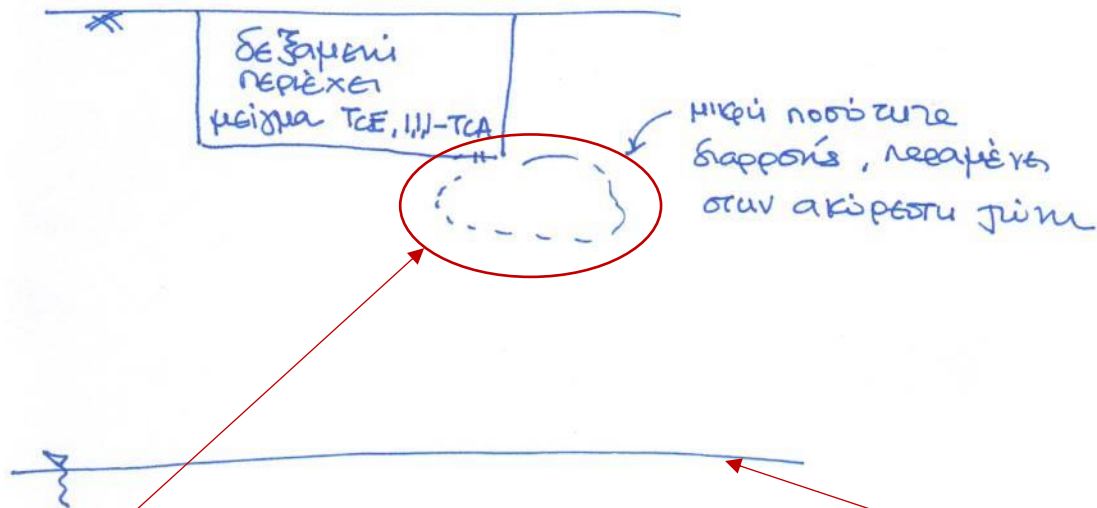


Παράδοση: 24 Νοεμβρίου 2022

1. [Σε αυτό το ερώτημα εξασκείστε να συνοδεύετε περιγραφές και λύσεις προβλημάτων με σχήματα. ΜΗΝ ΔΕΙΤΕ ΣΧΗΜΑΤΑ ΑΛΛΩΝ ΠΡΙΝ ΚΑΝΕΤΕ ΤΟ ΔΙΚΟ ΣΑΣ.] **Φτιάξτε ένα σκίτσο διαρροής** στο υπέδαφος που να αντιστοιχεί στην εκφώνηση του μικρού προβλήματος εξάσκησης Νο 2 από την ιστοσελίδα του μαθήματος στο helios (Παρουσιάσεις -> Ενότητα 6 - > Λυμένες Ασκήσεις). -----



Φτιάχνω μια εικόνα που δείχνει ένα σενάριο διαρροής συμβατό με την εκφώνηση και την περιοχή όπου έχω κυρίως δύο φάσεις, NAPL και αέρα (καθώς είμαι μακριά από τον Υ.Ο.) και έτσι έχει πρακτικό ενδιαφέρον η απάντηση στο μικρό πρόβλημα εξάσκησης Νο 2.

2α. [Σε αυτό το ερώτημα εξασκείστε στην αναζήτηση των παραμέτρων που απαιτούνται στα προβλήματα της ενότητας της αλληλεπίδρασης. Η ερώτηση έχει εκπαιδευτικό χαρακτήρα, δεν αντιστοιχεί σε πραγματική εφαρμογή (άντληση εδαφικού αέρα εφαρμόζουμε όταν ο ρύπος βρίσκεται κυρίως στην ακόρεστη ζώνη).] **Συγκρίνατε την αποτελεσματικότητα** (= μάζα που απομακρύνεται στον ίδιο όγκο αέρα) της απορρύπανσης με τη μέθοδο άντλησης εδαφικού αέρα (soil vapor extraction) για δύο περιστατικά ρύπανσης του υπόγειου νερού: (α) βενζολίου (benzene) με μέση συγκέντρωση 100 $\mu\text{g/l}$ και (β) 1,1,1-τριχλωροαιθανίου (1,1,1-trichloroethane, 1,1,1-TCA) με μέση συγκέντρωση 100 $\mu\text{g/l}$. -----

Η πίεση, και άρα η συγκέντρωση, στον αέρα είναι ανάλογη της συγκέντρωσης στο υδατικό διάλυμα και της σταθεράς του νόμου του Henry, η οποία σύμφωνα με το βιβλίο των LaGrega et al. (1994) είναι μεγαλύτερη για το τριχλωροαιθάνιο (TCA) (βλέπε Πίνακα 1). Άρα, αφού η συγκέντρωση στο υδατικό διάλυμα είναι ίδια για τους δύο ρύπους, για τον ίδιο όγκο αέρα απομακρύνεται μεγαλύτερη μάζα TCA. Αποφασίζω να δω και μια άλλη, πιο έγκυρη πηγή.

Για δεδομένα που είναι προϊόν επιστημονικής μελέτης (όπως πχ ο συντελεστής Henry) **αποφεύγουμε πηγές από το διαδίκτυο** (όμως για κάτι κοινώς γνωστό, όπως το μοριακό βάρος μιας ουσίας, το διαδίκτυο είναι μια χαρά). Προτιμάμε είτε πηγές από επιστημονικά περιοδικά είτε πηγές για τις οποίες κάποιος έχει να βάλει δουλειά και κόπο που αξίζει να πληρωθεί (π.χ. επιστημονικά βιβλία, handbooks). Η αξιοπιστία μιας πηγής είναι μεγαλύτερη αν η πηγή είναι πρωτογενής και αν η πληροφορία είναι σαφές ότι έχει περάσει από κρίση ειδικών. **Επειδή όμως η αξιοπιστία των πηγών δεν είναι προφανής, καλόν είναι να αναζητάει κανείς**

τουλάχιστον δύο πηγές. Κάποιοι από σας βρήκαν δύο τιμές και αναρωτήθηκαν ποια να κρατήσουν. Σ' αυτήν την περίπτωση, ή κρατάει κανείς τη δυσμενέστερη τιμή (αναλόγως εφαρμογής, εδώ προφανώς τη μικρότερη) ή ανατρέχει σε μια σούπερ-αξιόπιστη πηγή, όπως π.χ. η ακόλουθη αναφορά από το Κεφάλαιο 4 του Καββαδά (2013):

- Mackay, D. and W.Y. Shiu (1981). Critical review of Henry's Law constants for chemicals of environmental interest, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol 10, No 4, pp 1175-1199.

ΠΡΟΣΟΧΗ!! Αυτήν την πηγή την βλέπω με τα ίδια μου τα μάτια! Δεν αντιγράφω τιμές που έχουν πάρει από αυτήν την πηγή άλλοι συγγραφείς, π.χ. ο Καββαδάς (2013), γιατί σε αυτήν την περίπτωση η πηγή μου είναι ο Καββαδάς (2013), πηγή μικρότερης αξιοπιστίας από τους Mackay and Shiu (1981) – γιατί;

ΠΡΟΣΟΧΗ!! Στο επιστημονικό και τεχνικό γράψιμο είναι ΑΠΑΤΗ να αναφέρω μια πηγή από δεύτερο χέρι. Αν βέβαια η πηγή είναι δυσεύρετη (όχι τεμπελιές!!), τότε μπορώ να γράψω: «οι Mackay and Shiu (1981), σύμφωνα με τον Καββαδά (2013), παραθέτουν τους εξής συντελεστές Henry...». Για να δούμε λοιπόν τι έχουμε από αυτές τις δύο πηγές.

Οι LaGrega et al. (1994) χρησιμοποιούν την εξής σχέση για τον συντελεστή Henry: $H = e^{\left[\frac{A-B}{T}\right]}$ και δίνουν τιμές για τα A και B. Η θερμοκρασία T είναι σε βαθμούς Kelvin, και ο συντελεστής Henry προκύπτει σε μονάδες atm·m³/mol, που χάριν συγκρίσεως εδώ μετατρέπονται σε kPa·m³/mol. Επειδή ο συντελεστής Henry προκύπτει από εξίσωση, οι τιμές των LaGrega et al. (1994) κατατάσσονται στην κατηγορία «υπολογισμένες». Οι Mackay and Shiu (1981), έχοντας κάνει πάρα πολλή δουλειά, δίνουν τρεις κατηγορίες τιμών: υπολογισμένες τιμές, πειραματικές μετρημένες τιμές και μια συνιστώμενη τιμή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Σύγκριση τιμών συντελεστή Henry από δύο πηγές σε 25°C.

Πηγή	Συντελεστής Henry οργανικών ρύπων (kPa m ³ /mol)	
	Βενζόλιο (B) (MB: 78.12)	1,1,1-Τριχλωροαιθάνιο (1,1,1-TCA) (MB: 133.4)
LaGrega et al. (1994)	(0.0056 atm·m ³ /mol) 0.57	(0.0169 atm·m ³ /mol) 1.71
Mackay and Shiu (1981)	υπολογ.: 0.557	υπολογ.: 2.41 ^a και 3.56
	πείραμα: 0.562	πείραμα: 3.47 ^a
	συνιστώμενη: 0.550 ± 0.25	συνιστώμενη: 2.8 ± 0.04

^a σε 20°

Βλέπουμε ότι μεταξύ των πηγών υπάρχει απόκλιση, αλλά σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής Henry είναι συστηματικά μεγαλύτερος για το 1,1,1-TCA. Οπότε καταλήγω ότι θα έχω πιο πολύ 1,1,1-TCA στον αέρα. Τι εννοώ όμως με «πιο πολύ»; Πόσο ακριβώς; Μπορώ να γίνω πιο σαφής;

Για να ξαναγυρίσω στις αρχικές παραδοχές μου (σελ. 1): «Η πίεση, και άρα η συγκέντρωση, στον αέρα είναι ανάλογη της συγκέντρωσης στο υδατικό διάλυμα και της σταθεράς του νόμου του Henry...». Ωπ! Διαπιστώνω μια χαλαρότητα. Το απολύτως σωστό είναι: «Η τάση, και άρα η μοριακή συγκέντρωση, στον αέρα είναι ανάλογη της μοριακής συγκέντρωσης στο υδατικό διάλυμα και της σταθεράς του νόμου του Henry...». Για να σιγουρευτώ, ανατρέχω στο Παράδειγμα 3 των σημειώσεων. Από το παράδειγμα βλέπω ότι για ίσες συγκεντρώσεις των

ρύπων στο νερό ($C_{TCAw} = C_{Bw}$), οι συγκεντρώσεις στον αέρα (σημ. C_{TCAa} και C_{Ba} είναι οι συγκεντρώσεις εκφρασμένες ως μάζα/όγκο –όχι μοριακές συγκεντρώσεις– στον αέρα) είναι ανάλογες των συντελεστών Henry:

$$\frac{C_{TCAa}}{C_{Ba}} = \frac{\frac{P_{TCA}}{RT} \cdot MB_{TCA}}{\frac{P_B}{RT} \cdot MB_B} = \frac{\frac{H_{TCA} \cdot (C_{TCAw} / MB_{TCA}) \cdot MB_{TCA}}{RT}}{\frac{H_B \cdot (C_{Bw} / MB_B) \cdot MB_B}{RT}} = \frac{H_{TCA}}{H_B}$$

Με άλλα λόγια, αυτό το ερώτημα δεν ήθελε υπολογισμούς, αλλά προσεκτική αναζήτηση αξιόπιστων πηγών για τις σταθερές του νόμου του Henry. Επειδή η αξιοπιστία των πηγών δεν είναι προφανής, καλόν είναι να αναζητάει κανείς τουλάχιστον δύο πηγές. Γενικά αποφεύγετε πηγές από το διαδίκτυο και προτιμάτε είτε πηγές από επιστημονικά περιοδικά είτε πηγές για τις οποίες κάποιος έχουν να βάλει δουλειά και κόπο που αξίζει να πληρωθεί (π.χ. επιστημονικά βιβλία, handbooks). (Επαναλαμβάνομαι, αλλά επανάληψις μήτηρ πάσης μαθήσεως.)

2β. Για τις δύο πιο πάνω ενώσεις, υπολογίστε τον συντελεστή διαχωρισμού μεταξύ υδατικής φάσης και στερεάς φάσης, K_p , για τον ίδιο τύπο εδάφους. Με βάση αποκλειστικά τις τιμές που υπολογίσατε για τον συντελεστή K_p , (δηλ. ανεξάρτητα από την απάντηση στο ερώτημα 1α), ποιον από τους δύο ρύπους θα προτιμούσατε να αντιμετωπίζατε σε έναν ρυπασμένο χώρο;

Πίνακας 2. Τιμές συντελεστή διαχωρισμού οργανικού άνθρακα – υδατικής φάσης (K_{oc}).

Πηγή	K_{oc} (l/kg)	
	Βενζόλιο (B) ($K_{ow} = 132$)	1,1,1-Τριχλωροαιθάνιο (1,1,1-TCA) ($K_{ow} = 316$)
LaGrega et al. (1994)	83	152

Και οι δύο ενώσεις είναι υδροφοβικές. Οπότε, αν το έδαφος που θα θεωρήσω έχει οργανικό κλάσμα $f_{oc}=0.1\%$, μπορώ να υποθέσω ότι θα ισχύει η προσέγγιση $K_p=K_{oc} \times f_{oc}$.

Τον συντελεστή K_{oc} τον βρίσκω στην βιβλιογραφία, το οργανικό κλάσμα πώς θα το διαλέξω; Επειδή θέλω να αρχίσω να αποκτώ μια αίσθηση για τις τιμές που απαντώνται στο πεδίο, ψάχνω στην βιβλιογραφία με λέξεις-κλειδιά organic carbon και sorption και βρίσκω το άρθρο των Allen-King et al. (1997). [Σημ: έτσι αναφερόμαστε σε μια αναφορά εντός κειμένου: Επίθετο Συγγραφέα (έτος), ή Επίθετο Πρώτου Συγγραφέα και άλλοι (έτος) (= et al., συντομογραφία για το «και άλλοι» στα λατινικά), ή Επίθετο Πρώτου Συγγραφέα και συνεργάτες (έτος) (για ελληνική αναφορά), ενώ παραθέτουμε την πλήρη αναφορά στο τέλος, σε ξεχωριστή ενότητα].

Οι Allen-King et al. (1997) μελετούν σε λεπτομέρεια την ρόφηση του τριχλωροαιθενίου σε ένα παγετογενές έδαφος (till) πλούσιο σε άργιλο. Υπολογίζουν πειραματικά τον συντελεστή διαχωρισμού K_p , μετρούν το οργανικό κλάσμα f_{oc} , κι έτσι μπορούν να υπολογίσουν τον συντελεστή διαχωρισμού K_{oc} που αντιστοιχεί στο οργανικό υλικό του χώρου που μελετούν, αντί να τον πάρουν από την βιβλιογραφία, όπως εμείς. Δίνουν αποτελέσματα για δύο εδαφικά δείγματα, με τιμές $f_{oc}=0.68\%$ και 1.95% , δηλ. πρόκειται για ένα έδαφος με σημαντικό οργανικό κλάσματος. Θα κάνω τους υπολογισμούς μου με τον μέσο όρο αυτών των τιμών, δηλ. $f_{oc}=1.3\%$. Γι' αυτήν την τιμή οργανικού κλάσματος, βρίσκω:

Βενζόλιο $K_{p,B} = 1.1 \text{ l/kg}$

Τριχλωροαιθάνιο $K_{p,TCA} = 2.0 \text{ l/kg}$

(Προτιμώ μεγάλο ή μικρό K_p ;))

Διαβάζοντας και το υπόλοιπο άρθρο, βλέπω ότι γι' αυτό το έδαφος η ρόφηση στο οργανικό κλάσμα (απορρόφηση) ήταν πολύ έντονη. Η συμμετοχή της προσρόφησης στις αργιλικές επιφάνειες παρ' όλο που απολύτως ήταν υπολογίσιμη, σε σύγκριση με την απορρόφηση ήταν αμελητέα (σε υδατικό διάλυμα συγκέντρωσης 100 μg/l, η διαφορά ήταν σχεδόν 2 τάξεις μεγέθους, βλέπε Σχήμα 2). Επίσης, επειδή μου ανοίγει η περιέργεια, χαζεύω και τον Πίνακα 3, που δίνει μετρημένες τιμές K_{oc} για το TCE για πολλά εδάφη, και βλέπω ότι οι περισσότερες τιμές είναι πράγματι της ίδιας τάξης μεγέθους με την τιμή που δίνουν οι LaGrega et al. (1994) ($K_{oc,TCE} = 126 \text{ l/kg}$). Πού την έχουν βρει αυτήν την τιμή οι LaGrega et al. (1994); Διαβάζω προσεκτικά την εισαγωγή του παραρτήματος με τα στοιχεία για τους ρύπους και βλέπω ότι οι τιμές K_{oc} που δίνουν οι LaGrega et al. (1994) δεν είναι μετρημένες, αλλά έχουν υπολογιστεί μέσω συσχέτισης με την διαλυτότητα.

Βιβλιογραφικές αναφορές Άσκησης 2

Allen-King, R.M., L.D. McKay and M.R. Trudell (1997), Organic Carbon Dominated Trichloroethene Sorption in a clay-rich glacial deposit, Groundwater, No. 35, No 1, pp. 124-130.

LaGrega, M.D., P.L. Buckingham and J.C. Evans, 1994, Hazardous Waste Management, McGraw-Hill.

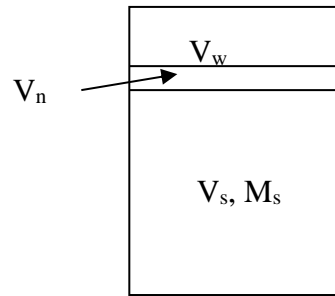
3. [Οι πράξεις που απαιτούνται για να απαντηθεί αυτό το ερώτημα είναι παρόμοιες με αυτές του παραδείγματος υπολογισμού συνολικής μάζας Παρουσιάσεις -> Ενότητα 6 -> Λυμένες Ασκήσεις.] Ας υποθέσουμε ότι θέλετε να προσδιορίσετε ανώτατα όρια για περιστατικά διαρροών οργανικών μη υδατικών ρύπων σε κορεσμένο έδαφος, έχοντας αποφασίσει ότι μπορείτε να επιτρέψετε κάποιον μικρό (παραμένοντα) βαθμό κορεσμού, αφού λόγω των τριχοειδών δυνάμεων η μη υδατική φάση είναι ακινητοποιημένη. Με αυτό το σκεπτικό, υπολογίστε τη μέγιστη συγκέντρωση σε έδαφος που περιέχει 1,1,1-τριχλωροαιθάνιο (1,1,1-trichloroethane – TCA) με μέσο παραμένοντα βαθμό κορεσμού 5%, χρησιμοποιώντας τις εξής παραμέτρους για το έδαφος: πορώδες 0.3 και ειδική πυκνότητα εδαφικών κόκκων 2.65. Αν κάνετε επιπλέον παραδοχές για να ολοκληρώσετε τους υπολογισμούς σας, να τις αναφέρετε σαφώς. Αν χρειαστείτε τις τιμές επιπλέον παραμέτρων, επιλέξατε κάποιες λογικές τιμές: συνιστάται να αναζητάτε τιμές που έχουν μετρηθεί σε πραγματικά περιστατικά. Σε κάθε περίπτωση, αναφέρατε τις πηγές σας (δηλ. δώστε όποια πληροφορία χρειάζεται για να μπορεί ένας τρίτος να βρει αυτό που βρήκατε εσείς). [Σε ποια εφαρμογή αντιστοιχεί αυτό το πρόβλημα: κατά τον χαρακτηρισμό ενός ρυπασμένου χώρου, παίρνω εδαφικά δείγματα και προσδιορίζω τη συγκέντρωση του τριχλωροαιθανίου στο έδαφος: στην περιοχή όπου ξεπερνιέται το ανώτατο όριο που έχω προσδιορίσει με τους υπολογισμούς μου, λαμβάνω κάποια δραστικά μέτρα αποκατάστασης, ενώ για μικρότερες τιμές επιλέγω πιο ήπια μέτρα. Ανάλογο σκεπτικό συναντήσαμε στο περιστατικό ρύπανσης με ορυκτέλαια σε χώρο αποθήκευσης της ΔΕΗ.]

Σχόλιο: το έδαφος παραμένει κορεσμένο, δηλ. χωρίς αέρα, απλά το TCA έχει διώξει (αντικαταστήσει) το 5% του νερού.

Συμβουλή: όταν δουλεύω με συγκεντρώσεις μόνο, επιλέγω εγώ έναν βολικό όγκο αναφοράς, ως πούμε 1 cm^3 .

Σύμφωνα με το παράδειγμα υπολογισμού συνολικής μάζας (Παρουσιάσεις -> Ενότητα 6 -> Λυμένες Ασκήσεις)

$$\begin{aligned}
 V &= 1 \text{ cm}^3 \\
 V_v &= V n = 0.3 \text{ cm}^3 \\
 V_s &= V - V_v = 0.7 \text{ cm}^3 \\
 M_s &= G_s \rho_w V_s = 2.65 \times 1 \text{ g/cm}^3 \times 0.7 \text{ cm}^3 = 1.855 \text{ g} \\
 V_w &= V_v \times S_w = 0.3 \text{ cm}^3 \times 0.95 = 0.285 \text{ cm}^3 \\
 V_n &= V_v \times S_n = 0.3 \text{ cm}^3 \times 0.05 = 0.015 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$



Μάζα (διαλυμένη) στην υδατική φάση = συγκέντρωση στο νερό x όγκος νερού

- Η συγκέντρωση στο νερό είναι ίση με τη διαλυτότητα (600 mg/l)⁽¹⁾ αφού έχουμε ξεχωριστή μη υδατική φάση.

$$M_1 = V_w \times C_{TCAw} = 0.285 \text{ cm}^3 \times 0.6 \text{ mg/cm}^3 = \underline{\underline{0.171 \text{ mg}}}$$

Μάζα (ροφημένη) στη στερεά φάση = συγκέντρωση στη στερεά φάση x ξηρή μάζα στερεάς φάσης

- Για να βρω τη συγκέντρωση στη στερεά φάση πρέπει να εκτιμήσω τον συντελεστή διαχωρισμού K_p . Από τους LaGrega et al. (1994) βρίσκω για το TCA $K_{oc} = 152 \text{ ml/g}$ ⁽²⁾. Για το ποσοστό οργανικού άνθρακα (ή οργανικό κλάσμα), ψάχνω μια τιμή που να έχει μετρηθεί σε πραγματικό έδαφος.

Όπως και στην προηγούμενη άσκηση, χρησιμοποιώ το άρθρο των Allen-King et al. (1997)⁽³⁾. Οι Allen-King et al. (1997) μελετούν σε λεπτομέρεια την ρόφηση τριχλωροαιθενίου σε ένα παγετογενές έδαφος (till) πλούσιο σε άργιλο. (Συγκεκριμένα, υπολογίζουν πειραματικά τον συντελεστή διαχωρισμού K_p , μετρούν το οργανικό κλάσμα f_{oc} , κι έτσι μπορούν να υπολογίσουν τον συντελεστή διαχωρισμού K_{oc} που αντιστοιχεί στο οργανικό υλικό του χώρου που μελετούν, αντί να τον πάρουν από την βιβλιογραφία, όπως εμείς.) Δίνουν αποτελέσματα για δύο εδαφικά δείγματα, με τιμές $f_{oc} = 0.68\%$ και 1.95% , δηλ. πρόκειται για ένα έδαφος με σημαντικό ποσοστό οργανικού άνθρακα. Θα κάνω τους υπολογισμούς μου με τον μέσο όρο αυτών των τιμών, δηλ. $f_{oc} = 1.3\%$.

$$\text{Γι' αυτές τις τιμές υπολογίζω } K_p = K_{oc} \times f_{oc} = 152 \text{ ml/g} \times 0.013 = 1.98 \text{ ml/g} = 1.98 \text{ l/kg.}$$

Συγκέντρωση στη στερεά φάση

$$C_{TCA_s} = K_p C_{TCAw} = 1.98 \text{ l/kg} \times 600 \text{ mg/l} = 1186 \text{ mg/kg} = 1.19 \text{ mg/g}$$

Μάζα στη στερεά φάση

$$M_2 = M_s \times C_{TCA_s} = 1.855 \text{ g} \times 1.19 \text{ mg/g} = \underline{\underline{2.2 \text{ mg}}}$$

Τέλος, **μάζα τριχλωροαιθένιου στη μη υδατική φάση**

$$M_3 = V_n \times d_{TCA}^{(4)} \times \rho_w = 0.015 \text{ cm}^3 \times 1.339 \times 1 \text{ g/cm}^3 = 0.02 \text{ g} = \underline{\underline{20 \text{ mg}}}$$

Άρα, η οριακή συγκέντρωση που ψάχνουμε είναι ίση με:

$$\begin{aligned}
 C_{TCA_{\text{χώμα}}} \text{ (mg/kg)} &= M_{PCE} / M_s = (M_1 + M_2 + M_3) / M_s = 22.37 \text{ mg} / 1.855 \text{ g} \\
 &= 12.06 \text{ mg/g} = \underline{\underline{12060 \text{ mg/kg} \approx 12 \text{ g/kg}}}
 \end{aligned}$$

Σύμφωνα με τις παραδοχές της άσκησης, σε όποια περιοχή του ρυπασμένου χώρου βρίσκουμε τιμή μικρότερη από αυτήν την οριακή συγκέντρωση στο έδαφος, δεν απαιτείται αποκατάσταση.

Παράμετροι - Πηγές

⁽¹⁾**Διαλυτότητα:** $S_{TCA} = 4400 \text{ mg/l}$ (LaGrega et al., 1994) και $= 480-730 \text{ mg/l}$ (Mackay and Shiu, 1981): Εμπιστεύομαι πιο πολύ την δεύτερη αναφορά, επειδή πρόκειται για επιστημονικό περιοδικό με κύρος. Επιπλέον, η απάντησή μου θα είναι πιο συντηρητική αν επιλέξω πιο μικρή διαλυτότητα. Επιλέγω μια μέση τιμή από τους Mackay and Shiu (1981) $C_{TCAw} = 600 \text{ mg/l}$

⁽²⁾**Συντελεστής διαχωρισμού υδατικής φάσης – οργανικού άνθρακα:** $K_{oc} = 152 \text{ ml/g}$ (LaGrega et al., 1994)

⁽³⁾**Ποσοστό οργανικού άνθρακα:** Allen-King, R.M., L.D. McKay and M.R. Trudell, 1997, Organic Carbon Dominated Trichloroethene Sorption in a clay-rich glacial deposit, Groundwater, No. 35, No 1, pp. 124-130.

⁽⁴⁾**Ειδική πυκνότητα:** $d_{TCA} = 1.339$ (Cohen, R.M., J.W Mercer and J. Matthews, 1993, DNAPL Site Evaluation, C.K Smoley.)