

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΤΛΗΣΕΙΣ

ΚΩΣΤΑΣ ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2011

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΤΛΗΣΕΙΣ - ΜΟΝΙΜΕΣ ΡΟΕΣ

1.1 Σε τι αποσκοπεί μια δοκιμαστική άντληση;

Οι *δοκιμαστικές αντλήσεις* ή *δοκιμές άντλησης* (pumping tests) παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην υδρογεωλογική έρευνα πεδίου. Μια καλά σχεδιασμένη αντλητική δοκιμή μπορεί να δώσει πληροφορίες για την απόδοση της γεώτρησης, τις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα και την υπόγεια ροή. Οι δοκιμαστικές αντλήσεις απαιτούν χρόνο και είναι δαπανηρές. Για τον λόγο αυτόν πρέπει να σχεδιασθούν σωστά, ώστε να πάρουμε αξιόπιστα δεδομένα. Η ερμηνεία των δεδομένων δεν είναι πάντα εύκολη, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η γεωλογική δομή και η υπόγεια ροή είναι πολύπλοκη.

Μια αντλητική δοκιμή είναι το μέσο για να διερευνήσουμε πόσο εύκολα ρέει το νερό διαμέσου του εδάφους στη γεώτρηση. Συνίσταται στην άντληση με ελεγχόμενη παροχή μιας γεώτρησης και την καταγραφή των επιπτώσεων στη στάθμη του υπόγειου νερού, τόσο στην ίδια τη γεώτρηση, όσο και σε γεωτρήσεις παρατήρησης (πιεζόμετρα).

Οι δοκιμαστικές αντλήσεις γίνονται για διάφορους λόγους:

1. Για τον προσδιορισμό της απόδοσης και τον καθαρισμό (ανάπτυξη) σε μια νέα υδρογεώτρηση ή τον έλεγχο της απόδοσης σε μια υφιστάμενη γεώτρηση. Η διάρκεια μπορεί να είναι από 8 ώρες έως μία εβδομάδα. Το στάδιο αυτό της άντλησης αναφέρεται ως *προάντληση*.
2. Άντληση με βαθμίδες (step tests), δηλ. άντληση με διαφορετικές παροχές (3 ή 4 στάδια, διάρκειας 3 ωρών το καθένα) για τον καθορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών της γεώτρησης, π.χ. παροχή εκμετάλλευσης. Η δοκιμή αυτή περιλαμβάνει και την καταγραφή της επανόδου (επαναφοράς) της στάθμης μετά τη διακοπή της άντλησης.
3. Για την εκτίμηση των επιπτώσεων της άντλησης σε γειτονικές γεωτρήσεις και στο περιβάλλον γενικότερα (πηγές, χειμάρρους, κ.λπ.). Η γεώτρηση αντλείται με σταθερή παροχή για μερικές ημέρες και μετά ακολουθεί η επάνοδος της στάθμης. Οι στάθμες του νερού τόσο στην αντλούμενη γεώτρηση, όσο και σε γειτονικές γεωτρήσεις, καθώς και οι παροχές των πηγών καταγράφονται σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

4. Για τον καθορισμό των υδραυλικών ιδιοτήτων του υδροφορέα (π.χ. συντελεστές αποθηκευτικότητας και μεταβιβαστικότητας). Στην περίπτωση αυτή γίνεται άντληση με σταθερή παροχή για 24-72 ώρες (ή για μερικές εβδομάδες) και καταγράφεται η στάθμη του υπόγειου νερού στην ίδια τη γεώτρηση και σε γειτονικές γεωτρήσεις παρατήρησης (πιεζόμετρα).
5. Δοκιμές μικρής διάρκειας (1-2 ώρες) για τον καθορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας.

1.2 Σχεδίαση μιας δοκιμαστικής άντλησης

Η προσχεδίαση των δοκιμών άντλησης είναι απαραίτητη για την επιτυχή εκτέλεσή τους. Αφού αποφασισθεί το είδος και η διάρκεια της άντλησης εξασφαλίζεται και ο κατάλληλος εξοπλισμός. Γενικά λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Η επιλογή της κατάλληλης αντλίας είναι κρίσιμη για την επιτυχία της δοκιμαστικής άντλησης. Η αντλία πρέπει να μπορεί να αντλήσει τη μέγιστη παροχή από το συγκεκριμένο βάθος.
- Καθορίζεται η διάρκεια της αντλητικής δοκιμής, η οποία εξαρτάται από την παροχή άντλησης, την απόσταση του πιεζομέτρου, τη μεταβιβαστικότητα του υδροφορέα και την ακτίνα της περιοχής έρευνας. Για υπό πίεση υδροφορείς, είναι απαραίτητη η άντληση τουλάχιστον 24 ωρών, για να διαπιστωθεί ή ύπαρξη υδρογεωλογικών ορίων.
- Κατά την εκτέλεση της δοκιμαστικής άντλησης δεν πρέπει να λειτουργούν γειτονικές γεωτρήσεις, που πιθανόν επηρεάζουν τη γεώτρηση άντλησης.
- Η επιλογή της κατάλληλης θέσης των πιεζομέτρων για τη μέτρηση της στάθμης είναι κρίσιμη. Πρέπει να βρίσκονται μέσα στην ακτίνα επίδρασης της αντλούμενης γεώτρησης (βλ. στη συνέχεια).
- Η μέτρηση της στάθμης του υπόγειου νερού γίνεται με σταθμήμετρα ή αυτογραφικά όργανα στην αντλούμενη γεώτρηση και σε γειτονικές γεωτρήσεις παρατήρησης (πιεζόμετρα). Η μέτρηση της στάθμης γίνεται σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα, όπως φαίνεται στον Πίν. 1.1 και καταγράφεται σε ειδικά έντυπα. Πριν την έναρξη της δοκιμαστικής άντλησης μετράμε την αρχική στάθμη του υπόγειου νερού στη γεώτρηση. Επίσης μετά τη διακοπή της άντλησης μετράμε την επαναφορά της στάθμης. Να σημειωθεί ότι, οι μετρήσεις επαναφοράς της στάθμης αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα κάθε δοκιμαστικής άντλησης.

Πίνακας 1.1: Συχνότητα μετρήσεων στάθμης κατά τη δοκιμαστική άντληση.

Χρόνος από την έναρξη της δοκιμής άντλησης	Συχνότητα μετρήσεων στάθμης υπόγειου νερού
0-10 min	1 min
10-20 min	2 min
20-60 min	5 min
60-120	10 min
2-5 h	30 min
5-12 h	1 h
12-36 h	2 h
36-96 h	6 h
>96 h	12 h

- Για τη μέτρηση της παροχής χρησιμοποιούνται *υδρόμετρα*, τα οποία είναι προσαρμοσμένα στο σωλήνα εκροής. Για παροχές μικρότερες από 10 l/s, χρησιμοποιούμε βαρέλι με συγκεκριμένο όγκο (100-200 l) και χρονόμετρο (*ογκομετρική μέθοδος*). Μετρούμε το χρόνο που απαιτείται να γεμίσει το βαρέλι και υπολογίζεται η παροχή, ως το πηλίκο του όγκου προς τον χρόνο. Για τη μέτρηση μεγάλων παροχών χρησιμοποιούνται *εκχειλιστές* τύπου δεξαμενής, παρόμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της παροχής χειμάρρων.

Συχνά με την πτώση της στάθμης κατά την άντληση μειώνεται και η παροχή. Για τον λόγο αυτόν πρέπει να μετράται συχνά (κάθε μισή έως μία ώρα) και να καταγράφεται στο ειδικό έντυπο, για να διαπιστωθεί αν παραμένει σταθερή. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο χειρισμό της βαλβίδας του σωλήνα εκροής. Δεν πρέπει η μεταβολή της παροχής κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής άντλησης να υπερβεί το 10%, αν και είναι επιθυμητό μικρότερο ποσοστό μεταβολής. Πριν την έναρξη της δοκιμής πρέπει να μετρηθεί η παροχή για συγκεκριμένες θέσεις της βαλβίδας.

- Ειδική μέριμνα πρέπει να ληφθεί για τον χώρο που θα παροχετευθεί το αντλούμενο νερό, ειδικά στις δοκιμές μεγάλης διάρκειας. Η καλύτερη λύση είναι η παροχέτευση σε ένα γειτονικό χείμαρρο για να αποφευχθούν προβλήματα καταστροφής καλλιεργειών από την ελεύθερη διοχέτευση σε γειτονικά αγροκτήματα.

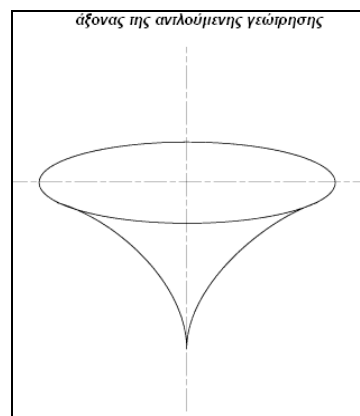
Συνοψίζοντας, τα απαραίτητα όργανα για την εκτέλεση μιας δοκιμής άντλησης εκτός από το αντλητικό συγκρότημα είναι: υδρόμετρο ή ογκομετρημένο δοχείο, σταθμήμετρο, χρονόμετρο, μετροταινία για τη μέτρηση της απόστασης των γειτονικών γεωτρήσεων παρατήρησης και έντυπα για την καταγραφή των μετρήσεων.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι η επιλογή της θέσης της γεώτρησης, στην οποία θα εκτελεσθεί δοκιμαστική άντληση, το είδος και η διάρκεια της άντλησης, πολλές φορές

περιορίζεται από οικονομικά κριτήρια. Αν υπάρχουν οικονομικοί περιορισμοί, ο υδρογεωλόγος πρέπει να διασφαλίσει την επιτυχία της άντλησης, με βάση τα υδρογεωλογικά δεδομένα της περιοχής. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητη η γνώση της γεωλογίας της περιοχής και πριν την έναρξη της δοκιμαστικής άντλησης πρέπει να συνταχθεί η στρωματογραφική στήλη της περιοχής.

1.3 Κώνος πτώσης στάθμης

Όταν μια γεώτρηση αντλείται, η στάθμη του υπόγειου νερού γύρω από αυτήν πέφτει, σχηματίζοντας έναν ανεστραμμένο **κώνο πτώσης στάθμης** ή **κώνο άντλησης** (cone of depression or pumping cone). Το σχήμα και η έκταση του κώνου εξαρτάται από την παροχή άντλησης και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα (Σχ. 1.1). Ο υποβιβασμός, δηλ. η απόσταση από την αρχική στάθμη του νερού ονομάζεται **πτώση στάθμης** (drawdown) με διάσταση μήκος (L) και συνήθως μετράται σε m.



Σχήμα 1.1: Κώνος πτώσης στάθμης σε αντλούμενη γεώτρηση.

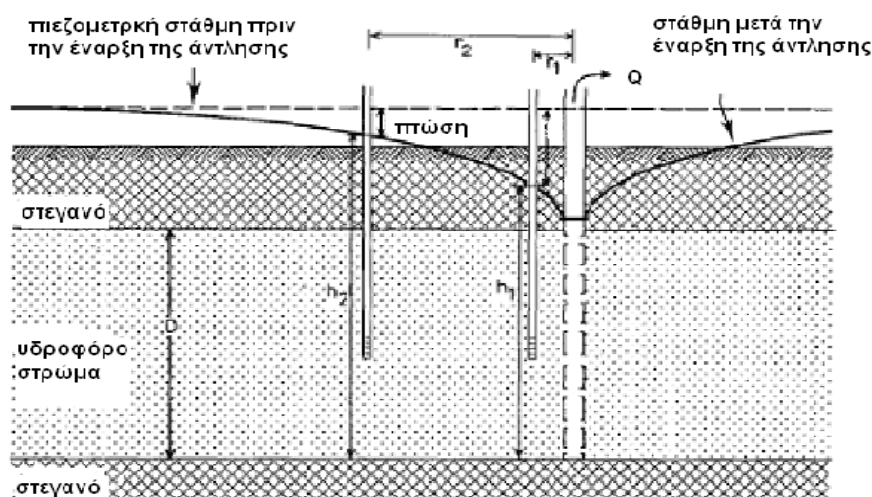
Αρχικά με την έναρξη της άντλησης αφαιρείται νερό που βρίσκεται στην άμεση γειτονιά της γεώτρησης. Η αφαίρεση του νερού αυτού δημιουργεί τον κώνο πτώσης της στάθμης γύρω από την αντλούμενη γεώτρηση. Με τη συνέχιση της άντλησης, ο κώνος εξαπλώνεται, αλλά και βαθαιίνει. Σύμφωνα με τον Καλλέργη (1999) διακρίνονται τρία στάδια ανάπτυξης του κώνου πτώσης στάθμης:

1) **αρχικό στάδιο:** Χαρακτηρίζεται από την πτώση της στάθμης σε όλη την έκταση του κώνου και τη γρήγορη μεταβολή του σχήματός του (μη μόνιμη ροή).

2) **ενδιάμεσο στάδιο**: Η στάθμη συνεχίζει να πέφτει, αλλά το κεντρικό τμήμα του κώνου παίρνει ένα σταθερό σχήμα (μεταβατική ροή)

3) **τελικό στάδιο**: Χαρακτηρίζεται από τη σταθεροποίηση της στάθμης και του σχήματος του κώνου πτώσης στάθμης (μόνιμη ροή).

Όσο απομακρυνόμαστε από την αντλούμενη γεώτρηση, η πτώση στάθμης γίνεται μικρότερη (Σχ. 1.2). Με την άντληση αρκετών ωρών, ο κώνος σταθεροποιείται (κατάσταση ισορροπίας). Το εξωτερικό όριο του κώνου πτώσης στάθμης καθορίζει την ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης (βλ. παράγραφο 2.3). Το νερό κατά την άντληση συγκλίνει προς τη γεώτρηση από όλες τις πλευρές και οι ισοδυναμικές καμπύλες σε ισότροπους και ομοιογενείς υδροφορείς είναι κυκλικές. Όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια, το φορτίο κοντά στη γεώτρηση μεταβάλλεται γραμμικά με τον λογάριθμο της απόστασης.



Σχήμα 1.2: Κώνος πτώσης στάθμης σε αντλούμενη γεώτρηση σε υπό πίεση υδροφορέα (Kruseman & Ridder, 1990).

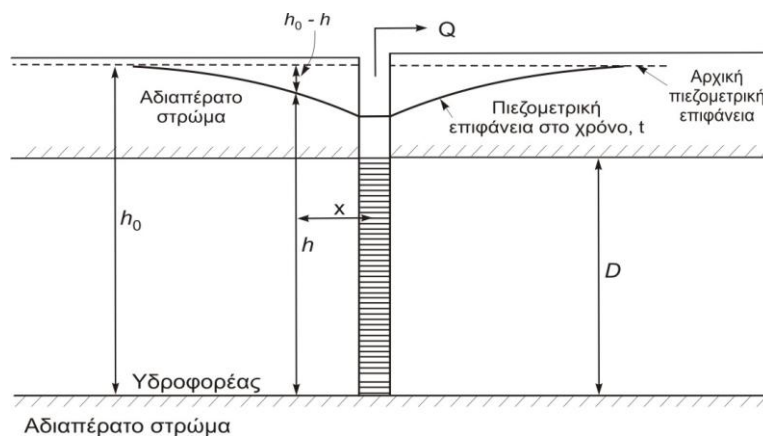
1.4 Ροή προς αντλούμενες γεωτρήσεις- Υπολογισμός υδραυλικών παραμέτρων

1.4.1 Βασικές παραδοχές

Οι κυριότερες υδραυλικές παράμετροι είναι ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας (T), ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (S) και η υδραυλική αγωγιμότητα (k). Πρακτικά δηλ. αντλείται μια γεώτρηση και καταγράφεται ο ρυθμός πτώσης της στάθμης του υπόγειου νερού στη γεώτρηση άντλησης σε μία ή περισσότερες γειτονικές γεωτρήσεις παρατήρησης.

Για τη μελέτη της ροής στα υδρομαστευτικά έργα (γεωτρήσεις, πηγάδια, τάφροι) και τον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφορέων πρέπει να γίνουν μερικές παραδοχές σχετικά με τις υδραυλικές συνθήκες στα υδροφόρα στρώματα, καθώς και τις γεωτρήσεις άντλησης και παρατήρησης. Οι παραδοχές αυτές είναι οι εξής (Fetter, 1994):

- 1) Ο υδροφορέας είναι ισότροπος και ομοιογενής.
- 2) Ο υδροφορέας είναι άπειρης έκτασης με οριζόντιο αδιαπέρατο υπόβαθρο.
- 3) Η αρχική πιεζομετρική στάθμη βρίσκεται σε ηρεμία πριν την έναρξη της άντλησης.
- 4) Όλες οι αλλαγές στη θέση της πιεζομετρικής επιφάνειας οφείλονται μόνο στην επίδραση της άντλησης.
- 5) Ισχύει ο νόμος του Darcy, δηλ. η ροή είναι στρωτή.
- 6) Το υπόγειο νερό έχει σταθερή πυκνότητα και ιξώδες.
- 7) Η ροή του υπόγειου νερού είναι οριζόντια (χωρίς κατακόρυφη συνιστώσα).
- 8) Όλη η ροή του υπόγειου νερού είναι ακτινική προς τη γεώτρηση και αυτό σημαίνει ότι οι τιμές της αποθηκευτικότητας και της μεταβιβαστικότητας είναι ανεξάρτητες από τη διεύθυνση της ροής.
- 9) Η γεώτρηση είναι **τέλεια** ή πλήρης (complete ή fully penetrating borehole) υδρομαστευτικό έργο, δηλ. διατρύει όλο το υδροφόρο στρώμα μέχρι το αδιαπέρατο υπόβαθρο και έχει φίλτρα σε όλο το πάχος του (Σχ. 1.3).



Σχήμα 1.3: Τέλεια γεώτρηση που αντλεί έναν υπό πίεση υδροφορέα.

10) Η διάμετρος της γεώτρησης είναι πολύ μικρή σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα, που σημαίνει ότι η αποθήκευση νερού στη γεώτρηση είναι ασήμαντη.

Οι ανωτέρω παραδοχές είναι γενικές και κατά περίπτωση ισχύουν επιπρόσθετες παραδοχές, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Πολλές από αυτές, κατά κανόνα, δεν ισχύουν

όπως π.χ. η ομοιογένεια και η ισοτροπία των υδροφορέων. Στην περίπτωση που ο υδροφορέας είναι έντονα ανισότροπος και η γεώτρηση δεν είναι πλήρης, η απόκλιση μπορεί να είναι σημαντική. Άλλες προϋποθέσεις, όπως π.χ. η οριζοντιότητα δεν επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Για τη μελέτη της ροής σε αντλούμενες γεωτρήσεις και τον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων, διακρίνονται δύο είδη ροής: μόνιμη και μη μόνιμη ροή.

1.4.2 Μόνιμη ακτινική ροή ή κατάσταση ισορροπίας

Αν η άντληση διαρκέσει αρκετά, η στάθμη του υπόγειου νερού φθάνει σε κατάσταση ισορροπίας (*μόνιμη ροή*, steady-state flow), δηλ. δεν παρατηρείται περαιτέρω πτώση στάθμης με τον χρόνο. Στην κατάσταση αυτή, ο κώνος πτώσης στάθμης σταματά να επεκτείνεται γιατί έχει φθάσει στο όριο εμπλουτισμού.

Η οριζόντια απόσταση από την αντλούμενη γεώτρηση, πέραν από την οποία δεν γίνονται αισθητά τα αποτελέσματα της άντλησης, δηλ. δεν παρατηρείται πτώση στάθμης ονομάζεται *ακτίνα επίδρασης* ή *επιρροής* της γεώτρησης (radius of influence). Η ακτίνα επίδρασης είναι μια σημαντική παράμετρος κάθε γεώτρησης και στη συνέχεια θα γίνει ειδική αναφορά σε αυτήν.

Η υδραυλική κλίση του κώνου πτώσης στάθμης προκαλεί ροή με σταθερό ρυθμό από το όριο εμπλουτισμού στη γεώτρηση, δηλ. ο ρυθμός με τον οποίο το νερό αντλείται από τη γεώτρηση είναι ίσος με τον ρυθμό με τον οποίο ο υδροφορέας μεταφέρει νερό στη γεώτρηση. Οι συνθήκες αυτές αναφέρονται ως συνθήκες *μόνιμης ροής* ή *ισορροπίας* (steady-state conditions). Θεωρητικά, σε συνθήκες άντλησης, δεν αποκαθίσταται ποτέ μόνιμη ροή. Παρόλα αυτά, μετά από μεγάλο χρόνο δεχόμαστε συνθήκες μόνιμης ροής, γιατί τα στοιχεία της ροής μεταβάλλονται με πολύ βραδύ ρυθμό (κατάσταση αγκι-ισορροπίας).

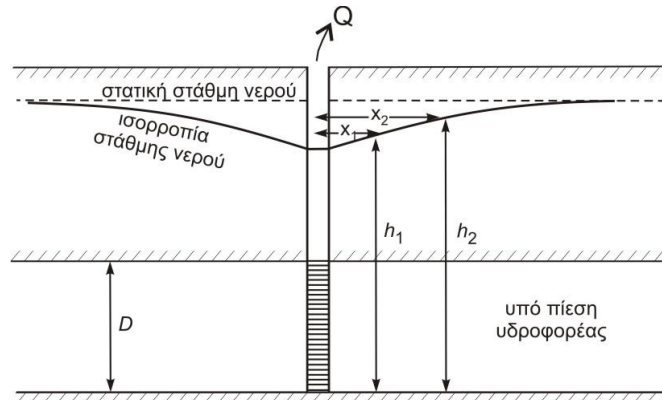
Υπό πίεση υδροφορείς

Στην περίπτωση μόνιμης ροής σε υπό πίεση υδροφορείς, εκτός από τις γενικές παραδοχές της παραγράφου 1.4.1, ισχύουν επιπλέον:

- η γεώτρηση αντλείται με σταθερό ρυθμό (σταθερή παροχή).

- η στάθμη του υπόγειου νερού δεν αλλάζει περαιτέρω με τον χρόνο άντλησης (κατάσταση ισορροπίας).

Στο Σχ. 1.4 φαίνεται μια τέλεια γεώτρηση που διατρύει έναν υπό πίεση υδροφόρα και αντλείται με σταθερή παροχή Q σε συνθήκες μόνιμης ροής.



Σχήμα 1.4: Μόνιμη ροή σε υπό πίεση υδροφόρα.

Ο *Dupuit* (1863) ήταν ο πρώτος που συνδύασε τον νόμο του Darcy με την εξίσωση της συνέχειας για να εξάγει μια εξίσωση σε μια αντλούμενη γεώτρηση με ακτινική ροή του νερού προς αυτή. Θεωρούμε ότι η γεώτρηση έχει κυλινδρικό σχήμα και η ροή του νερού προς αυτή λαμβάνει χώρα από την παράπλευρη επιφάνεια (A) του κυλίνδρου ($A=2\pi rD$), όπου r είναι η ακτίνα της γεώτρησης και D το πάχος του υδροφόρου στρώματος. Από το νόμο του Darcy (βλ. Κεφάλαιο 10 του Α' Τόμου), παραλείποντας το πρόσημο, ισχύει:

$$Q = k.i.A$$

$$Q = k \cdot \left(\frac{dh}{dr} \right) \cdot (2\pi rD)$$

Αν ολοκληρώσουμε την ανωτέρω εξίσωση με όρια: απόσταση $x_1=r$ (ακτίνα γεώτρησης) το φορτίο είναι h (πτώση στάθμης $\delta_1=H-h$) και σε απόσταση $x_2=R$ (ακτίνα επίδρασης) το φορτίο είναι H (πτώση στάθμης $\delta_2=0$), η εξίσωση του Dupuit παίρνει την εξής μορφή (οι πράξεις παραλείπονται):

$$T = \frac{Q}{2,73(H-h)} \log \frac{R}{r}$$

όπου: T =ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας

Q =η παροχή άντλησης

H = το φορτίο πριν την άντληση, πρακτικά η στάθμη του υπόγειου νερού

h =το φορτίο (στάθμη νερού) στη γεώτρηση μετά την αποκατάσταση της μόνιμης ροής. Η διαφορά $(H-h)=\delta$ είναι η πτώση στάθμης στη γεώτρηση.

R=η ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης

r=η ακτίνα της γεώτρησης

Η εξίσωση του Dupuit είναι δύσχρηστη γιατί απαιτεί τη γνώση της ακτίνας επίδρασης, κάτι που είναι δύσκολο στην πράξη. Προσεγγιστικά, οι τιμές της ακτίνας επίδρασης κυμαίνονται μεταξύ 100 και 500 m, ανάλογα με το είδος του υδροφορέα και τις συνθήκες άντλησης.

Ο **Thiem** (1906) τροποποίησε τους τύπους του Dupuit και τους κατέστησε εφαρμόσιμους στην πράξη. Θεωρώντας, όπως προηγουμένως, ότι η γεώτρηση έχει κυλινδρικό σχήμα και η ροή του νερού προς αυτήν λαμβάνει χώρα από την παράπλευρη επιφάνεια, από το νόμο του Darcy προκύπτει:

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

$$Q = k \cdot \left(\frac{dh}{dr} \right) \cdot (2\pi r D)$$

όπου: Q=η παροχή άντλησης

$\pi=3,14$

r=η ακτίνα της γεώτρησης

k=η υδραυλική αγωγιμότητα

D=το πάχος του υδροφόρου στρώματος

dh/dr=η υδραυλική κλίση (i)

Η ανωτέρω εξίσωση, λαμβάνοντας υπόψη ότι $T=k \cdot D$ και λύνοντας ως προς dh, γράφεται:

$$dh = \frac{Q}{2\pi T} \frac{dr}{r}$$

Αν έχουμε μετρήσεις στάθμης σε δύο γεωτρήσεις παρατήρησης (Σχ. 1.4), δηλ. στάθμη h_1 σε απόσταση x_1 από την αντλούμενη γεώτρηση και στάθμη h_2 σε απόσταση x_2 , μπορούμε να ολοκληρώσουμε τα δύο μέλη της ανωτέρω εξίσωσης με αυτές τις οριακές συνθήκες:

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \frac{Q}{2\pi T} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dr}{r} \Rightarrow h_2 - h_1 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{x_2}{x_1}$$

Μετατρέποντας τον νεπέριο λογάριθμο σε δεκαδικό ($\ln a = 2,3 \log a$) και λύνοντας ως προς τον συντελεστή μεταβιβαστικότητας T, ισχύει η κάτωθι εξίσωση:

$$T = \frac{Q}{2,73(h_2 - h_1)} \log \frac{x_2}{x_1}$$

Αν H είναι η αρχική στάθμη πριν την έναρξη της άντλησης, τότε $\delta_1=H-h_1$ και $\delta_2=H-h_2$ είναι οι αντίστοιχες πτώσεις στάθμης, οπότε $h_2-h_1=(H-\delta_2)-(H-\delta_1)=\delta_1-\delta_2$ και η εξίσωση γίνεται:

$$T = \frac{Q}{2,73(\delta_1 - \delta_2)} \log \frac{x_2}{x_1}$$

όπου: T είναι ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας ($L^2.T^{-1}$)

x_1, x_2 είναι οι αποστάσεις των δύο πιεζομέτρων ($x_2 > x_1$)

δ_1, δ_2 ($\delta_1 > \delta_2$) είναι οι πτώσεις στάθμης σε αποστάσεις x_1 και x_2

Q είναι η παροχή άντλησης της γεώτρησης

Η ανωτέρω εξίσωση είναι η εξίσωση για τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα σε συνθήκες μόνιμης ροής (τύπος του Thiem). Μπορεί δε, να εφαρμοσθεί και μεταξύ ενός πιεζομέτρου σε απόσταση x_2 και της αντλούμενης γεώτρησης ($x_1=r$, r =ακτίνα της γεώτρησης), αλλά στην περίπτωση αυτή εισάγεται κάποιο σφάλμα.

Ελεύθεροι υδροφορείς

Ο τύπος του **Dupuit** στα ελεύθερα υδροφόρα στρώματα έχει την εξής μορφή (η απόδειξη παραλείπεται):

$$k = \frac{Q \log \frac{R}{r}}{1,366(H^2 - h^2)}$$

όπου: k =ο συντελεστής υδροπερατότητας

Q =η παροχή άντλησης

H =το φορτίο σε απόσταση R ίση με την ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης ίσο με το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου στρώματος

h =το φορτίο σε απόσταση r ίση με την ακτίνα της γεώτρησης

Επειδή ο τύπος Dupuit είναι δύσχρηστος, ο Thiem παρήγαγε μια εξίσωση για συνθήκες μόνιμης ροής σε ελεύθερους υδροφορείς. Στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι γενικές παραδοχές και επιπλέον ότι η γεώτρηση αντλείται με σταθερή παροχή (Σχ. 1.5).

Η ακτινική ροή σε ελεύθερο υδροφορέα περιγράφεται από την εξίσωση:

$$Q = k \cdot \left(\frac{dh}{dr} \right) \cdot (2\pi rh)$$

όπου h είναι το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα που αλλάζει σε σχέση με την απόσταση, και τα υπόλοιπα σύμβολα καθορίστηκαν προηγούμενα.

Η εξίσωση ξαναγράφεται με τη μορφή:

$$h \cdot dh = \frac{Q}{2\pi k} \frac{dr}{r}$$

Αν έχουμε μετρήσεις στάθμης σε δύο γεωτρήσεις παρατήρησης, δηλ. στάθμη h_1 σε απόσταση x_1 από την αντλούμενη γεώτρηση και στάθμη h_2 σε απόσταση x_2 , μπορούμε να ολοκληρώσουμε τα δύο μέλη της ανωτέρω εξίσωσης με αυτές τις οριακές συνθήκες:

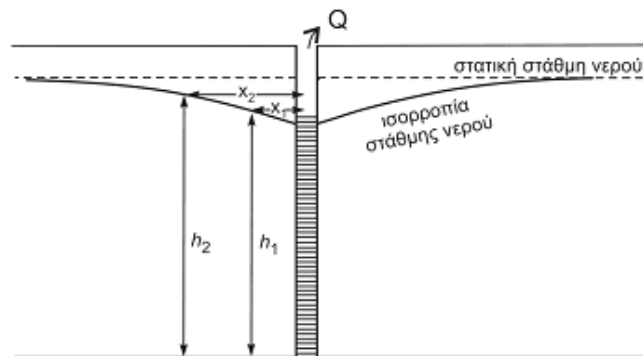
$$\int_{h_1}^{h_2} h dh = \frac{Q}{2\pi k} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dr}{r} \Rightarrow h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{x_2}{x_1}$$

Λύνοντας ως προς k υπολογίζεται ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας k από τον κάτωθι τύπο:

$$k = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln \frac{x_2}{x_1}$$

όπου: Q =η παροχή άντλησης

h_2, h_1 =τα φορτία σε αποστάσεις x_2, x_1 ($x_2 > x_1$), αντίστοιχα από την αντλούμενη γεώτρηση.



Σχήμα 1.5: Μόνιμη ροή σε ελεύθερο υδροφορέα που αντλείται με παροχή Q .

Αν H είναι η αρχική στάθμη πριν την έναρξη της άντλησης (ταυτίζεται με το αρχικό κορεσμένο πάχος D του υδροφορέα, δηλ. $H=D$), τότε η διαφορά $(h_2^2 - h_1^2)$ γράφεται:

$$h_2^2 - h_1^2 = (h_2 + h_1)(h_2 - h_1)$$

Επειδή $h_1=D-\delta_1$ και $h_2=D-\delta_2$ ισχύει (Σχ. 1.5):

$$(h_1+h_2)=(D-\delta_1)+(D-\delta_2)=2D-\delta_1-\delta_2 \text{ και } (h_1-h_2)=(D-\delta_1)-(D-\delta_2)=\delta_2-\delta_1$$

Με βάση τις ανωτέρω σχέσεις και μετατρέποντας τον νεπέριο λογάριθμο σε δεκαδικό, ο τύπος του Thiem στην περίπτωση των ελεύθερων υδροφορέων έχει την εξής μορφή:

$$k = \frac{Q \log \frac{x_2}{x_1}}{1,366(2D - \delta_1 - \delta_2)(\delta_1 - \delta_2)}$$

όπου δ_1, δ_2 οι πτώσεις στάθμης σε αποστάσεις x_1, x_2 αντίστοιχα.

Ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας (T) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T = k \frac{h_1 + h_2}{2}$$

Με τη χρήση λοιπόν του τύπου Thiem μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας k και τον συντελεστή μεταβιβαστικότητας T . Απαραίτητη προϋπόθεση η ύπαρξη δύο τουλάχιστον πιεζομέτρων. Τα πιεζόμετρα πρέπει να βρίσκονται σε μικρές σχετικά αποστάσεις για να είναι αισθητή η πτώση στάθμης και να μπορεί να μετρηθεί εύκολα. Οι μετρήσεις στάθμης στα πιεζόμετρα αυτά πρέπει να γίνονται ταυτόχρονα ή με παρεμβολή μικρού χρονικού διαστήματος. Όπως προαναφέρθηκε, ο τύπος Thiem μπορεί να εφαρμοσθεί και μεταξύ ενός πιεζομέτρου και της αντλούμενης γεώτρησης, αλλά στην περίπτωση αυτή υπάρχει κάποια απόκλιση από το πρότυπο Dupuit και εισάγονται σφάλματα στον υπολογισμό των τιμών των υδραυλικών παραμέτρων.

1.5 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις στη μόνιμη ροή

Συνοψίζοντας τη μελέτη που αφορά τη μόνιμη ροή σε αντλούμενες γεωτρήσεις, μπορεί να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις και να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μόνιμη ροή απαιτεί μεγάλο χρόνο άντλησης για να αποκατασταθούν συνθήκες ισορροπίας, δηλ. η στάθμη του υπόγειου νερού να παραμένει σταθερή με τον χρόνο. Θεωρητικά, σε συνθήκες άντλησης, δεν αποκαθίσταται ποτέ μόνιμη ροή. Μετά όμως από μεγάλο χρόνο άντλησης, τα στοιχεία της ροής μεταβάλλονται με πολύ αργό ρυθμό και θεωρούμε ότι αποκαθίστανται συνθήκες ισορροπίας.
- Απαιτούνται δύο τουλάχιστον πιεζόμετρα για τη μέτρηση της στάθμης. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις στάθμης στην ίδια την αντλούμενη γεώτρηση και ένα πιεζόμετρο. Αυτό όμως εισάγει σφάλματα, γιατί η πτώση στάθμης μέσα στην αντλούμενη γεώτρηση είναι μεγαλύτερη, λόγω της ύπαρξης των μη γραμμικών απωλειών φορτίου (βλ.

3^ο Κεφάλαιο). Όταν δεν υπάρχουν πιεζόμετρα και η μέτρηση της στάθμης γίνεται στη γεώτρηση άντλησης, συνιστάται η εφαρμογή μεθόδων μη μόνιμης ροής (Theis, Jacob) που αναφέρονται στη συνέχεια. Γενικά, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται μετρήσεις στάθμης από σημεία όπου η κλίση του κώνου πτώσης στάθμης είναι μεγαλύτερη από 15^ο.

- Από τις υδραυλικές παραμέτρους υπολογίζονται ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας (T) και η υδραυλική αγωγιμότητα (k) από τη σχέση $T=k \cdot D$ (D=το πάχος του υδροφόρου στρώματος) και δεν υπολογίζεται ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (S).

- Οι τύποι Dupuit και Thiem ισχύουν και στα ελεύθερα υδροφόρα στρώματα με την προϋπόθεση ότι οι πτώσεις στάθμης δεν είναι μεγάλες σε σχέση με το κορεσμένο πάχος D του υδροφόρου στρώματος (μικρότερες από 10% του πάχους).

Γενικά, στους ελεύθερους υδροφορείς, όσο πλησιάζουμε τη γεώτρηση άντλησης, τόσο αποκλίνουμε από το πρότυπο Dupuit και μάλιστα η απόκλιση είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η πτώση στάθμης.

- Η ακτίνα επίδρασης, δηλ. η απόσταση πέρα από την οποία το αποτέλεσμα της άντλησης δεν είναι αισθητό, σε συνθήκες μόνιμης ροής, παραμένει σταθερή.

- Η παροχή αυξάνεται με την αύξηση της ακτίνας της γεώτρησης, αλλά η σχέση αυτή δεν είναι γραμμική. Από τον τύπο του Dupuit προκύπτει ότι, η παροχή είναι αντιστρόφως ανάλογη του $\log(R/r)$. Αυτό συνεπάγεται ότι, ο διπλασιασμός της ακτίνας της γεώτρησης αυξάνει μόνο κατά 9-15% την παροχή της, με την προϋπόθεση ότι τα υπόλοιπα στοιχεία παραμένουν σταθερά και αγνοούνται οι μη γραμμικές απώλειες φορτίου.

- Για δοσμένη παροχή άντλησης, η πτώση στάθμης είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τον λογάριθμο της απόστασης ($\delta \propto \frac{1}{\log x}$).

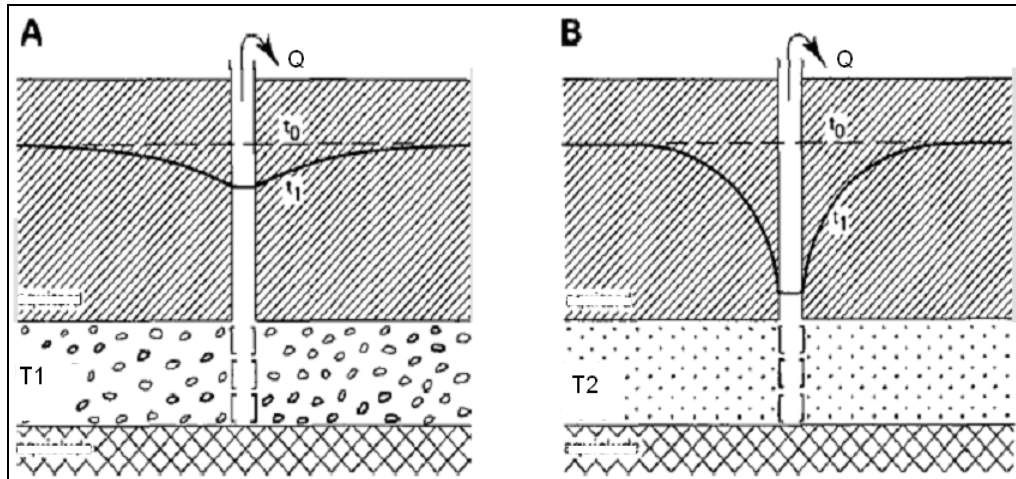
- Στους υπό πίεση υδροφορείς, από τους τύπους Dupuit και Thiem προκύπτει ότι η πτώση στάθμης σε κάθε σημείο του κώνου είναι ανάλογη με την παροχή άντλησης ($\delta \propto Q$).

Αυτό προκύπτει αν λύσουμε τον τύπο του Dupuit ως προς $\delta=(H-h)$, δηλ. $\delta = Q \frac{\log(R/r)}{2,73T}$,

απ' όπου φαίνεται η αναλογία πτώσης στάθμης σε σχέση με την παροχή. Από την ίδια σχέση προκύπτει ότι, για δοσμένη παροχή άντλησης, η πτώση στάθμης είναι αντιστρόφως

ανάλογη με τον συντελεστή μεταβιβαστικότητας ($\delta \propto \frac{1}{T}$). Στο Σχ. 1.6A όπου ο

υδροφορέας έχει μεγαλύτερη μεταβιβαστικότητα ($T_1 > T_2$), η πτώση στάθμης είναι μικρότερη για την ίδια παροχή άντλησης (Σχ. 1.6B).



Σχήμα 1.6: Σχέση πτώσης στάθμης με τη μεταβιβαστικότητα για υπό πίεση υδροφορέα (Kruseman & Ridder, 1990).

Κλείνοντας τέλος, να αναφερθεί ότι οι τύποι της μόνιμης ροής δεν χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στην Υδρογεωλογία και την Υπόγεια Υδραυλική, λόγω των μειονεκτημάτων που εμφανίζουν και που συνοψίζονται στα εξής:

- 1) μεγάλος χρόνος άντλησης που μεταφράζεται σε δαπάνη ενέργειας και μεγάλο κόστος
- 2) απαίτηση ύπαρξης δύο πιεζομέτρων
- 3) μη δυνατότητα υπολογισμού του συντελεστή αποθηκευτικότητας κ.λπ.

Υπέρβαση των μειονεκτημάτων αυτών γίνεται με την εφαρμογή μεθόδων σε κατάσταση μη ισορροπίας (μη μόνιμη ροή), όπως θα δούμε στο επόμενο Κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΗ ΜΟΝΙΜΕΣ ΡΟΕΣ-ΜΕΘΟΔΟΙ THEIS ΚΑΙ JACOB

2.1 Μη μόνιμη ροή ή κατάσταση μη ισορροπίας

Πολλές δοκιμές άντλησης δεν φθάνουν πάντοτε σε κατάσταση ισορροπίας, που σημαίνει ότι ο κώνος πτώσης στάθμης συνεχίζει να επεκτείνεται με τον χρόνο. Η ροή στις συνθήκες αυτές, της **μη ισορροπίας**, ονομάζεται **μη μόνιμη** ή **ασταθής ροή** (unsteady ή nonsteady ή transient flow ή nonequilibrium). Τα δεδομένα της πτώσης στάθμης από γεώτρηση που αντλείται σε κατάσταση μη ισορροπίας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων T, S, k, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Όλες γενικά οι ροές προς τα υδρομαστευτικά έργα είναι μη μόνιμες ροές.

2.1.1 Μη μόνιμη ακτινική ροή σε υπό πίεση υδροφορέα- Μέθοδος Theis

Ο Theis (1935) ήταν ο πρώτος που μελέτησε μαθηματικά το πρόβλημα της μη μόνιμης ροής σε υπό πίεση υδροφορέα. Εκτός από τις γενικές παραδοχές της παραγράφου 1.4.1, ο Theis έκανε επιπλέον και τις εξής:

- 1) Το υδροφόρο στρώμα είναι υπό πίεση, δηλ. περιορίζεται στην οροφή και τη βάση του από αδιαπέρατα στρώματα.
- 2) Δεν γίνεται τροφοδοσία του υδροφορέα κατά τη διάρκεια της άντλησης.
- 3) Η γεώτρηση αντλείται με σταθερή παροχή.
- 4) Ο υδροφορέας είναι συμπιεστός και το νερό απελευθερώνεται ακαριαία από αυτόν με την πτώση του υδραυλικού φορτίου.

Το σύνολο των παραδοχών που πρέπει να ικανοποιούνται αναφέρεται ως **πρότυπο Theis**. Με βάση τις ανωτέρω παραδοχές, ο Theis θεώρησε ότι η ροή του νερού προς τη γεώτρηση, είναι ανάλογη της ροής θερμότητας. Η διαφορική εξίσωση της ακτινικής δισδιάστατης ροής, σε πολικές συντεταγμένες έχει τη μορφή:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

όπου: h=φορτίο

x=απόσταση από την αντλούμενη γεώτρηση

t =χρόνος από την αρχή της άντλησης

S =ο συντελεστής αποθηκευτικότητας

T =ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας

Ο Theis έδωσε μια λύση της διαφορικής εξίσωσης που έχει την κάτωθι μορφή:

$$\delta = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad \text{με } u = \frac{Sx^2}{4Tt}$$

όπου: δ =η πτώση στάθμης και Q =η σταθερή παροχή άντλησης.

Το εκθετικό ολοκλήρωμα είναι συνάρτηση του κάτω ορίου u και μπορεί να αναπτυχθεί σε μια συγκλίνουσα σειρά άπειρων όρων:

$$\int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = -0.57722 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots$$

Το ολοκλήρωμα συμβολίζεται $W(u)$ (αναφέρεται ως συνάρτηση γεώτρησης ή χαρακτηριστική συνάρτηση, well function) και η ανωτέρω σχέση γράφεται:

$$\delta = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Για τον ακριβέστερο υπολογισμό του $W(u)$, υπάρχουν κατάλληλοι Πίνακες.

Για τον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων χρησιμοποιούνται οι κάτωθι τύποι:

$$T = \frac{Q}{4\pi\delta} W(u) \quad \text{και} \quad S = \frac{4uTt}{x^2}$$

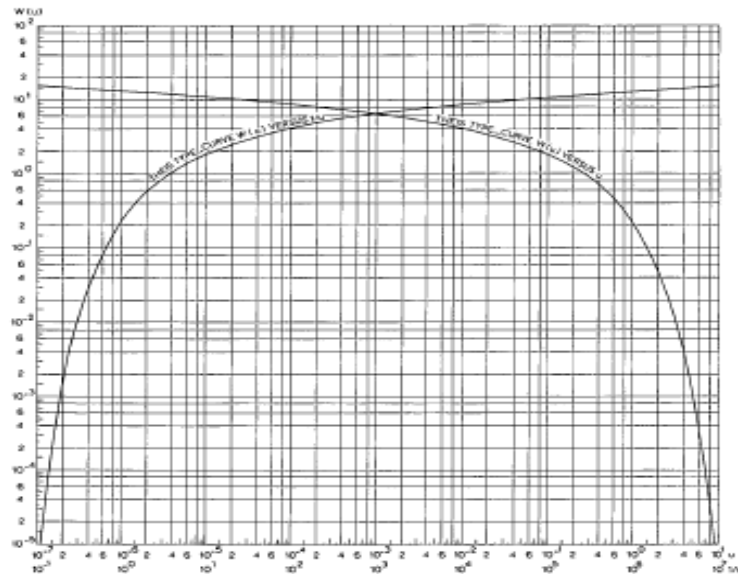
Ο Theis ανέπτυξε και ένα γραφικό τρόπο για την επίλυση της εξίσωσής του. Για τη γραφική εφαρμογή της μεθόδου Theis, ακολουθούνται τα κάτωθι βήματα:

Βήμα 1: Κατασκευή των **πρότυπων καμπυλών**: κανονικής $W(u)=f(u)$ και **ανεστραμμένης** $W(u)=f(1/u)$ σε διλογαριθμικό χαρτί, με βάση τις τιμές ειδικών Πινάκων. Οι καμπύλες αυτές ονομάζονται **καμπύλες Theis** ή **καμπύλη μη ισορροπίας** (Theis type curve ή nonequilibrium type curve). Η καμπύλη $W(u)=f(1/u)$ έχει το σχήμα του κώνου πτώσης στάθμης κοντά στην αντλούμενη γεώτρηση.

Βήμα 2: Κατασκευή των **πειραματικών καμπυλών** $\log\delta=f(\log t)$, $\log\delta=f(\log 1/t)$, $\log\delta=f(\log t/x^2)$, $\log\delta=f(\log x^2/t)$. Οι πειραματικές καμπύλες κατασκευάζονται με βάση τις μετρήσεις του πεδίου, δηλ. μετρήσεις της στάθμης σε συνάρτηση με τον χρόνο άντλησης. Συνήθως η μονάδα μέτρησης του χρόνου είναι τα λεπτά της ώρας (min), γιατί είναι πιο πρακτικό στο πεδίο η μέτρηση του χρόνου σε λεπτά.

Βήμα 3: Σύμπτωση της πειραματικής και της πρότυπης καμπύλης μετακινώντας τους άξονες των δύο καμπυλών παράλληλα (όταν ο χρόνος t είναι στον **αριθμητή**

χρησιμοποιούμε την πρότυπη *ανεστραμμένη* καμπύλη και όταν ο χρόνος t είναι στον *παρονομαστή* την πρότυπη *κανονική*). Για να γίνει η σύμπτωση, πρέπει οι πειραματικές καμπύλες να γίνουν σε διαφανές χαρτί (Σχ. 2.2).

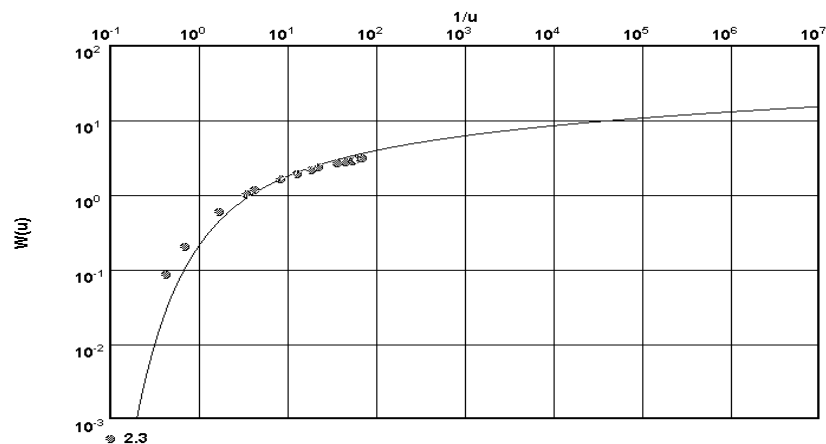


Σχήμα 2.1: Πρότυπες καμπύλες Theis (κανονική και ανεστραμμένη).

Βήμα 4: Παίρνουμε ένα σημείο αυθαίρετα στην περιοχή της σύμπτωσης και προβάλλοντας στους άξονες βρίσκουμε τις συντεταγμένες του στα δύο συστήματα, από όπου προκύπτουν 4 τιμές ($W(u)$, u ή $1/u$, δ , t ή $1/t$), ανάλογα αν χρησιμοποιήθηκε η πρότυπη κανονική ή η ανεστραμμένη καμπύλη.

Βήμα 5: Για τον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων χρησιμοποιούμε τους κάτωθι τύπους:

$$T = \frac{Q}{4\pi\delta} W(u) \quad \text{και} \quad S = \frac{4uTt}{x^2}$$



Σχήμα 2.2: Εφαρμογή της μεθόδου Theis.

Αν υπάρχουν πολλά πιεζόμετρα, κατασκευάζονται χωριστά διαγράμματα και υπολογίζονται οι υδραυλικές παράμετροι για κάθε μία περίπτωση. Αν τα πιεζόμετρα βρίσκονται σε διάφορες διευθύνσεις, εξάγονται συμπεράσματα για την ισοτροπία και την ομοιογένεια του υδροφορέα, ως προς τις υδραυλικές του ιδιότητες. Να σημειωθεί ότι, στην αγορά κυκλοφορούν εξειδικευμένα προγράμματα (AquiferTest, Pibe, Aqtesolv, Hydrotec, Aquifer Win32, WTAQ) που κατασκευάζουν τις καμπύλες (πρότυπες και πειραματικές), επεξεργάζονται τα αντλητικά δεδομένα και υπολογίζουν πολύ εύκολα και σύντομα τις υδραυλικές παραμέτρους.

2.1.2 Μη μόνιμη ροή σε υπό πίεση υδροφορέα- Μέθοδος Cooper-Jacob

Οι Cooper-Jacob (1964) διαπίστωσαν ότι για μικρές τιμές της συνάρτησης $u < 0,01$ (αυτό προϋποθέτει μεγάλο χρόνο άντλησης ή μικρή απόσταση του πιεζομέτρου από την αντλούμενη γεώτρηση), η εξίσωση Theis μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$\delta = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0,5772 - \ln \frac{x^2 S}{4Tt} \right) \quad \text{ή} \quad \delta = \frac{0,183Q}{T} \log \left(\frac{2,25Tt}{x^2 S} \right)$$

Ουσιαστικά, δηλ. παραλείπονται οι άπειροι όροι της σειράς, εκτός των δύο πρώτων. Η απόκλιση για τις διάφορες τιμές του u , φαίνεται στον Πίνακα 2.1 και παρατηρούμε ότι είναι μικρή.

Πίνακας 2.1: Απόκλιση της μεθόδου Jacob για τις διάφορες τιμές του u .

Σφάλμα μικρότερο από:	1%	2%	5%	10%
για u μικρότερο από:	0,03	0,05	0,10	0,15

Σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα ($\delta - \log t$, η πτώση στάθμης δ στον άξονα y και ο χρόνος t στον λογαριθμικό άξονα x), η ανωτέρω εξίσωση έχει μορφή ευθείας γραμμής με την προϋπόθεση ότι ισχύει ο περιορισμός του u . Αυτό ισχύει, όπως προαναφέρθηκε, για μεγάλες τιμές του χρόνου, με δεδομένο ότι η απόσταση του πιεζομέτρου είναι σταθερή. Για τον λόγο αυτό, δεν λαμβάνουμε υπόψη τις αρχικές μετρήσεις της στάθμης και χαράσσουμε την ευθεία με τις υπόλοιπες τιμές.

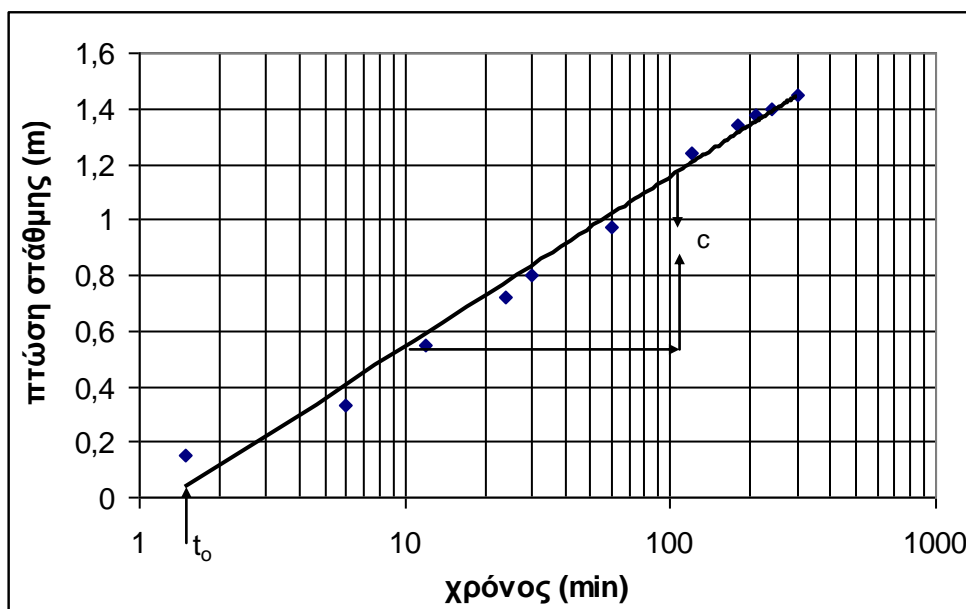
Στην περίπτωση που έχουμε πολλά πιεζόμετρα, στο κοντινότερο από αυτά θα ικανοποιηθεί το κριτήριο του Jacob ($u < 0,01$) πιο γρήγορα σε σχέση με τα πιο απομακρυσμένα. Τα διαγράμματα, όσον αφορά τον άξονα y (αριθμητικός), όπου

καταγράφεται η πτώση στάθμης μπορεί να γίνουν είτε με αύξουσα διάταξη τιμών στον θετικό ημιάξονα (Σχ.2.3), είτε με αντίστροφη διάταξη των τιμών. Για καλύτερη εποπτεία, επειδή η πτώση στάθμης γίνεται κατά τον αρνητικό ημιάξονα προτιμούμε τη δεύτερη μορφή.

Υπάρχουν τρεις δυνατές επιλύσεις Jacob, που παρουσιάζονται στον κάτωθι Πίν. 2.2. Τα διαγράμματα παριστάνουν ευθείες και τα σημεία t_0 , $(t/x^2)_0$ και R έχουν συντεταγμένες: $(t_0, 0)$, $((t/x^2)_0, 0)$ και $(R, 0)$, αντίστοιχα. Το $\Delta\delta=c$ αντιστοιχεί στην πτώση στάθμης ανά λογαριθμικό κύκλο (Σχ. 2.3) και $x=R$ αντιστοιχεί στην ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης.

Πίνακας 2.2: Μέθοδοι επίλυσης Jacob.

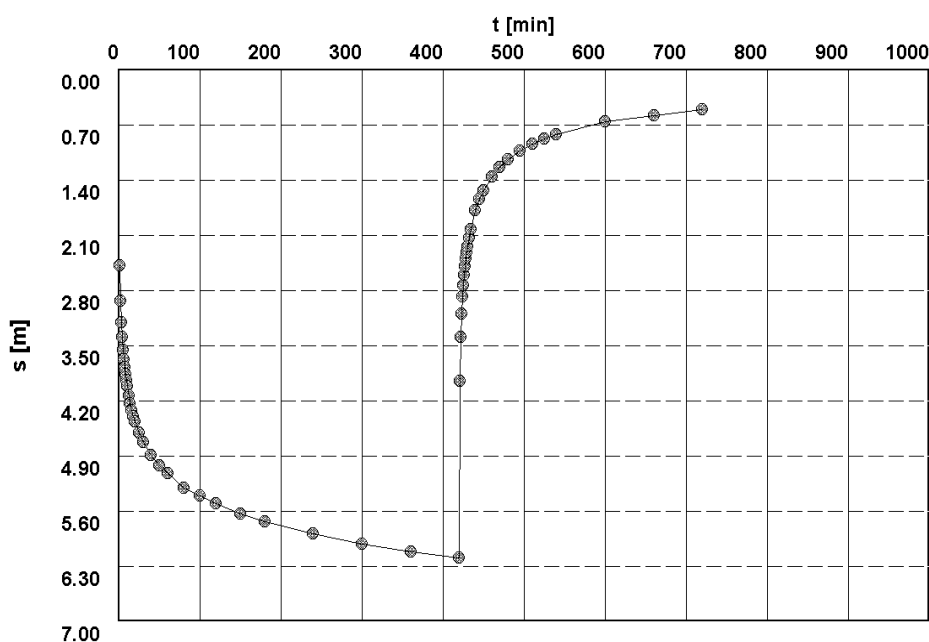
α/α	Διάγραμμα	Συντελεστής T	Συντελεστής S	
1	$\delta\text{-log } t$	$T = \frac{0,183Q}{\Delta\delta}$	$S = \frac{2,25Tt_0}{x^2}$	t_0 είναι η τομή με τον άξονα $\delta=0$
2	$\delta\text{-log}(t/x^2)$	$T = \frac{0,183Q}{\Delta\delta}$	$S = 2,25T\left(\frac{t}{x^2}\right)_0$	$(t/x^2)_0$ είναι η τομή με τον άξονα $\delta=0$
3	$\delta\text{-log } x$	$T = \frac{0,366Q}{\Delta\delta}$	$S = \frac{2,25Tt}{R^2}$	R είναι η τομή με τον άξονα $\delta=0$



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα Jacob πτώσης στάθμης-log χρόνου.

2.2 Μέθοδος επαναφοράς της στάθμης

Ο υπολογισμός των υδραυλικών παραμέτρων μπορεί να γίνει από την ανάλυση του υδρογραφήματος της *επαναφοράς ή επανόδου της στάθμης* (recovery test), μετά τη διακοπή της άντλησης στην αντλούμενη γεώτρηση. Μετά τη διακοπή της άντλησης, η στάθμη του υπόγειου νερού σε έναν υπό πίεση υδροφορέα, αρχίζει να ανέρχεται τείνοντας προοδευτικά να επανέλθει στην αρχική θέση της, στο επίπεδο δηλ. που ήταν πριν την έναρξη της άντλησης (Σχ. 2.4).



Σχήμα 2.4: Πτώση στάθμης και επαναφορά της, μετά τη διακοπή της άντλησης.

Η διαφορά της αρχικής στάθμης (προ της αντλήσεως) και της μετρούμενης σε μια χρονική στιγμή μετά τη διακοπή της άντλησης ονομάζεται *υπολειπόμενη πτώση στάθμης* (residual drawdown). Η μεταβολή της υπολειπόμενης πτώσης στάθμης με τον χρόνο παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα για την υδραυλική συμπεριφορά ενός υδροφορέα.

Η θεωρία για τη μέθοδο της επαναφοράς της στάθμης βασίζεται στις μελέτες των Theis και Cooper-Jacob. Η βασική θεώρηση είναι η εξής: Έστω μια γεώτρηση αντλείται με μια σταθερή παροχή για κάποιο συγκεκριμένο χρόνο. Μετά τη διακοπή της άντλησης η στάθμη μεταβάλλεται με τέτοιο ρυθμό, υποθέτοντας ότι η γεώτρηση συνεχίζει να αντλείται, ενώ από τη στιγμή της διακοπής της άντλησης αρχίζει να λειτουργεί μια υποθετική γεώτρηση εμπλουτισμού, δηλ. εισάγει νερό στη γεώτρηση με την ίδια παροχή.

Η εξίσωση που περιγράφει τη μορφή της υπολειπόμενης πτώσης στάθμης προκύπτει από την εφαρμογή της *αρχής της επαλληλίας* ή *αλληλεπίδρασης ροών* (superposition principle). Αυτό σημαίνει ότι μία φανταστική γεώτρηση εμπλουτισμού με την ίδια παροχή τοποθετείται στην ίδια θέση με τη γεώτρηση άντλησης. Η αρχή της επαλληλίας συνοψίζεται στο ότι, όταν έχουμε δύο διαφορετικές ροές, το τελικό αποτέλεσμα είναι η συνισταμένη αυτών.

Με βάση την ανωτέρω θεώρηση και χρησιμοποιώντας την εξίσωση Theis ισχύει:

$$\delta' = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u')]]$$

$$\text{όπου: } u = \frac{x^2 S}{4Tt} \quad \text{και} \quad u' = \frac{x^2 S'}{4Tt'}$$

Αν ο χρόνος t' είναι μεγάλος και θεωρώντας $S=S'$, παραλείποντας τις πράξεις, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για την υπολειπόμενη πτώση στάθμης:

$$\delta' = \frac{0,183Q}{T} \log\left(\frac{t}{t'}\right)$$

όπου: δ' =η υπολειπόμενη πτώση στάθμης, δηλ. η διαφορά της αρχικής στάθμης (προ της άντλησεως) και της μετρούμενης σε μια χρονική στιγμή μετά τη διακοπή της άντλησης.

Q =η παροχή άντλησης

t =ο χρόνος από την έναρξη της άντλησης ($t=t_{\text{άντλησης}} + t'$)

t' =ο χρόνος από τη διακοπή της άντλησης.

Για να γίνει $\delta'=0$, δηλ. να επανέλθει πλήρως η στάθμη στην αρχική της θέση, από την ανωτέρω εξίσωση προκύπτει: $\log(t/t')=0$, δηλ. $(t/t')=1$ και $t=t'$. Αυτό δεν συμβαίνει γιατί ο χρόνος $t > t'$. Άρα, θεωρητικά απαιτείται άπειρος, δηλ. πολύ μεγάλος χρόνος για την επαναφορά της στάθμης στην αρχική της θέση, εκτός αν γίνει εμπλουτισμός.

Η μέθοδος επαναφοράς της στάθμης είναι αναπόσπαστο τμήμα της δοκιμαστικής άντλησης. Είναι πιο οικονομική γιατί δεν γίνεται άντληση και πολλές φορές πιο χρήσιμη, ειδικά σε περιπτώσεις που έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις της παροχής κατά την άντληση. Η εφαρμογή της γίνεται ακολουθώντας τα εξής βήματα:

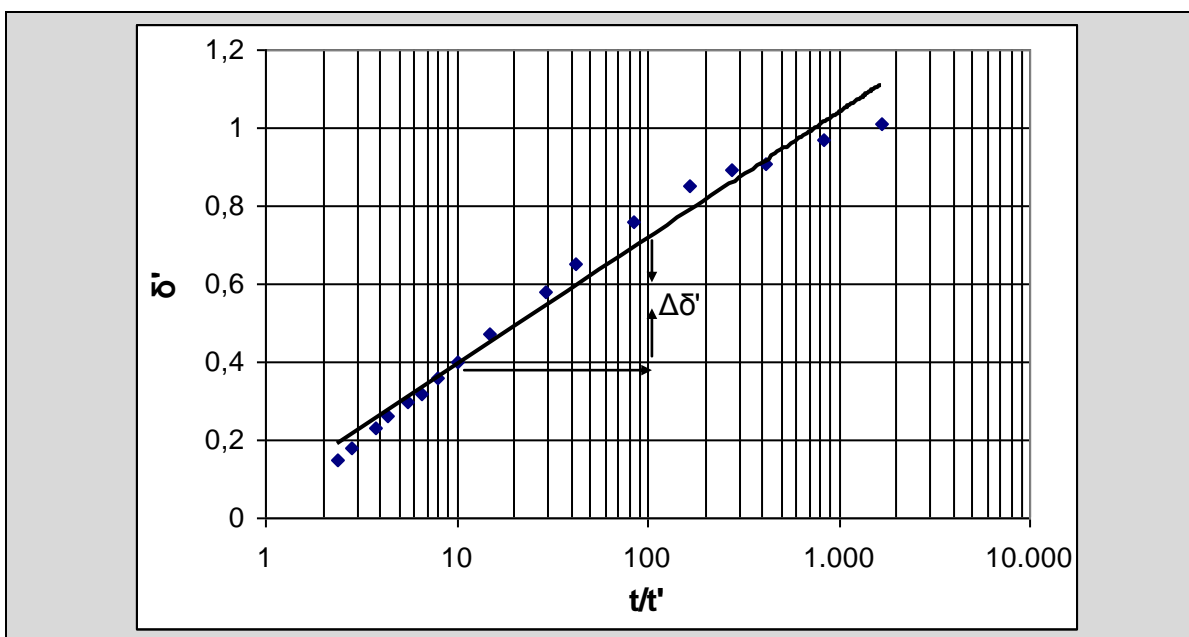
Βήμα 1: Κατασκευάζεται το διάγραμμα $\delta' = \log(t/t')$. Το διάγραμμα αυτό παριστάνει ευθεία (Σχ. 2.5), που θεωρητικά περνά από το σημείο (1, 0), αν και στην πράξη παρατηρούνται αποκλίσεις για διάφορους λόγους.

Βήμα 2: Υπολογίζουμε η κλίση της ευθείας του διαγράμματος, που είναι ουσιαστικά, η μεταβολή της υπολειπόμενης πτώσης στάθμης ($\Delta\delta'$) σε ένα λογαριθμικό κύκλο.

Βήμα 3: Από την παρακάτω σχέση υπολογίζεται ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας (T):

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta\delta'}$$

Οι αρχικές μετρήσεις, δηλ οι μεγάλες τιμές του λόγου (t/t'), δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, γιατί δεν ισχύει το πρότυπο Jacob. Να σημειωθεί ότι με τη μέθοδο επαναφοράς της στάθμης δεν μπορεί να υπολογισθεί ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (S).



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα πτώση στάθμης – $\log(t/t')$.

2.3 Ακτίνα επίδρασης

Η **ακτίνα επίδρασης** ή **επιρροής** (radius of influence) είναι η απόσταση εκείνη από τη γεώτρηση, πέραν της οποίας δεν γίνονται αισθητά τα αποτελέσματα της άντλησης, δηλ. η πτώση στάθμης είναι μηδέν.

Όπως έχει προαναφερθεί, σε κατάσταση μόνιμης ροής, η ακτίνα επίδρασης παραμένει σταθερή. Υπολογίζεται γραφικά από το διάγραμμα πτώσης στάθμης-απόστασης και υπολογιστικά από τον τύπο του Dupuit, λύνοντας ως προς $\ln R$.

Σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, η ακτίνα επίδρασης μεταβάλλεται με τον χρόνο. Από την εξίσωση του Jacob έχουμε:

$$\delta = \frac{0,183Q}{T} \log\left(\frac{2,25Tt}{x^2 S}\right)$$

Αν θέσουμε $\delta=0$, αυτό συνεπάγεται $x=R$ (R =η ακτίνα επίδρασης), γιατί από τον ορισμό, η ακτίνα επίδρασης είναι η απόσταση πέραν της οποίας η πτώση στάθμης μηδενίζεται.

Επειδή ο παράγοντας $(0,183Q/T)$ δεν μπορεί να είναι μηδέν, συνάγεται ότι:

$$\log\left(\frac{2,25Tt}{R^2S}\right) = 0$$

$$\log\left(\frac{2,25Tt}{R^2S}\right) = \log 1$$

$$\frac{2,25 Tt}{R^2 S} = 1 \rightarrow R = 1,5 \sqrt{\frac{Tt}{S}}$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι η ακτίνα επίδρασης είναι συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (αυξάνει με την πάροδο του χρόνου) και ανεξάρτητη της παροχής άντλησης. Το πηλίκο T/S ονομάζεται **διαχρητικότητα** ή **μεταδοτικότητα**. Στους υπό πίεση υδροφορείς, επειδή ο συντελεστής είναι S μικρός, η ακτίνα επίδρασης αυξάνεται πολύ πιο γρήγορα από ότι στους ελεύθερους υδροφορείς, στους οποίους απαιτούνται αρκετές ημέρες άντλησης για να επεκταθεί σε απόσταση λίγων εκατοντάδων μέτρων.

Παραγωγίζοντας τη σχέση ως προς τον χρόνο, έχουμε:

$$R' = \frac{dR}{dt} = 1,5 \sqrt{\frac{T}{S}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{t}}$$

Ο ρυθμός μεταβολής (R') της ακτίνας επίδρασης είναι αντιστρόφως ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, που υποδηλώνει ότι ο ρυθμός αύξησης της ακτίνας επίδρασης μειώνεται συνεχώς με το πέρασμα του χρόνου.

Η ακτίνα επίδρασης σε μη μόνιμες συνθήκες, υπολογίζεται:

1) Γραφικά από το διάγραμμα Jacob $\delta=f(\log x)$

Κατασκευάζεται το διάγραμμα (Σχ. 2.6) και το σημείο $(x, \delta)=(R, 0)$ είναι η ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης, όπως αναφέρθηκε στην 3^η μέθοδο Jacob. Για τον υπολογισμό απαιτούνται τουλάχιστον 2 πιεζόμετρα με ταυτόχρονη μέτρηση της στάθμης.

2) Υπολογιστικά από τη σχέση:

$$R = 1,5 \sqrt{\frac{Tt}{S}}$$

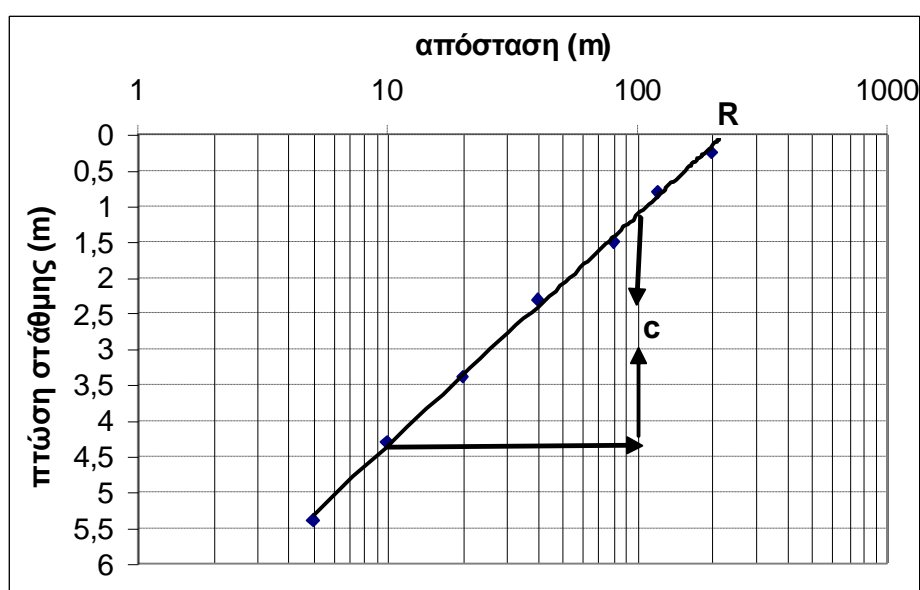
όπου: T =μεταβιβαστικότητα, S =αποθηκευτικότητα και t =χρόνος.

Η ανωτέρω σχέση υπολογίζει την ακτίνα επίδρασης για κάθε χρονική στιγμή με κάποιο σφάλμα, γιατί στο όριο της ροής δεν ισχύει το πρότυπο Jacob. Εκτός από τις ανωτέρω

μεθόδους, υπάρχουν και διάφοροι εμπειρικοί τύποι που υπολογίζουν την ακτίνα επίδρασης, χωρίς ευρεία αποδοχή. Η πλέον αξιόπιστη μέθοδος είναι η γραφική.

Στους ελεύθερους υδροφορείς η ακτίνα επίδρασης κυμαίνεται μεταξύ 100-200 m (σε υδροφορείς λεπτο- και μεσόκοκκων άμμων), 300-500 m (χονδρόκοκκοι άμμοι και χάλικες) και μεταξύ 500-1000 m (σε υδροφορείς με δευτερογενές πορώδες).

Στους υπό πίεση υδροφορείς η ακτίνα επίδρασης κυμαίνεται μεταξύ 250-500 m (σε υδροφορείς μεσόκοκκων άμμων), 750-1500 m (χονδρόκοκκοι άμμοι και χάλικες) και μεταξύ 1000-1500 m (σε υδροφορείς με δευτερογενές πορώδες).



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα πτώση στάθμης – $\log x$ και υπολογισμός της ακτίνας επίδρασης.

Η ακτίνα επίδρασης δεν σχετίζεται με τα αποθέματα του υδροφορέα, αλλά σχετίζεται με την επέκταση του κώνου κατάπτωσης, τη ζώνη ανάκτησης και τις ζώνες προστασίας των υδροληπτικών έργων (βλ. Κεφάλαιο 7, Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος, Βουδούρης, 2009).

2.4 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις στη μη μόνιμη ροή

Συνοψίζοντας τη μελέτη που αφορά τη **μη μόνιμη ροή** σε αντλούμενες γεωτρήσεις, μπορεί να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Η μη μόνιμη ροή δεν απαιτεί μεγάλο χρόνο άντλησης, σε αντίθεση με τη μόνιμη ροή και έτσι είναι πιο οικονομική. Επιπλέον, άλλα πλεονεκτήματα είναι: η δυνατότητα υπολογισμού και των δύο σημαντικών παραμέτρων T, S (στη μόνιμη ροή δεν ήταν

δυνατός ο υπολογισμός του S) με τη χρήση ενός μόνο πιεζομέτρου (στη μόνιμη ροή απαιτούνταν δύο πιεζόμετρα).

- Η εφαρμογή των μεθόδων απαιτεί την ύπαρξη ενός τουλάχιστον πιεζομέτρου. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει, οι μετρήσεις στάθμης μπορεί να γίνουν στην ίδια τη γεώτρηση, αλλά αυτό εισάγει σφάλματα, λόγω τυρβώδους ροής και πρόσθετων απωλειών φορτίου μέσα στη γεώτρηση. Στην περίπτωση της 3^{ns} μεθόδου Jacob (διάγραμμα $\delta\text{-log}x$) απαιτούνται τουλάχιστον τρία (3) πιεζόμετρα. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί και με δύο πιεζόμετρα, αλλά στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να ελεγχθεί η αξιοπιστία της ευθείας, με δεδομένο ότι από δύο σημεία περνάει πάντα μια ευθεία με συντελεστή συσχέτισης 100%.

- Οι μέθοδοι (Theis και Jacob) που εφαρμόζονται στη μη μόνιμη ροή για τον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων είναι γραφικές και ως εκ τούτου εισάγονται σφάλματα που σχετίζονται με την ακρίβεια κατασκευής των διαγραμμάτων (περίπτωση μεθόδων Jacob) και τη σύμπτωση των καμπυλών (περίπτωση Theis).

- Η μέθοδος Jacob εφαρμόζεται με την παραδοχή ότι: 1) ισχύει το πρότυπο Theis και 2) $u < 0,01$. Η δεύτερη παραδοχή ικανοποιείται όταν το πιεζόμετρο είναι σε μικρή απόσταση ή και ο χρόνος άντλησης σχετικά μεγάλος. Ο έλεγχος της δεύτερης παραδοχής πρέπει να γίνεται υποχρεωτικά γιατί είναι βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου Jacob.

- Κατά κανόνα οι αρχικές μετρήσεις δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, αλλά ούτε και οι τελευταίες μετρήσεις πριν τη σταθεροποίηση της στάθμης γιατί η ροή θεωρείται μόνιμη και δεν ισχύουν οι εξισώσεις Theis και Cooper-Jacob. Το τμήμα του διαγράμματος $\log\delta=f(\log t)$ που αντιστοιχεί στις τελευταίες χρονικά μετρήσεις αντικατοπτρίζει μια κατάσταση ψευδομόνιμης κατάστασης ή αγκι-ισορροπίας. Επίσης το διάγραμμα στην περίπτωση αυτήν επηρεάζεται από τα υδρογεωλογικά όρια (π.χ. υδρορεύματα, στεγανά όρια κ.λπ.).

Σύμφωνα με τον Butler (1990) σε ανομοιομορφους υδροφορείς, όπως κατά κανόνα συμβαίνει στη φύση, οι δύο μέθοδοι μπορεί να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα. Η μέθοδος Theis επηρεάζεται σημαντικά από τις υδραυλικές ιδιότητες στη γειτονιά της αντλούμενης γεώτρησης, ενώ η μέθοδος Jacob δίνει έμφαση στις υδραυλικές ιδιότητες κοντά στην άκρη του κώνου πτώσης στάθμης, που είναι μακριά από την αντλούμενη γεώτρηση. Η διαφορά των αποτελεσμάτων ανάμεσα στις δύο μεθόδους είναι και μια ένδειξη του βαθμού ανομοιομορφίας του υδροφορέα και της απόστασης του πιεζομέτρου από την αντλούμενη γεώτρηση. Για μεγαλύτερες αποστάσεις του πιεζομέτρου από την

αντλούμενη γεώτρηση αντιστοιχούν μικρότερες διαφορές στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για συγκεκριμένο βαθμό ανομοιομορφίας.

Έτσι αν θέλουμε να κάνουμε μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της πτώσης στάθμης σε μια αντλούμενη γεώτρηση, η πιο κατάλληλη μέθοδος είναι αυτή του Theis, γιατί αντανακλά καλύτερα τις υδραυλικές συνθήκες κοντά στη γεώτρηση. Αν θέλουμε να προβλέψουμε την απόδοση του υδροφορέα (aquifer yield) χρησιμοποιούμε τη μέθοδο Jacob, γιατί ελέγχει καλύτερα τις ιδιότητες του υδροφορέα σε μεγάλη απόσταση από την αντλούμενη γεώτρηση.

- Η παροχή άντλησης πρέπει να παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Αλλαγές στην παροχή επηρεάζουν άμεσα τη στάθμη του υπόγειου νερού στη γεώτρηση.

- Η μέθοδος Jacob μπορεί να εφαρμοσθεί ξεχωριστά για κάθε ένα πιεζόμετρο, στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα του ενός. Οι τιμές των υδραυλικών παραμέτρων που θα υπολογισθούν πρέπει να είναι παραπλήσιες, τουλάχιστον ως προς την τάξη μεγέθους. Η μέση τιμή αυτών θεωρείται η αντιπροσωπευτική τιμή του υδροφορέα για το συγκεκριμένο σημείο που βρίσκεται η γεώτρηση άντλησης.

- Η εξίσωση του Jacob ισχύει για τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα. Εφαρμόζεται όμως και για τα ελεύθερα υδροφόρα στρώματα με την προϋπόθεση ότι η πτώση στάθμης είναι μικρή σε σχέση με το πάχος του υδροφόρου στρώματος (<5%). Σε αντίθετη περίπτωση, δηλ. όταν οι πτώσεις στάθμης είναι μεγάλες εισάγεται η **διορθωμένη πτώση στάθμης**:

$\delta' = \delta - (\delta^2 / 2D)$, όπου D είναι το πάχος του υδροφόρου στρώματος.

- Η μέθοδος επαναφοράς της στιγμής είναι πιο οικονομική και η εφαρμογή της γίνεται και χωρίς πιεζόμετρο μετρώντας τη στάθμη στην ίδια τη γεώτρηση. Η μέθοδος δίνει ακριβή αποτελέσματα στους υπό πίεση υδροφορείς, αλλά υψηλότερες τιμές του συντελεστή μεταβιβαστικότητας (T) στους ελεύθερους υδροφορείς. Με τη μέθοδο αυτήν δεν υπολογίζεται ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (S).

- Η ακτίνα επίδρασης στη μη μόνιμη ροή μεταβάλλεται με τον χρόνο και μάλιστα αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό αύξησης, ενώ στη μόνιμη ροή παραμένει σταθερή. Στους υπό πίεση υδροφορείς επεκτείνεται πιο γρήγορα, σε σχέση με τους ελεύθερους υδροφορείς.

- Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις ισχύει ότι η ακτίνα των γεωτρήσεων είναι μικρή και κυμαίνεται μεταξύ 0,05 m και 0,25 m. Αν η ακτίνα είναι μεγάλη και αυτό συμβαίνει στα πηγάδια που γενικά κυμαίνεται μεταξύ 0,5 m και 2,5 m, τότε υπάρχουν ειδικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη την αποθήκευση νερού στο πηγάδι (Papadopoulos, 1967).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΤΛΟΥΜΕΝΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

3.1 Σχέση πτώσης στάθμης-παροχής

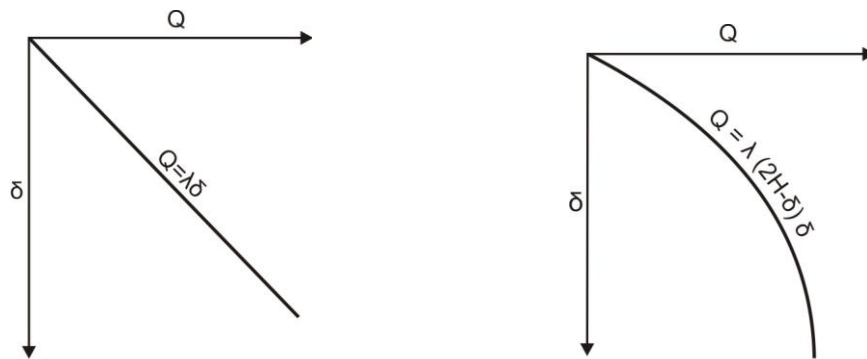
Σε κατάσταση ισορροπίας (μόνιμη ροή), στους *υπό πίεση υδροφορείς* υπάρχει γραμμική αναλογία μεταξύ πτώσης στάθμης (δ) και παροχής (Q), δηλ. ($\delta \propto Q$). Πράγματι από τον τύπο του Dupuit ισχύει:

$$T = \frac{Q}{2,73(H-h)} \log \frac{R}{r}$$

Θέτοντας $(H-h)=\delta$ και λύνοντας ως προς δ , προκύπτει (Σχ. 3.1):

$$\delta = \lambda.Q$$

όπου λ είναι μια σταθερά που είναι συνάρτηση της ακτίνας επίδρασης της γεώτρησης (R), της ακτίνας της γεώτρησης (r) και του συντελεστή μεταβιβαστικότητας (T), που θεωρείται σταθερός. *Συμπεραίνεται δηλ. ότι όσο αυξάνεται η παροχή, τόσο αυξάνεται η πτώση στάθμης.*



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα πτώσης στάθμης-παροχής σε υπό πίεση (αριστερά) και ελεύθερο υδροφόρο (δεξιά) σε κατάσταση ισορροπίας (μόνιμη ροή).

Στους *ελεύθερους υδροφορείς* σε κατάσταση μόνιμης ροής από τον τύπο του Dupuit (οι πράξεις παραλείπονται) προκύπτει ότι :

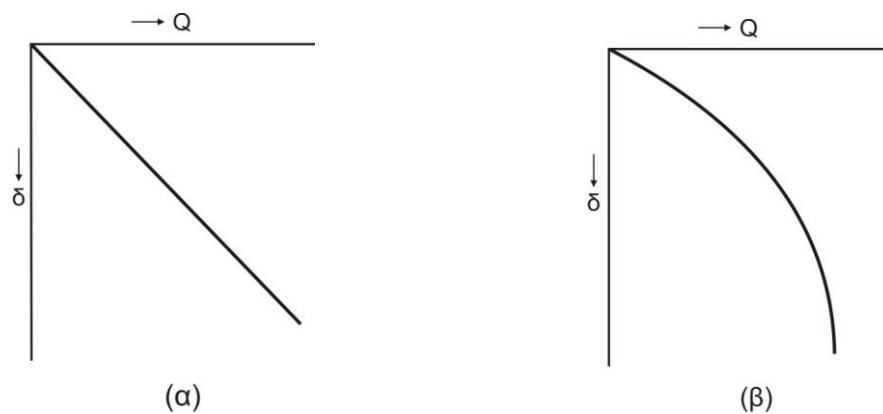
$$Q = \lambda.(2H - \delta).\delta$$

όπου: H =το φορτίο σε απόσταση ίση με την ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης που είναι ίσο με το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου στρώματος

λ =μία σταθερά.

Η ανωτέρω σχέση αντιπροσωπεύει μια παραβολή, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχ. 3.1, στο οποίο οι άξονες έχουν περιστραφεί κατά 90° μοίρες για να αντιστοιχεί η πτώση στάθμης στον κατακόρυφο άξονα, ώστε να έχουμε καλύτερη εποπτεία. **Συμπερασματικά, στους ελεύθερους υδροφορείς όσο αυξάνεται η παροχή, τόσο περισσότερο αυξάνεται (όχι γραμμικά) η πτώση στάθμης, που σημαίνει αύξηση του κόστους λόγω άντλησης από μεγάλο βάθος.**

Σε κατάσταση μη ισορροπίας (μη μόνιμης ροής) οι καμπύλες μεταξύ πτώσης στάθμης (δ) και παροχής (Q) ακολουθούν την ίδια πορεία, με την προϋπόθεση ότι οι μετρήσεις στάθμης γίνονται μετά από παρέλευση κάποιου χρόνου από την έναρξη της άντλησης (Σχ. 3.2).



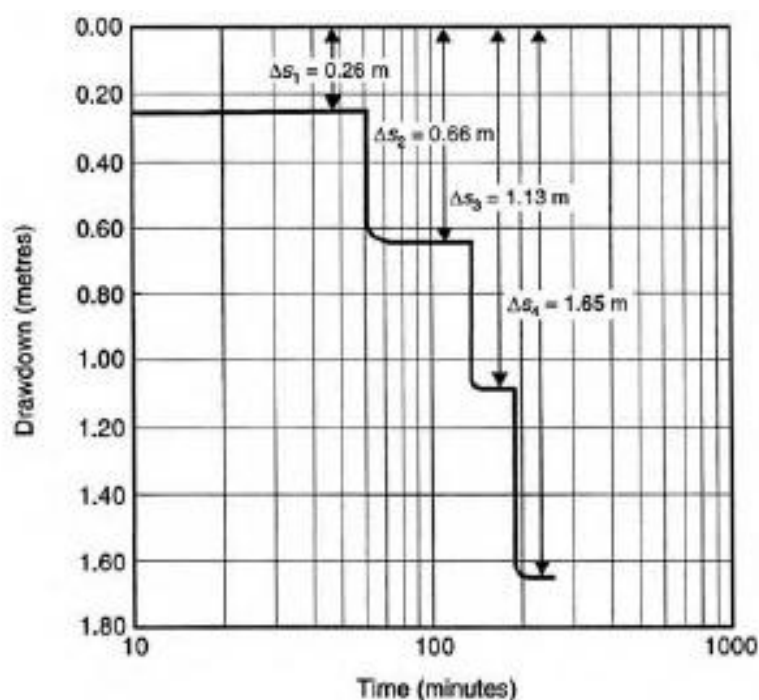
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα πτώσης στάθμης-παροχής σε υπό πίεση (α) και ελεύθερο υδροφόρα (β) σε κατάσταση μη ισορροπίας (μη μόνιμη ροή).

3.2 Άντληση κατά βαθμίδες- Χαρακτηριστική καμπύλη γεώτρησης

Για να προσδιορισθούν τα διάφορα χαρακτηριστικά μιας γεώτρησης και να ελεγχθεί αν αναπτύχθηκε καλά εκτελούνται δοκιμαστικές **αντλήσεις κατά βαθμίδες** (step-drawdown tests) (Σχ. 3.3). Η άντληση κατά βαθμίδες γίνεται με μεταβαλλόμενη παροχή, είτε συνεχόμενη (χωρίς να σταματήσουμε την άντληση αυξάνουμε την παροχή άντλησης), είτε διακοπτόμενη (δηλ. αντλούμε με μια συγκεκριμένη παροχή και μετά διακόπτουμε την άντληση και αφού επανέλθει η στάθμη αρχίζουμε την άντληση με νέα παροχή). Οι βαθμίδες άντλησης πρέπει να είναι τουλάχιστον 3 ή 4, διάρκειας 3 ωρών η καθεμιά.

Αναλυτικά ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Τοποθέτηση του αντλητικού συγκροτήματος. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αντλητικού συγκροτήματος (διάμετρος αντλίας-στροβίλου, βάθος τοποθέτησης, ιπποδύναμη κ.λπ.) καθορίζονται με βάση την τεχνική έκθεση της γεώτρησης.



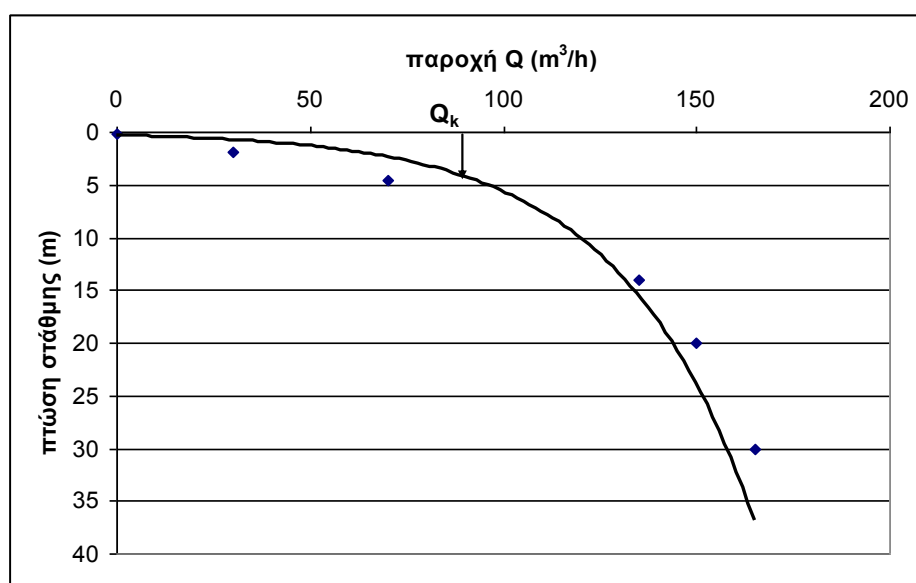
Σχήμα 3.3: Κλιμακωτή αντλητική δοκιμή.

- Η διάμετρος της αντλίας είναι ανάλογη με την αναμενόμενη παροχή, ώστε να αποδίδει τη μέγιστη παροχή που αποδίδει η γεώτρηση.
- Γίνεται προάντληση (μερικές ώρες) με διάφορες παροχές για να πάρουμε καθαρό νερό.
- Το αντλούμενο νερό απομακρύνεται με σωλήνα σε κατάλληλη απόσταση (τουλάχιστον 50 m) και εφόσον υπάρχει ενδεχόμενο επανατροφοδοσίας του υδροφορέα, η απόσταση αυτή αυξάνεται και καθορίζεται από την επίβλεψη.
- Το πρόγραμμα άντλησης (οι βαθμίδες, η τιμή σταθερής παροχής, η διάρκεια κ.λπ.) καθορίζεται επιτόπου με βάση την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προάντλησης.
- Τα στοιχεία της άντλησης καταχωρούνται σε ειδικό έντυπο και από την επεξεργασία τους καθορίζεται η κρίσιμη παροχή και η παροχή εκμετάλλευσης της γεώτρησης.
- Καθορίζονται οι μη γραμμικές απώλειες και ο βαθμός ανάπτυξης της γεώτρησης με βάση την αξιολόγηση των αντλητικών δεδομένων κατά βαθμίδες.

- Με την αξιολόγηση των δεδομένων της δοκιμαστικής άντλησης κατά βαθμίδες γίνεται εκτίμηση της κρίσιμης παροχής και της παροχής εκμετάλλευσης της γεώτρησης.

Για την εκτίμηση της κρίσιμης παροχής και της παροχής εκμετάλλευσης μιας γεώτρησης κατασκευάζεται το διάγραμμα πτώση στάθμης-παροχής, που αποτελεί και τη **χαρακτηριστική καμπύλη** της γεώτρησης. Για τη χάραξη της καμπύλης απαιτείται δοκιμαστική άντληση κατά βαθμίδες με τουλάχιστον τρεις (3) διαφορετικές παροχές.

Το διάγραμμα αυτό αποτελείται από ένα αρχικό ευθύγραμμο τμήμα, από ένα μεσαίο αρκετά κυρτό και ένα τελικό λιγότερο κυρτό (παραβολική μορφή) που τείνει να γίνει παράλληλο με τον κατακόρυφο άξονα (Σχ. 3.4). Το σημείο στο οποίο η καμπύλη από ευθεία γίνεται κυρτή ονομάζεται κριτικό σημείο και η προβολή του στον οριζόντιο άξονα καθορίζει την **κρίσιμη παροχή** (Q_k) της γεώτρησης. Η πτώση στάθμης που αντιστοιχεί στην κρίσιμη παροχή ονομάζεται κρίσιμη πτώση στάθμης.



Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστική καμπύλη γεώτρησης σε ελεύθερο υδροφόρο.

Ως **παροχή εκμετάλλευσης** ή **ωφέλιμη παροχή** (Q_e) λαμβάνεται παροχή μικρότερη ή ίση από την κρίσιμη παροχή ($Q_e \leq Q_k$). Την κρίσιμη παροχή δεν πρέπει να την υπερβαίνουμε γιατί δημιουργούνται ανεπιθύμητα αποτελέσματα (π.χ. τυρβώδης ροή προς τη γεώτρηση, μεγάλες πτώσεις στάθμης, αύξηση κόστους άντλησης, φθορά της αντλίας κ.λπ.).

Η χαρακτηριστική καμπύλη σε υπό πίεση υδροφορείς αποκτά καμπυλότητα, όμοια με αυτήν των ελεύθερων υδροφορέων, μόνο σε μεγάλες παροχές άντλησης. Έτσι, η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης δίνει πληροφορίες για το είδος του υδροφορέα. Μεγάλη

καμπυλότητα αντιστοιχεί σε ελεύθερους υδροφορείς ή σε υπό πίεση για άντληση με μεγάλες παροχές. Γραμμικότητα εμφανίζουν οι υπό πίεση υδροφορείς.

3.3 Γραμμικές και μη γραμμικές απώλειες

Για τον υπολογισμό των απωλειών φορτίου (πτώσεις στάθμης) και της απόδοσης των γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται τα στοιχεία των κλιμακωτών αντλητικών δοκιμασιών με βάση την ανάλυση των **Bierschenk & Wilson** (1961). Η ανάλυση αυτή θεωρεί ότι η πτώση στάθμης σε μία γεώτρηση μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα δύο παραγόντων:

$$\delta = B \cdot Q + C \cdot Q^n$$

Στην εξίσωση ο γραμμικός παράγων ($B \cdot Q$) εμφανίζει τις απώλειες φορτίου του υδροφορέα (formation loss) και ο μη γραμμικός ($C \cdot Q^n$) τις απώλειες φορτίου της γεώτρησης (well loss) που αντιστοιχούν σε μια δεδομένη παροχή Q . Το B και C (κατά κανόνα $B < C$) είναι συντελεστές και προσδιορίζονται γραφικά (βλ. συνέχεια).

Οι γραμμικές απώλειες αντιστοιχούν στα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα (μεταβιβαστικότητα, αποθηκευτικότητα) και οι μη γραμμικές στα τεχνικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης (τρόπος κατασκευής, βαθμός ανάπτυξης κ.λπ.). Οι μη γραμμικές απώλειες αναφέρονται και ανώμαλες απώλειες στάθμης. Οι απώλειες φορτίου στη γεώτρηση (μη γραμμικές απώλειες) συνδέονται με τυρβώδη ροή και είναι ανάλογες με τη n -οστή δύναμη της αντλούμενης παροχής (Q^n) όπου $n > 1$. Εντούτοις για λόγους ευκολίας χρησιμοποιείται η τιμή $n=2$ (επίλυση Jacob). Μεγάλες μη γραμμικές απώλειες καταγράφονται όταν οι γεωτρήσεις αντλούνται με μεγάλες παροχές ή όταν οι γεωτρήσεις δεν έχουν κατασκευασθεί και αναπτυχθεί σωστά (έμφραξη ανοιγμάτων των φιλτροσωλήνων). Σε μια καλά σχεδιασμένη γεώτρηση πρέπει οι γραμμικές απώλειες να είναι μεγαλύτερες από τις μη γραμμικές απώλειες.

Η **επίλυση Jacob** θεωρεί $n=2$ και η εξίσωση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

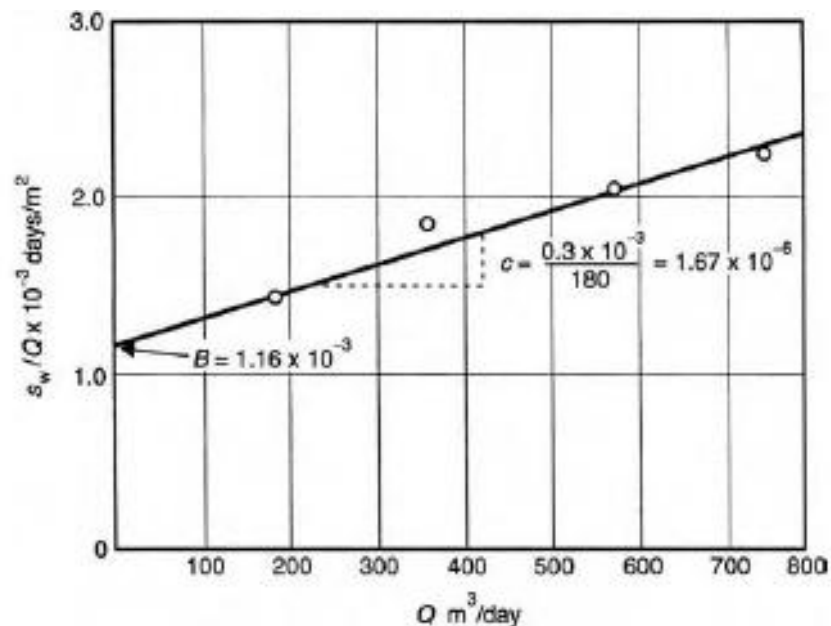
$$\frac{\delta}{Q} = CQ + B$$

Το πηλίκο δ/Q αναφέρεται και ως **ειδική πτώση στάθμης** (specific drawdown).

Ο Bierschenk (1964) πρότεινε μια γραφική λύση της εξίσωσης Jacob, πρακτικά δηλ. μια γραφική μέθοδο για τον καθορισμό των συντελεστών B και C (Σχ. 3.5). Η ανωτέρω σχέση είναι μία γραμμική σχέση ανάμεσα στα δ/Q και Q με δεδομένα από κλιμακωτή δοκιμαστική άντληση, όπου η πτώση στάθμης μετράται σε m και η παροχή σε m^3/day .

Έτσι το διάγραμμα $s_w/Q=f(Q)$ είναι μια ευθεία γραμμή με κλίση C και σταθερά B την τομή της ευθείας με τον κατακόρυφο άξονα. Η κλίση C αντιστοιχεί στον συντελεστή απωλειών της γεώτρησης (well loss coefficient).

Οι διαστάσεις των συντελεστών B και C είναι αντίστοιχα, $T.L^{-2}$ και $T.L^{-5}$. Με βάση τις τιμές του συντελεστή C εκφρασμένες σε min^2/m^5 , ο Walton (1962) πρότεινε κριτήρια αξιολόγησης των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών μιας γεώτρησης (Πίν. 3.1).



Σχήμα 3.5: Προσδιορισμός των παραμέτρων B και C με την επίλυση Jacob.

Πίνακας 3.1: Αξιολόγηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών μιας γεώτρησης με βάση τον συντελεστή C (min^2/m^5) (Walton, 1962).

Συντελεστής C (min^2/m^5)	Αξιολόγηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών της γεώτρησης
<0,5	Καλά σχεδιασμένη και αναπτυγμένη γεώτρηση
0,5-1	Μέτρια υποβαθμισμένη γεώτρηση ή έμφραξη φιλτροσωλήνων
1-4	Σοβαρά υποβαθμισμένη γεώτρηση ή έμφραξη φιλτροσωλήνων
>4	Δύσκολη η αποκατάσταση της γεώτρησης στην αρχική της κατάσταση

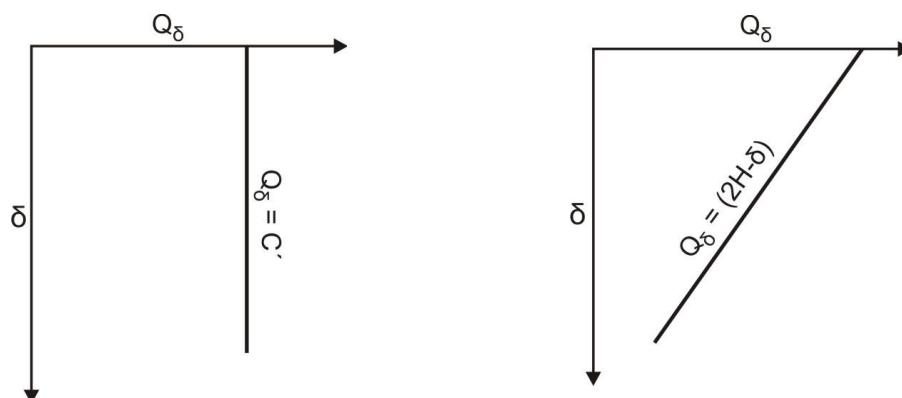
Συμπερασματικά, οι απώλειες φορτίου (πτώση στάθμης) της γεώτρησης (μη γραμμικές απώλειες) πρέπει να ελαχιστοποιούνται (αφού δεν είναι δυνατόν να μηδενισθούν πλήρως). Επειδή αυτές σχετίζονται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της υδρογεώτρησης (τρόπος κατασκευής, τέλεια ή ατελής γεώτρηση, τοποθέτηση φίλτρων, βαθμός ανάπτυξης κ.λπ.), απαιτείται σωστός σχεδιασμός και κατασκευή της γεώτρησης και εδώ έγκειται ο σημαντικός ρόλος του γεωλόγου ως επιβλέποντα του έργου.

3.3 Ειδική ικανότητα

Η *ειδική ικανότητα* ή *ειδική παροχή* (specific capacity) ορίζεται ως το πηλίκο $\frac{Q}{\delta}$ της αντλούμενης παροχής προς την αντίστοιχη πτώση στάθμης. Η ειδική ικανότητα υπολογίζεται εύκολα από τα στοιχεία παροχής και πτώσης στάθμης σε αντλούμενες γεωτρήσεις. Το αντίστροφο της ειδικής παροχής ονομάζεται *ειδική πτώση στάθμης*.

Μόνιμη ροή

Στους *υπό πίεση υδροφορείς*, από την αναλογική σχέση πτώσης στάθμης-παροχής ($\delta \propto Q$) προκύπτει ότι το $\frac{Q}{\delta} = \lambda$ (όπου λ σταθερά), δηλ. η ειδική ικανότητα παραμένει σταθερή (Σχ. 3.5), με την προϋπόθεση ότι μετά από μακροχρόνιες αντλήσεις η στάθμη τους δεν πέφτει κάτω από την αδιαπέρατη οροφή (δεν μετατρέπονται δηλ. σε ελεύθερους υδροφορείς).



Σχήμα 3.5: Ειδική ικανότητα σε υπό πίεση (αριστερά) και ελεύθερους υδροφορείς (δεξιά) σε κατάσταση ισορροπίας (μόνιμη ροή).

Από τον τύπο του Dupuit στους *ελεύθερους υδροφορείς* (οι πράξεις παραλείπονται) καταλήγουμε ότι η ειδική ικανότητα (Q/δ) ισούται με:

$$\frac{Q}{\delta} = \lambda \cdot (2H - \delta)$$

όπου τα σύμβολα H και λ καθορίστηκαν προηγούμενα.

Σύμφωνα με την ανωτέρω σχέση, η ειδική ικανότητα *μειώνεται με την πτώση στάθμης*, λόγω μείωσης του πάχους του υδροφόρου στρώματος με την άντληση (Σχ. 3.5).

Μη μόνιμη ροή

Στους υπό πίεση υδροφορείς, από τον τύπο του Jacob προκύπτει αναλογία μεταξύ πτώσης στάθμης και παροχής. Πράγματι έχουμε:

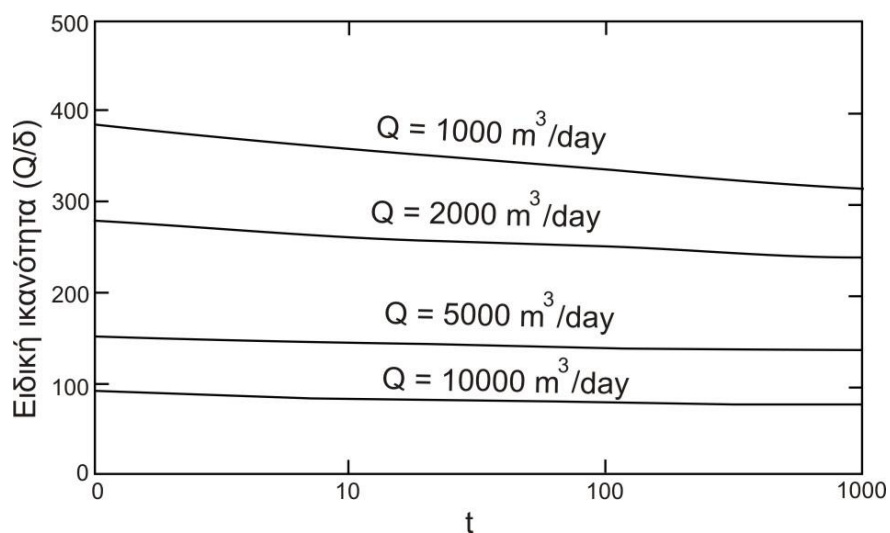
$$\delta = \frac{0,183Q}{T} \log\left(\frac{2,25Tt}{x^2S}\right)$$

Θεωρώντας το T και το S σταθερά (αφού αναφερόμαστε στο ίδιο υδροφόρο στρώμα), από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι $\delta \propto Q$ για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Από την αναλογία αυτή προκύπτει ότι το πηλίκο Q/δ (ειδική ικανότητα ή ειδική παροχή) ισούται με:

$$\frac{Q}{\delta} = \frac{T}{0,183(\log \frac{2,25T}{x^2S} + \log t)}$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι **η ειδική ικανότητα μειώνεται με τη διάρκεια της άντλησης** (αντιστρόφως ανάλογη του $\log t$).

Λαμβάνοντας υπόψη όμως τις μη γραμμικές απώλειες (βλ. επόμενη παράγραφο) προκύπτει ότι η ειδική ικανότητα ελαττώνεται με την παροχή και τη διάρκεια της άντλησης. **Έτσι, στην πράξη μετά από μακροχρόνιες αντλήσεις, η ειδική παροχή μειώνεται** (Σχ. 3.6).



Σχήμα 3.6: Ειδική ικανότητα σε σχέση με την παροχή και τη διάρκεια άντλησης σε υπό πίεση υδροφόρα σε κατάσταση μη ισορροπίας.

Στους *ελεύθερους υδροφορείς*, λόγω του ότι το κορεσμένο πάχος δεν παραμένει σταθερό κατά την άντληση και επιπλέον η ροή δεν είναι δισδιάστατη κοντά στην αντλούμενη γεώτρηση, αλλά υπάρχει και κατακόρυφη συνιστώσα υπάρχει απόκλιση από τη γραμμικότητα μεταξύ πτώσης στάθμης και παροχής, που εμφανίζεται στους υπό πίεση υδροφορείς. Συνεπώς και η ειδική ικανότητα μειώνεται με την πτώση στάθμης.

Γενικά, μείωση της ειδικής ικανότητας υποδηλώνει είτε μείωση της μεταβιβαστικότητας (T) λόγω της πτώσης στάθμης σε έναν ελεύθερο υδροφορέα, είτε αύξηση των μη γραμμικών απωλειών (π.χ. έμφραξη φίλτρων).

3.5 Σχεδιασμός αντλητικού πεδίου γεωτρήσεων

Η εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων με υδρογεωτρήσεις πρέπει να γίνεται με κατάλληλο σχεδιασμό, στον οποίο λαμβάνονται υπόψη η ικανότητα του υδροφορέα και οι υδατικές ανάγκες της περιοχής, δηλ. το ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης. Ο βέλτιστος σχεδιασμός αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση του αντλούμενου όγκου νερού από τις γεωτρήσεις και στην αποφυγή αρνητικών συνεπειών (εξάντληση υδροφορέα, ποιοτική υποβάθμιση του αντλούμενου νερού, καθιζήσεις από υπεράντληση κ.λπ.). Για το λόγο αυτόν απαιτείται ο καθορισμός:

- 1) της συνολικής ποσότητας νερού που θα αντληθεί από τις γεωτρήσεις με βάση την ασφαλή απόδοση του υδροφορέα
- 2) της παροχής καθεμιάς γεώτρησης, που καθορίζει και τον αριθμό τους
- 3) της θέσης των γεωτρήσεων στον χώρο (διάταξη και αποστάσεις των γεωτρήσεων)
- 4) των τεχνικών χαρακτηριστικών κάθε γεώτρησης (βάθος, διάμετρος κ.λπ.).

Η απόσταση των γεωτρήσεων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Για τον καθορισμό της απόστασης των γεωτρήσεων χρησιμοποιείται η **μέγιστη παροχή**, η οποία αντιστοιχεί σε πτώση στάθμης που κυμαίνεται μεταξύ $1/3$ και $2/3$ του κορεσμένου πάχους στους ελεύθερους υδροφορείς.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός παραγωγικών γεωτρήσεων προϋποθέτει ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους ίση με το 2-πλάσιο του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα. Η διάταξη των γεωτρήσεων πρέπει να είναι γραμμική και παράλληλη προς πιθανά θετικά όρια και κάθετη προς αρνητικά όρια (Καλλέργης, 1999). Σε κάθε περίπτωση όμως, εκτός από τα υδραυλικά κριτήρια λαμβάνονται υπόψη και οικονομοτεχνικά, όπως οι αγωγοί μεταφοράς, η ύπαρξη ηλεκτρικού και οδικού δικτύου, το κόστος κατασκευής κ.λπ.

Ερωτήσεις

- 1.1** Σε τι αποσκοπεί μια δοκιμή άντλησης;
- 1.2** Ποια είναι τα βήματα σχεδιασμού μιας δοκιμαστικής άντλησης;
- 1.3** Τι είναι ο κώνος πτώσης στάθμης;
- 1.4** Περιγράψτε συνοπτικά το πρότυπο Dupuit
- 1.5** Ποιες είναι οι προϋποθέσεις εφαρμογής του τύπου Thiém;
- 1.6** Ποια είναι τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου Theis;
- 1.7** Ποιες επιπλέον προϋποθέσεις από το πρότυπο Theis πρέπει να ισχύουν για να ισχύει η μέθοδος Jacob;
- 1.8** Αναφέρατε τις μεθόδους επίλυσης κατά Jacob στη μη μόνιμη ροή.
- 1.9** Ισχύει η επίλυση Theis σε ελεύθερους υδροφορείς και με ποιες προϋποθέσεις;
- 1.10** Τι είναι ακτίνα επίδρασης μιας γεώτρησης; Πως υπολογίζεται και πως μεταβάλλεται σε συνθήκες μη ισορροπίας;
- 11.** Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων μη μόνιμης ροής σε σχέση με αυτές της μόνιμης ροής;
- 12.** Ποια είναι τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου επανόδου της στάθμης;
- 13.** Τι είναι ειδική ικανότητα μιας αντλούμενης γεώτρησης;
- 14.** Πως κατασκευάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη μιας γεώτρησης και τι εκφράζει;
- 15.** Τι είναι γραμμικές και μη γραμμικές απώλειες φορτίου σε μια αντλούμενη γεώτρηση;
- 16.** Τι λαμβάνει υπόψη ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός αντλητικού πεδίου γεωτρήσεων;

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Avci, C.B. (1992): Parameter estimation for step drawdown tests. *Ground Water* 30 (3), 338-382.
- Batu, V. (1998): *Aquifer hydraulics. A comprehensive guide to hydrogeological data analysis.* John Wiley & Sons, Inc. p. 727.
- Bierschenk, W.H. (1964): Determining well efficiency by multiple step drawdown tests. *Int. Assoc. Sci. Hydrology Publ.* 64, 493-507.
- British Standards Institution (1983): *British Code of Practice for Test Pumping Water Wells.*
- Βουδούρης, Κ., Λαμπράκης, Ν., Καλλέργης, Γ. (1995): Υδρογεωλογική έρευνα και υδραυλικές παράμετροι των πλειοτεταρτογενών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής της πόλης των Πατρών. Πρακτικά 3^{ου} Υδρογεωλογικού συνεδρίου, Ηράκλειο, 199-211.
- Boulton, N.S. (1963): Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. *Proc. Institute of Civil Engineers, London, Vol. 26,* 469-482.
- Boulton, N.S. (1970): Analysis of data from pumping tests in unconfined anisotropic aquifers. *Journal of Hydrology* 10, 369-378.
- Chow, V.T. (1952): On the determination of transmissibility and storage coefficients from pumping test data. *Transactions, American Geophysical Union, Vol. 33,* 397-404.
- Cooper, H.H., Jacob, C.E. (1946): A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Transactions, American Geophysical Union, Vol. 27,* 526-534.
- Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, I.S. (1967): Response to a finite diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research* 3, 263-269.
- De Glee, G.J. (1930): *Over grondwaterstromingen Bij wateronttrekking door Middel Van Putten.* Thesis (in Dutch). Delft, The Netherlands, p. 175.
- Driscoll, F.G. (1986): *Groundwater and wells.* 2nd edition, Johnson Filtration Systems Inc., Minnesota, p. 1086.
- Hantush, M.S., Jacob, C.E. (1955): Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Transactions, American Geophysical Union, Vol. 36,* 95-100.
- Hantush, M.S. (1964): *Hydraulics of wells.* *Adv. Hydrosci* 1, 284-432.
- Hvorslev, M.J. (1951): Time lag and soil permeability in groundwater observations. U.S. Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station. *Bulletin* 36.
- Huisman, L. (1972): *Groundwater recovery.* MacMillan Press, London, p. 336.
- Jacob, C.E. (1946): Radial flow in a leaky artesian aquifer. *Transactions, American Geophysical Union, Vol. 27,* 198-205.
- Jacob, C.E. (1947): Drawdown test to determine effective radius of artesian wells. *Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 112,* 1047-1070.
- Kruseman, G.P., De Ridder, N.A. (1990): *Analysis and evaluation of pumping test data (2nd edition).* ILRI Publication 47. International Institute for land reclamation and development. Wageningen, Netherlands, p. 377.
- Lohman, S.W. (1972): *Groundwater Hydraulics.* U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 708.
- Μπουλουκάκης, Η., Βουδούρης, Κ. (1997): Αξιολόγηση των αντλητικών δεδομένων στους πλακώδεις ασβεστόλιθους στο Νομό Ηρακλείου Κρήτης. Πρακτικά 4^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας της Ε.Γ.Ε.-Σύνδεσμος Γεωλόγων Μεταλλειολόγων Κύπρου, Θεσσαλονίκη, 324-336.
- Neuman, S.P. (1972): Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research* 8, No 4, 1031-1045.

- Neuman, S.P. (1975): Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research* 11, 329-342.
- Papadopoulos, I.S. (1965): Nonsteady flow to a well in an infinite anisotropic aquifer. *Proc. of Dubrovnik Symposium on the Hydrology of fractured rocks. IASH*, 21-31.
- Papadopoulos, I.S., Cooper, H.H. (1967): Drawdown in a well of large diameter. *Water Resources Research*, Vol. 3, No 1, 241-244.
- Rorabaugh, M.I. (1953): Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian wells. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol. 79, 323, 1-23.
- Shekhar, S. (2006): An approach to interpretation of step drawdown tests. *Hydrogeology Journal* 14(6), 1018-1027.
- Singh, S.K. (2002): Well loss estimation: variable pumping replacing step drawdown test. *Journal Hydraulic Eng. ASCE* 128 (3), 343-348.
- Σούλιος, Γ. (1980): Χρήση H/Y για την εύρεση της θέσεως και του σχήματος της πιεζομετρικής επιφάνειας αντλούμενου υδροφόρου ορίζοντα με ορισμένες οριακές συνθήκες. *Πρακτικά II Πανελληνίου Σεμιναρίου Υδρολογίας, Αθήνα*, 573-583.
- Soulios, G. (1986): Application de la methode de De Glee aux nappes aquiferes semi-libres. *An. Scient. Univ. de France Cpmpte, Besancon*, 4 serie, fasc. 7, 87-96.
- Streltsova, T.D. (1972): Unsteady radial flow in an unconfined aquifer. *Water Resources Research*, Vol. 8, No 5, 1284-1298.
- Τελόγλου, Η., Παναγόπουλος, Α., Ζήσης, Θ., Πανώρας, Αθ. (2005): Προσδιορισμός υδραυλικών παραμέτρων σε υπό πίεση και μερικώς υπό πίεση υδροφορείς με μια απλοποιημένη διαγραμματική προσέγγιση. *Πρακτικά 7^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Αθήνα, Τόμος I*, 479-486.
- Theis, C.V. (1935): The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 16, 519-524.
- Thiem, G. (1906): *Hydrologic methods (in German)*. Gebhardt, J.M. Leipzig, Germany.
- U.S. Water and Power Resources Service (1981): *Groundwater manual*. Denver Colorado, p. 480.
- Walton, W.C. (1960): *Leaky artesian aquifer conditions in Illinois: Report of investigation, No 39*, Illinois State Water Survey.
- Walton, W.C. (1962): *Selected analytical methods for well and aquifer evaluation*. Illinois State Water Survey. Bulletin No 49, p. 81.
- Walton, W.C. (1987): *Groundwater pumping tests: Design and Analysis*. National Water Well Association. Lewis Publishers, p. 210.
- Wen, Z., Huang, G., Zhan, H. (2011): Non-Darcian flow to a well in a leaky aquifer using the Forchheimer equation. *Hydrogeology Journal* 19, 563-572.
- Wenzel, L.K. (1942): *Methods for determining permeability of water-bearing materials with special reference to discharging-well methods*: Washington, D.C., U.S. Geological Survey, Water Supply, Paper 887, 67-91.
- Yeh, H.D. (1989): Step-drawdown data analysis. *Journal Hydraulic Eng. ASCE* 115 (10), 1426-1432.
- Yeh, H.D. (2010): Analysis of pumping test data for determining unconfined aquifer parameters: Composite analysis or not? *Hydrogeology Journal* 17, 1133-1147.
- Zissis, Th. (1987): *Unsteady flow in karst aquifers using finite element method*. PhD Thesis, School of Agriculture, Aristotle University.