

Υπολογισμός Προστασίας Στεγάνωσης Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων

Calculating Protection Offered by Landfill Liners

ΠΑΝΤΑΖΙΔΟΥ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός, Επίκ. Καθηγήτρια, ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Οι κανονισμοί στεγανωτικών στρώσεων ΧΥΤΑ καθορίζουν τις απαιτήσεις σχεδιασμού συγκριτικά με ένα αργιλικό στρώμα αναφοράς ελάχιστου πάχους και μέγιστης υδραυλικής αγωγιμότητας, το οποίο οριοθετεί την ελάχιστη προστασία. Καθώς όμως οι κανονισμοί δεν αναφέρονται σε κάποιο μέγεθος κατάλληλο να αποτιμήσει ποσοτικά την προστασία, δίνουν τη δυνατότητα εναλλακτικών ορισμών. Η παρούσα εργασία συγκρίνει δύο ερμηνείες της προστασίας, με βάση (α) την παροχή στραγγίσματος και (β) τη μεταφορά συστατικών του στραγγίσματος. Στη συνέχεια παρουσιάζει εναλλακτικές μεθόδους υπολογισμού της προστασίας και αναλύει τα σχετικά πλεονέκτηματά της κάθε προσέγγισης.

ABSTRACT: European regulations concerning landfill liners specify design requirements in comparison to a reference clay liner of minimum thickness and maximum hydraulic conductivity, which delimits the minimum allowable protection. The regulations, however, do not offer any suggestions for variables suitable to quantify protection, leaving open the possibility of alternative definitions. This paper compares two interpretations of protection, on the basis of (a) flowrate of leachate (b) transport of leachate constituents. It then presents alternative methods of calculating protection and discusses the relative merits of each approach.

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 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 προσφέροντας εναλλακτικές ερμηνείες της προστασίας και παραθέτοντας διαφορετικές μεθόδους ποσοτικοποίησης της προστασίας.

Όπως θα φανεί, η ανάγκη σαφούς ορισμού γίνεται πιο επιτακτική στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται γεωσυνθετικές άργιλοι στην κατασκευή στεγανωτικών στρώσεων ΧΥΤΑ. Σκοπός της εργασίας είναι να καταδείξει τις διαφορές που προκύπτουν από τις εναλλακτικές ερμηνείες και να επισημάνει τα σχετικά πλεονεκτήματα εναλλακτικών μεθόδων υπολογισμού της προστασίας.

2. ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΤΕΓΑΝΩΣΗΣ

Η έννοια της προστασίας που προσφέρει η στεγανωτική στρώση ΧΥΤΑ μπορεί να ερμηνευθεί με βάση την υδραυλική συμπεριφορά της στρώσης, υπολογίζοντας 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 παροχής”.

Εναλλακτικά, η προστασία μπορεί να υπολογιστεί με βάση την εξάπλωση του ρυπαντικού φορτίου, υπολογίζοντας την επιβράδυνση στη μεταφορά των συστατικών του στραγγίσματος, δηλ. το χρόνο που απαιτείται για να φτάσουν αυτά στην κατάντη παρειά της στεγανωτικής στρώσης ή στον υποκείμενο υδροφόρο. Στο υπόλοιπο αυτής της εργασίας αυτή η ερμηνεία της προστασίας θα αναφέρεται ως “κριτήριο μεταφοράς”. Ο χρόνος μεταφοράς εξαρτάται βέβαια και από την ταχύτητα διήθησης του στραγγίσματος, η οποία είναι ανάλογη της παροχής, δηλ. του μέτρου στο οποίο βασίζεται το προηγούμενο κριτήριο. Καθώς όμως αυτή η εξάρτηση δεν είναι γραμμική, τα δύο κριτήρια, όπως θα δειχθεί και από τα παραδείγματα της Ενότητας 3, δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα.

Η ευρωπαϊκή οδηγία όπως και οι αντίστοιχες ελληνικές μεταφράσεις αφήνουν επιπλέον ανοιχτό το ερώτημα σε ποια στρώματα αναφέρεται ο υπολογισμός της ισοδυναμίας. Πριν δοθούν πιθανές απαντήσεις σ’ αυτό το ερώτημα, κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στο ακριβές κείμενο της Απόφασης 29407/3508/2002 (Παράρτημα Ι, Παράγρ. 3.2):

“Ο πυθμένας [...] συνίσταται από στρώμα γεωλογικού υλικού, το οποίο πρέπει να πληροί απαιτήσεις υδροπερατότητας και πάχους, οι οποίες, όσον αφορά την προστασία του εδάφους και των επιφανειακών και υπογείων υδάτων, έχουν συνδυασμένο αποτέλεσμα τουλάχιστον ισοδύναμο με εκείνο που προκύπτει από τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- ΧΥΤ μη επικινδύνων αποβλήτων: $K \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s, πάχους ≥ 1 m,
- ΧΥΤ επικινδύνων αποβλήτων: $K \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s, πάχους ≥ 5 m.

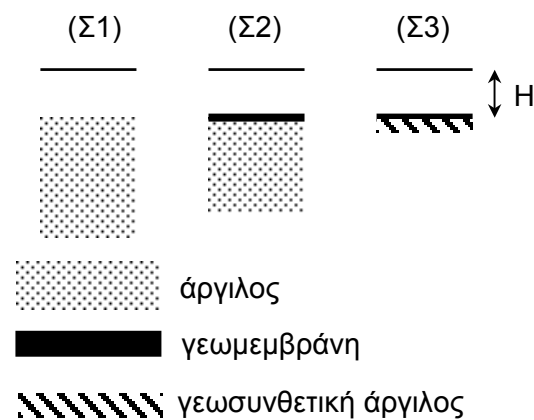
Εάν το στρώμα γεωλογικού φραγμού δεν πληροί εκ φύσεως τις ως άνω προϋποθέσεις, μπορεί να συμπληρώνεται τεχνητά και να ενισχύεται με άλλα μέσα που παρέχουν ισοδύναμη προστασία.”

Η πλέον συντηρητική ερμηνεία της ισοδυναμίας αντιστοιχεί στη σύγκριση της προστασίας που προσφέρουν τα αργιλικά στρώματα μόνον, δηλ. στη σύγκριση του στρώματος αναφοράς με το στρώμα σχεδιασμού της συμπυκνωμένης αργίλου (compacted clay liner, CCL) ή της γεωσυνθετικής αργίλου (geosynthetic clay liner, GCL). Σ’ αυτήν την περίπτωση, η γεωμεμβράνη είτε θεωρείται ότι αποτελεί μέρος

και των δύο στρωμάτων (δηλ. αναφοράς και σχεδιασμού) ή δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό προστασίας. Εναλλακτικά, το στρώμα αναφοράς των κανονισμών συγκρίνεται με το σύνθετο στρώμα γεωμεμβράνης – συμπυκνωμένης αργίλου ή γεωμεμβράνης – γεωσυνθετικής αργίλου. Οι ενδεικτικοί υπολογισμοί που ακολουθούν έχουν βασιστεί σ’ αυτήν τη δεύτερη ερμηνεία.

3. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΤΕΓΑΝΩΣΗΣ: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Αυτή η ενότητα συγκρίνει την προστασία τριών στρώσεων στεγάνωσης, όπως φαίνονται στο Σχήμα 1: του στρώματος αναφοράς (στρώση Σ1) και δύο σύνθετων στρώσεων στεγάνωσης αποτελούμενων από 1.5mm γεωμεμβράνης και 0.8m συμπυκνωμένης αργίλου (στρώση Σ2) ή 1.5 mm γεωμεμβράνης και γεωσυνθετική άργιλο πάχους 7mm (στρώση Σ3). Ο υπολογισμός της προστασίας θα γίνει και με τα δύο κριτήρια ισοδυναμίας της Ενότητας 2, υποθέτοντας ότι η γεωμεμβράνη δεν έχει καμία ατέλεια και έτσι επικρατούν συνθήκες μονοδιάστατης ροής και μεταφοράς (στην κατακόρυφη κατεύθυνση).



Σχήμα 1. Τρεις στρώσεις στεγάνωσης με υπερκείμενο ύψος στραγγίσματος H.
Figure 1. Three landfill bottom liners subjected to leachate height H.

3.1 Κριτήριο Παροχής

Για τον υπολογισμό της παροχής διαμέσου σύνθετων στρώσεων χρειάζεται να υπολογιστεί η ισοδύναμη κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα, K_v , ως συνάρτηση του πάχους, d_i , και της υδραυλικής αγωγιμότητας, K_i , του κάθε επί μέρους στρώματος i (δηλ. της γεωμεμβράνης και του αργιλικού στρώματος) από την εξίσωση:

$$K_v = \frac{\sum_{i=1}^m d_i}{\sum_{i=1}^m d_i / K_i} \quad (1)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται και για τις τρεις στρώσεις του σχήματος 1 η παροχή, Q , για μοναδιαία επιφάνεια ροής A από τον τύπο:

$$Q = KiA \quad (2)$$

όπου i είναι η υδραυλική κλίση, η οποία υπολογίζεται υποθέτοντας ότι το στράγγισμα έχει ατμοσφαιρική πίεση στη διεπαφή στρώσης στεγάνωσης – φυσικού εδάφους. Πρέπει να σημειωθεί ότι η υδραυλική κλίση δεν είναι ίδια στις τρεις στρώσεις, αφού εξαρτάται όχι μόνο από το ύψος στραγγίσματος H που είναι κοινό, αλλά και από το συνολικό μήκος ροής, δηλ. το συνολικό πάχος της κάθε στρώσης.

Πίνακας 1. Δεδομένα υπολογισμού παροχής και ταχύτητας μεταγωγής.

Table 1. Data required to calculate flowrate and velocity of advective transport.

Υλικά	Υδραυλική αγωγιμότητα (m/s)	Πάχος (m)	Πορώδες
Συμπυκνωμένη άργιλος (Σ1, Σ2)	1×10^{-9}	Σ1: 1 Σ2: 0.8	0.4 ^(α)
Γεωσυνθετική άργιλος (Σ3)	2×10^{-10} (β)	0.007	0.7 ^(β)
Γεωμεμβράνη (Σ2, Σ3)	1×10^{-13} (α)	0.0015	0.02 ^(α)

^α Mitchell (1987), ^β Rowe and Brachman (2004)

Για υδραυλική αγωγιμότητα και πάχος υλικών στεγάνωσης από τον Πίνακα 1 και για ύψος στραγγίσματος $H = 10\text{m}$ (που αντιστοιχεί σε σοβαρή αστοχία του συστήματος συλλογής στραγγίσματος), υπολογίζονται οι τιμές παροχής που δίνονται στον Πίνακα 2 για $A = 1\text{m}^2$. Από τον Πίνακα 2 φαίνεται ότι, σύμφωνα με το κριτήριο παροχής, οι δύο σύνθετες στρώσεις είναι σχεδόν ισοδύναμες και προσφέρουν 16 φορές μεγαλύτερη προστασία από τη στρώση αναφοράς.

3.2 Κριτήριο Μεταφοράς

Το κριτήριο μεταφοράς απαιτεί τον υπολογισμό της ταχύτητας μεταγωγής \bar{v} , δηλ. της ταχύτητας Darcy, $v = Ki$, διαιρεμένης με

το πορώδες, που δίνεται για τα τρία υλικά στον Πίνακα 1. Το κριτήριο μπορεί να εφαρμοστεί είτε απλοποιητικά, υπολογίζοντας το χρόνο άφιξης του μετώπου μεταφοράς συστατικών του στραγγίσματος λόγω μεταγωγής ($\sum t_i = \sum d_i / \bar{v}_i$, για κάθε στρώμα i), είτε υπολογίζοντας το χρόνο άφιξης μιας συγκεκριμένης συγκέντρωσης κάποιου συστατικού του στραγγίσματος. Ο χρόνος άφιξης συγκέντρωσης C προκύπτει από την προσεγγιστική λύση της εξίσωσης μεταφοράς λόγω μεταγωγής, διασποράς και διάχυσης:

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \bar{v}t}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (3)$$

όπου C_o είναι η συγκέντρωση συστατικού στο στράγγισμα εντός του ΧΥΤΑ και D είναι ο συντελεστής διάχυσης και διασποράς (στην παρούσα εφαρμογή, λόγω μικρών ταχυτήτων μεταγωγής η διασπορά μπορεί να αγνοηθεί). Από την εξίσωση (3), και για x ίσο με 1m (Σ1), 0.8m (Σ2) ή 0.007 m (Σ3), υπολογίζεται ο χρόνος t που απαιτείται για να παρατηρηθεί στην κατάντη παρειά λόγος συγκεντρώσεων $C/C_o = 1\%$. Οι Καββαδάς και Πανταζίδου (2006) παραθέτουν με λεπτομέρειες τα βήματα αυτού του υπολογισμού, καθώς επίσης και πίνακα με τις τιμές της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος, erfc , που απαιτεί η επίλυση της (3). Για τις τιμές του Πίνακα 1 και για συντελεστή διάχυσης $D = 32 \text{ cm}^2/\text{έτος}$, υπολογίζονται οι χρόνοι άφιξης που δίνονται στον Πίνακα 2.

Η σύγκριση του χρόνου άφιξης της στρώσης Σ1 με τους χρόνους των Σ2 και Σ3 δείχνει ότι το κριτήριο μεταφοράς είναι πιο αυστηρό από το κριτήριο παροχής. Σύγκριση των τιμών στις δύο τελευταίες στήλες δείχνει ότι ο απλοποιητικός υπολογισμός της άφιξης του μετώπου μεταγωγής δεν είναι υπέρ της ασφάλειας, αφού δίνει τιμές έως και σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τους χρόνους που προκύπτουν από την επίλυση της εξίσωσης (3) [για περαιτέρω συζήτηση των δύο εφαρμογών του κριτηρίου μεταφοράς βλέπε Πανταζίδου (2003)]. Ίσως το πιο ενδιαφέρον όμως αποτέλεσμα αφορά τη σύγκριση των δύο σύνθετων στρώσεων, οι οποίες, όπως προαναφέρθηκε, σύμφωνα με το κριτήριο παροχής είναι πρακτικώς ισοδύναμες. Αντίθετα, σύμφωνα με το κριτήριο μεταφοράς, η σύνθετη στρώση με τη γεωσυνθετική άργιλο (Σ3) υπολείπεται κατά πολύ της σύνθετης

Πίνακας 2. Αποτελέσματα υπολογισμών προστασίας στεγανωτικών στρώσεων με βάση διαφορετικούς ορισμούς της προστασίας.

Table 2. Results from calculations of protection offered by landfill bottom liners according to different protection criteria.

	Κριτήριο Παροχής		Κριτήριο Μεταφοράς	
	Παροχή (ανά 1 m ²)		Χρόνος άφιξης μετώπου μεταγωγής (έτη)	Χρόνος άφιξης συγκέντρωσης C=0.01C ₀ (έτη)
	(m ³ /s)	λίτρα/έτος (lt/y)		
Στρώση αναφοράς Σ1	1.1×10 ⁻⁸	347	1.15	0.99
Σύνθετη στρώση Σ2: με συμπυκνωμένη άργιλο	6.9×10 ⁻¹⁰	21.6	15	6.25
Σύνθετη στρώση Σ3: με γεωσυνθετική άργιλο	6.7×10 ⁻¹⁰	21.2	0.23	0.19*

*επειδή η εξίσωση (3) είναι προσεγγιστική και το λάθος μεγαλώνει όσο μειώνεται η απόσταση, ο ακριβής υπολογισμός θα δώσει ακόμα μικρότερο χρόνο για τη μικρού πάχους στρώση Σ3

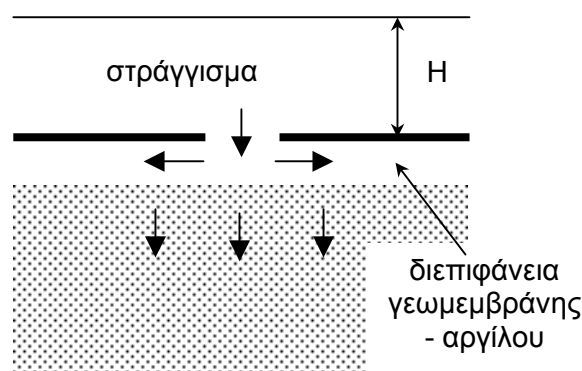
στρώσης με τη συμπυκνωμένη άργιλο (Σ2). Αξίζει επιπλέον να τονιστεί ότι ενώ η στρώση Σ3 σύμφωνα με το κριτήριο παροχής προσφέρει προστασία 16 φορές μεγαλύτερη αυτής του στρώματος αναφοράς (Σ1), δηλ. υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις των κανονισμών, σύμφωνα με το κριτήριο μεταφοράς παρέχει μόνο το 1/5 της προστασίας που απαιτούν οι κανονισμοί. Αυτοί οι μικροί χρόνοι άφιξης για τη στρώση Σ3 είναι αποτέλεσμα του μικρού πάχους της γεωσυνθετικής αργίλου, το οποίο δεν μπορεί να πετύχει σημαντική επιβράδυνση της εξάπλωσης του ρυπαντικού φορτίου.

4. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΤΕΓΑΝΩΣΗΣ: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

Η ανάλυση που προηγήθηκε στην Ενότητα 3 βασίζεται στην παραδοχή ότι η γεωμεμβράνη των σύνθετων στρώσεων είναι άθικτη. Αυτή η παραδοχή κρίνεται ικανοποιητική για αναλύσεις ισοδυναμίας, αλλά δεν μπορεί να δώσει μια αντιπροσωπευτική εικόνα της επιβάρυνσης του υπεδάφους από το ΧΥΤΑ. Επίσης, κατά την εφαρμογή της εξίσωσης (3) υπολογίζεται μεν έμμεσα η συμβολή της γεωμεμβράνης, στη μείωση της ταχύτητας ροής, αλλά όχι και άμεσα, στην επιβράδυνση της μεταφοράς. Τέλος, ο υπολογισμός δεν διαφοροποιείται ανάλογα με την απόσταση του ΧΥΤΑ από τον υδροφόρο ορίζοντα. Για να αντιμετωπιστούν αυτοί οι περιορισμοί, έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές μέθοδοι υπολογισμού της προστασίας, οι οποίες παρατίθενται περιληπτικά σ' αυτήν την ενότητα.

4.1 Κριτήριο Παροχής: Υπολογισμός με Ατέλειες στη Γεωμεμβράνη

Η ύπαρξη ατελειών είναι αναμενόμενη σε κάθε ΧΥΤΑ, αν και 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 δείχνει το Σχήμα 2: της κατακόρυφης ροής διαμέσου της ατέλειας, της οριζόντιας ροής στη διεπιφάνεια γεωμεμβράνης-αργίλου και της κατακόρυφης ροής διαμέσου της αργίλου.



Σχήμα 2. Οι τρεις συνιστώσες της ροής στην περιοχή ατέλειας γεωμεμβράνης.

Figure 2. The three components of flow in the vicinity of a geomembrane defect.

Πολλοί ερευνητές έχουν υπολογίσει αναλυτικά την παροχή για ροή διαμέσου ατελειών με διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και με βάση διαφορετικές παραδοχές και εμπειρικά δεδομένα (Giroud

and Bonaparte, 1989, Giroud, 1997, Rowe, 1998). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι κάποιες λύσεις βασίζονται σε δεδομένες εμπειρικές τιμές της διαβιβασιμότητας της διεπιφάνειας γεωμεμβράνης-αργίλου (πχ Giroud, 1997), δηλ. της παραμέτρου που καθορίζει την ποσότητα της οριζόντιας συνιστώσας της ροής στο Σχήμα 2, ενώ άλλες απαιτούν τον προσδιορισμό της διαβιβασιμότητας για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (πχ Rowe, 1998). Παράλληλα, αριθμητικές προσομοιώσεις έχουν προσφέρει δεδομένα σχετικά με την ακρίβεια των αναλυτικών μεθόδων (Foose et al., 2001).

Στην παρούσα εργασία, έχει επιλεγεί η σχέση που προτείνει ο Giroud (1997) για κυκλική οπή, επειδή είναι εύχρηστη και αρκετά ακριβής για ικανό εύρος εφαρμογών:

$$Q = 0.21\{1 + 0.1(H/d_s)^{0.95}\}a^{0.1}H^{0.9}K_s^{0.74} \quad (4)$$

όπου d_s και K_s είναι το πάχος και η υδραυλική αγωγιμότητα του αργιλικού στρώματος, αντίστοιχα, και a είναι η επιφάνεια της κυκλικής ατέλειας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εξίσωση (4) αντιστοιχεί σε καλή ποιότητα κατασκευής (η παροχή είναι 5.5 φορές μεγαλύτερη για πτωχή ποιότητα) και έχει προκύψει για αντιπροσωπευτικές εργαστηριακές τιμές της διαβιβασιμότητας της διεπιφάνειας γεωμεμβράνης-αργίλου. Η εφαρμογή της (4) απαιτεί βέβαια επιπλέον δεδομένα σε σχέση με την εξίσωση (2), όπως το μέγεθος της ατέλειας και, για να γίνει αναγωγή στη συνολική επιφάνεια του ΧΥΤΑ, τη συχνότητα εμφάνισης ατελειών. Ο Πίνακας 3 συγκρίνει τα αποτελέσματα των εξισώσεων (2) και (4) για ύψος στραγγίσματος $H = 3\text{m}$ [το άνω όριο εφαρμογής της (4)], $a = 1\text{cm}^2$ και συχνότητα ατελειών 0.5 οπές/1000m² [τιμές συγκρίσιμες με τις προτεινόμενες από τους Giroud and Bonaparte (1989) για καλή ποιότητα κατασκευής].

Παρόλη την αβεβαιότητα όσον αφορά την ακρίβεια της παροχής που δίνει η εξίσωση (4) για τη στρώση Σ3 (Foose et al., 2001), το συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 3 είναι ότι η παροχή διαμέσου των ατελειών είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την παροχή διαμέσου της άθικτης στεγανωτικής στρώσης, ακόμα και για καλή ποιότητα κατασκευής. Γι'αυτό η συμβολή των ατελειών στον υπολογισμό της παροχής δεν πρέπει να αγνοείται, τουλάχιστον κατά την εκτίμηση των επιπτώσεων ΧΥΤΑ στον υποκείμενο υδροφόρο.

Πίνακας 3. Παροχή διαμέσου (α) άθικτης στεγανωτικής στρώσης ΧΥΤΑ και (β) ατελειών της γεωμεμβράνης.

Table 3. Flowrate through (a) intact landfill bottom liners and (b) geomembrane defects.

	Παροχή (lt/y) ανά 1 m ²	
	α: χωρίς ατέλειες	β: μέσω ατελειών
Στρώση Σ2	7.6	1.0
Στρώση Σ3	6.4	7.7*

*καθώς η εξίσωση (4) δεν μπορεί να λάβει υπόψη τη μειωμένη διαβιβασιμότητα της διεπιφάνειας γεωμεμβράνης – γεωσυνθετικών αργίλων, αυτή η τιμή είναι πιθανά κατά πολύ μεγαλύτερη της πραγματικής (βλέπε και Foose et al., 2001)

4.2 Κριτήριο Μεταφοράς: Υπολογισμός με Ατέλειες στη Γεωμεμβράνη

Οι υπολογισμοί της συμβολής των ατελειών στη μεταφορά συστατικών του στραγγίσματος είναι περίπλοκοι και έτσι απαιτείται η χρήση αριθμητικών προσομοιώσεων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των Foose et al. (2002) οι οποίοι συγκρίνουν την αποτελεσματικότητα σύνθετων στρώσεων στεγάνωσης ανάλογων των Σ2 και Σ3 του παρόντος άρθρου, όπου όμως η συνολική παροχή της στρώσης Σ3 είναι δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη της παροχής της Σ2. Μάλιστα διαφοροποιούν περαιτέρω τις αναλύσεις τους για ανόργανους ρύπους, οι οποίοι επιβραδύνονται πολύ αποτελεσματικά από τη γεωμεμβράνη, σε αντίθεση με τους οργανικούς ρύπους, οι οποίοι διαχέονται σε σημαντικό βαθμό διαμέσου της γεωμεμβράνης. Τελικά οι Foose et al. (2002) δείχνουν ότι για τις ανόργανες ουσίες, οι οποίες θα εξαπλωθούν κυρίως διαμέσου των ατελειών, υπερτερούν οι στεγανωτικές στρώσεις που μπορούν να πετύχουν χαμηλή παροχή (δηλ. οι στρώσεις με γεωσυνθετικές αργίλους), εφόσον επιτευχθούν συνθήκες μόνιμης μεταφοράς. Αντίθετα, όταν ενδιαφέρει η επιβράδυνση των οργανικών ρύπων, υπερτερούν οι στρώσεις με συμπυκνωμένη άργιλο επειδή έχουν μεγαλύτερο πάχος.

4.3 Κριτήριο Μεταφοράς: ο Ρόλος του Υποκείμενου Εδάφους

Σύμφωνα με τα παραπάνω, θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει ότι τα λεπτού πάχους

γεωσυνθετικά αργιλικά υλικά δεν είναι τόσο αποτελεσματικές στρώσεις στεγάνωσης. Για να αποκτήσει όμως ο αναγνώστης μια πιο ολοκληρωμένη άποψη, θα πρέπει να γίνει αναφορά και στα αποτελέσματα των Rowe and Brachman (2004), οι οποίοι μελέτησαν με αριθμητικές προσομοιώσεις την ισοδυναμία στεγανωτικών στρώσεων με ατέλειες, συνυπολογίζοντας τη συμβολή του φυσικού εδάφους, το οποίο παίζει το ρόλο ενός στρώματος περαιτέρω εξασθένησης του ρυπαντικού φορτίου. Με αυτές τις προϋποθέσεις, οι Rowe and Brachman (2004) έδειξαν ότι είναι δυνατόν σύνθετες στρώσεις με γεωσυνθετικές αργίλους να προσφέρουν προστασία του υποκείμενου υδροφορέα ισοδύναμη αυτής των σύνθετων στρώσεων με συμπυκνωμένη άργιλο, ακόμα και σύμφωνα με το κριτήριο της μεταφοράς.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία έδειξε ότι εναλλακτικές ερμηνείες της προστασίας οδηγούν σε σημαντικές διαφορές στον υπολογισμό της ισοδύναμης προστασίας στεγανωτικών στρώσεων ΧΥΤΑ. Οι διαφορές δεν είναι μεγάλες για τις σύνθετες στρώσεις συμπυκνωμένης αργίλου, και γι'αυτό η επιλογή κριτηρίου δεν κρίνεται ως καθοριστική για αυτές τις περιπτώσεις. Αντίθετα, οι διαφορές γίνονται πολύ σημαντικές για τις σύνθετες στρώσεις με γεωσυνθετικές αργίλους, οι οποίες λόγω μικρού πάχους υστερούν ως προς το βαθμό που μπορούν να επιβραδύνουν την εξάπλωση των συστατικών του στραγγίσματος. Επειδή λοιπόν το κριτήριο παροχής δεν είναι υπέρ της ασφάλειας, συνιστάται η εφαρμογή του κριτηρίου της μεταφοράς για τις γεωσυνθετικές αργίλους. Επιπλέον, συνιστάται να συνυπολογίζεται και η συμβολή του υποκείμενου φυσικού εδάφους στην εξασθένηση του ρυπαντικού φορτίου σε περίπτωση υδροφορέα σε ικανό βάθος κάτω από τον ΧΥΤΑ. Αυτή η προσέγγιση συμπληρώνει κατά κάποιο τρόπο τις απαιτήσεις των κανονισμών, οι οποίοι ασχολούνται συγκριτικά με την ισοδυναμία πιθανών στρώσεων στεγάνωσης, χωρίς όμως να θεωρούν και την αποτελεσματικότητα της προστασίας που προσφέρει η επιλεχθείσα στρώση.

Ο υπολογισμός προστασίας με βάση την παραδοχή της άθικτης γεωμεμβράνης δίνει μεν ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τη σύγκριση ισοδυναμίας εναλλακτικών

στρώσεων στεγάνωσης, αλλά δεν μπορεί να αποτιμήσει την αποτελεσματικότητα μιας συγκεκριμένης στεγανωτικής στρώσης. Για την αντιπροσωπευτική αποτίμηση της προστασίας του υποκείμενου υδροφορέα, συνιστάται να λαμβάνονται υπόψη και οι αναπόφευκτες ατέλειες της γεωμεμβράνης, η συχνότητα και το μέγεθος των οποίων εξαρτώνται από την ποιότητα κατασκευής. Βέβαια ο υπολογισμός της παροχής και της μεταφοράς συστατικών του στραγγίσματος διαμέσου τόσο της άθικτης στεγάνωσης όσο και των ατελειών της γεωμεμβράνης είναι πιο πολύπλοκος και απαιτεί τον προσδιορισμό επιπλέον παραμέτρων. Όμως αυτός ο πρόσθετος υπολογιστικός φόρτος εξισορροπείται από τη δυνατότητα όχι μόνο της καλύτερης αποτίμησης των επιπτώσεων στο γεωπεριβάλλον, αλλά και της ποσοτικής "μετάφρασης" του κόστους αυξημένων ελέγχων, για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας κατασκευής, σε μειωμένες επιπτώσεις στον υποκείμενο υδροφορέα (Πανταζίδου και συνεργάτες, 2005). Τέλος, η δυνατότητα αντιπροσωπευτικής ποσοτικοποίησης της διήθησης στραγγίσματος διαμέσου της στεγανωτικής στρώσης επιτρέπει επίσης την ορθολογική επιλογή συστημάτων παρακολούθησης ΧΥΤΑ επιπλέον των φρεάτων παρακολούθησης που επιβάλλουν οι κανονισμοί (Skylakis et al., 2006), καθώς ο έγκαιρος, ή πιο ακριβής, εντοπισμός διαρροής στεγάνωσης ΧΥΤΑ και πάλι μεταφράζεται σε μειωμένες επιπτώσεις στον υποκείμενο υδροφορέα, ή σε μειωμένο κόστος αποκατάστασης.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

Foose, G.J., Benson, C.H. and Edil, T.B. (2001), "Predicting leakage through composite landfill liners", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 6, pp. 510-520.

Foose, G.J., Benson, C.H. and Edil, T.B. (2002), "Comparison of solute transport in three composite liners", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 5, pp. 391-403.

- 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, No. 2, pp. 27-67.
- Καββαδάς, Μ. και Πανταζίδου, Μ. (2006), "Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής", Εκδόσεις Ε.Μ. Πολυτεχνείο.
- Κοινή Υπουργική Απόφαση 29407/3508/2002, Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων, ΦΕΚ 1572Β, 16 Δεκεμβρίου 2002.
- Mitchell, J.K. (1987), Σημειώσεις μαθήματος "Soil Behavior", UC Berkeley.
- Οδηγία 1999/31/ΕΚ του Συμβουλίου της 26^{ης} Απριλίου 1999 περί υγειονομικής ταφής αποβλήτων.
- Πανταζίδου, Μ., Παπαμαρινόπουλος, Α., Σκυλάκης, Ε. και Τσατσανίφος, Χ. (2005), "Συνδυασμένη θεώρηση προστασίας, παρακολούθησης και αποκατάστασης ΧΥΤΑ", HELECO 2005 - 5^η Διεθνής Έκθεση και Συνέδριο για την Τεχνολογία Περιβάλλοντος, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου.
- Πανταζίδου, Μ. (2003), "Χώροι υγειονομικής ταφής αποβλήτων", Κεφάλαιο 8 στο βιβλίο "Περιβαλλοντική Τεχνολογία", Ανδρεαδάκης Α., Μ. Πανταζίδου, Α. Σταθόπουλος, Κ. Χατζημπίρος, Εκδόσεις Ε.Μ. Πολυτεχνείο.
- Rowe, R.K. (1998), "Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste", *Proceedings 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.
- Skylakis, E., Pantazidou, M. and Tsatsanifos, C. (2006), "Incorporating probability of liner failure and restoration costs when evaluating landfill liner designs and monitoring procedures", *Proceedings of the 5th International Congress on Environmental Geotechnics*, Cardiff, Wales, UK, June 26-30, pp. 789-796.