

Ποσοτικοποίηση της Παρεχόμενης Προστασίας από Σύνθετες Στρώσεις Στεγάνωσης ΧΥΤΑ: Σύγκριση Εναλλακτικών Μεθόδων Υπολογισμού

Quantifying Protection Offered by Composite Landfill Liners: Comparison of Alternative Calculation Methods

ΚΑΝΔΡΗΣ, Κ. Πολιτικός Μηχανικός
ΠΑΝΤΑΖΙΔΟΥ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Οι κανονισμοί που αναφέρονται στο σχεδιασμό πυθμένων ΧΥΤΑ είναι ασαφείς ως προς τον ορισμό της έννοιας της ισοδύναμης προστασίας που πρέπει να εξασφαλίζει η στρώση στεγάνωσης και, κατά συνέπεια, ως προς την επιλογή των κριτηρίων και των αντίστοιχων μεγεθών που ποσοτικοποιούν την προστασία. Το παρόν άρθρο εξετάζει δύο εναλλακτικά μεγέθη, την παροχή στραγγίσματος και τη συγκέντρωση ρύπου στο στράγγισμα, και συγκρίνει διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού για σύνθετες στρώσεις στεγάνωσης αποτελούμενες από γεωμεμβράνη και άργιλο, συμπυκνωμένη ή γεωσυνθετική. Η σύγκριση δείχνει ότι η επιλογή κριτηρίου και μεθόδου υπολογισμού εξαρτάται από τον τύπο της αργιλικής στρώσης (συμπυκνωμένη ή γεωσυνθετική).

ABSTRACT: Landfill regulations specify that composite liners should provide protection equivalent to that offered by a reference clay layer. However, regulations do not define protection, nor do they provide suggestions for suitable criteria that quantify protection. This article considers two alternative quantities, leachate flow rate and contaminant concentration in the leachate, and compares different calculation methods for composite landfill liners consisting of geomembrane and compacted or geosynthetic clay. Comparison shows that selection of criterion and calculation method depends on the clay layer type (compacted or geosynthetic).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ευρωπαϊκή Οδηγία 1999/31/ΕΚ για την υγειονομική ταφή αποβλήτων και οι αντίστοιχες αποφάσεις για τα αστικά-αδρανή (29407/3508/2002) και επικίνδυνα απόβλητα (13588/725/2006) καθορίζουν το απαιτούμενο επίπεδο προστασίας που πρέπει να προσφέρει η στεγανωτική στρώση ενός χώρου υγειονομικής ταφής αποβλήτων (ΧΥΤΑ) συγκριτικά με ένα αργιλικό στρώμα αναφοράς ελάχιστου πάχους και μέγιστης υδραυλικής αγωγιμότητας. Ενώ όμως οι κανονισμοί καθορίζουν ότι η στεγάνωση πρέπει να επιτυγχάνει προστασία ισοδύναμη αυτής του στρώματος αναφοράς, δεν προτείνουν μεγέθη κατάλληλα για να ποσοτικοποιήσουν την έννοια της προστασίας. Η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει αυτήν την έλλειψη εξετάζοντας δύο εναλλακτικά μεγέθη κατάλληλα για την

ποσοτικοποίηση της προστασίας, την παροχή στραγγίσματος και τη συγκέντρωση ρύπου στο στράγγισμα, και παραθέτοντας διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού αυτών των μεγεθών. Η ποσοτικοποίηση της προστασίας που προσφέρουν οι στρώσεις στεγάνωσης έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας στο παρελθόν (Katsumi et al., 2001, Rowe and Brachman, 2004, Πανταζίδου, 2007). Το παρόν άρθρο δίνει έμφαση στη σύγκριση εναλλακτικών μεθόδων υπολογισμού με βάση την ακρίβεια και την απλότητα εφαρμογής κάθε μεθόδου, καθώς και την ευκολία προσδιορισμού των απαραίτητων παραμέτρων για τους υπολογισμούς. Οι υπολογισμοί γίνονται για δύο σύνθετες στρώσεις Σ1 και Σ2. Η Σ1 αποτελείται από ένα στρώμα γεωμεμβράνης (geomembrane, GM) και ένα στρώμα συμπυκνωμένης αργίλου (compacted clay liner, CCL). Στη Σ2, η συμπυκνωμένη άργιλος

αντικαθίσταται από γεωσυνθετική άργιλο (geosynthetic clay liner, GCL).

2. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΡΟΗΣ

Η έννοια της προστασίας που προσφέρει η στεγανωτική στρώση ΧΥΤΑ μπορεί να ερμηνευθεί με βάση την υδραυλική συμπεριφορά της στρώσης, και να ποσοτικοποιηθεί με την παροχή του στραγγίσματος που διαφεύγει από το ΧΥΤΑ υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (δηλαδή όχι σε περίπτωση αστοχίας της στεγάνωσης). Στο υπόλοιπο αυτής της εργασίας αυτή η ερμηνεία της προστασίας θα αναφέρεται ως “κριτήριο ροής”.

2.1 Άθικτη Γεωμεμβράνη

Αρχικά εξετάζεται η ιδανική περίπτωση όπου η επιφάνεια της γεωμεμβράνης είναι άθικτη, χωρίς ατέλειες. Για τον υπολογισμό της παροχής Q του στραγγίσματος μέσω της στρώσης στεγάνωσης του ΧΥΤΑ, επιλύεται το πρόβλημα μονοδιάστατης ροής για το σύνθετο στρώμα που περιλαμβάνει τη γεωμεμβράνη και το υποκείμενο αργιλικό στρώμα. Η ζητούμενη παροχή προκύπτει από το νόμο του Darcy λαμβάνοντας υπόψη την ισοδύναμη υδραυλική αγωγιμότητα της σύνθετης στρώσης, k_{eq} , που υπολογίζεται ως:

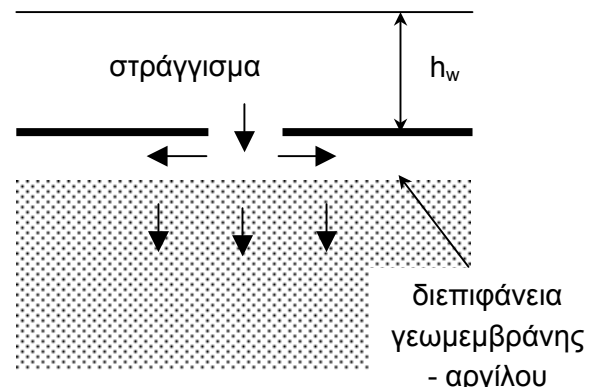
$$k_{eq} = \frac{h_{gm} + h_s}{\frac{h_{gm}}{k_{gm}} + \frac{h_s}{k_s}} \quad (1)$$

όπου h_{gm} και k_{gm} είναι το πάχος και η υδραυλική αγωγιμότητα της γεωμεμβράνης, αντίστοιχα, ενώ h_s και k_s είναι το πάχος και η υδραυλική αγωγιμότητα της υποκείμενης στρώσης χαμηλής περατότητας. Για την εφαρμογή της (1) στις στρώσεις Σ1 και Σ2, τα μεγέθη h_s και k_s αντικαθίστανται με τα αντίστοιχα της συμπυκνωμένης, h_{CCL} και k_{CCL} , και της γεωσυνθετικής, h_{GCL} και k_{GCL} , άργιλου.

2.2 Γεωμεμβράνη με Ατέλειες

Η ύπαρξη ατελειών είναι αναμενόμενη σε κάθε ΧΥΤΑ, αν και η συχνότητα μπορεί να περιοριστεί σημαντικά για καλή ποιότητα κατασκευής και με συστηματικούς ελέγχους. Στην περιοχή της ατέλειας, η ροή δεν είναι πια κατακόρυφη, αλλά είναι αποτέλεσμα τριών συνιστωσών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1: της

κατακόρυφης ροής διαμέσου της ατέλειας, της οριζόντιας ροής στη διεπιφάνεια γεωμεμβράνης-αργίλου και της ροής διαμέσου της άργιλου, που στο Σχήμα 1 δείχνεται απλοποιητικά ως μονοδιάστατη. Ο Κανδρής (2008) δίνει μια εκτενή επισκόπηση των αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού της παροχής στραγγίσματος διαμέσου ατελειών διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών και με βάση διαφορετικές παραδοχές και εμπειρικά δεδομένα. Στην παρούσα εργασία, εξετάζονται οι μέθοδοι των Giroud (1997) και Rowe (1998), οι οποίες υπολογίζουν παροχή στραγγίσματος στην περιοχή μιας κυκλικής ατέλειας.



Σχήμα 1. Οι τρεις συνιστώσες της ροής στην περιοχή ατέλειας γεωμεμβράνης.
Figure 1. The three components of flow in the vicinity of a geomembrane defect.

Η μέθοδος του Giroud (1997) βασίζεται σε εμπειρικές τιμές της διαβιβαστικότητα θ της διεπιφάνειας γεωμεμβράνης-αργίλου, δηλ. της παραμέτρου που καθορίζει την ποσότητα της οριζόντιας συνιστώσας της ροής στο Σχήμα 1. Έτσι, η σχέση για την παροχή περιλαμβάνει έναν συντελεστή θ ο οποίος διαφοροποιείται ανάλογα με την ποιότητα επαφής μεταξύ της γεωμεμβράνης και της αργιλικής στρώσης. Για την περίπτωση καλής επαφής, η παροχή Q δίνεται ως:

$$Q = 0,21 \cdot \left[1 + 0,1 \left(\frac{h_w}{h_s} \right)^{0,95} \right] \cdot a^{0,1} \cdot h_w^{0,9} \cdot k_s^{0,74} \quad (2)$$

όπου h_w είναι το ύψος στραγγίσματος και a η επιφάνεια της κυκλικής ατέλειας. Οι παραδοχές στις οποίες στηρίζεται η (2) επιβάλλουν όρια

εφαρμογής για κυκλικές ατέλειες διαμέτρου μεταξύ 0,5-25mm και ύψος στραγγίσματος μικρότερο από 3m. Επιπλέον, η υδραυλική αγωγιμότητα πρέπει να είναι μικρότερη από το 1/10 αυτής για την οποία η (2) δίνει παροχή ίση με την παροχή ελεύθερης εκροής από στόμιο, περιορισμός που αναμένεται να ικανοποιείται για αργιλικά υλικά. Για τη σωστή εφαρμογή της (2), απαιτείται η αντικατάσταση των τιμών όλων των μεγεθών στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ποιότητας επαφής είναι 1,15 για πτωχή ποιότητα, αντί για 0,21 (δηλ. η παροχή είναι 5,5 φορές μεγαλύτερη για πτωχή ποιότητα), και ότι οι τιμές αυτών των συντελεστών έχουν προκύψει από αντιπροσωπευτικές εργαστηριακές τιμές της διαβιβασιμότητας της διεπιφάνειας γεωμεμβράνης-αργίλου.

Η μέθοδος του Rowe (1998) είναι καθαρά αναλυτική αλλά και σημαντικά πιο περίπλοκη, καθώς ο υπολογισμός της παροχής εμπλέκει τις πιο κάτω σχέσεις:

$$Q = \pi k_s \left(r_o^2 i + 2i \Delta_1 + 2i \Delta_2 - \frac{2h_w}{h_s} \Delta_2 \right) \quad (3)$$

$$\Delta_1 = - \frac{[R \cdot \lambda_1(r_o, R) \cdot K_1(zR)]}{z} - \frac{[R \cdot \lambda_2(r_o, R) \cdot I_1(zR)]}{z} + \frac{r_o \cdot \lambda_1(r_o, R) \cdot K_1(zr_o)}{z} + \frac{[r_o \cdot \lambda_2(r_o, R) \cdot I_1(zr_o)]}{z} \quad (4)$$

$$\Delta_2 = \frac{[-R \cdot \lambda_1(R, r_o) \cdot K_1(zR)]}{z} + \frac{[-R \cdot \lambda_2(R, r_o) \cdot I_1(zR)]}{z} + \frac{r_o \cdot \lambda_1(R, r_o) \cdot K_1(zr_o)}{z} + \frac{[r_o \cdot \lambda_2(R, r_o) \cdot I_1(zr_o)]}{z} \quad (5)$$

$$\lambda_1(X, Y) = I_0(zY) / \left[\begin{array}{l} K_0(zX) I_0(zY) \\ -K_0(zY) I_0(zX) \end{array} \right] \quad (6)$$

$$\lambda_2(X, Y) = K_0(zY) / \left[\begin{array}{l} K_0(zX) I_0(zY) \\ -K_0(zY) I_0(zX) \end{array} \right] \quad (7)$$

$$z^2 = \frac{k_s}{h_s \theta} \quad (8)$$

όπου r_o είναι η ακτίνα της κυκλικής ατέλειας, i είναι η μέση υδραυλική κλίση, ίση με $(h_w + h_s)/h_s$, K_0 , K_1 , I_0 , I_1 είναι εκφράσεις της τροποποιημένης συνάρτησης Bessel, ενώ το μέγεθος R είναι η ακτίνα της βρεχόμενης περιοχής, για την οποία η παράγωγος του υδραυλικού φορτίου, dh/dr , μηδενίζεται:

$$\frac{dh}{dr} = (-h_w - h_s) \Lambda_1 - h_s \Lambda_2 \quad (9)$$

$$\Lambda_1 = \frac{-zK_1(zR)I_0(zR) - zK_0(zR)I_1(zR)}{K_0(zr_o)I_0(zR) - K_0(zR)I_0(zr_o)} \quad (10)$$

$$\Lambda_2 = \frac{-zK_1(zR)I_0(zr_o) - zK_0(zr_o)I_1(zR)}{K_0(zR)I_0(zr_o) - K_0(zr_o)I_0(zR)} \quad (11)$$

Η ακτίνα R βρίσκεται με δοκιμές, αρχίζοντας από $R=r_o$ και αναζητώντας την τιμή που μηδενίζει την (9).

Καθώς η μέθοδος Rowe (1998) στηρίζεται μόνο στην παραδοχή μονοδιάστατης ροής στην αργιλική στρώση, αποφεύγει τους γεωμετρικούς περιορισμούς της (2) και την εξάρτηση από συγκεκριμένα εμπειρικά δεδομένα. Όμως, απαιτεί τον προσδιορισμό της τιμής της διαβιβασιμότητας, θ , ενός μεγέθους που δύσκολα προσεγγίζεται με εργαστηριακά δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιεί και η μέθοδος Giroud (1997). Έτσι, όσον αφορά τη θ , το σχετικό πλεονέκτημα της μεθόδου Rowe (1998) είναι ότι επιτρέπει τη μελέτη της εξάρτησης των αποτελεσμάτων από την τιμή της, κάτι που δεν ισχύει για τη μέθοδο Giroud (1997).

3. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Εναλλακτικά, η προστασία μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με βάση την εξάπλωση του ρυπαντικού φορτίου, υπολογίζοντας την επιβράδυνση στη μεταφορά των επίφοβων συστατικών του στραγγίσματος, δηλ. το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει στην κατάντη παρειά της στεγανωτικής στρώσης μια συγκεκριμένη τιμή της συγκέντρωσής τους.

Στο υπόλοιπο της παρούσας εργασίας αυτή η ερμηνεία της προστασίας θα αναφέρεται ως “κριτήριο μεταφοράς”.

3.1 Άθικτη Γεωμεμβράνη

Κατ’ αντιστοιχία με το κριτήριο ροής, ως αρχική προσέγγιση θεωρείται ότι η επιφάνεια της γεωμεμβράνης δεν εμφανίζει ατέλειες. Κάθε ρύπος στο στράγγισμα μεταφέρεται υπό την επίδραση των φαινομένων της μεταγωγής και της υδροδυναμικής διασποράς. Για απλές εδαφικές στρώσεις, σύμφωνα με τη γνωστή λύση για μονοδιάστατη ροή και μεταφορά, η συγκέντρωση του ρύπου, c , σε σημείο x συναρτήσει του χρόνου, t , δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{c(x,t)}{c_o} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - (v/R_d) \cdot t}{2\sqrt{(D/R_d) \cdot t}} \right) + \exp\left(\frac{vx}{D}\right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + (v/R_d) \cdot t}{2\sqrt{(D/R_d) \cdot t}} \right) \right] \quad (12)$$

όπου c_o είναι η συγκέντρωση του ρύπου στο στράγγισμα, v η ταχύτητα μεταγωγής, R_d ο συντελεστής υστέρησης, και D ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς.

Για την εφαρμογή της εξίσωσης (12) σε σύνθετες στρώσεις πυθμένα ΧΥΤΑ, η ταχύτητα μεταγωγής μπορεί να υπολογιστεί ως $v = k_{eq} \cdot i / n_s$, όπου n_s είναι το πορώδες της αργίλου (n_{CCL} ή n_{GCL}). Για τον υπολογισμό της συμβολής της υδροδυναμικής διασποράς, οι Foose et al. (1999) προτείνουν την αντικατάσταση του όρου (D/R_d) με ένα σταθμισμένο ισοδύναμο συντελεστή, $D_{eq,Rd}$, ο οποίος δίνεται ως:

$$D_{eq,Rd} = \left(\frac{h_{gm} + h_s}{\frac{h_{gm}}{K_{gm}^p \cdot D_{gm}} + \frac{h_s}{(D_s/R_d) \cdot n_s}} \right) + a_L \cdot \frac{k_{eq} \cdot i}{n_s \cdot R_d} \quad (13)$$

όπου K_{gm}^p είναι ο συντελεστής διαχωρισμού της γεωμεμβράνης για τον κάθε ρύπο, D_{gm} και D_s ο συντελεστής διάχυσης σε γεωμεμβράνη και άργιλο (D_{CCL} ή D_{GCL}), αντίστοιχα, και a_L ο συντελεστής διαμήκους μηχανικής διασποράς.

Η εξίσωση (12) υπολογίζεται για $x=h_s$ για να προσδιοριστεί η συγκέντρωση ρύπου στην κατάντη παρειά της αργιλικής στρώσης για διαφορετικές χρονικές στιγμές.

3.2 Γεωμεμβράνη με Ατέλειες

Από διαφορετική σκοπιά επιχειρούν οι Katsumi et al. (2001) να επιλύσουν το πρόβλημα μεταφοράς, θέτοντας ως βασική παράμετρο του προβλήματος το είδος του ρύπου που εξετάζεται. Καθώς το υλικό της γεωμεμβράνης αποτελεί αποτελεσματικό φραγμό για τα ανόργανα συστατικά, γι’ αυτούς τους ρύπους οι Katsumi et al. (2001), όχι μόνο δεν αποδέχονται τη λογική της άθικτης γεωμεμβράνης, αλλά αντίθετα αναφέρουν ότι η βασική δίοδος μεταφοράς ρύπου θα είναι η ροή από τις υπάρχουσες ατέλειες. Ως εκ τούτου, η κύρια συνιστώσα της μεταφοράς είναι η μεταγωγή και η υδροδυναμική διασπορά στο στρώμα αργίλου στην περιοχή γύρω από τις ατέλειες της γεωμεμβράνης (δηλ. στη βρεχόμενη περιοχή). Έτσι, ουσιαστικά προτείνεται εκ νέου η εξίσωση (12), αλλά για μεταφορά στην αργιλική στρώση αποκλειστικά.

Αντίθετα, για τους οργανικούς ρύπους η γεωμεμβράνη δεν αποτελεί ισχυρό φραγμό. Γι’ αυτό, ως κύριος μηχανισμός μεταφοράς θεωρείται η διάχυση, διαμέσου της συνολικής επιφάνειας του πυθμένα. Έτσι, δεν εξετάζεται η ύπαρξη ατελειών, αφού η συνεισφορά τους στη μεταφορά αναμένεται να είναι μικρή. Επίσης, η συνεισφορά της μεταγωγής θεωρείται αμελητέα λόγω της ιδιαίτερα χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας της γεωμεμβράνης. Τέλος, δεν λαμβάνεται υπόψιν η γεωμεμβράνη κατά την εξέταση της διάχυσης, αφού έχει αρκετά μικρότερο πάχος από αυτό της αργιλικής στρώσης και επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, δεν συντελεί καθοριστικά στην επιβράδυνση της διάχυσης των οργανικών ρύπων. Έτσι, επιλύεται η εξίσωση για μονοδιάστατη διάχυση για $x=h_s$:

$$\frac{c(x = h_s, t)}{c_o} = \operatorname{erfc} \left[\frac{h_s}{2\sqrt{(D_s/R_d) \cdot t}} \right] \quad (14)$$

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή των κριτηρίων ροής και μεταφοράς απαιτεί τον προσδιορισμό των παραμέτρων του Πίνακα 1. Για το κριτήριο της μεταφοράς, εξετάστηκε το ιόν χλωρίου και το

βενζόλιο, ως αντιπροσωπευτικά συστατικά των ανόργανων και των οργανικών ρύπων του στραγγίσματος.

Πίνακας 1. Τιμές των παραμέτρων που απαιτούνται για τους υπολογισμούς.
Table 1. Values of input parameters.

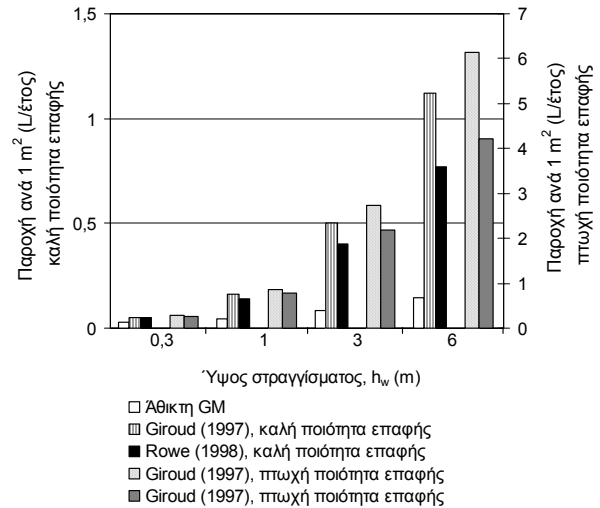
Παράμετρος	Ιόν χλωρίου	Βενζόλιο
R_d	1	
Παράμετροι γεωμεμβράνης		
h_{gm} (m)	0,0015	
k_{gm} (m/s) ^(α)	$1,0 \cdot 10^{-15}$	
$K_{gm}^p \cdot D_{gm}$ (m ² /s) ^(β)	$8,0 \cdot 10^{-17}$	$2,0 \cdot 10^{-12}$
r_o (mm) ^(γ,δ)	5,65	
N (ατέλειες/m ²) ^(γ,δ)	2,5/10.000	
Παράμετροι συμπυκνωμένης αργίλου		
h_{CCL} (m) ^(ε)	1,0	
k_{CCL} (m/s) ^(ζ)	$1,0 \cdot 10^{-9}$	
n_{CCL} (η,θ)	0,54	
D_{CCL} (m ² /s) ^(η,θ)	$6,34 \cdot 10^{-10}$	
a_L (m)	0,1	
Παράμετροι γεωσυνθετικής αργίλου		
h_{GCL} (m)	0,007	
k_{GCL} (m/s) ^(β,ι,κ)	$1,0 \cdot 10^{-11}$	
n_{GCL} (β)	0,70	
D_{GCL} (m ² /s) ^(β,λ)	$1,6 \cdot 10^{-10}$	
a_L (m)	$8,5 \cdot 10^{-4}$	
Παράμετροι διεπιφάνειας γεωμεμβράνης και υποκείμενης στρώσης		
θ_{GM-CCL} (m ² /s) ^(β,μ)	$1,0 \cdot 10^{-7}$, πτωχή επαφή $1,8 \cdot 10^{-8}$, καλή επαφή	
θ_{GM-GCL} (m ² /s) ^(ν)	$6,0 \cdot 10^{-9}$	

(α)Haxo et al. (1984), (β)Rowe (1998), (γ)Gilbert & Tang (1995), (δ)Giroud & Bonaparte (1989), (ε)1999/31/EK, (ζ)Benson et al. (1999), (η)Shackelford & Daniel (1991), (θ)Kim et al. (1997), (ι)Estornell & Daniel (1992), (κ)Ruhl & Daniel (1997), (λ)Rowe et al. (2005), (μ)Brown et al. (1987), (ν)Harpur et al. (1983)

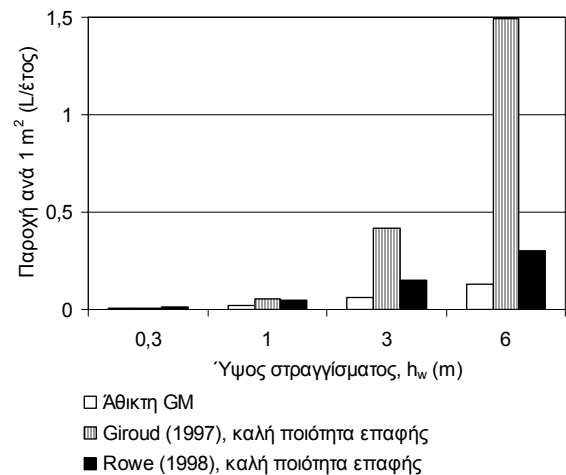
4.1 Κριτήριο Ποής

Υπενθυμίζεται ότι η παροχή στραγγίσματος, Q, υπολογίστηκε με τρεις μεθόδους: για άθικτη γεωμεμβράνη και για γεωμεμβράνη με ατέλειες από τις εξισώσεις (2) (Giroud, 1997) και (3) (Rowe, 1998). Οι υπολογισμοί έγιναν για δύο στρώσεις που αποτελούνται από γεωμεμβράνη και συμπυκνωμένη (Σ1) ή

γεωσυνθετική (Σ2) άργιλο. Τα αποτελέσματα δίνονται στα Σχήματα 2 και 3, αντίστοιχα. Για τη σύνθετη στρώση Σ2, οι υπολογισμοί έγιναν μόνο για την περίπτωση καλής ποιότητας επαφής, αφού αυτή είναι σχετικά εύκολο να επιτευχθεί για επαφή γεωμεμβράνης με γεωσυνθετική άργιλο, σε σχέση με την επαφή γεωμεμβράνης με συμπυκνωμένη άργιλο.



Σχήμα 2. Παροχή διαμέσου της σύνθετης στρώσης Σ1 για διαφορετικές τιμές ύψους στραγγίσματος και μεθόδους υπολογισμού.
Figure 2. Flow rate through composite layer Σ1 (GM-CCL), for different leachate heights and calculation methods.



Σχήμα 3. Παροχή διαμέσου της σύνθετης στρώσης Σ2 για διαφορετικές τιμές ύψους στραγγίσματος και μεθόδους υπολογισμού.
Figure 3. Flow rate through composite layer Σ2 (GM-GCL), for different leachate heights and calculation methods.

Οι μέθοδοι των Rowe (1998) και Giroud (1997) συμφωνούν ικανοποιητικά για τη

στρώση Σ1, για ύψος στραγγίσματος έως 3m, δίνοντας λόγο παροχών, Q_{Rowe}/Q_{Giroud} , μεταξύ 0,80 ($h_w=3m$) και 0,96 ($h_w=1m$). Για μεγάλο ύψος στραγγίσματος, η υπερεκτίμηση της παροχής από τη μέθοδο Giroud (1997) γίνεται σημαντική, ιδιαίτερα για τη στρώση με τη γεωσυνθετική άργιλο (Σ2), όπως άλλωστε αναμένεται, αφού έχουν ξεπεραστεί τα όρια εφαρμοσιμότητας της μεθόδου.

Η συμβολή της ροής διαμέσου της άθικτης γεωμεμβράνης είναι πάντα μικρή για την περίπτωση πτωχής ποιότητας επαφής και μπορεί να αγνοηθεί. Για την περίπτωση καλής επαφής, η παροχή διαμέσου της άθικτης γεωμεμβράνης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την παροχή διαμέσου των ατελειών, η οποία όταν υπολογίζεται κατά Rowe (1998) είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 2 έως 3 φορές.

Η σύγκριση των δύο στρώσεων μεταξύ τους δείχνει ότι, σύμφωνα με το κριτήριο ροής, η Σ2 (με 7mm γεωσυνθετική άργιλο) υπερτερεί συστηματικά της Σ1 (με 1m συμπυκνωμένη άργιλο).

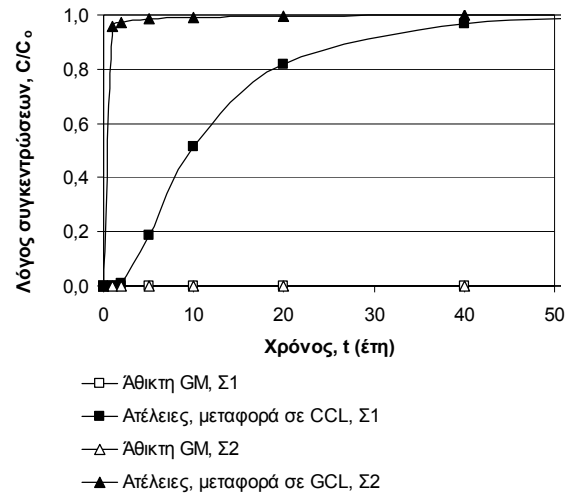
4.2 Κριτήριο Μεταφοράς

Υπενθυμίζεται ότι η συγκέντρωση ρύπου στην κατάντη παρειά της αργιλικής στρώσης, c , υπολογίστηκε με δύο μεθόδους. Για άθικτη γεωμεμβράνη, με την εξίσωση (12) για σταθμισμένες παραμέτρους γεωμεμβράνης-αργίλου. Για την περίπτωση ατελειών (Katsumi et al., 2001), η συγκέντρωση του ιόντος χλωρίου υπολογίστηκε πάλι από την (12) αλλά για τις παραμέτρους των αργιλικών υλικών, ενώ η συγκέντρωση του βενζολίου υπολογίστηκε από την (14). Τα αποτελέσματα δίνονται στα Σχήματα 4 (ιόν χλωρίου) και 5 (βενζόλιο), για ύψος στραγγίσματος $h_w=0,3m$.

Από το Σχήμα 4 φαίνεται ότι η παραδοχή της άθικτης γεωμεμβράνης είναι πλήρως ακατάλληλη για τους ανόργανους ρύπους, αφού καταλήγει στον υπολογισμό πρακτικώς μηδενικής μεταφοράς. Η σύγκριση των δύο στρώσεων με το κριτήριο μεταφοράς οδηγεί στο αντίθετο συμπέρασμα σε σχέση με το κριτήριο ροής: η στρώση Σ1 υπερτερεί, καθώς επιτυγχάνει σημαντική επιβράδυνση της εξάπλωσης του ρύπου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι συγκέντρωση ιόντος χλωρίου c ίση με $c_0/10$ φτάνει στο φυσικό έδαφος σε 4,5 χρόνια ή 1 μέρα, διαμέσου της Σ1 ή Σ2, αντίστοιχα.

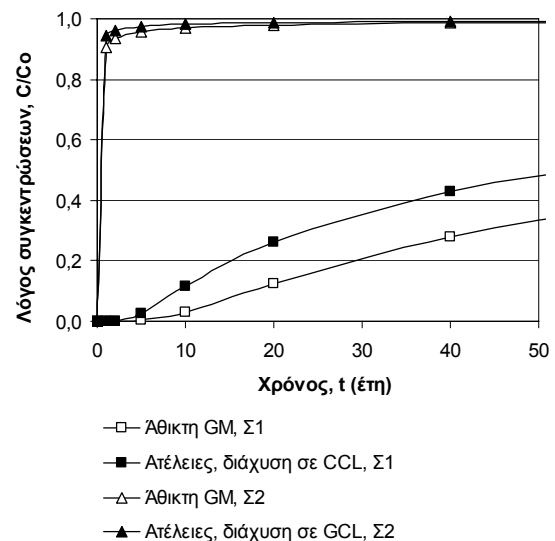
Αντίθετα με τους ανόργανους ρύπους, η παραδοχή της άθικτης γεωμεμβράνης μπορεί να εκτιμήσει τη μεταφορά οργανικών ρύπων διαμέσου της σύνθετης στρώσης με ακρίβεια

τάξης μεγέθους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Για παράδειγμα, συγκέντρωση βενζολίου c ίση με $c_0/10$ φτάνει διαμέσου της Σ1 στο φυσικό έδαφος σε 9,5 ή 15,5 χρόνια, για παραδοχή ύπαρξης ή μη ατελειών, αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Συγκέντρωση ιόντος χλωρίου στην κατάντη παρειά των σύνθετων στρώσεων Σ1, Σ2 συναρτήσει του χρόνου.

Figure 4. Concentration of chloride ion at the downstream boundary of composite liners Σ1 (GM-CCL), Σ2 (GM-GCL) as a function of time.



Σχήμα 5. Συγκέντρωση βενζολίου στην κατάντη παρειά των σύνθετων στρώσεων Σ1, Σ2 συναρτήσει του χρόνου.

Figure 5. Concentration of benzene at the downstream boundary of composite liners Σ1 (GM-CCL), Σ2 (GM-GCL) as a function of time.

Στη μεταξύ τους σύγκριση, η σύνθετη στρώση με τη συμπυκνωμένη άργιλο (Σ1) και πάλι υπερτερεί, όπως και στην περίπτωση των ανόργανων ρύπων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι

συγκέντρωση βενζολίου c ίση με $c_0/10$ φτάνει στο φυσικό έδαφος σε 9,5 χρόνια ή 1 μέρα, διαμέσου της Σ1 ή Σ2, αντίστοιχα. Καθίσταται σαφές ότι το πολύ μικρό πάχος της γεωσυνθετικής αργίλου αδυνατεί να επιβραδύνει αποτελεσματικά την εξάπλωση των ρύπων του στραγγίσματος (οργανικών ή ανόργανων).

4.3 Συζήτηση

Η γενίκευση των πιο πάνω αποτελεσμάτων απαιτεί ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με τις τιμές των παραμέτρων του Πίνακα 1, η οποία δεν είναι δυνατόν να περιγραφεί στο πλαίσιο του παρόντος άρθρου. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στον Κανδρή (2008) για αναλυτική παρουσίαση σχετικά με (α) το εύρος των τιμών κάθε παραμέτρου, από το οποίο επιλέχθηκαν αυτές του Πίνακα 1, (β) τις αβεβαιότητες που συνδέονται με την κάθε παράμετρο, (γ) την ανάλυση ευαισθησίας για τις πιο αβέβαιες παραμέτρους και (δ) τα συμπεράσματά της. Εδώ θα σχολιαστούν επιλεκτικά μόνο κάποιες παράμετροι.

Η παροχή εξαρτάται άμεσα από το ύψος στραγγίσματος και τα χαρακτηριστικά των ατελειών (διαστάσεις και συχνότητα). Το ύψος στραγγίσματος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας θα πρέπει να μην ξεπερνάει τα 0,3m (Giroud & Bonaparte, 1989) και, άρα, σημαντικά υψηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε συνθήκες αστοχίας του συστήματος απαγωγής στραγγίσματος. Ο υπολογισμός της μεταφοράς έγινε για $h_w=0,3m$, υποθέτοντας σε βάθος χρόνου δεκαετιών κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Η επιλεγείσα ακτίνα της κυκλικής ατέλειας είναι η μέγιστη τιμή που μετρήθηκε επί τόπου σε μελέτη 16 χώρων απόθεσης επικινδύνων αποβλήτων (Gilbert & Tang, 1995), ενώ η συχνότητα των ατελειών αναφέρεται από τους Giroud & Bonaparte (1989) ως αντιπροσωπευτική καλής ποιότητας κατασκευής.

Η σχετική συμβολή ροής διαμέσου άθικτης γεωμεμβράνης–ατελειών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των ατελειών και από την υδραυλική αγωγιμότητα της γεωμεμβράνης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για $k_{gm} = 10^{-13}$ m/s, η συμβολή της ροής διαμέσου των ατελειών [κατά Rowe (1998) και για τις τιμές του Πίνακα 1] είναι αμελητέα για περίπτωση καλής ποιότητας επαφής, ενώ είναι ίση με ποσοστό 10% ($h_w=0,3m$) έως 30% ($h_w=6m$) της παροχής διαμέσου της άθικτης γεωμεμβράνης σε περίπτωση πτωχής ποιότητας επαφής.

Όσον αφορά το κριτήριο μεταφοράς, ο προσδιορισμός των παραμέτρων επιβάλλει την αναζήτηση τιμών που μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το ρύπο που εξετάζεται. Σημειώνεται ότι, ενώ ο συντελεστής διάχυσης δεν έχει μεγάλη διακύμανση, ο συντελεστής υστέρησης αναμένεται να διαφέρει σημαντικά για διαφορετικούς ρύπους. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε η παραδοχή της μηδενικής υστέρησης ($R_d=1$), που αντιστοιχεί στην πιο δυσμενή περίπτωση.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ποσοτικοποίηση της προστασίας που προσφέρει η στρώση στεγάνωσης πυθμένων ΧΥΤΑ ενδιαφέρει είτε για την εκτίμηση ισοδυναμίας μεταξύ εναλλακτικών στρώσεων ή για την εκτίμηση πιθανών επιπτώσεων ενός ΧΥΤΑ. Όσον αφορά την ισοδυναμία μεταξύ δύο σύνθετων στρώσεων, τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας έδειξαν ότι είναι ασφαλές αυτή να εκτιμάται με συνδυασμένα κριτήρια ροής και μεταφοράς, όταν διερευνάται η επιλογή μεταξύ συμπυκνωμένης ή γεωσυνθετικής αργίλου.

Όταν επιλέγεται το κριτήριο ροής, η μέθοδος Giroud (1997) υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την παροχή για το ύψος στραγγίσματος που αναμένεται υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Για ύψος στραγγίσματος που αντιστοιχεί σε συνθήκες αστοχίας του συστήματος απαγωγής στραγγίσματος, θα πρέπει να εφαρμοστεί η μέθοδος Rowe (1998) με τη βοήθεια λογισμικού (π.χ. EXCEL) για τον υπολογισμό των συναρτήσεων Bessel. Σ' αυτήν την περίπτωση, θα πρέπει να προσδιοριστεί ένα αντιπροσωπευτικό εύρος τιμών της διαβιβαστικότητα. Συνιστάται ο υπολογισμός της θ για συνθήκες καλής και πτωχής ποιότητας επαφής μεταξύ γεωμεμβράνης και συμπυκνωμένης αργίλου, καθώς, και για τις δύο μεθόδους [Giroud (1997) και Rowe (1998)], η παροχή για πτωχή ποιότητα επαφής είναι 5 έως 6 φορές μεγαλύτερη από την παροχή που αντιστοιχεί στην καλή ποιότητα επαφής. Επίσης, ανάλογα με την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας της γεωμεμβράνης και τα χαρακτηριστικά των ατελειών, συνιστάται να εξετάζεται η σχετική συμβολή στη συνολική παροχή της ροής διαμέσου των ατελειών και της άθικτης γεωμεμβράνης.

Η επιλογή του κριτηρίου μεταφοράς απαιτεί πιο πολύπλοκους υπολογισμούς και τον προσδιορισμό σημαντικού αριθμού επιπλέον

παραμέτρων. Αυτοί οι επιπλέον υπολογισμοί είναι όμως απαραίτητοι για τις σύνθετες στρώσεις με γεωσυνθετική άργιλο, για τις οποίες το κριτήριο ροής δίνει επισφαλή συμπεράσματα.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Απόφαση 13588/725/2006, Μέτρα όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικινδύνων αποβλήτων..., ΦΕΚ 383B, 28-3-2006.

Benson, C.H., Daniel, D.E. and Boutwell, G.P. (1999), "Field performance of compacted clay liners", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, Vol. 125, No. 5, pp. 390-403.

Brown, K.W., Thomas, J.C., Lyhon, R.L., Jayawickrama, P. and Bart, S.C. (1987), "Quantification of leak rates through holes in landfill liners", USEPA Report CR 810940, Cincinnati, USA.

Estornell, P. and Daniel, D.E. (1992), "Hydraulic conductivity of three geosynthetic clay liners", *J. of Geotechnical Eng.*, Vol. 118, No. 10, pp. 1592-1606.

Foose, G.J., Benson, C.H. and Edil, T.B. (1999), "Equivalency of composite geosynthetic clay liners as a barrier to volatile organic compounds", *Geosynthetics '99 Conf.*, Boston, pp. 321-334.

Gilbert, R.B. and Tang, W.H. (1995), "Reliability-based design for waste containment systems", *Proc. of Geoenvironment 2000, Geotech. Spec. Publ. No. 46*, ASCE, New York, pp. 499-513.

Giroud, J.P. (1997), "Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners through geomembrane defects", *Geosynthetics International*, Vol. 4, No. 3-4, pp. 335-348.

Giroud, J.P. and Bonaparte, R. (1989), "Leakage through liners constructed with geomembranes – Part I. Geomembrane liners", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 8, pp. 27-67.

Harpur, W.A., Wilson-Fahmy, R.F. and Koerner, R.M. (1993), "Evaluation of the contact between geosynthetic clay liners and geomembranes in terms of transmissivity", *Proc. 7th GRI Conference on Geosynthetic Liner Systems: Innovations, Concerns and Design*, IFAI, St. Paul, MN pp. 138-149.

Haxo, H.E., Jr., Miedema, J.A. and Nelson, N.A. (1984), "Permeability of polymeric

membrane lining materials for waste management facilities", *Education symposium: Migration of gases, liquids and solids in elastomers*, 126th Meeting Rubber Division, American Chemical Society, Denver, Colorado, October 23-26.

Κανδρής, Κ. (2008), "Στεγανωτικές στρώσεις ΧΥΤΑ: Κριτήρια σχεδιασμού και μέθοδοι αποτίμησης προστασίας", *Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*.

Katsumi, T., Benson, C., Foose, G. and Kamon, M. (2001), "Performance-based design of landfill liners", *Engineering Geology*, Vol. 60, pp. 139-148.

Kim, J.Y., Edil, T.B. and Park, J.K. (1997), "Effective porosity and seepage velocity in column tests on compacted clay", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, Vol. 123, No. 12, pp. 1135-1142.

Κοινή Υπουργική Απόφαση 29407/3508/2002, Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων, ΦΕΚ 1572B, 16-12-2002.

Οδηγία 1999/31/ΕΚ του Συμβουλίου της 26^{ης} Απριλίου 1999 περί υγειονομικής ταφής αποβλήτων.

Πανταζίδου, Μ. (2007), "Υπολογισμός προστασίας στεγάνωσης χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων", *Ημερίδα ΤΕΕ "Γεωτεχνικές Εφαρμογές Γεωσυνθετικών Υλικών"*, 11-1-2007.

Rowe, R.K. (1998), "Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste", *Proc. of the 6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, Georgia, pp. 27-102.

Rowe, R.K. and Brachman, R.W.I. (2004), "Assessment of equivalence of composite liners", *Geosynthetics International*, Vol. 11, No. 4, pp. 273-286.

Rowe, R.K., Mukunoki, T. and Sangam, H.P. (2005), "BTEX diffusion and sorption for a geosynthetic clay liner at two temperatures", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, Vol. 131, No. 10, pp. 1211-1221.

Ruhl, J.L. and Daniel, D.E. (1997), "Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, Vol. 123, No. 4, pp. 369-381.

Schackelford, C.D. and Daniel, D.E. (1991), "Diffusion in saturated soil. II: Results for compacted clay", *J. of Geotechnical Eng.*, Vol. 117, No. 3, pp. 485-506.