε απόχρωση προς την κόκκινη έχουν βήμα υδραυλικού φορτίου 1 m, επομένως ξεκινώντας από υδραυλικό φορτίο 0.25 m (σκούρα μπλε απόχρωση), που τέθηκε ως οριακή συνθήκη, φτάνει σε μέγιστο (max) φορτίο 12,54 m. Η απεικόνιση του φορτίου ακολουθεί τα πρότυπα των υπόλοιπων δοκιμών για διάφορες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας. Στην εικόνα 4.14 απεικονίζεται το σετ των ισοχλωρίων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

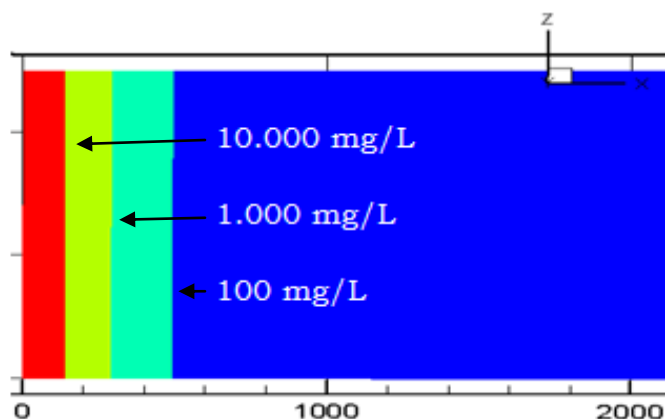


Levels	Salinity (kg/m ³)
1 (Blue)	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8 (Red)	35

Εικόνα 4.14. Απεικόνιση ισοχλωρίων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Παρατηρείται ότι δεν έχουν τη συνηθισμένη μορφή που αναμενόταν, αλλά είναι σχεδόν κάθετες στον υδροφορέα. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στις άλλες δοκιμές αυτού του σετ, με την εικόνα της τιμής $K = 2 \text{ m/day}$ να είναι όμοια, ενώ οι εικόνες των αποτελεσμάτων στις υπόλοιπες δοκιμές είναι πιο κοντά στο συνηθισμένο

τρόπο απεικόνισης. Επομένως, το πρωταρχικό συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή τη σειρά δοκιμών είναι το γεγονός ότι για συγκεκριμένο συνδυασμό [(K, α_L , α_T , dx, dy) = (2, 50, 2, 50, 20) και (5, 100, 5, 100, 50)] η σφήνα δεν μετακινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα, όπως αναλύθηκε και παραπάνω.



Εικόνα 4.15. Απεικόνιση των ισοχλώραίων συγκέντρωσης 100, 1.000, 10.000 mg/L.

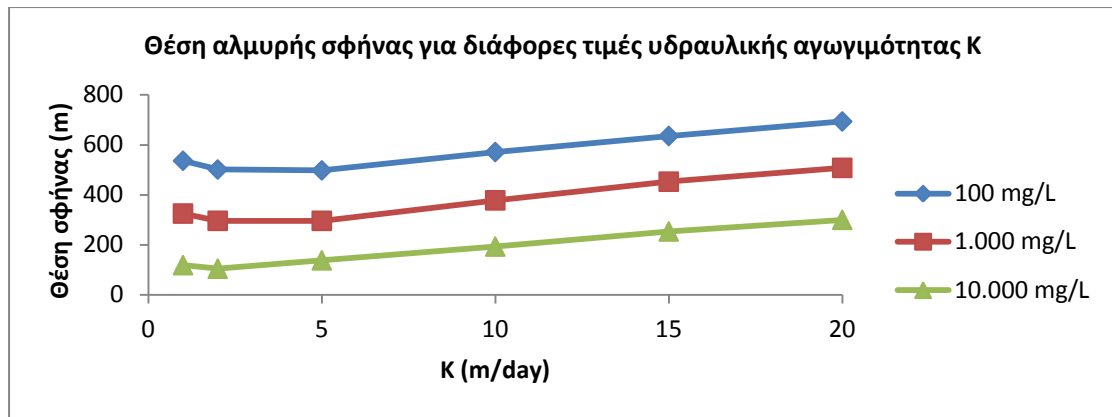
Από την εικόνα 4.15 προκύπτει ότι οι ισοχλώριες που απεικονίζονται έχουν ιδιαίτερη μορφή, καθώς όχι μόνο είναι κάθετες στον υδροφορέα, αλλά το κάτω όριο είναι πιο κοντά στην ακτή από ότι το πάνω όριο.

Αποτελέσματα προσομοιώσεων για: $\alpha_L = 100$, $\alpha_T = 10$ (dx = 100 m, dy = 50 m)

K (m/day)	Απόσταση αλμυρής σφήνας από ακτή (ισοχλώρια 100 mg/L) (m)	Θέση σφήνας (1.000 mg/L)	Θέση σφήνας (10.000 mg/L)
1	536,6	325,4	119,1
2	501,6	296,4	104,9
5	498,1	296,3	138,3
10	571,6	378,2	193,5
15	635,8	452,9	253,8
20	693,7	508,1	300,4

Πίνακας 4.6. Απόσταση της ισοχλώριας συγκέντρωσης 100, 1.000 και 10.000 mg/L από την ακτή για διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας K.

Σε αυτό το σετ αποτελεσμάτων προσομοιώσεων παρατηρείται ότι όπως και πριν για μεταβολή $K = 1 - 2 - 5$ m/day, η θέση της σφήνας μεταβάλλεται προς την ακτή παρά προς το εσωτερικό του υδροφορέα όπως αναμενόταν. Για τις υπόλοιπες μεταβολές του K, η απόσταση της ισοχλώριας συγκέντρωσης από την ακτή αυξάνεται. Τα αποτελέσματα είναι όμοια με του προηγούμενου σετ δοκιμών άρα επιβεβαιώνεται ότι ο συντελεστής που παίζει κύριο ρόλο στην μεταβολή της θέσης της σφήνας, μαζί με την υδραυλική αγωγιμότητα K είναι η διαμήκης διασπορά α_L . Σχηματικά:

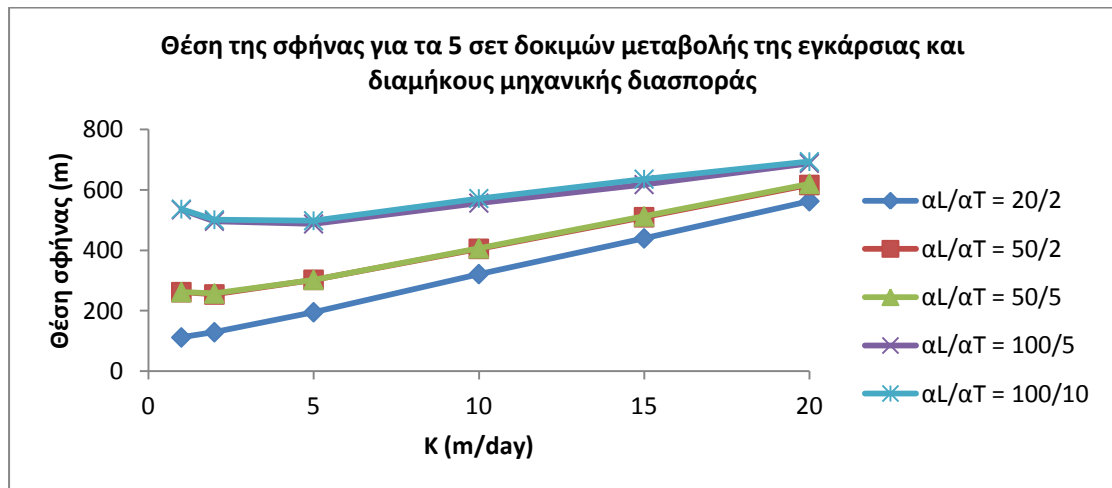


Διάγραμμα 4.6. Γραφική απεικόνιση μεταβολής της θέσης της σφήνας σε σχέση με τις μεταβολές στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K ($\alpha_L/\alpha_T = 100/10$).

Παρατηρείται ότι και οι ισοχλώριες συγκεντρώσεως 100 και 1.000 mg/L έχουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά την κλίση και την μεταβολή τους για τις εκάστοτε μεταβολές του K .

4.7. Σύγκριση Θεωρήσεων - Συμπεράσματα

Αρχικά γίνεται σχολιασμός για τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα 5 διαφορετικά σετ δοκιμών για τη θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους μεταβλητής πυκνότητας (variable density). Σχηματικά:



Διάγραμμα 4.7. Απεικόνιση της θέσης της σφήνας όπου μεταβάλλεται η διασπορά και η υδραυλική αγωγιμότητα για την ισοχλώρια συγκεντρώσεως 100 mg/L.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η απόσταση της σφήνας από την ακτή γενικότερα αυξάνεται όσο αυξάνεται η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K . Επίσης, όσο αυξάνεται η τιμή της διαμήκουσ διασποράς α_L κυρίως, απομακρύνεται η σφήνα από την ακτή, ενώ για μεταβολές της εγκάρσιου διασποράς η σφήνα αυξάνεται μόλις λίγα μέτρα. Αυτό αποτυπώνεται ξεκάθαρα από το γεγονός ότι τα διαγράμματα των δοκιμών πρακτικά συμπίπτουν, όπου τα α_L είναι ίδια, αλλά τα α_T διαφέρουν.

Επομένως, διαπιστώνεται ότι οι συντελεστές που επηρεάζουν πρωτίστως τη θέση της αλμυρής σφήνας που σχηματίζει το θαλασσινό νερό στο εσωτερικό του υδροφορέα είναι:

- η υδραυλική αγωγιμότητα K
- η διαμήκης διασπορά α_L (δευτερευόντως η εγκάρσια διασπορά α_T)

Τέλος, παρατηρείται το φαινόμενο για ορισμένα σετ δοκιμών και ορισμένες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας να μην συμπεριφέρεται η σφήνα όπως στις υπόλοιπες περιπτώσεις, δηλαδή αντί να αυξάνεται η απόσταση της ισοχλωρίας συγκεντρώσεως 100 mg/L όσο αυξάνεται το K , αντίθετα μειώνεται. Στα σετ δοκιμών $\alpha_L/\alpha_T = 50/2$ και $50/5$ η τιμή $K = 2$ m/day παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά (μη γραμμική), ενώ μετά η εικόνα του διαγράμματος είναι γραμμική. Στα σετ δοκιμών $\alpha_L/\alpha_T = 100/5$ και $100/10$ οι τιμές $K = 2$ m/day και $K = 5$ m/day είναι μη γραμμικές. Το φαινόμενο αυτό, όπως αναλύθηκε παραπάνω, οφείλεται στη συμπεριφορά της θαλάσσινης σφήνας στο εσωτερικό του παράκτιου υπόγειου υδροφορέα για συγκεκριμένες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα και μελέτη.

Η θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας αφορά υδροφορέα με καθορισμένα πλευρικά όρια, ενώ η θεώρηση sharp interface αφορά τη θεώρηση κατά Mantoglou (2003) για υδροφορέα με πλευρικά όρια. Όσον αφορά τη σύγκριση των δύο θεωρήσεων, τελικά προκύπτουν τα αποτελέσματα του πίνακα:

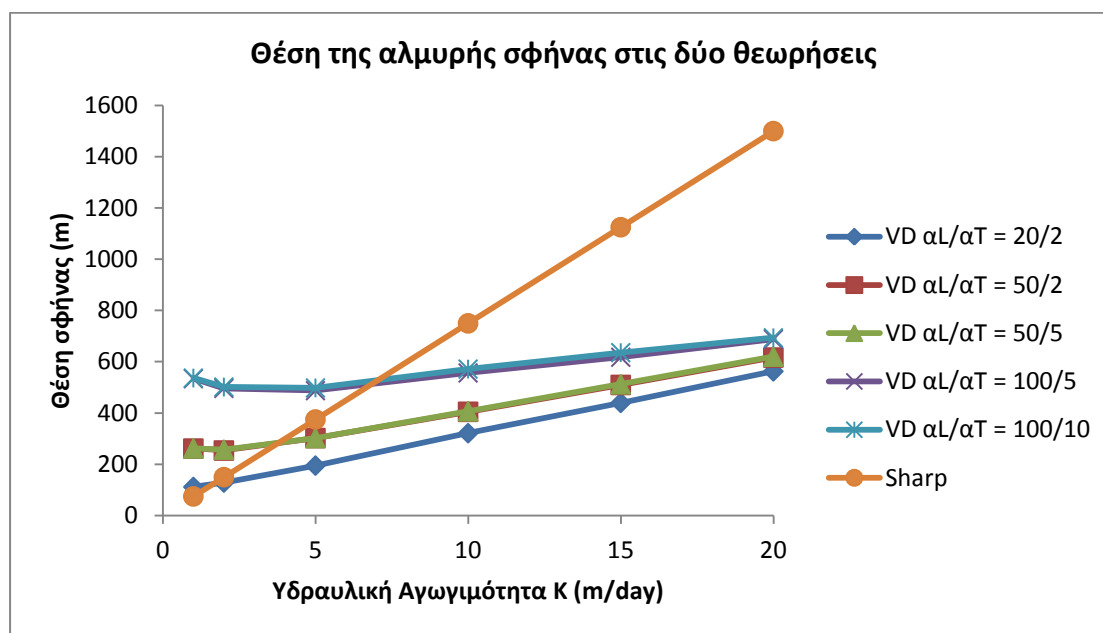
K (m/day)	Θέση σφήνας στη θεώρηση Variable Density για δοκιμές α_L/α_T (m)					Θέση σφήνας για Sharp interface
	20/2	50/2	50/5	100/5	100/10	Sharp interface (Mantoglou, 2003) (m)
1	111,8	261,5	262,05	534,1	536,6	75
2	129	254	257,3	496,2	501,6	150
5	195,2	302,5	302,5	487,5	498,1	375
10	321,5	405	406,7	556,5	571,6	750
15	439,8	509,7	512,5	617,8	635,8	1125
20	562,8	616,5	620,2	688	693,7	1500

Πίνακας 4.7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δύο θεωρήσεων χωρίς την ύπαρξη πηγαδιού.

Από τον πίνακα προκύπτει ότι η σφήνα μεταβάλλεται με διαφορετικό τρόπο στις δύο θεωρήσεις όπως αναμενόταν λόγω των ριζικών διαφορών τους σε θέματα ροής. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για τιμές $\alpha_L/\alpha_T = 20/2$, μόνο στην περίπτωση $K = 1$ m/day, η σφήνα έχει προχωρήσει περισσότερο από την αντίστοιχη της sharp interface θεώρησης. Όσον αφορά τις τιμές $\alpha_L/\alpha_T = 50/2$ και $50/5$, στις περιπτώσεις $K = 1, 2$ m/day η σφήνα έχει προχωρήσει περισσότερο από την αντίστοιχη της sharp interface θεώρησης, ενώ για τιμές $\alpha_L/\alpha_T = 100/5$ και $100/10$, στις περιπτώσεις $K = 1,$

2, 5 m/day η σφήνα έχει προχωρήσει περισσότερο από την αντίστοιχη της sharp interface θεώρησης.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι η θέση της σφήνας στη θεώρηση sharp interface, για μεγαλύτερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας K , είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη θεώρηση variable density, αφού φτάνει στα 1500 μέτρα, δηλαδή στο 1/5 του μήκους υδροφορέα, ενώ στην άλλη θεώρηση φτάνει μόλις μέχρι το 1/10 του μήκους του υδροφορέα για υψηλές τιμές διασποράς. Σχηματικά:



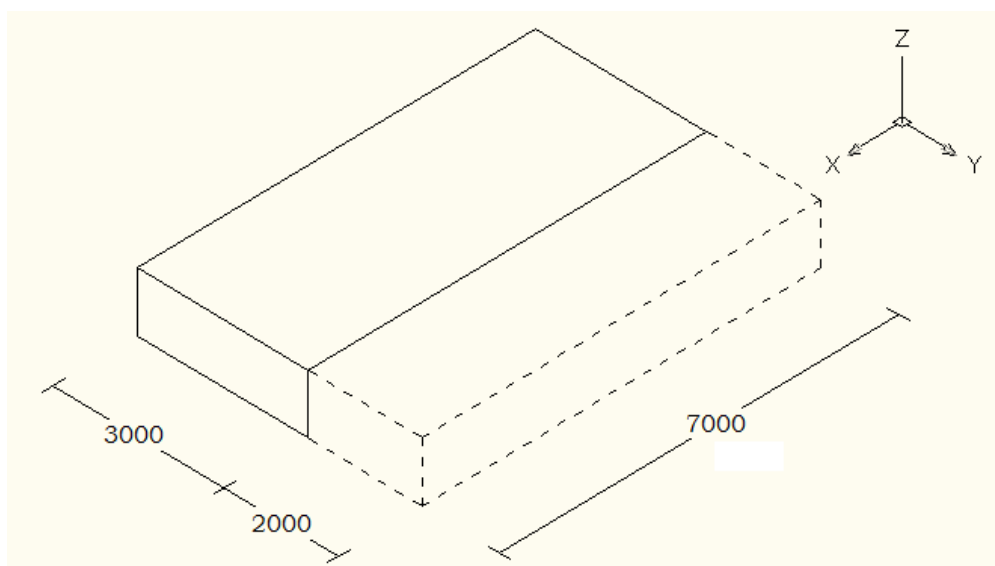
Διάγραμμα 4.8. Θέση της αλμυρής σφήνας για τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας και διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους μεταβλητής πυκνότητας.

Τέλος, διαπιστώνεται ότι και η κλίση των διαγραμμάτων μεταξύ των δύο θεωρήσεων είναι διαφορετικές σε μεγάλο βαθμό, αφού στην θεώρηση sharp interface η σχέση της θέσης της σφήνας με την υδραυλική αγωγιμότητα K είναι γραμμική, ενώ στην άλλη θεώρηση γραμμική με ιδιομορφίες. Όσον αφορά το φαινόμενο που παρατηρήθηκε στη θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας για ορισμένα σενάρια δοκιμών και συγκεκριμένες τιμές K , δεν παρατηρείται ανάλογο φαινόμενο στη θεώρηση sharp interface. Επομένως, διαπιστώνεται ότι οι δύο θεωρήσεις έχουν αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα στο σύνολό τους, λόγω των διαφορών στη θεωρία τους.

Ειδικότερα, ενώ παρουσιάζονται οι τιμές των αποτελεσμάτων προσομοίωσης να είναι αρκετά κοντά για χαμηλές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, όσο αυξάνεται το K παρατηρείται ότι λόγω της θεώρησης απότομης διεπιφάνειας (Mantoglou 2003), η οποία τείνει να εκτιμά τη θέση της σφήνας πιο μέσα στο εσωτερικό του υδροφορέα, εφόσον δεν λογαριάζει μεταβλητή πυκνότητα ούτε τη ζώνη ανάμιξης άλατος, αλλά θεωρεί τη διεπιφάνεια ως μέγεθος πεπερασμένου πάχους. Επομένως, η διαφορά αυτή μεταξύ των μοντέλων οφείλεται στο γεγονός της διαφορετικής θεώρησης όσον αφορά τη διεπιφάνεια και την πυκνότητα του νερού.

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΠΗΓΑΔΙ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται τρία μοντέλα προσομοίωσης της κίνησης του αλμυρού νερού στο εσωτερικό παράκτιου υπόγειου υδροφορέα για τη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρωσης, δηλαδή η θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) κατά Mantoglou (2003) και κατά Strack (1976 - οι διαφορές των δύο μοντέλων αναλύονται παρακάτω), καθώς και η θεώρηση υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας (variable density flow), όσον αφορά την εύρεση μέγιστης παροχής άντλησης από πηγάδι σε δοκιμαστικές θέσεις. Με αυτό τον τρόπο θα βγουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του κάθε μοντέλου σε παρουσία πηγαδιού άντλησης, καθώς και για το πόσο πλησιάζουν τα αποτελέσματα προσομοιώσεων των μοντέλων. Για αυτό το λόγο, εξετάζεται υδροφορέας διαστάσεων 7 km x 3 km, ο οποίος εξετάστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο χωρίς πηγάδι άντλησης, αλλά και διαστάσεων 7 km x 5 km, ώστε να μελετηθεί η επίδραση των πλευρικών ορίων στη θέση της σφήνας και τη μέγιστη παροχή.



Εικόνα 5.1. Ο υδροφορέας που εξετάζεται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, ενώ απεικονίζονται και τα αυξημένα πλευρικά όρια.

5.1. Ορισμός Βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση στοχεύει στον υπολογισμό της μέγιστης παροχής άντλησης που μπορεί να επιτευχθεί, αποφεύγοντας την υφαλμύρωση των φρεάτων. Επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης που περιλαμβάνει τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος:

- α. Παροχή άντλησης
- β. Θέση φρέατος (γραμμή και στήλη του καννάβου)

Η προστασία των φρεάτων από την εισροή θαλασσινού νερού επιτυγχάνεται μέσω των κατάλληλων περιορισμών που τίθενται από το μελετητή.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η μέγιστη παροχή άντλησης για δεδομένη θέση πηγαδιού άντλησης. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η τοποθέτηση φρέατος άντλησης στη θέση $X = 1.000 \text{ m}$, 2.000 m και 3.000 m . Επομένως, η θέση του πηγαδιού στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν αποτελεί ζητούμενο της βελτιστοποίησης, παρά μόνο η μέγιστη παροχή άντλησης πριν υφαιμυρωθεί ο υδροφορέας, ώστε να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των τριών μοντέλων.

5.2. Μεθοδολογίες από Βιβλιογραφία

Κατά τη βιβλιογραφική έρευνα εντοπίζονται διάφοροι τρόποι προσέγγισης του συνδυασμένου προβλήματος υφαιμύρωσης και μεγιστοποίησης της παροχής άντλησης. Η ποικιλία μεθόδων αναφέρεται τόσο στον ορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιοριστικών διατάξεων όσο και στην εφαρμοζόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης. Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά τα ευρήματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε σε διεθνή βιβλιογραφία στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας (Παπαντωνίου, 2003).

Σε ό,τι αφορά στην αντικειμενική συνάρτηση, οι μεταβλητές του προβλήματος που περιλαμβάνει μπορεί να είναι οι εξής, ανάλογα με τη θεώρηση που γίνεται κάθε φορά:

- η συνολική παροχή άντλησης (Shamir et al. 1984, Hallaji and Yazicigil 1996, Cheng et al. 2000, Mantoglou 2003) στη μεγιστοποίηση της οποίας στοχεύει το πρόγραμμα βελτιστοποίησης
- η συγκέντρωση άλατος με στόχο την ελαχιστοποίησή του (Das and Datta 1999)
- το κόστος άντλησης (Ahfeld and Sawyer 1990, Wang and Ahlfeld 1994, Emch and Yeh 1998)
- η θέση των φρεάτων (Wang and Ahlfeld 1994)

Η ύπαρξη περισσότερων της μίας αντικειμενικής συνάρτησης οδηγεί σε βελτιστοποίηση πολλαπλών σκοπών - multiobjective optimization (Shamir et al. 1984, Emch and Yeh 1998, Das and Datta 1999). Οι Emch and Yeh (1998) κατά τη σύνταξη του προβλήματος βελτιστοποίησης στοχεύουν τόσο στην ελαχιστοποίηση του κόστους όσο και στην ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ποσότητας θαλασσινού νερού. Οι Das and Datta (1999) ορίζουν τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις με στόχο:

(α) τη μεγιστοποίηση της άντλησης ορισμένων φρεάτων,

(β) την ελαχιστοποίηση της συγκέντρωσης άλατος στις παραπάνω θέσεις των φρεάτων και

(γ) την ελαχιστοποίηση της άντλησης κάποιων άλλων φρεάτων.

Όλα τα προαναφερόμενα άρθρα εστιάζονται κυρίως στη βελτιστοποίηση των παροχών άντλησης σε δεδομένες θέσεις φρεάτων. Οι Gorelick et al. (1984) και Wang and Ahlfeld (1994) επεκτείνουν το πρόβλημα και στον εντοπισμό των κατάλληλων θέσεων για τη λειτουργία των γεωτρήσεων. Οι περιοριστικές διατάξεις μπορούν να αφορούν στη μέγιστη και ελάχιστη ποσότητα άντλησης (Gorelick et al. 1984, Ahlfeld and Sawyer 1990, Wang and Ahlfeld 1994, Hallaji and Yazicigil 1996, Emch and Yeh 1998, Das and Datta 1999, Cheng et al. 2000), στη θέση του ποδιού της αλάτινης σφήνας (Cheng et al. 2000, Mantoglou 2003), στη μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση του πιεζομετρικού φορτίου στις θέσεις άντλησης (Gorelick et al. 1984, Hallaji and Yazicigil 1996, Emch and Yeh 1998, Das and Datta 1999), στην τιμή δυναμικού στις θέσεις άντλησης (Mantoglou 2003), στη συγκέντρωση άλατος (Gorelick et al. 1984, Wang and Ahlfeld 1994, Das and Datta 1999, Kourakos and Mantoglou 2009).

5.3. Υπολογισμός Κρίσιμης Άντλησης για Υδροφορέα 7 km x 3 km

Σε αρχική φάση, εξετάζεται ο παράκτιος περιορισμένος υπόγειος υδροφορέας διαστάσεων 7 km x 3 km, δηλαδή ο ίδιος υδροφορέας που εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για την εύρεση σφήνας χωρίς την παρουσία πηγαδιού άντλησης. Επιλέγεται να επιτευχθεί η μέγιστη παροχή άντλησης μέσω δοκιμαστικών τιμών παροχών άντλησης σε κάθε θέση, ως ποσοστό της πλευρικής τροφοδοσίας, που είναι ίση με 1.250 m³/day. Με αυτό τον τρόπο γίνονται δοκιμές για διάφορες τιμές, ώσπου να βρεθεί η κρίσιμη τιμή παροχής άντλησης για την οποία το πηγάδι στη δεδομένη θέση δεν υφαλμυρώνεται και αποτελεί τη κρίσιμη παροχή άντλησης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών.

5.3.1. Υπολογισμός κρίσιμης άντλησης με θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) κατά Mantoglou (2003)

Στη συγκεκριμένη παράγραφο, εξετάζεται το πρόβλημα της εύρεσης κρίσιμης παροχής άντλησης για δεδομένη θέση φρέατος στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας κατά Mantoglou (2003). Η θεώρηση αυτή, τροποποιημένη για την παρουσία φρέατος, εξετάστηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο και η διαφορά της από την λύση του Strack (1976) είναι το γεγονός ότι ο Strack (1976) θεωρεί μόνο το όριο της θάλασσας ενώ αγνοεί τα πλευρικά όρια.

Αντίθετα, ο Mantoglou (2003) επέκτεινε το πρόβλημα ώστε να περιλαμβάνει τα πλευρικά όρια και να επιλύει συστήματα πεπερασμένων διαστάσεων. Επομένως, σε επόμενη φάση που γίνεται η εξέταση υδροφορέα με αύξηση πλευρικών ορίων έχει

ενδιαφέρον να παρατηρηθεί εάν θα συγκλίνουν σε μεγαλύτερο βαθμό οι δύο θεωρήσεις.

Η προσομοίωση της κίνησης του αλμυρού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα γίνεται με τη χρήση λογισμικού HydroGeoSphere. Χρησιμοποιείται η ίδια διαδικασία που αναπτύχθηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά με κάποιες τροποποιήσεις, ώστε στον κώδικα να συμπεριληφθεί το πηγάδι άντλησης με τις ιδιότητές του. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τη διαδικασία που εκτελείται:

Βήμα 1. Σύνταξη κώδικα σε αρχείο με κατάληξη .mprops

Όπως αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο δίνονται αρχικές τιμές για ιδιότητες του υδροφορέα. Δηλώνεται ότι ο υδροφορέας είναι ισότροπος, δηλαδή σε κάθε σημείο του η διαπερατότητα είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$). Η τιμή του K εκφράζει την ευκολία που ένα ρευστό ρέει μέσα στους πόρους του πορώδους μέσου και εξαρτάται από τη φύση και τις ιδιότητές του. Δίνοντας τον ορισμό αυτό, αυτόματα θεωρείται ότι η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K είναι η ίδια πρακτικά σε όλη την έκταση του πορώδους μέσου.

Η τιμή που δίνεται στην υδραυλική αγωγιμότητα στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι $K = 10 \text{ m/day}$, αφού θεωρείται ότι αποτελεί την πιο αντιπροσωπευτική τιμή για τον υδροφορέα που εξετάζεται. Η τιμή αυτή παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια υπολογισμών. Εξάλλου, μετά τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, έχει διαπιστωθεί ήδη το πώς και πόσο επηρεάζει η αλλαγή της υδραυλικής αγωγιμότητας τη θέση της σφήνας. Έχοντας σταθερή την τιμή K είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των μοντέλων. Επίσης, δηλώνεται η τιμή του πορώδους του υδροφορέα που εξετάζεται, που με βάση τις ιδιότητες του υδροφορέα και τις απαιτήσεις του προβλήματος, ορίζεται η τιμή 0.2, η οποία είναι αμετάβλητη κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Τέλος, ορίζεται η ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφορέα που εξετάζεται ίση με $1.e-4$, δηλαδή $1.0 * 10^{-4} [L^{-1}]$.

Βήμα 2. Ορισμός πηγαδιού και ιδιοτήτων του σε αρχείο

Η διαφορά με την προηγούμενη διαδικασία είναι το γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση συμπεριλαμβάνεται στον κώδικα επίλυσης της προσομοίωσης του νερού και της εύρεσης της αλμυρής σφήνας το πηγάδι άντλησης και οι ιδιότητές του. Συγκεκριμένα, δημιουργείται αρχείο που περιλαμβάνει τη θέση του πηγαδιού σε X , Y άξονες. Εφόσον επιλέγεται να υπάρχει μόνο ένα πηγάδι άντλησης κάθε φορά, επιλέγεται αυτό να βρίσκεται στο κέντρο του υδροφορέα ως προς τον άξονα Y , επομένως σε αυτή την περίπτωση στη θέση $Y = 1.500 \text{ m}$, ενώ επιλέγονται διαδοχικά οι θέσεις $X = 1.000, 2.000, 3.000 \text{ m}$.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επιλέγονται δοκιμαστικές τιμές για την παροχή άντλησης και γίνονται δοκιμές ώπου να βρεθεί η τιμή εκείνη που αν αυξηθεί η παροχή, το πηγάδι υφαλμυρώνεται. Επιλέγεται η τιμή της παροχής άντλησης να είναι ποσοστό της πλευρικής τροφοδοσίας, ώστε να γίνουν οι συγκρίσεις μεταξύ των

μοντέλων πιο κατανοητές. Ανάλογα με τη δοκιμή, μεταβάλλονται οι τιμές της θέσης X και της παροχής άντλησης.

Βήμα 3. Σύνταξη κώδικα σε αρχείο με κατάληξη .grok

Αρχικά ορίζεται και παράγεται ο κানাβος που θα αναπαριστά από εδώ και πέρα τον εξεταζόμενο υδροφορέα (Grid generation). Για τη sharp θεώρηση, ορίζεται υδροφορέας διαστάσεων 7 km x 3 km (με αφετηρία το 0 σε κάθε άξονα), ενώ η διακριτοποίηση γίνεται ανά 20 m, ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Σε όλες τις δοκιμές η σειρά εντολών παραμένει αμετάβλητη, αν και η διακριτοποίηση σε αυτή τη θεώρηση δεν έχει σημασία στο τελικό εξαγόμενο αποτέλεσμα.

Έπειτα, επιλέγονται οι οριακές συνθήκες για τη ροή, όπως αναπτύχθηκε σε ειδική παράγραφο της εργασίας (όρια πρώτης και δεύτερης συνθήκης). Επιλέγεται αρχικά το σύνολο των κόμβων και δίνεται αρχικό υδραυλικό φορτίο ίσο με το 0. Σε επόμενο σημείο, επιλέγονται οι κόμβοι στην πλευρά του υδροφορέα που βρίσκεται σε επαφή με τη θάλασσα. Σε εκείνη την πλευρά δηλώνεται συγκεκριμένο υδραυλικό φορτίο που αφορά τις οριακές συνθήκες ροής (Flow-Boundary conditions) για τους κόμβους αυτούς, ίσο με 0. Τέλος, επιλέγεται η αντίθετη πλευρά που τροφοδοτείται με πλευρική παροχή και ορίζεται η πλευρική τροφοδοσία στα 1.250 m³/day, συνυπολογίζοντας το πλάτος του (3.000 m) και το βάθος (50 m) του υδροφορέα.

Βήμα 4. Εκτέλεση λογισμικού Grok.

Βήμα 5. Εκτέλεση του λογισμικού HydroGeoSphere

Βήμα 6. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων με λογισμικό TECPLOT

Βήμα 7. Εύρεση σφήνας με τη χρήση MATLAB

Επειδή απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια από την εύρεση της σφήνας με τη βοήθεια της γραφικής απεικόνισης, συντάχθηκε εκ νέου κώδικας σε περιβάλλον MATLAB, ώστε να παρουσιάζεται το δυναμικό σε όλους τους κόμβους του υδροφορέα, και να συμπεριλαμβάνει στη θεώρηση την ύπαρξη πηγαδιού, σύμφωνα με τον κানাβο που τον προσομοιάζει από τον ορισμό του στο "Grok".

Επειδή ο εξεταζόμενος ρύπος είναι το αλάτι, σύμφωνα με το πάχος και το λόγο πυκνότητας για περιορισμένους υδροφορείς, το δυναμικό που αντιστοιχεί στην αντίστοιχη ζώνη υφαλμύρωσης του υδροφορέα, δηλαδή εκείνη η τιμή δυναμικού για την οποία ο υδροφορέας θεωρείται ότι έχει υφαλμυρωθεί, είναι ίσο με $\Phi_{toe} = 31.25m^2$. Επομένως, στον κώδικα που συντάσσεται, δίνεται εντολή να "σαρώνει" το πρόγραμμα τον κানাβο δυναμικού για την τιμή αυτή και να βρίσκει τη ζώνη σημείων που αντιστοιχούν σε τιμή δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$.

Όσον αφορά τους περιορισμούς που τίθενται, προκειμένου να αποφευχθεί η υφαλμύρωση του φρέατος ελέγχεται η θέση του ποδιού της αλάτινης σφήνας κατά

μήκος της γραμμής του καννάβου που διέρχεται από το κελί του φρέατος. Το πόδι της αλάτινης σφήνας δεν πρέπει να προσεγγίσει το πηγάδι:

$$x_{ii} \leq x_{wi} \quad (6.1)$$

όπου x_i : η απόσταση του ποδιού της αλάτινης σφήνας από την ακτή

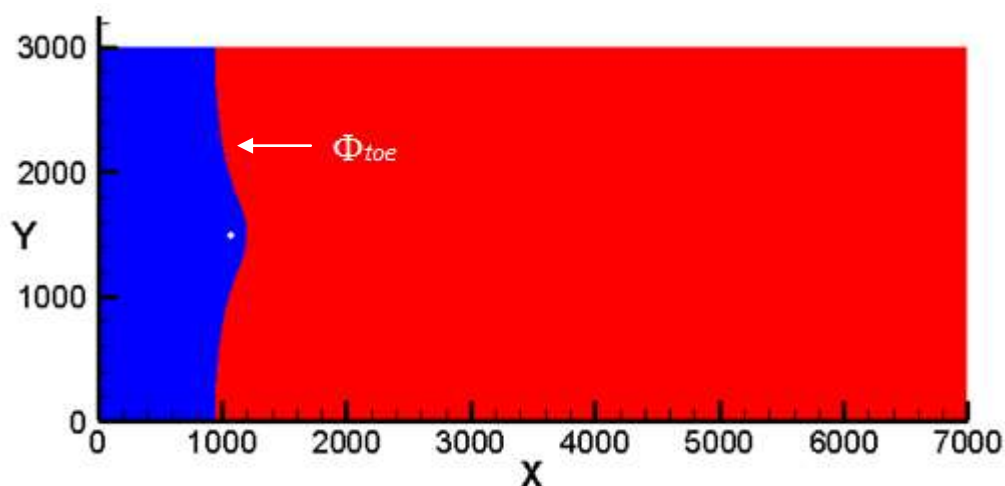
x_w : η απόσταση του πηγαδιού από την ακτή

Με βάση αυτό τον περιορισμό ελέγχεται αν η θέση της σφήνας έχει προσεγγίσει το πηγάδι. Εφόσον έχει φτάσει τη θέση του πηγαδιού ή την έχει ξεπεράσει, ελέγχεται εκ νέου με μικρότερη τιμή παροχής άντλησης, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση, και επαναλαμβάνεται η διαδικασία από την αρχή.

Πηγάδι άντλησης στη θέση $X = 1.000 \text{ m}$, $Y = 1.500 \text{ m}$

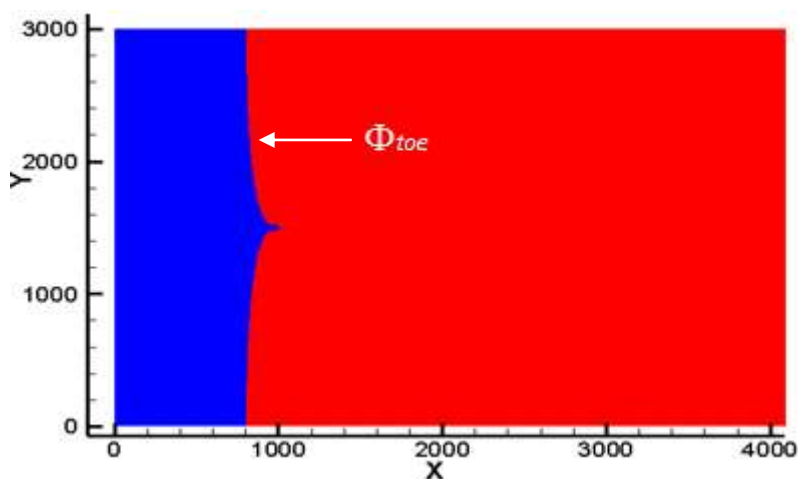
Στο κομμάτι αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία εύρεσης της μέγιστης δυνατής παροχής άντλησης από πηγάδι στη θέση $(X,Y) = (1000,1500) \text{ m}$. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται και στις άλλες περιπτώσεις όπου παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα.

Αρχικά επιλέχθηκε η τιμή παροχής άντλησης ίση με $375 \text{ m}^3/\text{day}$ που αντιστοιχεί σε ποσοστό 30% της πλευρικής τροφοδοσίας του υδροφορέα που είναι ίση με $1250 \text{ m}^3/\text{day}$. Ακολουθήθηκαν τα βήματα που περιγράφονται παραπάνω και από την επίλυση σε περιβάλλον MATLAB προέκυψε ότι η θέση της σφήνας ήταν στα $1.201,3 \text{ m}$, δηλαδή η αλμυρή σφήνα όχι μόνο είχε προσεγγίσει το πηγάδι άντλησης στα 1.000 m , αλλά το είχε ξεπεράσει κατά 200 m περίπου. Η δισδιάστατη απεικόνιση της κατάστασης με την βοήθεια του λογισμικού TECPLOT δείχνει ξεκάθαρα την θέση της σφήνας σε σχέση με τη θέση του φρέατος:



Εικόνα 5.2. Θέση της αλμυρής σφήνας για παροχή άντλησης $375 \text{ m}^3/\text{day}$ πηγαδιού στη θέση $(X,Y) = (1000,1500) \text{ m}$

Στην εικόνα με μπλε χρώμα απεικονίζεται η ζώνη $\Phi_{toe} = 31.25m^2$ για την οποία το πηγάδι θεωρείται υφαλμυρισμένο, επομένως είναι ξεκάθαρο ότι η αλμυρή σφήνα έχει ξεπεράσει τη θέση του φρέατος και αντλείται πλέον θαλασσινό νερό από αυτή τη θέση. Γίνονται δοκιμές για μικρότερες τιμές της παροχής άντλησης μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, όπως για παροχή ίση με $125 m^3/day$, δηλαδή ποσοστό 10% της πλευρικής τροφοδοσίας. Παρατηρείται ότι μετά τους υπολογισμούς και την προσομοίωση ροής, η θέση της σφήνας φτάνει στα 1016,3 m, άρα συνεχίζει να είναι υφαλμυρισμένος ο υδροφορέας, όπως φαίνεται παρακάτω:

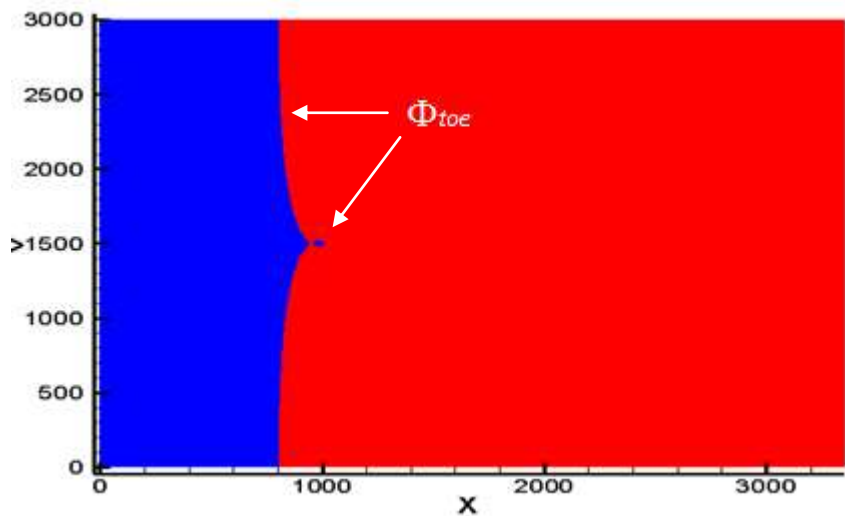


Εικόνα 5.3. Θέση αλμυρής σφήνας για παροχή $125 m^3/day$ στη θέση (1000,1500) m

Όπως φαίνεται από την εικόνα, το δυναμικό $\Phi_{toe} = 31.25m^2$ έχει ξεπεράσει μόλις το πηγάδι άντλησης, επομένως η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στη κρίσιμη που αναζητείται. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον το σχήμα της κίνησης της ροής, καθώς σε αντίθεση με την προηγούμενη κατάσταση, μια αιχμηρή "μύτη" αλμυρού νερού περνάει το όριο των 1000 m, ενώ κοντά στα πλευρικά όρια παρατηρείται ότι δεν έχει φτάσει ακόμα το όριο των 800 m, γεγονός που συνάδει με την συμπεριφορά του θαλασσινού νερού στο εσωτερικό παράκτιων υπόγειων υδροφορέων από τη βιβλιογραφία.

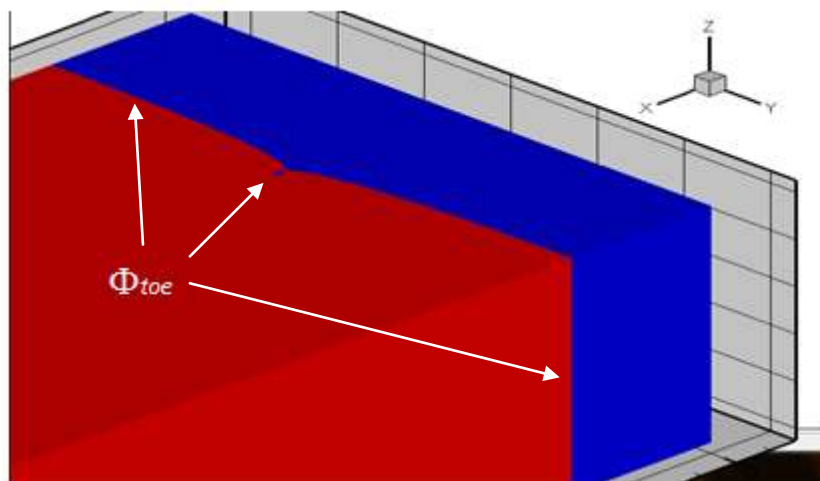
Γίνεται δοκιμή για τιμή $124 m^3/day$ και $123 m^3/day$ που αντιστοιχούν σε ποσοστό 9,9% και 9,8% της πλευρικής τροφοδοσίας του υδροφορέα αντίστοιχα και προκύπτει η θέση της σφήνας στα 1015,9 και 1015,4 m αντίστοιχα. Όμως, για παροχή άντλησης $122 m^3/day$ που αντιστοιχεί σε ποσοστό 9,76% της πλευρικής τροφοδοσίας, ενώ ο κώδικας σε περιβάλλον MATLAB δείχνει ότι η θέση της σφήνας είναι στα 952,5 m, η απεικόνιση σε TECPLOT αποκαλύπτει ότι ενώ η σφήνα βρίσκεται όντως στη θέση αυτή, στη θέση του πηγαδιού έχει σχηματιστεί μια κυκλική ζώνη δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$ που αντιστοιχεί σε υφαλμυρισμένο υδροφορέα. Αυτό οφείλεται στην ευαισθησία του μοντέλου, καθώς όπως φαίνεται για πολύ μικρή αύξηση της άντλησης, το πηγάδι αντλεί αλμυρό νερό, επομένως η δυναμική κατάσταση ισορροπίας είναι ευμετάβλητη.

Από την εικόνα 5.4 φαίνεται ξεκάθαρα το παραπάνω φαινόμενο, επομένως, αν και η θέση της σφήνας βρίσκεται στα 950 m, δεν μπορεί να γίνει δεκτή η τιμή της παροχής άντλησης αφού ουσιαστικά το πηγάδι αντλεί αλμυρό νερό.



Εικόνα 5.4. Θέση της αλμυρής σφήνας για παροχή άντλησης $122 \text{ m}^3/\text{day}$ πηγαδιού στη θέση $(X,Y) = (1000,1500) \text{ m}$

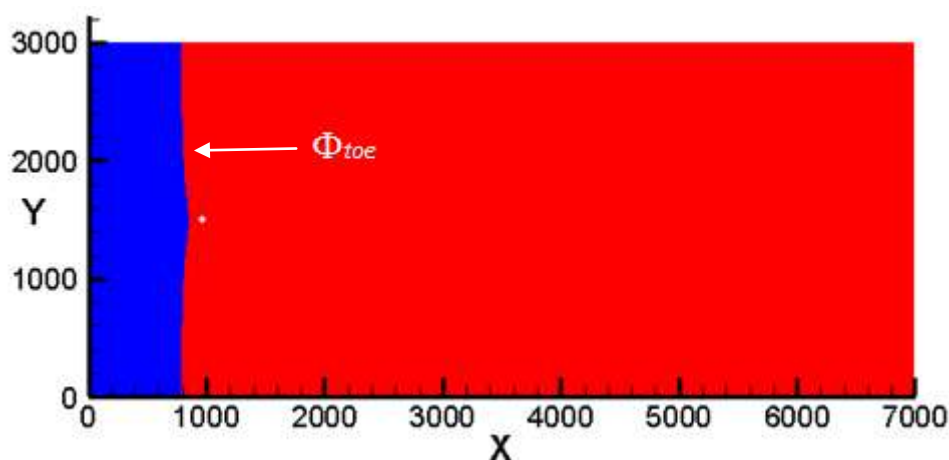
Αυτό φαίνεται και στην τρισδιάστατη απεικόνιση του υδροφορέα σε λογισμικό TECPLOT, όπου αν και η θέση της σφήνας είναι πιο πίσω από τα 1.000 m κοντά στη θέση του πηγαδιού, παρατηρείται μια κυλινδρική ζώνη δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25 \text{ m}^2$, της οποίας η ύπαρξη οφείλεται στους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 5.5. 3-D απεικόνιση του υφαλμυρισμένου υδροφορέα.

Επομένως, συνεχίζονται οι δοκιμές για μικρότερες τιμές άντλησης, ώστε να μην συμβαίνει το φαινόμενο αυτό. Μετά από αρκετές δοκιμές προέκυψε ότι για παροχή άντλησης $88 \text{ m}^3/\text{day}$ (ποσοστό 7,05% της πλευρικής τροφοδοσίας του

υδροφορέα) δεν συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο και η θέση της σφήνας προκύπτει στα 856 m.



Εικόνα 5.6. Θέση αλμυρής σφήνας για παροχή άντλησης $88 \text{ m}^3/\text{day}$ πηγαδιού στη θέση $(X, Y) = (1000, 1500) \text{ m}$

Με την άσπρη κουκίδα απεικονίζεται η θέση του πηγαδιού άντλησης. Όπως είναι φανερό, η σφήνα δεν έχει πλησιάσει το πηγάδι, ενώ δεν παρατηρείται ζώνη δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25 \text{ m}^2$ στη θέση του πηγαδιού. Επομένως, για την θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) κατά Mantoglou (2003), για θέση πηγαδιού στα $X = 1.000 \text{ m}$, η κρίσιμη παροχή άντλησης για να μην υφαλμυρωθεί το πηγάδι άντλησης, δηλαδή όχι μόνο η ζώνη της αλμυρής σφήνας να μην έχει προσεγγίσει το πηγάδι, αλλά και να μην έχει δημιουργηθεί ζώνη δυναμικού Φ_{toe} στη θέση του πηγαδιού, είναι ίση με:

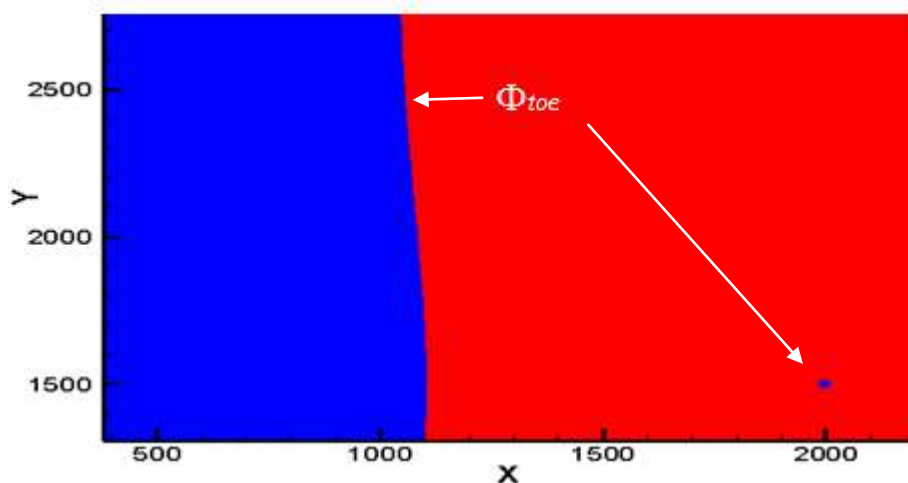
$$Q_{\max} = 88 \text{ m}^3/\text{day} = 7,05\% * Q_{\text{πλευρ.}} (= 1250 \text{ m}^3/\text{day})$$

Πηγάδι άντλησης στη θέση $X = 2.000 \text{ m}$, $Y = 1.500 \text{ m}$

Στο κομμάτι αυτό ακολουθείται η ίδια διαδικασία εύρεσης της μέγιστης δυνατής παροχής άντλησης από πηγάδι στη θέση $(X, Y) = (2000, 1500) \text{ m}$. Αρχικά επιλέχθηκε η τιμή παροχής άντλησης ίση με $625 \text{ m}^3/\text{day}$ που αντιστοιχεί σε ποσοστό 50% της πλευρικής τροφοδοσίας του υδροφορέα που είναι ίση με $1250 \text{ m}^3/\text{day}$. Ακολουθήθηκαν τα βήματα που περιγράφονται παραπάνω και από την επίλυση σε περιβάλλον MATLAB προέκυψε ότι η θέση της σφήνας ήταν στα 2.206,4 m, δηλαδή η αλμυρή σφήνα όχι μόνο είχε προσεγγίσει το πηγάδι άντλησης στα 1.000 m, αλλά το είχε ξεπεράσει κατά 100 m περίπου.

Γίνονται δοκιμές για μικρότερες τιμές της παροχής άντλησης μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, όμως παρατηρείται όμοιο φαινόμενο με την προηγούμενη περίπτωση. Για παράδειγμα, για παροχή άντλησης $375 \text{ m}^3/\text{day}$ που αντιστοιχεί σε ποσοστό 30% της πλευρικής τροφοδοσίας, ενώ ο κώδικας σε περιβάλλον MATLAB δείχνει ότι η θέση της σφήνας είναι στα 1105,2 m, η

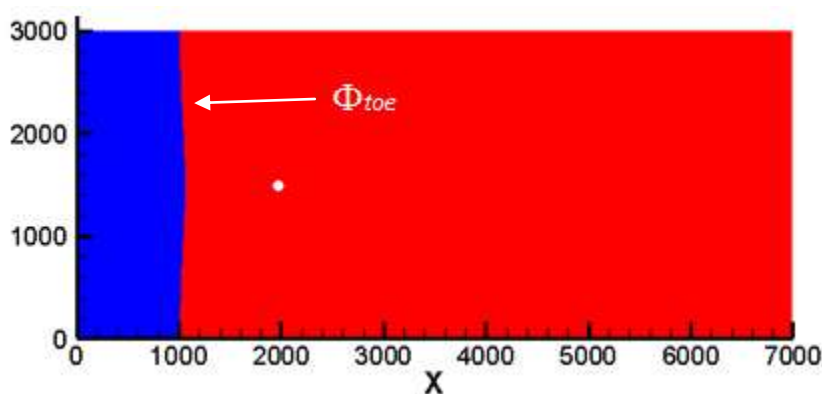
απεικόνιση σε TECPLOT αποκαλύπτει ότι ενώ η σφήνα βρίσκεται όντως στη θέση αυτή, στη θέση του πηγαδιού έχει σχηματιστεί μια κυκλική ζώνη δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$ που αντιστοιχεί σε υφαλμυρισμένο υδροφορέα.



Εικόνα 5.7. Θέση της αλμυρής σφήνας για παροχή άντλησης $375 \text{ m}^3/\text{day}$ πηγαδιού στη θέση $(X,Y) = (2000,1500) \text{ m}$

Από την εικόνα 5.7 φαίνεται ξεκάθαρα το παραπάνω φαινόμενο, επομένως, αν και η θέση της σφήνας βρίσκεται στα 1.100 m, δεν μπορεί να γίνει δεκτή η τιμή της παροχής άντλησης αφού ουσιαστικά πρόκειται για ασταθή κατάσταση και είναι πιθανόν να αντληθεί υφάλμυρο νερό αν υπάρξει κάποια ανομοιογένεια του υδροφορέα ή μικρή μείωση της τροφοδοσίας ή αύξησης της άντλησης.

Μετά από αρκετές δοκιμές προέκυψε ότι για παροχή άντλησης $345 \text{ m}^3/\text{day}$, δηλαδή ποσοστό 27,6% της πλευρικής τροφοδοσίας, δεν συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο και η θέση της σφήνας στα 1.063,2 m.



Εικόνα 5.8. Θέση αλμυρής σφήνας για παροχή άντλησης $345 \text{ m}^3/\text{day}$ πηγαδιού στη θέση $(X,Y) = (2000,1500) \text{ m}$

Με την άσπρη κουκίδα απεικονίζεται η θέση του πηγαδιού άντλησης. Όπως είναι φανερό, η σφήνα δεν έχει πλησιάσει το πηγάδι, ενώ δεν παρατηρείται ζώνη

δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$ στη θέση του πηγαδιού. Επομένως, για την θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) κατά Mantoglou (2003), για θέση πηγαδιού στα $X = 2.000$ m, η κρίσιμη παροχή άντλησης είναι ίση με:

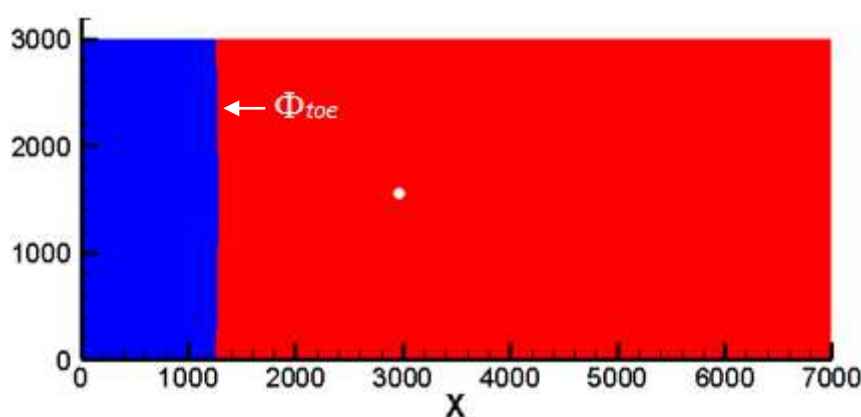
$$Q_{max} = 345 \text{ m}^3/\text{day} = 27,6\% * Q_{\text{πλευρ.}}$$

Πηγάδι άντλησης στη θέση $X = 3.000$ m, $Y = 1.500$ m

Στο κομμάτι αυτό ακολουθείται η ίδια διαδικασία εύρεσης της μέγιστης δυνατής παροχής άντλησης από πηγάδι στη θέση $(X,Y) = (3000,1500)$ m. Αρχικά επιλέχθηκε η τιμή παροχής άντλησης ίση με $600 \text{ m}^3/\text{day}$ που αντιστοιχεί σε ποσοστό 48% της πλευρικής τροφοδοσίας του υδροφορέα που είναι ίση με $1250 \text{ m}^3/\text{day}$. Ακολουθήθηκαν τα βήματα που περιγράφονται παραπάνω και από την επίλυση σε περιβάλλον MATLAB προέκυψε ότι η θέση της σφήνας ήταν στα 1460,2 m, αλλά η απεικόνιση σε TECPLOT αποκαλύπτει ότι ενώ η σφήνα βρίσκεται όντως στη θέση αυτή, στη θέση του πηγαδιού έχει σχηματιστεί μια κυκλική ζώνη δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$ που αντιστοιχεί σε υφαλμυρισμένο υδροφορέα, όπως παρατηρήθηκε στις άλλες δύο περιπτώσεις.

Επομένως συνεχίζονται οι δοκιμές για μικρότερες τιμές άντλησης, ώστε να μην συμβαίνει το φαινόμενο αυτό. Μετά από αρκετές δοκιμές προέκυψε ότι για παροχή άντλησης $515 \text{ m}^3/\text{day}$, δηλαδή ποσοστό 41,2% της πλευρικής τροφοδοσίας, δεν συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο και η θέση της σφήνας στα 1.286 m. Με την άσπρη κουκίδα στην εικόνα 5.9 είναι η θέση του πηγαδιού άντλησης. Η σφήνα δεν έχει πλησιάσει το πηγάδι, ενώ δεν παρατηρείται ζώνη δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$ στη θέση του πηγαδιού. Επομένως, για την θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) κατά Mantoglou (2003), για θέση πηγαδιού στα $X = 3.000$ m, η κρίσιμη παροχή άντλησης για να μην υφαλμυρωθεί το πηγάδι άντλησης είναι ίση με:

$$Q_{max} = 515 \text{ m}^3/\text{day} = 41,2\% * Q_{\text{πλευρ.}}$$

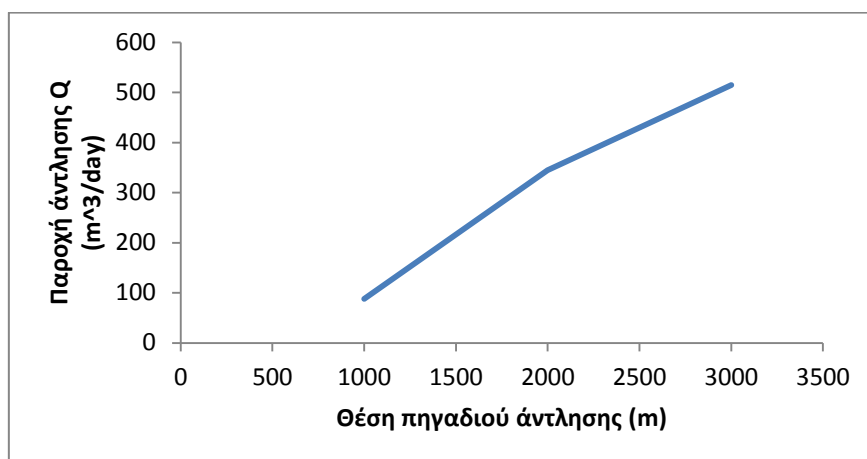


Εικόνα 5.9. Θέση αλμυρής σφήνας για παροχή άντλησης $515 \text{ m}^3/\text{day}$ πηγαδιού στη θέση $(X,Y) = (3000,1500)$ m

Συνολικά για αυτή τη θεώρηση η εικόνα των αποτελεσμάτων συνοψίζεται στο παρακάτω διάγραμμα βάσει του πίνακα 5.1, όπου είναι αισθητή η αύξηση της παροχής άντλησης όσο αυξάνεται η απόσταση του πηγαδιού άντλησης από την ακτή, γεγονός που είναι απόλυτα λογικό με βάση τις αρχές της κίνησης νερού:

Απότομη Διεπιφάνεια (Mantoglou)		
Θέση πηγαδιού άντλησης X (m)	Μέγιστη παροχή άντλησης Q (m ³ /day)	Ποσοστό πλευρικής τροφοδοσίας (%)
1000	88	7,04
2000	345	27,6
3000	515	41,2

Πίνακας 5.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα θεώρησης απότομης διεπιφάνειας κατά Mantoglou (2003).



Διάγραμμα 5.1. Απεικόνιση αποτελεσμάτων θεώρησης απότομης διεπιφάνειας κατά Mantoglou (2003).

5.3.2. Υπολογισμός κρίσιμης άντλησης με θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) κατά Strack (1976)

Στη συγκεκριμένη παράγραφο, εξετάζεται το πρόβλημα της εύρεσης κρίσιμης παροχής άντλησης για δεδομένη θέση φρέατος στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας κατά Strack (1976). Η προσομοίωση της κίνησης του αλμυρού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα γίνεται με τη χρήση κώδικα που αναπτύσσεται σε περιβάλλον MATLAB.

Συγκεκριμένα, δίνονται αρχικές τιμές για ιδιότητες του υδροφορέα. Δηλώνεται ότι ο υδροφορέας είναι ισότροπος και η τιμή που δίνεται στην υδραυλική αγωγιμότητα στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι $K = 10$ m/day, αφού θεωρείται ότι αποτελεί την πιο αντιπροσωπευτική τιμή για τον υδροφορέα που εξετάζεται. Η τιμή αυτή παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια υπολογισμών. Έχοντας σταθερή την τιμή K είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των μοντέλων. Ορίζεται και παράγεται ο

κάνναβος που θα αναπαριστά από εδώ και πέρα τον εξεταζόμενο υδροφορέα (Grid generation). Για τη sharp θεώρηση, ορίζεται υδροφορέας διαστάσεων 7 km x 3 km, ενώ η διακριτοποίηση γίνεται ανά 50 m, ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Ορίζεται η πλευρική τροφοδοσία στα 1.250 m³/day, συνυπολογίζοντας το πλάτος του (3.000 m) και το βάθος (50 m) του υδροφορέα.

Όσον αφορά την ύπαρξη πηγαδιού, εφόσον επιλέγεται να υπάρχει μόνο ένα πηγάδι άντλησης κάθε φορά, επιλέγεται αυτό να βρίσκεται στο κέντρο του υδροφορέα ως προς τον άξονα Y, επομένως σε ατή την περίπτωση στη θέση Y = 1.500 m, ενώ επιλέγονται διαδοχικά οι θέσεις X = 1.000, 2.000, 3.000 m. Στον κώδικα που συντάσσεται επιλύεται συνάρτηση, συνυπολογίζοντας τους περιορισμούς που αναφέρονται παρακάτω και τις ιδιότητες του υδροφορέα και της κίνησης του νερού, η οποία δίνει ως λύσεις τις μέγιστες παροχές άντλησης, ώστε να μην αντλεί θαλασσινό νερό το πηγάδι.

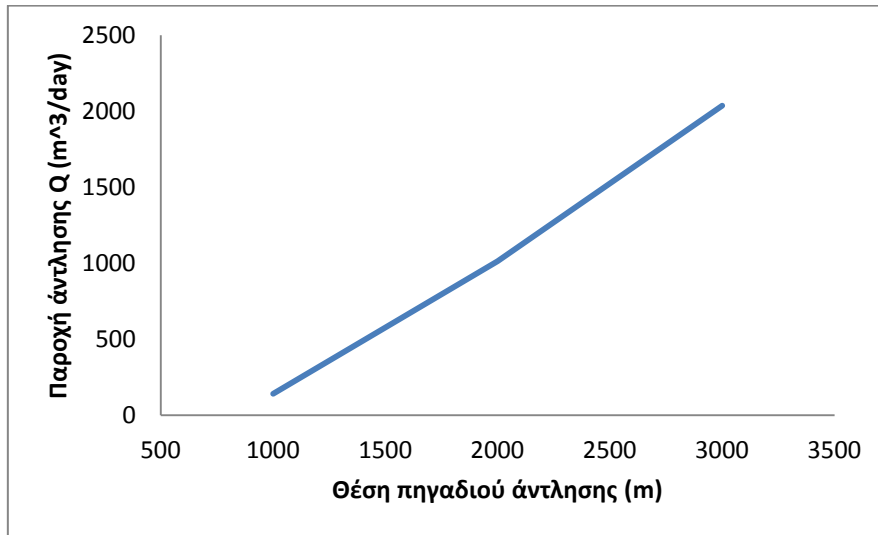
Επειδή ο εξεταζόμενος ρύπος είναι το αλάτι, σύμφωνα με το πάχος και το λόγο πυκνότητας για περιορισμένο υδροφορέα, το δυναμικό που αντιστοιχεί στην αντίστοιχη ζώνη υφαλμύρωσης του υδροφορέα, δηλαδή εκείνη η τιμή δυναμικού για την οποία ο υδροφορέας θεωρείται ότι έχει υφαλμυρωθεί, είναι $\Phi_{toe} = 31.25m^2$. Επομένως, στον κώδικα που συντάσσεται, δίνεται εντολή να "σαρώνει" το πρόγραμμα τον κάνναβο δυναμικού για την τιμή αυτή και να βρίσκει τη ζώνη σημείων που αντιστοιχούν σε τιμή δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$.

Όσον αφορά τους περιορισμούς που τίθενται, προκειμένου να αποφευχθεί η υφαλμύρωση του φρέατος ελέγχεται η θέση του ποδιού της αλάτινης σφήνας κατά μήκος της γραμμής του καννάβου που διέρχεται από το κελί του φρέατος. Το πόδι της αλάτινης σφήνας δεν πρέπει να προσεγγίσει το πηγάδι, όπως ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο ($x_{ti} \leq x_{wi}$).

Τελικά, η επίλυση της συνάρτησης δίνει τα αποτελέσματα του πίνακα 5.2 και απεικονίζονται στο διάγραμμα 5.2. Όπως φαίνεται στην τρίτη γραμμή του πίνακα, για τη θέση X = 3.000 m, προκύπτει από την επίλυση παροχή άντλησης 2037,6 m³/day. Η θεώρηση Strack (1976), ως μοντέλο απότομης διεπιφάνειας, δίνει χαμηλές τιμές άντλησης για μικρές αποστάσεις πηγαδιών από την ακτή, αλλά από συγκεκριμένη θέση πηγαδιού και έπειτα, η τιμή της κρίσιμης άντλησης είναι μη ρεαλιστική με αποτέλεσμα να προκύπτουν αποτελέσματα άντλησης πολύ υψηλά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο Strack (1976) θεωρεί μόνο το όριο της ακτής και αγνοεί τα πλευρικά όρια, επομένως όσο οι αποστάσεις πηγαδιού από την ακτή αυξάνονται, οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου είναι μη ρεαλιστικές. Για λόγους παρουσίασης επιλέγεται να απεικονίζεται η συγκεκριμένη τιμή για να φανερωθεί η αδυναμία αυτή του μοντέλου Strack (1976).

Απότομη Διεπιφάνεια (Strack 1976)		
Θέση πηγαδιού άντλησης X (m)	Μέγιστη παροχή άντλησης Q (m ³ /day)	Ποσοστό πλευρικής τροφοδοσίας (%)
1000	142,7	11,45
2000	1.013,5	81,14
3000	2.036,5	162,9

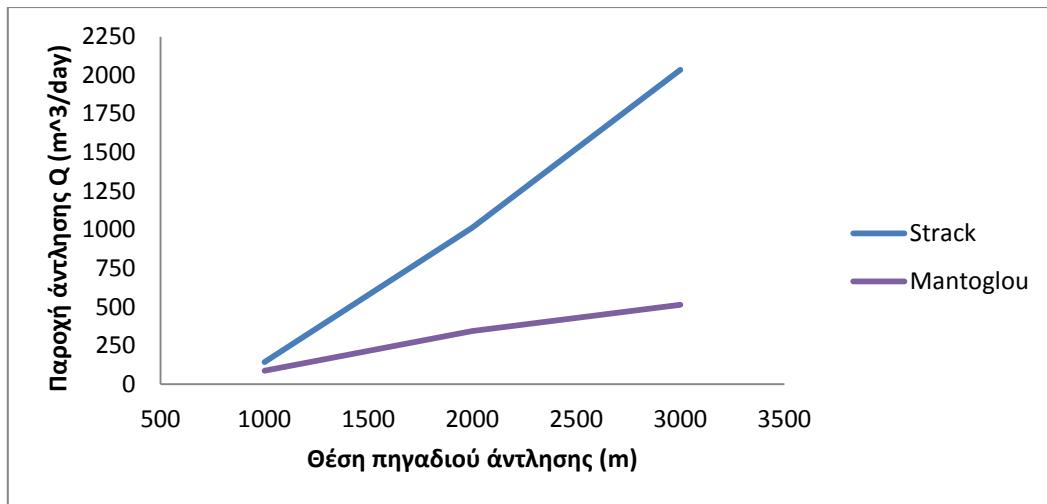
Πίνακας 5.2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα θεώρησης απότομης διεπιφάνειας κατά Strack (1976).



Διάγραμμα 5.2. Απεικόνιση αποτελεσμάτων θεώρησης απότομης διεπιφάνειας κατά Strack (1976).

Από τη σύγκριση των δύο μοντέλων που αφορούν την ίδια θεώρηση γενικότερα περί απότομης διεπιφάνειας μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού (sharp interface), παρατηρείται ότι στα συγκεκριμένα πλευρικά όρια, οι διαφορές των δύο μοντέλων είναι μεγάλες, αφού οι διαφορές μεταξύ των τιμών των παροχών άντλησεων αυξάνονται όσο αυξάνεται η απόσταση της θέσης του πηγαδιού από την ακτή.

Χαρακτηριστική είναι η εικόνα του διαγράμματος 5.3, όπου απεικονίζεται η διαφορά των δύο μοντέλων, που είναι λογική καθώς η θεώρηση Strack (1976) θεωρεί μόνο το όριο της θάλασσας και αγνοεί τα πλευρικά όρια ενώ το μοντέλο κατά Mantoglou (2003) επέκτεινε το μοντέλο του Strack να περιλαμβάνει τα πλευρικά όρια που μειώνουν την παροχή, ώστε να επιλύονται και υδροφορείς πεπερασμένων διαστάσεων. Στις δοκιμές για υδροφορέα μεγαλύτερων πλευρικών ορίων οι διαφορές αυτές αναμένεται να μειωθούν, τουλάχιστον στις θέσεις πηγαδιού πιο κοντά στην ακτή.



Διάγραμμα 5.3. Απεικόνιση αποτελεσμάτων των μοντέλων sharp interface κατά Mantoglou (μωβ γραμμή) και Strack (μπλε γραμμή).

5.3.3. Υπολογισμός κρίσιμης άντλησης με θεώρηση υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας (variable density flow)

Στη συγκεκριμένη παράγραφο εξετάζεται το πρόβλημα της εύρεσης παροχής άντλησης για δεδομένη θέση φρέατος στη θεώρηση υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας. Η θεώρηση αυτή, τροποποιημένη για την παρουσία φρέατος, εξετάστηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αναλύθηκε η επίδραση των τιμών της εγκάρσιας και διαμήκουσ διασποράς σε συνδυασμό με την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στη θέση της αλάτινης σφήνας.

Η προσομοίωση της κίνησης του αλμυρού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα γίνεται με τη χρήση λογισμικού HydroGeoSphere. Χρησιμοποιείται η ίδια διαδικασία που αναπτύχθηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά με κάποιες τροποποιήσεις, ώστε στον κώδικα να συμπεριληφθεί το πηγάδι άντλησης με τις ιδιότητές του. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τη διαδικασία που εκτελείται:

Βήμα 1. Σύνταξη κώδικα σε αρχείο με κατάληξη .mprops

Δηλώνεται ότι ο υδροφορέας είναι ισότροπος, δηλαδή σε κάθε σημείο του η διαπερατότητα είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$). Η τιμή που δίνεται στην υδραυλική αγωγιμότητα στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι $K = 10$ m/day. Έχοντας σταθερή την τιμή K είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των μοντέλων. Επίσης, δηλώνεται η τιμή του πορώδους του υδροφορέα που εξετάζεται, που με βάση τις ιδιότητες του υδροφορέα και τις απαιτήσεις του προβλήματος, ορίζεται η τιμή 0.2, η οποία είναι αμετάβλητη κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Τέλος, ορίζεται η ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφορέα που εξετάζεται ίση με $1.0 \cdot 10^{-4}$ [L^{-1}].

Βήμα 2. Ορισμός πηγαδιού και ιδιοτήτων του σε αρχείο

Η διαφορά με την προηγούμενη διαδικασία είναι το γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση συμπεριλαμβάνεται στον κώδικα επίλυσης της προσομοίωσης του νερού και της εύρεσης της αλμυρής σφήνας το πηγάδι άντλησης και οι ιδιότητές του. Συγκεκριμένα, δημιουργείται αρχείο που περιλαμβάνει τη θέση του πηγαδιού σε X, Y άξονες. Εφόσον επιλέγεται να υπάρχει μόνο ένα πηγάδι άντλησης κάθε φορά, επιλέγεται αυτό να βρίσκεται στο κέντρο του υδροφορέα ως προς τον άξονα Y, επομένως σε αυτή την περίπτωση στη θέση $Y = 1.500$ m, ενώ επιλέγονται διαδοχικά οι θέσεις $X = 1.000, 2.000, 3.000$ m.

Επιλέγονται δοκιμαστικές τιμές για την παροχή άντλησης και γίνονται δοκιμές ώσπου να βρεθεί η τιμή εκείνη που αν αυξηθεί η παροχή, το πηγάδι υφαιμυρώνεται. Επιλέγεται η τιμή της παροχής άντλησης να είναι ποσοστό της πλευρικής τροφοδοσίας, ώστε να γίνουν οι συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων πιο κατανοητές. Ανάλογα με τη δοκιμή, μεταβάλλονται οι τιμές της θέσης X και της παροχής άντλησης.

Βήμα 3. Σύνταξη κώδικα σε αρχείο με κατάληξη .grok

Αρχικά ορίζεται και παράγεται ο κানাβος που θα αναπαριστά από εδώ και πέρα τον εξεταζόμενο υδροφορέα (Grid generation). Για τη sharp θεώρηση, ορίζεται υδροφορέας διαστάσεων 7 km x 3 km (με αφετηρία το 0 σε κάθε άξονα) και ορίζεται η πλευρική τροφοδοσία στα $1.250 \text{ m}^3/\text{day}$, συνυπολογίζοντας το πλάτος του (3.000 m) και το βάθος (50 m) του υδροφορέα.

Όσον αφορά την επιλογή των συντελεστών διασποράς, επιλέγονται δύο σετ τιμών για την καλύτερη και αποτελεσματικότερη ανάλυση και σύγκριση με άλλα μοντέλα. Ειδικότερα:

$$\frac{\text{συντελεστής εγκάρσιας διασποράς}}{\text{συντελεστής διαμήκους διασποράς}} = \frac{\alpha_L}{\alpha_T} = \left\{ \frac{20}{2}, \frac{50}{5} \right\} \quad (5.2)$$

Επίσης, ως αρχικές συνθήκες σε αυτή την περίπτωση ορίζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης κίνησης νερού που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του προηγούμενου κεφαλαίου, με απώτερο σκοπό την επίτευξη γρηγορότερων και κατάλληλων αποτελεσμάτων.

Σε αντίθεση με τις δοκιμές του προηγούμενου κεφαλαίου, όσον αφορά τον χρόνο πραγματοποίησης επαναλήψεων, ώστε να σταθεροποιηθεί η θέση της σφήνας με την πάροδο των χρόνων, τελικά διαπιστώνεται ότι σε αυτή την περίπτωση απαιτείται διάστημα 900-1000 χρόνων για να επιτευχθεί σταθερότητα και ισορροπία, λόγω της παρουσίας πηγαδιού άντλησης.

Βήμα 4. Εκτέλεση λογισμικού Grok.

Βήμα 5. Εκτέλεση του λογισμικού HydroGeoSphere

Βήμα 6. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων με λογισμικό TECPLOT

Βήμα 7. Εύρεση σφήνας με τη χρήση MATLAB

Επειδή απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια από την εύρεση της σφήνας με τη βοήθεια της γραφικής απεικόνισης, συντάχθηκε εκ νέου κώδικας σε περιβάλλον MATLAB, ώστε να παρουσιάζεται το δυναμικό σε όλους τους κόμβους του υδροφορέα, και να συμπεριλαμβάνει στη θεώρηση την ύπαρξη πηγαδιού, σύμφωνα με τον κάρναβο που τον προσομοιάζει από τον ορισμό του στο "Grok".

Επειδή ο εξεταζόμενος ρύπος είναι το αλάτι, η ισοχλώρια συγκέντρωσης 100 mg/L επιλέγεται ως όριο ποσιμότητας για το νερό σε διαχειριστικά προβλήματα παράκτιων υδροφορέων. Επομένως, στον κώδικα που συντάσσεται, δίνεται εντολή να "σαρώνει" το πρόγραμμα τον κάρναβο δυναμικού για την τιμή αυτή και να βρίσκει τη ζώνη σημείων που αντιστοιχούν σε τιμή 100 mg/L.

Όσον αφορά τους περιορισμούς που τίθενται, προκειμένου να αποφευχθεί η υφαλμύρωση του φρέατος ελέγχεται η θέση του ποδιού της αλάτινης σφήνας κατά μήκος της γραμμής του καννάβου που διέρχεται από το κελί του φρέατος. Το πόδι της αλάτινης σφήνας δεν πρέπει να προσεγγίσει το πηγάδι, άρα όπως αναλύθηκε προηγουμένως $x_i \leq x_{wi}$. Με βάση αυτό τον περιορισμό ελέγχεται αν η θέση της σφήνας έχει προσεγγίσει το πηγάδι. Εφόσον έχει φτάσει τη θέση του πηγαδιού ή την έχει ξεπεράσει, ελέγχεται εκ νέου με μικρότερη τιμή παροχής άντλησης, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση, και επαναλαμβάνεται η διαδικασία από την αρχή.

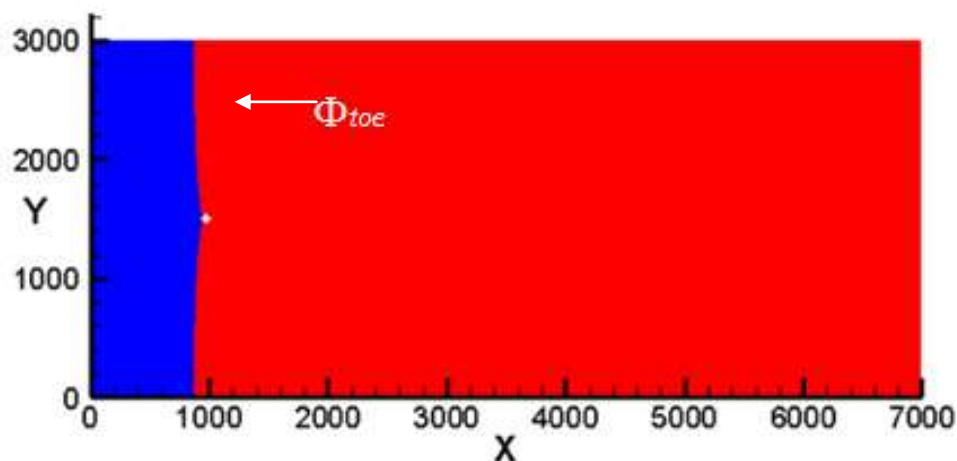
Πηγάδι άντλησης στη θέση $X = 1.000 \text{ m}$, $Y = 1.500 \text{ m}$

Στο κομμάτι αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία εύρεσης της μέγιστης δυνατής παροχής άντλησης από πηγάδι στη θέση $(X,Y) = (1000,1500) \text{ m}$. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται και στις άλλες περιπτώσεις όπου παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα.

1. $a_L = 20$, $a_T = 2$

Αρχικά εξετάζεται το πρώτο σετ συντελεστών διασποράς. Επιλέχθηκε η τιμή παροχής άντλησης ίση με $500 \text{ m}^3/\text{day}$ που αντιστοιχεί σε ποσοστό 40% της πλευρικής τροφοδοσίας του υδροφορέα που είναι ίση με $1250 \text{ m}^3/\text{day}$. Ακολουθήθηκαν τα βήματα που περιγράφονται παραπάνω και από την επίλυση σε περιβάλλον MATLAB προέκυψε ότι η θέση της σφήνας ήταν στα 1.021,8 m, επομένως είναι ξεκάθαρο ότι η αλμυρή σφήνα έχει ξεπεράσει τη θέση του φρέατος και αντλείται πλέον θαλασσινό νερό από αυτή τη θέση.

Γίνονται δοκιμές για μικρότερες τιμές της παροχής άντλησης μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Προκύπτει τελικά ότι για παροχή άντλησης $460 \text{ m}^3/\text{day}$ δεν συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο και η θέση της σφήνας προκύπτει στα 999,2 m, ενώ για παροχή $465 \text{ m}^3/\text{day}$ (ποσοστό 37,5% της πλευρικής τροφοδοσίας του υδροφορέα), η σφήνα φτάνει στα 1000 m, δηλαδή μόλις που υφαλμυρώνεται το πηγάδι και δεν είναι ανεκτή η τιμή.



Εικόνα 5.10. Θέση αλμυρής σφήνας για παροχή άντλησης $360 \text{ m}^3/\text{day}$ πηγαδιού στη θέση $(X, Y) = (1000, 1500) \text{ m}$

2. $\alpha_L = 50, \alpha_T = 5$

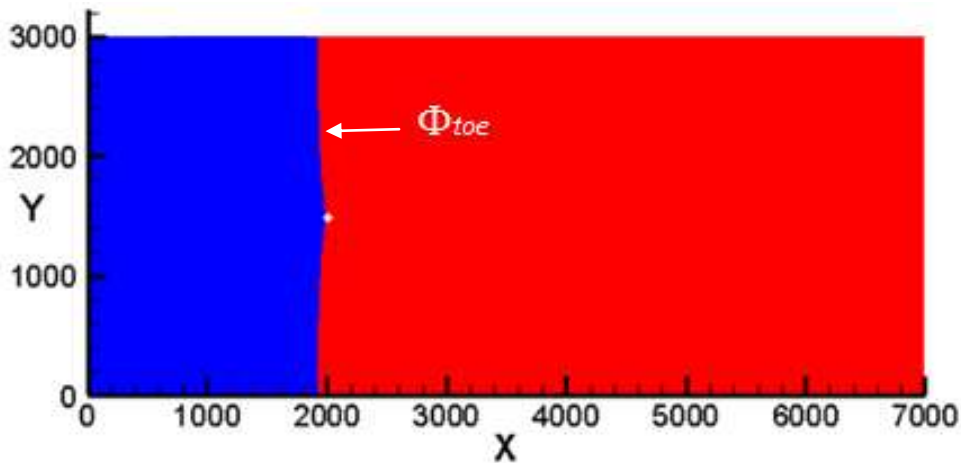
Σε επόμενη φάση εξετάζεται το δεύτερο σετ συντελεστών διασποράς. Επιλέχθηκε η τιμή παροχής άντλησης ίση με $460 \text{ m}^3/\text{day}$ που αντιστοιχεί σε ποσοστό 37% της πλευρικής τροφοδοσίας του υδροφορέα που είναι ίση με $1250 \text{ m}^3/\text{day}$. Ακολουθήθηκαν τα βήματα που περιγράφονται παραπάνω και από την επίλυση σε περιβάλλον MATLAB προέκυψε ότι η θέση της σφήνας ήταν στα 1.120 m.

Προκύπτει τελικά ότι για παροχή άντλησης $360 \text{ m}^3/\text{day}$ (ποσοστό 29% της πλευρικής τροφοδοσίας του υδροφορέα) δεν συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο και η θέση της σφήνας προκύπτει στα 999,5 m, ενώ για παροχή $365 \text{ m}^3/\text{day}$ (ποσοστό 29,5% της πλευρικής τροφοδοσίας του υδροφορέα), η σφήνα φτάνει στα 1000 m, δηλαδή μόλις που υφαλμυρώνεται το πηγάδι και δεν είναι ανεκτή η τιμή.

Παρατηρείται ότι σε αυτή την περίπτωση απαιτείται μικρότερη τιμή παροχής άντλησης για να υφαλμυρωθεί ο υδροφορέας. Αυτό είναι λογικό, καθώς από τα συμπεράσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, μεγαλύτερη τιμή συντελεστή εγκάρσιας διασποράς κυρίως σημαίνει ότι η σφήνα προχωράει περισσότερο στο εσωτερικό του υπόγειου υδροφορέα, επομένως αναμενόταν σε αυτό το σετ τιμών να για μικρότερη παροχή άντλησης να προχωράει περισσότερο η σφήνα.

Πηγάδι άντλησης στη θέση $X = 2.000 \text{ m}, Y = 1.500 \text{ m}$

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τις δοκιμές για τα δύο σετ τιμών των συντελεστών διασποράς. Προκύπτει έπειτα από διάφορες δοκιμές ότι στο σετ τιμών $\alpha_L/\alpha_T = 20/2$ για παροχή άντλησης ίση με $774 \text{ m}^3/\text{day}$ (που αντιστοιχεί σε ποσοστό 62%) η θέση της σφήνας είναι στα 1999,7 m, δηλαδή δεν ξεπερνάει τη θέση του φρέατος, όπως φαίνεται στην εικόνα:



Εικόνα 5.11. Θέση αλμυρής σφήνας για παροχή άντλησης $774 \text{ m}^3/\text{day}$ πηγαδιού στη θέση $(X, Y) = (2000, 1500) \text{ m}$

Αντίθετα, στο σετ τιμών συντελεστών διασποράς $\alpha_L/\alpha_T = 50/5$ για παροχή άντλησης ίση με $673 \text{ m}^3/\text{day}$ (που αντιστοιχεί σε ποσοστό 54%) η θέση της σφήνας είναι στα $1999,1 \text{ m}$.

Πηγάδι άντλησης στη θέση $X = 3.000 \text{ m}$, $Y = 1.500 \text{ m}$

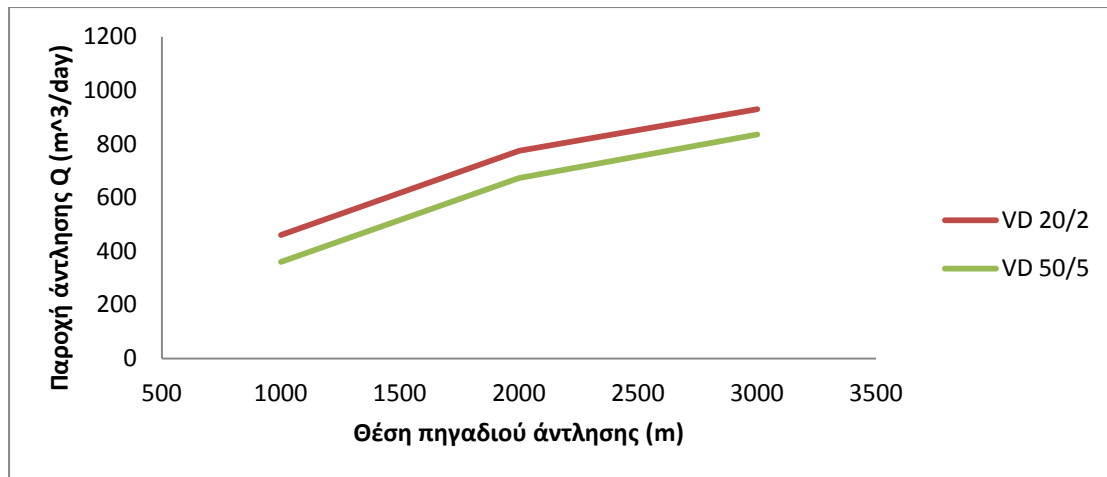
Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τις δοκιμές για τα δύο σετ τιμών των συντελεστών διασποράς. Προκύπτει έπειτα από διάφορες δοκιμές ότι στο σετ τιμών $\alpha_L/\alpha_T = 20/2$ για παροχή άντλησης ίση με $930 \text{ m}^3/\text{day}$ η θέση της σφήνας είναι στα $2998,7 \text{ m}$, δηλαδή δεν ξεπερνάει τη θέση του φρέατος. Όμοια, στο σετ τιμών συντελεστών διασποράς $\alpha_L/\alpha_T = 50/5$ για παροχή άντλησης ίση με $835 \text{ m}^3/\text{day}$, η θέση της σφήνας είναι στα $2999,5 \text{ m}$, επομένως ισχύει ότι και παραπάνω.

Από τη σύγκριση των δύο σετ τιμών συντελεστών διασποράς για το μοντέλο υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας (variable density flow), παρατηρείται ότι οι διαφορές παροχών αντλήσεων είναι σχετικά μικρές.

Variable Density Flow		
Θέση πηγαδιού άντλησης X (m)	Μέγιστη παροχή άντλησης Q (m^3/day) για σετ $\alpha_L/\alpha_T = 20/2$	Μέγιστη παροχή άντλησης Q (m^3/day) για σετ $\alpha_L/\alpha_T = 50/5$
1000	460 (36,8%)	360 (28,8%)
2000	774 (61,92%)	673 (53,84%)
3000	930 (74,4%)	835 (66,8%)

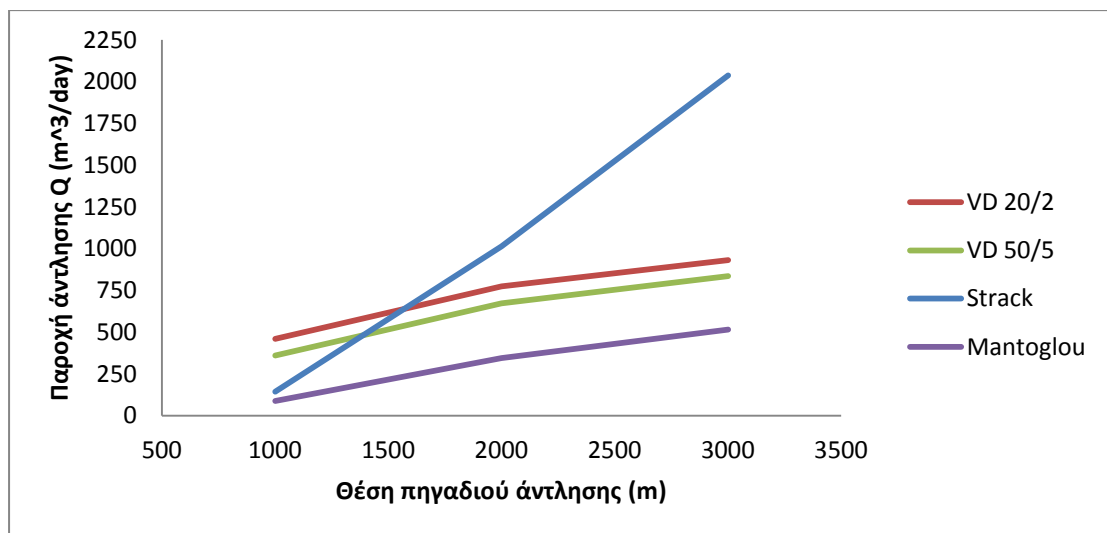
Πίνακας 5.3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλου variable density flow.

Επομένως, όσον αφορά τον υδροφορέα διαστάσεων $7 \times 3 \text{ km}^2$, τα αποτελέσματα εφαρμογής των τριών μοντέλων απεικονίζονται στο διάγραμμα 5.5.



Διάγραμμα 5.4. Απεικόνιση στοιχείων πίνακα 5.3, όπου με κόκκινη γραμμή απεικονίζεται το σετ τιμών $\alpha_L/\alpha_T = 20/2$ και με πράσινη γραμμή απεικονίζεται το σετ τιμών $\alpha_L/\alpha_T = 50/5$.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η συμπεριφορά των μοντέλων ήταν η αναμενόμενη. Συγκεκριμένα, η διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα που αφορούν τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας σχολιάστηκε παραπάνω και είναι λογική για πλευρικά όρια απόστασης 3 km. Επιπλέον, η διαφορά μεταξύ των δύο σετ τιμών των συντελεστών διασποράς είναι επίσης αναμενόμενη, λόγω της επίδρασης του συντελεστή εγκάρσιας διασποράς κυρίως στην θέση της αλμυρής σφήνας, άρα και στην εύρεση της κρίσιμης παροχής άντλησης.



Διάγραμμα 5.5. Απεικόνιση συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων όλων των μοντέλων για υδροφορέα διαστάσεων 7 km x 3 km.

Τέλος, οι διαφορές μεταξύ των θεωρήσεων απότομης διεπιφάνειας και υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας οφείλονται κυρίως στις αρχές που τις διέπουν και στις παραδοχές που γίνονται στο πλαίσιο εφαρμογής τους. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η θεώρηση sharp interface κατά Mantoglou (2003) είναι υπέρ της

ασφάλειας, αφού εκτιμά πολύ χαμηλές τιμές παροχής άντλησης ώστε να μην υφαιμυρώνεται το πηγάδι άντλησης.

Έπειτα ακολουθεί το μοντέλο κατά Strack (1976) για απόσταση 1.000 μέτρων από την ακτή, ενώ για απόσταση 2.000, 3.000 μέτρων από την ακτή παρατηρείται ότι το μοντέλο κατά Strack (1976) δίνει τις μεγαλύτερες τιμές άντλησης. Δηλαδή παρατηρείται η ιδιότητα του μοντέλου Strack (1976) να υπερεκτιμά τις κρίσιμες παροχές άντλησης, με αποτέλεσμα να απεικονίζονται αρκετά μεγάλες τιμές. Ιδίως στη θέση $X = 3.000$ m η τιμή ξεφεύγει και ξεπερνά το 100% της πλευρικής τροφοδοσίας. Αντίθετα, τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας, ειδικά για χαμηλότερη τιμή του συντελεστή εγκάρσιας διασποράς, εκτιμούν αρκετά υψηλές τιμές παροχής άντλησης αλλά υπολείπονται του μοντέλου Strack (1976) για απόσταση 2.000 και 3.000 m από την ακτή. Συγκεκριμένα οι τιμές σε αυτή την περίπτωση κυμαίνονται από 30-70%, σε σύγκριση με το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας που κυμαίνεται σε ποσοστά 10-40%.

5.4. Υπολογισμός Κρίσιμης Άντλησης για Υδροφορέα 7 km x 5 km

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται ο παράκτιος περιορισμένος υπόγειος υδροφορέας διαστάσεων 7 km x 5 km, δηλαδή επιλέγεται να μελετηθεί η επίδραση των πλευρικών ορίων στη συμπεριφορά της αλμυρής σφήνας σε κάθε θεώρηση. Επιλέγεται και πάλι να επιτευχθεί η μέγιστη παροχή άντλησης μέσω δοκιμαστικών τιμών παροχών άντλησης σε κάθε θέση, ως ποσοστό της πλευρικής τροφοδοσίας, που είναι ίση με $1250 \text{ m}^3/\text{day}$. Με αυτό τον τρόπο γίνονται δοκιμές για διάφορες τιμές, ώσπου να βρεθεί η κρίσιμη τιμή παροχής άντλησης για την οποία το πηγάδι στη δεδομένη θέση δεν υφαιμυρώνεται και αποτελεί τη κρίσιμη παροχή άντλησης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των νέων δοκιμών.

Εξετάζεται το πρόβλημα της εύρεσης κρίσιμης παροχής άντλησης για δεδομένη θέση φρέατος στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας κατά Mantoglou (2003). Σε αυτή τη φάση που γίνεται η εξέταση υδροφορέα με αύξηση πλευρικών ορίων έχει ενδιαφέρον να παρατηρηθεί εφόσον θα συγκλίνουν σε μεγαλύτερο βαθμό με τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας κατά Strack (1976). Επίσης εξετάζεται η θεώρηση υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας (variable density flow) για σετ συντελεστών διασποράς $\alpha_L/\alpha_T = 20/2, 50/5$. Με αυτό τον τρόπο θα γίνει εκ νέου σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριών μοντέλων και θα εξαφθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Η προσομοίωση της κίνησης του αλμυρού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα γίνεται όπως και παραπάνω αλλά με διαφοροποιημένα πλευρικά όρια και η εύρεση της μέγιστης δυνατής παροχής σε κάθε θέση γίνεται επίσης με τη μέθοδο των δοκιμών.

Επειδή ο εξεταζόμενος ρύπος είναι το αλάτι, με βάση το πάχος και το λόγο πυκνότητας για περιορισμένους υδροφορείς, το δυναμικό που αντιστοιχεί στην αντίστοιχη ζώνη υφαιμύρωσης του υδροφορέα, δηλαδή εκείνη η τιμή δυναμικού για

την οποία ο υδροφορέας θεωρείται ότι έχει υφαλμυρωθεί, είναι $\Phi_{toe} = 31.25m^2$. Επομένως, στον κώδικα που συντάσσεται, δίνεται εντολή να "σαρώνει" το πρόγραμμα τον κάρναβο δυναμικού για την τιμή αυτή και να βρίσκει τη ζώνη σημείων που αντιστοιχούν σε τιμή δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$.

Όσον αφορά τους περιορισμούς που τίθενται, προκειμένου να αποφευχθεί η υφαλμύρωση του φρέατος ελέγχεται η θέση του ποδιού της αλάτινης σφήνας κατά μήκος της γραμμής του καννάβου που διέρχεται από το κελί του φρέατος. Το πόδι της αλάτινης σφήνας δεν πρέπει να προσεγγίσει το πηγάδι:

$$X_i \leq X_{wi}, \quad i = 1, 2, \dots, k \text{ όπου } k \text{ ο αριθμός των φρεάτων}$$

όπου X_i : η απόσταση του ποδιού της αλάτινης σφήνας από την ακτή

X_w : η απόσταση του πηγαδιού από την ακτή

Με βάση αυτό τον περιορισμό ελέγχεται αν η θέση της σφήνας έχει προσεγγίσει το πηγάδι. Εφόσον έχει φτάσει τη θέση του πηγαδιού ή την έχει ξεπεράσει, ελέγχεται εκ νέου με μικρότερη τιμή παροχής άντλησης, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση, και επαναλαμβάνεται η διαδικασία από την αρχή.

Όπως και παραπάνω, δοκιμάζονται αρχικές τιμές παροχής στις θέσεις $(X, Y) = (1.000, 2.500)$, $(2.000, 2.500)$ και $(3.000, 2.500)$ ως ποσοστό της πλευρικής τροφοδοσίας. Επιλέγεται να γίνει προσομοίωση απότομης διεπιφάνειας κατά Strack (1976) και για θέση $X = 5.000$ m, για να απεικονιστεί η ιδιότητα του μοντέλου Strack (1976) που αναφέρθηκε παραπάνω, όπου η τιμή άντλησης είναι μη ρεαλιστική και γίνεται μεγαλύτερη από την πλευρική τροφοδοσία του υδροφορέα.

Παρατηρώντας τη θέση της σφήνας αφού εφαρμόζονται αυτές οι τιμές, τελικά επιλέγονται οι τιμές που δίνουν τις βέλτιστες παροχές άντλησης, ώστε η αλμυρή σφήνα να μην ξεπερνάει ή να φτάνει στη θέση του φρέατος άντλησης. Η εικόνα των αποτελεσμάτων είναι όμοια με αυτή που παρατηρήθηκε στα προηγούμενα πλευρικά όρια, επομένως παρουσιάζονται συνολικά μόνο τα αποτελέσματα για κάθε θεώρηση στον πίνακα 5.4 και σχηματικά στο διάγραμμα 5.6:

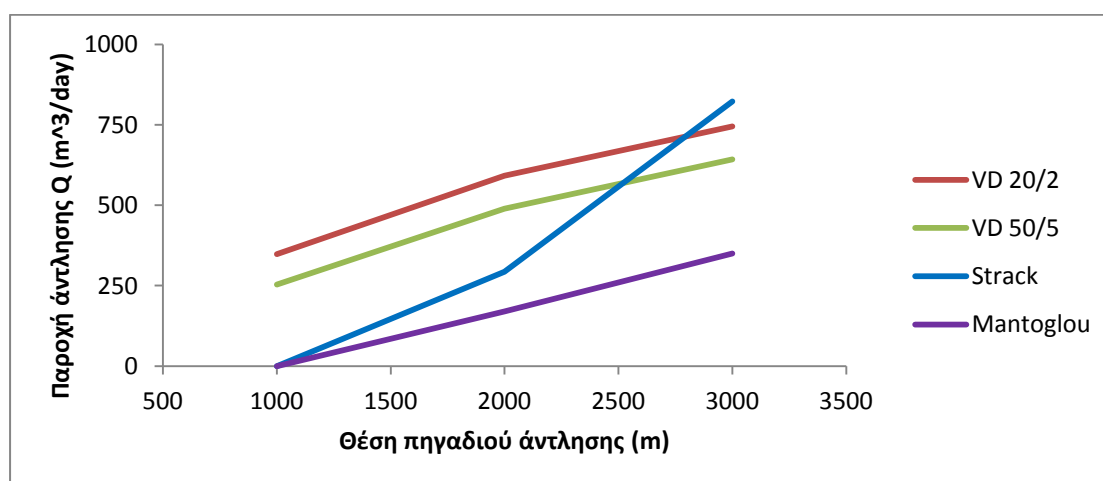
Θέση Πηγαδιού (m)	Κρίσιμη Παροχή Άντλησης Q (m ³ /day)			
	Θεώρηση Απότομης Διεπιφάνειας (Sharp interface)		Θεώρηση Μεταβλητής Πυκνότητας (Variable Density)	
	Mantoglou	Strack	$\alpha_L/\alpha_T = 20/2$	$\alpha_L/\alpha_T = 50/5$
1.000	0 (0%)	0 (0%)	348 (27,8%)	253 (20,2%)
2.000	170 (13,6%)	293,41 (23,5%)	592 (47,4%)	489 (39,1%)
3.000	350 (28%)	822,36 (65,8%)	745 (59,8%)	642 (51,8%)

Πίνακας 5.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης κίνησης νερού στα τρία μοντέλα για υδροφορέα 7x5 km².

Παρατηρείται ότι η παροχή άντλησης αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση του φρέατος άντλησης από την ακτή, όπως και στην περίπτωση υδροφορέα διαστάσεων $7 \times 3 \text{ km}^2$. Αυτό είναι αναμενόμενο, βάσει της συμπεριφοράς της κίνησης του αλμυρού νερού σε υπόγειο παράκτιο υδροφορέα. Επίσης, παρατηρείται ότι σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση οι τιμές της παροχής άντλησης είναι αισθητά μικρότερες. Το ότι μίκρυνε η κρίσιμη άντληση οφείλεται στο ότι αυξήθηκε ο όγκος του υδροφορέα και ελαττώθηκαν τα δυναμικά και τα υδραυλικά φορτία στην περιοχή του πηγαδιού, καθώς και στο σύνολο της επιφάνειας του υδροφορέα. Επίσης, λόγω του παραπάνω φαινομένου, στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, η οποία είναι υπέρ της ασφάλειας, στα μοντέλα κατά Mantoglou (2003) και Strack (1976), στη θέση $(X,Y) = (1.000, 2.500)$ το πηγάδι άντλησης είναι ήδη υφαλμιρισμένο χωρίς να απαιτείται παροχή άντλησης.

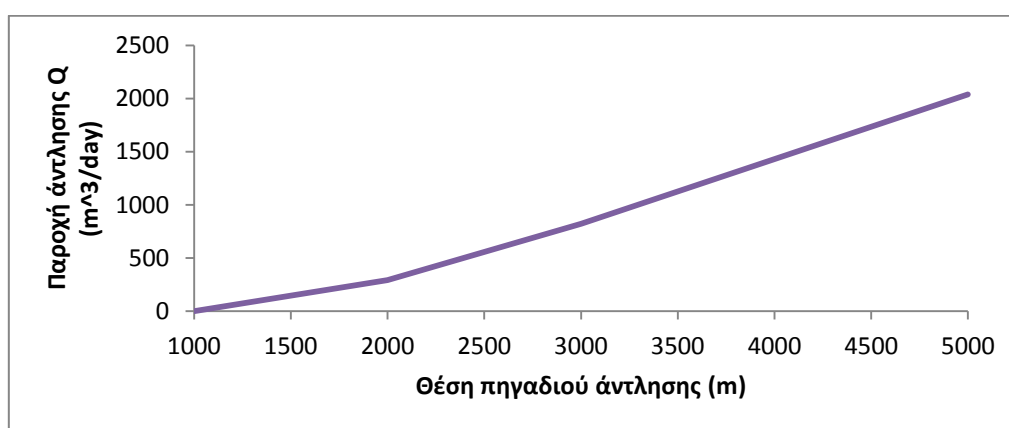
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η συμπεριφορά των μοντέλων ήταν η αναμενόμενη. Συγκεκριμένα, οι διαφορές μεταξύ των δύο σετ τιμών των συντελεστών διασποράς είναι αναμενόμενες, λόγω της επίδρασης του συντελεστή εγκάρσιας διασποράς κυρίως στην θέση της αλμυρής σφήνας, άρα και στην εύρεση της κρίσιμης παροχής άντλησης. Παρ' όλα αυτά, οι τιμές είναι αρκετά κοντά, ενώ και το πρότυπο των διαγραμμάτων τους είναι όμοιο.

Όσον αφορά την θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν αρκετά πιο κοντινά αποτελέσματα στις θέσεις πηγαδιού κοντά στην ακτή, όπως αναμενόταν, αλλά παρατηρείται και πάλι το φαινόμενο όπου στο μοντέλο κατά Strack (1976) για συγκεκριμένη θέση πηγαδιού και έπειτα, η τιμή άντλησης είναι υπερβολικά μεγάλη και δεν δικαιολογείται από την πλευρική τροφοδοσία. Το πρότυπο των διαγραμμάτων τους δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό όπως πριν, λόγω των διαφορών των δύο θεωρήσεων και του γεγονότος ότι σε μεγαλύτερα πλευρικά όρια αναμένονται μικρότερες διαφορές. 0



Διάγραμμα 5.6. Απεικόνιση συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων πίνακα 5.4. για υδροφορέα διαστάσεων $7 \text{ km} \times 5 \text{ km}$.

Τέλος, οι διαφορές μεταξύ των θεωρήσεων απότομης διεπιφάνειας και υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας οφείλονται κυρίως στις αρχές που τις διέπουν. Παρατηρείται ότι η θεώρηση sharp interface κατά Mantoglou (2003) είναι υπέρ της ασφάλειας, αφού εκτιμά πολύ χαμηλές τιμές παροχής άντλησης. Έπειτα ακολουθεί το μοντέλο κατά Strack (1976) στις πρώτες θέσεις, αλλά έπειτα είναι μη ρεαλιστική η τιμή και ξεπερνά το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας. Όπως φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα, η τιμή της κρίσιμης άντλησης είναι μη ρεαλιστική στα 5.000 m και είναι μεγαλύτερη από το 100% της πλευρικής τροφοδοσίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι όσο πιο μέσα στο εσωτερικό του υδροφορέα βρίσκεται το πηγάδι, η θεώρηση Strack (1976) που θεωρεί μόνο το όριο της ακτής και αγνοεί τα πλευρικά όρια δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το όριο αυτό και δίνει μη αναμενόμενα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 5.7. Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης κίνησης με θεώρηση απότομης διεπιφάνειας κατά Strack (1976) για υδροφορέα 7x5 km².

Αντίθετα, τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας, ειδικά για χαμηλότερη τιμή του συντελεστή εγκάρσιας διασποράς, εκτιμούν αρκετά υψηλές τιμές παροχής άντλησης, που είναι όμως πιο κοντά στην πραγματική εικόνα του υδροφορέα. Συνολικά, παρατηρείται ότι για αύξηση των πλευρικών ορίων, τα τρία μοντέλα παρουσιάζουν αρκετά πιο κοντινά αποτελέσματα, ειδικότερα όσον αφορά τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας με την θεώρηση απότομης διεπιφάνειας κατά Mantoglou (2003). Επομένως, τα πλευρικά όρια ενός υδροφορέα παίζουν σημαντικό ρόλο στη θέση της αλμυρής σφήνας καθώς και στην τιμή της κρίσιμης παροχής άντλησης από πηγάδι στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Επιπλέον, σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο θεωρήσεων συγκλίνουν σε σαφώς μεγαλύτερο βαθμό με τη διαφορά ότι το μοντέλο του Strack (1976) πλέον πλησιάζει περισσότερο στην συμπεριφορά της ανάλυσης κατά Mantoglou (2003) όσον αφορά τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, παρά στη θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, όσον αφορά τουλάχιστον τι δύο πρώτες θέσεις, αφού στη θέση X=3.000 m φαίνεται να προσεγγίζει τη λύση της μεταβλητής πυκνότητας.

5.5. Βελτίωση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης της Θεώρησης Απότομης Διεπιφάνειας

Παρατηρείται ότι παρά την ελάττωση των διαφορών μεταξύ των δύο μοντέλων στη δεύτερη περίπτωση, ακόμα υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα προσομοίωσης μεταξύ της θεώρησης απότομης διεπιφάνειας και μεταβλητής πυκνότητας. Οι Pool και Carrera (2011) πρότειναν μια διαφοροποίηση στο λόγο πυκνότητας για να βελτιωθούν τα αποτελέσματα της θεώρησης sharp interface και να πλησιάσουν στις τιμές των variable density μοντέλων που είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Ο λόγος αυτός που χρησιμοποιείται και από τους Mantoglou και Christelis (2013) είναι:

$$\varepsilon^* = \varepsilon \left[1 - \left(\frac{\alpha_T}{B} \right)^{1/6} \right] \quad (5.3)$$

όπου $\varepsilon = \frac{\rho s - \rho f}{\rho f}$ είναι ο λόγος πυκνοτήτων αλμυρού - γλυκού νερού, ε^* είναι ένας διαφοροποιημένος λόγος πυκνότητας, α_T ο συντελεστής εγκάρσιας διασποράς και B είναι το πάχος του υδροφορέα.

Ενώ το πεπερασμένο μοντέλο του Mantoglou (2003) για υδροφορέα με πλευρικά όρια παράγει αποτελέσματα με χαμηλότερη άντληση σε σύγκριση με τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας, με τη "διόρθωση" του λόγου πυκνοτήτων αναμένονται τα αποτελέσματα του μοντέλου Mantoglou (2003) να είναι πιο κοντά στα "πραγματικά" αποτελέσματα.

Γίνονται νέες προσομοιώσεις με τον τροποποιημένο παράγοντα για το μοντέλο του Mantoglou (2003) και του Strack (1976) που αφορούν θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, ώστε να διαπιστωθεί η συμπεριφορά τους όσον αφορά την ομοιότητα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης των variable density μοντέλων. Δοκιμάζονται οι τιμές συντελεστή εγκάρσιας διασποράς $\alpha_T = 2$ και $\alpha_T = 5$ που χρησιμοποιήθηκαν και στη θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας, και βρίσκονται νέα δυναμικά που αφορούν το "Πόδι" της σφήνας, από τον τύπο:

$$\Phi_{ioe} = \frac{\varepsilon^* \cdot B^2}{2} \quad (5.4)$$

Τελικά, οι νέες τιμές που προκύπτουν για το δυναμικό που αντιστοιχεί στο πόδι της σφήνας είναι $\Phi_{ioe} = 12.97m^2$ και $\Phi_{toe} = 9.96m^2$ για $\alpha_T = 2$ και $\alpha_T = 5$ αντίστοιχα.

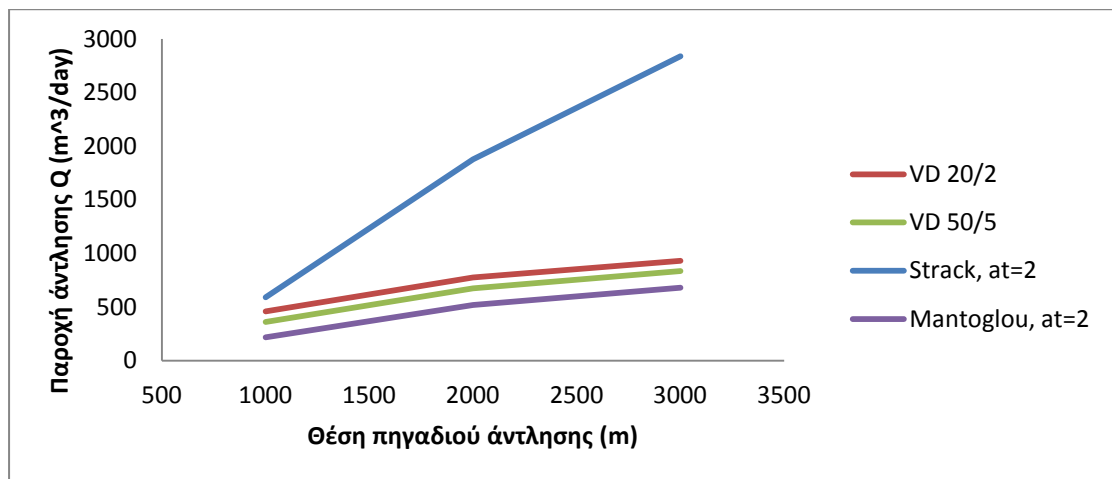
Υδροφορέας 7x3 km²

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για $\alpha_T = 2$.

Θέση Πηγαδιού (m)	Κρίσιμη Παροχή Άντλησης Q (m ³ /day)			
	Θεώρηση Απότομης Διεπιφάνειας (Sharp interface)		Θεώρηση Μεταβλητής Πυκνότητας (Variable Density)	
	Mantoglou	Strack	$\alpha_L/\alpha_T = 20/2$	$\alpha_L/\alpha_T = 50/5$
1.000	218 (17,44%)	589,86 (47,18%)	460 (36,8%)	360 (28,8%)
2.000	520 (41,6%)	1877,6 (151,1%)	774 (61,92%)	673 (53,84%)
3.000	680 (54,4%)	2837,6 (227%)	930 (74,4%)	835 (66,8%)

Πίνακας 5.5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης κίνησης νερού στα τρία μοντέλα για ε^* και $\alpha_T = 2$.

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα προσομοίωσης της θεώρησης απότομης διεπιφάνειας για ανάλυση Mantoglou (2003) είναι πολύ πιο κοντά με αυτά της θεώρησης μεταβλητής πυκνότητας που είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα.

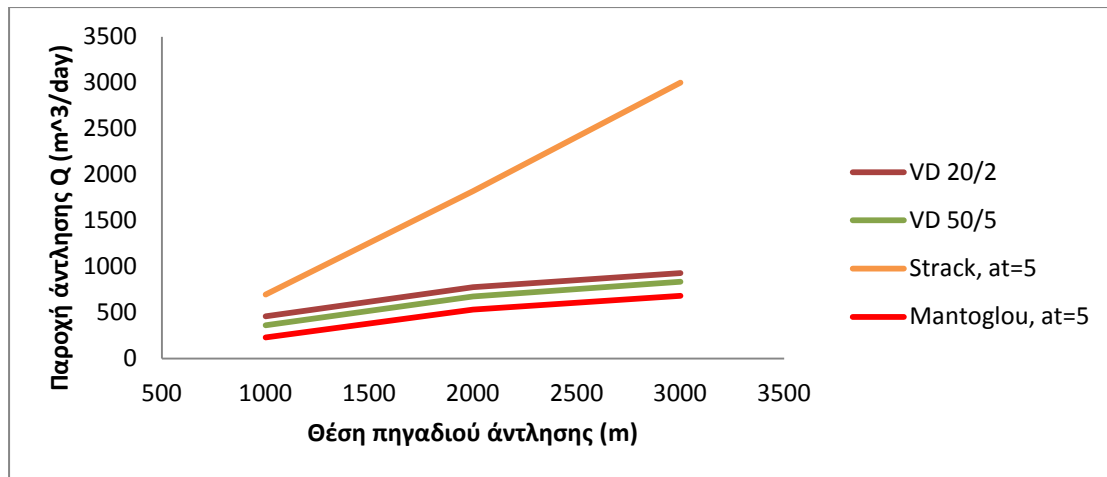


Διάγραμμα 5.8. Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης θεωρήσεων που εξετάζονται για υδροφορέα 7x3 km² με τροποποιημένο λόγο ε^* για $\alpha_T = 2$.

Ενώ όσον αφορά τα αποτελέσματα για $\alpha_T = 5$:

Θέση Πηγαδιού (m)	Κρίσιμη Παροχή Άντλησης Q (m ³ /day)			
	Θεώρηση Απότομης Διεπιφάνειας (Sharp interface)		Θεώρηση Μεταβλητής Πυκνότητας (Variable Density)	
	Mantoglou	Strack	$\alpha_L/\alpha_T = 20/2$	$\alpha_L/\alpha_T = 50/5$
1.000	230 (18,40%)	695,77 (55,66%)	460 (36,8%)	360 (28,8%)
2.000	531 (42,48%)	1821,6 (145,7%)	774 (61,92%)	673 (53,84%)
3.000	695 (55,6%)	3000 (240%)	930 (74,4%)	835 (66,8%)

Πίνακας 5.6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης κίνησης νερού στα τρία μοντέλα για ε^* και $\alpha_T = 5$.



Διάγραμμα 5.9. Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης των θεωρήσεων για υδροφορέα $7 \times 3 \text{ km}^2$ με τροποποιημένο λόγο πυκνοτήτων ε^* για $\alpha_T = 5$.

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις δύο διαφορετικές τιμές συντελεστή εγκάρσιας διασποράς α_T όσον αφορά το μοντέλο Mantoglou (2003) είναι πρακτικά ίδια, καθώς αφορούν δυναμικά που είναι πολύ κοντινά μεταξύ τους, δηλαδή $\Phi_{toe} = 9,96 \text{ m}^2$ για $\alpha_T = 2$ και $\Phi_{toe} = 12,97 \text{ m}^2$ για $\alpha_T = 5$. Επομένως, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις για $\alpha_T = 2$ είναι πρακτικά της τάξης των $10 - 20 \text{ m}^3$ χαμηλότερα από τα αντίστοιχα για $\alpha_T = 5$. Για αυτό και στο διάγραμμα η εικόνα των δύο δοκιμών είναι πρακτικά η ίδια.

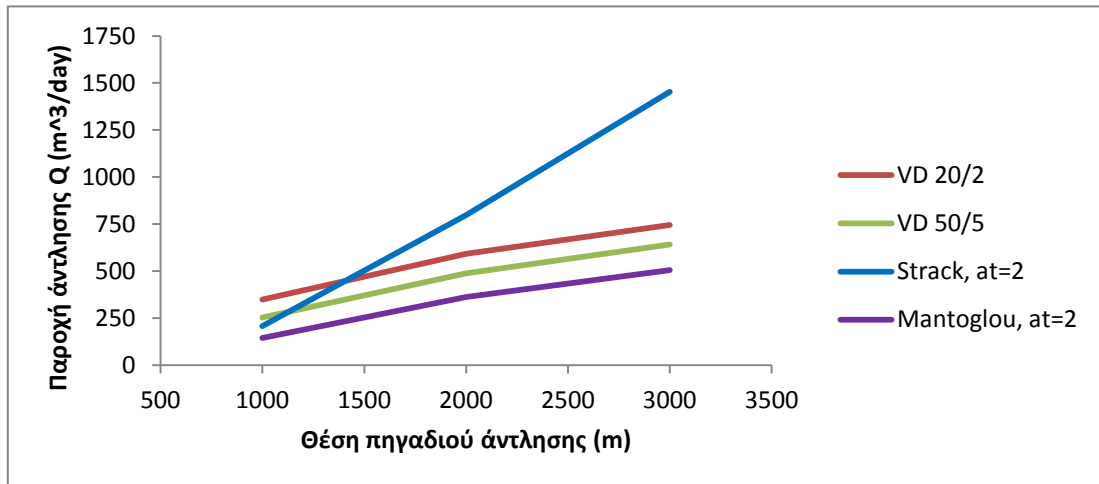
Αντίθετα, στο μοντέλο Strack (1976) παρατηρείται ότι στις θέσεις 1000 και 3000 m τα αποτελέσματα για $\alpha_T = 2$ είναι χαμηλότερα από τα αντίστοιχα για $\alpha_T = 5$, ενώ στη θέση 2000 m από την ακτή είναι η αντίστροφη κατάσταση.

Υδροφορέας $7 \times 5 \text{ km}^2$

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για $\alpha_T = 2$.

Θέση Πηγαδιού (m)	Κρίσιμη Παροχή Αντλησης Q (m^3/day)			
	Θεώρηση Απότομης Διεπιφάνειας (Sharp interface)		Θεώρηση Μεταβλητής Πυκνότητας (Variable Density)	
	Mantoglou	Strack	$\alpha_1/\alpha_T = 20/2$	$\alpha_1/\alpha_T = 50/5$
1.000	145 (11,6%)	207,08 (16,57%)	348 (27,8%)	253 (20,2%)
2.000	362 (28,9%)	797,81 (63,8%)	592 (47,4%)	489 (39,1%)
3.000	505 (40,4%)	1452,7 (116,2%)	745 (59,8%)	642 (51,8%)

Πίνακας 5.7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης κίνησης νερού στα τρία μοντέλα για ε^* και $\alpha_T = 2$.

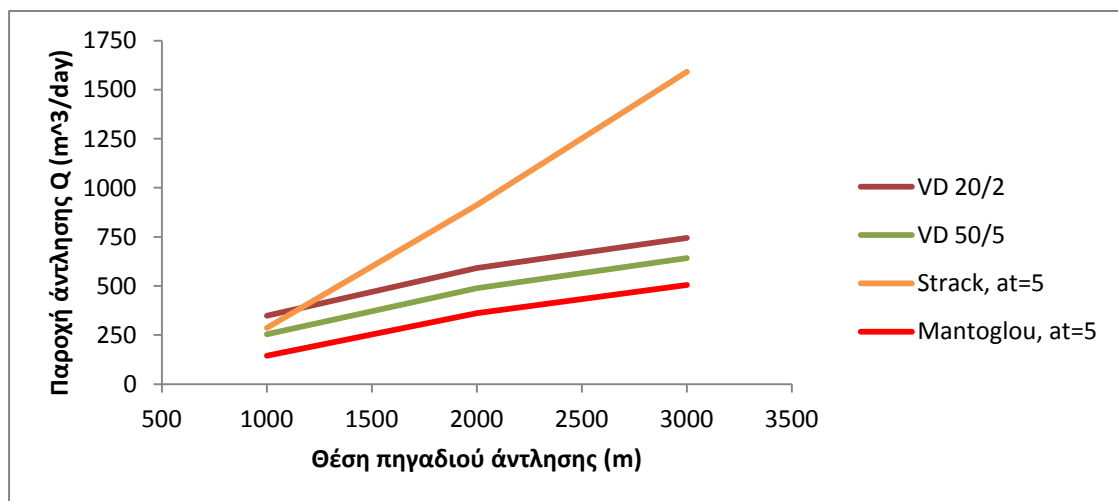


Διάγραμμα 5.10. Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης των θεωρήσεων που εξετάζονται για υδροφορέα $7 \times 5 \text{ km}^2$ με τροποποιημένο λόγο ε^* για $\alpha_T = 2$.

Ενώ όσον αφορά τα αποτελέσματα για $\alpha_T = 5$:

Θέση Πηγαδιού (m)	Κρίσιμη Παροχή Άντλησης Q (m ³ /day)			
	Θεώρηση Απότομης Διεπιφάνειας (Sharp interface)		Θεώρηση Μεταβλητής Πυκνότητας (Variable Density)	
	Mantoglou	Strack	$\alpha_I/\alpha_T = 20/2$	$\alpha_I/\alpha_T = 50/5$
1.000	156 (12,48%)	287,11 (23%)	348 (27,8%)	253 (20,2%)
2.000	377 (30,16%)	913,36 (73,07%)	592 (47,4%)	489 (39,1%)
3.000	522 (41,76%)	1590,9 (127,3%)	745 (59,8%)	642 (51,8%)

Πίνακας 5.8. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης κίνησης νερού στα τρία μοντέλα για ε^* και $\alpha_T = 5$.



Διάγραμμα 5.11. Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης των τριών θεωρήσεων για υδροφορέα $7 \times 5 \text{ km}^2$ με τροποποιημένο λόγο πυκνοτήτων ε^* για $\alpha_T = 5$.

Από την εφαρμογή στα δύο παραδείγματα υδροφορέων προκύπτει ότι πράγματι τα αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου Mantoglou (2003) είναι αρκετά πιο κοντά στα αποτελέσματα προσομοίωσης των μοντέλων variable density, ειδικότερα για λόγο συντελεστών διασποράς $\alpha_L/\alpha_T = 50/5$. Ειδικότερα, όπως προέκυψε σε προηγούμενη παράγραφο της Διπλωματικής Εργασίας, η αύξηση των πλευρικών ορίων επιδρά στην ελάττωση των διαφορών, επομένως σε αυτή την περίπτωση που τροποποιείται και ο λόγος πυκνοτήτων, οι διαφορές μεταξύ των δύο θεωρήσεων είναι αρκετά μικρές. Άρα το μοντέλο Mantoglou (2003) μπορεί να τροποποιηθεί με τον νέο λόγο πυκνοτήτων που προτείνουν οι Pool και Carrera (2011) για να δώσει αποτελέσματα πιο "κοντά" στην πραγματικότητα, ή τουλάχιστον σε αυτά που προκύπτουν από την προσομοίωση μοντέλων μεταβλητής πυκνότητας.

Όσον αφορά τη θεώρηση Strack (1976), παρατηρείται ότι στην πρώτη περίπτωση που $\Delta Y = 3.000$ m, από τη θέση πηγαδιού $X = 1.000$ m και μετά, τα αποτελέσματα προσομοίωσης έχουν μεγάλες διαφορές με τα υπόλοιπα μοντέλα, ειδικά όσο η θέση του πηγαδιού είναι πιο μέσα στον υδροφόρα. Από την κλίση φαίνεται ότι σε θέση πιο κοντά στην ακτή τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αρκετά πιο κοντά μεταξύ τους, γεγονός που δικαιολογείται από το γεγονός ότι ο Strack (1976) αγνοεί τα πλευρικά όρια και θεωρεί μόνο το όριο της ακτής. Στην περίπτωση που τα πλευρικά όρια αυξάνονται, τα αποτελέσματα προσομοίωσης των μοντέλων είναι αρκετά κοντά προς την ακτή και στα 1.000 m, αλλά μετά από τη θέση αυτή ο Strack (1976) αρχίζει να δίνει μη ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις δύο διαφορετικές τιμές συντελεστή εγκάρσιας διασποράς α_T όσον αφορά το μοντέλο Mantoglou (2003) είναι πρακτικά ίδια και στις δύο περιπτώσεις υδροφόρα, καθώς αφορούν δυναμικά που είναι πολύ κοντινά μεταξύ τους, δηλαδή $\Phi_{10e} = 9,96m^2$ για $\alpha_T = 2$ και $\Phi_{10e} = 12,97m^2$ για $\alpha_T = 5$. Επομένως, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις για $\alpha_T = 2$ είναι πρακτικά της τάξης των 10 - 20 m³ χαμηλότερα από τα αντίστοιχα για $\alpha_T = 5$. Για αυτό και στο διάγραμμα η εικόνα των δύο δοκιμών είναι πρακτικά η ίδια.

Αντίθετα, στο μοντέλο Strack (1976) παρατηρείται ότι στις θέσεις 1000 και 3000 m τα αποτελέσματα για $\alpha_T = 2$ είναι χαμηλότερα από τα αντίστοιχα για $\alpha_T = 5$, ενώ στη θέση 2000 m από την ακτή είναι η αντίστροφη κατάσταση όσον αφορά τον υδροφόρα που καλύπτει έκταση 7x3 km². Από την άλλη μεριά, στον υδροφόρα 7x5 km² παρατηρείται ότι το μοντέλο Strack (1976) για $\alpha_T = 2$ δίνει χαμηλότερα αποτελέσματα σε σχέση με τα αντίστοιχα για $\alpha_T = 5$, αλλά έχουν παρόμοια κλίση.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις δοκιμές που έγιναν στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας. Ειδικότερα, παρουσιάζονται οι συμπεριφορές της κίνησης του αλμυρού νερού και του ρύπου που εξετάζεται, δηλαδή του αλατιού, στο εσωτερικό υδροφορέα, όπως καταγράφηκε με τη χρήση λογισμικού και παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων.

6.1. Συμπεράσματα Δοκιμών σε Υδροφορέα 7 km x 3 km χωρίς την Παρουσία Πηγαδιού Άντλησης

Όπως παρουσιάστηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, εξετάστηκε η θέση της αλμυρής σφήνας, δηλαδή το μήκος που έχει προχωρήσει η ζώνη δυναμικού $\Phi_{toe} = 31.25m^2$, η οποία ευθύνεται για την υφαλμύρωση του παράκτιου υπόγειου υδροφορέα στο εσωτερικό του σύμφωνα με το πάχος και λόγο πυκνότητας για περιορισμένους υδροφορείς. Στη φάση αυτή εξετάστηκε μόνο περιορισμένος παράκτιος υπόγειος υδροφορέας διαστάσεων 7 km x 3 km όσον αφορά τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) κατά Mantoglou (2003) και τη θεώρηση υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας (variable density flow). Συγκεκριμένα, για διαφορετικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και των συντελεστών διασποράς στην περίπτωση της μεταβλητής πυκνότητας, εξετάστηκε η θέση της σφήνας, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση των συντελεστών αυτών στη θέση του θαλασσινού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Παρατηρήθηκε ότι και στα δύο μοντέλα η απόσταση της σφήνας από την ακτή γενικότερα αυξάνεται όσο αυξάνεται η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K . Επίσης, όσο αυξάνεται η τιμή της διαμήκου διασποράς (α_L) κυρίως, απομακρύνεται η σφήνα από την ακτή, ενώ για μεταβολές της εγκάρσιας διασποράς (α_T) η σφήνα αυξάνεται μόλις λίγα μέτρα. Αυτό αποτυπώνεται ξεκάθαρα από το γεγονός ότι τα διαγράμματα των δοκιμών πρακτικά συμπίπτουν, όπου τα α_L είναι ίδια, αλλά τα α_T διαφέρουν. Επομένως, διαπιστώνεται ότι οι συντελεστές που επηρεάζουν πρωτίστως τη θέση της αλμυρής σφήνας που σχηματίζει το θαλασσινό νερό στο εσωτερικό του υδροφορέα είναι:

- η υδραυλική αγωγιμότητα K
- η διαμήκης διασπορά α_L (δευτερευόντως η εγκάρσια διασπορά α_T)

Τέλος, παρατηρείται το φαινόμενο για ορισμένα σετ δοκιμών και ορισμένες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας να μην συμπεριφέρεται η σφήνα όπως αναμενόταν, δηλαδή αντί να αυξάνεται η απόσταση της ισοχλώριας συγκεντρώσεως 100 mg/L όσο αυξάνεται το K , αντίθετα μειώνεται. Στα σετ δοκιμών $\alpha_L/\alpha_T = 50/2$ και $50/5$ η τιμή $K = 2$ m/day είναι προβληματική, ενώ μετά η συμπεριφορά του

διαγράμματος είναι η αναμενόμενη. Στα σετ δοκιμών $\alpha_L/\alpha_T = 100/5$ και $100/10$ η τιμή $K = 2$ m/day και $K = 5$ m/day είναι προβληματικές. Το φαινόμενο αυτό, όπως αναλύθηκε παραπάνω, οφείλεται στη συμπεριφορά της θαλάσσινης σφήνας στο εσωτερικό του παράκτιου υπόγειου υδροφορέα για συγκεκριμένες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα και μελέτη.

Όσον αφορά τη σύγκριση των δύο θεωρήσεων, η σφήνα μεταβάλλεται με διαφορετικό τρόπο στις δύο θεωρήσεις λόγω των ριζικών διαφορών τους σε θέματα ροής. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για τιμές $\alpha_L/\alpha_T = 20/2$, μόνο στην περίπτωση όπου $K = 1$ m/day, η σφήνα έχει προχωρήσει περισσότερο από την αντίστοιχη της sharp interface θεώρησης. Όσον αφορά τις τιμές $\alpha_L/\alpha_T = 50/2$ και $50/5$, στις περιπτώσεις $K = 1, 2$ m/day η σφήνα έχει προχωρήσει περισσότερο από την αντίστοιχη της sharp interface θεώρησης, ενώ για τιμές $\alpha_L/\alpha_T = 100/5$ και $100/10$, στις περιπτώσεις $K = 1, 2, 5$ m/day η σφήνα έχει προχωρήσει περισσότερο από την αντίστοιχη της sharp interface θεώρησης.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι η θέση της σφήνας στη θεώρηση sharp interface, για μεγαλύτερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας K , είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη θεώρηση variable density, αφού φτάνει στα 1500 μέτρα, δηλαδή στο 1/5 του μήκους υδροφορέα, ενώ στην άλλη θεώρηση φτάνει μόλις μέχρι το 1/10 του μήκους του υδροφορέα για υψηλές τιμές διασποράς.

Τέλος, διαπιστώνεται ότι και η κλίση των διαγραμμάτων μεταξύ των δύο θεωρήσεων είναι διαφορετικές σε μεγάλο βαθμό, αφού στην θεώρηση sharp interface η σχέση της θέσης της σφήνας με την υδραυλική αγωγιμότητα K είναι γραμμική, ενώ στην άλλη θεώρηση γραμμική αλλά με ιδιομορφίες. Όσον αφορά το φαινόμενο που παρατηρήθηκε στη θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας για ορισμένα σετ δοκιμών και συγκεκριμένες τιμές K , δεν παρατηρείται ανάλογο φαινόμενο στη θεώρηση sharp interface. Επομένως, διαπιστώνεται ότι οι δύο θεωρήσεις έχουν αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα στο σύνολό τους, λόγω των διαφορών στη θεωρία τους.

6.2. Συμπεράσματα Δοκιμών σε Υδροφορέα 7 km x 3 km με Παρουσία Πηγαδιού Άντλησης

Σε επόμενη φάση εξετάστηκε το πρόβλημα εύρεσης της μέγιστης δυνατής παροχής άντλησης ως ποσοστό της πλευρικής τροφοδοσίας του υδροφορέα ($Q_{\text{πλευρ}} = 1250$ m³/day) από πηγάδι άντλησης στη θέση $(X, Y) = (1000, 1500), (2000, 1500)$ και $(3000, 1500)$ στο εσωτερικό του υδροφορέα στα πλαίσια της θεώρησης απότομης διεπιφάνειας κατά Strack (1976) και Mantoglou (2003) και της θεώρησης υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας όσον αφορά τα σετ συντελεστών διασποράς $\alpha_L/\alpha_T = 20/2$ και $50/5$ για τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας $K = 10$ m/day, με τη μέθοδο των δοκιμών. Με αυτό τον τρόπο επιδιώχθηκε η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το ποια θεώρηση είναι υπέρ της ασφάλειας, κατά πόσον οι τιμές συγκλίνουν, ιδιαίτερα όσον αφορά τη σύγκριση μοντέλων κατά Strack (1976) και Mantoglou (2003), όπου

οι διαφορές τους έγκεινται στη διαφορετική θεώρηση πλευρικών ορίων, αφού στη θεώρηση κατά Strack (1976) αγνοούνται τα πλευρικά όρια.

Επομένως, όσον αφορά τον υδροφορέα διαστάσεων $7 \times 3 \text{ km}^2$, τα αποτελέσματα εφαρμογής των τριών μοντέλων είναι τα ακόλουθα. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα που αφορούν τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας σχολιάστηκε παραπάνω και είναι λογική για πλευρικά όρια απόστασης 3 km. Επιπλέον, οι διαφορές μεταξύ των δύο σετ τιμών των συντελεστών διασποράς είναι επίσης αναμενόμενη, λόγω της επίδρασης του συντελεστή εγκάρσιας διασποράς κυρίως στην θέση της αλμυρής σφήνας, άρα και στην εύρεση της κρίσιμης παροχής άντλησης. Ειδικότερα, στη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας κατά Mantoglou εμφανίζεται το φαινόμενο της κύκλωσης, δηλαδή παρατηρείται ζώνη δυναμικού 31.25 m^2 στο πηγάδι άντλησης, χωρίς να το έχει προσεγγίσει η αλμυρή σφήνα. Για λόγους ασφάλειας, επιλέχθηκε να μη δοκιμάζεται μεγαλύτερη τιμή από όταν εμφανίζεται το φαινόμενο, αφού πρακτικά το πηγάδι θεωρείται υφαλμιρισμένο.

Τέλος, οι διαφορές μεταξύ των θεωρήσεων απότομης διεπιφάνειας και υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας οφείλονται κυρίως στις αρχές που τις διέπουν και στις παραδοχές που γίνονται στο πλαίσιο εφαρμογής τους. Παρατηρείται ότι η θεώρηση sharp interface κατά Mantoglou είναι υπέρ της ασφάλειας, αφού εκτιμά πολύ χαμηλές τιμές παροχής άντλησης ώστε να μην υφαλμυρώνεται το πηγάδι άντλησης. Έπειτα ακολουθεί το μοντέλο κατά Strack (1976) για απόσταση 1000 μέτρων από ακτή. Αντίθετα, τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας, ειδικά για χαμηλότερη τιμή του συντελεστή εγκάρσιας διασποράς, εκτιμούν αρκετά υψηλές τιμές παροχής άντλησης, αλλά υπολείπονται του μοντέλου Strack (1976) για απόσταση 2000 και 3000 m από ακτή.

6.3. Συμπεράσματα Δοκιμών σε Υδροφορέα $7 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ με Παρουσία Πηγαδιού Άντλησης

Τέλος, επιλέχθηκε να γίνει η παραπάνω διαδικασία για υδροφορέα διαστάσεων $7 \text{ km} \times 5 \text{ km}$, δηλαδή αυξήθηκαν τα πλευρικά όρια. Με αυτό τον τρόπο επιδιώχθηκε να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των πλευρικών ορίων στην κρίσιμη παροχή άντλησης από πηγάδι σε κάθε θέση, καθώς και να ελεγχθεί αν τα μοντέλα κατά Strack (1976) και Mantoglou (2003) συγκλίνουν σε μεγαλύτερο βαθμό για αυξημένα πλευρικά όρια όπως αναμενόταν.

Προκύπτει ότι η παροχή άντλησης αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση του φρέατος άντλησης από την ακτή βάσει της συμπεριφοράς της κίνησης του αλμυρού νερού σε υπόγειο παράκτιο υδροφορέα. Επίσης, παρατηρείται ότι σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση οι τιμές της παροχής άντλησης είναι αισθητά μικρότερες, καθώς όσο μεγαλώνουν τα πλευρικά όρια, απαιτείται μικρότερη τιμή παροχής άντλησης για να υφαλμυρωθεί το πηγάδι άντλησης. Επίσης, λόγω του παραπάνω φαινομένου, στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, η οποία είναι υπέρ της ασφάλειας,

στα μοντέλα κατά Mantoglou (2003) και Strack (1976), στη θέση $(X,Y) = (1.000, 2.500)$ το πηγάδι άντλησης είναι ήδη υφαλμυρισμένο χωρίς να απαιτείται παροχή άντλησης.

Οι διαφορές μεταξύ των δύο σετ τιμών των συντελεστών διασποράς είναι αναμενόμενες, λόγω της επίδρασης του συντελεστή εγκάρσιας διασποράς κυρίως στην θέση της αλμυρής σφήνας, άρα και στην εύρεση της κρίσιμης παροχής άντλησης. Παρ' όλα αυτά, οι τιμές είναι αρκετά κοντά, ενώ και το πρότυπο των διαγραμμάτων τους είναι όμοιο. Όσον αφορά την θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν αρκετά πιο κοντινά αποτελέσματα και το πρότυπο των διαγραμμάτων τους δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό όπως πριν, λόγω των διαφορών των δύο θεωρήσεων και του γεγονότος ότι σε μεγαλύτερα πλευρικά όρια αναμένονται μικρότερες διαφορές. Επίσης, παρατηρείται ότι η εικόνα των διαγραμμάτων τους δεν συνάδει με της προηγούμενης κατάστασης, καθώς στη θέση $(X,Y) = (3.000, 2.500)$ παρουσιάζεται μεγαλύτερη αύξηση της παροχής άντλησης από ότι αναμενόταν.

Τέλος, οι διαφορές μεταξύ των θεωρήσεων απότομης διεπιφάνειας και υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας οφείλονται κυρίως στις αρχές που τις διέπουν και στις παραδοχές που γίνονται στο πλαίσιο εφαρμογής τους. Παρατηρείται ότι η θεώρηση sharp interface κατά Mantoglou (2003) είναι υπέρ της ασφάλειας, αφού εκτιμά πολύ χαμηλές τιμές παροχής άντλησης ώστε να μην υφαλμυρώνεται το πηγάδι άντλησης. Έπειτα ακολουθεί το μοντέλο κατά Strack (1976) στις πρώτες θέσεις μέχρι να "ξεφύγει" λόγω των ιδιοτήτων του σε συγκεκριμένη θέση πηγαδιού.

Αντίθετα, τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας, ειδικά για χαμηλότερη τιμή του συντελεστή εγκάρσιας διασποράς, εκτιμούν αρκετά υψηλές τιμές παροχής άντλησης. Συνολικά, παρατηρείται ότι για αύξηση των πλευρικών ορίων, τα τρία μοντέλα παρουσιάζουν αρκετά πιο κοντινά αποτελέσματα, άρα διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνονται τα πλευρικά όρια οι τρεις θεωρήσεις δίνουν όμοια αποτελέσματα. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο θεωρήσεων συγκλίνουν σε σαφώς μεγαλύτερο βαθμό με τη διαφορά ότι το μοντέλο του Strack (1976) πλέον πλησιάζει περισσότερο στην συμπεριφορά της ανάλυσης κατά Mantoglou (2003) όσον αφορά τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, παρά στη θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, με εξαίρεση τη θέση πηγαδιού στα 3.000 μέτρα.

Τέλος, παρατηρείται ότι από την εφαρμογή του βελτιωμένου λόγου πυκνοτήτων αλμυρού και γλυκού νερού προκύπτει ότι πράγματι τα αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου Mantoglou (2003) είναι αρκετά πιο κοντά στα αποτελέσματα προσομοίωσης των μοντέλων variable density και για τις δύο τιμές συντελεστή εγκάρσιας διασποράς, αφού οι διαφορές μεταξύ των δύο θεωρήσεων είναι αρκετά μικρές. Άρα το μοντέλο Mantoglou (2003) μπορεί να τροποποιηθεί με τον νέο λόγο πυκνοτήτων που προτείνουν οι Pool και Carrera (2011) για να δώσει αποτελέσματα πιο "κοντά" στα πραγματικά αποτελέσματα.

Όσον αφορά τη θεώρηση Strack (1976) και για τις δύο περιπτώσεις συντελεστή εγκάρσιας διασποράς, παρατηρείται ότι στην πρώτη περίπτωση που $\Delta Y = 3.000 \text{ m}$, από τη θέση πηγαδιού $X = 1.000 \text{ m}$ και μετά, τα αποτελέσματα προσομοίωσης έχουν μεγάλες διαφορές με τα υπόλοιπα μοντέλα, ειδικά όσο η θέση του πηγαδιού είναι πιο μέσα στον υδροφορέα. Από την κλίση φαίνεται ότι σε θέση πιο κοντά στην ακτή τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αρκετά πιο κοντά μεταξύ τους, γεγονός που δικαιολογείται από το γεγονός ότι ο Strack αγνοεί τα πλευρικά όρια και θεωρεί μόνο το όριο της ακτής. Στην περίπτωση που τα πλευρικά όρια αυξάνονται, τα αποτελέσματα προσομοίωσης των μοντέλων είναι αρκετά κοντά προς την ακτή και στα 1.000 m , αλλά μετά από τη θέση αυτή ο Strack αρχίζει να δίνει μη ρεαλιστικά αποτελέσματα.

6.4. Προτάσεις για Έρευνα

Από τα παραπάνω προκύπτουν διάφορα θέματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω έρευνας και μελέτης. Συγκεκριμένα, κρίνεται επιτακτική ανάγκη εμβάθυνσης στη σύγκριση των μοντέλων ώστε να διαπιστωθεί ποια θεώρηση - η θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας (sharp interface) κατά Mantoglou (2003) ή Strack (1976) και η αντίστοιχη της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας (variable density flow) - προσομοιάζει το φυσικό πρόβλημα της υφαλμύρωσης σε μεγαλύτερο βαθμό, καθώς και ποιο μοντέλο είναι υπέρ της ασφάλειας και της μέγιστης παροχής άντλησης από πηγάδι.

Μετά τη διεκπεραίωση των δοκιμών στις διαφορετικές περιπτώσεις υδροφορέων και συνθηκών άντλησης προέκυψαν σε ορισμένες περιπτώσεις μη αναμενόμενα και ενδιαφέροντα αποτελέσματα που κρίνεται σημαντικό να μελετηθούν. Συγκεκριμένα προτείνεται να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση:

A) στην περίπτωση που μελετάται ο παράκτιος περιορισμένος υπόγειος υδροφορέας διαστάσεων $7 \times 3 \text{ km}^2$ χωρίς την παρουσία πηγαδιών άντλησης, παρατηρείται το φαινόμενο για ορισμένα σετ δοκιμών και ορισμένες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας να μην συμπεριφέρεται η σφήνα όπως αναμενόταν, δηλαδή αντί να αυξάνεται η απόσταση της ισοχλωρίας συγκεντρώσεως 100 mg/L όσο αυξάνεται το K , αντίθετα μειώνεται. Στα σετ δοκιμών $a_I/a_T = 50/2$ και $50/5$ η τιμή $K = 2 \text{ m/day}$ είναι προβληματική, ενώ στα σετ δοκιμών $a_I/a_T = 100/5$ και $100/10$ η τιμή $K = 2 \text{ m/day}$ και $K = 5 \text{ m/day}$ είναι προβληματικές. Το φαινόμενο αυτό, όπως αναλύθηκε παραπάνω, οφείλεται στη συμπεριφορά της θαλάσσινης σφήνας στο εσωτερικό του παράκτιου υπόγειου υδροφορέα για συγκεκριμένες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα και μελέτη.

B) στην περίπτωση που αυξάνονται τα πλευρικά όρια του υδροφορέα με την παρουσία πηγαδιού άντλησης παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα μοντέλα απότομης διεπιφάνειας κατά Mantoglou (2003) και Strack (1976) συγκλίνουν σε μεγαλύτερο βαθμό, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι στην ανάλυση

Strack (1976) τα πλευρικά όρια θεωρούνται ημιάπειρα, επομένως όσο πλησιάζει στη συγκεκριμένη κατάσταση υπάρχει μεγαλύτερος βαθμός σύγκλισης. Απαιτείται όμως περαιτέρω μελέτη στο φαινόμενο αυτό.

Γ) στο ενδεχόμενο τελικής σύγκλισης των αποτελεσμάτων όσον αφορά την παροχή άντλησης μεταξύ της θεώρησης απότομης διεπιφάνειας και ροής μεταβλητής πυκνότητας για επιλογή συγκεκριμένων παραμέτρων και υδραυλικών ιδιοτήτων. Παρατηρείται ότι όταν αυξάνονται τα πλευρικά όρια, τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο θεωρήσεων συγκλίνουν σε μεγαλύτερο βαθμό, άρα απαιτείται περαιτέρω μελέτη στο φαινόμενο αυτό.

Δ) στην εφαρμογή των δύο θεωρήσεων σε άλλα παραδείγματα υδροφορέων με διαφορετικές διαστάσεις και υδραυλικές παραμέτρους για να εξεταστεί αν γενικεύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας.

Ε) στην εφαρμογή του βελτιωμένου λόγου πυκνότητας αλμυρού και γλυκού νερού στα μοντέλα απότομης διεπιφάνειας κατά Mantoglou (2003) για περιορισμένο υδροφορέα με καθορισμένα πλευρικά όρια και Strack (1976) για υδροφορέα με ημιάπειρα πλευρικά όρια. Παρατηρείται ότι με την εφαρμογή του όρου προκύπτουν αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου απότομης διεπιφάνειας πιο κοντά σε αυτά της θεώρησης μεταβλητής πυκνότητας, όπως δείχνουν οι Pool και Carrera (2011) και οι Mantoglou και Christelis (2013), αλλά απαιτείται μεγαλύτερη έρευνα στο θέμα αυτό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Ahfeld D.P. and Sawyer C.S., “Well Location in Capture Zone Design Using Simulation and Optimization Techniques”, *Ground Water*, 28(4), pp.507-512, 1990.
2. Bear J. *et al* ‘Seawater Intrusion in Coastal Aquifers –Concepts, Methods and Practices’, Kluwer Academic Publishers, pp.163-191, 1999.
3. Bear J., “Hydraulics of Groundwater”, McGraw-Hill, New York 1979.
4. Cheng A.H.-D, Ouazar D., Analytical solutions. J Bear, A.H.-D Cheng, S Sorek, D Ouazar, I Herrera (Eds.), *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers—Concepts, Methods and Practices*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.
5. Cheng, A. H. D., D. Halhal, A. Naji, and D. Ouazar, Pumping optimization in saltwater-intruded coastal aquifers, *Water Resour. Res.*, 36(8), 2155–2165, 2000.
6. Dentz M., Tartakovsky D.M., Abarca E., Guadagnini A., Sanchez-Vila X., Carrera, J., Variable-density flow in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 561, pp 209-235, doi:10.1017/S0022112006000668, 2006.
7. Gorelick S.M., “A Review of Distributed Parameter Groundwater Management Modeling Methods”, *Water Resources Research*, 19(2), pp.305-319, 1983.
8. Kourakos, G., and A. Mantoglou, Pumping optimization of coastal aquifers based on evolutionary algorithms and surrogate modular neural network models, *Adv. Water Resour.*, 32(4), 507–521, 2009
9. Pool, M., and J. Carrera, A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of seawater intrusion in coastal aquifers, *Water Resour. Res.*, 47, W05506, doi:10.1029/2010WR010256, 2011.
10. Mantoglou, A., Pumping management of coastal aquifers using analytical models of saltwater intrusion, *Water Resour. Res.*, 39(12), 1335, 2003.
11. Mantoglou A., Papantoniou M. & Giannouloupoulos P., ‘Management of coastal Aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms’, *Journal of Hydrology*, pp.209-228, 2004.

12. Mantoglou A, Papantoniou M, Optimal design of pumping networks in coastal aquifers using sharp interface models. *J Hydrol* 361:52–63. 2008.
13. “Optimization Toolbox, For Use with MATLAB”, User’s Guide Version 2, The Math Works Inc, 1996 Pohlheim H., “GEATbx : Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox for use with MATLAB”, 1994-2000.
14. Park, N., Cui, L. and Shi, L., Analytical Design Curves to Maximize Pumping or Minimize Injection in Coastal Aquifers. *Ground Water*, 47: 797–805. doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00589.x, 2009.
15. Pierre D.A., “Optimization Theory with Applications”, Dover Publications I.N.C., New York 1986.
16. Pool, M., and J. Carrera, A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of seawater intrusion in coastal aquifers, *Water Resour. Res.*, 47, W05506, doi:10.1029/2010WR010256. 2011.
17. Strack, O.D.L., A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers. *Water Resour. Res.* 12 (6), 1165–1174, 1976.
18. Wurbs, Ralph A., ‘Water Management Models’, Prentice Hall, 2005.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Γιαννουλόπουλος Γ. Κ., “Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό Πεδίο”, Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Αθήνα 2000.
2. Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ., ‘Τεχνική Υδρολογία’, Ε.Μ.Π, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων, Αθήνα 1999.
3. Λατινόπουλος Π.Δ., “Υδραυλική των Υπογείων Ροών”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη 1986.
4. Mantoglou A., ‘Υπόγεια Νερά και η Διαχείριση τους’, Αθήνα 2004.
5. Mantoglou A. , Κουράκος Γ., ‘Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου ανάλυσης παράκτιων υδροφορέων’, Γ’ Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης 2000-2006: Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα, Ολοκληρωμένη Διαχείριση

Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα, Τεύχος 4β, Αθήνα 2005.

6. Mantoglou A., Γιαννουλόπουλος Π., “Βελτιστοποίηση Αντλήσεων Παράκτιων Υδροφορέων και Πρόληψη Υφαλμύρωσης”, Πρακτικά Συμποσίου “Αιγαίο-Νερό-Βιώσιμη Ανάπτυξη”, Πάρος 2001.
7. Μιμίκου Μ.Α., “Τεχνολογία Υδατικών Πόρων”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1994.
8. Νάνου-Γιάνναρου Α., “Εισαγωγή στα Υπόγεια Νερά”, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1999.
9. Παπαντωνίου Μ., “Διαχείριση Παράκτιων Υδροφορέων - Βελτιστοποίηση Αντλήσεων”, Μεταπτυχιακή Εργασία, Διεπιστημονικό - Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2003.
10. Τσακίρης Γ., ‘Υδατικοί Πόροι: Ι, Τεχνική Υδρολογία’, Ε.Μ.Π, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα 1995.