

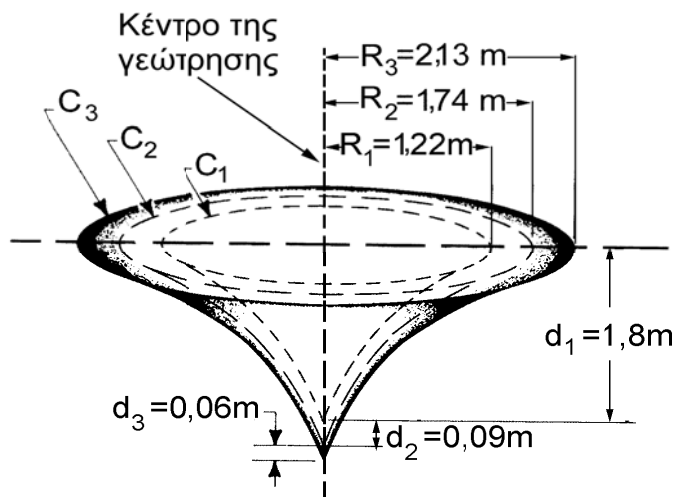
ΑΝΤΛΗΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΑΣΙΕΣ

Κατά τη διάρκεια των αντλήσεων σε έργα υδροληψίας (γεωτρήσεις, πηγάδια) δημιουργείται σαν συνέπεια των αντλήσεων ένας ανάστροφος κώνος ή κώνος κατάπτωσης (depression cone) του οποίου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων και από τις παραμέτρους άντλησης. Με την βοήθεια των αντλητικών δοκιμασιών υπολογίζονται οι υδραυλικές ιδιότητες των υδροφόρων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο υπολογισμός της πτώσης της στάθμης (drawdown) γύρω από το πηγάδι άντλησης στην περίπτωση που είναι γνωστές οι υδραυλικές ιδιότητες των υδροφόρων. Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στις παρακάτω βασικές προϋποθέσεις:

Προϋποθέσεις

1. Ο υδροφόρος ορίζοντας ευρίσκεται πάνω από ένα στεγανό υπόβαθρο.
2. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι οριζόντιοι και έχουν άπειρη έκταση.
3. Η πιεζομετρική επιφάνεια των υδροφόρων πριν από την άντληση είναι επίσης οριζόντια.
4. Η πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφόρου δεν παρουσίαζε διαφοροποιήσεις συναρτήσει του χρόνου για την χρονική περίοδο πριν από τις αντλήσεις.
5. Όλες οι αλλαγές της πιεζομετρικής επιφάνειας κατά τη διάρκεια των αντλήσεων οφείλονται σ' αυτές.
6. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ομοιογενής και ισότροπος.
7. Η ροή προς το πηγάδι άντλησης είναι ακτινωτή.
8. Η υπόγεια ροή είναι οριζόντια.
9. Ο νόμος του Darcy είναι εφαρμόσιμος.
10. Το υπόγειο νερό έχει μια σταθερή πυκνότητα και σταθερό ιξώδες.
11. Τόσο η γεώτρηση ή πηγάδι παρατήρησης όσο και το πηγάδι άντλησης διαπερνούν όλο το πάχος του υδροφόρου.
12. Το πηγάδι άντλησης έχει μια απειροελάχιστη διάμετρο και είναι 100% αποτελεσματικό.

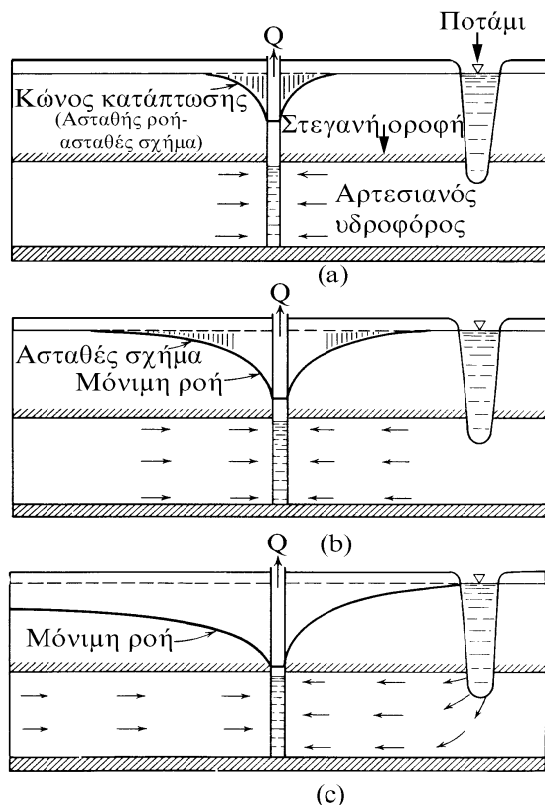
Ο κώνος κατάπτωσης



Ο ανάστροφος κώνος του διπλανού σχήματος προκύπτει από την άντληση σε πηγάδι με σταθερή παροχή ίση με $1310 \text{ m}^3/\text{d}$.

Οι ακτίνες R_1 , R_2 , και R_3 καθώς και τα βάθη στα οποία φθάνει η κορυφή αντιστοιχούν σε χρονικά διαστήματα t_1 , $t_2=2t_1$ και $t_3=3t_1$ (Johnson, 1966).

Η πτώση στάθμης είναι ανάλογη του Q και του t , και αντιστρόφως ανάλογη του r , του S , και του T



Κατά τη διάρκεια της άντλησης ο κώνος κατάπτωσης διευρύνεται και βαθαιίνει. Στις θέσεις (α) και (β) διαμορφώνεται κάτω από συνθήκες μη μόνιμης ροής ενώ στη θέση (γ) όπου η απόληψη νερού αντιστοιχεί στο νερό που φθάνει στη γεώτρηση από το γειτονικό κανάλι λόγω επαγωγής, η διαμόρφωση του σχήματος έχει ολοκληρωθεί. Στο ενδιάμεσο στάδιο (β) η ροή γίνεται μόνιμη όταν η ακτίνα του κώνου κατάπτωσης φθάσει στο γειτονικό κανάλι και αρχίσει η επαγωγική τροφοδοσία (Heath and Trainer, 1968).

Υπολογισμός της πτώσης στάθμης σ' ένα πηγάδι Αντλησης

1. Ροή σε υπό πίεση και σε μερικός υπό πίεση υδροφόρους

Ο Theis (1935) έκανε τη πρώτη μαθηματική ανάλυση για τον υπολογισμό της πτώσης στάθμης σ' ένα πηγάδι άντλησης για ένα υπό πίεση υδροφόρο ορίζοντα και κάτω από συνθήκες μη μόνιμης ροής. Ξεκίνησε τους υπολογισμούς του εφαρμόζοντας το νόμο του Darcy και κάνοντας τις απαραίτητες συμπληρωματικές στις ήδη αναφερθείσες υποθέσεις:

1. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι υπό πίεση έχοντας μια εντελώς στεγανή οροφή και ένα εντελώς στεγανό δάπεδο.
2. Δεν υπάρχει πηγή τροφοδοσίας.
3. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι συμπιεστός και το νερό απελευθερώνεται στιγμιαία κατά την ταπείνωση του φορτίου.
4. Το πηγάδι αντλείται με μια σταθερή παροχή.

Ο νόμος του **Darcy** για την περίπτωση γράφεται:

$$Q = (2\pi r b) K \left(\frac{dh}{dr} \right)$$

Όπου:

Q η παροχή άντλησης (L^3/T)

r είναι η ακτινωτή απόσταση από την κυλινδρική διατομή εισαγωγής του νερού στο πηγάδι άντλησης (**L**)

K η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

b, το πάχος του υδροφόρου (**L**)

$\frac{dh}{dr}$ ο συντελεστής υδραυλικής κλίσης (%)

Από τη σχέση:

$$Q = (2\pi b)K\left(\frac{dh}{dr}\right) \Leftrightarrow Q = 2\pi rT\left(\frac{dh}{dr}\right) \Leftrightarrow r \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{Q}{2\pi T}$$

Οι **αρχικές συνθήκες** για μια οριζόντια πιεζομετρική επιφάνεια είναι:

$$h(r,0) = h_o \text{ για όλα τα } r.$$

Οι **οριακές συνθήκες** αναφερόμενες σ' ένα άπειρο ορίζοντα χωρίς πτώση στάθμης για κάθε χρονική στιγμή είναι:

$$h(\infty, t) = h_o \text{ για όλα τα } t.$$

Με βάση όλα τα παραπάνω ο Theis κατέληξε στη λύση:

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-a}}{a} da$$

Ο όρος **u** δίνεται από τη σχέση:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Όπου στα παραπάνω,

Q η σταθερή παροχή άντλησης ($L^3/T, m^3/d$)

r είναι η ακτινωτή απόσταση από την κυλινδρική διατομή εισαγωγής του νερού στο πηγάδι άντλησης (**L,m**)

T η μεταβιβαστικότητα του υδροφόρου ($L^2/T, m^2/d$)

h το υδραυλικό φορτίο (**L,m**)

h_o το αρχικό υδραυλικό φορτίο (**L,m**)

h_o-h η πτώση στάθμης (**L,m**)

t ο χρόνος από την αρχή των αντλήσεων (T, d)

S ο συντελεστής αποθηκευτικότητας του υδροφόρου (%)

Το εκθετικό ολοκλήρωμα της παραπάνω σχέσης μπορεί να αντικατασταθεί από μια άπειρη σειρά και η σχέση καταλήγει στη:

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots \right]$$

Η άπειρη αυτή σειρά ονομάζεται συνάρτηση του πηγαδιού άντλησης (well function) και συμβολίζεται με W(u):

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Υπάρχουν πίνακες από τους οποίους προκύπτουν οι τιμές W(u) σαν συνάρτηση του u.

Πίνακας 1: Τιμές του W(u) για τιμές του u μεταξύ 9 και 10⁻¹⁵

1/u	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10 ⁻¹	0.000017	0.00164	0.0086	0.0249	0.0489	0.0784	0.111	0.146	0.183
10 ⁰	0.219	0.560	0.829	1.04	1.22	1.37	1.51	1.62	1.73
10 ¹	1.82	2.47	2.86	3.14	3.35	3.53	3.69	3.82	3.93
10 ²	4.04	4.73	5.13	5.42	5.64	5.82	5.98	6.11	6.23
10 ³	6.33	7.02	7.43	7.72	7.94	8.12	8.28	8.41	8.53
10 ⁴	8.63	9.33	9.73	10	10.2	10.4	10.6	10.7	10.8
10 ⁵	10.9	11.6	12	12.3	12.5	12.7	12.9	13	13.1
10 ⁶	13.2	13.9	14.3	14.6	14.8	15	15.2	15.3	15.4
10 ⁷	15.5	16.2	16.6	16.9	17.2	17.3	17.5	17.6	17.7
10 ⁸	17.8	18.5	18.9	19.2	19.5	19.6	19.8	19.9	20
10 ⁹	20.1	20.8	21.2	21.5	21.8	21.9	22.1	22.2	22.3
10 ¹⁰	22.4	23.1	23.5	23.8	24.1	24.2	24.4	24.5	24.6

Στην περίπτωση που η οροφή του υπό πίεση υδροφόρου ορίζοντα είναι ένα ημιπερατό στρώμα (**Ροή σ' ένα υπό πίεση υδροφόρο στρώμα με διαρροές**, flow in a Leaky, Confined aquifer) τότε ο τύπος Theis μετασχηματίζεται στον τύπο Hantush – Jacob που ισχύει για τις περιπτώσεις αυτές και είναι:

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r / B), \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt}, \quad B = \sqrt{\frac{Tb'}{K'}}$$

Όπου στα παραπάνω,

Q η σταθερή παροχή άντλησης (**L³/T, m³/d**)

W(u,r/B) είναι η συνάρτηση του αρτεσιανού με διαρροές πηγαδιού άντλησης (τιμές δίνονται από πίνακες).

r είναι η απόσταση από το πηγάδι άντλησης έως το πηγάδι παρατήρησης (**L,m**)

T η μεταβιβαστικότητα του υπό πίεση υδροφόρου (**L²/T, m²/d**)

h το υδραυλικό φορτίο (**L,m**)

h_o το αρχικό υδραυλικό φορτίο (**L,m**)

h_o-h η πτώση στάθμης (**L,m**)

t ο χρόνος από την αρχή των αντλήσεων (**T, d**)

S ο συντελεστής αποθηκευτικότητας του υδροφόρου (%)

B είναι ένας παράγων διαρροής (**L,m**).

b' είναι το πάχος του ημιπερατού στρώματος (**L,m**)

K' είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του ημιπερατού στρώματος (**L/T, m/d**).

Για την ισχύ της παραπάνω σχέσης απαιτούνται να ισχύουν επίσης οι προϋποθέσεις:

1. Το ημιπερατό στρώμα αποτελεί την βάση ελεύθερου υδροφόρου με οριζόντια ελεύθερη επιφάνεια.
2. Η επιφάνεια του υπόγειου νερού του ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα δεν υποχωρεί κατά τη διάρκεια των αντλήσεων. Ισχύει εάν $b''K'' > 100 bK$ όπου b'' (L,m) το κορεσμένο πάχος του ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα και K'' η υδραυλική του αγωγιμότητα (L/T, m/d).
3. Το ημιπερατό στρώμα είναι ασυμπίεστο δηλαδή δεν απελευθερώνεται νερό από αποθήκευση και η ροή σ' αυτό είναι κατακόρυφη. Ισχύει εάν $t > 0.036b'S'/K'$, όπου b' το πάχος του ημιπερατού στρώματος (L,m) και K' η υδραυλική του αγωγιμότητα (L/T, m/d).
4. Η ακτίνα του πηγαδιού άντλησης r_w είναι ασήμαντη. Ισχύει εάν $t > (30r_w^2 S/T)(1 - \{10r_w/b\})^2$.

2. Ροή σε ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες

Για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες ισχύει η σχέση Neuman (1987) κάτω από τις εξής προϋποθέσεις:

1. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ελεύθερος και η πτώση στάθμης είναι ασήμαντη σε σχέση με το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου.
2. Η ειδική απόδοση του υδροφόρου είναι πολύ μεγαλύτερη από την αποθηκευτικότητα του λόγω συμπιεστότητας σκελετού του υδροφόρου και νερού και το νερό προέρχεται από το αποθηκευμένο στο ενεργό πορώδες
3. Η ακόρεστη ζώνη δεν επηρεάζει την πτώση στάθμης στο πηγάδι άντλησης

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \Gamma) \quad , \quad u_A = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad , \quad u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad , \quad \Gamma = \frac{r^2 K_v}{b^2 K_h}$$

Όπου στα παραπάνω:

Q η σταθερή παροχή άντλησης ($L^3/T, m^3/d$)

W(u_A, u_B, Γ) είναι η συνάρτηση του πηγαδιού (τιμές δίνονται από πίνακες).

h_o-h είναι η πτώση στάθμης (**L,m**)

r είναι η ακτινωτή απόσταση από το πηγάδι άντλησης (**L,m**)

T η μεταβιβαστικότητα του υπό πίεση υδροφόρου ($L^2/T, m^2/d$)

S ο συντελεστής αποθηκευτικότητας του υδροφόρου (%)

b είναι το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου στρώματος (**L,m**)

K_h είναι η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα (**L/T, m/d**).

K_v είναι η κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα (**L/T, m/d**).

t είναι ο χρόνος (**T, d**)

Προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφόρων

Ο προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφόρων οριζόντων T και S γίνεται με τις αντλητικές δοκιμασίες (**pumping tests**). Στις αντλητικές δοκιμασίες ένα πηγάδι αντλείται και ταυτόχρονα γίνεται η καταγραφή της πτώσης της στάθμης σ' ένα γειτονικό. Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται, πτώση στάθμης σε σχέση με το χρόνο και παροχή άντλησης, αξιοποιούνται με τη βοήθεια κατάλληλων μεθοδολογιών για τον προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφόρων. Για την χρήση των μεθοδολογιών που θα αναπτυχθούν παρακάτω σημειώνεται ότι τα πηγάδια άντλησης και παρατήρησης οφείλουν να διαπερνούν και να φέρουν φίλτρα σ' όλο το πάχος του υπό έρευνα υδροφόρου και μόνο σ' αυτόν.

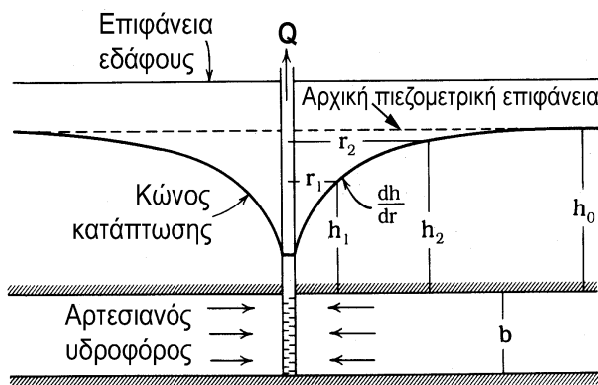
Ο προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφόρων οριζόντων είναι δυνατόν να γίνει κάτω από συνθήκες μόνιμης ροής (Steady-State Conditions) ή κάτω από συνθήκες μη μόνιμης ροής (Transient Conditions). Στην πρώτη περίπτωση μετά από ένα χρονικό διάστημα ο κώνος κατάπτωσης σταματά να διευρύνεται και επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ του νερού που εξέρχεται από το πηγάδι άντλησης και αυτού που εισέρχεται σ' αυτό.

Στην δεύτερη περίπτωση δεν επέρχεται ισορροπία μεταξύ εισερχομένων και αντλημένων ποσοτήτων νερού (συνθήκες μη ισορροπίας nonequilibrium conditions) και ο κώνος κατάπτωσης συνεχίζει να διευρύνεται μετά του χρόνου.

1. Μόνιμη αντνωτή ροή σε υπό πίεση υδροφόρο ορίζοντα (Sready radial flow in a confined aquifer)

Πέραν των παραπάνω τεθέντων προϋποθέσεων απαιτούνται επί πλέον:

1. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι υπό πίεση έχοντας μια εντελώς στεγανή οροφή και ένα εντελώς στεγανό δάπεδο.
2. Το πηγάδι αντλείται με μια σταθερή παροχή.
3. Λόγω μόνιμης ροής η πτώση στάθμης είναι σταθερή και ανεξάρτητη του χρόνου



Ο νόμος του **Darcy** για την περίπτωση γράφεται:

$$Q = (2\pi r b) K \left(\frac{dh}{dr} \right)$$

Απ' όπου προκύπτει

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

Στην περίπτωση που υπάρχουν δύο πηγάδια παρατήρησης από την ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης προκύπτει:

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \frac{Q}{2\pi T} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}$$

και η λύση της δίνει:

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \Leftrightarrow T = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

εξίσωση Thiem,

Όπου **στα παραπάνω:**

Q η σταθερή παροχή άντλησης ($L^3/T, m^3/d$)

T η μεταβιβαστικότητα του υπό πίεση υδροφόρου ($L^2/T, m^2/d$)

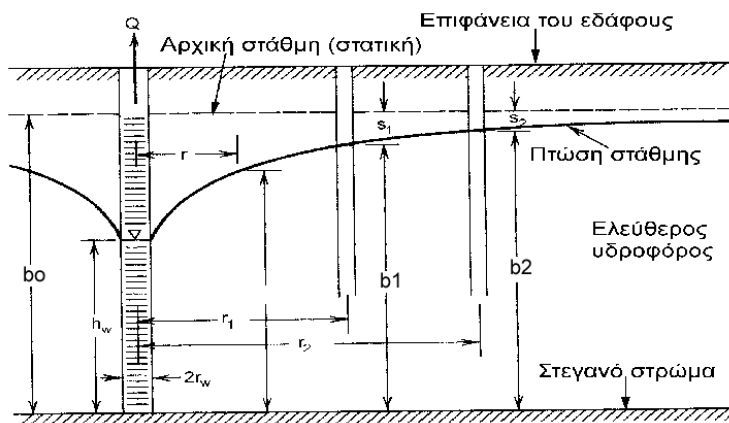
h₁ το υδραυλικό φορτίο σε απόσταση r_1 από το πηγάδι άντλησης (**L, m**)

h₂ το υδραυλικό φορτίο σε απόσταση r_2 από το πηγάδι άντλησης (**L,m**)

2. Μόνιμη αντνωτή ροή σε ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα (Sready radial flow in an unconfined aquifer)

Προϋποθέσεις

1. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ελεύθερος έχοντας ένα εντελώς στεγανό δάπεδο.
2. Το πηγάδι αντλείται με μια σταθερή παροχή.
3. Λόγω μόνιμης ροής η πτώση στάθμης είναι σταθερή και ανεξάρτητη του χρόνου



$$Q = (2\pi b)K \left(\frac{db}{dr} \right)$$

Όπου:

Q η παροχή άντλησης ($L^3/T, m^3/d$)

K η υδραυλική αγωγιμότητα του ελεύθερου υδροφόρου (**L/T, m/d**)

r η ακτινωτή απόσταση από τη κυκλική διατομή του πηγαδιού άντλησης (**L, m**)

b το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου (**L,m**)

db/dr ο συντελεστής υδραυλικής κλίσης (%)

Η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$Q = (2\pi b)K \left(\frac{db}{dr} \right) \Leftrightarrow bdb = \frac{Q}{2\pi K} \frac{dr}{r}$$

Απ' όπου δι' ολοκλήρωσεως για δύο πηγάδια παρατήρησης στις αποστάσεις r_1 και r_2 προκύπτει:

$$\int_{b_1}^{b_2} b db = \frac{Q}{2\pi K} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \Leftrightarrow b_2^2 - b_1^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

και

$$K = \frac{Q}{\pi(b_2^2 - b_1^2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Όπου:

Q η παροχή άντλησης (L^3/T , m^3/d)

K η υδραυλική αγωγιμότητα του ελεύθερου υδροφόρου (L/T , m/d)

b₁, b₂ τα κορεσμένα πάχη σε αποστάσεις r_1 και r_2 από το πηγάδι άντλησης (**L, m**)

3. Μή μόνιμη αντνωτή ροή σε υπό πίεση υδροφόρο ορίζοντα (Nonequilibrium radial radial flow in an confined aquifer).

Προϋποθέσεις: Ισχύουν ότι και στην περίπτωση της μόνιμης ροής

Ισχύουν η γνωστή σχέση του Theis:

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

και η

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Από την οποία προκύπτει:

$$S = \frac{4Tut}{r^2}$$

Όπου στα παραπάνω:

Q η παροχή άντλησης ($L^3/T, m^3/d$)

W(u) είναι η συνάρτηση του πηγαδιού άντλησης (αδιάστατη, τιμές δίνονται από πίνακες).

r είναι η απόσταση από το πηγάδι άντλησης έως το πηγάδι παρατήρησης (**L,m**)

T η μεταβιβαστικότητα του υπό πίεση υδροφόρου ($L^2/T, m^2/d$)

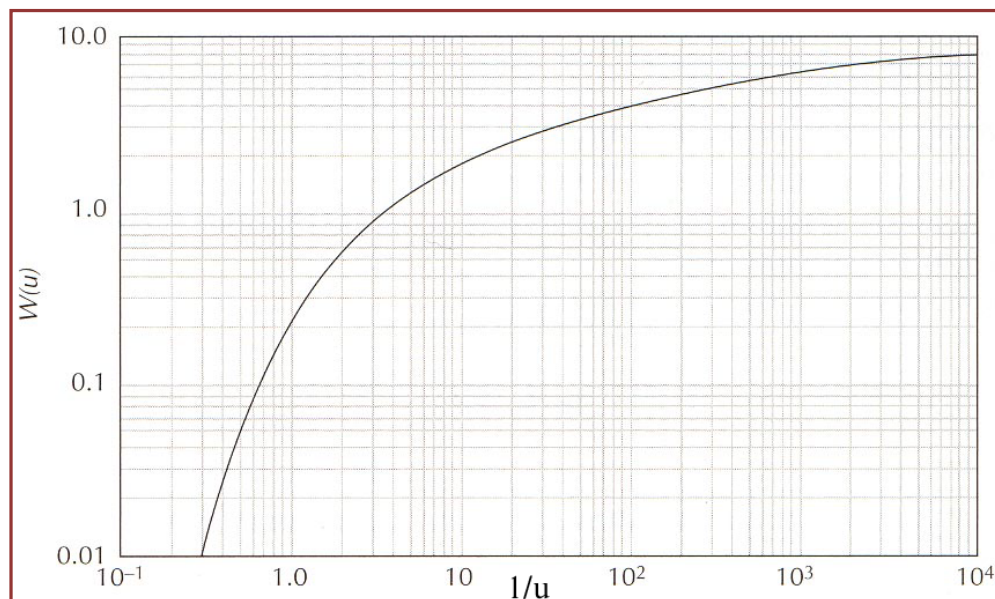
h_o-h η πτώση στάθμης (**L,m**)

t ο χρόνος από την αρχή των αντλήσεων (**T, d**)

S ο συντελεστής αποθηκευτικότητας του υδροφόρου (%)

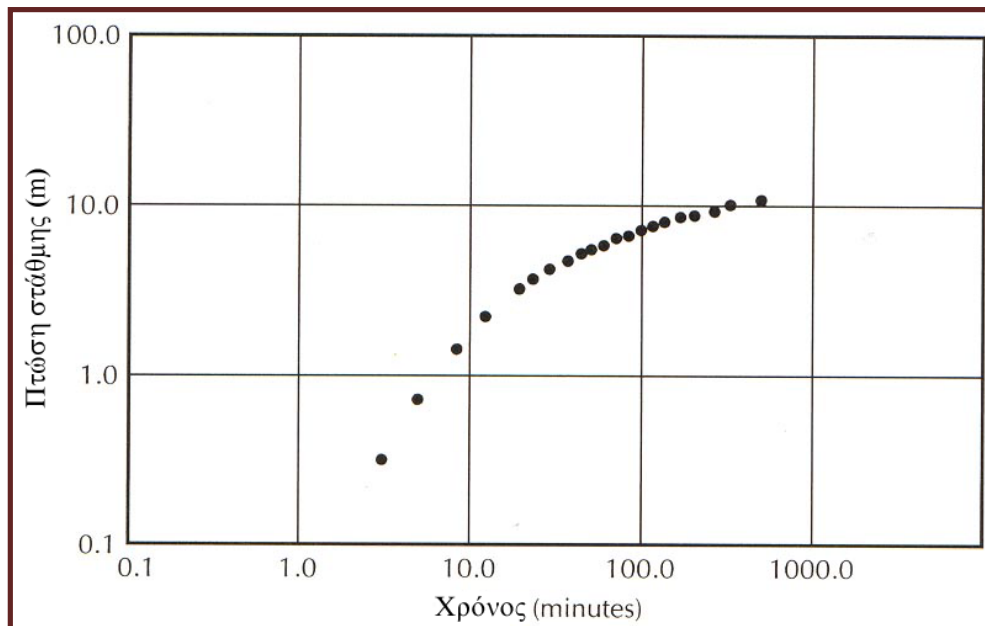
Η επίλυση γίνεται με τρόπο γραφικό που έχει δοθεί από τον Theis με την χρήση διαγραμμάτων που καλούνται **καμπύλη Theis** ή **τυπική ανάστροφη καμπύλη** ή **τυπική καμπύλη μη ισορροπίας**.

A: $1/u_A=1$ και $W(u)_A=1$

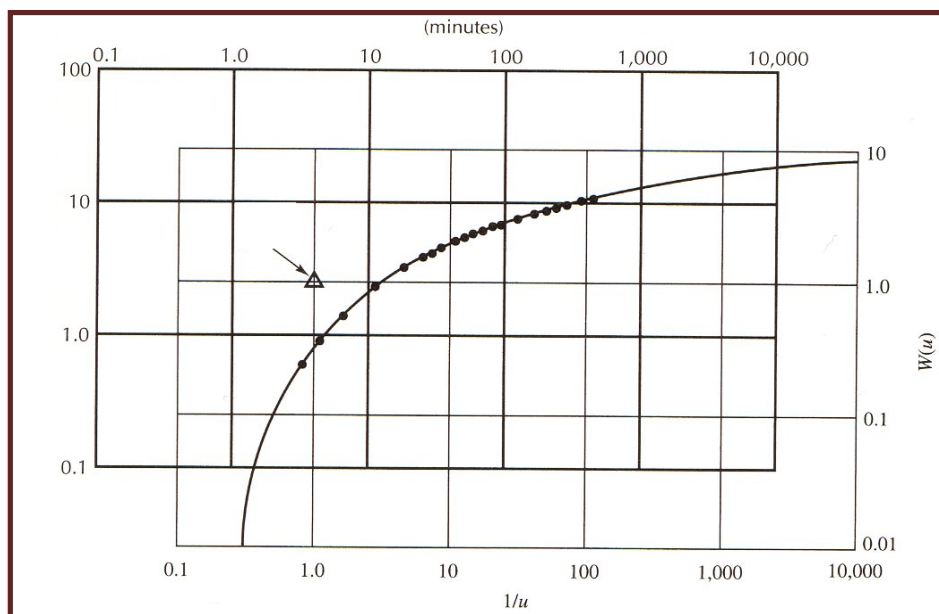


Για την χρήση του παραπάνω διαγράμματος απαιτείται:

Η κατασκευή της πειραματικής καμπύλης Theis όπως παρακάτω:



1. Η Αλληλεπίθεση των δυο προηγούμενων διαγραμμάτων όπως παρακάτω:



Από την αλληλεπίθεση των δύο διαγραμμάτων προκύπτει μια **ομάδα τιμών** **$W(u)$** , **$1/u$** , **(h_0-h)** , **t** .

2. Τελικό βήμα, υπολογισμός των υδραυλικών παραμέτρων T και S:

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \Leftrightarrow T = \frac{Q}{4\pi(h_o - h)} W(u) \quad S = \frac{4Tut}{r^2}$$

Με βάση τις τιμές $W(u)$, $1/u$, $(h_o - h)$, t , υπολογίζονται οι υδραυλικές παράμετροι T και S από τους παραπάνω τύπους.

4. Μή μόνιμη ακτινωτή ροή σε υπό πίεση υδροφόρο ορίζοντα (Nonequilibrium radial flow in an confined aquifer) Επίλυση με τη μέθοδο Cooper-Jacob (Πτώση στάθμης συναρτήσει του χρόνου)

Οι C.E.Jacob και H.H Cooper παρατήρησαν ότι μετά από την εκκίνηση μιας άντλησης στην εξίσωση:

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots \right]$$

οι όροι που περιέχουν τις δυνάμεις του u γίνονται αμελητέοι επειδή το u γίνεται πολύ μικρό. Έτσι η παραπάνω εξίσωση με την προϋπόθεση ότι $u < 0.05$ μπορεί να γραφεί:

$$T = \frac{Q}{4\pi(h_o - h)} \left[-0.5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right) \right]$$

ή

$$T = \frac{Q}{4\pi(h_o - h)} \left[-\ln(1.78) - \ln\left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right) \right]$$

ή

$$T = \frac{Q}{4\pi(h_o - h)} \ln\left(\frac{4Tt}{1.78r^2 S}\right) \quad \text{ή} \quad T = \frac{2.3Q}{4\pi(h_o - h)} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right)$$

Εάν οι τεθείσες προϋποθέσεις ισχύουν δηλαδή αυτό μπορεί να συμβαίνει για μεγάλο t και μικρό r , η παραπάνω εξίσωση μπορεί να προβληθεί σαν μια ευθεία γραμμή σ' ένα ημιλογαριθμικό χαρτί όπου η πτώση στάθμης (h_o-h) είναι συνάρτηση του χρόνου t . Τότε για ένα λογαριθμικό κύκλο προσδιορίζονται τα T και S από τις σχέσεις:

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta(h_o - h)}$$

$$S = \frac{2.25Tt_o}{r^2}$$

(βλέπε και σχήμα)

Όπου:

Q η σταθερή παροχή άντλησης ($L^3/T, m^3/d$)

$s = (h_o-h)$ είναι η πτώση στάθμης στο πηγάδι παρατήρησης (L, m)

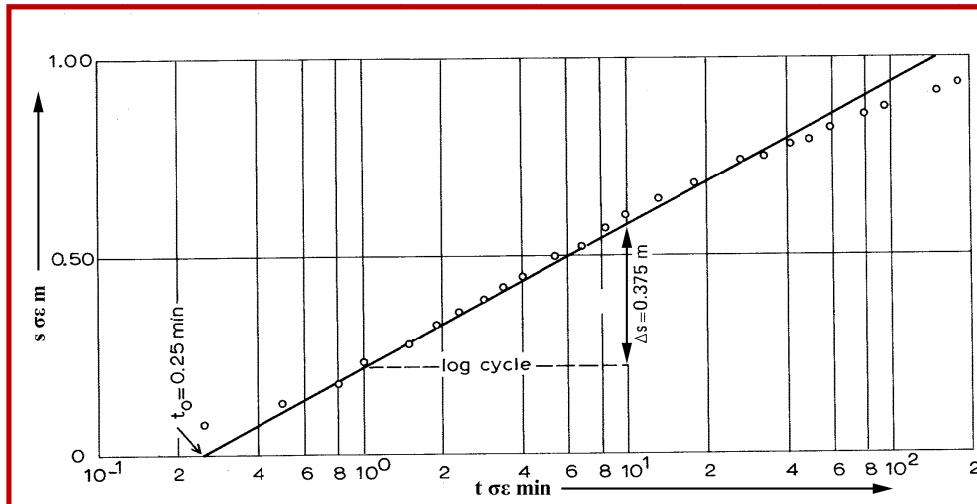
$\Delta s = \Delta(h_o-h)$ είναι η πτώση στάθμης ανά λογαριθμικό κύκλο (L, m)

r είναι η ακτινωτή απόσταση από το πηγάδι άντλησης (L, m)

T η μεταβιβαστικότητα του υπό πίεση υδροφόρου ($L^2/T, m^2/d$)

S ο συντελεστής αποθηκευτικότητας του υδροφόρου (%)

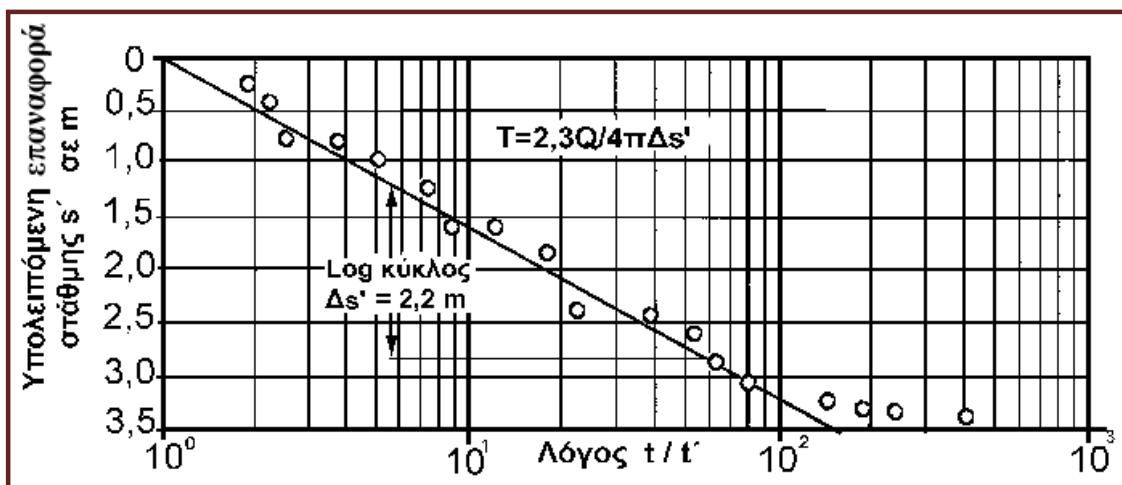
t_o είναι ο χρόνος για τον οποίο η ευθεία τέμνει τον άξονα των χρόνων (T, d)



Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί **και όταν δεν υπάρχει πηγάδι παρατήρησης!** Επειδή όμως στη γεώτρηση υπάρχουν απώλειες φορτίου λόγω κατασκευαστικών δυσκολιών, ο συντελεστής εναποθήκευσης δεν θα πρέπει να υπολογίζεται. Επειδή επί πλέον η είσοδος του νερού στη γεώτρηση δεν είναι απολύτως γραμμική, παρότι για τον σκοπό αυτό συνήθως λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα, χρησιμοποιούνται αντί για την πτώση στάθμης τα αποτελέσματα της υπολειπόμενης στάθμης κατά την αντίστροφη διαδικασία της μέτρησης της **επαναφοράς της στάθμης** στη γεώτρηση άντλησης μετά το τέλος της άντλησης.

Σημειώνεται τέλος ότι οι πρώτες μετρήσεις πρέπει να αποφεύγονται επειδή κατά την έναρξη των αντλήσεων οι πρώτες ποσότητες νερού προέρχονται από το αποθηκευμένο στην κοιλότητα της γεώτρησης νερό.

5. Μή μόνιμη ακτινωτή ροή σε υπό πίεση υδροφόρο ορίζοντα (Nonequilibrium radial flow in an confined aquifer) Επίλυση με τη μέθοδο Cooper-Jacob (Υπολειπόμενη Επαναφορά στάθμης συναρτήσει του λόγου t/t')



Γίνεται εκτίμηση του T από τα στοιχεία της γεώτρησης άντλησης εάν δεν υπάρχει πιεζόμετρο και την σχέση:

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta(h_o - h)}$$

Όπου:

Q η σταθερή παροχή άντλησης ($L^3/T, m^3/d$)

$s' = h_o - h$ είναι η επαναφορά στάθμης στη γεώτρηση άντλησης (L, m)

$\Delta s' = \Delta(h_o - h)$ είναι η επαναφορά στάθμης ανά λογαριθμικό κύκλο (L, m)

r είναι η ακτινωτή απόσταση από το πηγάδι άντλησης (L, m)

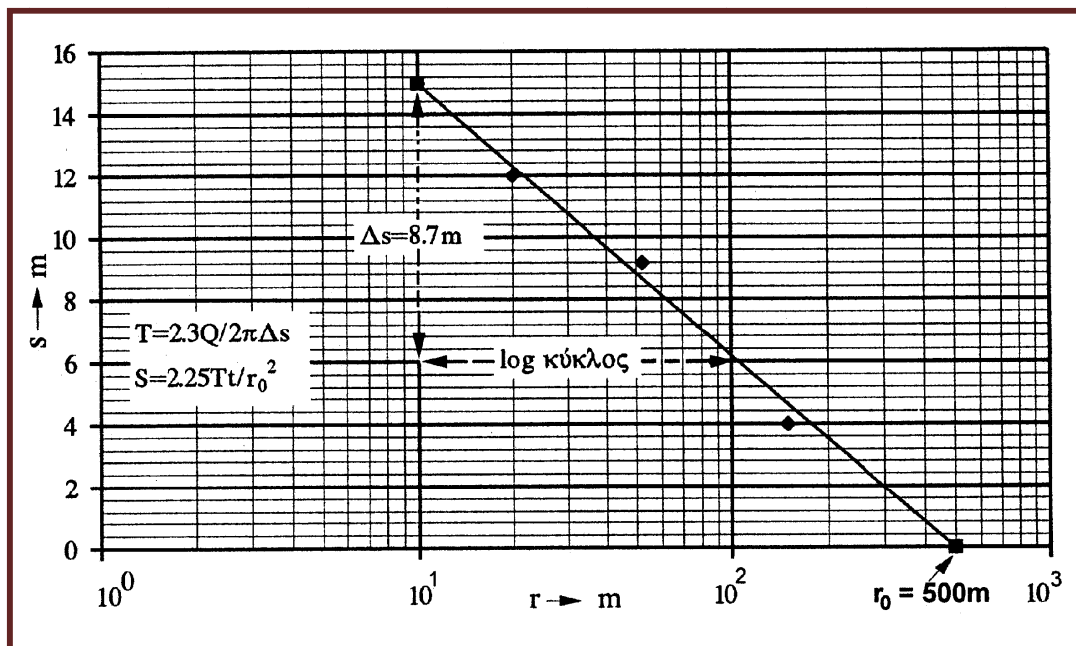
T η μεταβιβαστικότητα του υπό πίεση υδροφόρου ($L^2/T, m^2/d$)

6. Μή μόνιμη αντνωτή ροή σε υπό πίεση υδροφόρο ορίζοντα (Nonequilibrium radial flow in an confined aquifer) Επίλυση με τη μέθοδο Cooper-Jacob (Πτώση στάθμης συναρτήσει της απόστασης)

Εάν υπάρχουν πολλά πηγάδια παρατήρησης και για συγκεκριμένους χρόνους ταυτόχρονες μετρήσεις στάθμης, τότε είναι δυνατόν η επίλυση της εξίσωσης να γίνει γραφικά με τη χρήση ημιλογαριθμικού χαρτιού στο οποίο η πτώση στάθμης είναι συνάρτηση της απόστασης.

$$T = \frac{Q}{4\pi(h_o - h)} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right)$$

Για r_o που προκύπτει από την τομή της ευθείας με τον άξονα της απόστασης και για πτώση στάθμης που αντιστοιχεί σ' ένα λογαριθμικό κύκλο ισχύουν οι σχέσεις:



$$T = \frac{2.3Q}{2\pi\Delta(h_o - h)}$$

$$S = \frac{2.25Tt}{r_o^2}$$

Όπου:

Q η σταθερή παροχή άντλησης ($L^3/T, m^3/d$)

s = (h_o-h) είναι η πτώση στάθμης στο πηγάδι παρατήρησης (**L,m**)

Δs=Δ(h_o-h) είναι η πτώση στάθμης ανά λογαριθμικό κύκλο (**L,m**)

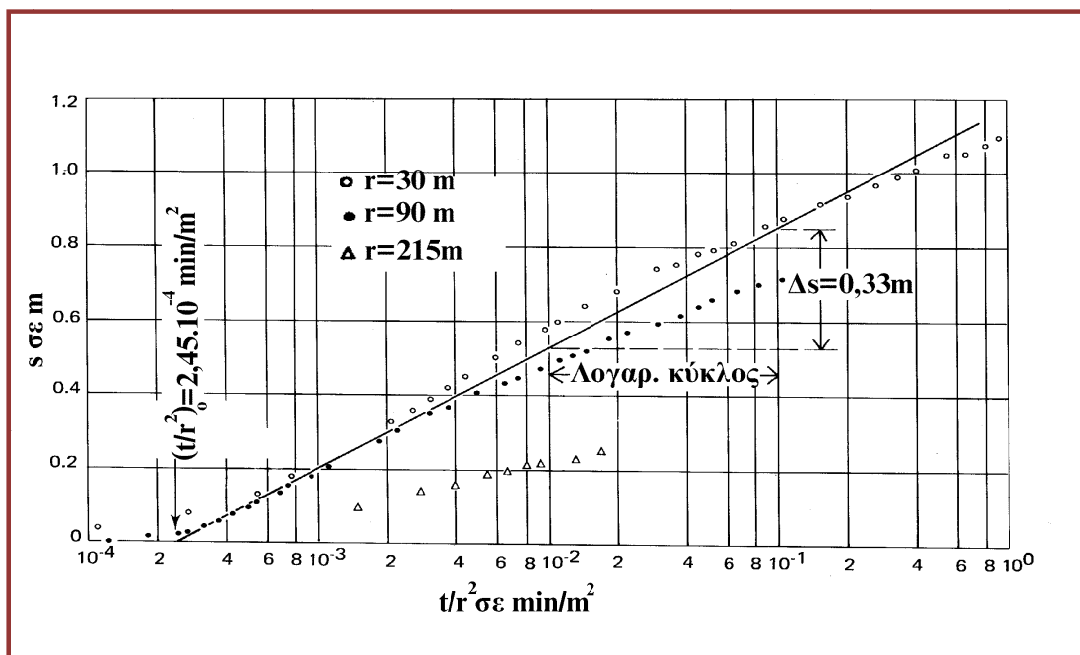
r είναι η ακτινωτή απόσταση από το πηγάδι άντλησης (**L,m**)

T η μεταβιβαστικότητα του υπό πίεση υδροφόρου ($L^2/T, m^2/d$)

S ο συντελεστής αποθηκευτικότητας του υδροφόρου (%)

r_o είναι η απόσταση για την οποία η ευθεία τέμνει τον άξονα των αποστάσεων (**T, d**)

7. Μη μόνιμη ακτινωτή ροή σε υπό πίεση υδροφόρο ορίζοντα (Nonequilibrium radial flow in an confined aquifer) Επίλυση με τη μέθοδο Cooper-Jacob (Πτώση στάθμης συναρτήσει της ποσότητας $(t/r_o)^2$.



$$T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta(h_o - h)}$$

$$S = 2.25T\left(\frac{t}{r^2}\right)_o$$

Όπου:

Q η σταθερή παροχή άντλησης ($L^3 / T, m^3 / d$)

s = (h_o-h) είναι η πτώση στάθμης στο πηγάδι παρατήρησης (**L, m**)

Δs=Δ(h_o-h) είναι η πτώση στάθμης ανά λογαριθμικό κύκλο (**L, m**)

r είναι η ακτινωτή απόσταση από το πηγάδι άντλησης (**L, m**)

T η μεταβιβαστικότητα του υπό πίεση υδροφόρου ($L^2 / T, m^2 / d$)

S ο συντελεστής αποθηκευτικότητας του υδροφόρου (%)

(t/r²)_o είναι η τομή της ευθείας με τον άξονα **(t/ r²)(T/ L²)**

8. Μή μόνιμη ακτινωτή ροή σε ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα

(Nonequilibrium radial flow in an unconfined aquifer)

Βασισμένος στις αρχικές γενικές τεθείσες προϋποθέσεις και σε αυτές που ισχύουν για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες ο Neuman (1975) έδωσε μια γραφική μέθοδο υπολογισμού των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφόρων οριζόντων. Η εξίσωση ροής για ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα είναι:

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \Gamma) , \quad u_A = \frac{r^2 S}{4Tt} , \quad u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt} , \quad \Gamma = \frac{r^2 K_v}{b^2 K_h}$$

Όπου στα παραπάνω:

Q η σταθερή παροχή άντλησης ($L^3 / T, m^3 / d$)

W(u_A, u_B, Γ) είναι η συνάρτηση του πηγαδιού άντλησης (τιμές από πίνακες).

h_o-h είναι η πτώση στάθμης (**L, m**)

r είναι η ακτινωτή απόσταση από το πηγάδι άντλησης (**L, m**)

T η μεταβιβαστικότητα του υπό πίεση υδροφόρου ($L^2 / T, m^2 / d$)

S ο συντελεστής αποθηκευτικότητας του υδροφόρου (%)

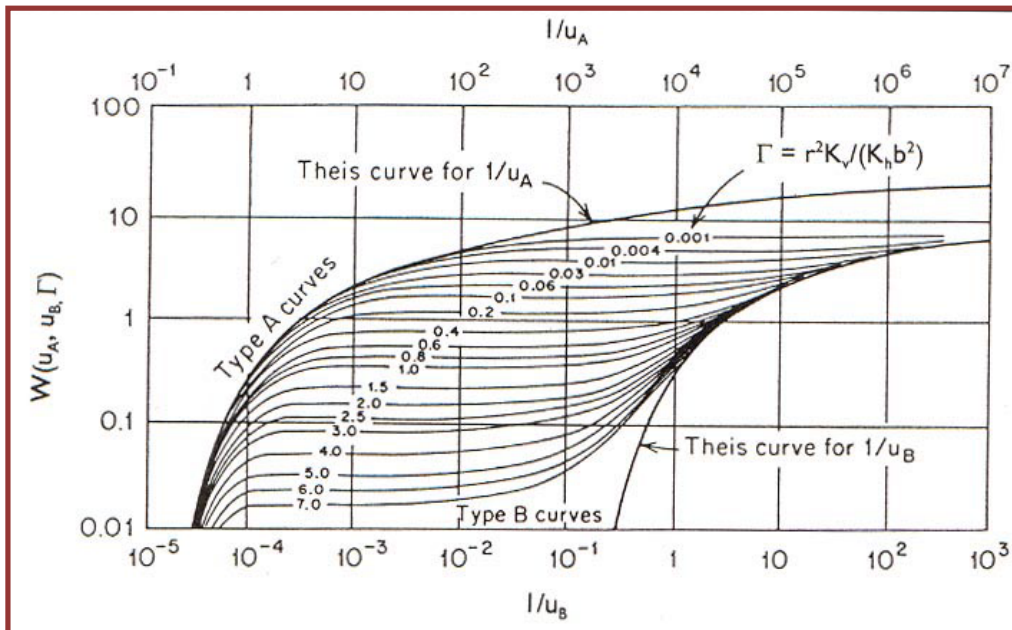
S_y η ειδική απόδοση (%)

b είναι το αρχικά κορεσμένο πάχος του υδροφόρου στρώματος (**L, m**)

K_h είναι η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα (**L/ T, m/ d**).

K_v είναι η κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα (**L/T, m/ d**).

t είναι ο χρόνος (**T, d**)



Για την γραφική επίλυση χρησιμοποιούνται δύο ομάδες καμπυλών. Η πρώτη ομάδα (καμπύλες τύπου A, Type A curves) χρησιμοποιείται για τα δεδομένα των πρώτων λεπτών (πρώιμες τιμές πτώσης στάθμης) των αντλήσεων που το νερό απελευθερώνεται από τον υδροφόρο στιγμιαία. Στη συνέχεια λόγω κατακόρυφης ροής υπάρχει διαφοροποίηση από την μόνιμη ροή που αναφέρεται στη πρώτη ομάδα των καμπυλών και τότε χρησιμοποιείται η δεύτερη ομάδα καμπυλών (καμπύλες τύπου B, Type B curves) για τα δεδομένα που ακολουθούν (όψιμες τιμές). Στο παραπάνω σχήμα οι καμπύλες των δύο τύπων αναφέρονται σε πλήρη πηγάδια που έχουν διατηρήσει όλο το πάχος των υδροφόρων.

Για την χρήση των καμπυλών αυτών χρησιμοποιείται η παρακάτω τεχνική:

1. Γίνεται εναπόθεση της πειραματική καμπύλης με τις θεωρητικές, μετακινώντας τους άξονες παράλληλα, με τρόπο ώστε οι πρώιμες τιμές των αντλήσεων να ταιριάζουν εντελώς με τις καμπύλες τύπου A. Όταν αυτό επιτευχθεί σημειώνονται οι τιμές των $W(u_A, \Gamma)$, $1/u_A$, t , και $h_0 - h$. Η τιμή του Γ προκύπτει από τις τυπικές καμπύλες. Από την χρήση των τιμών αυτών και των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει η τιμή T .

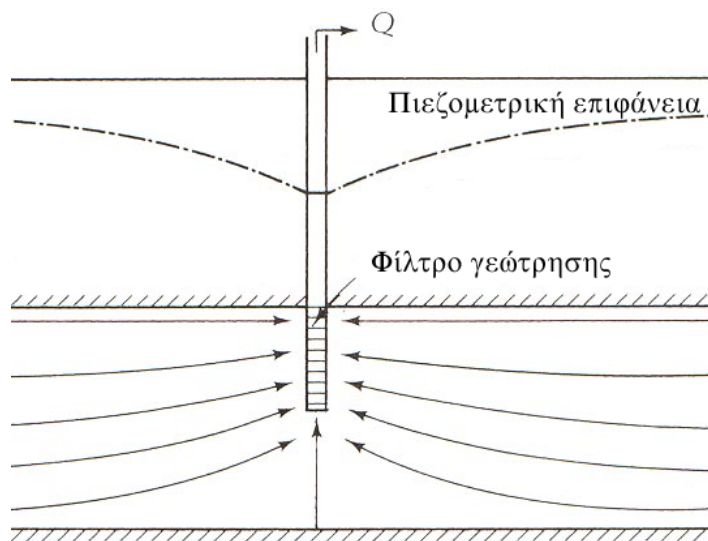
2. Οι όψιμες τιμές πτώσης στάθμης αποτίθενται όπως παραπάνω στη καμπύλη τύπου Β. Ενεργώντας όπως και προηγούμενα καταλήγουμε στο προσδιορισμό μιας νέας τιμής T η οποία δεν θα πρέπει να διαφέρει πολύ από την ήδη προσδιορισθείσα .
3. Η τιμή της οριζόντιας Υδραυλικής αγωγιμότητας (K_h) προσδιορίζεται από τη σχέση: $K_h = T/b$ ενώ της κατακόρυφης (K_v) από τη σχέση: $K_v = [(\Gamma b^2 K_h)/(r^2)]$.

Επειδή πολλές φορές η πτώση στάθμης είναι μεγάλη σε σχέση με το κορεσμένο πάχος των υδροφόρων και οι τεθείσες για την χρήση των προηγούμενων μεθοδολογιών προϋποθέσεις δεν τηρούνται τότε γίνεται διόρθωση της πτώσης στάθμης με την χρήση της παρακάτω σχέσης:

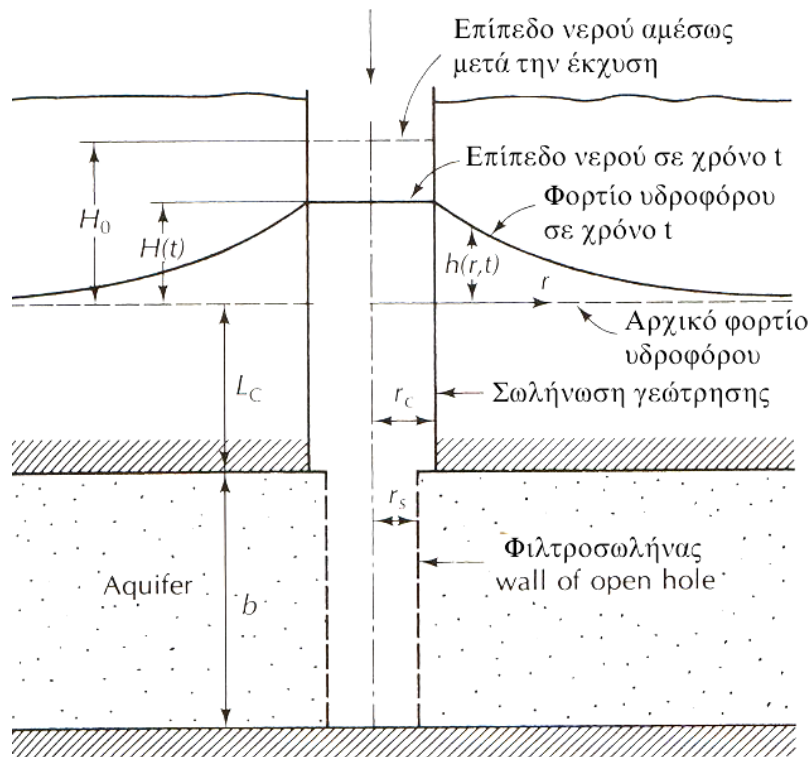
$$(h_o - h)' = (h_o - h) - [(h_o - h)^2 / 2b]$$

Ατελή έργα:

(Ροή σε τρεις και όχι σε δύο διαστάσεις. Ειδική αντιμετώπιση)

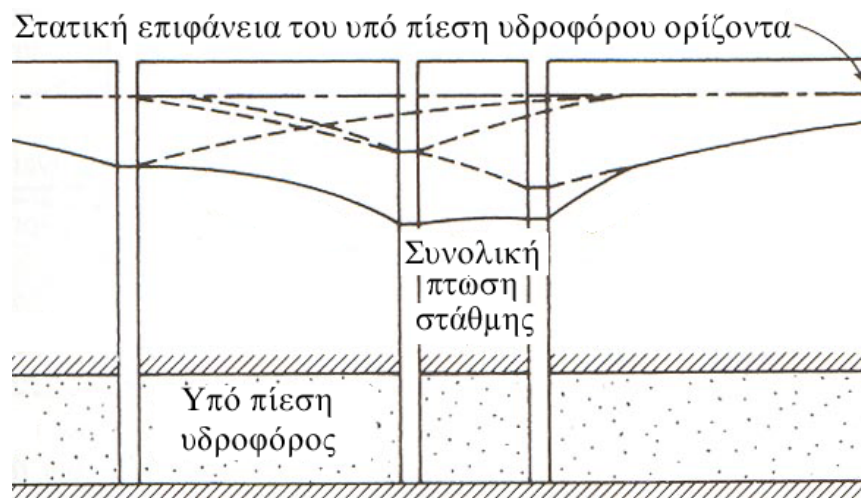


Δοκιμασίες στιγμιαίας φόρτισης (Slug tests)



Μέθοδος Cooper-Bredhoeft - Papadopoulos
Μέθοδος Hvorslev
Μέθοδος Bower και Rice

Διαμόρφωση του κώνου κατάπτωσης από πολλαπλές αντλήσεις



Επίδραση επί των αντλήσεων των θετικών και αρνητικών υδρογεωλογικών συνόρων

