



ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μ. Πανταζίδου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Θεματική Ενότητα 4 – Υπόγεια ροή
Ταχύτητα κίνησης υπόγειου νερού και ρύπου



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

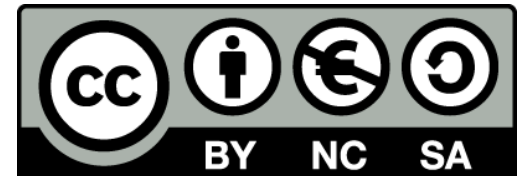


ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΙΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.

Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειες χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.

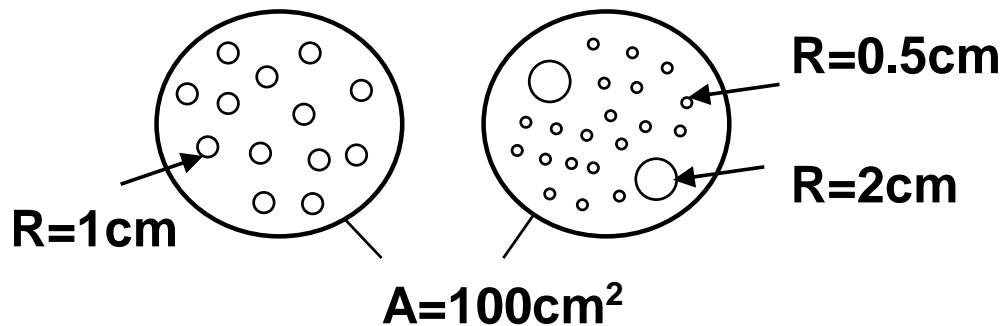


Υπόγεια ροή

Παρουσίαση 3 από 4:

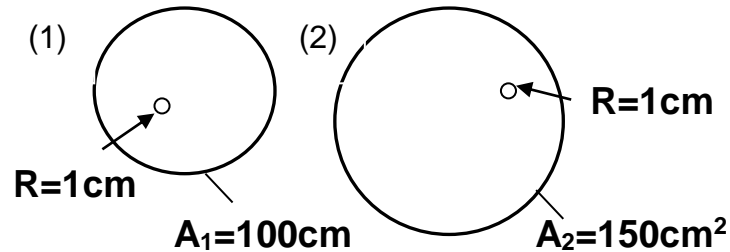
Ταχύτητα κίνησης
υπόγειου νερού & ρύπου
(Ταχύτητα μεταγωγής)

**Απλό μοντέλο εδαφικής στήλης:
συμπαγής κύλινδρος επιφάνειας A με πολλά
κυλινδρικά ανοίγματα**



- Προσομοίωση διόδων ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους με κυλινδρικούς αγωγούς διαφορετικών διαμέτρων (στο σχήμα φαίνονται σε τομή)
- Χρησιμοποιούμε απλά μοντέλα γιατί είναι πιο εύκολο να καταλαβαίνουμε πρώτα σε αυτά πώς κινείται στους εδαφικούς πόρους το νερό και μαζί του ο ρύπος

Ακραίως απλά μοντέλα 1 και 2



πορώδες εδαφικών στηλών

$$n_1 = \pi R^2 / A_1, \quad n_2 = \pi R^2 / A_2$$

- μέση ταχύτητα σε κυλινδρικό αγωγό $v_m(R)$, $v_{m1} = v_{m2} = v_m$
 - παροχή $Q_1 = Q_2 = Q = v_m \cdot \pi R^2$
 - ταχύτητα Darcy v (παροχή ανηγμένη στη συνολική επιφάνεια, A)
 $v_1 = Q/A_1 > v_2 = Q/A_2$
 - σχέση ταχύτητας στον κυλινδρικό αγωγό – ταχύτητας Darcy
 $v_m = v_1 \cdot A_1 / \pi R^2 = v_2 \cdot A_2 / \pi R^2$
- \Rightarrow ταχύτητα στον κυλινδρικό αγωγό = ταχύτητα Darcy / πορώδες

ΠΟΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΥΟ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΕΙΝΑΙ Η «ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ»?

Πότε ισχύει ο νόμος Darcy – τι αγνοεί;

- Περιγράφει πλήρως τη ροή όταν δεν έχουμε θερμική, χημική, ηλεκτρική κλίση δυναμικού
- Ισχύει για στρωτή ροή:
 - αριθμός Reynolds, $R = \rho v d / \mu < 1$ έως 10 ($d =$ μέση διάμετρος κόκκου, $\mu =$ ιξώδες)
- Αγνοεί την ύπαρξη των εδαφικών κόκκων (ή, δεν «βλέπει» τη δομή των εδαφικών πόρων)
 - Ορίζω τη μέση γραμμική ταχύτητα \bar{v} ή ταχύτητα διήθησης, seepage velocity, v_s
 - $A_v =$ επιφάνεια των πόρων (σε τομή)
 - $n =$ πορώδες $= V_v / V \approx A_v / A$

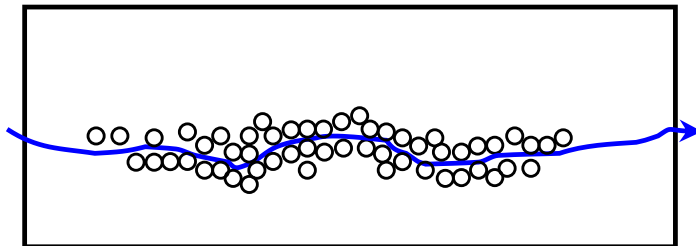
$$v_s = \frac{Q}{A_v} = \frac{Q}{A \cdot n} = \frac{v}{n}$$

Εξοικείωση με καινούρια μεγέθη: όταν λέω «ταχύτητα ροής» τι ακριβώς εννοώ;

- Η ταχύτητα **Darcy** ή φαινόμενη ταχύτητα ή ειδική παροχή, v : αντιστοιχεί στο νερό που βγαίνει από ολόκληρη διατομή

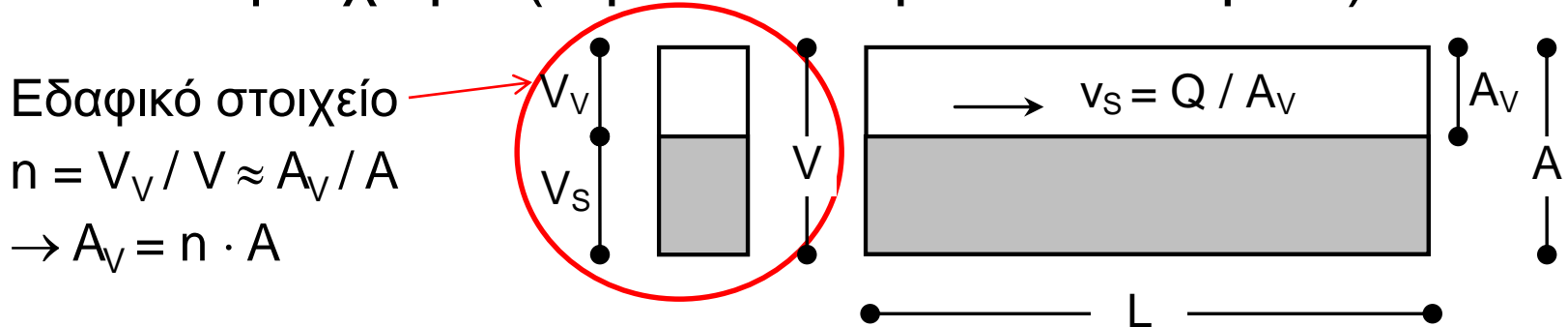


- Η «πραγματική ταχύτητα» αντιστοιχεί σε ροϊκές γραμμές που παρακάμπτουν τους κόκκους = ??



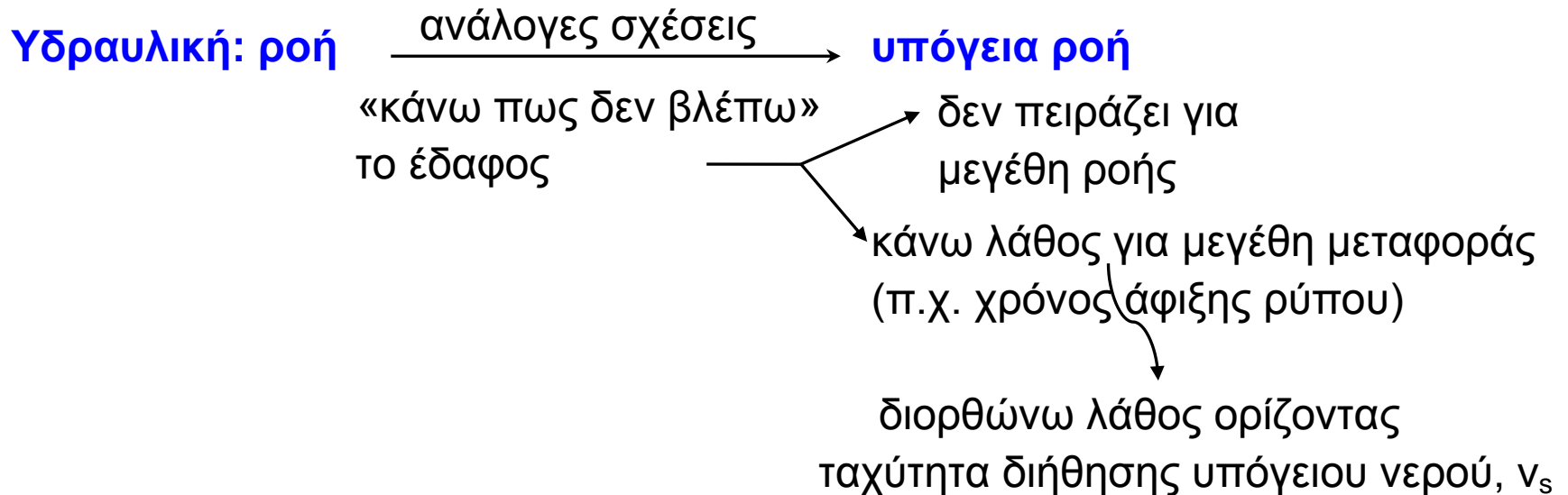
«Ταχύτητα ροής»: τι ακριβώς εννοώ; (συν.)

- Η μέση γραμμική ταχύτητα ή ταχύτητα διήθησης v_s : αντιστοιχεί στο νερό που κυκλοφορεί στον διαθέσιμο χώρο (δηλ. στον όγκο των πόρων)



- Πειραματικά βρίσκεται ότι η v_s δίνει καλή προσέγγιση του χρόνου εμφάνισης ρύπου στα κατάντη εδαφικής στήλης $\rightarrow v_s = v / n =$ **ταχύτητα μεταγωγής**
- $L = v_s \cdot T \rightarrow$ **Χρόνος άφιξης ρύπου, $T = L / v_s$**

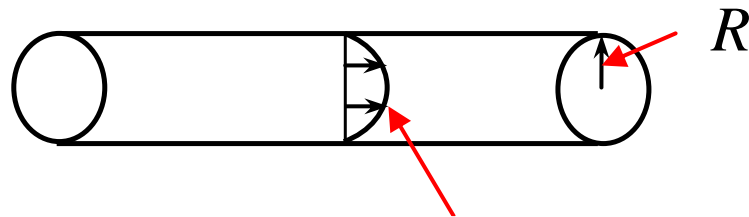
Μάζεμα ιδεών: ταχύτητα διήθησης, seepage velocity, pore (water) velocity



Αναλογία με μηχανική \rightarrow εδαφομηχανική;

Οι δίοδοι μεταξύ των εδαφικών κόκκων ως κυλινδρικοί αγωγοί

- Κυλινδρικός αγωγός ακτίνας R



μέση ταχύτητα, v_m

$$v_m = -\frac{R^2 \rho g}{8\mu} \frac{d\left(\frac{p}{\gamma} + z\right)}{dl}$$

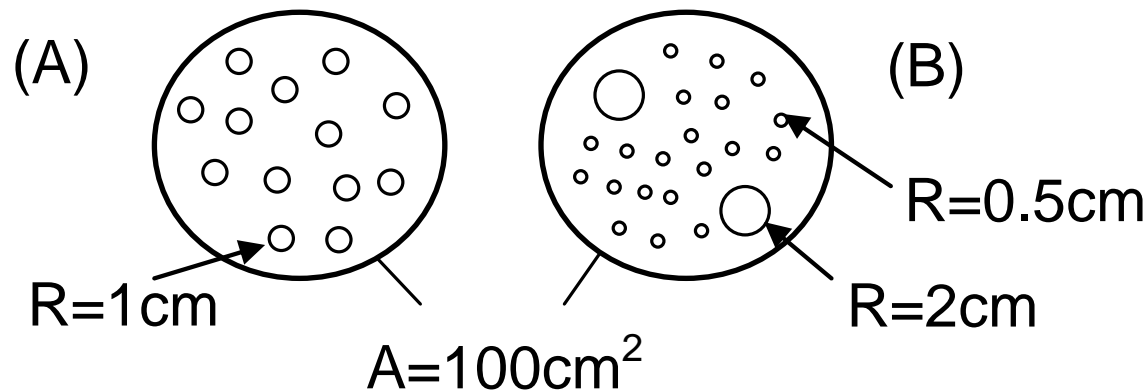
Σημ: το πρόστιμο πλην εκφράζει ότι η ταχύτητα έχει φορά στην κατεύθυνση που μειώνεται το υδραυλικό φορτίο

- Συγκρίνοντας την έκφραση για την v_m με την ταχύτητα Darcy θα λέγαμε ότι ο κυλινδρικός αγωγός έχει υδραυλική αγωγιμότητα

$$K_{\alpha\gamma\omega\gamma\omicron\upsilon} = R^2 \rho g / 8 \mu$$

Εφαρμογή εννοιών υπόγειας ροής σε εδαφικό μοντέλο

- Οι διατομές (A) και (B), δείχνουν σε τομή δύο μοντέλα εδαφικών στηλών: πρόκειται για δύο συμπαγείς κυλίνδρους, στους οποίους έχουμε ανοίξει με τρυπάνι πολλά σωληνάκια. Συγκεκριμένα, η διατομή (A) έχει 13 ανοίγματα ακτίνας 1 cm, ενώ η διατομή (B) έχει δύο ανοίγματα ακτίνας 2 cm και 20 ανοίγματα ακτίνας 0.5 cm. Η συνολική διατομή και στις δύο περιπτώσεις έχει επιφάνεια 100 cm².



Ας υπολογίσουμε τα χρήσιμά μας μεγέθη: ταχύτητα, παροχή, κ.λπ.

Εδαφικό μοντέλο: υπολογισμός ταχύτητας-παροχής

- Μέση ταχύτητα σε κάθε σωλήνα ακτίνας R

$$v_{\sigma\omega\lambda} = \frac{R^2 \rho g}{8\mu} i$$

- Παροχή από κάθε σωλήνα ακτίνας R

$$Q_{\sigma\omega\lambda} = v_{\sigma\omega\lambda} A_{\sigma\omega\lambda}, \quad A_{\sigma\omega\lambda} = \pi R^2 \rightarrow Q_{\sigma\omega\lambda} = \frac{R^4 \pi \rho g}{8\mu} i$$

- Η συνολική παροχή για τη στήλη είναι το άθροισμα της παροχής του κάθε σωλήνα

$$\text{Στήλη (A)} \quad Q_A = \sum Q_{\sigma\omega\lambda} = 13 \frac{R_1^4 \pi \rho g}{8\mu} i$$

Εδαφικό μοντέλο: υπολογισμός ταχύτητας-παροχής (συν.)

- Ταχύτητα Darcy $v_A = Q_A / A = \sum Q_{\sigma\omega\lambda} / A = 13 \frac{R_1^4 \pi \rho g}{8\mu} \frac{i}{A}$
- Πορώδες $n = \frac{V_V}{V} = \frac{A_V}{A}$, $A = A_{ολικό} = 100 \text{ cm}^2$
- Διατομή (A): $A_V = 13\pi R_1^2 = 40.84 \text{ cm}^2$, άρα $n_A = 0.41$
- Ταχύτητα διήθησης

$$v_s = \frac{v_A}{n_A} = Q_A / (A \cdot n_A) = 13 \frac{R_1^4 \pi \rho g}{8\mu} \frac{i}{A} \frac{A}{A_V} = 13 \frac{R_1^4 \pi \rho g}{8\mu} \frac{i}{A} \frac{A}{13\pi R_1^2} = \frac{R_1^2 \rho g}{8\mu} i = v_{\sigma\omega\lambda}!$$
- Παρατήρηση: αφού όλη η διατομή των σωλήνων είναι διαθέσιμη για ροή, $v_s = v_{\sigma\omega\lambda}$

Εδαφικό μοντέλο: υπολογισμός ταχύτητας-παροχής (συν.)

- Διατομή (B): $A_V = 2\pi 2^2 + 20\pi 0.5^2 = 25.13 + 15.71 = 40.84 \text{ cm}^2$, άρα $n_B = 0.41$ – οι δύο διατομές αντιστοιχούν στο ίδιο πορώδες!

- Υπολογισμός λόγου παροχών δύο διατομών

$$\text{Στήλη (B)} \quad Q_B = 2 \frac{2^4 \pi \rho g}{8\mu} i + 20 \frac{0.5^4 \pi \rho g}{8\mu} i$$

$$\frac{Q_B}{Q_A} = \frac{\frac{\pi \rho g}{8\mu} i (2 \times 2^4 + 20 \times 0.5^4)}{\frac{\pi \rho g}{8\mu} i (13 \times 1^4)} \cong 2.6$$

Μεγάλο πορώδες → μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα; Όχι απαραίτητα!

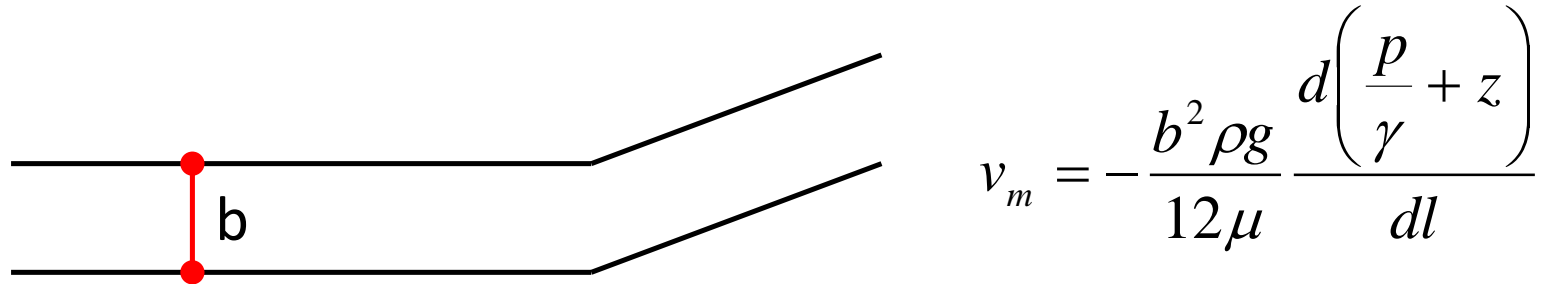
- Η υδραυλική αγωγιμότητα άρα και η παροχή εξαρτώνται άμεσα από την **κατανομή του μεγέθους των πόρων** και όχι απαραίτητα από το συνολικό πορώδες

Εδαφικό μοντέλο: υπολογισμός χρόνου άφιξης ρύπου

- Με ποια ταχύτητα θα υπολογίσω τον χρόνο άφιξης ρύπου από τα ανάντη στα κατόντη της στήλης;
- Στήλη (A): $T = L / v_{σωλ}$ ($R_{σωλ} = 1\text{cm}$)
- Στήλη (B): $T = L / v_{σωλ}$ ($R_{σωλ} = 2\text{cm}$)
 - δηλαδή αντί για έναν σταθμισμένο μέσο όρο που δίνει η v_s , προτιμώ στη στήλη (B) να υπολογίσω τον μικρότερο χρόνο που αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη ταχύτητα
 - στη στήλη (B) μπορώ να «δω» το φαινόμενο της μηχανικής διασποράς: ο ρύπος στα μεγάλα σωληνάκια κινείται πιο γρήγορα σε σύγκριση με τα μικρά

Οι ρωγμές των βράχων ως παράλληλες πλάκες που απέχουν b

- Ροή ανάμεσα σε δύο πλάκες που απέχουν b



- Συγκρίνοντας την έκφραση για την v_m με την ταχύτητα Darcy θα λέγαμε ότι η ρωγμή έχει υδραυλική αγωγιμότητα $K_{\rho\omega\gamma\mu\eta\varsigma} = b^2 \rho g / 12 \mu$
- Κατ' αναλογία με το εδαφικό μοντέλο, μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο άφιξης ρύπου (με την v_m) και, αν ξέρω τη συχνότητα των ρωγμών, την παροχή

Ερώτηση κατανόησης

- Η μέση γραμμική ταχύτητα ή ταχύτητα διήθησης ... (τσεκάρετε όλα τα σωστά)
 - είναι η ταχύτητα Darcy διαιρεμένη με το πορώδες
 - είναι παροχή ανηγμένη στο τμήμα της διατομής που είναι διαθέσιμο για ροή
 - έχει βρεθεί πειραματικά ότι προσεγγίζει καλά την ταχύτητα μεταγωγής
 - προσεγγίζει καλά την πραγματική ταχύτητα του νερού στους εδαφικούς πόρους

Βασικά σημεία – έννοιες

- Προσοχή! ανάλογα με το θεματικό πεδίο, ο όρος «ταχύτητα του υπόγειου νερού» μπορεί να αναφέρεται σε διαφορετική έννοια
- Σε κείμενα Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής, ας μην χρησιμοποιούμε χαλαρά τον όρο «ταχύτητα του υπόγειου νερού», ο οποίος αντιστοιχεί στην ταχύτητα διήθησης του υπόγειου νερού, v_s
- Οι όροι “average linear velocity” και “seepage velocity” σε αγγλικά κείμενα σχετικά με ρύπανση υπεδάφους αναφέρονται στην ταχύτητα διήθησης του υπόγειου νερού, v_s
- Όταν διαβάζουμε σε αγγλικά κείμενα τον όρο “ground water velocity”, χωρίς επεξήγηση δεν μπορούμε να είμαστε 100% σίγουροι σε ποιο μέγεθος αναφέρεται

Βασικά σημεία - υπολογισμοί

- Χρησιμοποιούμε την **ταχύτητα Darcy, v** , για να υπολογίσουμε **παροχή**
 - ο όρος «ταχύτητα Darcy» είναι αδιαφανής (για όποιον δεν ξέρει τον νόμο Darcy), αλλά η ερμηνεία του είναι μονοσήμαντη
- Χρησιμοποιούμε την **ταχύτητα διήθησης του υπόγειου νερού, v_s** , για να υπολογίσουμε τον **χρόνο άφιξης ρύπου**
 - για να μην υπάρχει αμφιβολία, σε προβλήματα μεταφοράς θα χρησιμοποιώ τον όρο **ταχύτητα μεταγωγής**
 - ο χρόνος άφιξης ρύπου λέει πόσο γρήγορα θα κινηθεί το μέτωπο του ρύπου αν η μεταφορά συμβαίνει μόνο λόγω μεταγωγής και, άρα
 - ο χρόνος άφιξης ρύπου εκφράζει κατά προσέγγιση (χονδρική αν διάχυση και διασπορά έχουν σημαντική συμβολή στην μεταφορά) πόσο γρήγορα θα επηρεαστεί από την ρύπανση ένα σημείο κατάντη της πηγής

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα ΕΜΠ**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ