

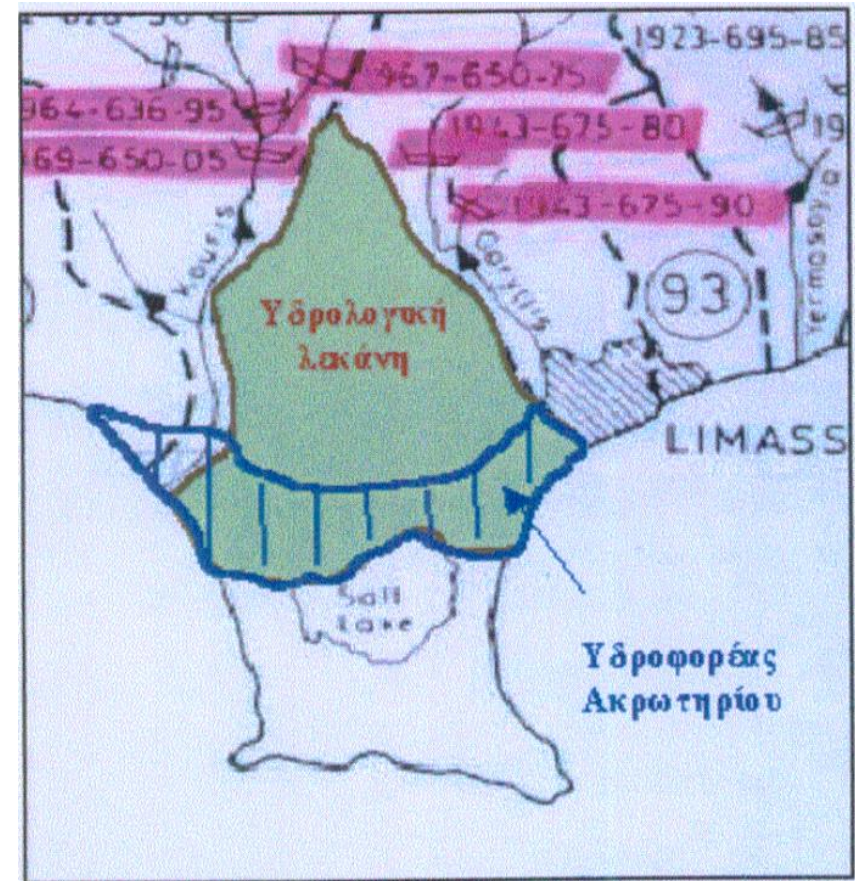
A photograph of a desert landscape. In the foreground, there is a circular stone well or cistern, built with rough, stacked stones. The well is partially filled with water. The ground around the well is sandy and dry. In the background, there are several palm trees and a small signpost with Arabic text. The sky is clear and blue.

Διαχείριση Υδατικών Πόρων

Εβδ.9: Υπόγεια Νερά

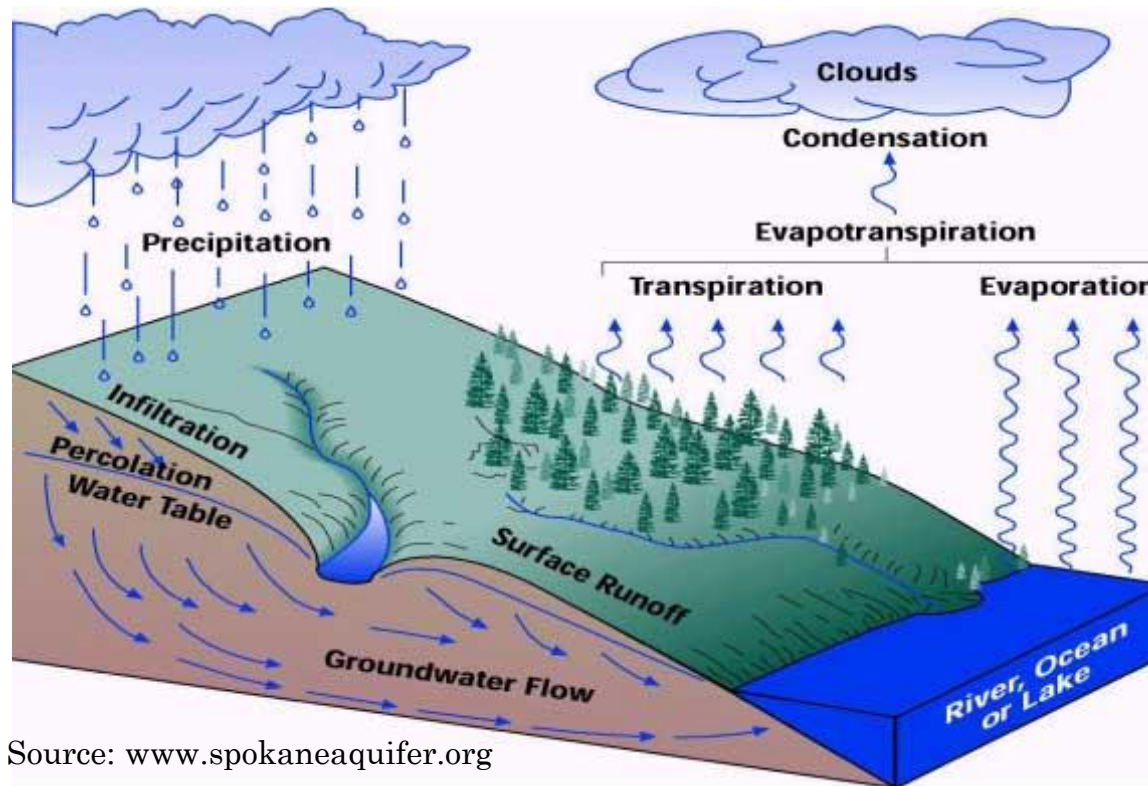
Περιεχόμενα

1. Γενική Εισαγωγή
2. Πορώδες
3. Ειδική απόδοση
4. Νόμος Darcy
5. Εκτίμηση αποθηκευμένου όγκου
6. Εκτίμηση ασφαλούς απόδοσης
7. Υδροφορέας Ακρωτηρίου



Υδροφορείς

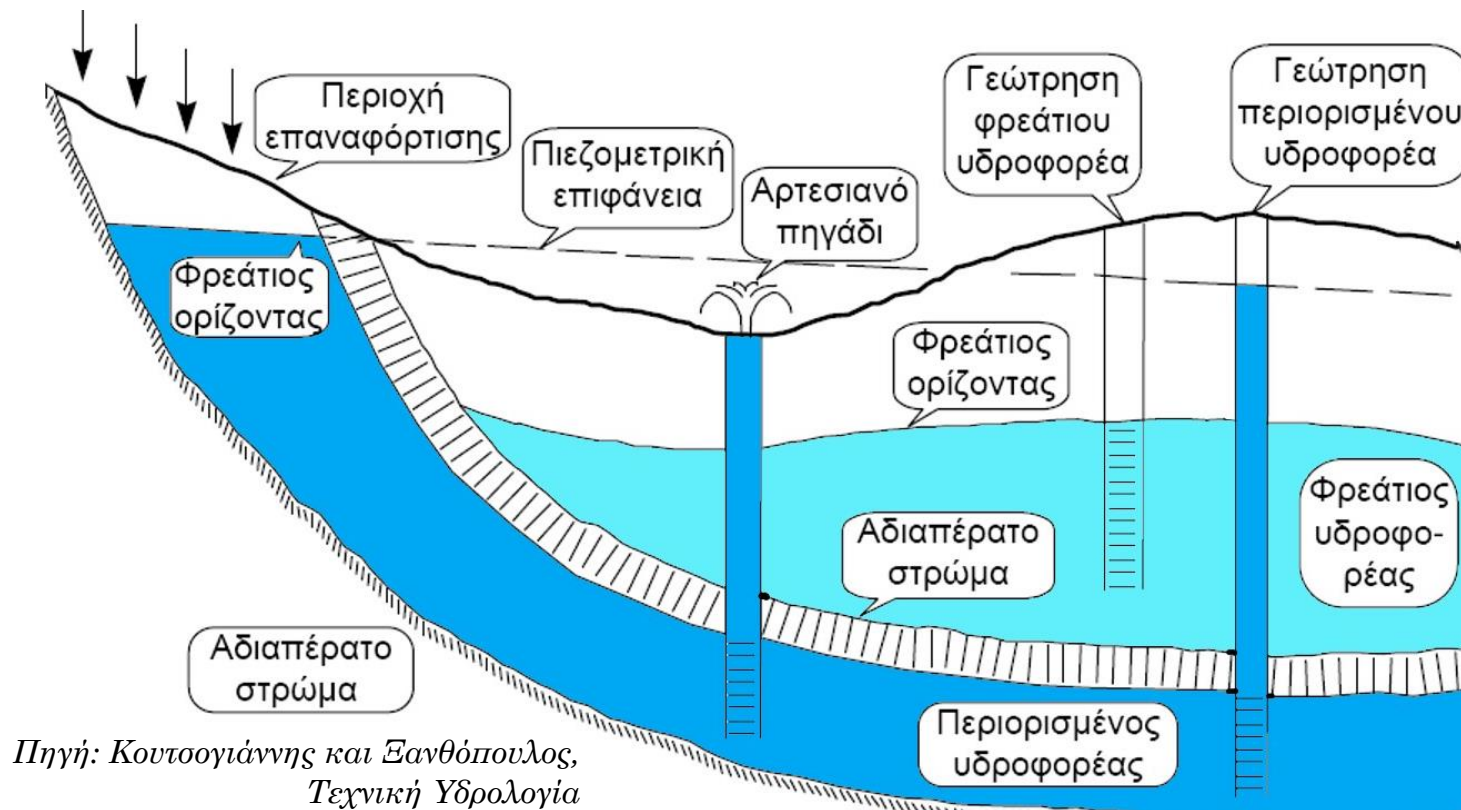
Υδροφορέας (aquifer): Γεωλογικός σχηματισμός που περιέχει νερό και είναι επαρκώς διαπερατός για να μπορεί να γίνει απόληψη και χρήση του νερού. Τέτοιοι σχηματισμοί είναι συνήθως εδαφικά στρώματα (άμμων, χαλικιών, κροκάλων) ή έντονα ρηγματωμένα πετρώματα ή καρστικά πετρώματα.



Source: www.spokaneaquifer.org

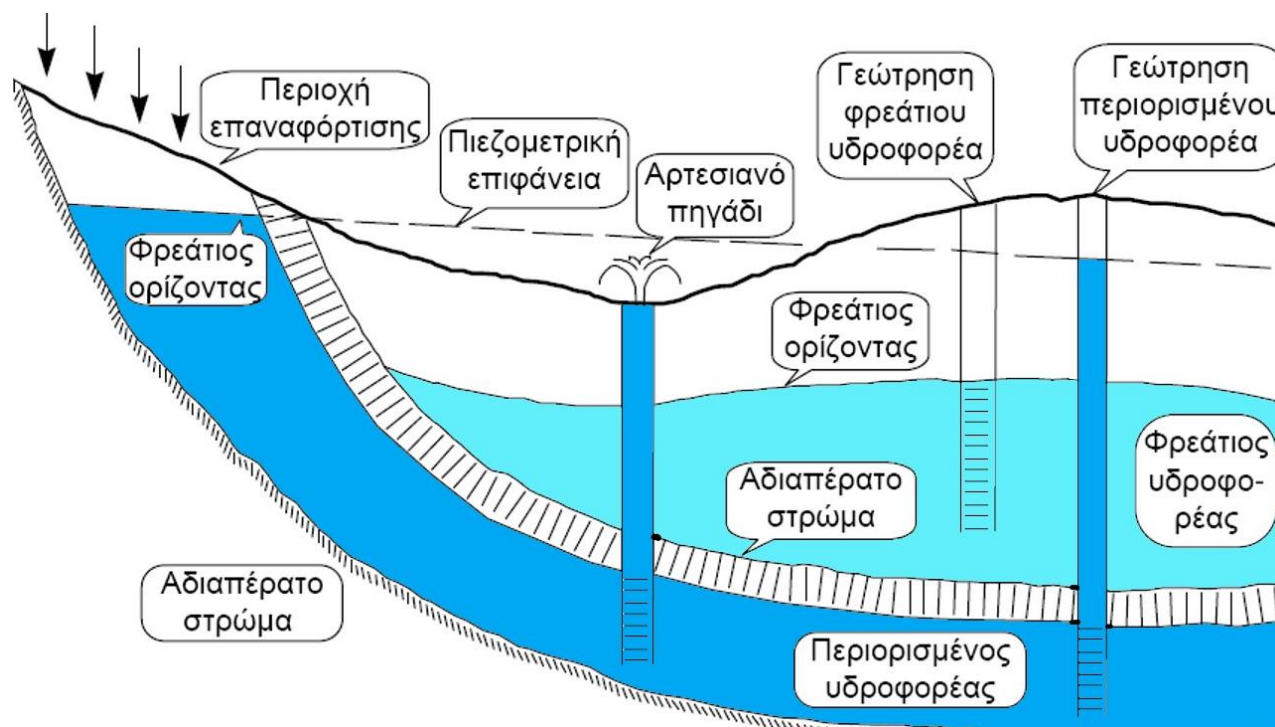
Τύποι Υδροφορέων

1. Φρεάτιοι Υδροφορείς (unconfined aquifers): Έχουν ως κάτω όριο ένα αδιαπέρατο γεωλογικό στρώμα ενώ το άνω όριο τους είναι η ελεύθερη επιφάνεια του νερού (φρεάτιος ορίζοντας). Κυανό χρώμα στο σχήμα.



Τύποι Υδροφορέων

2. Περιορισμένοι Υδροφορείς (confined aquifers): Υπάρχει αδιαπέρατο γεωλογικό στρώμα πάνω και κάτω από τον υδροφόρα. Το νερό βρίσκεται υπό πίεση.



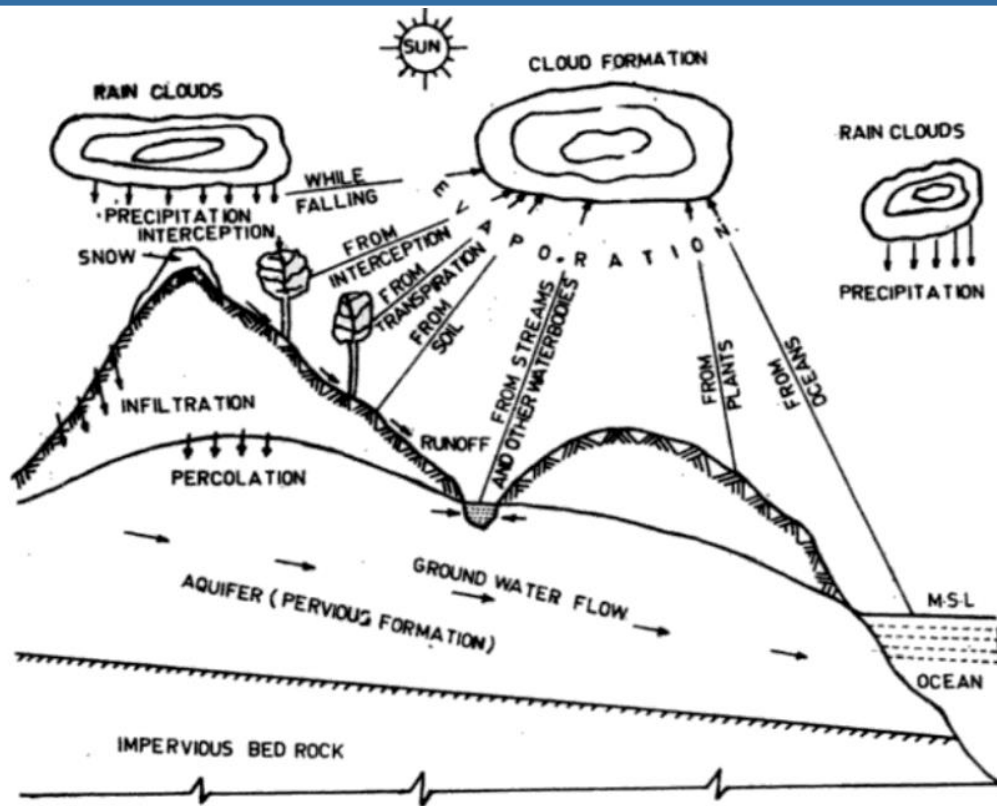
Πηγή: Κουτσογιάννης,
Τεχνική Υδρολογία

Αρτεσιανά πηγάδια: Είναι γεωτρήσεις σε θέσεις όπου το έδαφος είναι χαμηλότερα από τον φρεάτιο ορίζοντα του περιορισμένου υδροφόρα. Το νερό φτάνει μόνο του στην επιφάνεια. Δεν χρειάζεται να το αντλήσουμε.

Υπόγεια νερά - Πλεονεκτήματα

- 1. Απλή λύση για ύδρευση/άρδευση.** Η χρήση υπογείου νερού είναι μια σχετικά οικονομική και γρήγορη λύση για την εξυπηρέτηση των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών κυρίως μικρών περιοχών.
- 2. Δεν απαιτούνται έργα αποθήκευσης.** Οι υδροφορείς συμπεριφέρονται ως ταμιευτήρες υπερετήσιας ρύθμισης, με συνέπεια να μην απαιτείται η κατασκευή μεγάλων έργων αποθήκευσης (φράγματα, λιμνοδεξαμενές, δεξαμενές) για την αξιοποίηση των υπόγειων νερών.
- 3. Δεν απαιτούνται μεγάλα έργα μεταφοράς.** Όταν οι υδροφορείς αναπτύσσονται κάτω από τις εκτάσεις όπου γίνεται η κατανάλωση, αποφεύγεται η κατασκευή μεγάλων έργων μεταφοράς.
- 4. Είναι δυνατή η σταδιακή ανάπτυξη.** Οι γεωτρήσεις μπορούν να κατασκευάζονται σταδιακά ανάλογα με την αύξηση των αναγκών. Επομένως περιορίζεται το αρχικό κόστος της επένδυσης.
- 5. Υψηλή ποιότητα νερού.** Αν ο υδροφορέας δεν έχει ρυπανθεί (πχ. φυτοφάρμακα) η ποιότητα του νερού είναι πολύ υψηλή και δεν απαιτείται σημαντική επεξεργασία.

Ποσότητα υπόγειων υδάτων στη Γη



Ωκεανοί	97,2 %
Πάγοι και παγετώνες	2,2 %
Υπόγεια Νερά	0,6 %
Επιφανειακά νερά	0,01 %
Ατμόσφαιρα	0,001%

Υπερετήσιος μέσος όρος

Τεράστιες ποσότητες νερού τις οποίες όμως δεν μπορούμε να αξιοποιήσουμε επειδή:

- (1) Δεν βρίσκονται σε πορώδεις σχηματισμούς.
- (2) Βρίσκονται σε μεγάλο βάθος
- (3) Ο ρυθμός αναπλήρωσης τους είναι αργός (περιβαλλοντικές συνέπειες)

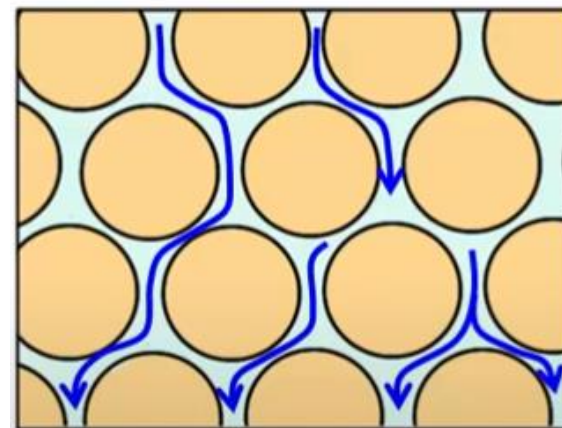
Πορώδεις σχηματισμοί

Πορώδεις σχηματισμοί: Εδαφικά στρώματα που επιτρέπουν τη διείσδυση και την κυκλοφορία του νερού μέσα από την μάζα τους. Μπορούν δηλαδή να λειτουργούν ως ταμιευτήρες (το νερό αποθηκεύεται στους πόρους) και ως μέσο μεταφοράς του νερού (το νερό μεταφέρετε μέσα από τους πόρους).

Η ποσότητα νερού που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα υδροφορέα εξαρτάται **από το πορώδες (n)** του εδαφικού σχηματισμού.

Η ποσότητα νερού που μπορεί να αποδώσει ένας υδροφορέας εξαρτάται **από την υδραυλική αγωγιμότητα (k)** του εδαφικού σχηματισμού.

Ερώτηση: Τι είναι το πορώδες (n);

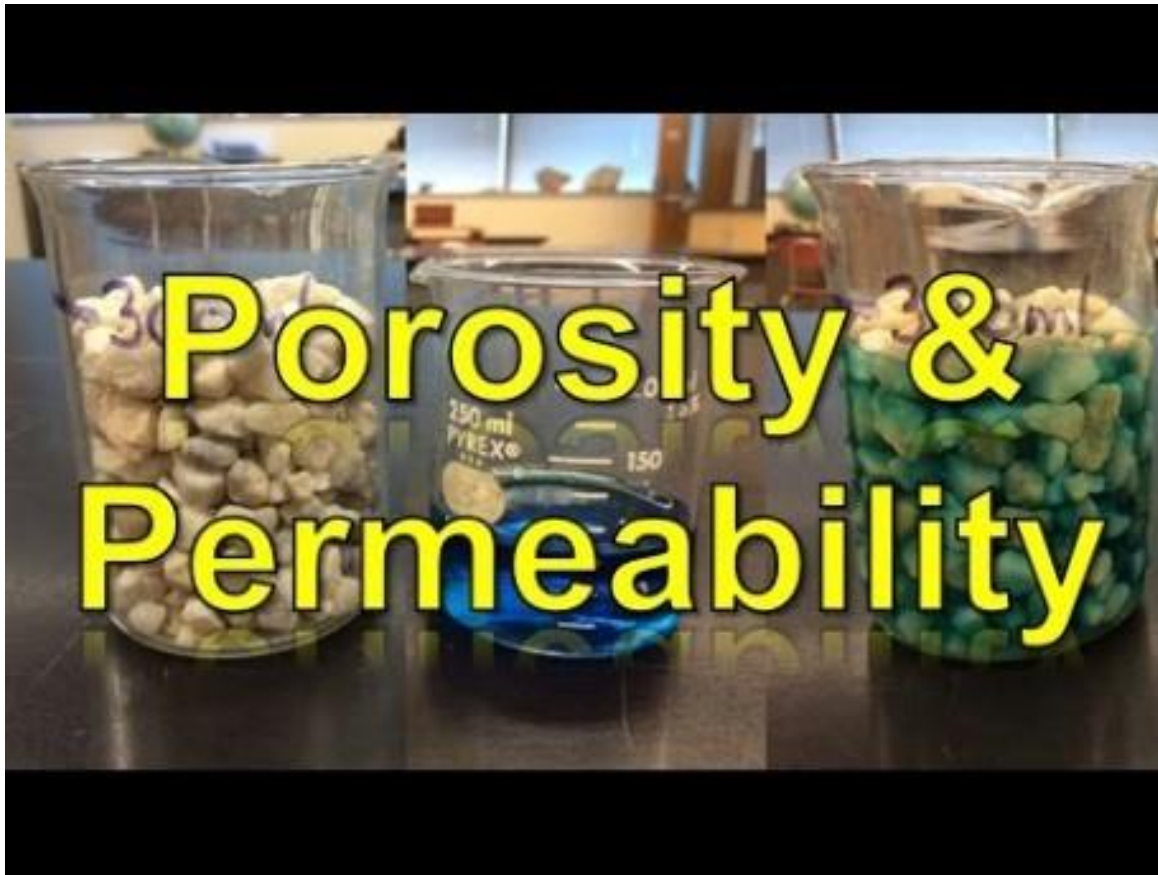


*Πηγή: Κουτσογιάννης
και Ξανθόπουλος,
Τεχνική Υδρολογία*

Πορώδες

Πορώδες (porosity): Ο λόγος του όγκου των κενών (V_v) προς τον συνολικό όγκο εδάφους (V_T)

$$n = \frac{V_v}{V_T}$$



Πηγή (Playback Link):

<https://www.youtube.com/embed/8mfBomrw0rs?start=78&feature=oembed>

Πορώδες

Απλή άσκηση

Έχουμε μια πλαστική δεξαμενή με όγκο 1 m^3 η οποία είναι γεμάτη με άμμο. Ξεκινούμε και προσθέτουμε νερό στην δεξαμενή μέχρι να γεμίσουν τα κενά της άμμου και να φτάσει το νερό στην άνω στάθμη της δεξαμενή (μόλις πριν υπερχειλίσει). Προσθέσαμε συνολικά 330 L νερό. Πόσο είναι το πορώδες της συγκεκριμένης άμμου;

$$V_V = 330 \text{ L} = 0.330 \text{ m}^3$$

$$V_T = 1 \text{ m}^3$$

$$\text{Πορώδες: } n = V_V / V_T = 0.330/1 = 33\%$$

Ειδική Απόδοση

Ειδική Απόδοση (specific yield): Ο μέγιστος όγκος νερού που μπορεί να αποστραγγίσει (V_y) από πλήρως κορεσμένο έδαφος προς τον συνολικό όγκο του εδάφους (V_T)

$$S_y = \frac{V_y}{V_T}$$

Μια ποσότητα νερού συγκρατείται από τριχοειδή και άλλα φαινόμενα και δεν αποστραγγίζει με την βαρύτητα. Εννοείτε ότι στο εργαστήριο μπορούμε να την αποστραγγίσουμε (oven drying).

Άσκηση

Ένας φρεάτιος υδροφορέας έχει επιφάνεια 6 km^2 . Στον υδροφορέα λειτουργεί σύστημα γεωτρήσεων για την άρδευση της ευρύτερης περιοχής. Μετά από άντληση $3,5 \text{ MCM}$ η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα ήταν $2,5 \text{ m}$. Πόση είναι η ειδική απόδοση;

Ειδική Απόδοση – Άσκηση

Example 9.2. When 3.68 million m^3 of water was pumped out from an unconfined aquifer of 6.2 km^2 areal extent, the water table was observed to go down by 2.6 m. What is the specific yield of the aquifer ? During a monsoon season if the water table of the same aquifer goes up by 10.8 m what is the volume of recharge ?

Solution.

$$\text{Water released from the aquifer} = (6.2 \times 10^6) \times 2.6 \times s_y$$

$$\text{Water pumped out} = 3.68 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$\text{Equating these two quantities } s_y = \frac{3.68}{6.2 \times 2.6} = 0.2283$$

$$\therefore \text{ Specific yield of the aquifer} = 0.2283 \text{ or } 22.83\%$$

Πηγή: Jaya Rami Reddy, “A text book of hydrology”

Υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity)

Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται κατά πρώτο λόγο από το εδάφους. Εννοείτε ότι η υδραυλική αγωγιμότητα δεν είναι σταθερή σε όλη την μάζα του υδροφορέα. Στην πράξη μια πρώτη εκτίμηση γίνεται από τον τύπο του εδάφους (π.χ. λεπτή άμμος καλά διαβαθμισμένη). Ποιο ακριβής εκτίμηση γίνεται με δοκιμές άντλησης.



Πηγή (Playback Link):

<https://www.youtube.com/embed/8mfBomrw0rs?start=259&feature=oembed>

Πορώδες & Υδραυλική Αγωγιμότητα εδαφών

<i>Material</i>	±15% <i>Porosity</i> %	<i>Specific</i> <i>yield</i> %	<i>Hydraulic</i> <i>conductivity</i> <i>m/day</i>	<i>Intrinsic</i> <i>permeability</i> <i>darcys</i>
Clay	45	3	0.0004	0.0005
Sand	35	25	41.0	50
Gravel	25	22	4100.0	5000
Gravel and Sand	20	16	410.0	500
Sandstone	15	8	4.10	5
Dense limestone and shale	5	2	0.041	0.05
Quartzite, granite	1	0.5	0.0004	0.0005

Ερώτηση: Σε ποια κατηγορία εδαφών ανήκουν τα πιο κάτω:

- Ένα εδαφικό υλικό με διάμετρο κόκκων από 0,63 - 2 mm
- Ένα εδαφικό υλικό με διάμετρο κόκκων από 2 - 63 mm

Ερώτηση: Ποια η βασική διαφορά των αργίλων (Clay soils) σε σχέση με τα άλλα μαλακά εδάφη (π.χ. άμμους, χαλίκια)

Κοκκομετρία

Πίνακας με τις διαστάσεις
κόκκων για κατηγοριοποίηση
εδαφών

ISO 14688-1:2002

Name				Size range (mm)
Very coarse soil		Large boulder	LBo	>630
		Boulder	Bo	200–630
		Cobble	Co	63–200
Coarse soil	Gravel	Coarse gravel	CGr	20–63
		Medium gravel	MGr	6.3–20
		Fine gravel	FGr	2.0–6.3
	Sand	Coarse sand	CSa	0.63–2.0
		Medium sand	MSa	0.2–0.63
		Fine sand	FSa	0.063–0.2
Fine soil	Silt	Coarse silt	CSi	0.02–0.063
		Medium silt	MSi	0.0063–0.02
		Fine silt	FSi	0.002–0.0063
	Clay		Cl	≤0.002

Γεωλογικές Τομές

Ερώτηση: Με βάση τις γεωλογικές τομές εντοπίστε την θέση πιθανού υδροφορέα

Project: Borehole Samples				B.H. No. : I		Sheet: 1/1							
Owner: Western University				Start Date: 17/07/2012		End Date: 17/07/2012							
Location: Western Environmental Site				Casing Depth: 9.00 m		E: ---							
Rig Type: CME 55 Mount Drill				G.W. Depth (m): 6.41 m		N: ---							
Drilling Method: Rotary Drilling				Weather : Sunny		B.H. Elev: ---							
													
Depth. (m)	Thick. (m)	Description	Legend	SPT Counts			N Value				w %	LL %	PL %
				15cm	15cm	15cm	0	10	20	30			
1.00	4.00	200 mm to 300 mm Top Soil		2	6	12					---	---	
		Firm to Stiff, brown becoming gray at a depth of 3.8 m, lean CLAY with coarse sand and some gravel.		5	5	6					23.3	30.6	16.5
2.00				5	6	11					12.28	28.32	16.12
3.00				5	7	11					13.07	25.72	15.68
4.00				5	7	11					13.86	24.92	15.87
	1.00	Firm to Stiff, light gray becoming dark gray at a depth of 6.5 m, lean CLAY with fine sand and some gravel.		5	5	7					13.00	17.53	12.76
5.00		Soft, light gray becoming dark gray at a depth of 6.5 m, lean CLAY fine sand and some gravel.		5	6	7					12.99	24.05	14.27
6.00	1.00			1	2	2					23.78	37.46	21.09
	0.50	Firm, light gray becoming dark gray at a depth of 6.5 m, lean CLAY		2	3	7					14.79	29.65	15.91
7.00	1.50	Very Stiff, dark gray, lean clay with seams fine sand.		2	8	12					16.55	23.65	12.37
8.00				13	16	22					11.92	18.62	13.10
	0.75	Very Stiff to hard, dark gray, lean clay with seams fine sand.		11	19	26					13.06	21.30	12.43
9.00	0.25	Hard, gray CLAY											

Holst Soil Engineering Limited									
BOREHOLE LOG									
Contract No. F.3256									
Location: Davyhuilme Sewage Works									
Client: North West Water Authority									
Method of Boring: Shell and Auger									
Diameter of Borehole: 0.150 m									
Ground Level: 20.23m A.O.D.									
Date: 3.12.75-4.12.75									
Description of Strata	Legend	Depth below G.L. (m)	Thickness of Strata (m)	Type of Sample	c (kN/cm²)	# (No. of samples)	m.c. (%)	V (Kg/cm³)	N
MADEGROUND Medium dense ash, cinders and bricks		1.00							12
MADEGROUND Soft to firm, dark grey, clayey silt and ash		1.80	1.80	2.00	19	13	0	33.0	1870
		3.00							
		4.00			32	18	0	107.0	1245
		4.80	3.00						1215
Very loose, grey fine sandy SILT		5.00							5
		6.50							2 for 0.45m
		7.80	3.00						
Very loose, fine to medium grey silty SAND (Blowing Slightly)		8.80	1.00	9.00					
		9.50							49
Dense, brown coarse SAND and medium to coarse GRAVEL and COBBLES									
Type of Sample: Undisturbed Sample # Angle of Friction Disturbed Sample m.c. Moisture Content Water Sample v Bulk Density Penetration Test N SPT Value Apparent Cohesion c									
Remarks (Observations of Ground Water etc.) Water struck 1.60m 3.12.75 Casing 1.60m Standing level 1.40m " " 2.00m Dry 2.00m " " 7.80m Struck 7.80m " " 7.80m Standing 7.80m " " 7.80m									

Ροή στον Υδροφορέα - Νόμος Darcy

Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν σε ένα υδροφορέα, το νερό μπορεί να είναι στάσιμο ή να κινείται. Συνήθως η ροή του νερού είναι της τάξης των μερικών μέτρων ανά ημέρα. Σε πολλές περιπτώσεις, μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε την κατεύθυνση και την ταχύτητα αυτής της ροής. Πχ:

- (1) Για τον υπολογισμό των διαφυγών από ένα υδροφορέα.
- (2) Για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου.
- (3) Για την εκτίμηση των δυνατοτήτων άντλησης από ένα υδροφορέα.
- (4) Για την εκτίμηση της διάδοσης μιας ρύπανσης στο νερό.

Για μονοδιάστατη ροή (στο επίπεδο x-y) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το νόμο του Darcy για να εκτιμήσουμε την ειδική παροχή q_x

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

Νόμος Darcy

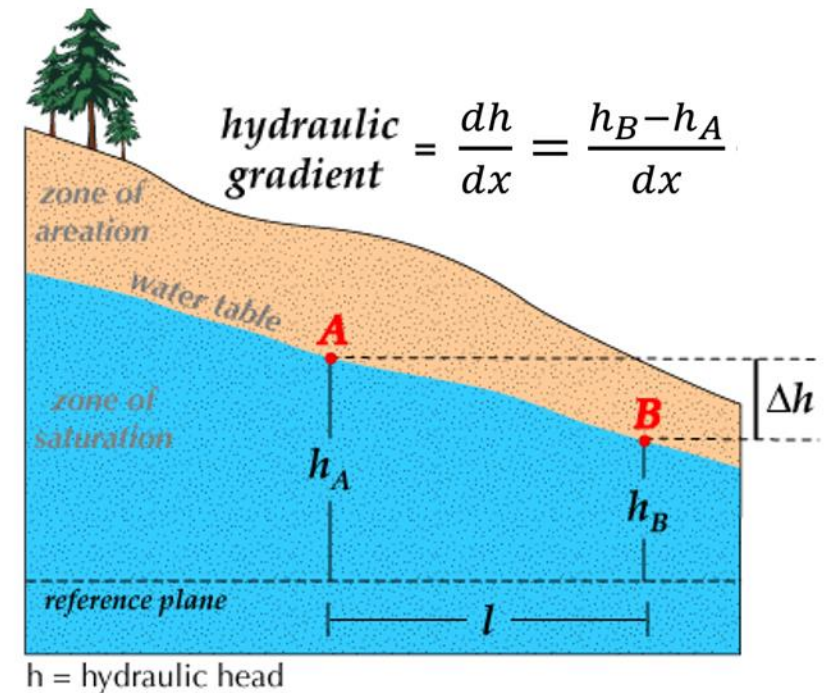
Νόμος του Darcy: Η ειδική παροχή είναι γραμμικά ανάλογη της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της υδραυλικής κλίσης .

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

q_x = Ειδική Παροχή. Είναι η παροχή (Q) ανά μονάδα επιφάνειας (A). Έχει διαστάσεις ταχύτητας, συνήθως m/day.

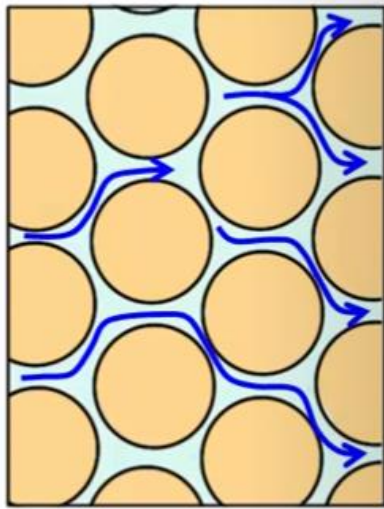
K = Υδραυλική αγωγιμότητα. Συντελεστής που εξαρτάται από το πόσο εύκολα περνά το νερό μέσα από τον εδαφικό σχηματισμό. Έχει διαστάσεις ταχύτητας, συνήθως m/day.

$\frac{dh}{dx}$ = υδραυλική κλίση. Με απλά λόγια, πόσο απότομη είναι η διαφορά υδραυλικού ύψους μεταξύ δύο θέσεων. Αδιάστατο.



Υπάρχει πλην επειδή η κατεύθυνση της ροής είναι προς τα εκεί που μειώνεται το υδραυλικό ύψος (αρνητική υδραυλική κλίση).

Ταχύτητα ροής

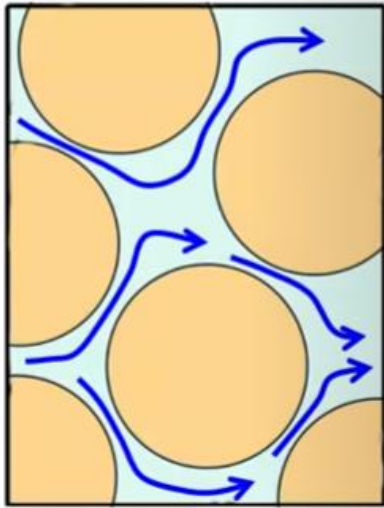


Η ειδική παροχή q_x έχει την έννοια της παροχής ανά μονάδα επιφάνειας κάθετης στην διεύθυνση $[m^3/s] / [m^2]$, γι' αυτό και η μονάδα μέτρησης της είναι μονάδα ταχύτητας $[m/s]$.

Η ειδική παροχή q_x δεν αντιστοιχεί στην ταχύτητα ροής. Αυτό συμβαίνει γιατί στην μονάδα επιφάνειας περιλαμβάνονται κόκκοι του εδάφους και διάκενα. Η ροή όμως είναι μόνο διαμέσου των κενών. Οπότε η ταχύτητά ροής διαμέσου είναι:

$$u_x = \frac{q_x}{n}$$

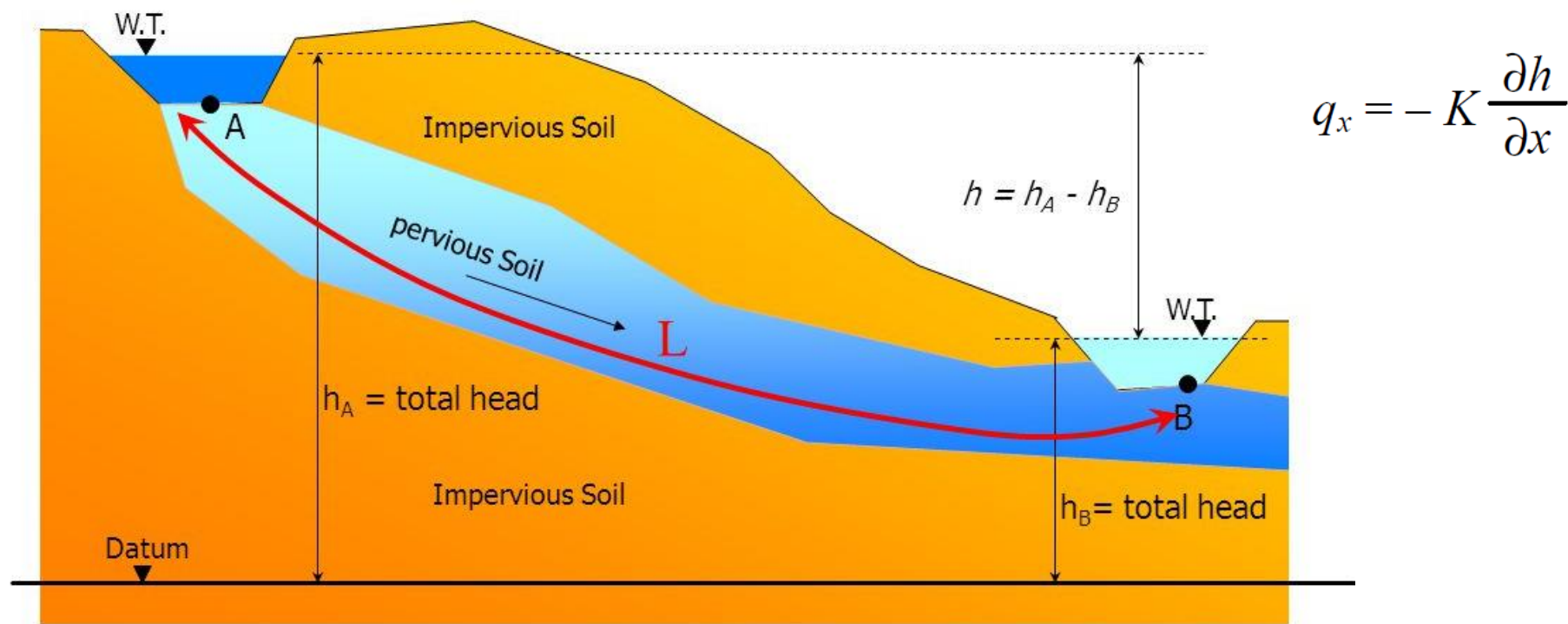
Όπου n το πορώδες του εδαφικού σχηματισμού.



Νόμος Darcy - Παράδειγμα

Οι απώλειες από τη λίμνη A (αριστερά) τροφοδοτούν την λίμνη B (δεξιά). Η απόσταση μεταξύ τους είναι 3.5 km. Η στάθμη του νερού στην λίμνη A είναι στο +1100 m και στην λίμνη B στο +1060 m. $K=12.5$ m/day και $n=15\%$.

Υπολογίστε την ειδική παροχή (q_x) και την ταχύτητα ροής διαμέσου των πόρων;



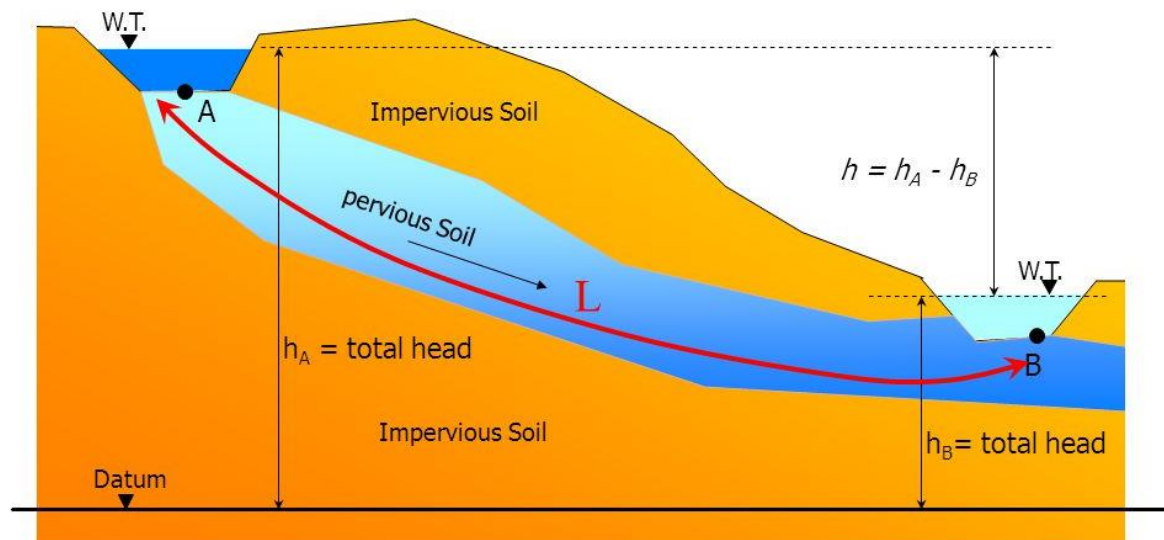
Νόμος Darcy - Παράδειγμα

Υδραυλική κλίση: $-\frac{dh}{dx} = -\frac{1060-1100}{3500} = -\frac{-40}{3500} = 0.0115$

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

Ειδική Παροχή $q_x = -K \frac{dh}{dx} = 12.5 \cdot 0.0115 = 0.143 \text{ m/day}$

$$u_x = \frac{q_x}{n} = \frac{0.143}{0.15} = 0.95 \text{ m/day}$$



Χαρακτηριστικά μεγέθη υδροφορέα

Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός υδροφορέα:

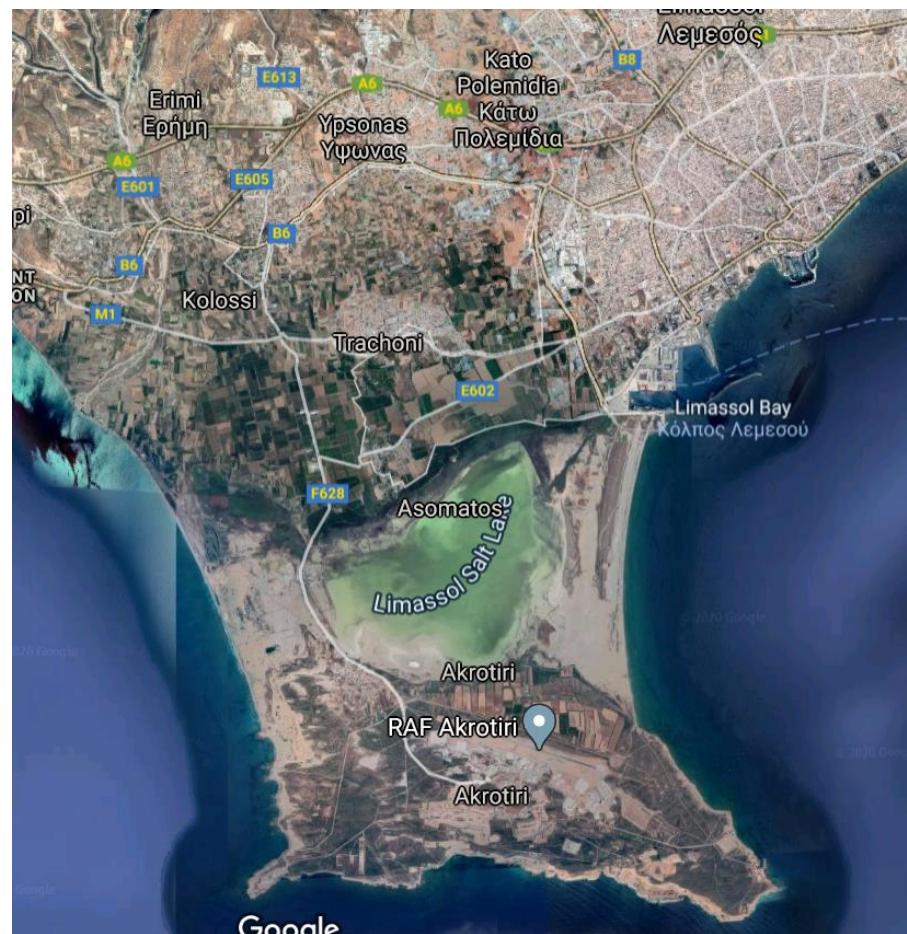
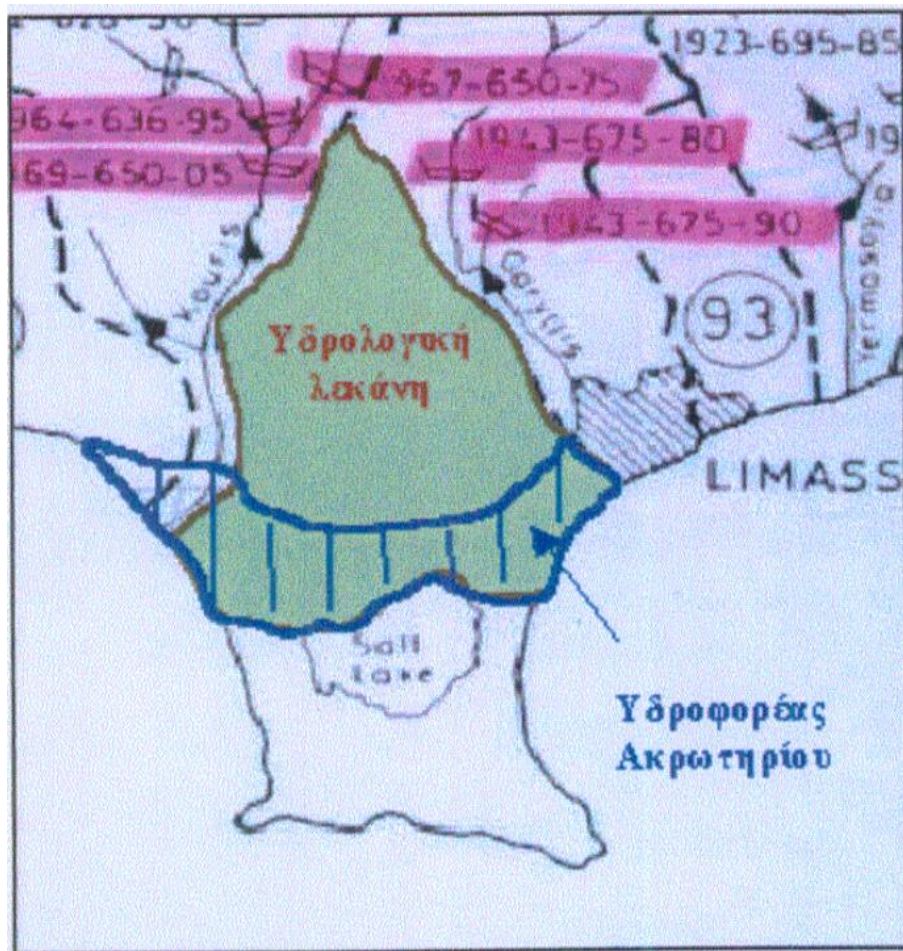
1. Έκταση (km^2)
2. Πάχος Στρωμάτων (m)
3. Πορώδες (n)
4. Υδραυλική αγωγιμότητα (K), Ειδική απόδοση (S_y)

Βάση των πιο πάνω μπορούμε να υπολογίσουμε:

1. Πόσο νερό υπάρχει σε ένα υδροφορέα.
2. Πόσο νερό μπορούμε να αντλήσουμε για δεδομένη ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα
3. Να σχεδιάσουμε γεωτρήσεις
4. Να εκτιμήσουμε την έκταση πιθανής μόλυνσης των υδάτων
5. κτλ.

Υδρολογική Λεκάνη $\neq$ Υδροφορέας

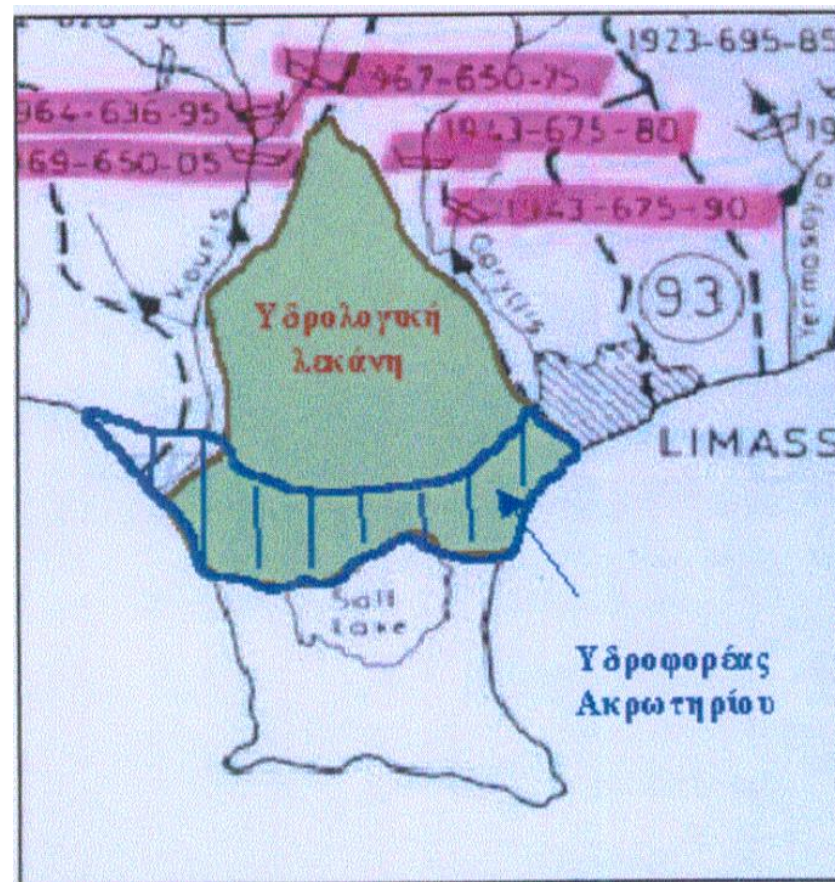
Ο υδροφορέας και η υδρολογική λεκάνη που τον τροφοδοτεί δεν ταυτίζονται.



Υδροφορέας Ακρωτηρίου

- Μέγεθος υδρολογικής λεκάνης $\approx 78 \text{ km}^2$
- Υδροφορέας $\approx 40 \text{ km}^2$
- Πορώδες $\approx 20 \%$
- Απόληψη 1997 $\approx 7,6 \text{ MCM}$
- Χαμηλό υψόμετρο περιοχής και μικρή υδραυλική κλίση στον υδροφορέα
- Εκτεταμένη επαφή με την θάλασσα
 - Δυτικά κόλπος Επισκοπής
 - Ανατολικά κόλπος Ακρωτηρίου)

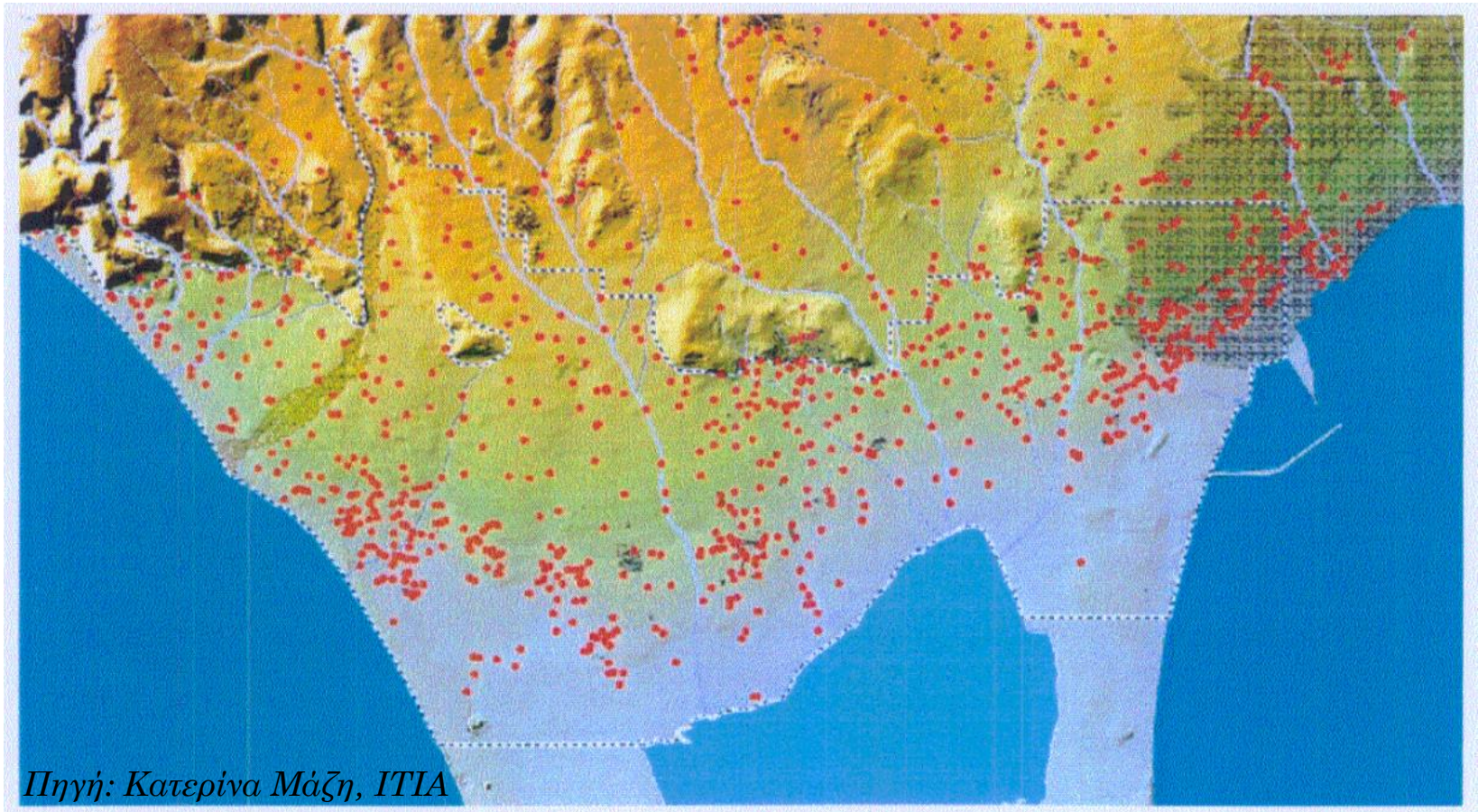
Ερώτηση: Στον υδροφορέα Ακρωτηρίου υπάρχουν προβλήματα με την ποιότητα του νερού. Ποιο είναι το πρόβλημα και που οφείλεται;



Πηγή: Κατερίνα Μάζη, ΙΤΙΑ

Υδροφορέας Ακρωτηρίου

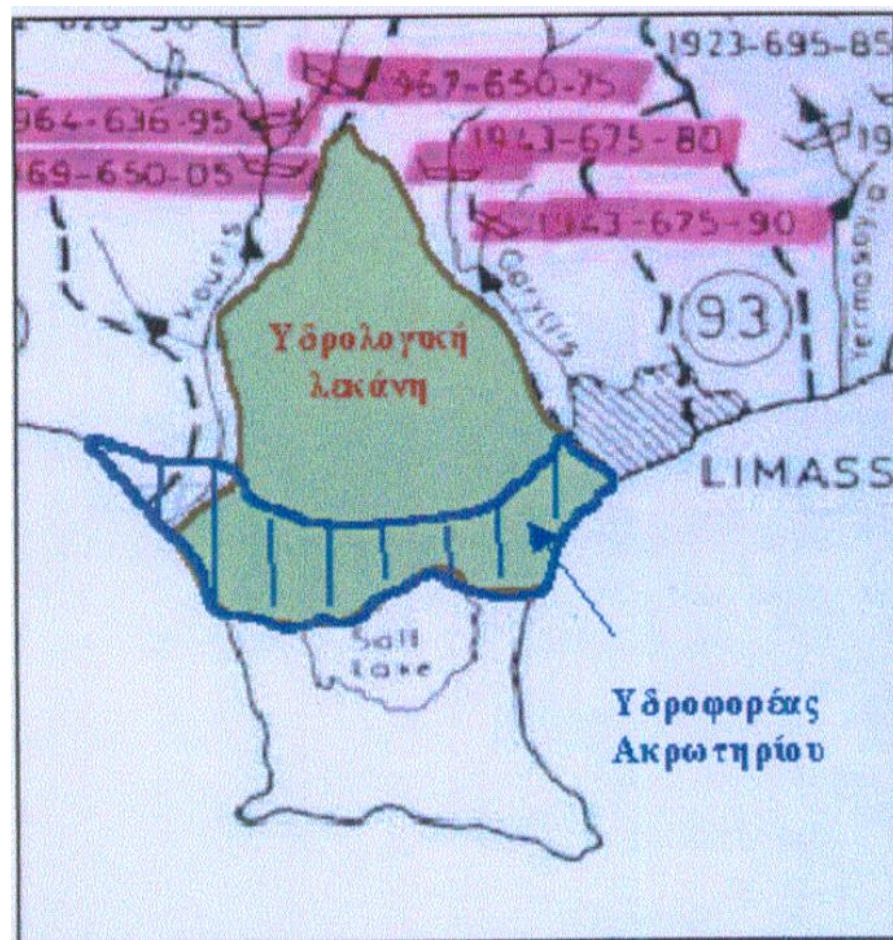
- 1800 γεωτρήσεις, 300 γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται σήμερα για απόληψη νερού
- Κατασκευή φράγματος Κούρη το 1998



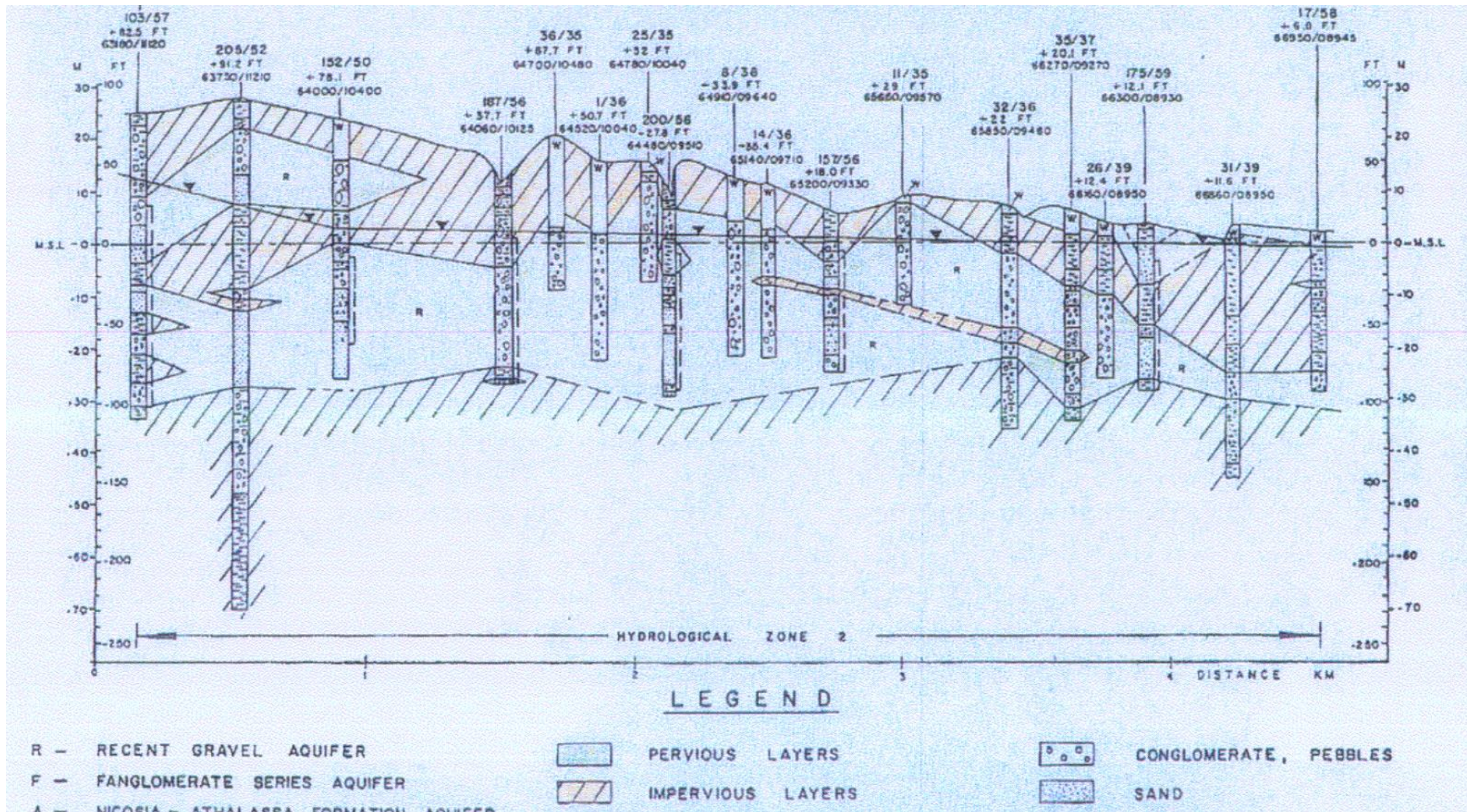
Υδροφορέας Ακρωτηρίου

Ο υδροφορέας Ακρωτηρίου
τροφοδοτείται από:

1. Άμεση βροχόπτωση
2. Υπόγειες απώλειες του ταμιευτήρα του Κούρη
3. Υπόγειες εισροές από το Βόρειο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης
4. Επιστροφές Άρδευσης
5. Τεχνητό εμπλουτισμό

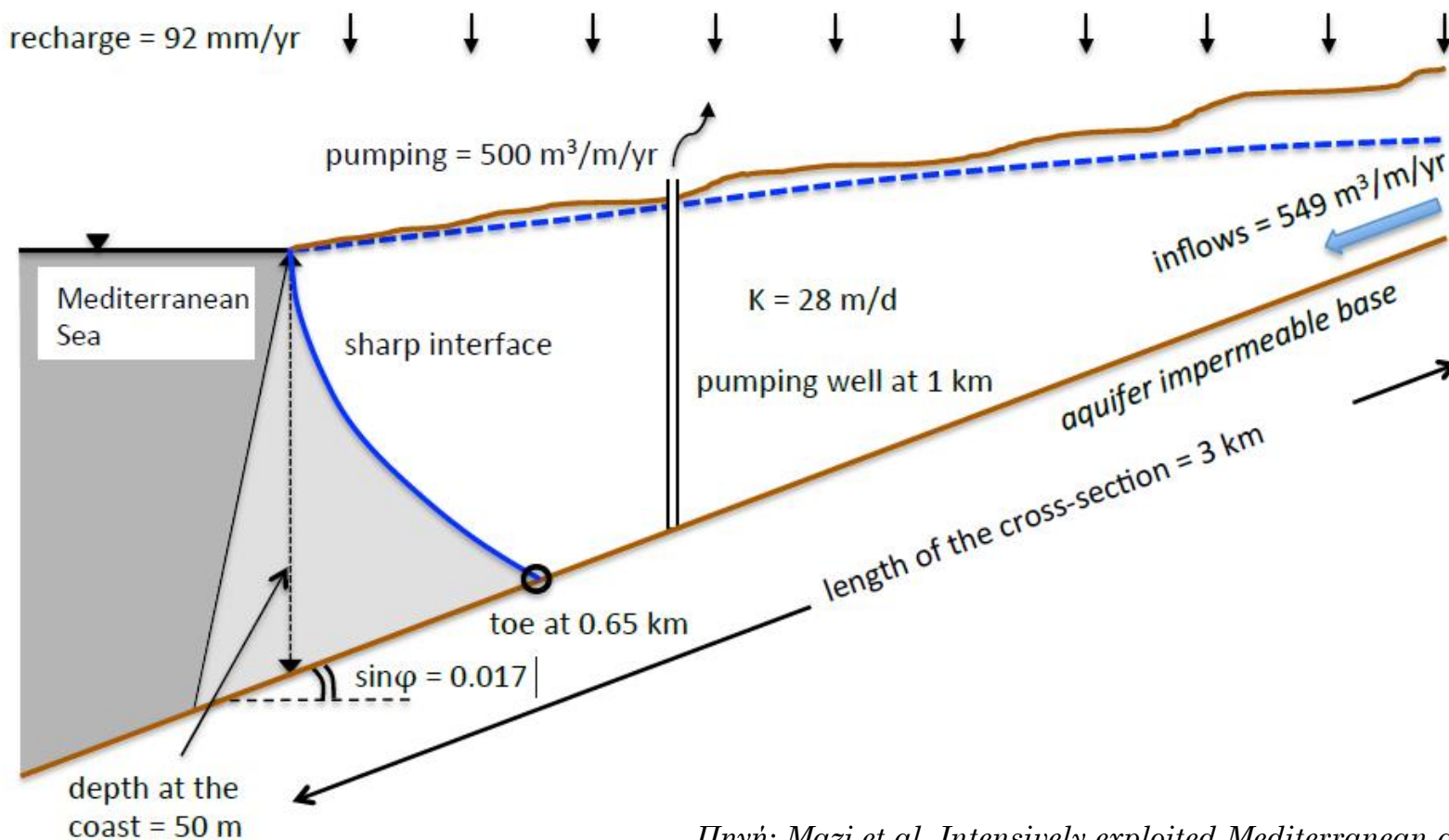


Υδροφόρας Ακρωτηρίου – Γεωλογική τομή



Υδροφόρας Ακρωτηρίου

Υδατικό Ισοζύγιο στον υδροφόρα του Ακρωτηρίου



Πηγή: Mazi et al, *Intensively exploited Mediterranean aquifers: resilience to seawater intrusion and proximity to critical thresholds*

Υπόγεια νερά - Σύγκριση με επιφανειακά νερά

1. Ποσοτική Σύγκριση

Γενικά, το αξιοποιήσιμο υπόγειο δυναμικό μιας λεκάνης είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με τα εκμεταλλεύσιμα επιφανειακά νερά (βραδύς ρυθμός ανανέωσης).

2. Ποιοτική Σύγκριση

Η ποιότητα των υπόγειων υδατικών πόρων είναι γενικά καλύτερη από αυτή των επιφανειακών. Εντούτοις, μπορεί να υποβαθμιστεί έντονα από την εκτεταμένη χρήση φυτοφαρμάκων & λιπασμάτων, και από τη διείσδυση της θάλασσας.

3. Κόστος λειτουργίας (OpEx)

Η άντληση του υπόγειου νερού συνεπάγεται σημαντική ενεργειακή, άρα και οικονομική, επιβάρυνση.

4. Υπερεκμετάλλευση

Η ταπείνωση της στάθμης των φρεάτιων οριζόντων ή της πίεσης των περιορισμένων υδροφορέων αυξάνει το κόστος άντλησης σε γραμμική αναλογία και προκαλεί ποικίλα προβλήματα (π.χ. καθιζήσεις εδαφών).

Πηγή: Κουτσογιάννης & Ευστρατιάδης, Διαχείριση Υδατικών Πόρων
