



Εκμετάλλευση και Προστασία των Υπόγειων Υδατικών Πόρων

Ενότητα 6: Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς

Αναπληρωτής Καθηγητής Νικόλαος Θεοδοσίου
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» 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.





Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (1/22)

Η επιτυχία ενός μοντέλου προσομοίωσης φαινομένων μεταφοράς ρύπων στο έδαφος και το υπόγειο νερό εξαρτάται από το βαθμό αντίληψης και κατανόησης των διεργασιών και διαδικασιών που τα επηρεάζουν.

Αυτή η κατανόηση επιτρέπει:

- α) την πρόβλεψη του χρόνου άφιξης και τις τιμές συγκέντρωσης των ρύπων στις θέσεις ελέγχου, π.χ. σε πηγάδια άντλησης,
- β) το σχεδιασμό ενός οικονομικού και ασφαλούς συστήματος διάθεσης αποβλήτων,
- γ) την εγκατάσταση ενός συστήματος μετρήσεων και ελέγχου και
- δ) την ανάπτυξη εφικτών και οικονομικά αποδοτικών λύσεων για την εξυγίανση μολυσμένων υδροφορέων.



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (2/22)

Η συγκέντρωση των ρύπων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς τους μειώνεται εξαιτίας διεργασιών όπως:

η διασπορά (μοριακή και υδροδυναμική), η προσρόφηση, διάφορες χημικές αντιδράσεις, μικροβιακή αποικοδόμηση, ο ρυθμός διάθεσης των ρύπων στο έδαφος και, τέλος, η σχετική απόσταση που διανύεται.

Φυσικές διεργασίες όπως η υδροδυναμική διασπορά επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο όλες τις κατηγορίες των ρύπων.

Διεργασίες όπως προσρόφηση, χημικές διεργασίες και αποικοδόμηση έχουν διαφορετικές επιδράσεις και κατά συνέπεια άλλους ρυθμούς μεταβολής στις συγκεντρώσεις διαφορετικών ρύπων.



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (3/22)

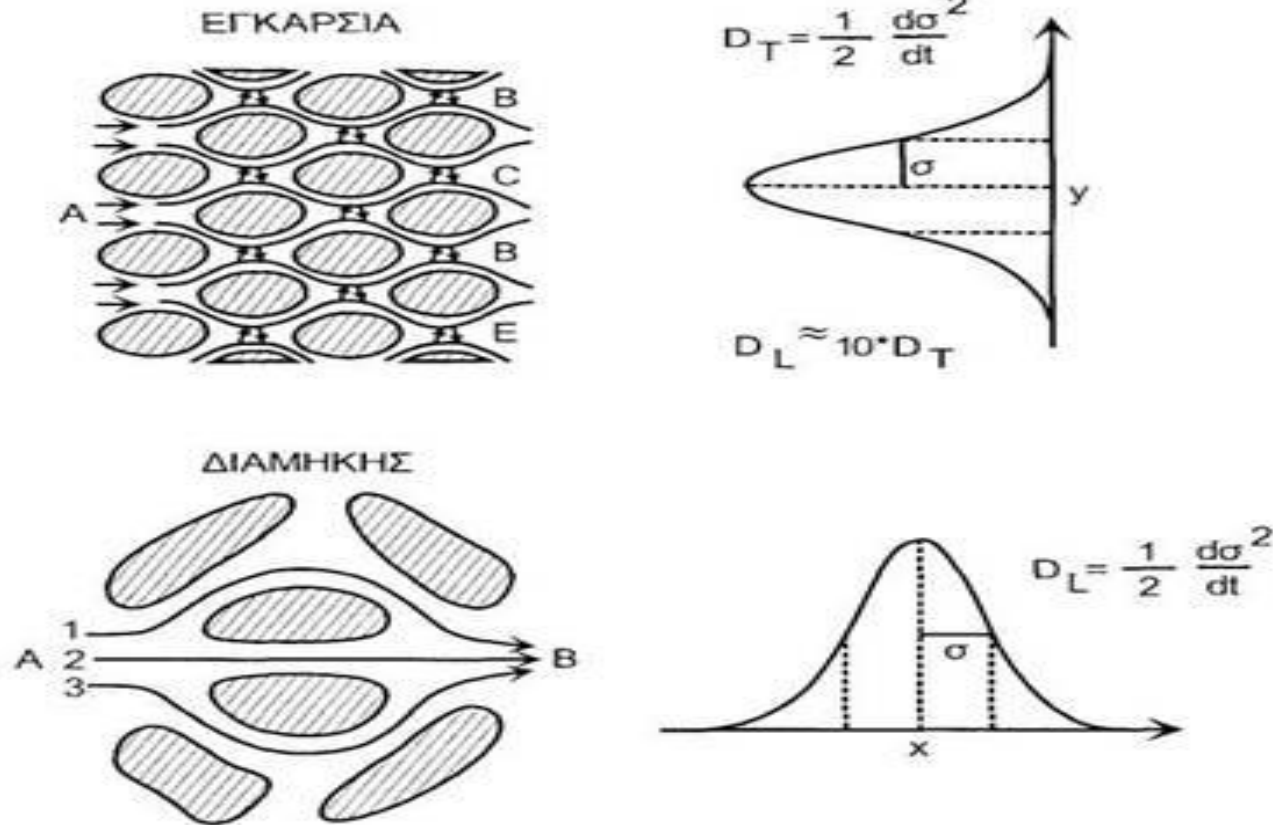
Διασπορά

Η διασπορά ρύπων σ' ένα πορώδες μέσο αφορά στη συνεχή εξάπλωση ενός ορισμένου όγκου ακάθαρτου νερού που κινείται μέσα σ' αυτό.

Συνέπεια της διασποράς είναι η ανάμειξη του ακάθαρτου με καθαρό υπόγειο νερό, πρόκειται δηλαδή για ένα μηχανισμό αραίωσης των ρύπων που έχει ιδιαίτερη σημασία όταν η πηγή γένεσης είναι σημειακής μορφής.



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (4/22)



Σχήμα 1: Μηχανική διασπορά.

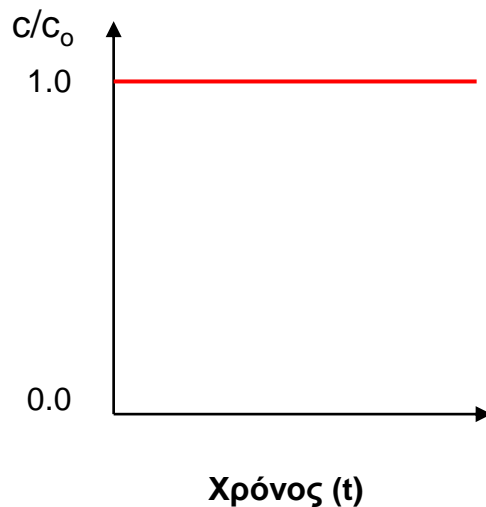
Από: Περικλής Λατινόπουλος Προστασία και Εξυγίανση των Υπόγειων Νερών – Σημειώσεις Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη», Θεσσαλονίκη 2006, σελ. 58



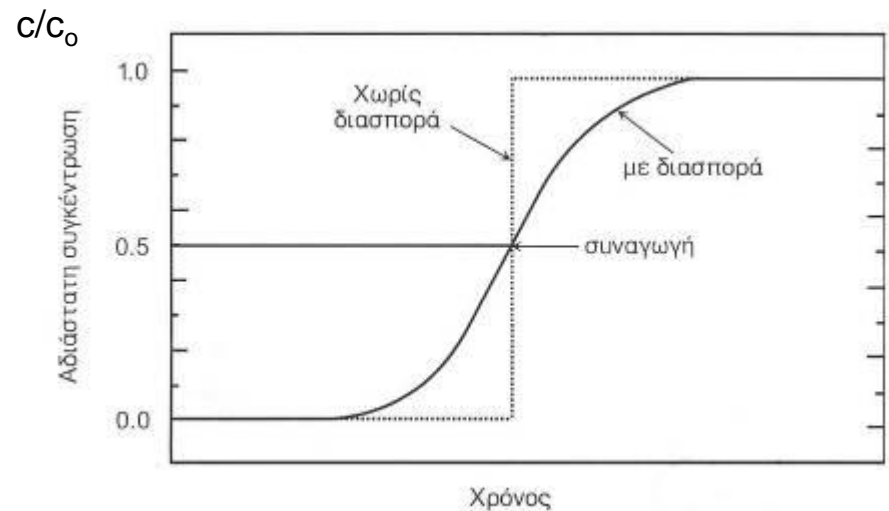
Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (5/22)

Διασπορά

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της διασποράς είναι ότι οι ρύποι φθάνουν σε διάφορα σημεία του πεδίου ροής σε διαφορετικό χρόνο απ' αυτόν που υπολογίζεται αν ληφθεί υπόψη μόνο η μέση ταχύτητα του νερού.



Σχήμα 2: αδιάστατη συγκέντρωση στην πηγή ($x=0$).
Πηγή: Π. Λατινόπουλος, ο.π., σελ. 62.



Σχήμα 3: αδιάστατη συγκέντρωση σε θέση $x \gg 0$.
Πηγή: Π. Λατινόπουλος, ο.π., σελ. 60.



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (6/22)

Διασπορά

Μικροσκοπική διασπορά:

α) τη μοριακή διάχυση, που είναι σημαντική μόνο σε πολύ μικρές ταχύτητες ροής, και

β) την υδροδυναμική ανάμειξη, που προκαλείται όταν οι ταχύτητες ροής είναι μεγάλες.

Μακροσκοπική διασπορά:

οφείλεται κυρίως στην ετερογένεια των γεωλογικών σχηματισμών. Μεγαλύτερη εξάπλωση ρύπων σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας σε σύγκριση μ' αυτήν που θα αναμένονταν από θεωρητικές ή εργαστηριακές έρευνες στις οποίες θεωρείται μόνο η μικροσκοπική διασπορά.



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (7/22)

Η έννοια της **διάχυσης** προσδιορίζει την εξάπλωση των ρύπων με βάση τον νόμο του Fick, δηλαδή ότι η ροή μάζας ουσιών διαλυμένων στο νερό καθορίζεται από τη βαθμίδα της συγκέντρωσης.

Με άλλα λόγια η διάχυση, που δεν εξαρτάται από την κίνηση του νερού, καθορίζει ότι η συγκέντρωση των ρύπων αυξάνεται κατά την έννοια της μείωσης της συγκέντρωσης, αφού υπακούει στον νόμο του Fick:

$$F = -D_d \frac{\partial c}{\partial x}$$



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (8/22)

Συναγωγή

Ορίζεται ως μεταφορά μιας συντηρητικής ουσίας, μιας ουσίας δηλαδή που δεν αντιδρά χημικά στη διάρκεια της εξέλιξης του φαινομένου ούτε με το περιβάλλον ούτε με άλλες ουσίες.

Η μεταφορά μόνο με συναγωγή, που σημαίνει μεταφορά με το κινούμενο φυσικό υπόγειο νερό, θεωρείται ότι γίνεται με τη μέση ταχύτητα του.



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (9/22)

Εξίσωση συναγωγής - διασποράς

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij}^* \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (c u_i) = \frac{c' W^*}{n} + \sum_{k=1}^N R_k = \frac{\partial c}{\partial t}$$

c [M/L³] είναι η συγκέντρωση του ρύπου,

D_{ij}^* [L / T] είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς

x_j [L] είναι οι συντεταγμένες ενός γενικά τρισδιάστατου καρτεσιανού συστήματος ($i, j = 1, 2, 3$).

c' είναι η συγκέντρωση των ρύπων στην πηγή εισόδου ή εξόδου του νερού,

W^* [T⁻¹] είναι η παροχή ανά μονάδα όγκου του πορώδους μέσου και

t [T] ο χρόνος.



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (10/22)

Εξίσωση συναγωγής - διασποράς

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij}^* \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (c u_i) - \frac{c W^*}{n} + \sum_{k=1}^N R_k = \frac{\partial c}{\partial t}$$

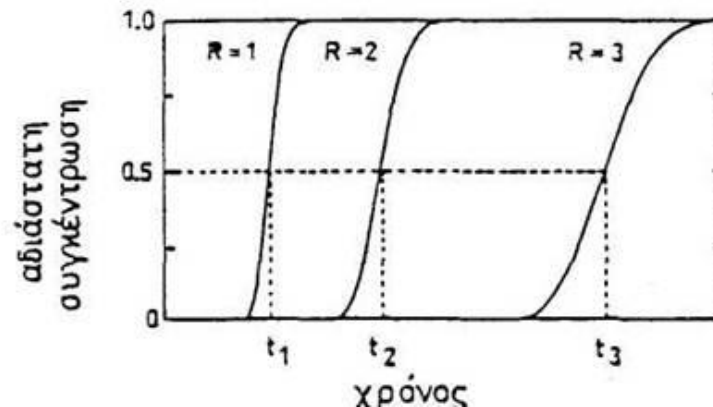
- Ο πρώτος όρος αφορά το μερίδιο της διασποράς,
- Ο δεύτερος όρος αφορά τη ροή της μάζας των ρύπων με συναγωγή,
- Ο τρίτος αποτελεί τον όρο πηγής (πρόσθεση ή αφαίρεση μάζας),
- Ο τέταρτος είναι ο όρος που αφορά προσθήκη ή αφαίρεση μάζας του ρύπου εξαιτίας χημικών αντιδράσεων. Στον τελευταίο όρο υποτίθεται ότι υπάρχουν N συνολικά αντιδράσεις στις οποίες συμμετέχει ο υπό μελέτη ρύπος και έτσι με R_k συμβολίζεται ο ρυθμός παραγωγής του ρύπου εξαιτίας της k -στής αντίδρασης.



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (11/22)

Παράγοντας επιβράδυνσης

Η φυσική σημασία του παράγοντα επιβράδυνσης είναι ότι χαρακτηρίζει κίνηση των ρύπων με ταχύτητα τόσο μικρότερη της μέσης ταχύτητας της φυσικής ροής όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του. Στη γενική περίπτωση η καθυστέρηση αυτή οφείλεται σε χημικές διεργασίες που υφίσταται ο υπόψη ρύπος, όπως καθίζηση, προσρόφηση στο στερεό σκελετό και ιοντοανταλλαγή.



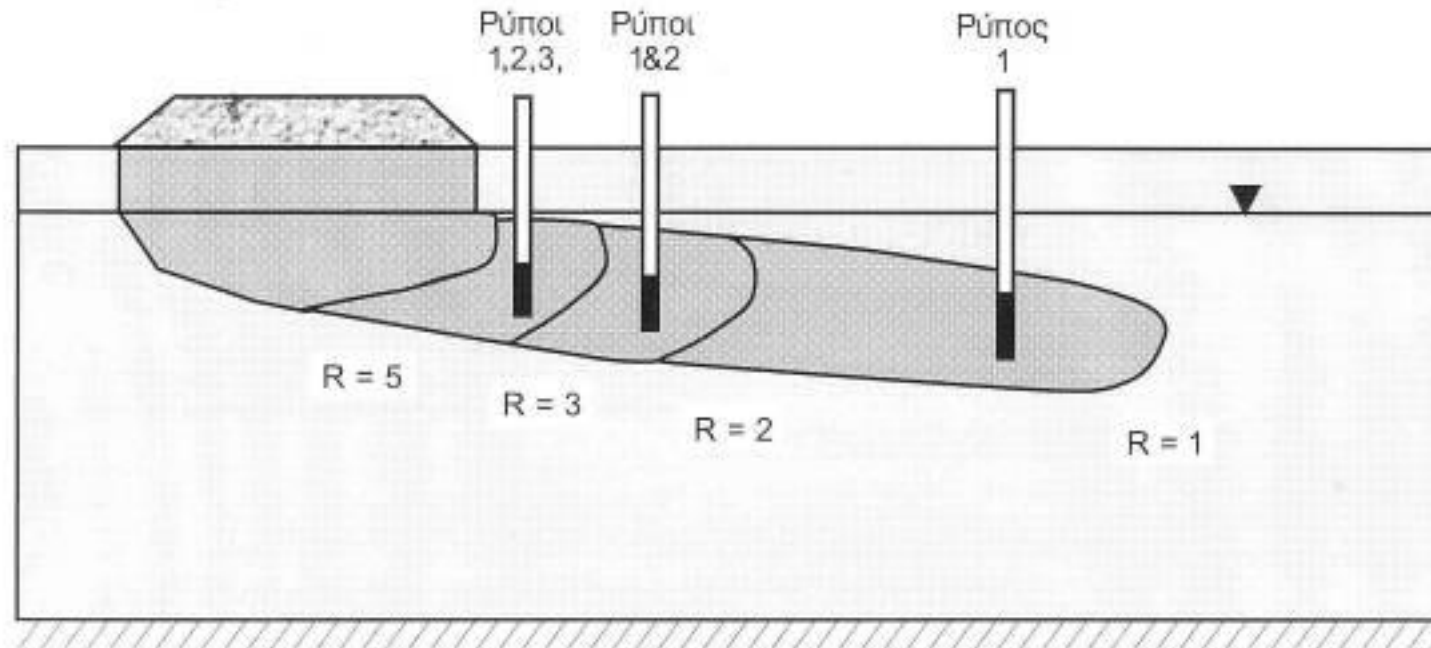
Σχήμα 4: Μεταβολή της κίνησης των ρύπων για διάφορες τιμές R.

Πηγή: Π. Λατινόπουλος, ο.π., σελ. 63.



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (12/22)

Παράγοντας επιβράδυνσης



Σχήμα 5: Μεταφορά ρύπων για διάφορες τιμές R κάτω από περιοχές διάθεσης αποβλήτων.

Από: Π. Λατινόπουλος, ο.π., σελ. 64.

Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (13/22)

Εξίσωση συναγωγής - διασποράς

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{i,j}^* \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i c) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (u c) = 0$$

$$D \left(\frac{c_{i+1} - 2c_i + c_{i-1}}{\Delta x^2} \right) - u \frac{c_i - c_{i-1}}{\Delta x} = 0$$

$$D \left(\frac{c_{i+1} - 2c_i + c_{i-1}}{\Delta x^2} \right) - u \frac{c_{i+1} - c_i}{\Delta x} = 0$$

$$c_{i+1} = \left(u \frac{c_i - c_{i-1}}{\Delta x} \right) \frac{\Delta x^2}{D} + 2c_i - c_{i-1}$$

$$c_{i+1} = \frac{1}{\frac{D}{\Delta x^2} - \frac{u}{\Delta x}} \left[\frac{D}{\Delta x^2} (c_i - c_{i-1}) - u \frac{c_i}{\Delta x} \right]$$

$$D \left(\frac{c_{i+1} - 2c_i + c_{i-1}}{\Delta x^2} \right) - u \frac{c_{i+1} - c_{i-1}}{\Delta x} = 0$$

$$c_{i+1} = \frac{1}{\frac{D}{\Delta x^2} - \frac{u}{2\Delta x}} \left[\frac{D}{\Delta x^2} (c_i - c_{i-1}) - u \frac{c_{i-1}}{2\Delta x} \right]$$



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (14/22)

Εξίσωση συναγωγής - διασποράς

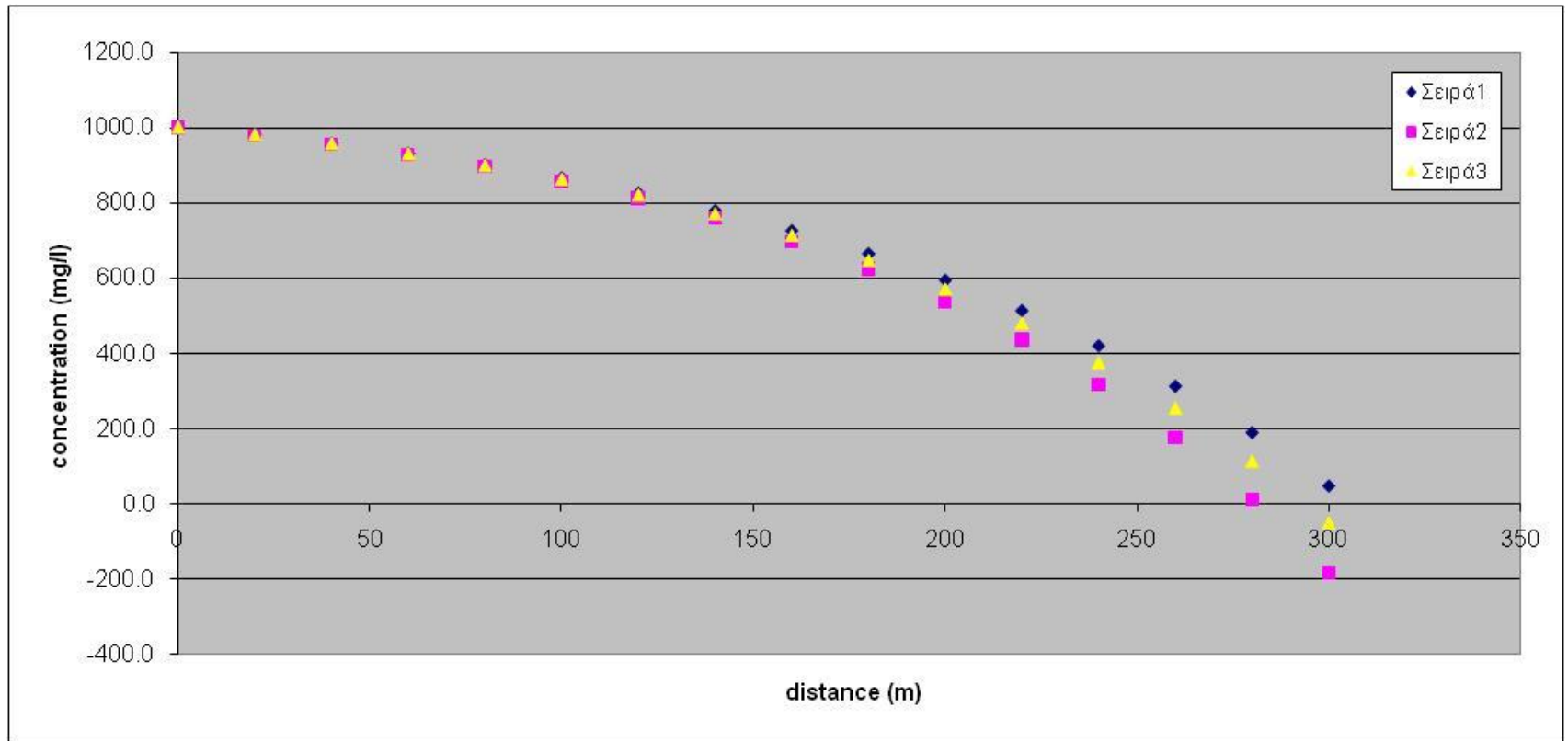
$\Delta x =$ 20
 $D =$ 100
 $c =$ 1000mg/l
 $K =$ 1.5m/d
 $J =$ 0.01
 $n =$ 0.02

$$u = \frac{K J}{n} = 0.75 \quad \text{m/d}$$

point	distance	concentration		
0	0	1000.0	1000.0	1000.0
1	20	980.0	980.0	980.0
2	40	957.0	956.5	956.8
3	60	930.6	928.8	929.7
4	80	900.1	896.2	898.4
5	100	865.2	857.9	861.9
6	120	824.9	812.8	819.5
7	140	778.7	759.8	770.2
8	160	725.5	697.4	712.9
9	180	664.3	624.0	646.4
10	200	593.9	537.7	569.0
11	220	513.0	436.1	479.1
12	240	420.0	316.6	374.7
13	260	313.0	176.0	253.3
14	280	189.9	10.5	112.2
15	300	48.4	-184.1	-51.8



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (15/22)



Σχήμα 6: Γραφική Παράσταση εξίσωσης συναγωγής – διασποράς.

Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (16/22)

Εξίσωση συναγωγής - διασποράς

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{i,j}^* \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_i c \right) = R \frac{\partial c}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(u c \right) = R \frac{\partial c}{\partial t}$$

$$R \frac{\partial c_i}{\partial t} = R \frac{c_i^{t+1} - c_i^t}{\Delta t}$$

$$D \left(\frac{c_{i+1}^t - 2c_i^t + c_{i-1}^t}{\Delta x^2} \right) - u \frac{c_i^t - c_{i-1}^t}{\Delta x} = R \frac{c_i^{t+1} - c_i^t}{\Delta t}$$

$$c_i^{t+1} = \frac{\Delta t}{R} \left[D \left(\frac{c_{i+1}^t - 2c_i^t + c_{i-1}^t}{\Delta x^2} \right) - u \frac{c_i^t - c_{i-1}^t}{\Delta x} \right] + c_i^t$$



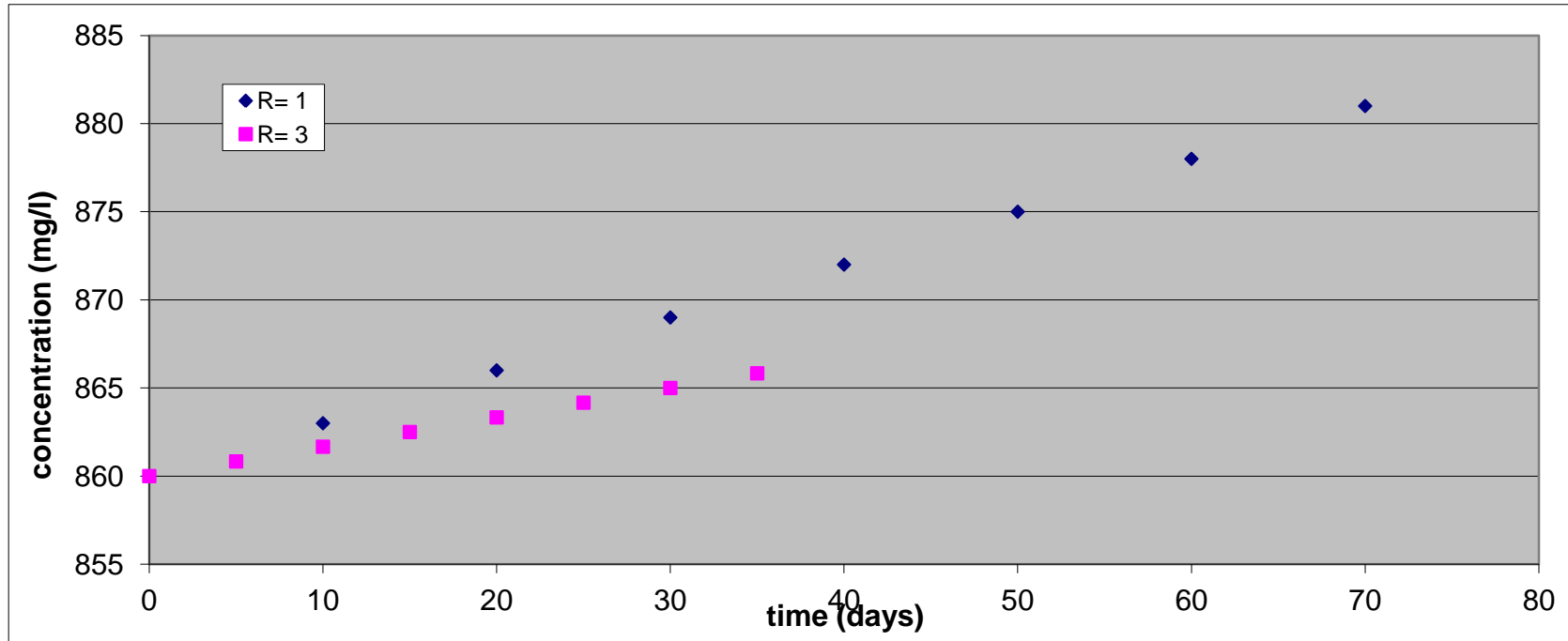
Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (17/22)

$\Delta x =$ 50
 $D =$ 100
 $c =$ 1000mg/l
 $K =$ 1.5m/d
 $J =$ 0.01
 $n =$ 0.02
 $R =$ 1
 $\Delta t =$ 10d

point	distance	$u = \frac{0.75 \text{ m/d} \cdot K \cdot J}{n \cdot c} =$								
		0	10	20	30	40	50	60	70	t (days)
0	0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
1	50	980.0	983.0	984.4	985.6	986.5	987.4	988.0	988.7	
2	100	960.0	963.0	966.0	968.1	970.1	971.7	973.2	974.5	
3	150	940.0	943.0	946.0	949.0	951.5	953.9	956.0	958.0	
4	200	920.0	923.0	926.0	929.0	932.0	934.7	937.4	939.8	
5	250	900.0	903.0	906.0	909.0	912.0	915.0	917.8	920.7	
6	300	880.0	883.0	886.0	889.0	892.0	895.0	898.0	900.9	
7	350	860.0	863.0	866.0	869.0	872.0	875.0	878.0	881.0	
8	400	840.0	843.0	846.0	849.0	852.0	855.0	858.0	861.0	
9	450	820.0	823.0	826.0	829.0	832.0	835.0	838.0		
10	500	800.0	803.0	806.0	809.0	812.0	815.0			
11	550	780.0	783.0	786.0	789.0	792.0				
12	600	760.0	763.0	766.0	769.0					
13	650	740.0	743.0	746.0						
14	700	720.0	723.0							
15	750	700.0								



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (18/22)



Σχήμα 7: Γραφική Παράσταση Μεταφοράς Ρύπων για διάφορες τιμές του R.

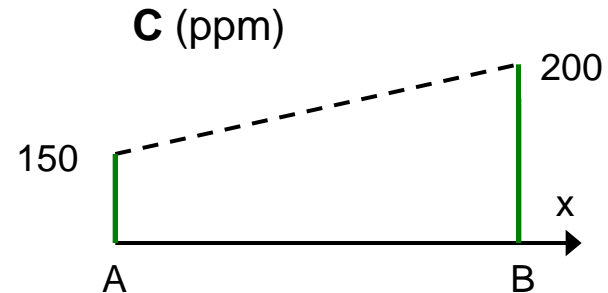
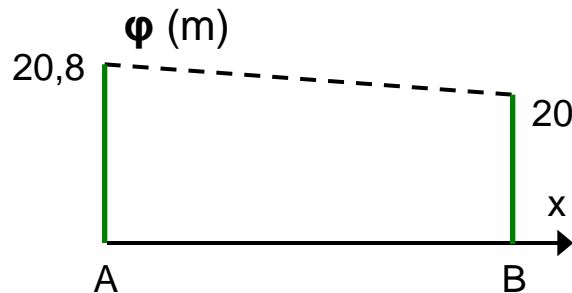


Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (19/21)

Για τη μονοδιάστατη ροή σε οριζόντιο υδροφορέα δίνονται τα παρακάτω δεδομένα:

- Συντελεστής διαπερατότητας: $K=40$ m/day,
- Συντελεστής δυναμικής διασπορικότητας: $\alpha_L=30$ m,
- Συντελεστής διάχυσης: $D_d=10^{-4}$ cm²/s,
- Πορώδες: $n=0,25$

Εάν στο πηγάδι παρατήρησης A (με συντεταγμένη $x=0$) το υδραυλικό φορτίο είναι 20.8 m και η συγκέντρωση Cl^- 150 ppm, ενώ στο πηγάδι παρατήρησης B (με συντεταγμένη $x=100$) το υδραυλικό φορτίο είναι 20 m και η συγκέντρωση Cl^- 200 ppm, ζητείται να βρεθεί η συνολική ροή μάζας Cl^- κατά τη διεύθυνση της ροής ανά μονάδα επιφάνειας του υδροφορέα στο σημείο A.



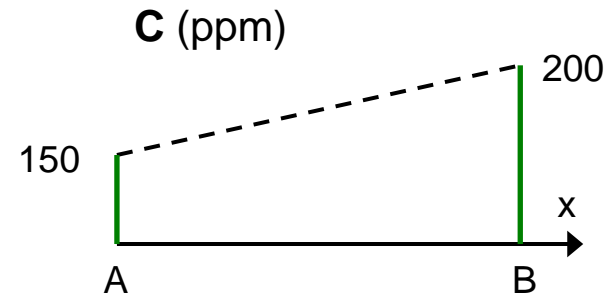
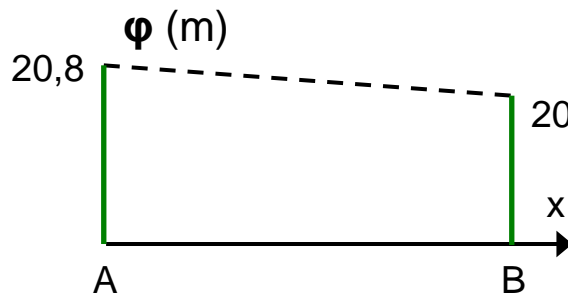
Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (20/22)

Η μέση ταχύτητα ροής στον υδροφορέα είναι:

$$v = -\frac{K}{n} \frac{d\phi}{dx} = -\frac{40}{0,25} \frac{20 - 20,8}{100} = 1,28 \text{ m/d}$$

και ο συντελεστής μηχανικής διασποράς:

$$D_L = a_L v = 30 \times 1,28 = 38,4 \text{ m}^2 / \text{d}$$



Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (21/22)

Ροή μάζας από συναγωγή:

$$F_{adv} = cv \qquad F_{adv} = 150 \times 1,28 = 192 \text{ g / m}^2 / d$$

Ροή μάζας από διασπορά:

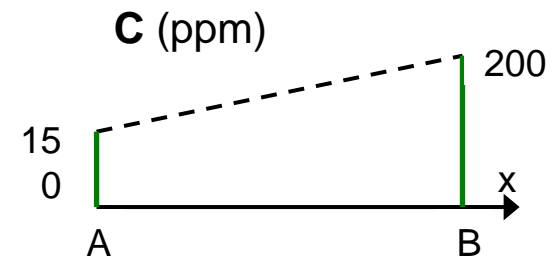
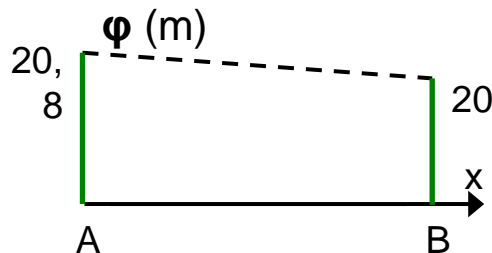
$$F_{dis} = -D_L \frac{\partial c}{\partial x} \qquad \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{200 - 150}{100} = 0,5 \text{ g / m}^4$$

$$F_{dis} = -38,4 \times 0,5 = -19,2 \text{ g / m}^2 / d$$

Ροή μάζας από διάχυση:

$$D_d = 10^{-4} \text{ cm}^2 / s = 10^{-4} \times 10^{-4} \times 86400 = 8,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / d$$

$$F_{dif} = -D_d \frac{\partial c}{\partial x} = -8,64 \times 10^{-4} \times 0,5 = -0,43 \times 10^{-4} \text{ g / m}^2 / d$$

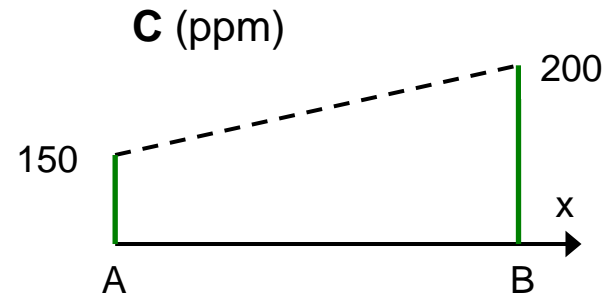
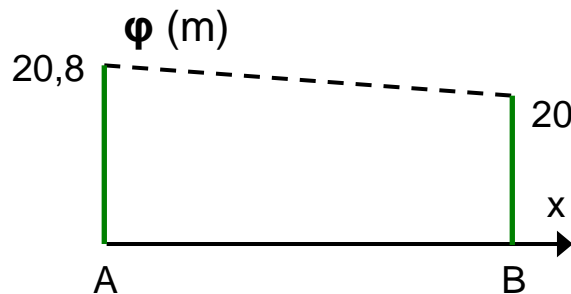


Μεταφορά ρύπων σε υδροφορείς (22/22)

ΣΥΝΟΛΙΚΗ ροή μάζας (ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους)

$$q_{(CT)} = n (F_{adv} + F_{dis} + F_{dif})$$

$$q_{(CT)} = 0,25 \times (192 - 19,2 - 0,43 \times 10^{-4}) = 43,2 \text{ g / m}^2 / d$$



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Νικόλαος Θεοδοσίου.
«Εκμετάλλευση και Προστασία των Υπόγειων Υδατικών Πόρων. Μεταφορά
ρύπων σε υδροφορείς». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2014. Διαθέσιμο από τη
δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.auth.gr/courses/OCRS373/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Παρόμοια Διανομή [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

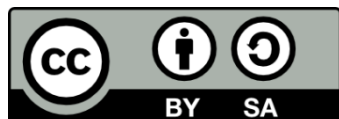
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: <Γιάννης Αυγολούπης>
Θεσσαλονίκη, <Χειμερινό Εξάμηνο 2014-2015>



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

