



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ»**

του Αποστόλ Α. Λούκα

Εξεταστική επιτροπή:

Στειακάκης Εμμανουήλ, Καθηγητής (επιβλέπων)

Βαρουχάκης Εμμανουήλ, Επίκ. Καθηγητής

Ξηρουδάκης Γεώργιος, Επίκ. Καθηγητής

Χανιά, 2025

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αρχικώς, ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Στειακάκη Εμμανουήλ, ο οποίος δέχτηκε να συνεργαστεί μαζί μου και να επιβλέψει την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ομοίως, ευχαριστώ και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ.κ. Βαρουχάκη Εμμανουήλ και Ξηρουδάκη Γεώργιο που συμμετείχαν στη διαδικασία αξιολόγησης της εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Βαβαδάκη Διονύσιο (ΕΤΕΠ) της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης) για την βοήθεια που μου παρείχε στις επιλύσεις που έκανα με το λογισμικό SEEP/W, όπως και για τις υποδείξεις του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Όλοι οι παραπάνω συνέβαλαν σημαντικά στην προσπάθεια μου να κατανοήσω εις βάθος τις βασικές έννοιες και τους κύριους άξονες του υπό εξέταση ζητήματος. Ήταν χαρά και τιμή μου να συνεργαστώ μαζί τους.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου, καθώς και όλους όσους συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην περάτωση της εργασίας μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το υπόγειο νερό είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό και ευαίσθητο αγαθό. Η παρούσα εργασία ασχολείται με το ζήτημα της ανάκτησης των υπόγειων υδάτων μέσω υδρομαστευτικών έργων και ιδιαίτερα μέσω υδρογεωτρήσεων.

Παρουσιάζονται βασικές υδραυλικές έννοιες και παράμετροι, καθοριστικές για τον προσδιορισμό της ποσότητας και ποιότητας του διαθέσιμου υπόγειου νερού σε μια περιοχή.

Στη συνέχεια, εξετάζονται τα διάφορα έργα υδρομάστευσης. Περιγράφεται η κατασκευή των έργων αυτών και παρατίθενται τα κριτήρια επιλογής της κατάλληλης διατρητικής μεθόδου για υδρογεώτρηση.

Ακολούθως, αναλύεται η ροή του υπογείου νερού προς ένα υδρομαστευτικό έργο. Μελετάται η κίνηση του υπόγειου νερού προς μία γεώτρηση σε ελεύθερο υδροφορέα και παρουσιάζεται η προσομοίωση της ροής με τη βοήθεια του λογισμικού SEEP/W σε συνθήκες σταθερής ροής.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τις αναλυτικές σχέσεις των Dupuit και Thiem, και εξετάζονται διάφορα σενάρια (παραμετρική ανάλυση), προκειμένου να βρεθούν τα τεχνικά και υδρογεωλογικά εκείνα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν περισσότερο την απόδοση μιας αντλούμενης υδρογεώτρησης.

Λέξεις κλειδιά: Υπόγειο νερό, υδρογεωτρήσεις, γεωτρύπανα, διατρητικές μέθοδοι, ροή υπόγειου νερού προς υδρομαστευτικά έργα, SEEP/W

ABSTRACT

Groundwater is an extremely important and sensitive asset. This paper deals with the issue of groundwater recovery through water pumping projects and in particular through water wells.

Basic hydraulic definitions and parameters are presented, which are decisive for determining the quantity and quality of available groundwater in an area.

Subsequently, various water pumping projects are examined. The construction of these projects is described and the criteria for selecting the appropriate drilling method for achieving effective water well drilling are listed.

Subsequently, the flow of groundwater to the well is analyzed and analytical relationships and considerations are reported. The movement of groundwater towards a well in an unconfined aquifer is studied and the simulation of flow using the SEEP/W software under steady flow conditions is presented.

The simulation results are compared with the equations of Dupuit and Thiem, and various scenarios are examined (parametric analysis), in order to find those technical and hydrogeological characteristics that most affect the performance of a pumping water well.

Key words: *Groundwater, water wells, drilling methods, groundwater flow to water pumping projects , SEEP/W*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2.	ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΥΔΡΟΦΟΡΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ.....	3
2.1.	Ζώνες υγρασίας	4
2.2.	Τύποι υδροφόρων	5
2.3.1.	Ελεύθεροι υδροφόροι	5
2.3.2.	Αρτεσιανοί (υπό πίεση) υδροφόροι	5
2.3.3.	Υδροφόροι με διαρροές ή ημιαρτεσιανοί (<i>leaky aquifers</i>)	6
2.3.	Υδραυλικές παράμετροι.....	7
3.	ΕΡΓΑ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΣΗΣ	10
3.1.	Κατακόρυφα έργα υδρομάστευσης.....	10
3.1.1.	Υδρογεωτρήσεις	10
3.1.2.	Πηγάδια ή φρέατα	12
3.2.	Οριζόντια υδρομαστευτικά έργα (Horizontal wells).....	13
3.3.	Μικτά υδρομαστευτικά έργα	14
4.	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	16
4.1.	Διάτρηση	16
4.1.1.	Κρουστικές μέθοδοι διάτρησης.....	17
4.1.2.	Περιστροφικές μέθοδοι διάτρησης.....	22
4.1.3.	Συνδυαστικές μέθοδοι διάτρησης.....	30
4.1.4.	Επιλογή της βέλτιστης μεθόδου διάτρησης.....	34
4.2.	Σωλήνωση και τοποθέτηση φίλτρων	34
5.	ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ	40
5.1.	Ροή του υπόγειου νερού σε γεώτρηση.....	43
5.1.1.	Μεταβαλλόμενη κατάσταση ροής σε υπό πίεση υδροφορέα	46
5.1.2.	Σταθερή κατάσταση ροής σε υπό πίεση υδροφορέα	51
5.1.3.	Μεταβαλλόμενη κατάσταση ροής σε ελεύθερο υδροφορέα	52
5.1.4.	Σταθερή κατάσταση ροής σε ελεύθερο υδροφορέα	54
5.1.5.	Ροή σε ατελείς υδρογεωτρήσεις	56

5.2.	Άντληση σε περισσότερες από μία γεωτρήσεις	58
5.3.	Σχέση παροχής με πτώση στάθμης και διάμετρο της γεώτρησης	58
5.4.	Μέγιστη παροχή – κρίσιμη ταχύτητα	59
5.5.	Ροή του υπόγειου νερού προς υδρομαστευτικές στοές	61
6.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SEEP/W	64
6.1.	Σχεδιασμός μοντέλου	67
6.2.	Θεωρήσεις και παραδοχές	68
6.3.	Επιλογή συνθηκών ροής	68
6.4.	Εισαγωγή ιδιοτήτων	69
6.5.	Οριακές συνθήκες	71
6.6.	Επίλυση – Σύγκριση με αναλυτικές μεθόδους	72
6.6.1.	Επίλυση με αναλυτικές μεθόδους	76
6.6.2.	Σύγκριση αποτελεσμάτων	77
6.7.	Παραμετρική ανάλυση	77
6.7.1.	Σενάριο Α: Μεταβολή του συντελεστή υδροπερατότητας	78
6.7.2.	Σενάριο Β: Μεταβολή του βάθους της γεώτρησης	78
6.7.3.	Σενάριο Γ: Μεταβολή της διαμέτρου της γεώτρησης	80
6.7.4.	Σενάριο Δ: Μεταβολή της πτώσης στάθμης στην γεώτρηση	81
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85
	Ελληνική βιβλιογραφία	85
	Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	86
	Ιστότοποι	87

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υπόγειο νερό αποτελεί έναν από τους πολυτιμότερους φυσικούς πόρους για τον άνθρωπο και αντιπροσωπεύει το 97% του γλυκού νερού στον πλανήτη μας.

Η εκμετάλλευση του υπόγειου νερού για την κάλυψη των αναγκών του ανθρώπου έγινε αρχικά με τη χρήση ρηχών πηγαδιών και υδρομαστευτικών στοών (qanats). Η τεχνολογική εξέλιξη και η ανάγκη εκμετάλλευσης του υπόγειου νερού για την κάλυψη των διαρκώς αυξανόμενων ανθρωπίνων αναγκών, οδήγησαν σε πολυπλοκότερα υδρομαστευτικά έργα, όπως οι υδρογεωτρήσεις.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στο ζήτημα της εκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων μέσω υδρομαστευτικών έργων. Για την επιλογή της βέλτιστης θέσης και του βάθους ανόρυξης μίας υδρογεώτρησης, αλλά και για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού της, λαμβάνονται υπόψη γεωλογικά κριτήρια, υδρογεωλογικές παράμετροι (υδραυλική αγωγιμότητα, συντελεστής εναποθήκευσης κ.λπ.) και τοπογραφικά / μορφολογικά χαρακτηριστικά (προσβασιμότητα, υψόμετρο κεφαλής της γεώτρησης κ.λπ.) της περιοχής.

Με δεδομένες τις παραπάνω παραμέτρους και προκειμένου να αναζητηθούν τα σημαντικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά (βάθος και διάμετρος γεώτρησης) που επηρεάζουν στην απόδοση ενός τέτοιου έργου, ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία:

Αρχικά, περιγράφεται η έννοια της υδρομάστευσης, δηλαδή, της απόληψης νερού με την κατασκευή του κατάλληλου τεχνικού έργου. Τα υδρομαστευτικά έργα διακρίνονται σε: (i) κατακόρυφα, (ii) οριζόντια, και (iii) μικτά, που αποτελούν συνδυασμό οριζόντιων και κατακόρυφων υδρομαστευτικών έργων.

Στην συνέχεια, η εργασία επικεντρώνεται στις υδρογεωτρήσεις που αποτελούν και τα πιο συνηθισμένα υδρομαστευτικά έργα. Περιγράφονται οι μέθοδοι και ο εξοπλισμός διάνοιξης και λειτουργίας (άντλησης) μιας υδρογεώτρησης. Επιπροσθέτως παρατίθενται κριτήρια για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου διάτρησης.

Στη συνέχεια, αναλύεται η κίνηση του υπογείου νερού προς μία υδρογεώτρηση. Αναφέρονται οι διάφοροι τύποι ροής (σταθερή, μεταβαλλόμενη), όπως και οι αναλυτικές σχέσεις και θεωρήσεις που διέπουν την κίνηση του υπόγειου νερού κατά την άντληση.

Τέλος, με τη βοήθεια του λογισμικού SEEP/W, επιχειρείται η μελέτη της κίνησης του υπόγειου νερού κατά την διάρκεια μιας άντλησης σε ελεύθερο υδροφορέα, θεωρώντας την περίπτωση σταθερής ροής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τις αναλυτικές σχέσεις των Dupuit και Thiem και εξετάζονται διάφορα σενάρια (παραμετρική ανάλυση), προκειμένου να αξιολογηθούν τα τεχνικά (π.χ. διάμετρος γεώτρησης) και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά (π.χ. υδροπερατότητα υδροφόρου σχηματισμού) που επηρεάζουν περισσότερο την απόδοση μιας γεώτρησης.

2. ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΥΔΡΟΦΟΡΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Το υπόγειο νερό αναφέρεται στο νερό που υπάρχει κάτω από την επιφάνεια της Γης σε κορεσμένα εδάφη ή σχηματισμούς βράχων. Αποτελεί κύριο φυσικό πόρο και παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση των οικοσυστημάτων και στην κάλυψη των αναγκών του ανθρώπου (Καλλέργης, 1999).

Τα υπόγεια ύδατα αναπληρώνονται μέσω της διαδικασίας της κατείδυσης, όταν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα εισχωρούν στο έδαφος και γεμίζουν τα κενά μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους.

Η κατείδυση αποτελεί μέρος του υδρολογικού κύκλου (Εικόνα 2.1), σύμφωνα με τον οποίο, λόγω της θερμότητας και των ανέμων στην επιφάνεια της Γης, τα ύδατά της εξατμίζονται και συμπυκνώνονται ως υδρατμοί, δημιουργώντας σύννεφα. Τα σύννεφα υγροποιούνται και στη συνέχεια πέφτουν ως βροχή ή άλλες μορφές υετού (ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα), εμπλουτίζοντας έτσι τις αποθήκες νερού της Γης, είτε είναι αυτές επιφανειακές (θάλασσες και λίμνες), είτε είναι υπόγειες (<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-cycle>).

Το νερό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων εμπλουτίζει καταρχήν τη θάλασσα και τα επιφανειακά υδάτινα σώματα (λίμνες, ποτάμια). Κάποιες όμως ποσότητες του νερού αυτού διαπερνούν το έδαφος (διήθηση) και σχηματίζουν το υπόγειο νερό.

Μέρος του υπόγειου νερού μπορεί να ξαναβρεί τον δρόμο του προς τα επιφανειακά υδάτινα σώματα και τότε εκφορτίζεται με τη μορφή πηγών. Ένα άλλο μέρος του υπόγειου νερού κινείται βαθύτερα και εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν σημαντικές ποσότητες νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Το υπόγειο νερό μπορεί να εκμεταλλευτεί μέσω πηγαδιών / γεωτρήσεων για διάφορους σκοπούς (παροχή πόσιμου νερού, άρδευση, βιομηχανική χρήση).



Εικόνα 2.1: Ο υδρολογικός κύκλος (https://el.wikipedia.org/wiki/Κύκλος_του_νερού, από <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-cycle>).

2.1. Ζώνες υγρασίας

Η υγρασία μέσα σε έναν υδροφόρο σχηματισμό εντοπίζεται στη ζώνη αερισμού και στη ζώνη κορεσμού (Βουδούρης, 2022, Βλυσίδης, 2024):

Η **ζώνη αερισμού (zone of aeration)** αποτελείται από διάκενα που πληρούνται μερικώς από αέρα και μερικώς από νερό, δηλαδή, απαντά διφασική ροή. Στη ζώνη αυτή το νερό ονομάζεται «ρηχό νερό» (vadose water).

Στη **ζώνη κορεσμού (zone of saturation)** όλα τα διάκενα είναι γεμάτα από νερό κάτω από υδροστατική πίεση. Η ροή εδώ είναι μονοφασική. Η ζώνη αυτή εκτείνεται από την πάνω επιφάνεια κορεσμού μέχρι το υποκείμενο στεγανό υπόβαθρο. Αν απουσιάζει υπερκείμενο στεγανό στρώμα, η πάνω επιφάνεια κορεσμού αποτελεί μία υδροστατική, πιεζομετρική ή ελεύθερη επιφάνεια (water table).

Πρόκειται, λοιπόν, για επιφάνεια όπου η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική και δεν είναι παρά η στάθμη του νερού στα πηγάδια και στις γεωτρήσεις. Το νερό της ζώνης κορεσμού είναι το υπόγειο νερό (groundwater) ή φρεάτιο νερό (phreatic water) για τους ελεύθερους και μόνον υδροφόρους (Καλλέργης, 1999).

2.2. Τύποι υδροφόρων

Με τον όρο υδροφορείς εννοούνται οι γεωλογικές στρώσεις που περιέχουν και μεταφέρουν υπόγεια νερά. Οι υδροφόροι λειτουργούν ως αποθήκες νερού. Η δομή και η σύσταση τους επηρεάζει την ποσότητα και την ποιότητα του υπόγειου νερού (Water Resources Engineering, 2024).

Οι υδροφόροι κατηγοριοποιούνται ως εξής:

2.3.1. *Ελεύθεροι υδροφόροι*

Ελεύθερος είναι ο υδροφόρος ο οποίος έχει ως δάπεδο στεγανό πέτρωμα, ως οροφή ελεύθερη υδροστατική επιφάνεια ενώ το νερό που γεμίζει το πορώδες της στερεάς φάσης βρίσκεται με πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Η ελεύθερη υδροστατική επιφάνεια έχει μεταβαλλόμενη, κυματώδη μορφή και κλίση, ανάλογα με τις συνθήκες στις περιοχές τροφοδοσίας και στράγγισης, τις αντλήσεις από γεωτρήσεις και την υδραυλική αγωγιμότητα.

Ανυψώσεις και ταπεινώσεις της στάθμης του νερού αντιστοιχούν σε μεταβολές του αποθηκευμένου όγκου στον υδροφόρο. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι ποσότητες του διαθέσιμου νερού, η κατανομή του και η κίνηση του στον υδροφόρο, κατασκευάζονται ισοσταθμικοί χάρτες, από μετρήσεις της υδροστατικής στάθμης του νερού μέσα στις γεωτρήσεις (Καλλέργης, 1999).

2.3.2. *Αρτεσιανοί (υπό πίεση) υδροφόροι*

Σε αυτούς τους υδροφόρους, το υπόγειο νερό βρίσκεται «εγκλωβισμένο» ανάμεσα στα σχετικά αδιαπέραστα στρώματα της οροφής και του δαπέδου με πίεση μεγαλύτερη από την

ατμοσφαιρική, για αυτό το λόγο αποκαλούνται και ως εγκλωβισμένοι ή με πίεση υδροφόροι (confined or pressure aquifers). Η στάθμη του νερού σε μία υδρογεώτρηση που βρίσκεται σε αρτεσιανό υδροφόρο ανεβαίνει ψηλότερα από τον πυθμένα της αδιαπέρατης οροφής.

Κατά κανόνα οι αρτεσιανοί υδροφόροι μεταπίπτουν προς τα ανάντη σε ελεύθερους, λόγω διακοπής της παρουσίας της στεγανής οροφής ή αποσφήνωσης της.

Οι μεταβολές της στάθμης του νερού στις αρτεσιανές υδρογεωτρήσεις προέρχονται, κατά κύριο λόγο από τις μεταβολές της πίεσης και όχι τόσο του από τις μεταβολές του όγκου του αποθηκευμένου νερού. Έτσι, οι αρτεσιανοί υδροφόροι δρουν κατά κύριο λόγο σαν αγωγοί για τη μεταβίβαση του νερού από τις περιοχές τροφοδοσίας στις θέσεις φυσικής (πηγές) ή τεχνητής (υδρογεωτρήσεις) εκροής (Καλλέργης, 1999).

2.3.3. Υδροφόροι με διαρροές ή ημιαρτεσιανοί (leaky aquifers)

Είναι οι πιο συνηθισμένοι τύποι υδροφόρων, παρά το γεγονός ότι είναι δύσκολη η αναγνώριση τους, συνήθως λόγω κακής ερμηνείας των διαγραμμάτων των αντλητικών δομικών.

Οι ημιαρτεσιανοί υδροφόροι απαντούν σε αλλουβιακές κοιλάδες ή σε λεκάνες παλιών λιμνών, όπου ένα περατό στρώμα υπόκειται ή υπέρκειται ενός ημιπερατού στρώματος.

Η άντληση νερού από μία υδρογεώτρηση σε έναν ημιαρτεσιανό υδροφόρο, προκαλεί την κίνηση του νερού προς δύο κατευθύνσεις, οριζόντια μέσα στον υδροφόρο και κατακόρυφα από το ημι-υδροφόρο προς το υδροφόρο στρώμα. Να σημειωθεί ότι η φορά της κατακόρυφης ροής εξαρτάται από τη σχετική θέση της πιεζομετρικής και της υδροστατικής επιφάνειας (Καλλέργης, 1999).

2.3. Υδραυλικές παράμετροι

Οι σημαντικότερες υδραυλικές (ή υδρογεωλογικές) παράμετροι ενός υδροφορέα είναι οι:

Υδροπερατότητα

Ένα μέσο έχει υδροπερατότητα (ή υδραυλική αγωγιμότητα) ίση με την μονάδα, εάν στη μονάδα του χρόνου μεταβιβάζει μια μονάδα όγκου νερού μέσω μιας διατομής ίσης με τη μονάδα, με επικράτηση του κινηματικού ιξώδους και με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα.

Η σταθερά (ή συντελεστής) υδροπερατότητας (k) έχει διαστάσεις ταχύτητας, όπως προκύπτει από το νόμο του Darcy:

$$k = -\frac{v}{i} \quad [2.1]$$

όπου,

v η ταχύτητα ροής, και

i η υδραυλική κλίση.

Οι τιμές του συντελεστή υδροπερατότητας εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το ενεργό πορώδες, το μέγεθος και το σχήμα των πόρων του σχηματισμού.

Ανάλογα δε με την υδροπερατότητα, οι υδροφόροι χαρακτηρίζονται από στεγανοί (αδιαπέρατοι) έως και πολύ διαπερατοί (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1: Τύποι υδροφόρων με βάση την υδροπερατότητα (Καλλέργης, 1999).

Υδροφόρος	Σταθερά υδροπερατότητας
Πολύ υδροπερατός	$k \geq 10^{-1} \text{ m/s}$
Υδροπερατός	$10^{-6} < k < 10^{-1} \text{ m/s}$
Λίγο υδροπερατός	$10^{-9} < k < 10^{-6} \text{ m/s}$
Στεγανός	$k \leq 10^{-9} \text{ m/s}$

Μεταβιβαστικότητα

Καλείται ο ρυθμός με τον οποίο το νερό, με επικράτηση του κινηματικού ιξώδους, μεταβιβάζεται μέσω μιας μοναδιαίας διατομής του υδροφόρου με υδραυλική κλίση ίση με την μονάδα. Μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$T = k \cdot H \quad [2.2]$$

όπου,

H το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου.

Σε ένα υπό πίεση υδροφόρο ομοιόμορφου πάχους η μεταβιβαστικότητα είναι σταθερή, θεωρώντας ισότροπο και ομοιογενές σύνολο συνθηκών. Εξ ορισμού, το υδραυλικό φορτίο ενός υπό πίεση υδροφόρου είναι υψηλότερα από την οροφή του και επομένως όλο το πάχος του είναι κορεσμένο (Woessner & Poeter, 2020).

Το κορεσμένο πάχος ενός ελεύθερου υδροφορέα ποικίλλει με το χώρο, καθώς ο υδροφόρος ορίζοντας (πιεζομετρική επιφάνεια) έχει κλίση προς την κατεύθυνση της ροής και επομένως οι τιμές της μεταβιβαστικότητας αλλάζουν. Όταν η κλίση του υδροφόρου ορίζοντα είναι μικρή, χρησιμοποιείται συνήθως μία μόνο μέση τιμή T. Σε περιοχές όμως με μεγάλες κλίσεις του υδροφόρου ορίζοντα, για τον υπολογισμό μίας αντιπροσωπευτικής τιμής T μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μέσο πάχος του υδροφόρου (Woessner & Poeter, 2020).

Η μεταβιβαστικότητα, συνήθως, προσδιορίζεται από προσεκτικά σχεδιασμένες δοκιμές, κατά τις οποίες αντλούνται πηγάδια και καταγράφονται οι στάθμες του υπόγειου νερού σε κοντινά πηγάδια παρατήρησης (δοκιμαστικές αντλήσεις). Τα δεδομένα αυτά αναλύονται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας αναλυτικές εξισώσεις ή αριθμητικές προσομοιώσεις (Lohman, 1972, από Woessner & Poeter, 2020).

Αποθηκευτικότητα

Ονομάζεται και συντελεστής εναποθήκευσης (S) και δίνεται από τη σχέση 2.3.

$$S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta h} \quad [2.3]$$

όπου,

ΔV ο όγκος του νερού που αποθηκεύεται ανά μονάδα επιφάνειας,

A η επιφάνεια, και

Δh η μοναδιαία μεταβολή του υδραυλικού φορτίου.

Στους ελεύθερους υδροφορείς η αποθηκευτικότητα είναι ίση με το ενεργό πορώδες.

Στους υπό πίεση υδροφορείς κατά την άντληση μιας υδρογεώτρησης υπάρχει πτώση της πιεζομετρικής επιφάνειας που συνεπάγεται αλλαγή των πιέσεων που επικρατούν στον υδροφορέα. Συνεπώς, το νερό διαστέλλεται και ο υδροφόρος συμπιέζεται λόγω της ύπαρξης των υπερκειμένων (Καλλέργης, 1999).

Ακτίνα επίδρασης

Κατά τη διάρκεια μιας άντλησης με σταθερή παροχή, η στάθμη του υπόγειου νερού ταπεινώνεται. Η διαφορά της στάθμης πριν και μετά την άντληση ονομάζεται πτώση στάθμης.

Όσο ο χρόνος άντλησης αυξάνεται, η πτώση της στάθμης επεκτείνεται δημιουργώντας μία επιφάνεια σε σχήμα ανάστροφου κώνου γύρω από το αντλούμενο σημείο, γνωστός και ως «κώνος πτώσης στάθμης» (cone of depression). Όταν όμως οι εισροές εξισορροπήσουν, ο κώνος πτώσης στάθμης σταθεροποιείται στη μέγιστη έκτασή του.

Η ακτίνα του μέγιστου αυτού κώνου πτώσης στάθμης ονομάζεται ακτίνα επίδρασης (R) και εξαρτάται από τις ιδιότητες του αντλούμενου υδροφόρου σχηματισμού.

3. ΕΡΓΑ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΣΗΣ

Με τον όρο υδρομάστευση καλούμε την απόληψη νερού από υδροφόρα συστήματα ή πηγές με την κατασκευή του κατάλληλου τεχνικού έργου.

3.1. Κατακόρυφα έργα υδρομάστευσης

Τα κατακόρυφα υδρομαστευτικά έργα διακρίνονται σε βαθειά και ρηχά.

Βαθεία υδρομαστευτικά έργα είναι γεωτρήσεις ελάχιστης διαμέτρου 20 cm και συνήθως ελάχιστου βάθους 20 m. Για τα έργα αυτά χρησιμοποιείται ο όρος «υδρογεωτρήσεις». Η κατασκευή των υδρογεωτρήσεων γίνεται με διάτρηση με γεωτρύπανα κρουστικά, περιστροφικά ή με συνδυασμό των δύο ειδών διάτρησης.

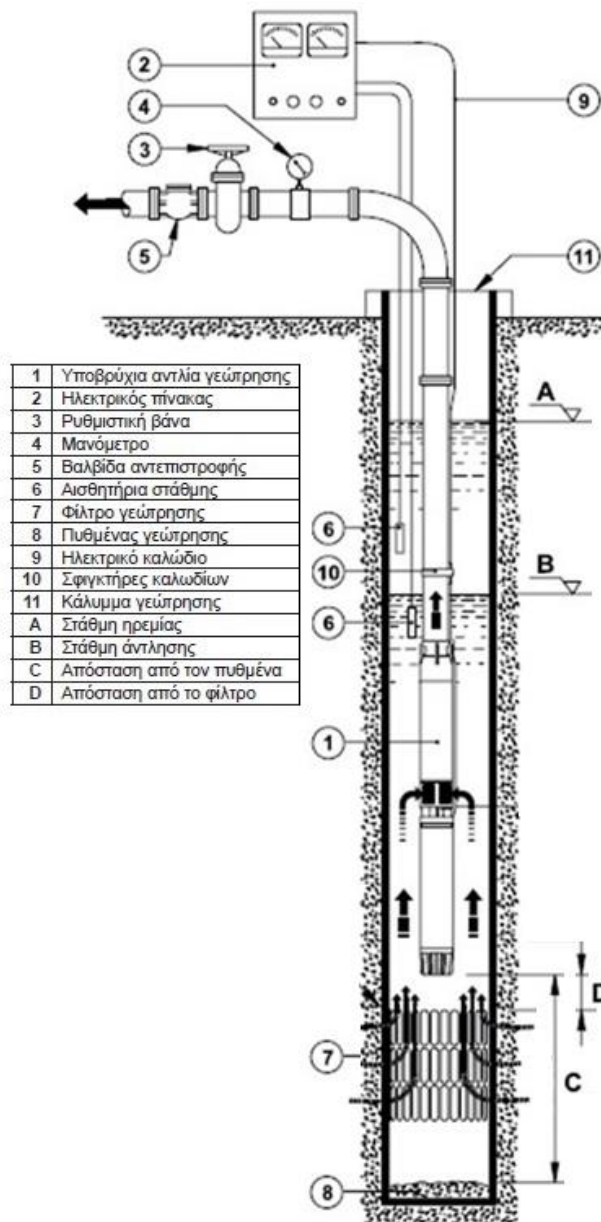
Τα **ρηχά υδρομαστευτικά έργα** είναι διάτρητα ή σκαφτά έργα που το βάθος τους σπάνια ξεπερνά τα 20 m. Τα ρηχά υδρομαστευτικά έργα, ανεξάρτητα από τον τρόπο κατασκευής τους και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά συνήθως αποκαλούνται «πηγάδια» ή «φρέατα», διότι υδρομαστεύουν ρηχούς ελεύθερους υδροφόρους που παλιά ονομάζονταν και φρεάτιοι υδροφόροι.

3.1.1. *Υδρογεωτρήσεις*

Υδρογεώτρηση ονομάζεται η κατακόρυφη οπή στο έδαφος ή στη βραχώμαζα με σκοπό την άντληση του υπόγειου νερού (Εικόνα 3.1). Η υδρογεώτρηση αποτελεί το συνηθέστερο έργο υδρομάστευσης.

Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης και του βάθους ανόρυξης μιας υδρογεώτρησης πρέπει να ληφθούν υπόψη μια σειρά από κριτήρια (γεωλογικά – υδρογεωλογικά, μορφολογικά, ποιότητας νερού, οικονομοτεχνικά, νομικά κ.ά.). Ο σχεδιασμός μιας υδρογεώτρησης θα πρέπει να προσφέρει (<https://whelveenergy.gr/ydrogeotriseis>):

- Δυνατότητα άντλησης με την μέγιστη απόδοση.



Εικόνα 3.1: Σχηματική κατακόρυφη τομή τυπικής υδρογεώτρησης
(<https://www.orcapumps.gr/arthra/ypovryxia-antlia-geotrisis-times-p-1037.html>).

- Απόληψη νερού καλής ποιότητας.
- Προστασία από μόλυνση / ρύπανση.
- Το αντλούμενο νερό είναι απαλλαγμένο από λεπτομερή υλικά.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (> 25 χρόνια).

- Ελαχιστοποίηση των δαπανών για την ανόρυξη, συμπλήρωση, ανάπτυξη και συντήρηση της γεώτρησης.

Η ανόρυξη μιας υδρογεώτρησης πραγματοποιείται αφού πρώτα ολοκληρωθούν οι διαδικασίες μελέτης – αδειοδότησης και έχει συνταχθεί ο προϋπολογισμός της.

3.1.2. Πηγάδια ή φρέατα

Είναι κατακόρυφες οπές, μικρότερου βάθους από τις υδρογεωτρήσεις. Σύμφωνα με τον τρόπο κατασκευής τους διακρίνονται σε (Καλλέργης, 1999):

Dug wells

Τα φρέατα αυτά δίνουν νερό από ρηχούς υδροφόρους λόγω της μεγάλης διαμέτρου διάνοιξης που κυμαίνεται από 1 – 10 m και βάθος έως 20 m. Όταν τα φρέατα εκτείνονται μερικά μέτρα κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου η μεγάλη διάμετρος τους επιτρέπει την αποθήκευση σημαντικών ποσοτήτων νερού.

Το μειονέκτημα των σκαφτών φρεάτων είναι ότι εύκολα ρυπαίνονται από επιφανειακά νερά και αερομεταφερόμενα υλικά.

Bored wells

Παρέχουν μικρές ποσότητες νερού με χαμηλό κόστος κατασκευής σε ρηχούς υδροφόρους και χαλαρά υλικά. Για την κατασκευή των φρεάτων αυτών χρησιμοποιούνται χειροκίνητοι ή μηχανοκίνητοι ελικοφόροι εδαφολήπτες.

Ο εδαφολήπτης φτάνει βάθος έως 15 m και διάμετρο έως 20 cm. Ο μηχανοκίνητος εδαφολήπτης σε ευνοϊκές συνθήκες ξεπερνά σε βάθος τα 30 m και διάμετρο έως 1 m.

Driven wells

Αποτελούνται από μία σειρά συνδεδεμένων σωλήνων που μπήγονται με επανειλημμένες προωθήσεις στο έδαφος μέχρι μερικά μέτρα κάτω από τη στάθμη του νερού του ορίζοντα.

Το κατώτερο μέρος του σωλήνα είναι διάτρητο έτσι ώστε να μπορεί να εισέρχεται το νερό. Οι συνήθεις διάμετροι των σωληνωτών φρεάτων είναι 3 – 10 cm, ενώ το βάθος τους δεν ξεπερνά τα 15 – 20 m.

Τα σωληνωτά φρέατα κατασκευάζονται μόνο στα λεπτόκοκκα χαλαρά εδάφη.

Jetted wells

Κατασκευάζονται με εκτόξευση νερού με πίεση. Η μεγάλη ταχύτητα του νερού διαβρώνει το έδαφος ενώ η σωλήνωση η οποία προωθείται βαθμιαία μαζί με την εκβάθυνση του φρέατος, οδηγεί το νερό και τα τμήματα του εδάφους έξω από το φρέαρ. Οι διάμετροι των φρεάτων αυτών κυμαίνονται από 3 έως 10 cm και το βάθος τους από 15 έως 20 m.

Κύρια χρήση τους είναι ως δοκιμαστικά ερευνητικά φρέατα και φρέατα παρατηρήσεως, γνωστά και ως πιεζόμετρα.

3.2. Οριζόντια υδρομαστευτικά έργα (Horizontal wells)

Οι δύο κύριοι τύποι οριζόντιων υδρομαστευτικών έργων είναι οι εξής:

Γαλαρίες ή στοές

Πρόκειται επί της ουσίας για οριζόντιους συλλεκτήριους αγωγούς νερού που συγκεντρώνουν το υπόγειο νερό μέσω βαρυτικής ροής. Η κατασκευή της στοάς πραγματοποιείται στο υψόμετρο της στάθμης του νερού και εκφορτίζεται σε μία υπόγεια δεξαμενή από την οποία το νερό ανυψώνεται με την χρήση αντλίας.

Η κατασκευή της εκάστοτε γαλαρίας διαφέρει ανάλογα με το είδος του υδροφόρου και των πετρωμάτων που θα συναντηθούν (Καλλέργης, 1999).

Σε παράκτιες περιοχές με υλικά που έχουν καλή υδροπερατότητα η γαλαρία τοποθετείται κάθετα προς τη διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού και σε βάθος τέτοιο που μηδενίζει το

κίνδυνο σημαντικών πτώσεων της στάθμης και διείσδυσης του θαλασσινού νερού στη γαλαρία.

Στην περίπτωση όπου ο υδροφόρος (ποτάμι ή λίμνη) έχει στεγανό πυθμένα η γαλαρία τοποθετείται χαμηλότερα από της αποθέσεις της κοίτης, σε εκσκαφή, η οποία γεμίζεται με χαλικόφιλτρο και λειτουργεί σαν τεχνητός υδροφόρος (Καλλέργης, 1999).

Στην περίπτωση χαλαρού υδροφόρου στρώματος η γαλαρία κατασκευάζεται παράλληλα προς την κοίτη των ποταμών και τροφοδοτείται από τον επαγωγικό εμπλουτισμό με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η μόνιμη και επαρκής απόδοση του νερού.

Σε καρστικά πετρώματα με λεπτές ρωγμές οι γαλαρίες χρησιμοποιούνται σαν κύριο υδρομαστευτικό έργο.

Στην περίπτωση σταθεροποίησης πρανών οι γαλαρίες εξοπλίζονται με χαλικόφιλτρο και λειτουργούν ως στραγγιστήρια.

Στα συμπαγή πετρώματα, όπως είναι βασάλτες ή ασβεστόλιθοι, οι γαλαρίες είναι χωρίς επένδυση, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα είδη πετρωμάτων όπου συνίσταται η χρήση χαλικόφιλτρου (Καλλέργης, 1999).

Οριζόντιες γεωτρήσεις

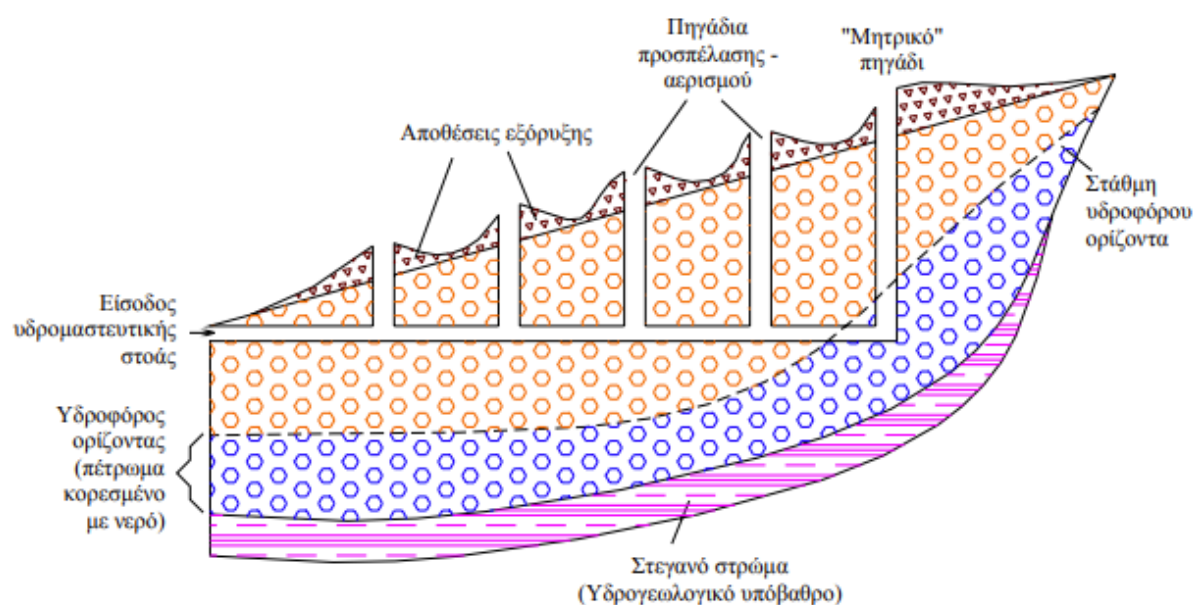
Πρόκειται για οριζόντιες οπές μικρής διαμέτρου, οι οποίες σωληνώνονται με διάτρητους σωλήνες για τη συλλογή του νερού. Η χρήση των οριζόντιων γεωτρήσεων πέρα από υδροληπτική μέθοδος, εφαρμόζεται και ως στραγγιστική για την αντιμετώπιση κατολισθήσεων (Καλλέργης, 1999).

3.3. Μικτά υδρομαστευτικά έργα

Πρόκειται για συνδυασμό κατακόρυφων και οριζόντιων υδρομαστευτικών έργων. Τέτοιο παράδειγμα είναι τα qanat.

Το qanat είναι ένα υπόγειο σύστημα υδρομάστευσης που αναπτύχθηκε πριν από 3.000 χρόνια στην Περσία (σημερινό Ιράν). Αποτελεί μία από τις πιο ισορροπημένες οικολογικά μεθόδους ανάκτησης νερού σε άνυδρες περιοχές, καθώς βασίζεται εξ' ολοκλήρου σε παροχέτευση υπόγειου νερού με βάση τη βαρύτητα, δίχως άντληση.

Αποτελείται συνήθως από μία υπο-οριζόντια (ελαφριά κλίση που σπάνια υπερβαίνει το 5%) στοά συλλογής του υπόγειου νερού (υδρομαστευτική στοά) και φρεάτια (πηγάδια / γεωτρήσεις) που συνδέουν τη στοά με την επιφάνεια (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Σχηματική κατακόρυφη τομή τυπικού qanat (Κλειδοπούλου, 2003, από Kahlown & Hamilton, 1994).

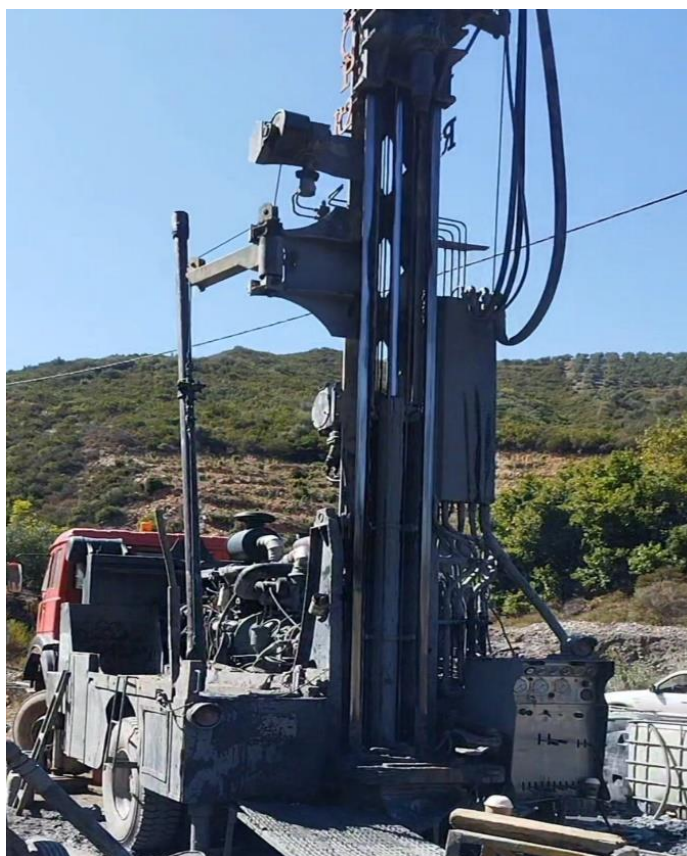
Στη σύγχρονη Ελλάδα το μεγαλύτερο γνωστό qanat είναι αυτό της Αγίας Παρασκευής στο Χορτιάτη, το οποίο βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο 575 – 585 m στα δυτικά της ομώνυμης μικρής εκκλησίας. Εδώ και αιώνες χρησιμοποιείται για να διοχετεύσει το νερό κάτω από τον ορεινό όγκο στην πλαγιά του λόφου. Το νερό που εκμεταλλεύεται προέρχεται τόσο από μια υπόγεια πηγή όσο και από κατείσδυση (<https://hydriaproject.info/el/case-studies/the-water-drainage-system-qanat-of-hortiatis/waterworks>).

4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Η κατασκευή μιας υδρογεώτρησης περιλαμβάνει τη διάνοιξή της με γεωτρύπανο (διάτρηση) και τη σωλήνωσή της, όπως και την τοποθέτηση φίλτρων (χαλίκια – φιλτροσωλήνες).

4.1. Διάτρηση

Για την διάνοιξη μιας υδρογεώτρησης γίνεται διάτρηση του εδάφους ή της βραχώμαζας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με τη χρήση γεωτρύπανου (Εικόνα 4.1). Για την επίτευξη του επιθυμητού βάθους προστίθενται συνεχώς διατρητικά στελέχη (Geotriseis.com, 2014).



Εικόνα 4.1: Γεωτρύπανο σε φορτηγό (Φωτογραφία από υδρογεώτρηση στο Βοτανικό Πάρκο Χανίων, 2023).

Οι κυριότερες μέθοδοι διάτρησης είναι οι κρουστικές, οι περιστροφικές ή ο συνδυασμός των δύο. Ανάλογα, οι δύο κύριοι τύποι γεωτρυπάνων είναι τα κρουστικά και τα περιστροφικά.

Η σωστή επιλογή μεθόδου διάτρησης (και συνεπώς γεωτρυπάνου) είναι σημαντικός παράγοντας στην αποτελεσματικότητα μιας υδρογεώτρησης, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη η θέση της γεώτρησης, η φύση και η σκληρότητα του εδάφους, το βάθος της γεώτρησης και η διάμετρός της. Συνεπώς, κάθε υδρογεώτρηση πρέπει να αντιμετωπίζεται σαν μία ιδιαίτερη περίπτωση.

4.1.1. Κρουστικές μέθοδοι διάτρησης

Η κρουστική διάτρηση είναι η παλαιότερη από τις διάφορες μεθόδους διάτρησης. Πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τους Κινέζους το 600 π.Χ.

Τυπικός εξοπλισμός

Τα κρουστικά γεωτρύπανα έχουν περιορισμένη διάμετρο οπής. Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα διάτρησης σε σχέση με την σκληρότητα των πετρωμάτων, αποδίδουν καλύτερα σε βραχώδεις σχηματισμούς παρά σε μαλακά εδάφη και προσχλωσιγενή ιζήματα.

Ο τυπικός εξοπλισμός μιας κρουστικής διάτρησης περιλαμβάνει (Καλλέργης, 1999):

- **Κρουστικό γεωτρύπανο:** Αποτελείται από έναν πύργο ή γαβριά, ένα βαρούλκο, τον κινητήρα και τον μηχανισμό κρούσεων, δηλαδή, μία ράβδο που κινείται πάνω-κάτω.
- **Διατρητική στήλη:** Αποτελείται από πάνω προς το κάτω από:
 - a) τον περιστρεφόμενο τροφοδότη του νερού (swivel),
 - b) την υποδοχή του τροφοδότη νερού (swivel socket),
 - c) ένα ζευγάρι συνδέσμων (jars),
 - d) το στέλεχος (drill stem),
 - e) το κοπτικό άκρο ή κοπίδι (drill bit), και

a) τον κάδο καθαρισμού ή ποδοβαλβίδα ή αμμολήπτη (bailer).

Το πιο σημαντικό μέρος της στήλης είναι το **κοπτικό άκρο** που συνήθως έχει μήκος 1-3 m και ζυγίζει μέχρι 1500 kg. Τα στελέχη προσθέτουν βάρος και μήκος στο κοπτικό άκρο ώστε να κόβει γρήγορα και κατακόρυφα.

Τα κοπτικά άκρα του γεωτρυπάνου είναι εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για την κοπή και τη διάτρηση του εδάφους ή των βράχων κατά τη διάρκεια διάνοιξης μιας υδρογεώτρησης. Αυτά τα άκρα είναι σχεδιασμένα για να αντέχουν στην υψηλή πίεση και την τριβή που προκαλείται κατά τη διάτρηση και να εξασφαλίσουν αποτελεσματική κοπή του υλικού.

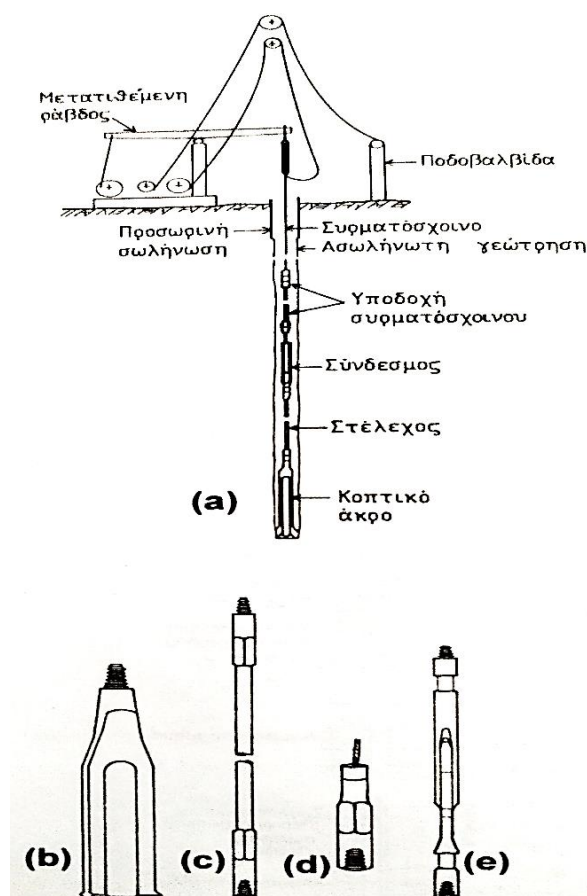
Τα διάφορα είδη κρουστικής διάτρησης είναι τα εξής (Καλλέργης, 1999):

Κρουστική διάτρηση με συρματόσχοινο (Cable tool percussion drilling)

Η υδρογεώτρηση ανοίγεται με την κοπτική ενέργεια μιας σειράς εργαλείων που κρατούνται από ένα συρματόσχοινο, το οποίο ανεβοκατεβαίνει προκαλώντας κρούσεις του τελικού κοπτικού άκρου (Φυτίκας, 1998). Το ρυθμικό ανεβοκατέβασμα του κοπτικού άκρου γίνεται με το μηχανισμό πρόκλησης των ρυθμικών κρούσεων (έκκεντρο ή ράβδος). Ο εξοπλισμός στην κρουστική διάτρηση αποτελείται από ένα γεωτρύπανο, τη διατρητική στήλη και τον κάδο καθαρισμού (Εικόνα 4.2).

Με την μέθοδο αυτή μπορεί να κατασκευαστούν υδρογεωτρήσεις διαμέτρου 8 – 60 cm σε συμπαγή πετρώματα βάθους έως 60 m χωρίς σωλήνωση. Σε χαλαρούς σχηματισμούς η μέθοδος είναι λιγότερο αποτελεσματική και απαιτεί συνεχή σωλήνωση κατά την προχώρηση.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλότητα, η εύκολη συντήρηση και επισκευή του εξοπλισμού της και η μικρή ποσότητα νερού που απαιτείται σε σύγκριση με άλλες μεθόδους διάτρησης. Το κόστος ενός τέτοιου κρουστικού συγκροτήματος είναι το μισό ενός περιστροφικού γεωτρυπάνου της ίδιας δυναμικότητας.

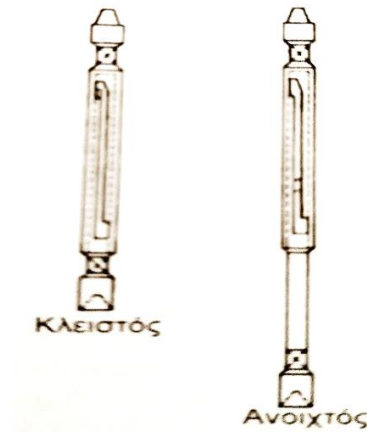


Εικόνα 4.2: Σχηματική απεικόνιση: α) Κρουστική διάτρηση με συρματόσχοινο και με δοκό που μετατίθεται μπρος-πίσω, β) κοπτικό άκρο, γ) διατρητικό στέλεχος, δ) περιστρεφόμενος τροφοδότης νερού, και ε) σύνδεσμοι (Καλλέργης, 1999 από Huisman, 1972 και Todd, 1980),

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ο αργός ρυθμός διάτρησης, ο περιορισμός στο βάθος διάτρησης και η ανάγκη συνεχούς σωλήνωσης σε χαλαρούς σχηματισμούς.

Κρουστική διάτρηση με ελεύθερη πτώση

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στη διάτρηση με ελεύθερη πτώση διαφέρει ελάχιστα από την κρουστική μέθοδο με συρματόσχοινο. Η κύρια διαφορά είναι στην αντικατάσταση του των συνδέσμων με μία διάταξη που επιτρέπει την ελεύθερη πτώση του κοπιδιού και του στελέχους (Εικόνα 4.3), ενώ και το συρματόσχοινο έχει αντικατασταθεί από συμπαγείς μεταλλικές ράβδους (στελέχη) (Σούλιος, 2008).



Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού ελεύθερης πτώσης (Καλλέργης, 1999, από Huisman, 1972).

Η κρουστική διάτρηση με ελεύθερη πτώση είναι ακόμα πιο χρονοβόρα από την μέθοδο με συρματόσχοινο, ενώ απαιτεί και πολυπρόσωπο γεωτρητικό συνεργείο.

Μετά από προσχώρηση 2 m, η διατρητική στήλη θα πρέπει να ανέβει στην επιφάνεια και το κοπίδι να αντικατασταθεί με τον κάδο καθαρισμού. Στη συνέχεια, η στήλη ξανακατεβαίνει στη γεώτρηση, καθαρίζεται και το κοπίδι επανατοποθετείται στη θέση του κάδου.

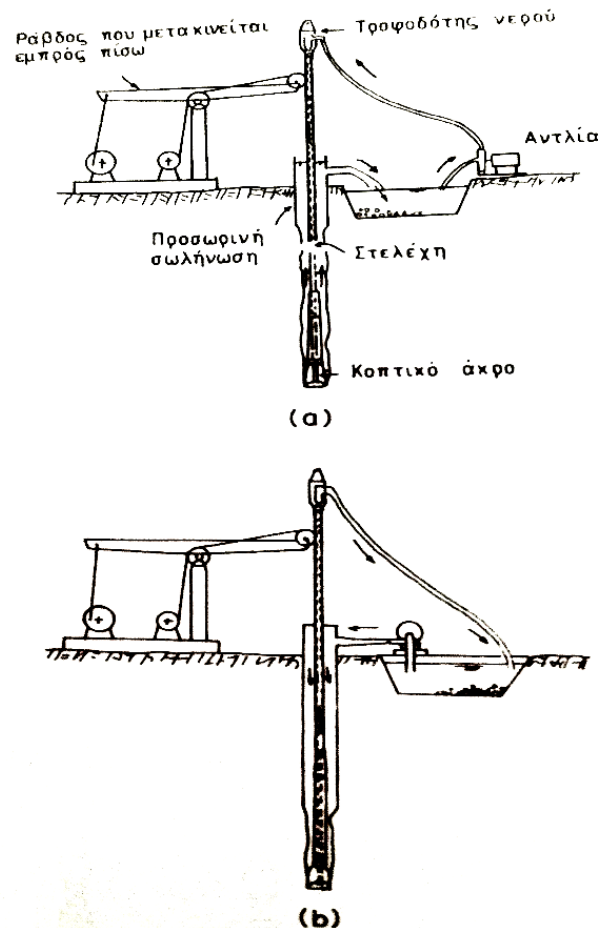
Για το λόγο αυτό, η χρήση αυτής της μεθόδου είναι περιορισμένη.

Υδραυλική κρουστική διάτρηση (Hydraulic percussion drilling)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί συνδυασμό κρουστικής διάτρησης και της τεχνικής που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των jetted wells (βλέπε ενότητα 3.1.2 στο κεφάλαιο 3). Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η ακρίβεια ως προς τη δειγματοληψία, η οποία αξιοποιείται κυρίως στην κατασκευή υδρογεωτρήσεων μικρής απόδοσης (Καλλέργης, 1999).

Αρχικά, η υδρογεώτρηση πληρώνεται με νερό. Η διάτρηση πραγματοποιείται με την πτώση του κοπτικού άκρου με υψηλή ταχύτητα από μικρό ύψος. Τα τρίμματα μαζί με το νερό εξέρχονται στην επιφάνεια από το εσωτερικό της διατρητικής στήλης λόγω της ώθησης που προκαλείται κατά την ανύψωση του κοπιδιού από τη βαλβίδα ελέγχου, καθώς υπάρχει ανακύκλωση του νερού για την επανάληψη της διαδικασίας.

Όσον αφορά τον εξοπλισμό, η βαλβίδα ελέγχου έχει αντικαταστήσει την αντλία νερού, η οποία τοποθετείται πάνω από το κοπίδι και η διατρητική στήλη είναι όμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στην κρουστική διάτρηση με εκτόξευση νερού (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση υδραυλικής κρουστικής διάτρησης κανονικής (α) και ανάστροφης (β) κυκλοφορίας. Τα βέλη δείχνουν τη διεύθυνση ροής του νερού (Καλλέργης, 1999).

Κρουστική διάτρηση με εκτόξευση νερού

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μία τεχνική που βασίζεται στο συνδυασμό της κοπτικής ενέργειας με την διαβρωτική ενέργεια του εκτοξευόμενου νερού. Το νερό διαβιβάζεται με πίεση μέσα από τα στελέχη και εξέρχεται από ακροφύσια που υπάρχουν σε κάθε μία πλευρά του κοπτικού άκρου.

Η ροή του νερού βοηθά στην απομάκρυνση των τριμμάτων, καθώς χαλαρώνει το πέτρωμα που πρόκειται να διατρηθεί και συμβάλλει σημαντικά στον καθαρισμό του κοπιδιού.

Η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική με την ανάστροφη κυκλοφορία νερού (Εικόνα 4.4b), αν και χάνεται σε μεγάλο βαθμό η ενέργεια της εκτόξευσης του νερού. Απαραίτητη είναι η σωλήνωση (προσωρινή ή περιφραγματική) στην περίπτωση όπου τα τοιχώματα της υδρογεώτρησης πέφτουν ή όταν οι απώλειες της κυκλοφορίας του νερού είναι σημαντικές.

Κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη ταχύτητα διάτρησης. Η κρουστική διάτρηση με εκτόξευση νερού χρησιμοποιείται για την κατασκευή πιεζομέτρων και πηγαδιών μικρής απόδοσης.

Διάτρηση τύπου Καλιφόρνιας

Πρόκειται για παραλλαγή της μεθόδου με συρματόσχοινο. Οι διαφορές της από την μέθοδο με συρματόσχοινο είναι οι εξής:

- a) Χρήση κάδου καθαρισμού για τη διάτρηση και την αφαίρεση της λάσπης.
- b) Αντικατάσταση της διατρητικής στήλης από υδραυλικούς γρύλους για την προώθηση του σωλήνα.
- c) Η διαδικασία της σωλήνωσης πραγματοποιείται σε μικρά τμήματα με μικρού πάχους λαμαρινένιο σωλήνα.

Η μέθοδος τύπου Καλιφόρνιας δεν χρησιμοποιείται πλέον, λόγω του αργού ρυθμού διάτρησης, αλλά και του αυξημένου κόστους σωλήνωσης της υδρογεώτρησης (Καλλέργης, 1999).

4.1.2. Περιστροφικές μέθοδοι διάτρησης

Η περιστροφική διάτρηση χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους αρχαίους Αιγύπτιους με σκοπό την λατόμηση. Η μέθοδος τώρα χρησιμοποιείται για την κατασκευή γεωτρήσεων

παντός τύπου διαμέτρου έως 45 cm και μεγάλου βάθους. Στην περίπτωση χαλαρών σχηματισμών πρόκειται για μία γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδο διάτρησης.

Η αρχή λειτουργίας των περιστροφικών γεωτρήσεων βασίζεται στην εφαρμογή κατακόρυφης δύναμης (Weight On Bit - WOB) και στην συνεχή περιστροφή της στήλης (Rotation Per Minute - RPM) ενόσω πραγματοποιείται κυκλοφορία του γεωτρητικού ρευστού (Κελεσίδης, 2012).

Τυπικός εξοπλισμός

Τα περιστροφικά γεωτρήματα προτιμώνται για πετρώματα μεσαίας έως και υψηλής σκληρότητας, καθώς επιτυγχάνουν υψηλές ταχύτητες διάτρησης και έχουν την ικανότητα διάνοιξης οπής μεγάλης διαμέτρου.

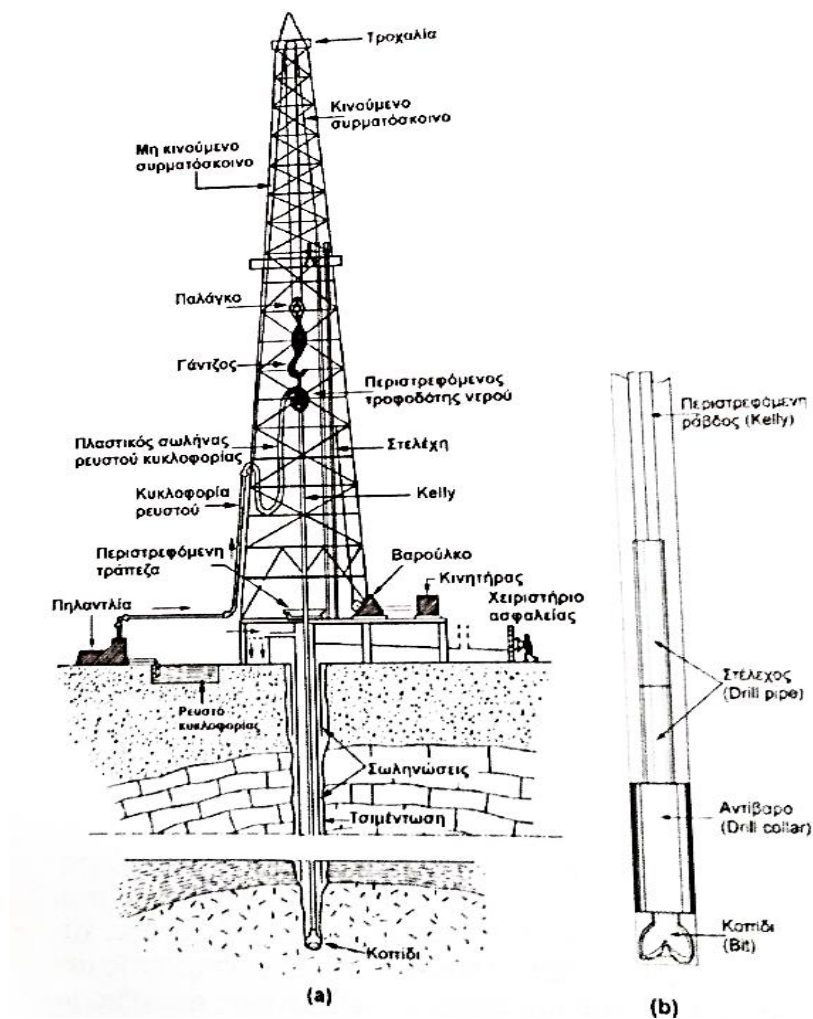
Σύμφωνα με τον τρόπο περιστροφής τους διακρίνονται σε: μηχανικά και υδραυλικά.

Τα μηχανικά γεωτρήματα χρησιμοποιούν την ενέργεια του κινητήρα για την εκκίνηση της περιστρεφόμενης τράπεζας. Αποτελούν την αρχική εφεύρεση περιστροφικών γεωτρήσεων και δεν χρησιμοποιούνται πλέον.

Τα υδραυλικά γεωτρήματα υπερτερούν των μηχανικών, διότι επιτυγχάνουν υψηλότερες ταχύτητες διάτρησης, αν και απαιτείται καταρτισμένο προσωπικό για την χρήση τους. Επίσης, είναι ακριβότερα από τα μηχανικά.

Ο τυπικός εξοπλισμός μιας περιστροφικής διάτρησης φαίνεται στην Εικόνα 4.5 και περιλαμβάνει (Καλλέργης, 1999):

- **Περιστροφικό γεωτρήμα:** Αποτελείται από τον πύργο του γεωτρήματος (mast), την τροχαλία (hoist), το βαρούλκο (derrick), την τράπεζα περιστροφής (rotating table), την πηλαντλία (mud pump) και τον κινητήρα.



Εικόνα 4.5: Σχηματική απεικόνιση (α) περιστροφικού γεωτρύπανου, και (β) τυπικής διατρητικής στήλης (Καλλέργης, 1999).

Στα σύγχρονα υδραυλικά γεωτρύπανα η τράπεζα περιστροφής έχει αντικατασταθεί από την υδραυλική περιστρεπτή κεφαλή και η πηλαντλία από έναν ισχυρό αεροσυμπιεστή (350 psi), μαζί με μία μικρή αντλία νερού.

- **Διατρητική στήλη:** Αποτελείται από κάτω προς τα πάνω από:

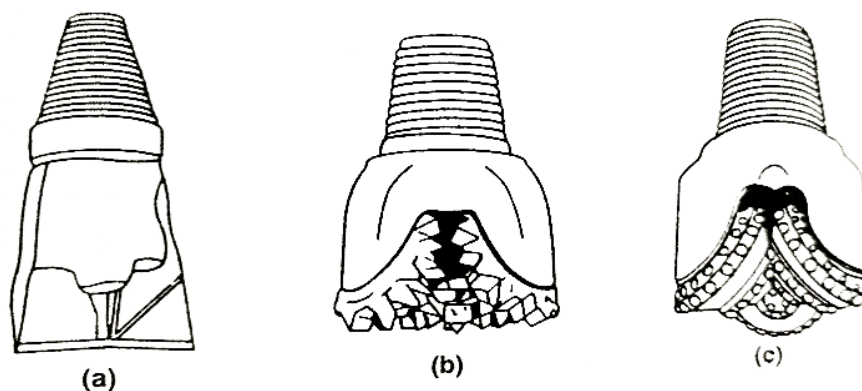
a) το κοπτικό άκρο ή κοπίδι (drill bit),

b) τα αντίβαρα που προσθέτουν το απαραίτητο βάρος στο κοπίδι και συντελούν στη διατήρηση της ευθυγραμμίας και της κατακορυφότητας της υδρογεώτρησης (drill collars),

- c) τα στελέχη ή στήλη μήκους 3-6 m το καθένα (drill pipe),
- d) την περιστρεφόμενη ράβδο στην οποία κοχλιώνεται η διατρητική στήλη στο πάνω μέρος της (kelly), και
- e) τον περιστρεφόμενο τροφοδότη νερού που συνδέει τη διατρητική στήλη με την ακίνητη πηλαντλία (swivel).

Όπως συμβαίνει και στα κρουστικά γεωτρήματα, το πιο σημαντικό μέρος της διατρητικής στήλης είναι το κοπτικό άκρο. Υπάρχουν διάφορα είδη κοπτικών άκρων (Εικόνα 4.6):

- Τρίφτερο (fishtail bit),
- Τρίκωνο ή γρανάζι (cone-type rock bit),
- Κοπίδι καρβιδίου (carbide button bit).



Εικόνα 4.6: Σχηματική απεικόνιση κοπιδίων περιστροφικής διάτρησης: (α) Τρίφτερο, (b) Τρίκωνο, και (c) Τρίκωνο με καρβίδια (Καλλέργης, 1999).

Η επιλογή του κατάλληλου εξαρτήματος εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους που πρόκειται να διατρηθεί.

Για διάτρηση μαλακών και χαλαρών υλικών είναι προτιμότερη η χρήση του τρίφτερου. Στα σκληρά πετρώματα είναι υποχρεωτική η χρήση των τρίκωνων κοπιδίων (Καλλέργης, 1999).

Τα διάφορα είδη περιστροφικής διάτρησης είναι τα εξής (Καλλέργης, 1999):

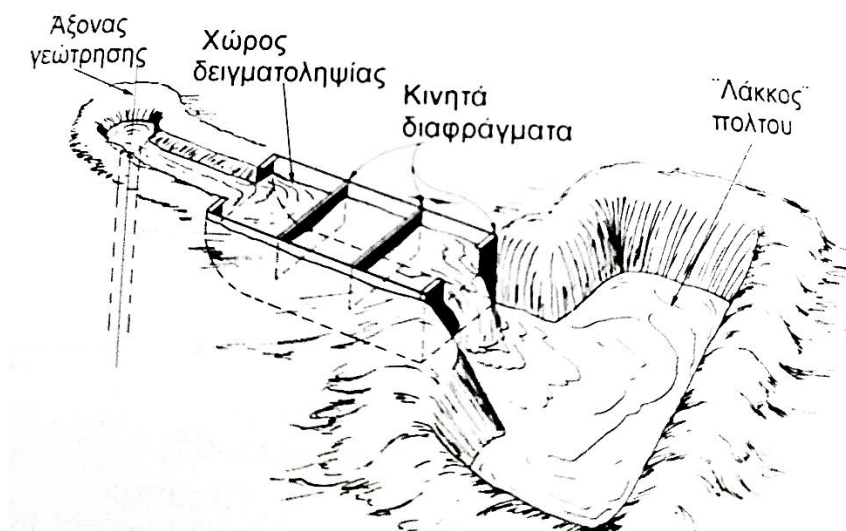
Υδραυλική περιστροφική διάτρηση με κανονική κυκλοφορία

Στη μέθοδο αυτή η διάτρηση είναι συνεχής με την χρήση περιστρεφόμενου κοπιδίου, μέσω του οποίου διαβιβάζεται ο πολφός (ή πολτός). Ο πολφός διαβιβάζεται στην οπή μέσω της διατρητικής στήλης και ανεβαίνει στην επιφάνεια από το χώρο μεταξύ των τοιχωμάτων της γεώτρησης και της διατρητικής στήλης. Με τον τρόπο αυτό παρασύρονται τα τρίμματα που έχουν διατρηθεί στην επιφάνεια.

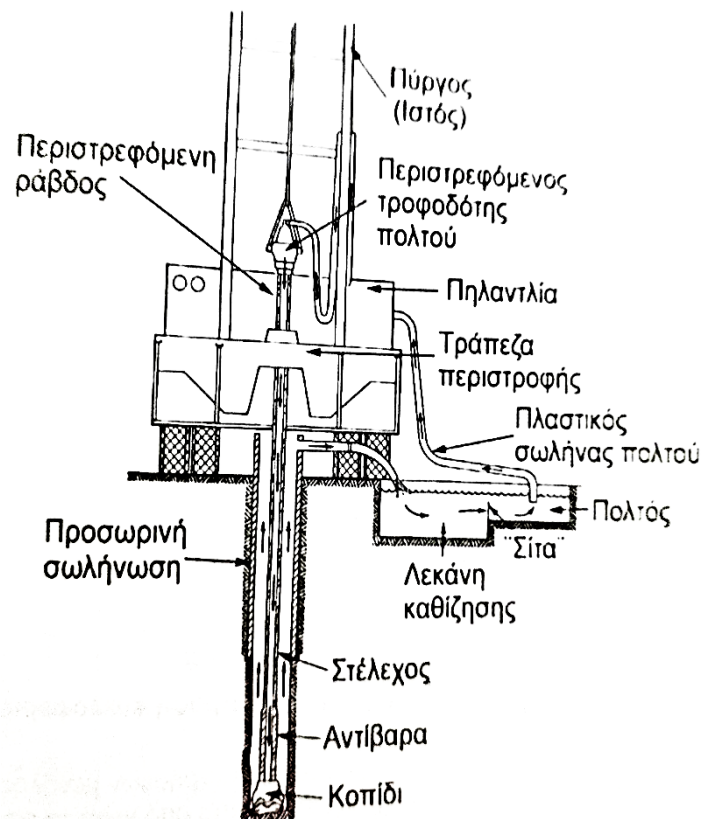
Ο πολφός που υπερχειλίζει στην επιφάνεια του εδάφους οδηγείται σε έναν λάκκο, αποθέτοντας έτσι τα αιωρούμενα τρίμματα τα οποία εν συνεχεία περνάνε από ψιλό κόσκινο. Στη συνέχεια ο πολτός αναρροφάται από την πηλαντλία και εισέρχεται ξανά στην υδρογεώτρηση (κυκλοφορία σε κλειστό σύστημα) (Εικόνες 4.7 και 4.8).

Τα διάφορα είδη πολτού που εφαρμόζονται είναι τα εξής:

a) Από άργιλο (ενεργοποιημένο μπετονίτη με Na_2CO_3) και νερό.



Εικόνα 4.7: Σχηματική απεικόνιση δεξαμενής πολτού και συλλέκτη τριμμάτων στην υδραυλική περιστροφική διάτρηση με κανονική κυκλοφορία (Καλλέργης, 1999, από *Water and Power Resources Service, 1991*).



Εικόνα 4.8: Σχηματική απεικόνιση συστήματος κυκλοφορίας του πολφού στην υδραυλική περιστροφική διάτρηση κανονικής κυκλοφορίας (Καλλέργης, 1999).

- b) Από απορρυπαντικό και νερό.
- c) Αέρας και απορρυπαντικό.
- d) Αέρας απορρυπαντικό και νερό.

Η ύπαρξη του πολτού στην υδραυλική περιστροφική διάτρηση είναι ωφέλιμη στην υδρογέωτρωση για τους παρακάτω λόγους (Καλλέργης, 1999):

- Συμβάλλει στη ψύξη και λίπανση του κοπιδίου.
- Μέσω της συνεχής κυκλοφορίας του πολφού τα τρίμματα της υδρογέωτρωσης ανεβαίνουν στην επιφάνεια.
- Συγκρατεί τα χαλαρά τοιχώματα της οπής απαλείφοντας έτσι την ανάγκη προσωρινής σωλήνωσης.

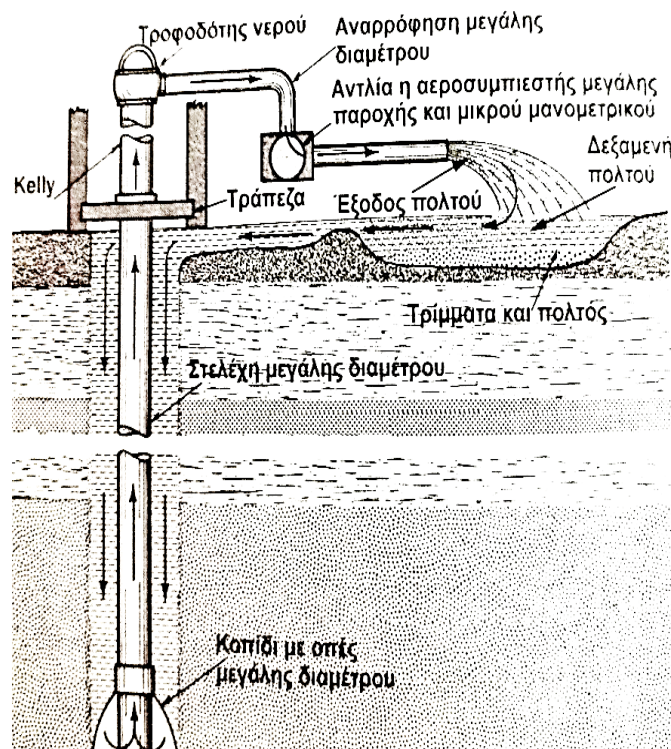
- Μειώνει τις απώλειες της υδρογεώτρησης στεγανοποιώντας τα τοιχώματα της τρύπας.

Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου της υδραυλικής περιστροφικής διάτρησης με κανονική κυκλοφορία είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης ηλεκτρικών διασκοπήσεων, καθώς κατά τη διαδικασία της διάτρησης δεν είναι απαραίτητη η προσωρινή σωλήνωση της υδρογεώτρησης. Επίσης, προσφέρει γρήγορη διάτρηση.

Παρόλα αυτά, η μέθοδος δεν συνιστάται για κατασκευή παραγωγικών υδρογεωτρήσεων, διότι πέρα από το πολύ υψηλό κόστος και την πολύπλοκη λειτουργία της, συναντώνται σοβαρά προβλήματα όταν χάνεται η κυκλοφορία από πιθανά ρήγματα του υδροφόρου.

Περιστροφική διάτρηση με ανάστροφη κυκλοφορία (Reverse circulation rotary drilling)

Η μέθοδος αυτή (Εικόνα 4.9) εφαρμόζεται κυρίως σε χαλαρούς σχηματισμούς με διάμετρο διάνοιξης από 40 cm έως και 1.8 m. Όταν η διάνοιξη γίνεται σε μεγάλες διαμέτρους είναι απαραίτητη η τοποθέτηση χαλικοφίλτρου (Καλλέργης, 1999).



Εικόνα 4.9: Σχηματική απεικόνιση περιστροφικής διάτρησης με ανάστροφη κυκλοφορία με αντλία ή με αεροσυμπιεστή (Καλλέργης, 1999).

Το νερό παίζει το ρόλο του πολφού κυκλοφορίας και αντλείται μέσω αεροσυμπιεστή ή μέσω πανίσχυρης κεντρόφυγας αντλίας από το εσωτερικό της διατρητικής στήλης. Η υδρογεώτρηση παραμένει συνεχώς πλήρης με νερό (στάθμη νερού στην επιφάνεια του εδάφους).

Είναι σημαντικό η στάθμη του νερού να παραμένει υψηλά (στην επιφάνεια του εδάφους) καθ' όλη τη διάρκεια της διάτρησης, έτσι ώστε να υπάρχει αποτελεσματική υδραυλική κλίση ανάμεσα στον υδροφόρο και τη γεώτρηση. Αυτό εξυπηρετεί επίσης στην αναρρόφηση από τη φυγόκεντρο αντλία και στη σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης από τα αιωρούμενα υλικά που βρίσκονται μαζί με το νερό.

Όταν το βάθος διάτρησης φτάσει τα 6 m, τοποθετείται προσωρινή σωλήνωση με σκοπό τη διατήρηση του φορτίου στο επιθυμητό επίπεδο. Η χρήση σωλήνωσης είναι αναγκαία όταν η στάθμη του νερού στον υδροφόρο σχηματισμό βρίσκεται πιο ψηλά για την αύξηση του φορτίου και για να μειωθούν οι απώλειες όταν η στάθμη του νερού στον υδροφόρο σχηματισμό είναι πιο βαθιά (Καλλέργης, 1999).

Το βάθος διάτρησης της μεθόδου κυμαίνεται από 150 έως 400 m με τη χρήση αεροσυμπιεστή και διπλού σωλήνα (dual tube method).

Άμεση περιστροφική διάτρηση με αέρα

Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε συνεκτικά ή ημισυνεκτικά πετρώματα, έχοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ταχύτητα διάτρησης. Ο εξοπλισμός είναι ο ίδιος με αυτόν της υδραυλικής περιστροφικής διάτρησης κανονικής κυκλοφορίας, με μόνες διαφορές την χρήση αέρα με πίεση ως ρευστό κυκλοφορίας αντί του πολφού και την αντικατάσταση της πηλαντλίας με ένα ισχυρό αεροσυμπιεστή 500 psi ή ακόμα ισχυρότερο, ανάλογα με τις συνθήκες.

Ο αέρας εκτοξεύεται από τον αεροσυμπιεστή στον περιστρεφόμενο τροφοδότη ρευστού, στην συνέχεια περνάει στην περιστρεφόμενη ράβδο (kelly) και από εκεί φτάνει στα στελέχη. Έπειτα, εξέρχεται από τις οπές του κοπτικού άκρου, με αποτέλεσμα την ανύψωση των

τριμμάτων και τη συγκέντρωση τους γύρω από τη γεώτρηση, λόγω του ανερχόμενου ρεύματος αέρα.

Η ανύψωση των τριμμάτων είναι δυνατόν να βελτιωθεί με την προσθήκη ελάχιστης ποσότητας νερού και επιφανειοδραστικών ουσιών στο ρευστό. Η προσθήκη νερού στο ρευστό συμβάλλει στον έλεγχο της παραγόμενης σκόνης, καθώς και στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του περιστρεφόμενου τροφοδότη ρευστού.

Όσον αφορά τη δειγματοληψία, η μέθοδος δεν θεωρείται αξιόπιστη, επειδή τα τρίμματα από διάφορα βάθη αναμιγνύονται, λόγω της καθυστέρησης που υπάρχει μέχρι να φτάσουν στην επιφάνεια.

Η ταχύτητα διάτρησης της μεθόδου μειώνεται, καθώς το βάθος της διάτρησης μεγαλώνει και το γεγονός αυτό οφείλεται στην ραγδαία αύξηση της πίεσης της υδρογεώτρησης. Όταν διάτρηση φτάσει στο επιθυμητό βάθος όπου βρίσκεται ο υδροφόρος σχηματισμός, η ταχύτητα διάτρησης ελέγχεται από τη παροχή του υδροφόρου.

Η μέθοδος της άμεσης περιστροφικής διάτρησης με αέρα, εκτός από την μεγάλη ταχύτητα διάτρησης παρέχει τη δυνατότητα διάτρησης σε ρωγματωμένα πετρώματα και καρστικούς σχηματισμούς.

4.1.3. Συνδυαστικές μέθοδοι διάτρησης

Διάτρηση με αερόσφυρα

Στη μέθοδο αυτή το κοπτικό άκρο έχει αντικατασταθεί από υδραυλική σφύρα (αερόσφυρα), η οποία συνδυάζει κρούση και περιστροφή ταυτόχρονα. Οι κοπτικές επιφάνειες της σφύρας είναι ενισχυμένες με καρβίδια βολφραμίου, παρέχοντας έτσι καλή απόδοση στα συνεκτικά πετρώματα.

Τα τρίμματα που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της διάτρησης φτάνουν στη επιφάνεια από την επίδραση του αέρα, κατά την ενεργοποίηση της αερόσφυρας. Όταν η διάτρηση

πραγματοποιείται κάτω από το νερό, μετά από ένα συγκεκριμένο βάθος, τα τρίμματα ανεβαίνουν στην επιφάνεια μέσω της αντλίας αέρα.

Η ισχύς του αεροσυμπιεστή φτάνει μέχρι και 500 psi, ενώ η ιδανική ταχύτητα περιστροφής της σφύρας είναι 10 – 30 rpm. Η παρουσία νερού στους αγωγούς του αέρα είναι απαραίτητη για την αποφυγή πιθανού κολλήματος της διατρητικής στήλης.

Η χρήση της διάτρησης με αερόσφουρα περιορίζεται στα συνεκτικά και ημισυνεκτικά πετρώματα. Η μέθοδος δεν συνιστάται για χαλαρά υλικά και υγρές αργίλους, διότι οι οπές εξόδου του αέρα φράζουν και η αερόσφουρα δεν λειτουργεί (Καλλέργης, 1999).

Διάτρηση ανάστροφης κυκλοφορίας (Inverse drilling)

Στη μέθοδο αυτή ο αέρας διαβιβάζεται στο κοπτικό άκρο μέσω των τοιχωμάτων των στελεχών και εξέρχεται από το κοίλο εσωτερικό τους. Η διάμετρος διάτρησης της μεθόδου σε χαλαρούς σχηματισμούς φτάνει έως 150 cm. Στον εξοπλισμό προστίθεται αεροσυμπιεστής ισχύος 125 psi και κεντρόφυγη αντλία.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην μέθοδο αυτή τα περιστροφικά γεωτρήματα θετικής κυκλοφορίας μετατρέπονται σε ανάστροφης κυκλοφορίας με χρήση αέρα.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου έχουν ως εξής (Καλλέργης, 1999):

- Μεγάλη ταχύτητα διάτρησης σε χαλαρούς σχηματισμούς.
- Μεγάλη διάμετρος διάτρησης.
- Χρήση μικρής ποσότητας πολφού.
- Μικρός απαιτούμενος χρόνος ανάπτυξης της υδρογεώτρησης.

Μοναδικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι το πολύ υψηλό κόστος του εξοπλισμού της.

Διάτρηση ανάστροφης κυκλοφορίας με διπλά τοιχώματα (Dual-wall reverse circulation drilling)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση μηχανικής προώθησης διπλού σωλήνα μέχρι το επιθυμητό βάθος διάτρησης με το κοπτικό άκρο ταυτόχρονα να σπάει το πέτρωμα.

Κύρια εφαρμογή της μεθόδου είναι σε χαλαρά υλικά όπου αποδίδει καλύτερα. Όταν συναντηθούν συνεκτικά υλικά, η διάτρηση συνεχίζεται με κανονική διάτρηση και η χρήση του διπλού σωλήνα σταματάει και χρησιμεύει μόνο ως προσωρινή σωλήνωση.

Η διάμετρος διάτρησης της μεθόδου θεωρείται μικρή (20 – 25 cm), καθώς και ως προς το βάθος διάτρησης υπάρχουν περιορισμοί ανάλογα με το είδος που πρόκειται να διατρηθεί. Το μέγιστο βάθος διάτρησης για αλλουβιακές αποθέσεις φτάνει τα 400 m, αν και αποδίδει καλά μέχρι τα 180 m. Στα συνεκτικά πετρώματα, το μέγιστο βάθος διάτρησης φτάνει έως και τα 600 m.

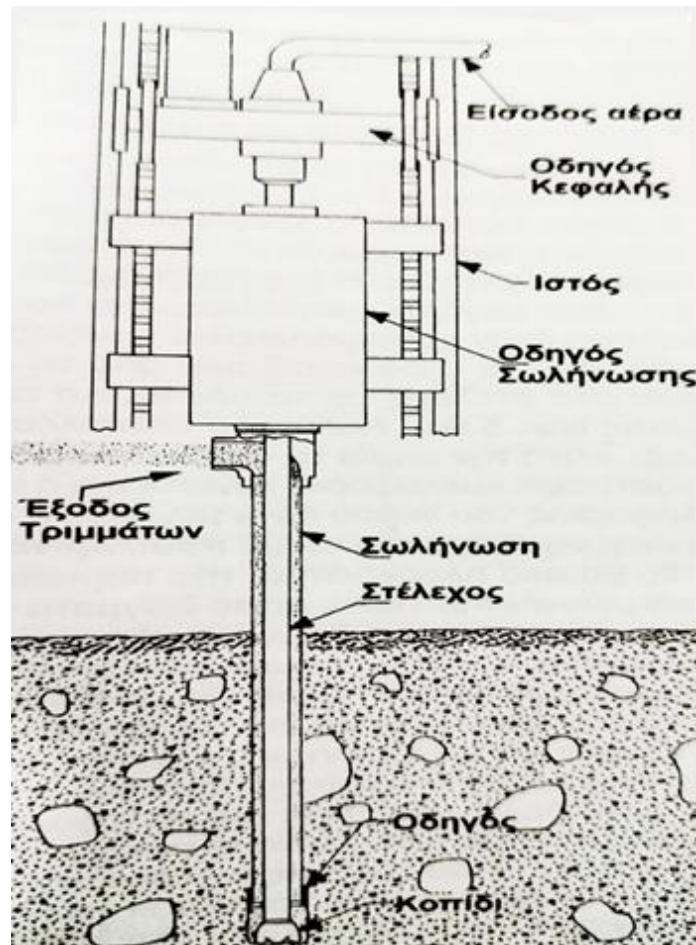
Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι (Καλλέργης, 1999):

- Μεγάλη ταχύτητα διάτρησης σε χαλαρά υλικά.
- Αντιπροσωπευτική δειγματοληψία.
- Απουσία προβλημάτων, λόγω απωλειών κυκλοφορίας.
- Εύκολη εκτίμηση της απόδοσης του υδροφόρου σχηματισμού.

Ταυτόχρονη διάτρηση και σωλήνωση (Drill-through casing driver)

Η διάτρηση στη μέθοδο αυτή (Εικόνα 4.10) πραγματοποιείται με τρεις τρόπους:

- 1) Σωλήνωση και διατρητική στήλη προχωρούν ταυτόχρονα σαν ένα.
- 2) Προηγείται η σωλήνωση κατά 0.2 – 0.5 m και ακολουθεί η διάτρηση.
- 3) Προηγείται η διάτρηση μερικές δεκάδες cm και ακολουθεί η σωλήνωση. Με αυτή την τεχνική επιτυγχάνονται μεγάλοι ρυθμοί απόδοσης σε χαλαρούς σχηματισμούς.



Εικόνα 4.10: Σχηματική απεικόνιση ταυτόχρονης διάτρησης και σωλήνωσης (Καλλέργης, 1999).

Η προσωρινή σωλήνωση, με τη βοήθεια οδηγών, προωθείται μαζί με τη διάτρηση. Η διατρητική στήλη και η προσωρινή σωλήνωση συναρμολογούνται μαζί. Τα στελέχη και οι σωλήνες έχουν το ίδιο μήκος. Στο κάτω άκρο της σωλήνωσης τοποθετείται χαλύβδινο πέδιλο.

Η κεφαλή της σωλήνωσης συναρμολογείται στη βάση του οδηγού της σωλήνωσης. Η τελευταία προωθείται με έμβολο που ενεργοποιείται με τη διαβίβαση πεπιεσμένου αέρα.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι (Καλλέργης, 1999):

- Εύκολη και γρήγορη διάτρηση στους χαλαρούς σχηματισμούς.
- Δεν υπάρχουν απώλειες κυκλοφορίας.
- Αξιόπιστη δειγματοληψία.

- Σταθερά τοιχώματα γεώτρησης.
- Δυνατότητα διάτρησης με οποιαδήποτε καιρική συνθήκη.

Τα μειονεκτήματα είναι (Καλλέργης, 1999):

- Υψηλό κόστος εξοπλισμού.
- Μεγάλος θόρυβος κατά τη λειτουργία.

3.1.4. Επιλογή της βέλτιστης μεθόδου διάτρησης

Η επιλογή της καλύτερης, κατά περίπτωση, μεθόδου διάτρησης προϋποθέτει την άριστη γνώση των γεωλογικών συνθηκών της επιλεγμένης θέσης διάνοιξης της υδρογεώτρησης.

Ο Πίνακας 4.1 αποτελεί βασικό οδηγό επιλογής μεθόδου διάτρησης και κοπτικών άκρων (Driscoll, 1986).

Επίσης, στον Πίνακα 4.2 απεικονίζεται η εκτιμώμενη απόδοση των διατρητικών μεθόδων σε διάφορους τύπους πετρωμάτων (Καλλέργης, 1999).

4.2. Σωλήνωση και τοποθέτηση φίλτρων

Η τοποθέτηση σωλήνων γίνεται συνήθως σε υδρογεωτρήσεις που κατασκευάζονται σε χαλαρούς σχηματισμούς, μετά την ολοκλήρωση ή και κατά τη διάρκεια της διάτρησης (βλέπε ενότητα 3.1.3). Στα συνεκτικά πετρώματα, όπως είναι τα καρστικά, δεν χρειάζεται συνήθως σωλήνωση.

Περιμετρικά της σωλήνωσης τοποθετείται ποταμίσιο χαλίκι (χαλικόφιλτρο), το οποίο λειτουργεί ως φυσικό φίλτρο για τον καθαρισμό του νερού.

Πίνακας 4.1: Οδηγός επιλογής τεχνικής διάτρησης (Driscoll, 1986).

Γεωλογικός σχηματισμός			
Κατηγορία	Μαγματικά + Μεταμορφωμένα	Ιζηματογενή	
Πετρώματα	Γρανίτες, χαλαζίτες, βασάλτες, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι	Ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες, σχιστόλιθοι	Άργιλος, άμμος, χαλίκια
Συνεκτικότητα	Πολύ συνεκτικά έως συνεκτικά	Συνεκτικά έως ημισυνεκτικά	Χαλαρά
Διατρητικές μέθοδοι	Κρουστική διάτρηση		
	Περιστροφική διάτρηση		
	Με αέρα ή αφρό		
	Κοπίδια καρβιδίου		Με πολτό
	Χαλύβδινα κοπίδια		
Διάμετρος	Μικρή (4 - 8'')	Μικρή έως μεσαία (6 - 12'')	
Βάθος	Μικρό (15 - 60 m)	Μικρό έως μεγάλο (15 - 400 m)	

Η σωλήνωση χρησιμοποιείται για (Καλλέργης, 1999):

- Την αποτροπή της κατάρρευσης των τοιχωμάτων της γεώτρησης, ιδιαίτερα σε χαλαρά υλικά: Η οπή της γεώτρησης παραμένει ανοιχτή, επιτρέποντας την άντληση νερού.
- Την προστασία της υποβρύχιας αντλίας από τυχόν ζημιές, είτε από τη διάτρηση είτε από τη διάβρωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης.

Οι συνηθέστεροι τύποι σωλήνων που τοποθετούνται στις υδρογεωτρήσεις είναι οι εξής (Καλλέργης, 1999):

- ✓ Χαλύβδινοι: Είναι ανθεκτικοί σε διάβρωση και έχουν μεγάλη αντοχή σε πίεση.
- ✓ Ανοξείδωτοι: Είναι πολύ ανθεκτικοί σε διάβρωση, αλλά και σε χημικές ουσίες.
- ✓ Γαλβανισμένοι: Προστατεύονται με μια στρώση ψευδαργύρου για καλύτερη αντοχή στη διάβρωση.

Πίνακας 4.2: Εκτίμηση απόδοσης των διατρητικών μεθόδων σε διάφορους τύπους πετρωμάτων (Καλλέργης, 1999).

ΤΥΠΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ		
	Κρουστική με συρματοσκοίνο	Περιστροφική με πολφό	Περιστροφική και κρουστική
Άμμοι θινών	Δύσκολη	Γρήγορη	Δεν συνίσταται
Χαλαρή άμμος - χαλίκια	Δύσκολη	Γρήγορη	Δεν συνίσταται
Ρευστή άμμος	Δύσκολη	Γρήγορη	Δεν συνίσταται
Χαλαροί ογκόλιθοι με κώνους κορημάτων - παγετώδεις αποθέσεις	Δύσκολη - αργή, χρήση σωλήνα οδηγού	Δύσκολη - αδύνατη	Δεν συνίσταται
Άργιλος – ιλύς	Αργή	Γρήγορη	Δεν συνίσταται
Σχιστόλιθοι υγείς	Γρήγορη	Γρήγορη	Δεν συνίσταται
Πλαστικοί σχιστόλιθοι	Αργή	Γρήγορη	Δεν συνίσταται
Εύθρυπτοι σχιστόλιθοι	Γρήγορη	Γρήγορη	Δεν συνίσταται
Χαλαροί ψαμμίτες	Αργή	Αργή	Δεν συνίσταται
Συμπαγείς ψαμμίτες	Αργή	Αργή	Δεν συνίσταται
Κερατολιθικοί κόνδυλοι	Γρήγορη	Αργή	Πολύ γρήγορη
Ασβεστόλιθοι με κερατολιθικούς κόνδυλους	Γρήγορη	Αργή	Πολύ γρήγορη
Ασβεστόλιθοι με μικρές ρωγμές - καρστικές κοιλότητες	Γρήγορη	Αργή - αδύνατη	Δύσκολη
Δολομίτες	Γρήγορη	Γρήγορη	Πολύ γρήγορη
Βασάλτες λεπτοστρωματώδεις σε ιζήματα	Γρήγορη	Αργή	Πολύ γρήγορη
Παχυστρωματώδεις βασάλτες	Αργή	Αργή	Γρήγορη
Μεταμορφωμένα πετρώματα	Αργή	Αργή	Γρήγορη
Γρανίτες	Αργή	Αργή	Γρήγορη

- ✓ Πλαστικοί PVC: Αποτελούν ελαφριά και οικονομική επιλογή, κατάλληλη για συγκεκριμένες εφαρμογές.
- ✓ Φιλτροσωλήνες: Έχουν μικρές οπές που επιτρέπουν τη διήθηση του νερού, αλλά εμποδίζουν την είσοδο ακαθαρσιών.

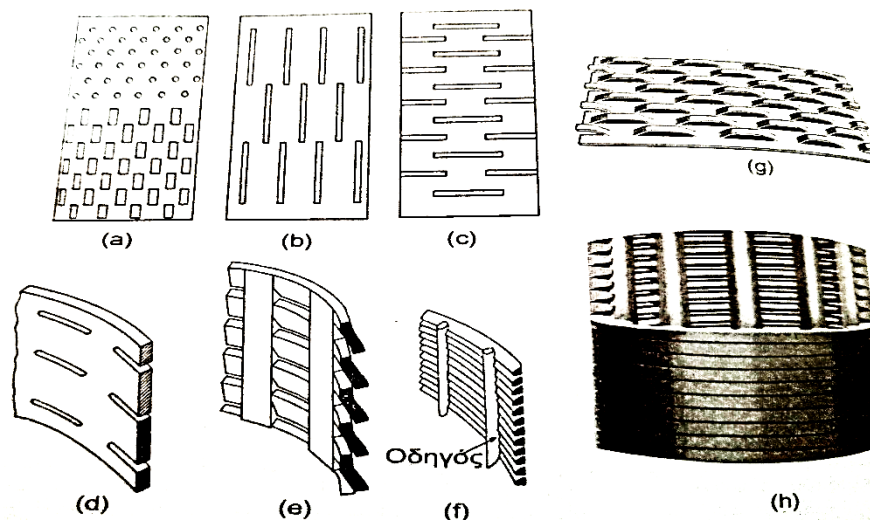
Φιλτροσωλήνες (Screens)

Πρόκειται για σωλήνες που φέρουν εγκοπές ή ανοίγματα από τα οποία είναι δυνατή η προσπέλαση του νερού, όχι όμως και των λεπτόκοκκων υλικών του εδάφους που παρασύρονται από τη ροή του νερού της υδρογεώτρησης.

Οι διάφοροι τύποι φιλτροσωλήνων, όπως και η τοποθέτησή τους στις γεωτρήσεις, φαίνονται στις Εικόνες 4.11, 4.12 και 4.13.

Η θέση του φιλτροσωλήνα σε σχέση τα υδροφόρα στρώματα είναι σημαντική για τη ροή του νερού, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες του φορτίου στο ελάχιστο (Βαφειάδης, 1998).

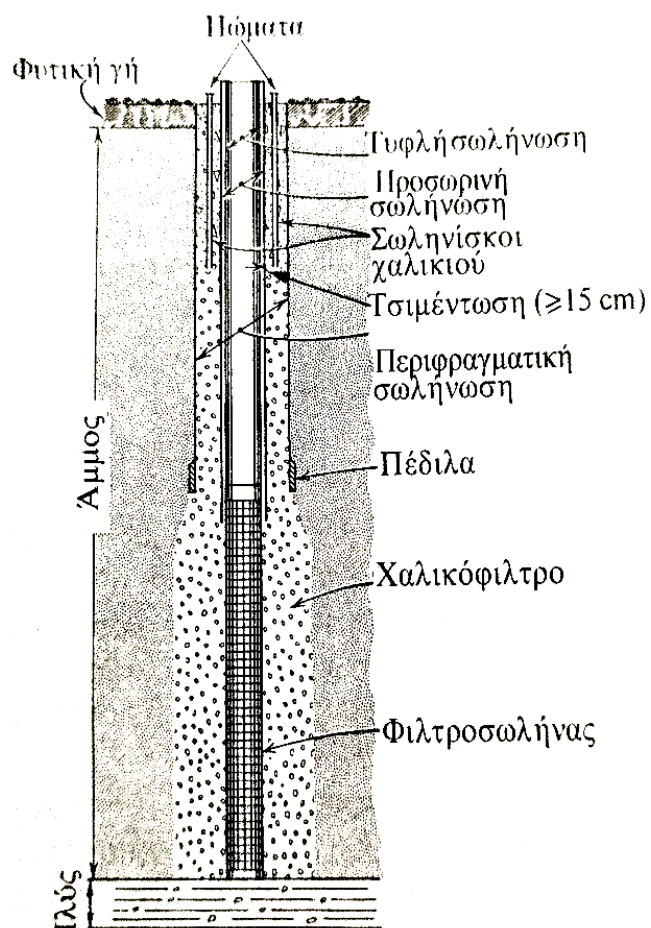
Ο τύπος και οι διαστάσεις των ανοιγμάτων του φιλτροσωλήνα ποικίλλουν και είναι κρίσιμες παράμετροι για τη διατήρηση της καλής κατάστασης του φιλτροσωλήνα και της αντλίας. Η επιλογή των διαστάσεων των ανοιγμάτων του φιλτροσωλήνα πρέπει να γίνεται μετά από κοκκομετρική ανάλυση των υλικών του υδροφόρου σχηματισμού.



Εικόνα 4.11: Σχηματική απεικόνιση φιλτροσωλήνων: (α) με κυκλικές ή ορθογώνιες τρύπες, (β) με κατακόρυφες σχισμές, (γ) και (δ) με οριζόντιες σχισμές, (ε) με περσιδωτές σχισμές, (φ) και (h) με συνεχείς σχισμές περιέλιξης, και (g) με γεφυρωτές σχισμές (Καλλέργης, 1999).



Εικόνα 4.12: Φιλτροσωλήνες τύπου γέφυρας 3 μέτρων (Βουδούρης & Μαρίνος, 2010).



Εικόνα 4.13: Σχηματική απεικόνιση κατακόρυφης τομής υδρογεώτρησης με φιλτροσωλήνα και χαλικό φίλτρο (Καλλέργης, 1999, από American Water Works Association, 1967).

Όσον αφορά την επιλογή της διαμέτρου του φιλτροσωλήνα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι διαστάσεις των ανοιγμάτων και η αποδεκτή μέγιστη ταχύτητα εισόδου του νερού σε αυτόν. Η διάμετρος του φιλτροσωλήνα θα πρέπει να είναι κατά 5 cm τουλάχιστον μικρότερη από τη διάμετρο του σωλήνα θαλάμου αντλίας.

Βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται όταν η συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων του φιλτροσωλήνα είναι ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργό πορώδες του υδροφόρου στρώματος (Βαφειάδης, 1998).

5. ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η κίνηση του υπόγειου νερού περιγράφεται από τον **νόμο του Darcy**, σύμφωνα με τον οποίο, ο ρυθμός ροής (παροχή) του νερού μέσω πορώδους σχηματισμού εξαρτάται από την υδραυλική κλίση, δηλαδή, την απώλεια δυναμικού (dh) κατά μήκος της διαδρομής του νερού (dl) (Καλλέργης, 1999):

$$Q = k \cdot A \cdot i \quad [5.1]$$

όπου,

Q παροχή

k σταθερά υδροπερατότητας (υδραυλική αγωγιμότητα),

A εμβαδόν διατομής, μέσα από την οποία διέρχεται το νερό, και

i υδραυλική κλίση ($= dh / dl$).

Ο νόμος του Darcy εφαρμόστηκε αρχικά σε κορεσμένα μέσα. Όμως, μεταγενέστερες έρευνες έδειξαν ότι μπορεί να εφαρμοστεί και για να περιγράψει τη ροή του νερού και σε ακόρεστα μέσα. Η μόνη διαφορά είναι ότι σε ακόρεστες συνθήκες, η υδροπερατότητα δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με τις διακυμάνσεις της περιεκτικότητας σε νερό στους πόρους (ογκομετρική υγρασία, θ ή volumetric water content, VWC) και έμμεσα με τις αλλαγές της πίεσης του νερού των πόρων.

Ο νόμος του Darcy συχνά εκφράζεται ως εξής (Καλλέργης, 1999):

$$v = k \cdot i \quad [5.2]$$

όπου, v η ταχύτητα του Darcy.

Η πραγματική (γραμμική) μέση ταχύτητα με την οποία κινείται το υπόγειο νερό είναι ίση με την ταχύτητα του Darcy (φαινόμενη) διαιρεμένη με το (ενεργό) πορώδες. Στους ακόρεστους σχηματισμούς, είναι ίση με την ταχύτητα Darcy διαιρεμένη με την ογκομετρική υγρασία του εδάφους (VWC).

Η γενική διαφορική εξίσωση που διέπει τη δισδιάστατη ροή, όπως την εφαρμόζει το SEEP/W (GEO-SLOPE International Ltd, 2015) μπορεί να είναι εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{k}_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathbf{k}_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \mathbf{Q} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad [5.3]$$

όπου,

H στάθμη του νερού,

k_x σταθερά υδροπερατότητας στον άξονα x ,

k_y σταθερά υδροπερατότητας στον άξονα y ,

Q παροχή,

θ ογκομετρική υγρασία, και

t χρόνος.

Επίσης, η υδραυλική αγωγιμότητα K του πορώδους μέσου δίδεται από την σχέση:

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{k} \cdot \mu}{\rho_w \cdot g} \quad [5.4]$$

όπου,

μ το κινηματικό ιξώδες του νερού, και

ρ_w η πυκνότητα του νερού, και

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}_{rel} \cdot \mathbf{k}_{sat} \quad [5.5]$$

όπου,

k_{rel} η σχετική υδροπερατότητα, και

k_{sat} η κορεσμένη υδροπερατότητα.

Στις ακόρεστες ζώνες, η ροή του υπόγειου νερού σχετίζεται με τη συνολική μύζηση (ψ_t), δηλαδή το άθροισμα της ελκτικής (ψ) και της οσμωτικής μύζησης (π):

$$\psi_t = \psi + \pi \quad [5.6]$$

Εντούτοις, στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, δεν αναπτύσσεται οσμωτική μύζηση και ως εκούτου:

$$\Psi_t \approx \Psi \quad [5.7]$$

Η ελκτική μύζηση Ψ (ή απλώς μύζηση) αναπτύσσεται στο σκελετό του εδάφους (δυνάμεις προσρόφησης και τριχοειδείς δυνάμεις) και προσδιορίζεται από τη διαφορά μεταξύ της πίεσης του αέρα (p_a) και της πίεσης του νερού των πόρων (p_w) του εδάφους:

$$\Psi = p_a - p_w \quad [5.8]$$

Τις περισσότερες φορές η πίεση του αέρα των πόρων είναι σταθερή και αρκετά μικρή ώστε να θεωρείται αμελητέα:

$$\Psi \approx - p_w \quad [5.9]$$

Η μάζα του νερού που μπορεί να συγκεντρωθεί συνολικά σε κάθε επιμέρους τμήμα του εδάφους είναι (Song, 1990):

$$m = \rho_w \cdot n \cdot S \quad [5.10]$$

όπου,

ρ_w η πυκνότητα του νερού,

n το πορώδες, και

S ο βαθμός κορεσμού.

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας, η εκροή νερού από όγκο εδάφους είναι ανάλογη με τις αλλαγές στη συγκέντρωση της μάζας του νερού και η εξίσωση συνέχειας έχει τη μορφή (Song, 1990):

$$\nabla^T \left[\rho_w \cdot \frac{k_{rel}}{\rho_w \cdot g} \cdot k_{sat} (\nabla p_w + \rho_w \cdot g) \right] = - \frac{\theta}{\theta_t} \cdot (\rho_w \cdot n \cdot S) \quad [5.11]$$

Παραγωγίζοντας την δεξιά πλευρά της προηγούμενης σχέσης ως προς τον χρόνο, η σχέση 5.11 μετατρέπεται σε:

$$-\frac{\theta}{\theta_t}(\rho_w \cdot n \cdot S) = -n \cdot S \cdot \frac{\theta \cdot \rho_w}{\theta_t} - \rho_w \cdot n \cdot \frac{\theta_s}{\theta_t} - \rho_w \cdot S \cdot \frac{\theta_n}{\theta_t} \quad [5.12]$$

Τελικά, από τον συνδυασμό των σχέσεων 5.11 και 5.12, προκύπτει (Song, 1990):

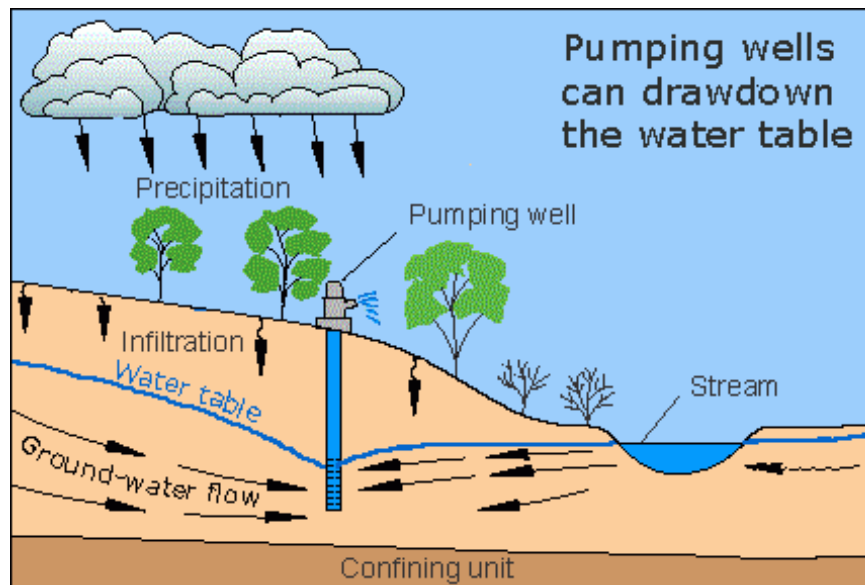
$$\begin{aligned} \rho_w \cdot S \cdot m^T \cdot \frac{\theta_s}{\theta_t} - \rho_w \cdot S \cdot \left(\frac{n}{K_w} + \frac{(1-n)}{K_s} \right) \cdot \frac{\theta \cdot p_w}{\theta_t} + n \cdot \rho_w \cdot \frac{\theta_s}{\theta \cdot p_w} \cdot \frac{\theta \cdot p_w}{\theta_t} \\ + \nabla^T \left[\rho_w \cdot \frac{k_{rel}}{\rho_w \cdot g} \cdot k_{sat} \cdot (\nabla p_w + \rho_w \cdot g) \right] = 0 \end{aligned} \quad [5.13]$$

Η σχέση 5.13 θεωρείται η θεμελιώδης εξίσωση συνέχειας της ροής του υπόγειου νερού: Ο πρώτος όρος του αθροίσματος αντιπροσωπεύει την συνολική συμπίεση του εδάφους λόγω των ενεργών τάσεων και της πίεσης των πόρων, ενώ με τον δεύτερο όρο εκφράζεται η συμπίεση των στερεών σωματιδίων του σκελετού του εδάφους, καθώς και οι αλλαγές στην πυκνότητα του νερού, λαμβάνοντας υπόψη την συμπιεστότητα αέρα – νερού. Ο τρίτος όρος του αθροίσματος εκφράζει αλλαγές στον βαθμό κορεσμού λόγω ροής, ενώ ο τέταρτος όρος ερμηνεύει την απόκλιση της μάζας του νερού στην ροή του εναπομείναντος νερού.

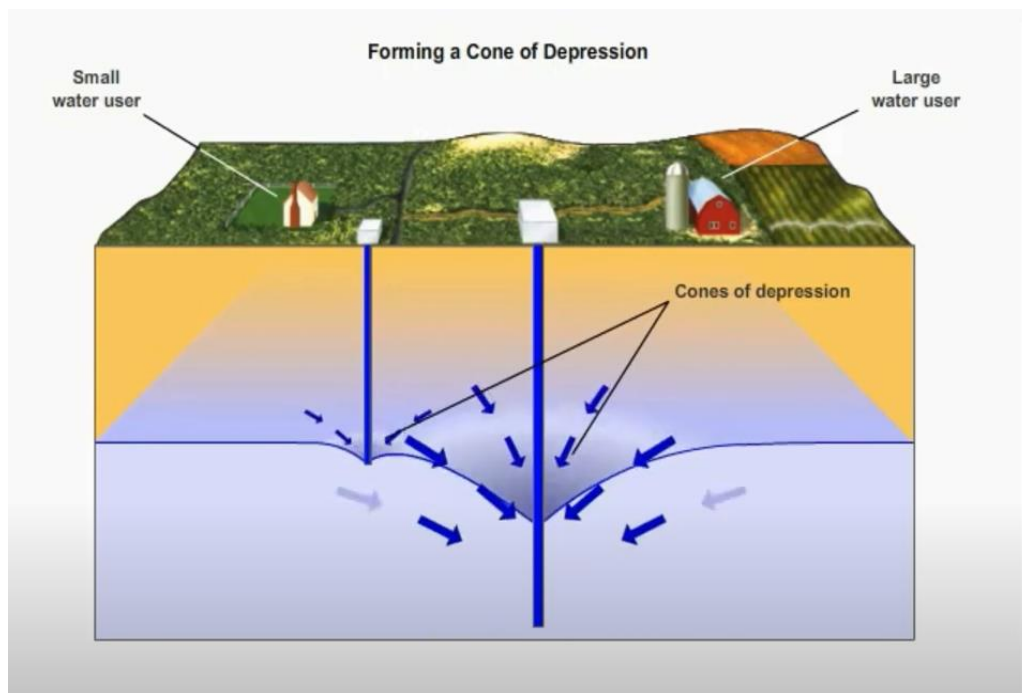
Η αρχική σχέση μύζησης – κορεσμού του εδάφους καθορίζεται από την αρχική θέση της στάθμης των υπόγειων υδάτων, τα εδαφικά στρώματα με διαφορετική υδραυλική συμπεριφορά και τους κλιματικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα η βροχόπτωση (Song, 1990).

5.1. Ροή του υπόγειου νερού σε γεώτρηση

Κατά τη διαδικασία μιας άντλησης, η ταπείνωση της στάθμης επεκτείνεται δημιουργώντας μία επιφάνεια στάθμης του υπόγειου νερού σε σχήμα ανάστροφου κώνου γύρω από την υδρογεώτρηση, γνωστός και ως «κώνος πτώσης στάθμης» (cone of depression, βλέπε Εικόνες 5.1 και 5.2).



Εικόνα 5.1: Σχηματική απεικόνιση της ροής του υπόγειου νερού προς υδρογεώτρηση
(<https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/900>).



Εικόνα 5.2: Σχηματική απεικόνιση των κώνων πτώσης στάθμης σε γειτονικές υδρογεωτρήσεις
(<https://www.facebook.com/geologyeng/posts/groundwater-cone-of-depressionlink-httpswwwyoutube.com/watchv4v0rv6k2bnq/810984832892818>).

Ο κώνος πτώσης στάθμης μεγαλώνει έως ότου οι εισροές εξισορροπήσουν τον όγκο του νερού που αντλείται στο φρέαρ. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού προς τη γεώτρηση είναι η παροχή άντλησης, η υδραυλική αγωγιμότητα (υδροπερατότητα) και η μεταβιβαστικότητα του υδροφορέα.

Ο μοναδικός παράγοντας που είναι δυνατόν να ελεγχθεί από τον άνθρωπο είναι η παροχή άντλησης και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής για μία αποτελεσματική υδρογεώτρηση. Επιλογή μεγάλης παροχής άντλησης θα οδηγήσει σε πρόωρη αποστράγγιση του υδροφόρου στρώματος έχοντας αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Αντιθέτως, μικρή παροχή άντλησης έχει ως αποτέλεσμα την εκμετάλλευση μη επιθυμητού όγκου υπόγειου νερού, με συνέπεια η υδρογεώτρηση να κρίνεται ανεπιτυχής λόγω του μεγάλου της κόστους.

Η ροή των υπόγειων υδάτων προς γεωτρήσεις (ή πηγάδια) μπορεί να είναι (Καλλέργης, 1999):

(i) μεταβαλλόμενη (transient flow) ή σταθερή (steady state flow), και

(ii) περιορισμένη (αν υπάρχει κοντά στην υδρογεώτρηση κάποιο υδρογεωλογικό όριο, π.χ. μια λίμνη) ή μη περιορισμένη.

Η ροή του υπόγειου νερού προς ένα πηγάδι είναι τρισδιάστατη, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι οριζόντιες όσο και η κατακόρυφη συνιστώσα της. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να δοθεί μια πολύ απλούστερη, δισδιάστατη, κατάσταση.

Όταν οι συνθήκες κατά μήκος των ορίων του προβλήματος είναι ομοιόμορφες στην κατακόρυφη διεύθυνση και δεν υπάρχει εμπλουτισμός, η ροή του υπόγειου νερού προς ένα πλήρες πηγάδι πραγματοποιείται οριζόντια και η κατακόρυφη συνιστώσα της ροής είναι παντού μηδενική.

Στο μεσαίο τμήμα του φρέατος, επιπλέον, υπάρχει μια ακτινική ροή, η οποία περιγράφεται σε επίπεδες πολικές συντεταγμένες. Τότε, όλες οι ιδιότητες της ροής, όπως η ταχύτητα, η μεταβολή της πιεζομετρικής στάθμης κ.λπ., εξαρτώνται μόνο από μία μεταβλητή, την απόσταση μεταξύ του σημείου παρατήρησης και του κέντρου του πηγαδιού (Καλλέργης, 1999).

Η μελέτη ροής του υπόγειου νερού προς μια αντλούμενη γεώτρηση είναι ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα, το οποίο εξαρτάται από τις πραγματικές επί τόπου συνθήκες, όπως το είδος του υδροφόρου σχηματισμού, του υπερκείμενου και του υποκείμενου σχηματισμού, τυχόν υδρογεωλογικά όρια, το βάθος της γεώτρησης, το πάχος των φίλτρων, την παροχή και την διάρκεια άντλησης κ.λπ.

5.1.1. Μεταβαλλόμενη κατάσταση ροής σε υπό πίεση υδροφορέα

Τη στιγμή που ξεκινά η άντληση υπόγειων υδάτων από ένα πλήρες πηγάδι σε μη περιορισμένο (θεωρητικά άπειρης έκτασης) υπό πίεση υδροφόρο, θα αρχίσει να εξαπλώνεται ακτινικά προς τα έξω ο κώνος πτώσης της στάθμης.

Η πτώση της στάθμης διαδίδεται με το χρόνο και την απόσταση (Εικόνα 5.3), μειώνοντας τις πιέσεις του νερού των πόρων και αυξάνοντας τις πιέσεις εδάφους – κόκκων. Και από τα δύο φαινόμενα απελευθερώνεται νερό, το οποίο στη συνέχεια ρέει στη γεώτρηση. Αυτή η παροχή νερού είναι που εμποδίζει την άμεση δημιουργία συνθηκών σταθερής ροής.

Για τη μελέτη της μεταβαλλόμενης ροής των υπόγειων υδάτων, θεωρώντας ότι δεν υπάρχει εμπλουτισμός (επαναφόρτιση), ο υδροφορέας χωρίζεται σε (μοναδιαία) στοιχεία με πάχος H (ίσο με το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα) και μοναδιαία έκταση. Αν το πορώδες του σχηματισμού είναι ίσο με n , το κάθε μοναδιαίο στοιχείο περιέχει μάζα νερού ίση με (Huisman, 1972):

$$M_w = \rho_w \cdot n \cdot H \quad [5.14]$$

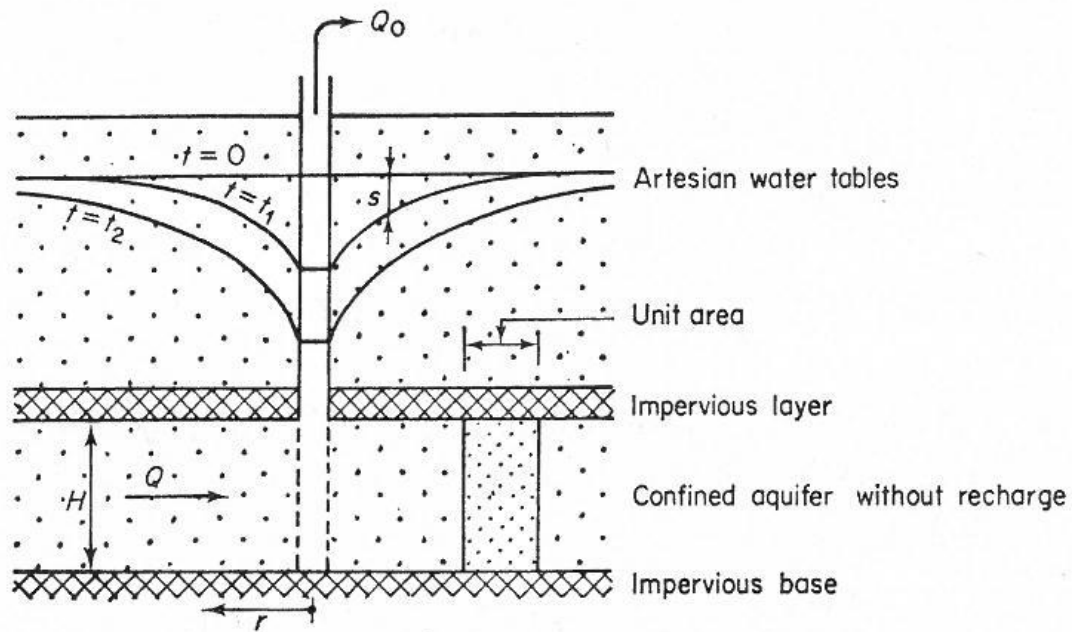
και μάζα κόκκων ίση με:

$$M_g = \rho_g \cdot (1 - n) \cdot H \quad [5.15]$$

όπου, ρ_g η πυκνότητα των κόκκων.

Για στιγμιαία αύξηση της πτώσης στάθμης (ds), η μάζα του νερού στο μοναδιαίο στοιχείο θα αλλάξει κατά:

$$\frac{dM_w}{ds} = n \cdot H \cdot \frac{d\rho_w}{ds} + \rho_w \cdot H \cdot \frac{dn}{ds} + \rho_w \cdot H \cdot \frac{dH}{ds} \quad [5.16]$$



Εικόνα 5.3: Σχηματική απεικόνιση του μεταβαλλόμενου κώνου πτώσης στάθμης σε πλήρη γεώτρηση που αντλεί από μη περιορισμένο υπό πίεση υδροφορέα (Huisman, 1972).

ενώ η μάζα των κόκκων παραμένει σταθερή:

$$\frac{dM_g}{ds} = 0 = (1 - n) \cdot H \cdot \frac{d\rho_g}{ds} - \rho_g \cdot H \cdot \frac{dn}{ds} + \rho_g \cdot (1 - n) \cdot \frac{dH}{ds} \quad [5.17]$$

ή

$$0 = \frac{\rho_w}{\rho_g} (1 - n) \cdot H \cdot \frac{d\rho_g}{ds} - \rho_w \cdot H \cdot \frac{dn}{ds} + \rho_w \cdot (1 - n) \cdot \frac{dH}{ds} \quad [5.18]$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\frac{dM_w}{ds} = n \cdot H \cdot \frac{d\rho_w}{ds} + \frac{\rho_w}{\rho_g} \cdot (1 - n) \cdot H \cdot \frac{d\rho_g}{ds} + \rho_w \cdot \frac{dH}{ds} \quad [5.19]$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πίεση του εδάφους (σ_s) είναι το άθροισμα των πιέσεων του νερού (σ_w) και των κόκκων (σ_g):

$$\sigma_s = \sigma_w + \sigma_g \quad [5.20]$$

η άντληση του φρέατος θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης του νερού των πόρων:

$$d\sigma_w = -\rho_w \cdot g \cdot ds \quad [5.21]$$

αλλά, καθώς ο υδροφόρος ορίζοντας παραμένει κορεσμένος, δεν θα αλλάξει την πίεση του εδάφους, δηλαδή:

$$d\sigma_s = 0 \text{ ή } d\sigma_g = -d\sigma_w = \rho_w \cdot g \cdot ds \quad [5.22]$$

και σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικότητας (Huisman, 1972):

$$d\rho_w = \rho_w \cdot \frac{d\sigma_w}{K_w}, \quad d\rho_g = \rho_g \cdot \frac{d\sigma_g}{K_g}, \quad dH = -H \cdot \frac{d\sigma_g}{E} \quad [5.23]$$

όπου,

E το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, και

K_w K_g τα μέτρα συμπίεσης του νερού και των κόκκων, αντίστοιχα.

Αντικαθιστώντας στις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\frac{dM_w}{ds} = -\rho_w^2 \cdot g \cdot H \cdot \left(\frac{n}{K_w} + \frac{1-n}{K_g} + \frac{1}{E} \right) \quad [5.24]$$

Τελικά, ο όγκος του νερού (V_w) που απελευθερώνεται από κάθε στοιχείο με μοναδιαίο εμβαδό δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dV_w}{ds} = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot \left(\frac{n}{K_w} + \frac{1-n}{K_g} + \frac{1}{E} \right) = \varepsilon \quad [5.25]$$

όπου, ε μια σταθερά του υδροφορέα.

Με βάση τα παραπάνω, για συντελεστή μεταβιβαστικότητας του υδροφορέα T = k · H (κεφάλαιο 1, σχέση 1.2) και λαμβάνοντας υπόψη τον νόμο του Darcy (σχέση 5.1), η παροχή Q προς την γεώτρηση σε μία απόσταση παρατήρησης r από το κέντρο της είναι (Huisman, 1972):

$$Q = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot T \cdot \frac{\partial s}{\partial r} \quad [5.26]$$

όπου, s η πτώση στάθμης στην ίδια απόσταση.

Με βάση τις σχέσεις 5.25 και 5.26 και λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο t που πέρασε από την έναρξη της άντλησης με σταθερή παροχή Q_0 , προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$\partial Q = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot \frac{\partial V_w}{\partial t} \quad [5.27]$$

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} = \frac{dV_w}{ds} \cdot \frac{\partial s}{\partial t} = \varepsilon \cdot \frac{\partial s}{\partial t} \quad [5.28]$$

$$\frac{\partial Q}{\partial r} = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial s}{\partial t} \quad [5.29]$$

Και τελικά:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{\partial s}{r \cdot \partial r} - \frac{\varepsilon \cdot \partial s}{T \cdot \partial t} = 0 \quad [5.30]$$

Για τις οριακές συνθήκες $r \rightarrow r_0$, $Q = Q_0$ και $r \rightarrow \infty$, $Q = 0$, η παραπάνω διαφορική εξίσωση έχει ως λύση (τύπος του **Theis**):

$$s = \frac{Q_0}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u^2) \quad [5.31]$$

και

$$Q = Q_0 \cdot e^{-u^2} \quad [5.32]$$

Σημειώνεται ότι η εξίσωση Theis (1935) προϋποθέτει ότι ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ομοιογενής και ισότροπος, η ροή είναι παροδική και συμβαίνει μέσα σε ένα δισδιάστατο ακτινωτό σύστημα άπειρης έκτασης. Επίσης, απλοποιεί, παραβλέποντας την ακτίνα της γεώτρησης και αντιμετωπίζοντάς την ως απλή γραμμή. Παρόλες τις προϋποθέσεις και απλοποιήσεις του, ο τύπος του Theis θεωρείται θεμελιώδης για την περιγραφή της μεταβαλλόμενης ροής προς υδρογεωτρήσεις (Baalousha, 2024).

Η συνάρτηση $W(u^2)$ είναι το λεγόμενο «λογαριθμικό ολοκλήρωμα» (δίνεται από πίνακες). Το u^2 ορίζεται από τη σχέση:

$$u^2 = \frac{\varepsilon \cdot r^2}{4 \cdot T \cdot t} \quad [5.33]$$

ή, σε απλοποιημένη μορφή (Baalousha, 2024):

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t} \quad [5.34]$$

όπου, S ο συντελεστής εναποθήκευσης του υδροφορέα (βλέπε κεφάλαιο 1, σχέση 1.3)

Για μικρές τιμές του u^2 , δηλαδή, κοντά στην υδρογεώτρηση και μετά από αρκετό χρόνο άντλησης, η συνάρτηση $W(u^2)$ μπορεί να προσεγγιστεί με τη σχέση (Huisman, 1972):

$$W(u^2) = 2 \cdot \ln \frac{0.75}{u} \quad [5.35]$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση 5.31:

$$s = \frac{Q_0}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{0.75}{u} \quad [5.36]$$

Από τη σχέση 5.36 και για αποστάσεις r_1 και r_2 από το κέντρο της γεώτρησης, προκύπτει η εξίσωση του **Thiem** (1906):

$$s_1 - s_2 = \frac{Q_0}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot H} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad [5.37]$$

όπου, s_1 και s_2 οι πτώσεις στάθμης σε αποστάσεις r_1 και r_2 από το κέντρο της γεώτρησης, αντίστοιχα.

Απλοποίηση (ημιλογαριθμική προσέγγιση) της εξίσωσης Theis είναι και ο τύπος του **Jacob** (Cooper & Jacob, 1946, από Μπεζές, 1978):

$$s = \frac{0.183 \cdot Q_0}{T} \cdot \log \frac{2.25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S} \quad [5.38]$$

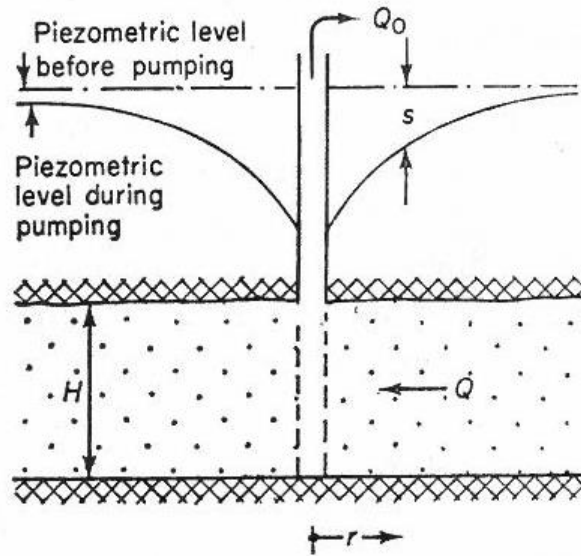
Ο περιορισμός εφαρμογής της παραπάνω σχέσης (πέρα από τις προϋποθέσεις που ισχύουν στον τύπο του Theis) είναι το u (σχέση 5.34) να είναι μικρότερο του 0.01.

Μέσω του τύπου του Jacob μπορεί να εκτιμηθεί και η ακτίνα επίδρασης της υδρογεώτρησης, εάν θεωρηθεί ότι στην ακτίνα αυτή $s = 0$, ως εξής:

$$R = 1.5 \cdot \sqrt{\frac{T \cdot t}{s}} \quad [5.39]$$

5.1.2. Σταθερή κατάσταση ροής σε υπό πίεση υδροφορέα

Όταν ο κώνος πτώσης στάθμης ενός μη περιορισμένου υπό πίεση υδροφορέα που αντλείται από μια πλήρη γεώτρηση έχει πια σταθεροποιηθεί ($Q = Q_0 = \text{σταθερό}$) και δεν υπάρχει επαναφόρτιση του υδροφόρου σχηματισμού (Εικόνα 5.4), οι εξισώσεις κίνησης και συνέχειας, ξεκινώντας πάντα από τον νόμο του Darcy, αναλύονται ως εξής (Huisman, 1972):



Εικόνα 5.4: Σχηματική απεικόνιση του σταθεροποιημένου κώνου πτώσης στάθμης σε πλήρη γεώτρηση που αντλεί από μη περιορισμένο υπό πίεση υδροφορέα (Huisman, 1972).

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot v \cdot H = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot k \cdot H \cdot \frac{ds}{dr} \quad [5.40]$$

$$ds = \frac{Q_0 \cdot dr}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot H \cdot r} \quad [5.41]$$

όπου, s είναι η διαφορά στην (αρτεσιανή) στάθμη του νερού πριν την άντληση και κατά την διάρκεια της άντλησης, όταν και σταθεροποιείται ο κώνος πτώσης στάθμης.

Η ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης 5.41 για τις οριακές συνθήκες $r = r_1$, $s = s_1$ και $r = r_2$, $s = s_2$, όπου, s_1 και s_2 οι πτώσεις στάθμης σε τυχαίες αποστάσεις r_1 και r_2 από το κέντρο της γεώτρησης, αντίστοιχα, δίνει και πάλι τον τύπο του **Thiem** (σχέση 5.37).

Για τη ροή των υπόγειων υδάτων σε υδρογεωτρήσεις, ο τύπος του Thiem είναι υψίστης σημασίας, καθώς ισχύει – τουλάχιστον κατά προσέγγιση – για σχεδόν όλους τους τύπους ροής, περιορισμένη και μη περιορισμένη, σταθερή και μεταβαλλόμενη. Ωστόσο, δεν παρέχει την στιγμιαία πτώση στάθμης s σε απόσταση παρατήρησης r από το κέντρο του φρέατος. Για αυτό το σκοπό πρέπει να εφαρμοστεί αόριστη ολοκλήρωση:

$$s = -\frac{Q_0}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot H} \cdot \ln r + \frac{Q_0}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot H} \cdot \ln R \quad [5.42]$$

όπου, R η ακτίνα επίδρασης της υδρογεώτρησης (για τη συγκεκριμένη παροχή Q_0).

Η σχέση 5.42, απλοποιημένη, δίνει τον τύπο του **Dupuit** (1857) για υπό πίεση υδροφορείς (Huisman, 1972):

$$s = \frac{Q_0}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot H} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad [5.43]$$

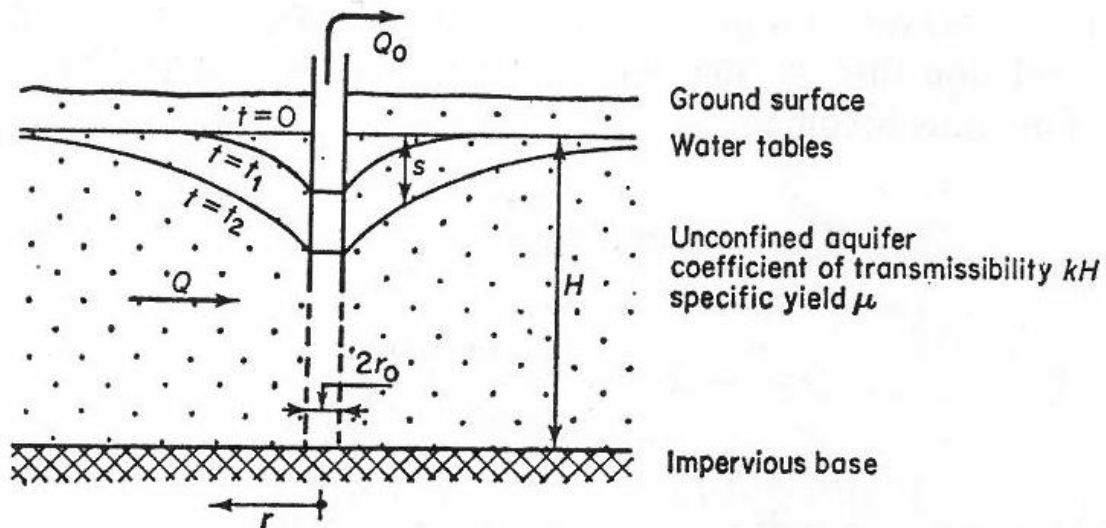
5.1.3. Μεταβαλλόμενη κατάσταση ροής σε ελεύθερο υδροφορέα

Η Εικόνα 5.5 δείχνει έναν μη περιορισμένο ελεύθερο υδροφορέα που βρίσκεται πάνω από μια αδιαπέρατη βάση. Δεν υπάρχει εμπλουτισμός (επαναφόρτιση) από βροχοπτώσεις, ούτε απώλεια νερού λόγω εξάτμισης – διαπνοής και συνεπώς ο υδροφόρος ορίζοντας είναι οριζόντιος (Huisman, 1972).

Η άντληση του υπόγειου νερού μέσω μιας πλήρους (τέλειας) υδρογεώτρησης θα έχει ως αποτέλεσμα την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό σημαίνει ότι με την πάροδο του χρόνου θα υπάρχει μείωση του κορεσμένου πάχους (H) που είναι διαθέσιμο για τη ροή του νερού.

Η άντληση διαδίδεται με το χρόνο και την απόσταση, με τέτοιο τρόπο, ώστε η συνολική ποσότητα νερού που λαμβάνεται (αφαιρείται) από την έναρξη της άντλησης να ισοδυναμεί με τη μείωση της στάθμης στον κώνο πτώσης στάθμης.

Η ποσότητα του νερού που αφαιρείται, ανά μονάδα όγκου κορεσμένου εδάφους, ονομάζεται ειδική απόδοση (specific yield) και συμβολίζεται με μ (Huisman, 1972).



Εικόνα 5.5: Σχηματική απεικόνιση του μεταβαλλόμενου κώνου πτώσης στάθμης σε πλήρη γεώτρηση που αντλεί από μη περιορισμένο ελεύθερο υδροφορέα (Huisman, 1972).

Η ειδική απόδοση είναι πάντα μικρότερη από το πορώδες, καθώς μέρος των υπόγειων υδάτων συνδέεται με τις επιφάνειες των κόκκων με τριχοειδείς δυνάμεις. Όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι τόσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαφορά.

Θεωρώντας ότι ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας T (σχέση 2.2, κεφάλαιο 2) και η ειδική απόδοση (μ) είναι σταθερές και λαμβάνοντας υπόψη τον νόμο του Darcy (σχέση 5.1), η παροχή Q προς την γεώτρηση σε μία απόσταση παρατήρησης r από το κέντρο της, περιγράφεται από τη σχέση 5.26. Λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο t που πέρασε από την έναρξη της άντλησης με σταθερή παροχή Q_0 προκύπτει σχέση ανάλογη με την 5.29 (Huisman, 1972):

$$\frac{\partial Q}{\partial r} = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu \cdot \frac{\partial s}{\partial t} \quad [5.44]$$

και τελικά:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{\partial s}{r \cdot \partial r} - \frac{\mu \cdot \partial s}{T \cdot \partial t} = 0 \quad [5.45]$$

Για τις οριακές συνθήκες $r \rightarrow r_0$, $Q = Q_0$ και $r \rightarrow \infty$, $Q = 0$, η παραπάνω διαφορική εξίσωση έχει ως λύση τον τύπο του **Theis** (βλέπε σχέση 5.31 της ενότητας 5.1.1).

Το u^2 αυτή τη φορά δίνεται από τη σχέση:

$$u^2 = \frac{\mu \cdot r^2}{4 \cdot T \cdot t} \quad [5.46]$$

Και σε αυτή την περίπτωση, ακριβώς όπως στην ενότητα 5.1.1, για μικρές τιμές του u^2 , δηλαδή, κοντά στην υδρογεώτρηση και μετά από αρκετό χρόνο άντλησης, προκύπτει η εξίσωση του **Thiem** (σχέση 5.37).

Σημειώνεται ότι οι τύποι του Theis και του Thiem, στην περίπτωση μεταβαλλόμενης ροής σε ελεύθερο υδροφορέα είναι λιγότερο ακριβείς σε σχέση με τον υπό πίεση υδροφορέα, καθώς οι σχέσεις αυτές έχουν προκύψει με την υπόθεση σταθερών παραμέτρων T και μ . Όμως, λόγω της μείωσης του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα (H), ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας (T) μπορεί να είναι σταθερός μόνο κατά προσέγγιση.

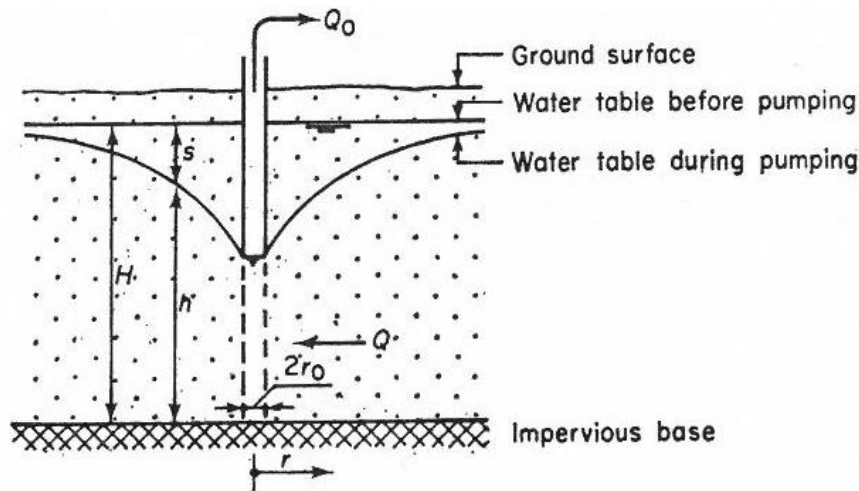
Επίσης, η ποσότητα υπόγειου νερού που αφαιρείται ανά μονάδα επιφάνειας δεν είναι σταθερή. Λόγω των τριχοειδών δυνάμεων, αυτή η ποσότητα θα είναι μικρή στην αρχή και θα αυξάνεται με το χρόνο σε μια μέγιστη τιμή, δηλαδή την ειδική απόδοση (μ). Συνεπώς, η τιμή που πρέπει να εισάγεται στους τύπους μεταβαλλόμενης ροής πρέπει να είναι πάντα μικρότερη από το μ . Όσο μικρότερη είναι η διάρκεια της άντλησης τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η διαφορά της πραγματικής ποσότητας νερού που αφαιρείται ανά μονάδα επιφάνειας από την ειδική απόδοση (Huisman, 1972).

5.1.4. Σταθερή κατάσταση ροής σε ελεύθερο υδροφορέα

Η Εικόνα 5.6 δείχνει έναν μη περιορισμένο ελεύθερο υδροφορέα που βρίσκεται πάνω από μια αδιαπέρατη βάση και αντλείται από μία τέλεια γεώτρηση. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, εφόσον δεν υπάρχει επαναφόρτιση από βροχοπτώσεις, ή απώλεια νερού λόγω εξάτμισης – διαπνοής, ο υδροφόρος ορίζοντας είναι οριζόντιος (Huisman, 1972).

Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις, μετά την επίτευξη ισορροπίας (σταθερή ροή με $Q = Q_0 = \text{σταθερό}$), η εξίσωση της ροής θα είναι (Huisman, 1972):

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot k \cdot h \cdot \frac{dh}{dr} \quad [5.47]$$



Εικόνα 5.6: Σχηματική απεικόνιση του σταθεροποιημένου κώνου πτώσης στάθμης σε πλήρη γεώτρηση που αντλεί από μη περιορισμένο ελεύθερο υδροφόρο (Huisman, 1972).

και κατά συνέπεια:

$$h \cdot dh = \frac{Q_0 \cdot dr}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot r} \quad [5.48]$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω διαφορική εξίσωση στις οριακές συνθήκες $r = R$, $h = H$, προκύπτει ο τύπος του **Dupuit** για ελεύθερους υδροφορείς (Huisman, 1972):

$$H^2 - h^2 = \frac{Q_0}{\pi \cdot k} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad [5.49]$$

Σημειώνεται ότι για να ισχύει ο τύπος του Dupuit θα πρέπει το πάχος του υδροφόρου ορίζοντα να είναι μεγάλο σε σχέση με τις διακυμάνσεις της στάθμης του νερού και οι κλίσεις του υδροφόρου στρώματος να είναι σχετικά μικρές. Τότε θεωρείται ότι η μεταβιβαστικότητα (T) είναι σχεδόν σταθερή. Η λύση Dupuit – Forchheimer (1886) επιτρέπει τη μείωση αυτού του προβλήματος δισδιάστατης ροής σε μία διάσταση υποθέτοντας ότι η ροή είναι οριζόντια και ομοιόμορφη σε όλη την κατακόρυφη τομή (Mistear et al., 2006).

Η πτώση στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα ισούται με:

$$s = H - h \quad [5.50]$$

Αντικαθιστώντας στον τύπο του Dupuit προκύπτει η σχέση:

$$s = \frac{Q_0}{\pi \cdot k \cdot (2 \cdot H - s)} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad [5.51]$$

Για σχετικά μικρές πτώσεις στάθμης σε υδροφορείς μεγάλου βάθους, το s είναι αμελητέο σε σύγκριση με το $2 \cdot H$ και ο τύπος απλοποιείται ως (Huisman, 1972):

$$s = \frac{Q_0}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot H} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad [5.52]$$

κοντά στο πηγάδι.

Η παραπάνω σχέση καταλήγει πάλι στον τύπο του **Thiem** (σχέση 5.37), στην περίπτωση που εξετάζεται η διαφορά στην πτώση στάθμης μεταξύ δύο τυχαίων σημείων σε απόσταση r_1 και r_2 από το κέντρο του φρεατίου.

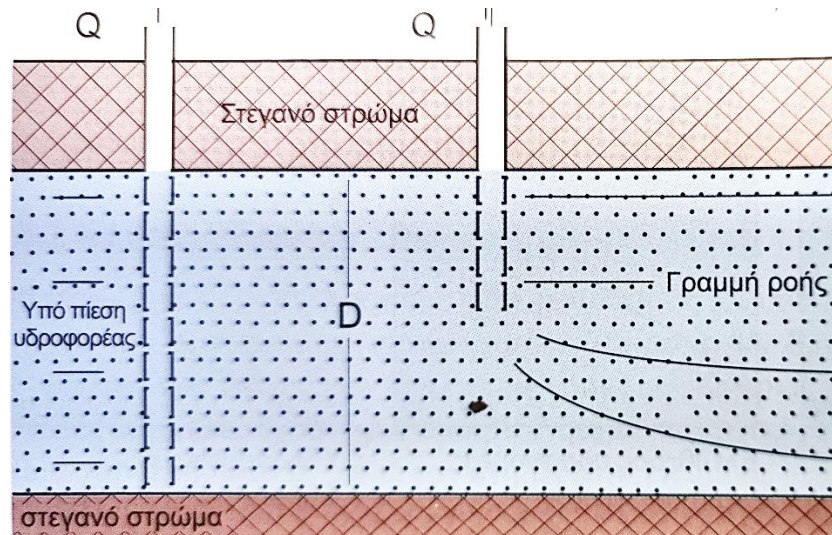
Σημειώνεται ότι ο τύπος του Thiem μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ελεύθερους υδροφορείς εφόσον γίνουν ορισμένες παραδοχές, η κυριότερη από τις οποίες είναι ότι το πάχος του υδροφορέα είναι μεγάλο σε σύγκριση με τις παρατηρούμενες πτώσεις στάθμης (Missteat et al., 2006).

5.1.5. Ροή σε ατελείς υδρογεωτρήσεις

Όλες οι προαναφερόμενες σχέσεις αφορούν πλήρεις (τέλειες) υδρογεωτρήσεις, δηλαδή, γεωτρήσεις που διατρύουν όλο το υδροφόρο στρώμα μέχρι το αδιαπέρατο υπόβαθρο, ενώ τα φίλτρα τους αναπτύσσονται σε όλο το πάχος του κορεσμένου αυτού στρώματος. Για τις ατελείς γεωτρήσεις, δηλαδή, τις γεωτρήσεις που δεν φτάνουν στο αδιαπέρατο υπόβαθρο ή τα φίλτρα τους δεν καλύπτουν όλο το πάχος του κορεσμένου υδροφόρου στρώματος, υπάρχει η έννοια του «βαθμού τελειότητας».

Βαθμός τελειότητας είναι το ποσοστό (%) του βάθους διάτρησης ή κάλυψης με φίλτρα προς το συνολικό κορεσμένο πάχος του υδροφορέα. Γεώτρηση με βαθμό τελειότητας μεγαλύτερο από 80% θεωρείται πρακτικά τέλεια (Βουδούρης, 2022).

Στην ατελή γεώτρηση επηρεάζεται η ροή του υπόγειου νερού και αλλοιώνονται οι γραμμές ροής, λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας (Εικόνα 5.7).



Εικόνα 5.7: Σχηματική απεικόνιση των γραμμών ροής προς μία τέλεια (αριστερά) και μία ατελή (δεξιά) γεώτρηση σε υπό πίεση υδροφορέα (Βουδούρης, 2022).

Έτσι, το πρόβλημα της ροής από μονοδιάστατο οριζόντιο (τέλεια γεώτρηση) μετατρέπεται σε τρισδιάστατο και φυσικά πολυπλοκότερο, καθώς, μεταξύ άλλων, η διαφοροποίηση της οριζόντιας ($k_x = k_y$) από την κατακόρυφη (k_z) συνιστώσα της υδροπερατότητας γίνεται πολύ σημαντική.

Σύμφωνα με τον Huntush (1964), όταν η απόσταση μιας ατελούς γεώτρησης παρατήρησης από μια επίσης ατελή γεώτρηση άντλησης είναι μεγαλύτερη από (Βουδούρης, 2022):

$$x = 1.5 \cdot H \cdot \sqrt{k_x/k_z} \approx 1.5 \cdot H \quad [5.53]$$

η επίδραση στις εξισώσεις ροής που αναπτύχθηκαν στην ενότητα 5.1 είναι ασήμαντη.

Όταν όμως η απόστασή τους είναι μικρότερη από x , η πτώση στάθμης δεν υπακούει στις εξισώσεις αυτές.

5.2. Άντληση σε περισσότερες από μία γεωτρήσεις

Σε περιπτώσεις όπου αντλούν περισσότερες από μία γεωτρήσεις, η πτώση στάθμης μπορεί να υπολογισθεί με την αρχή της υπέρθεσης, η οποία ισχύει τόσο για συνθήκες σταθερής κατάστασης όσο και για χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες (Misstear et al., 2006).

Σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ροής εφαρμόζεται ο τύπος του Jacob (σχέση 5.38), ενώ εάν έχει επιτευχθεί κατάσταση ισορροπίας μπορεί να εφαρμοστεί ο τύπος του Thiem (σχέση 5.37).

Η αρχή της υπέρθεσης ορίζει ότι η συνολική πτώση στάθμης σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο (π.χ. σε μια γεώτρηση παρατήρησης) βρίσκεται με την άθροιση των αποτελεσμάτων της πτώσης στάθμης από κάθε πηγάδι άντλησης. Η πτώση στάθμης σε κάθε φρεάτιο υπολογίζεται υποθέτοντας ότι είναι το μοναδικό που αντλείται και στη συνέχεια προστίθενται (υπέρθεση) οι παρεμβολές από τις γειτονικές υδρογεωτρήσεις.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε αριθμό τέλειων γεωτρήσεων σε ένα πεδίο εκμετάλλευσης, θεωρώντας ότι ο υδροφορέας είναι περιορισμένος, άπειρος, ομοιογενής και ισότροπος, με αρχικά οριζόντια πιεζομετρική επιφάνεια. Ισχύει, επίσης, και για μη περιορισμένους υδροφορείς, υπό την προϋπόθεση ότι η πτώση στάθμης είναι μικρή σε σχέση με το συνολικό πάχος του υδροφορέα (Misstear et al., 2006).

5.3. Σχέση παροχής με πτώση στάθμης και διάμετρο της γεώτρησης

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις ροής του υπόγειου νερού (ενότητα 5.1), μεταβολές στην παροχή άντλησης προκαλούν άμεσες διαφοροποιήσεις στη στάθμη του υπόγειου νερού.

Επίσης, πτώση της στάθμης του νερού σημαίνει ότι η αντλία πρέπει να εργάζεται σκληρότερα για να ανυψώσει την ίδια ποσότητα νερού. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο ρυθμός άντλησης ρυθμίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν σταθερότερη εκροή (Misstear et al., 2006).

Η διάμετρος της γεώτρησης επιδρά επίσης στην ποσότητα του υπόγειου νερού που δύναται να αντληθεί (απόδοση). Όμως, αν διπλασιασθεί η διάμετρος, κρατώντας τις υπόλοιπες

παραμέτρους σταθερές, η παροχή αυξάνεται μόνο κατά 10%. Ο λόγος για μια τόσο μικρή αύξηση είναι ότι ο ρυθμός εκφόρτισης είναι ανάλογος του λογαρίθμου της ακτίνας του φρέατος (βλέπε εξίσωση Thiem – σχέση 5.37).

Βέβαια, η παραπάνω διατύπωση βασίζεται στη θεωρητική συμπεριφορά της πτώσης στάθμης σε ένα πλήρες πηγάδι που αντλεί από ομοιογενή υδροφορέα. Συνεπώς, δεν λαμβάνει υπόψη τις απώλειες της γεώτρησης, οι οποίες θα μπορούσαν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση εάν επιλεγεί πολύ μικρή διάμετρος πηγαδιού. Επίσης, αύξηση της διαμέτρου της γεώτρησης σε έναν ρηγματωμένο ή καρστικοποιημένο υδροφορέα θα μπορούσε να έχει σημαντική επίδραση στην απόδοσή της, εάν αυτή η αύξηση οδηγήσει σε διασταύρωση με ρήγματα ή καρστικούς αγωγούς, αντίστοιχα (Misstear et al., 2006).

5.4. Μέγιστη παροχή – κρίσιμη ταχύτητα

Η απόδοση μιας γεώτρησης επηρεάζεται άμεσα από τις αλλαγές στην στάθμη του υπόγειου ύδατος. Για αυτό το λόγο η τιμή της παροχής με την οποία αντλείται η γεώτρηση, η οποία όπως προαναφέρθηκε επηρεάζει άμεσα την πτώση στάθμης, είναι πολύ σημαντικό να επιλεγεί σωστά.

Σε έναν ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα μπορεί λόγω υπερβολικής άντλησης να προκύψει μεγάλη πτώση στάθμης του υπόγειου νερού και σημαντική μείωση στην μεταβιβαστικότητα του υδροφόρου ορίζοντα και ως εκ τούτου στην απόδοση του φρέατος. Από την άλλη, υπερβολικά χαμηλή παροχή άντλησης μπορεί, επίσης, να οδηγήσει σε ενισχυμένη διάβρωση και βιορύπανση, καθώς και σε αυξημένο κόστος (Misstear et al., 2006).

Αν στον τύπο του Duvuit (σχέση 5.49) μηδενιστεί η πτώση στάθμης h , η ταχύτητα ροής γίνεται θεωρητικά άπειρη και κατά συνέπεια επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή παροχή άντλησης. Στην πραγματικότητα όμως κοντά στη γεώτρηση δεν ισχύουν οι παραδοχές του Duvuit, καθώς η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας είναι αρκετά έντονη και υπάρχουν κάθετες συνιστώσες της ταχύτητας.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πραγματική στάθμη του υπόγειου νερού να βρίσκεται υψηλότερα από την θεωρητική στάθμη κατά Duryit. Η διαφορά τους ονομάζεται «επιφάνεια διαστάλαξης» (seepage surface) και δίνεται όπως αναφέρει ο Τζιμόπουλος (1994) από τον Castany (1951) ως:

$$h' = 0.5 \cdot \frac{H^2 - h^2}{H} \quad [5.54]$$

Με βάση λοιπόν την παραπάνω σχέση, η πραγματική μέγιστη παροχή με την οποία μπορεί να αντληθεί μια γεώτρηση (για $h = 0$) είναι:

$$h' = 0.5 \cdot H \quad [5.55]$$

Συνεπώς, είναι ασύμφορο να αντλείται μια πλήρης (τέλεια) γεώτρηση με παροχή τέτοια, ώστε η πτώση στάθμης στο φρέαρ να ξεπερνά το μισό του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα. Με βάση πάλι τον τύπο του Duryit, προκύπτει ότι η μέγιστη παροχή είναι ίση με (Τζιμόπουλος, 1994):

$$Q_{\max} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\pi \cdot H^2 \cdot k}{\ln(R/r_w)} \quad [5.56]$$

όπου, r_w η ακτίνα της υδρογεώτρησης.

Ταυτόχρονα όμως, θα πρέπει να γίνεται έλεγχος της αναπτυσσόμενης ταχύτητας ροής (U) στα τοιχώματα της γεώτρησης, έτσι ώστε αυτή να μην ξεπερνά την κρίσιμη ταχύτητα (U_{\max}). Στην περίπτωση που η αναπτυσσόμενη ταχύτητα ξεπεράσει την κρίσιμη, συμβαίνει παράσυρση του λεπτόκκοκου υλικού του υπεδάφους (αυτό φαίνεται από το νερό μέσα στο φρέαρ που θολώνει), ενώ συγχρόνως προκαλείται φράξιμο του σωλήνα αναρρόφησης της αντλίας (Τζιμόπουλος, 1994).

Η αναπτυσσόμενη ταχύτητα δίνεται από τη σχέση (Misstear et al., 2006):

$$U = \frac{Q_{\max}}{2 \cdot \pi \cdot r_w \cdot (0.5 \cdot H)} \quad [5.57]$$

ενώ η κρίσιμη ταχύτητα δίνεται από την εμπειρική σχέση του Sichardt (1928, από Τζιμόπουλος, 1994):

$$U_{\max} = \sqrt{\frac{k}{15}} \quad [5.58]$$

ή από την επίσης εμπειρική σχέση του Cambefort (1937, από Τζιμόπουλος, 1994):

$$U_{\max} = \frac{\pi \cdot k}{4} \quad [5.59]$$

5.5. Ροή του υπόγειου νερού προς υδρομαστευτικές στοές

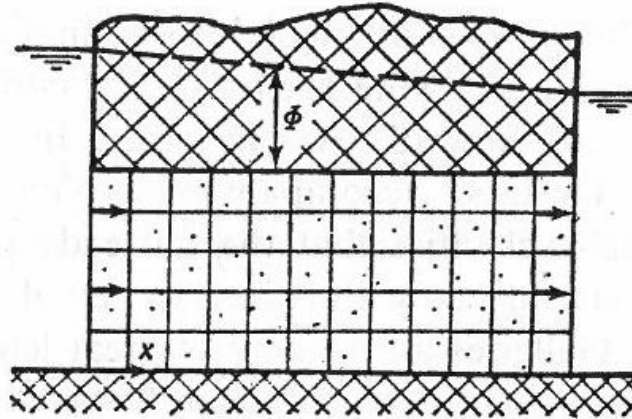
Η ροή των υπόγειων υδάτων προς υδρομαστευτικές στοές μπορεί να είναι (Huisman, 1972):

- (i) σταθερή ή μεταβαλλόμενη, όπως και στις υδρογεωτρήσεις,
- (ii) μέσω ενός απεριόριστου υδροφόρου ορίζοντα πάνω από μια αδιαπέρατη ή διαπερατή βάση, ή μέσω ενός περιορισμένου υδροφορέα που οριοθετείται στην κορυφή και στο κάτω μέρος από αδιαπέρατα ή ημιπερατά υδροφόρα στρώματα.

Σε περιορισμένους υδροφορείς, η πτώση στάθμης που συνοδεύει την άντληση των υπόγειων υδάτων διαδίδεται με τόσο υψηλές ταχύτητες που η διάρκεια μεταβατικής ροής είναι μικρή και δεν έχει καμία συνέπεια σε σχέση με τα πραγματικά προβλήματα ροής.

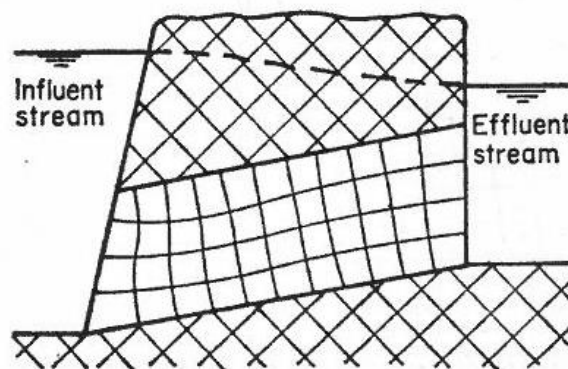
Οι υδρομαστευτικές στοές είναι συνήθως μεγάλου μήκους και σε πολλές περιπτώσεις η ανάλυση της ροής του υπόγειου νερού μπορεί να περιοριστεί σε διατομή κάθετη σε αυτές. Θεωρητικά αυτό σημαίνει δισδιάστατη ροή (Huisman, 1972).

Στην πραγματικότητα, ωστόσο, η κατάσταση είναι συχνά πολύ πιο απλή. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 5.8 δίνεται υδροφορέας με σταθερό πάχος και υδροπερατότητα που περιορίζεται από δύο παράλληλες κατακόρυφες τάφρους και δεν επαναφορτίζεται. Ο υδροφορέας αυτός διηθείται πλήρως από τις τάφρους στις κατακόρυφες πλευρές του και οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες, ενώ οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κατακόρυφες. Η ταχύτητα ροής είναι η ίδια από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά και η πιεζομετρική στάθμη εξαρτάται από μία μόνο μεταβλητή: την απόσταση από κάποιο σημείο αφετηρίας.



Εικόνα 5.8: Μονοδιάστατη ροή υπόγειων υδάτων σε περιορισμένο υδροφόρο ορίζοντα χωρίς επαναφόρτιση (Huisman, 1972).

Για το μεγαλύτερο μέρος του υδροφόρου σχηματισμού αυτή η μονοδιάστατη ροή υπάρχει επίσης όταν ο περιορισμένος υδροφορέας βρίσκεται σε κεκλιμένο επίπεδο ή όταν οι οριακές συνθήκες δεν είναι κατακόρυφα ομοιόμορφες. Πράγματι, κοντά στα επίπεδα εισροής και εκροής, οι γραμμές ροής δεν είναι πλέον παράλληλες μεταξύ τους (βλέπε Εικόνα 5.9), αλλά η έκταση στην οποία συμβαίνει αυτό είναι αρκετά μικρή. Στην πράξη είναι πολύ μικρότερη από ό,τι φαίνεται στην εικόνα λόγω της κλίμακας.



Εικόνα 5.9: Ημι-μονοδιάστατη ροή υπόγειων υδάτων σε περιορισμένο υδροφόρο ορίζοντα χωρίς επαναφόρτιση (Huisman, 1972).

Η επιρροή των δευτερευουσών συνιστωσών ροής κοντά στα όρια είναι στην πραγματικότητα τόσο μικρή και εμφανίζεται σε τόσο μικρές αποστάσεις, ώστε οι συνιστώσες αυτές μπορούν

να παραμεληθούν με ασφάλεια, εάν η ροή σε ένα μόνο μήκος του υδροφορέα είναι μονοδιάστατη (Huisman, 1972).

Άλλες αποκλίσεις από την ιδανική κατάσταση της Εικόνας 5.8 συμβαίνουν όταν το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου ορίζοντα δεν είναι σταθερό ή όταν υπάρχει επαναφόρτιση. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι γραμμές ροής δεν είναι παράλληλες μεταξύ τους σε όλο το μήκος του υδροφόρου ορίζοντα. Εάν, ωστόσο, οι οριζόντιες διαστάσεις είναι μεγάλες σε σύγκριση με τις κατακόρυφες – όπως συμβαίνει συνήθως – η αποκλίνουσα γωνία μεταξύ δύο γειτονικών γραμμών ροής είναι μικρή και η συνιστώσα της ροής κάθετα προς την κύρια κατεύθυνση κίνησης είναι αμελητέα. Και πάλι, μια καλή προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών μπορεί να επιτευχθεί υποθέτοντας ότι αυτός ο τύπος ροής είναι μονοδιάστατος.

Με βάση τα παραπάνω, για την επίλυση όλων των προβλημάτων ροής υπάρχουν μόνο δύο εξισώσεις: η εξίσωση της κίνησης και η εξίσωση της συνέχειας.

Για τη ροή του υπόγειου νερού, ο τύπος του Darcy θεωρεί ότι η πτώση στάθμης που συνοδεύει την κίνηση του νερού είναι ευθέως ανάλογη της ταχύτητας. Για την μεταβαλλόμενη ροή σε υπό πίεση υδροφορέα, η εξίσωση της συνέχειας πρέπει να γραφεί ως διατήρηση της μάζας, ενώ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η διατήρηση του όγκου είναι επαρκής (Huisman, 1972).

Οι τιμές του συντελεστή υδροπερατότητας (k), του κορεσμένου πάχους του υδροφόρου σχηματισμού (H) και της μεταβιβατικότητας (T) πρέπει να προσδιοριστούν στο πεδίο. Το ίδιο ισχύει και για τις βροχοπτώσεις και τις απώλειες λόγω εξάτμισης – διαπνοής και επιφανειακής απορροής, όπως και για τα υπόγεια ύδατα που διηθούνται μέσω ημιδιαπερατών στρωμάτων.

Σε κάθε περίπτωση, ο προσδιορισμός αυτών των παραγόντων είναι δύσκολος και περίπλοκος, χρονοβόρος και δαπανηρός και ποτέ δεν είναι απόλυτα σωστός. Πολλές φορές μπορούν εύκολα να προκύψουν σφάλματα της τάξης των 10 – 30%, ενώ ακόμη και υπό τις ευνοϊκότερες συνθήκες αναμένονται κάποιες αποκλίσεις (Huisman, 1972).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SEEP/W

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για την διερεύνηση της ροής του υπόγειου νερού προς μια υδρογεώτρηση είναι το SEEP/W, το οποίο αναπτύχθηκε από την GEO-SLOPE International Ltd. (2015).

Το SEEP/W είναι ένα αριθμητικό μοντέλο για την ανάλυση της ροής των υπόγειων νερών σε δύο διαστάσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιείται στη γεωτεχνική μηχανική και την υδρογεωλογία για την αξιολόγηση των πιθανών προβλημάτων διαρροής και διήθησης σε διάφορες κατασκευές, όπως φράγματα, επιχώματα, εκσκαφές και σήραγγες.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων μηχανικής με τη διαίρεση του πεδίου σε τμήματα που ονομάζονται στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά προσεγγίζουν τη συμπεριφορά του πεδίου.

Η συμπεριφορά κάθε τμήματος περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις. Εξασφαλίζοντας τις απαιτήσεις συνέχειας και ισορροπίας μεταξύ των στοιχείων αυτών, μπορεί να ληφθεί μια μοναδική λύση από γραμμικό σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων (GEO-SLOPE International Ltd., 2015).

Όσον αφορά την κίνηση του νερού, το SEEP/W επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώνουν τη ροή σε συνθήκες σταθερής και μεταβαλλόμενης κατάστασης. Μπορεί να λάβει υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, οι οριακές συνθήκες και οι ιδιότητες των υλικών. Το πρόγραμμα παρέχει εργαλεία για τη δημιουργία καννάβου πεπερασμένων στοιχείων, τον ορισμό ιδιοτήτων υλικών, τον καθορισμό οριακών συνθηκών και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Το SEEP/W ενσωματώνει προηγμένους αλγορίθμους για τον χειρισμό σύνθετων σεναρίων, όπως της στρωσιγένειας της ανισοτροπίας και της ετερογένειας. Μπορεί επίσης να λάβει υπόψη τις χρονικά εξαρτώμενες αλλαγές στις οριακές συνθήκες, όπως οι βροχοπτώσεις και οι διακυμάνσεις της στάθμης των υπόγειων υδάτων, για να αξιολογήσει τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του συστήματος.

Χρησιμοποιεί την θεμελιώδη εξίσωση συνέχειας της ροής του υπόγειου νερού, όπως αυτή αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5 (σχέση 5.13).

Υπάρχουν τρία βασικά στάδια μιας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων: α) η δημιουργία του αριθμητικού τομέα (region) με την κατάλληλη γεωμετρία, β) η δημιουργία του διακριτικού πλέγματος (mesh) που απαιτεί τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων υλικού στις διάφορες υπό-περιοχές του τομέα, και γ) ο καθορισμός των κατάλληλων οριακών συνθηκών (boundary conditions).

Όταν ορίζεται μια περιοχή, αυτή έχει (GEO-SLOPE International Ltd., 2015):

- Ένα τύπο υλικού,
- Ένα τύπο πλέγματος στοιχείων (ή χωρίς πλέγμα),
- Μία σειρά στοιχείων, είτε πρώτης είτε δεύτερης τάξης.

Η διαδικασία υποδιαίρεσης της περιοχής σε μικρότερα κομμάτια είναι γνωστή ως διακριτοποίηση. Τα κομμάτια είναι γνωστά ως πεπερασμένα στοιχεία.

Στην δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να επιλεγεί ένας από τους ακόλουθους τύπους: Μη δομημένα (unstructured) τριγωνικά στοιχεία ή δομημένα (structured) στοιχεία. Κάθε μία από τις δύο επιλογές διακριτοποίησης έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Τα μη δομημένα πεπερασμένα στοιχεία ορίζονται ευκολότερα απ' ό,τι τα δομημένα, καθώς ο προσδιορισμός της μορφής τους ελέγχεται από το πρόγραμμα. Όμως, ειδικά για τα προβλήματα ροής του υπόγειου νερού, πιο αξιόπιστα θεωρούνται τα δομημένα πεπερασμένα στοιχεία, λόγω του ότι προκαλούν την ελάχιστη δυνατή αλλοίωση στα ανύσματα ροής (velocity vectors) (GEO-SLOPE International Ltd., 2015).

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά ενός πεπερασμένου στοιχείου είναι οι κόμβοι (nodes) στις γωνίες των στοιχείων ή κατά μήκος των άκρων των στοιχείων.

Οι κόμβοι σε ένα σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κατανομή των αρχικών αγνώστων στο στοιχείο. Στο SEEP/W, η κύρια μεταβλητή είναι το υδραυλικό φορτίο ή η πίεση του νερού των πόρων. Επίσης, οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για

τη σύνδεση των στοιχείων σε έναν τομέα. Οι κοινοί κόμβοι μεταξύ των στοιχείων διασφαλίζουν τη συμβατότητα των ιδιοτήτων τους.

Όλες οι εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζονται στους κόμβους. Συνεπώς, οι ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις αυτές προέρχονται από τα γύρω στοιχεία.

Με βάση τα παραπάνω, ο τύπος της διακριτοποίησης που επιλέχθηκε είναι τα δομημένα (structured) στοιχεία.

Επίσης, επιλέχθηκε αξονική συμμετρική ανάλυση (axisymmetric 360°). Η αξονική συμμετρική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση τρισδιάστατων προβλημάτων με συμμετρία ως προς ένα κατακόρυφο άξονα περιστροφής (GEO-SLOPE International Ltd., 2015).

Το πρόβλημα ορίζεται σε δύο διαστάσεις, αλλά η ανάλυση γίνεται γύρω από έναν κατακόρυφο κεντρικό άξονα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αξονικής συμμετρικής ανάλυσης είναι η ροή σε μεμονωμένο φρέαρ (γέωτρηση) άντλησης. Με την ανάλυση αυτή είναι δυνατή η απεικόνιση του κώνου πτώσης στάθμης λόγω της άντλησης.

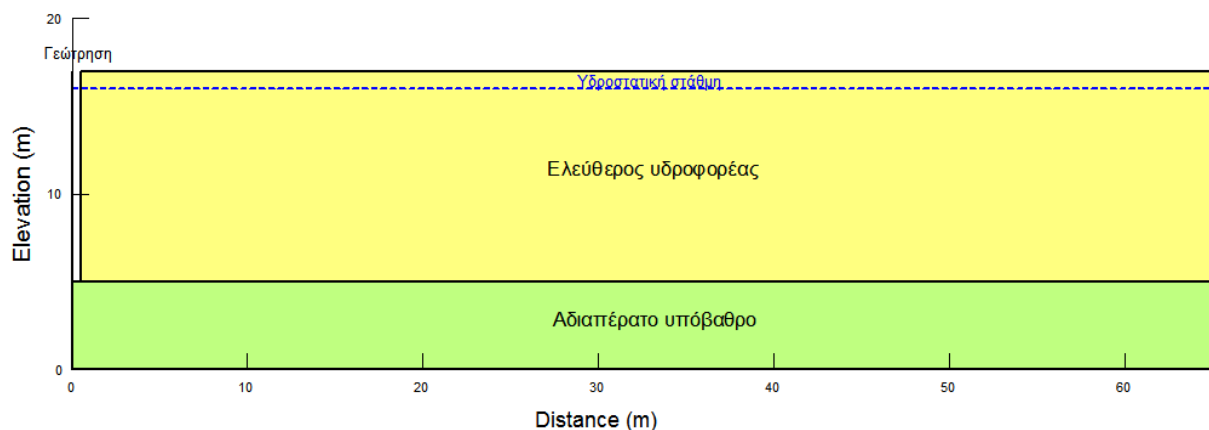
Στο SEEP/W ο κατακόρυφος συμμετρικός άξονας περιστροφής (άξονας γεώτρησης) είναι πάντα στη συντεταγμένη $x = 0$. Επίσης το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να περιλαμβάνει στοιχεία συμμετρικά και ίσα. Γι αυτό το λόγο επιλέγεται η διακριτοποίηση να γίνεται με δομημένα στοιχεία, ενώ προτιμάται τα στοιχεία αυτά να έχουν μοναδιαίο μέγεθος (πλάτος $x_i =$ ύψος $y_i = 1$, για κάθε στοιχείο i), προκειμένου να μην χρειάζονται αναγωγές στους υπολογισμούς (GEO-SLOPE International Ltd., 2015).

Κι αυτό γιατί στην αξονική συμμετρική ανάλυση η υπολογιζόμενη ταχύτητα ροής (water flux, q) σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο γίνεται ανά ακτίνιο (radian). Εάν οι διαστάσεις κάθε στοιχείου είναι μοναδιαίες, τότε σε ένα πλήρη κύκλο (360°), η περιφερειακή περιοχή (όλα τα στοιχεία γύρω από τον άξονα) θα έχει συνολικό μήκος ίσο με $2 \cdot \pi \cdot x_i$ και η τιμή της ταχύτητας ροής για την περιοχή αυτή θα είναι ίση με την υπολογισμένη από το SEEP/W ροή σε κάθε στοιχείο επί $2 \cdot \pi$.

Επίσης, σε περίπτωση που επιλεγεί διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία διαστάσεων $2 \cdot \pi$ ($= 6.2832$), η υπολογιζόμενη από το SEEP/W ταχύτητα ροής ($q = Q / A$) σε κάθε στοιχείο θα εκφράζει την περιφερειακή περιοχή γύρω από τον άξονα. Σε κάθε άλλη περίπτωση διακριτοποίησης, θα πρέπει να γίνουν αναγωγές, ανάλογα με τις διαστάσεις των στοιχείων (GEO-SLOPE International Ltd., 2015).

6.1. Σχεδιασμός μοντέλου

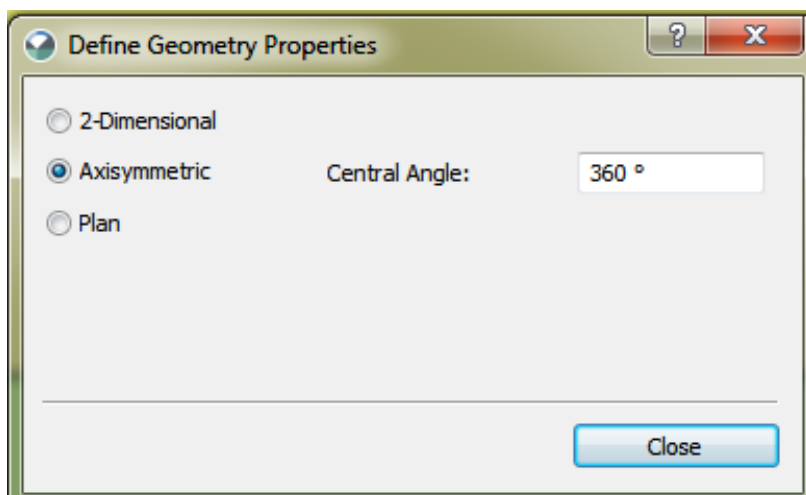
Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε, με τη βοήθεια του λογισμικού GeoStudio 2019 R2, το απλοποιημένο πρόβλημα που φαίνεται στην τομή του Σχήματος 6.1: Γεώτρηση αντλεί νερό από ελεύθερο υδροφορέα πάχους 12 m (κορεσμένο πάχος 11 m), κάτω από τον οποίο υπάρχει αδιαπέρατο υπόβαθρο πάχους 5 m.



Σχήμα 6.1: Γεωμετρία προβλήματος που διερευνήθηκε στο SEEP/W.

Προκειμένου να γίνει αξονική συμμετρική ανάλυση, στο SEEP/W και μέσω των εντολών «Define» → «Geometry Properties», επιλέχθηκε «Axisymmetric», ενώ στο πεδίο «Central Angle»: 360° (Εικόνα 6.1).

Η γεώτρηση που αντλείται τοποθετήθηκε με τον άξονά της να συμπίπτει με τον άξονα των τεταγμένων (yy'), όπως απαιτεί η αξονική συμμετρική ανάλυση. Επίσης, η γεώτρηση θεωρήθηκε τέλεια, καθώς καλύπτει όλο το πάχος του υδροφορέα (βάθος 12 m). Ως διάμετρος του φρέατος επιλέχθηκε το 1 m ($r_w = 0.5$ m).



Εικόνα 6.1: Επιλογή αξονικής συμμετρικής ανάλυσης στο SEEP/W.

Ο ελεύθερος υδροφόρος θεωρήθηκε ότι αναπτύσσεται οριζόντια και βρίσκεται σε υψόμετρα από +5 έως +17 m (επιφάνεια εδάφους), ενώ η υδροστατική στάθμη (αρχική πιεζομετρία) είναι στα +16 m. Συνεπώς, το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου σχηματισμού (H) είναι ίσο με 11 m. Η έκταση του υδροφορέα φτάνει τα 65 m περιμετρικά του άξονα του φρέατος.

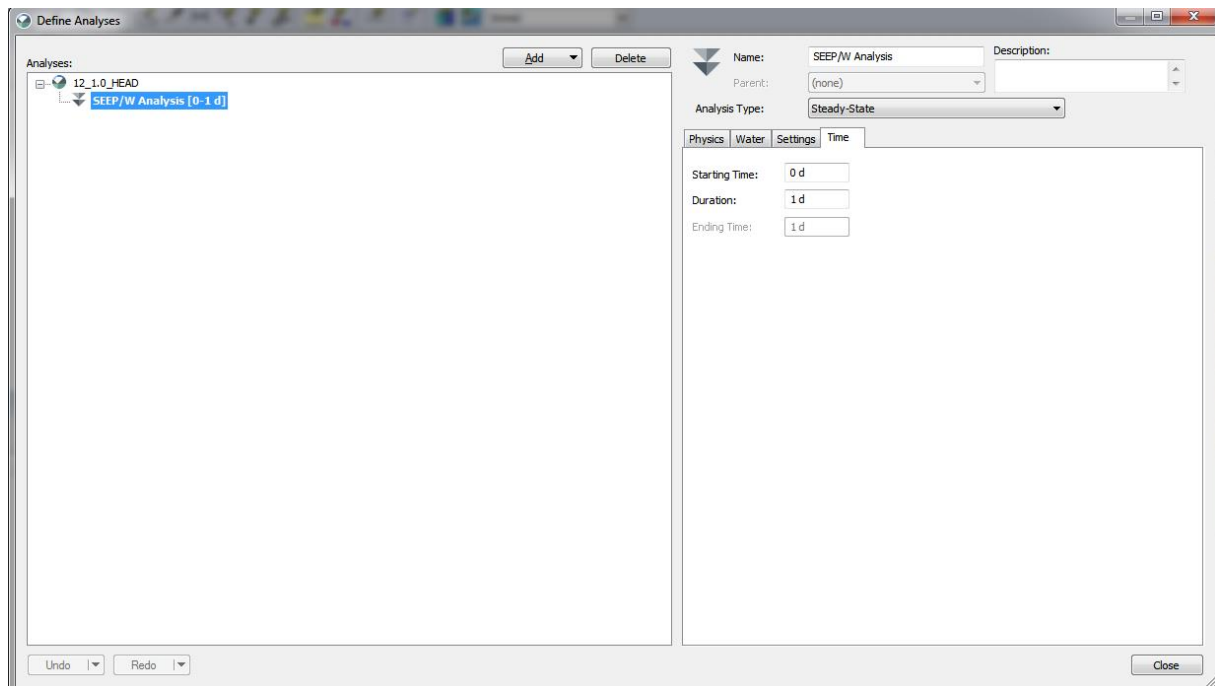
Κάτω από τον ελεύθερο υδροφορέα σχεδιάσθηκε στρώμα πολύ μικρής υδροπερατότητας (πρακτικά αδιαπέρατο). Το στρώμα αυτό αναπτύσσεται επίσης οριζόντια και βρίσκεται σε υψόμετρα από 0 έως +5 m.

6.2. Θεωρήσεις και παραδοχές

Θεωρήθηκε ότι τα γεωλογικά στρώματα είναι ομογενή και ισότροπα. Επίσης, η κατανομή των πιέσεων του νερού των πόρων διερευνήθηκε μόνο στην κορεσμένη ζώνη.

6.3. Επιλογή συνθηκών ροής

Η επιλογή των συνθηκών ροής γίνεται μέσω των εντολών «Define» → «Analyses». Ορίσθηκε σταθερή κατάσταση ροής μέσω της επιλογής «Steady-State» (Εικόνα 6.2).



Εικόνα 6.2: Επιλογή συνθηκών ροής στο SEEP/W.

Στο πεδίο «Time» ορίζεται η ημέρα έναρξης, η διάρκεια και τα βήματα της ανάλυσης (GEO-SLOPE International Ltd., 2015). Καθορίσθηκε διάρκεια άντλησης 1 ημέρας (σε 1 βήμα ανάλυσης).

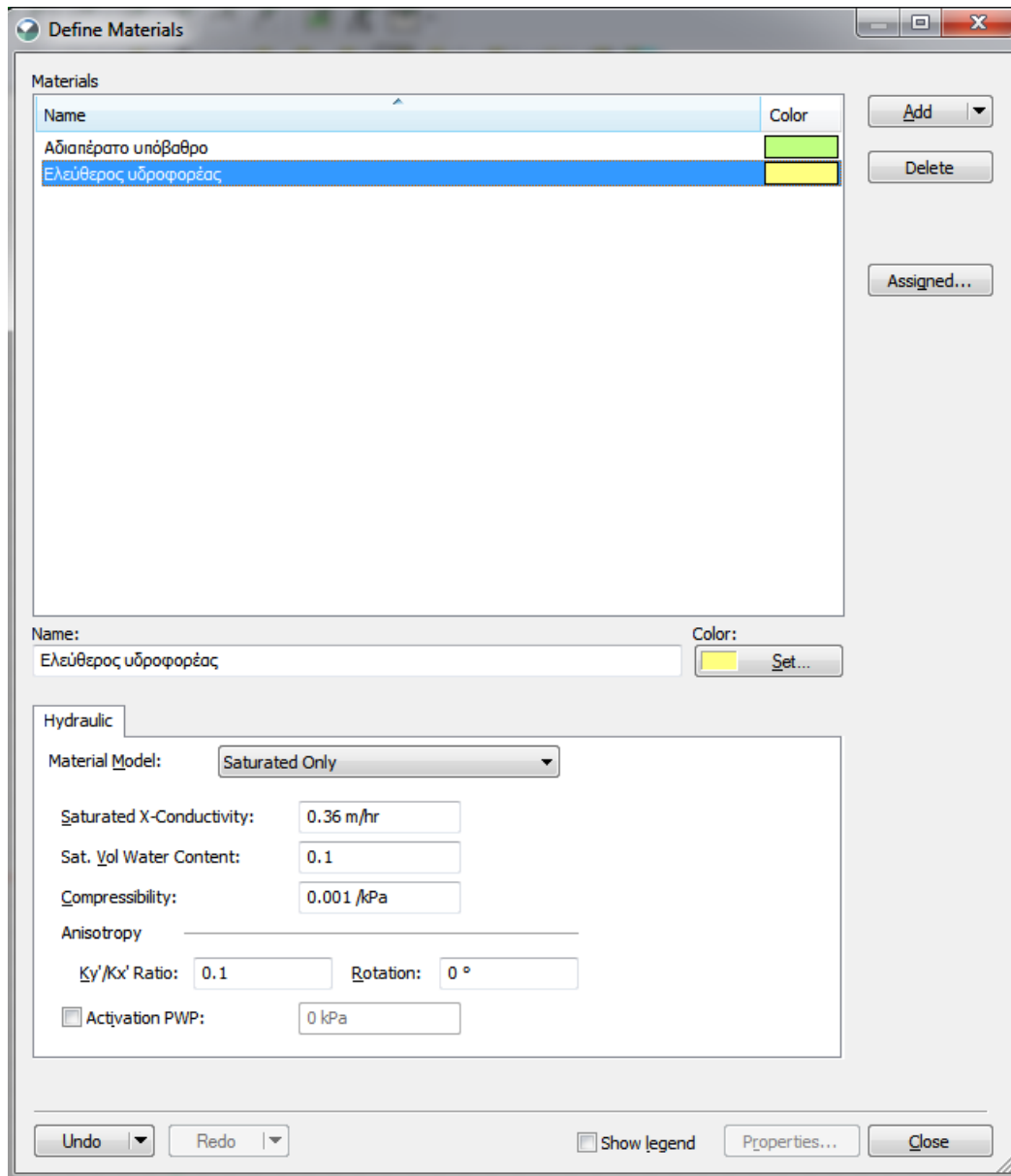
Σημειώνεται ότι η διάρκεια της άντλησης δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα στην ανάλυση σταθερής κατάστασης ροής, παρά μόνο όταν η ροή είναι μεταβαλλόμενη (Transient State).

6.4. Εισαγωγή ιδιοτήτων

Τα γεωλογικά στρώματα εισάγονται στο πρόγραμμα SEEP/W με τις εντολές «Draw» → «Regions». Σχεδιάσθηκαν 2 στρώματα, όπως αυτά φαίνονται στο Σχήμα 6.1. Η ανώτερη ενότητα αποτελεί έναν ελεύθερο υδροφορέα μεγάλης υδροπερατότητας και η κατώτερη ένα αδιαπέρατο στρώμα.

Οι υδρογεωλογικές παράμετροι κάθε στρώματος που απαιτούνται από το πρόγραμμα SEEP/W είναι η ογκομετρική υγρασία (Volumetric Water Content, VWC) και ο συντελεστής υδροπερατότητας (Hydraulic Conductivity, k) (GEO-SLOPE International Ltd., 2015).

Οι παράμετροι αυτές ορίζονται με τις εντολές «Define» → «Materials» (Εικόνα 6.3).



Εικόνα 6.3: Εισαγωγή ιδιοτήτων ελεύθερου υδροφορέα στο SEEP/W.

Και τα δύο στρώματα ορίσθηκαν κορεσμένα (Saturated Only) με συμπιεστότητα (Compressibility) ίση με 0.001 /kPa, όπως υποδεικνύει παράδειγμα εφαρμογής από το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος (GEO-SLOPE International Ltd., 2015).

Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των ιδιοτήτων των δύο στρωμάτων φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Ιδιότητες στρωμάτων στο SEEP/W.

Στρώμα	Οριζόντια υδροπερατότητα, kx		Λόγος ky/kx	Ογκομετρική υγρασία, VWC
	(m/s)	(m/h)		
Ελεύθερος υδροφορέας	10^{-4}	0.36	0.1	0.1
Αδιαπέρατο υπόβαθρο	10^{-8}	0.000036	1	0.01

6.5. Οριακές συνθήκες

Ο καθορισμός συνθηκών στα όρια ενός προβλήματος είναι ένα από τα βασικά στοιχεία μιας αριθμητικής ανάλυσης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο αυτά τα είδη προβλημάτων αναφέρονται συχνά ως προβλήματα «οριακής τιμής».

Η δυνατότητα ελέγχου των συνθηκών στα όρια είναι επίσης αυτό που κάνει τις αριθμητικές αναλύσεις τόσο ισχυρές. Οι λύσεις σε αριθμητικά προβλήματα εξαρτώνται άμεσα από τις οριακές συνθήκες, ενώ χωρίς αυτές δεν είναι δυνατή η εξεύρεση λύσης.

Μερικές φορές ο καθορισμός των οριακών συνθηκών είναι αρκετά απλός. Πολλές φορές, ωστόσο, ο καθορισμός των οριακών συνθηκών είναι περίπλοκος και απαιτεί προσεκτική σκέψη και σχεδιασμό. Έτσι, κάποιες φορές οι οριακές συνθήκες καθορίζονται μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας «trial and error» (GEO-SLOPE International Ltd., 2015).

Επιπλέον, οι συνθήκες στα όρια μπορεί να αλλάζουν με το χρόνο κατά τη διάρκεια μιας ανάλυσης μεταβαλλόμενης ροής. Στην περίπτωση αυτή οι οριακές συνθήκες δύναται να εισάγονται ως συνάρτηση.

Το πιο σημαντικό, είναι ότι πρέπει να υπάρχει μια σαφής κατανόηση της φυσικής σημασίας των διαφόρων τύπων οριακών συνθηκών. Για να βοηθήσει τον χρήστη σε αυτήν την πτυχή της ανάλυσης, το SEEP/W διαθέτει εργαλεία που καθιστούν δυνατή την επαλήθευση ότι τα αποτελέσματα ταιριάζουν με τις καθορισμένες συνθήκες (GEO-SLOPE International Ltd., 2015).

Στο μοντέλο μελέτης καθορίσθηκαν οι εξής οριακές συνθήκες:

- Σταθερό υδραυλικό φορτίο ίσο με 16 m στο δεξιό άκρο του ελεύθερου υδροφορέα.
- Σταθερό υδραυλικό φορτίο ίσο με 10.5 m στο αριστερό άκρο του ελεύθερου υδροφορέα (στην επαφή με την γεώτρηση).

Θεωρήθηκε, δηλαδή, ότι η ακτίνα επίδρασης του πηγαδιού είναι μικρότερη από 65 m και συνεπώς στο δεξιό άκρο του ελεύθερου υδροφορέα, η αρχική υδροστατική στάθμη παραμένει αμετάβλητη. Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώθηκε με την εφαρμογή της σχέσης 5.39 του κεφαλαίου 5, σύμφωνα με την οποία $R = 46$ m.

Σημειώνεται ότι η εφαρμογή της σχέσης 5.39 έγινε με την θεώρηση ότι στους ελεύθερους υδροφορείς η αποθηκευτικότητα είναι σχεδόν ίση με το ενεργό πορώδες του υδροφόρου στρώματος και συνεπώς: $S \approx VWC = 0.1$.

Από την άλλη, επιλέχθηκε η τιμή 10.5 m ως υδραυλικό φορτίο στην γεώτρηση (πτώση στάθμης: $16 - 10.5 = 5.5$ m) με το σκεπτικό ότι, τουλάχιστον θεωρητικά, σε αυτή την στάθμη επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή παροχή, όπως ορίζει η σχέση 5.55 και δεδομένου ότι $H = 11$ m (βλέπε ενότητα 5.4, κεφάλαιο 5).

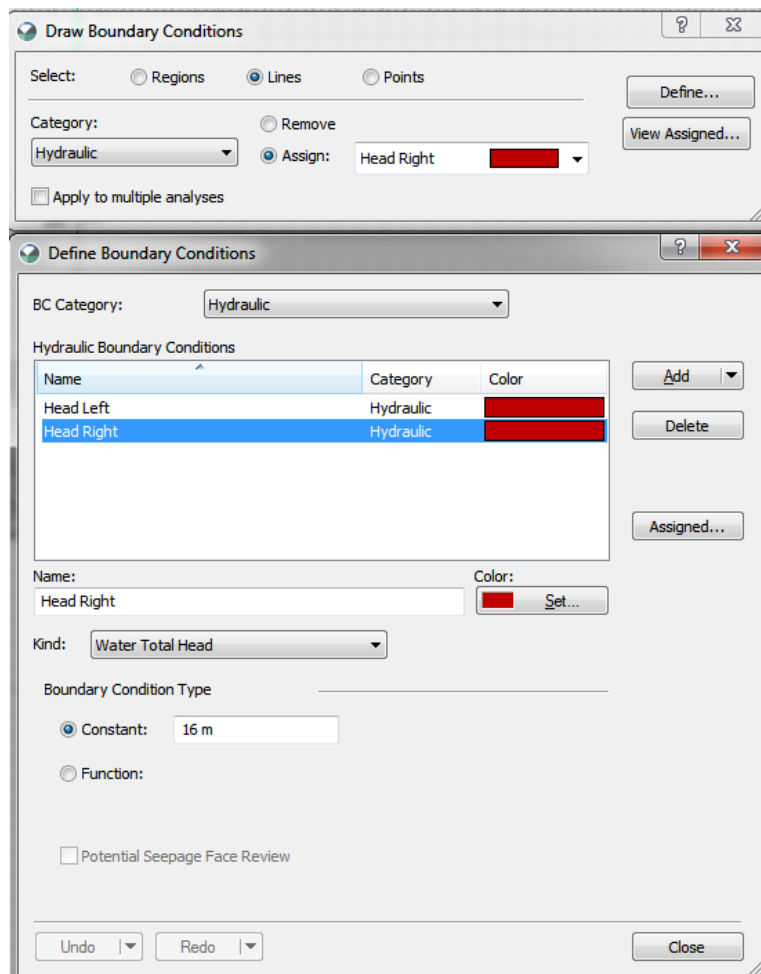
Οι εντολές του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν τον σχεδιασμό και τον ορισμό των παραπάνω οριακών συνθηκών είναι οι «Draw Boundary Conditions» και «Define Boundary Conditions», αντίστοιχα (Εικόνα 6.4).

Προκειμένου να σχεδιαστούν τα σταθερά υδραυλικά φορτία που προαναφέρθηκαν, επιλέχθηκε «Water Total Head» και σταθερές τιμές (Constant).

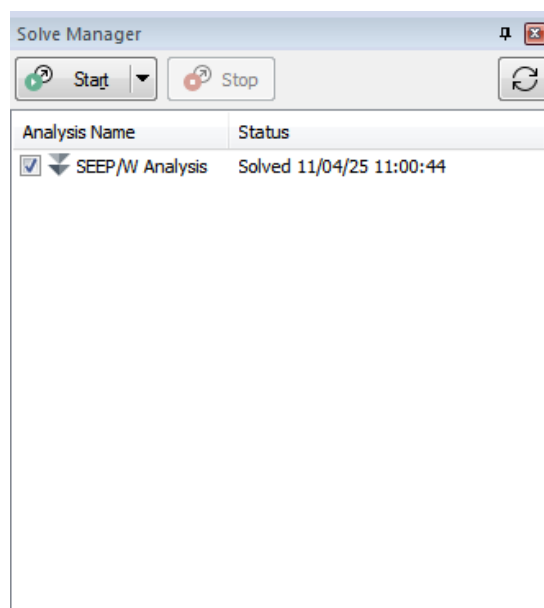
6.6. Επίλυση – Σύγκριση με αναλυτικές μεθόδους

Στο SEEP/W, η επίλυση του μοντέλου γίνεται στο πεδίο «Solve Manager» με την εντολή «Start» (Εικόνα 6.5).

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι καταρχήν γραφικά:

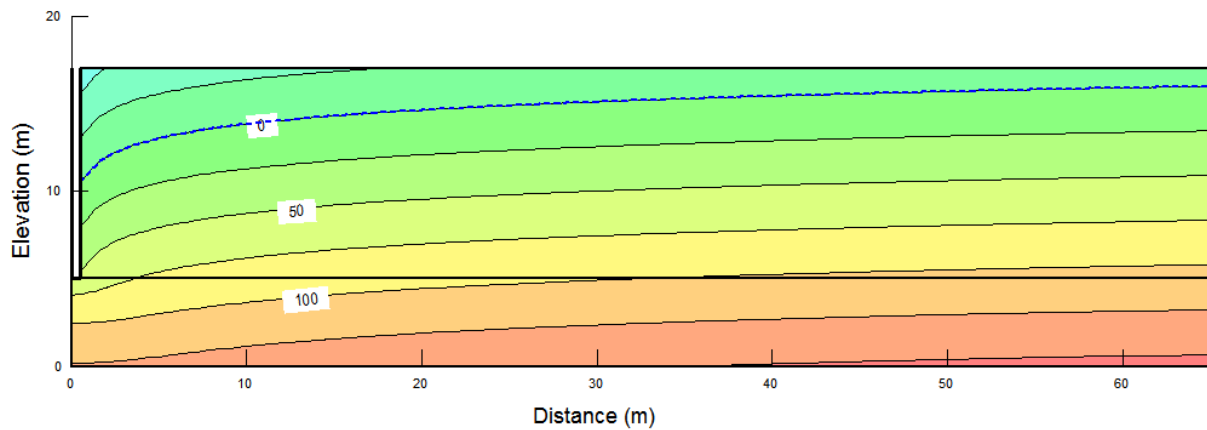


Εικόνα 6.4: Σχεδιασμός και ορισμός οριακών συνθηκών στο SEEP/W.



Εικόνα 6.5: Επίλυση στο SEEP/W.

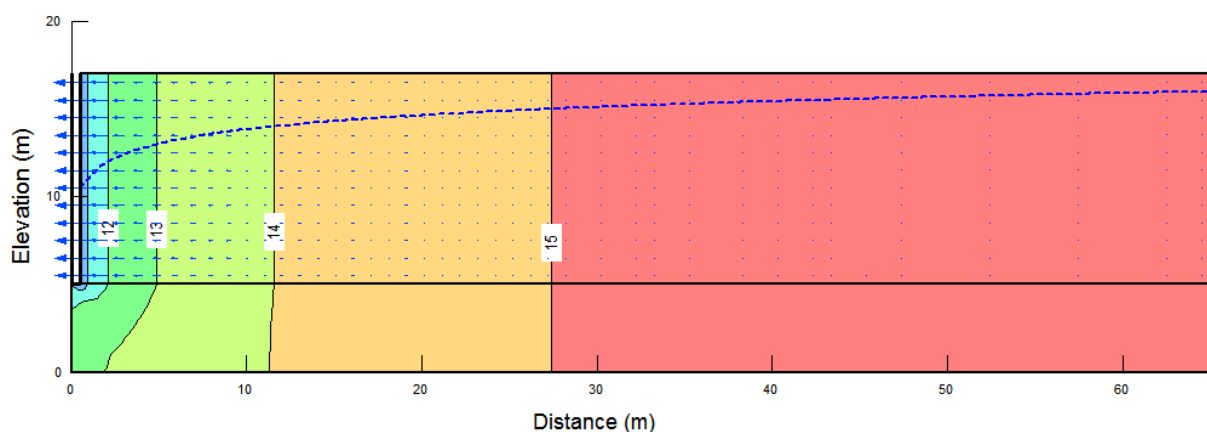
Στο Σχήμα 6.2 παριστάνεται η πίεση του νερού των πόρων (Pore Water Pressure, PWP σε m) και ο κώνος πτώσης στάθμης του υπόγειου νερού (για PWP = 0, σημειώνεται με μπλε διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 6.2: Πίεση του νερού των πόρων (σε m) και κώνος πτώσης στάθμης στο SEEP/W.

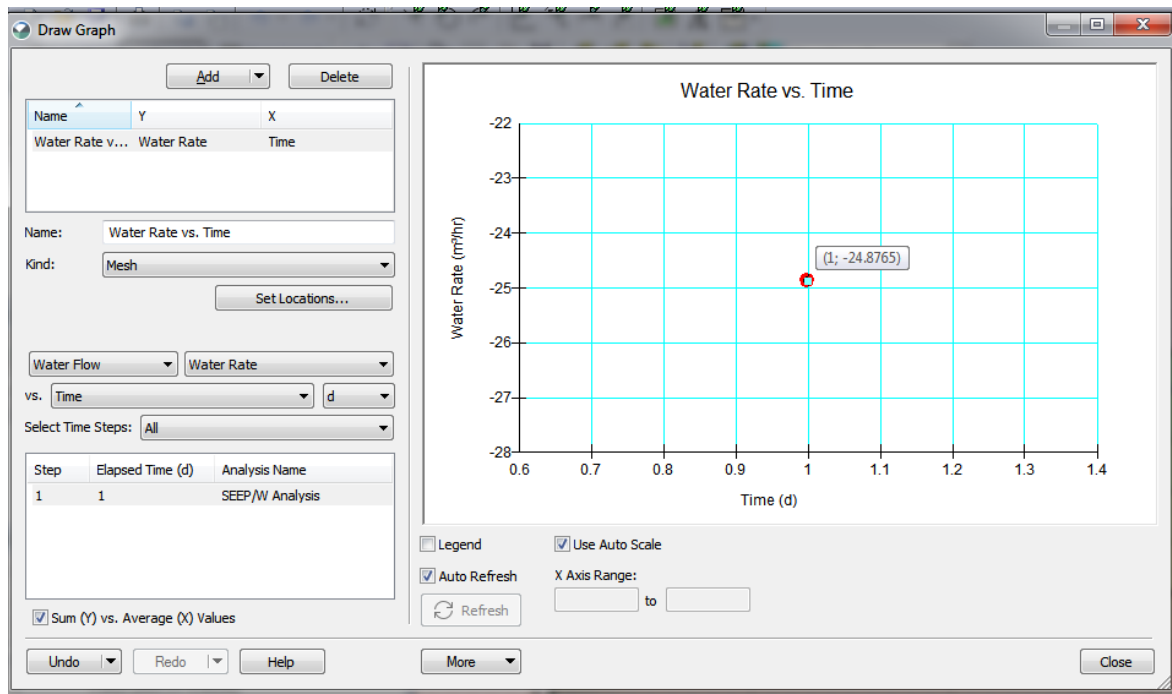
Επίσης, στο Σχήμα 6.3 δίνεται το υδραυλικό φορτίο (Water Total Head, σε m) και τα διανύσματα ροής (με μπλε βέλη, το μέγεθος των διανυσμάτων εξαρτάται από το μέγεθος της ταχύτητας ροής).

Σημειώνεται ότι τα ανύσματα ροής πάνω από την στάθμη του νερού είναι θεωρητικά, καθώς δεν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της παροχής από το πρόγραμμα.



Σχήμα 6.3: Υδραυλικό φορτίο (σε m) και διανύσματα ροής στο SEEP/W.

Πέρα των παραπάνω γραφικών αποτελεσμάτων, το πρόγραμμα δίνει και ποσοτικά αποτελέσματα (διαγράμματα), σε επιλεγμένες περιοχές (κόμβους). Στην Εικόνα 6.6 δίνεται διάγραμμα παροχής άντλησης – χρόνου άντλησης στη γεώτρηση.



Εικόνα 6.6: Διάγραμμα παροχής – χρόνου στη γεώτρηση άντλησης στο SEEP/W.

Σημειώνεται ότι η περιοχή που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό της παροχής (στην πράξη τα φίλτρα της γεώτρησης) αφορά ολόκληρη τη στήλη της γεώτρησης στο κορεσμένο τμήμα του υδροφόρου σχηματισμού (υψόμετρα από +5 έως και 16 m). Το αρνητικό πρόσημο της παροχής (Εικόνα 6.6) δηλώνει αφαίρεση ποσότητας νερού από τον υδροφορέα.

Επειδή η ανάλυση έγινε θεωρώντας σταθερή κατάσταση ροής, το αποτέλεσμα της παροχής είναι σταθερό και εκφράζεται ως ένα και μόνο σημείο στο διάγραμμα παροχής (water rate) – χρόνου (time) στο «τέλος» της άντλησης (1 βήμα ανάλυσης = 1 ημέρα) (Εικόνα 6.6). Εάν επιλεγόταν μεταβαλλόμενη κατάσταση ροής το διάγραμμα θα περιλάμβανε τιμές για όλα τα βήματα της ανάλυσης (time steps).

Η παραπάνω επίλυση έδωσε (μέγιστη) παροχή άντλησης ίση με **24.88 m³/h**.

6.6.1. Επίλυση με αναλυτικές μεθόδους

Προκειμένου να εκτιμηθεί η αξιοπιστία της τιμής της παροχής που υπολογίσθηκε από το πρόγραμμα SEEP/W, εφαρμόστηκαν αναλυτικές σχέσεις όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5.

Έτσι, χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους και επιλύοντας ως προς Q_0 τους τύπους Dupuit (σχέση 5.49):

$$H^2 - h^2 = \frac{Q_0}{\pi \cdot k} \cdot \ln \frac{R}{r}$$

και Thiem (σχέση 5.37):

$$s_1 - s_2 = \frac{Q_0}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot H} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

προκύπτει:

$Q_0 = 22.67 \text{ m}^3/\text{h}$ (Dupuit), και

$Q_0 = 24.32 \text{ m}^3/\text{h}$ (Thiem).

Για την εφαρμογή των προαναφερόμενων σχέσεων θεωρήθηκαν οι εξής τιμές:

$k = 0.36 \text{ m/h}$

$H = 11 \text{ m}$ (κορεσμένο πάχος υδροφορέα)

$h = 5.5 \text{ m}$ (στάθμη στην γεώτρηση)

$r = r_1 = 0.5 \text{ m}$ (ακτίνα γεώτρησης)

$R = 46 \text{ m}$ (ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης)

$s_1 = 11 - 5.5 = 5.5 \text{ m}$ (πτώση στάθμης στην γεώτρηση)

$r_2 = 40 \text{ m}$ (τυχαία απόσταση)

$s_2 = 11 - 10.46 = 0.54 \text{ m}$ (πτώση στάθμης στην απόσταση $r_2 = 40 \text{ m}$, όπως εκτιμήθηκε από το πρόγραμμα SEEP/W – βλέπε Σχήμα 6.2)

6.6.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Δαπιστώνεται ότι το αποτέλεσμα της επίλυσης του αριθμητικού μοντέλου συγκλίνει με αυτό της επίλυσης του τύπου του Thiern (διαφορά 2%). Σε σχέση όμως με το αποτέλεσμα της επίλυσης του τύπου του Dupuit υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση (10%).

Αυτό προφανώς οφείλεται στην μη κάλυψη όλων των προϋποθέσεων για την εφαρμογή της εξίσωσης Dupuit. Συγκεκριμένα, το πάχος του κορεσμένου στρώματος δεν είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με τις διακυμάνσεις της στάθμης του νερού (βλέπε ενότητα 5.1.4 του κεφαλαίου 5).

6.7. Παραμετρική ανάλυση

Με βάση την προαναφερόμενη καλή σύγκλιση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης σε σχέση με αυτά από την εφαρμογή του τύπου Thiern (σχέση 5.37, κεφάλαιο 5), έγινε περαιτέρω ανάλυση της ροής του υπόγειου νερού προς την γεώτρηση μέσω του προγράμματος SEEP/W, μεταβάλλοντας κρίσιμες παραμέτρους προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση τους στο αποτέλεσμα της άντλησης. Η παραμετρική αυτή ανάλυση έγινε με τον σχεδιασμό και την επίλυση των παρακάτω σεναρίων:

Σενάριο Α: Μεταβολή του συντελεστή υδροπερατότητας (k) του υδροφορέα.

Σενάριο Β: Μεταβολή του βάθους της γεώτρησης (βαθμός τελειότητας).

Σενάριο Γ: Μεταβολή της διαμέτρου της γεώτρησης.

Σενάριο Δ: Μεταβολή της πτώσης στάθμης στην γεώτρηση.

6.7.1. Σενάριο Α: Μεταβολή του συντελεστή υδροπερατότητας

Θεωρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές, πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις με υποδεκαπλάσιο ($k = 10^{-5}$ m/s) έως και δεκαπλάσιο ($k = 10^{-3}$ m/s) συντελεστή υδροπερατότητας του υδροφόρου στρώματος.

Τα αποτελέσματα αυτών των επιλύσεων δίνονται στον Πίνακα 6.2 και δείχνουν γραμμική μεταβολή της παροχής άντλησης (Σχήμα 6.4), επιβεβαιώνοντας τη θεωρία (βλέπε ενότητα 5.1.4 στο κεφάλαιο 5).

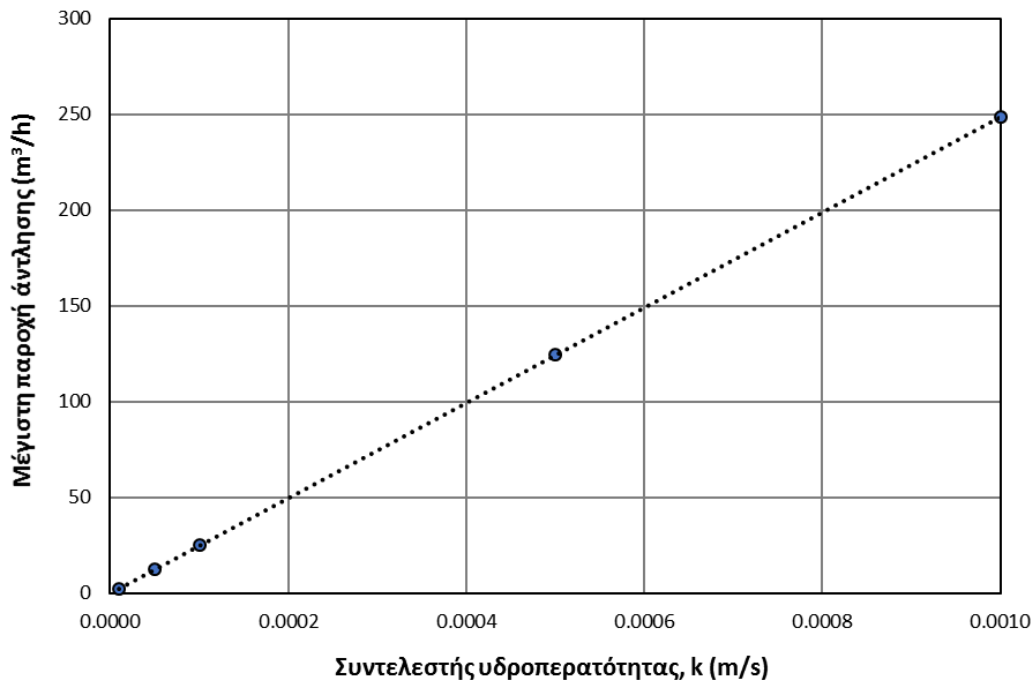
Πίνακας 6.2: Σενάριο Α: Αποτελέσματα επιλύσεων στο SEEP/W.

Συντελεστής υδροπερατότητας, k (m/s)	Παροχή άντλησης, Q				
	SEEP/W	Τύπος Dupuit		Τύπος Thiem	
	(m ³ /h)	(m ³ /h)	Διαφορά από SEEP/W	(m ³ /h)	Διαφορά από SEEP/W
10^{-5}	2.49	3.04	-18%	2.43	2%
5×10^{-5}	12.44	12.28	1%	12.16	2%
10^{-4}	24.88	22.67	10%	24.32	2%
5×10^{-4}	124.38	96.35	29%	121.58	2%
10^{-3}	248.76	180.75	38%	243.17	2%

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η διαφοροποίηση των τιμών της υπολογιζόμενης παροχής από αυτές με την επίλυση του τύπου του Thiem παραμένει σταθερή (διαφορά 2%). Αντίθετα, οι διαφοροποιήσεις των τιμών της υπολογιζόμενης παροχής σε σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν από την επίλυση Dupuit ποικίλουν (από -18 έως 38%).

6.7.2. Σενάριο Β: Μεταβολή του βάθους της γεώτρησης

Κρατώντας όλες τις παραμέτρους σταθερές ($k = 10^{-4}$ m/s), το μοντέλο επιλύθηκε στο SEEP/W για βάθος γεώτρησης ίσο με 11, 10, 9 και 8 m, δηλαδή, με βαθμό τελειότητας ίσο με 91%, 82%, 73% και 64%, αντίστοιχα.

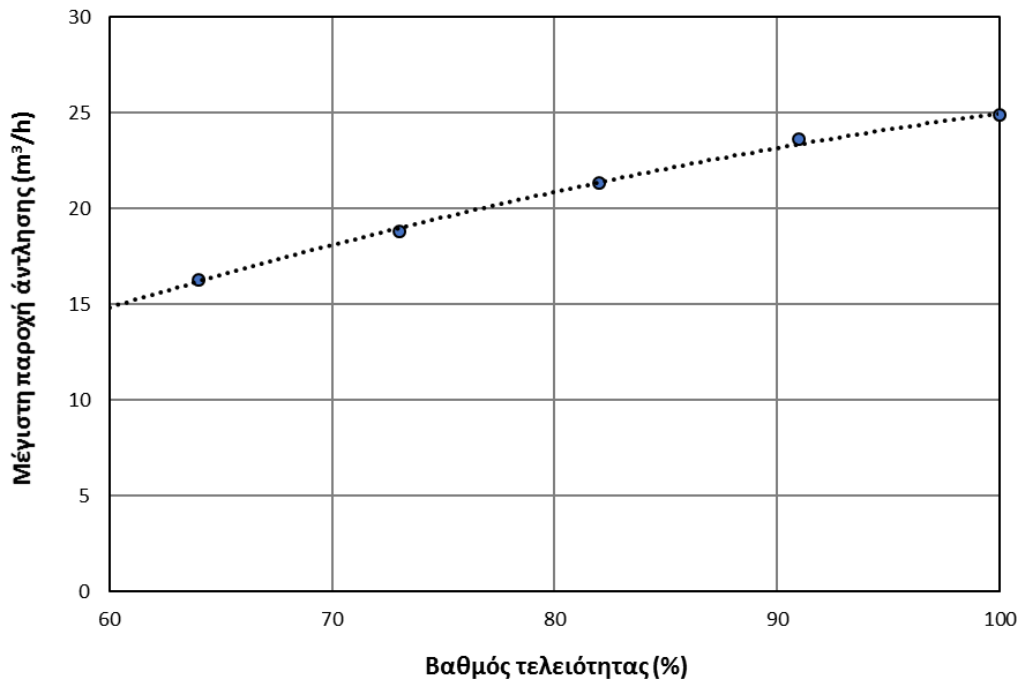


Σχήμα 6.4: Σενάριο A: Μεταβολή της παροχής άντλησης σε σχέση με τον συντελεστή υδροπερατότητας του υδροφορέα.

Πίνακας 6.3: Σενάριο B: Αποτελέσματα επιλύσεων στο SEEP/W.

Βάθος γεώτρησης (m)	Βαθμός τελειότητας	Παροχή άντλησης, Q	
		(m³/h)	Διαφορά από αρχική επίλυση
8	64%	16.30	-34%
9	73%	18.83	-24%
10	82%	21.32	-14%
11	91%	23.62	-5%
12	100%	24.88	0

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5, όσο μικρότερος είναι ο βαθμός τελειότητας της υδρογεώτρησης τόσο μεγαλύτερη είναι και η μείωση της παροχής άντλησης, σε σχέση με την αρχική επίλυση (ενότητα 6.6). Όμως για μικρές αποκλίσεις από την τελειότητα της γεώτρησης (βαθμός τελειότητας > 95%) οι αποκλίσεις από την παροχή άντλησης είναι ασήμαντες (βλέπε ενότητα 5.1.5 στο κεφάλαιο 5).



Σχήμα 6.5: Σενάριο Β: Μεταβολή της παροχής άντλησης σε σχέση με τον βαθμό τελειότητας της υδρογεώτρησης.

6.7.3. Σενάριο Γ: Μεταβολή της διαμέτρου της γεώτρησης

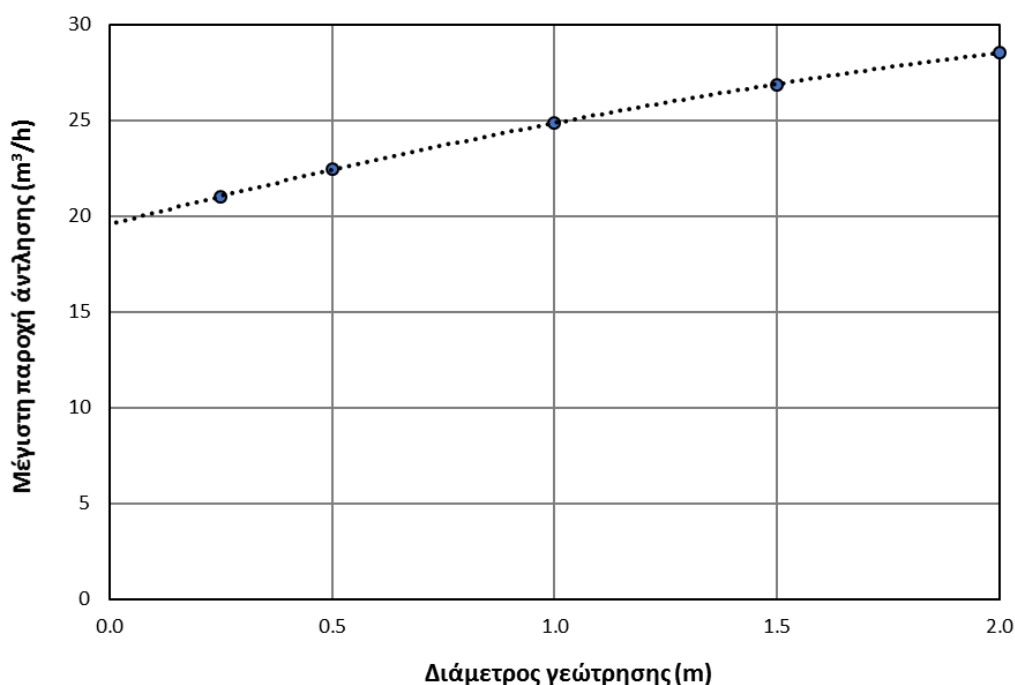
Με όλες τις παραμέτρους σταθερές ($k = 10^{-4}$ m/s), το μοντέλο για διάμετρο γεώτρησης ίση με 0.25, 0.5, 1.5 και 2 m.

Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 6.4 και δείχνουν μικρότερες αποκλίσεις στην υπολογιζόμενη παροχή άντλησης σε σχέση με την αρχική επίλυση (ενότητα 6.6) (από -16 έως 15%). Και σε αυτή την περίπτωση επιβεβαιώνεται η θεωρία (βλέπε ενότητα 5.3 στο κεφάλαιο 5), σύμφωνα με την οποία, μεγάλες αυξήσεις στην διάμετρο της γεώτρησης δεν επιφέρουν αντίστοιχα μεγάλες αυξήσεις στην παροχή άντλησης.

Στο Σχήμα 6.6 φαίνεται ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος της υδρογεώτρησης, ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνει η παροχή άντλησης μειώνεται.

Πίνακας 6.4: Σενάριο Γ: Αποτελέσματα επιλύσεων στο SEEP/W.

Διάμετρος γεώτρησης (m)	Διαφοροποίηση	Παροχή άντλησης, Q	
		(m ³ /h)	Διαφορά από αρχική επίλυση
0.25	-75%	21.00	-16%
0.5	-50%	22.47	-10%
1.0	0	24.88	0
1.5	50%	26.85	8%
2.0	100%	28.57	15%



Σχήμα 6.6: Σενάριο Γ: Μεταβολή της παροχής άντλησης σε σχέση με την διάμετρο της υδρογεώτρησης.

6.7.4. Σενάριο Δ: Μεταβολή της πτώσης στάθμης στην γεώτρηση

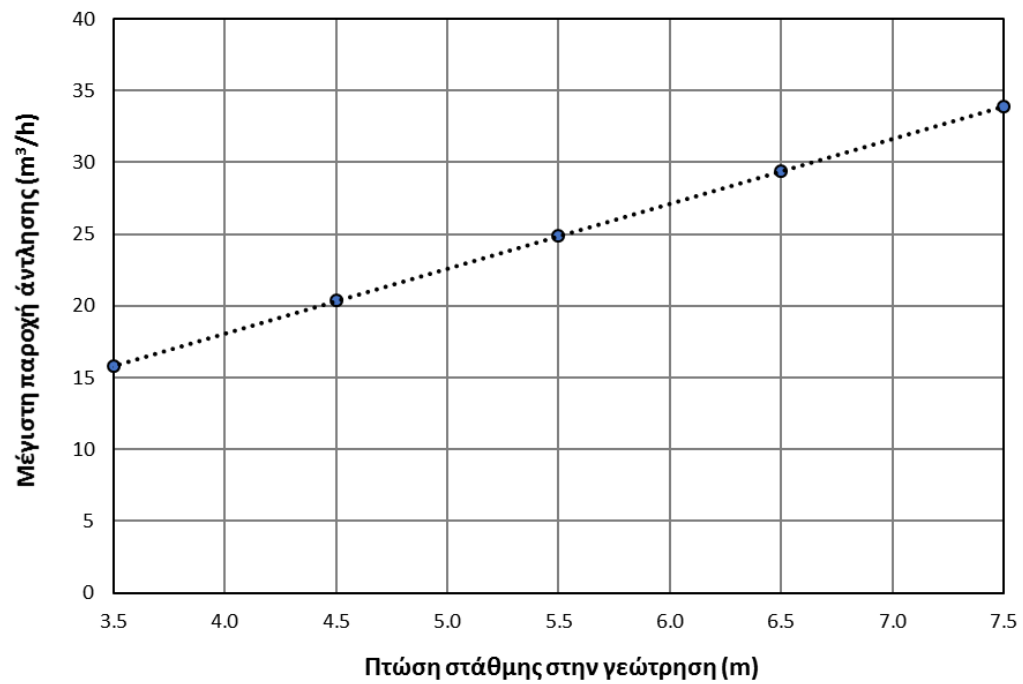
Με όλες τις παραμέτρους σταθερές ($k = 10^{-4}$ m/s), το μοντέλο επιλύθηκε στο SEEP/W για πτώση στάθμης στην γεώτρηση από 3.5 έως και 7.5 m, δηλαδή, για (σταθερό) υδραυλικό φορτίο (στάθμη) στην επαφή γεώτρησης – υδροφορέα από 12.5 έως και 8.5 m, αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.5 δείχνουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις στην υπολογιζόμενη παροχή άντλησης (από -36 έως 36%). Όπως επιβεβαιώνεται και από την θεωρία (βλέπε ενότητα 5.3 στο κεφάλαιο 5), η παροχή συνδέεται άμεσα και γραμμικά με την πτώση στάθμης (βλέπε Σχήμα 6.7).

Πίνακας 6.5: Σενάριο Δ: Αποτελέσματα επιλύσεων στο SEEP/W.

Πτώση στάθμης στην γεώτρηση (m)	Στάθμη στην γεώτρηση (m)	Παροχή άντλησης, Q	
		(m ³ /h)	Διαφορά από αρχική επίλυση
3.5	12.5	15.83	-36%
4.5	11.5	20.35	-18%
5.5	10.5	24.88	0
6.5	9.5	29.40	18%
7.5	8.5	33.92	-36%

Σημειώνεται ότι παροχές 29.40 και 33.92 m³/h είναι θεωρητικές και μόνο, καθώς όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.4 στο κεφάλαιο 5 «είναι ασύμφορο να αντλείται μια πλήρης (τέλεια) γεώτρηση με παροχή τέτοια, ώστε η πτώση στάθμης στο φρέαρ να ξεπερνά το μισό του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα». Συνεπώς, στην πράξη, η μέγιστη δυνατή παροχή άντλησης αντιστοιχεί σε πτώση στάθμης ίση με $0.5 \cdot H = 5.5$ m.



Σχήμα 6.7: Σενάριο Δ: Μεταβολή της παροχής άντλησης σε σχέση με την πτώση στάθμης στην υδρογεώτρηση.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού ελεύθερου υδροφόρου σχηματισμού προς μία υδρογεώτρηση, μέσω του προγράμματος SEEP/W, συνάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Οι μέγιστες παροχές που υπολογίσθηκαν από το πρόγραμμα SEEP/W, συγκλίνουν με τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου Thiem (απόκλιση 2%). Αντίθετα, με τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου Dupuit αποκλίνουν αισθητά. Αυτό αποδεικνύει την καλή εφαρμογή της σχέσης Thiem σε όλους τους τύπους υδροφόρων, αλλά και την περιορισμένη εφαρμογή της σχέσης Dupuit σε υπό πίεση υδροφορείς. Στην περίπτωση ελεύθερων υδροφορέων, όπως σε αυτή που εξετάσθηκε, για να εφαρμοσθεί επιτυχώς η σχέση Dupuit θα πρέπει το πάχος του υδροφόρου ορίζοντα να είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τις διακυμάνσεις της στάθμης του νερού.
- Ο συντελεστής υδροπερατότητας (k) του υδροφόρου επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της υδρογεώτρησης (μέγιστη παροχή). Παρατηρείται γραμμική αύξηση της απόδοσης της γεώτρησης σε σχέση με τον συντελεστή υδροπερατότητας.
- Ατελείς γεωτρήσεις εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις από τη θεωρητική τιμή της μέγιστης παροχής που προέκυψε από τις αναλυτικές μεθόδους. Το βάθος διάτρησης της γεώτρησης επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της. Μια τέλεια υδρογεώτρηση προσφέρει την μέγιστη δυνατή παροχή άντλησης.
- Η διάμετρος διάτρησης της γεώτρησης δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την απόδοσή της. Διαδοχικές αυξήσεις της διαμέτρου προκαλούν αύξηση της μέγιστης παροχής άντλησης, αλλά με μειούμενο ρυθμό.
- Αύξηση της πτώσης στάθμης νερού συσχετίζεται με γραμμικές αυξήσεις των τιμών της παροχής άντλησης, όπως ήταν αναμενόμενο από τη θεωρία. Η πτώση στάθμης φαίνεται να είναι και ο σημαντικότερος παράγοντας επηρεασμού της μέγιστης παροχής από αυτούς που εξετάσθηκαν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

Βαφειάδης, Π. (1998), Η τεχνική των Υδρογεωτρήσεων, University Press, Θεσσαλονίκη.

Βλυσίδης, Α., Τεχνολογία Πόσιμου Νερού, Πρώτη Διάλεξη: Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Πατρών, <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/ENV279>.

Βουδούρης, Κ.Σ. (2022), Εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειου νερού, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 978-960-418-957-1.

Βουδούρης, Κ. & Μαρίνος, Β. (2010), Υδρομαστευτικά έργα – Τεχνικές διάτρησης – Συμπλήρωση – Ανάπτυξη υδρογεώτρησης – Δειγματοληπτικές – Γεωτεχνικές γεωτρήσεις – Μέθοδοι διαγραφιών, Πανεπιστημιακές παραδόσεις και σημειώσεις μαθήματος Τεχνικής Γεωτρήσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Καλλέργης, Γ. (1999), Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Τόμος Α' , Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.

Κελεσίδης, Β.Χ. (2012), Αβαθείς και ειδικές γεωτρήσεις, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Κλειδοπούλου, Μ.Ν. (2003), Ροή υπόγειων νερών προς υδρομαστευτικά έργα (Παράδειγμα: υδρομαστευτική στοά περιοχής Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης), Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Μπεζές, Κ. (1978), Σχέση πτώσης στάθμης – παροχής σε μία γεώτρηση, Σύλλογος Ελλήνων Γεωλόγων, Έκδοση 1/78, Ειδικά Θέματα Υδρογεωλογίας, Αθήνα.

Σούλιος, Γ. (2008), Γενική Υδρογεωλογία, Β' Τόμος, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

Τζιμόπουλος, Χ.Δ. (1994), Στραγγίσεις – Υδραυλική φρεάτων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Φυτίκας, Μ. (1998), Τεχνική Γεωτρήσεων, Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας και Φυσικής Γεωγραφίας, Θεσσαλονίκη.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Baalousha, H.M. (2024), Theis equation revisited: From infinite to finite aquifer and from fully to partially penetrating well, Elsevier, Groundwater for Sustainable Development, Vol. 24, February 2024, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101069>.

Culver, G. (1991), Drilling and well construction in "Geothermal Direct Use Engineering and Design Guidebook", Geo- Heat Center, Oregon Institute of Technology, p. 115-151, Klamath Falls, Oregon, U.S.A. <http://geoheat.oit.edu/pdf/tp65.pdf>.

Driscoll, F.G. (1986), Groundwater and wells. Second edition, Johnson Filtration Systems Inc., St. Paul – Minnesota.

Fetter, C.W. (1988), Applied hydrogeology, Fourth edition, C.E. Merrill, Columbus.

GEO-SLOPE International Ltd. (2015). Seepage Modeling with SEEP/W: An Engineering Methodology. June 2015 Edition. www.geo-slope.com.

Huisman, L. (1972), Groundwater Recovery, Macmillan Publishers, London.

Misstear, B., Banks, D. & Clark, L. (2006), Water wells and boreholes, John Wiley & Sons, Ltd., DOI: 10.1002/0470031344.

Song, E.X. (1990), Elasto-plastic consolidation under steady state and cyclic loads, Dissertation, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

Todd, D.K. (1980), Groundwater hydrology, Second edition, John Wiley & Sons Inc., New York.

Woessner, W.W. & Poeter, E.P. (2020), Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater flow, The Groundwater Project.

Ισότοποι

<https://whelveenenergy.gr/ydrogeotriseis>

<https://www.waterresourcesengineering.com>

<https://www.geotriseis.com/geotrypana.php>

<https://apothesis.lib.hmu.gr/handle/20.500.12688/10695>