

# Αντιδιαβρωτική Προστασία με Χρήση Γεωσυνθετικών Υλικών.

## Erosion Control Using Geosynthetics.

ΦΙΚΙΡΗΣ, Ι. Φ. Πολιτικός Μηχανικός MSc, DIC, ΕΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Παρουσιάζονται οι εφαρμογές των γεωσυνθετικών υλικών για την αντιδιαβρωτική προστασία εδαφών. Γίνεται συνοπτική παρουσίαση των μηχανισμών διάβρωσης και των παραγόντων που επηρεάζουν την διαβρωσιμότητα του εδάφους. Περιγράφονται οι εναλλακτικές λύσεις που παρέχουν τα γεωσυνθετικά υλικά με ιδιαίτερη αναφορά στα μέτρα αντιδιαβρωτικής προστασίας i) πρανών χωματουργικών έργων, ii) οχθών καναλιών, χειμάρρων, ποταμών κτλ, και iii) ακτογραμμών που υπόκεινται στη δράση κυματισμών. Τέλος, παρουσιάζονται καινοτόμες τεχνικές λύσεις με χρήση γεωσυνθετικών υλικών, με ιδιαίτερη αναφορά στους γεωσωλήνες, που δύναται να χρησιμοποιηθούν μεταξύ άλλων εφαρμογών και ως αντιδιαβρωτικά μέτρα.

**ABSTRACT :** Erosion control measures using geosynthetics are presented. A short review of soil erosion processes as well as of the factors that influence soil erodibility is presented. The alternative solutions that geosynthetics could provide against soil erosion are presented, with particular reference on i) earthwork slopes ii) canal, torrent and river banks and iii) coastal beaches and cliffs subjected to wave actions. Finally, innovative solutions with geosynthetics are presented, with particular reference on the application of geotubes as erosion control measures and as alternative engineering solutions.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

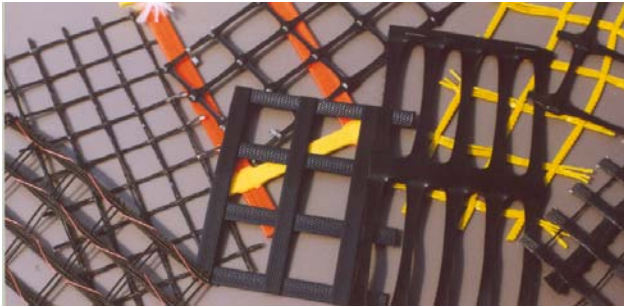
Σε κανέναν άλλο τομέα της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού δεν υπήρξε τα τελευταία χρόνια τόσο ραγδαία εξέλιξη σε σύγκριση με το πεδίο εφαρμογής των γεωσυνθετικών υλικών (geosynthetics) στα τεχνικά έργα. Η απλότητα των βασικών αρχών μελέτης των τεχνικών έργων που συμπεριλαμβάνουν τέτοια υλικά, τα κατασκευαστικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα που παρέχουν, το εύρος του πεδίου εφαρμογής τους, τα οικονομικά οφέλη που τις περισσότερες φορές συνεπάγονται από την χρησιμοποίησή τους, η βιομηχανοποίηση της παραγωγής τους και, τέλος, η υλοποίηση τεχνικά ανέφικτων χωρίς αυτά λύσεων αποτελούν τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα που οδήγησαν στην ταχεία αποδοχή τους από τον τεχνικό κόσμο. Είναι χαρακτηριστικό ότι το έτος 1970 υπήρχαν διαθέσιμοι μόνον 5-6 τύποι γεωσυνθετικών υλικών ενώ στις μέρες μας διατίθενται στο εμπόριο περισσότεροι από 600 διαφορετικοί τύποι (Holtz 2001).

Παρά το γεγονός ότι οι πρώτες χρήσεις των γεωσυνθετικών υλικών αφορούσαν ως επί το πλείστον την ενίσχυση της διατμητικής αντοχής εδαφών εντός του σώματος επιχωμάτων, σήμερα η εξέλιξη των υλικών αυτών έχει διευρύνει τον τομέα εφαρμογής τους. Έχουν αναφερθεί περισσότερες από 150 διαφορετικές εφαρμογές με γεωσυνθετικά υλικά (Holtz et. al. 1997, Koerner 1998), καθιστώντας τα στις ημέρες μας βασικό τεχνικό εργαλείο για τους μηχανικούς. Η ποικιλία λοιπόν τόσο στους τύπους των γεωσυνθετικών υλικών όσο και στις επιμέρους ιδιότητές τους επιτρέπει την εκμετάλλευσή τους για την εξυπηρέτηση πολλαπλών λειτουργιών. Σύμφωνα με το IGS (1998), τα γεωσυνθετικά υλικά ανάλογα με τη βασική λειτουργία για την οποία καλούνται να χρησιμοποιηθούν μπορεί να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

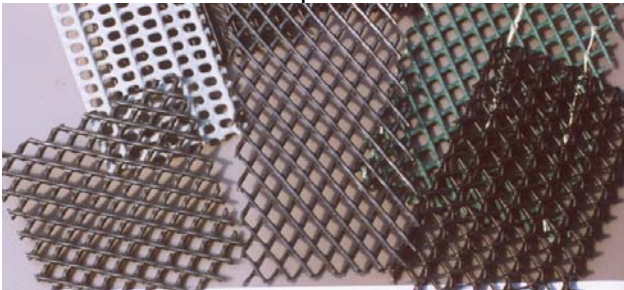
- Συγκράτηση (containment), π.χ. για τη συγκράτηση κόκκων εδάφους με σκοπό τη διατήρηση συγκεκριμένης γεωμετρίας
- Αποστράγγιση (drainage), π.χ. για τη συλ-



α



β



γ



δ



ε

Φωτογραφία 1. Τύποι γεωσυνθετικών υλικών  
 α) γεωυφάσματα, β) γεωπλέγματα, γ) γεωδίκτυα, δ) γεωμεμβράνες και ε) γεωσύνθετα υλικά.  
 Photograph 1. Geosynthetic types α) geotextiles β) geogrids, γ) geonets, δ) geomembranes, and ε) geocomposites.

λογή και τη μεταφορά υπογείων υδάτων σε συγκεκριμένες διαδρομές,

- Προστασία (protection), λειτουργώντας π.χ. ως στρώσεις ανάληψης ποσοστού των αναπτυσσόμενων τάσεων ανακουφίζουν τα υποκείμενα εδαφικά στρώματα, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό τις καθιζήσεις,

- Όπλιση (reinforcement), π.χ. για την ενίσχυση της διατμητικής αντοχής του εδάφους κυρίως μέσω της εφελκυστικής αντοχής των γεωσυνθετικών υλικών,

- Διαχωρισμός (separation), π.χ. για την αποφυγή ανάμιξης διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικών υλικών,

- Προστασία επιφανειακής διάβρωσης (superficial erosion control) π.χ. για την αποφυγή της μετακίνησης εδαφών εξαιτίας της αιολικής διάβρωσης ή της διάβρωσης από την επιφανειακή απορροή υδάτων.

- Ακόμα λειτουργούν ως ζώνες διήθησης και προστασίας ή φιλτραρίσματος (filtration), για τη διευθέτηση της ροής των υδάτων εντός του εδάφους με την ταυτόχρονη διατήρηση των εδαφικών κόκκων στη θέση τους.

- Τέλος, τα γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται ως λύσεις στεγανοποίησης ή ως φράγματα (barriers) για την αποφυγή της εισροής ή διαφυγής υγρών (π.χ. υπογείων υδάτων, ρύπων) ή αερίων.

Στο γενικευμένο όρο των γεωσυνθετικών υλικών ανήκουν τα γεωυφάσματα, οι γεωμεμβράνες, τα γεωπλέγματα, τα γεωδίκτυα, οι γεωσυνθετικοί αργιλικόι φραγμοί (GCL), καθώς και τα συνδυασμένα γεωσυνθετικά, όπως π.χ. τα συνδυασμένα γεωυφάσματα – γεωδίκτυα, γεωυφάσματα – γεωμεμβράνες, γεωμεμβράνες – γεωπλέγματα, γεωυφασμάσματα – γεωπλέγματα κτλ. (Φωτ. 1). Τα γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιούμενα σε συνδυασμό με τα συμβατικά υλικά, προσφέρουν ιδιαίτερα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα και ευφυείς τεχνικές λύσεις εξαιτίας:

- του μικρού χώρου που καταλαμβάνουν, εξαιτίας του μικρού τους πάχους, συγκριτικά με άλλες λύσεις π.χ. εδαφικές στρώσεις,

- του ότι αποτελούν προϊόντα που υπόκεινται σε συνεχή ποιοτικό έλεγχο κατά τη βιομηχανική τους παραγωγή, σε αντίθεση με την ετερογένεια που συχνά παρουσιάζουν τα εδαφικά υλικά ακόμη και του ίδιου δανειοθαλάμου,

- των κατασκευαστικών ευκολιών που παρέχουν π.χ. προμηθεύονται και τοποθετούνται επιτόπου σε μεγάλα φύλλα / ρολά, γεγονός που αυξάνει πολύ την παραγωγικότητα στο έργο,

- της αδιάκοπης συνέχισης των εργασιών ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών σε αντίθεση με ορισμένα εδαφικά υλικά όπου η περιεχόμενη υγρασία ορισμένες φορές προκαλεί καθυστερήσεις,
- της οικονομικής τους ανταγωνιστικότητας μιας και το κόστος προμήθειας, μεταφοράς και τοποθέτησής τους είναι πολλές φορές κατά πολύ συγκρίσιμο με το κόστος μη διαθέσιμων στο έργο κατάλληλων εδαφικών υλικών,
- της τεχνικής υπεροχής που παρέχουν μέσω των πολλαπλών τους ιδιοτήτων,
- της ευρείας διαθεσιμότητας τους πλέον στο εμπόριο,
- και τέλος του ότι αποτελούν περιβαλλοντικά αποδεκτά υλικά παρέχοντας φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις και μειώνοντας με την εφαρμογή τους τη χρήση φυσικών πόρων, εδαφικών δηλαδή υλικών.

Το παρόν άρθρο επικεντρώνεται στη χρήση των γεωσυνθετικών υλικών για την αντιδιαβρωτική προστασία των εδαφών. Παρουσιάζονται οι λύσεις που παρέχουν τα γεωσυνθετικά υλικά στην αντιμετώπιση της διάβρωσης των πρηνών γεωτεχνικών έργων π.χ. ορυγμάτων και επιχωμάτων οδοποιίας, οχθών χειμάρρων, καναλιών και ποταμών καθώς και παράκτιων περιοχών που υπόκεινται στη συνεχή δράση των κυματισμών.

Οι λόγοι εφαρμογής έργων πρόβλεψης αντιδιαβρωτικής προστασίας οφείλονται άλλοτε σε περιοριστικούς όρους που επιβάλλουν οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις σε κάθε έργο (π.χ. αποφυγή μόλυνσης υδάτων από εδαφικά υλικά που παρασύρονται από την αρχική τους θέση), άλλοτε στην απαίτηση διατήρησης του διαμορφωμένου τοπογραφικού ανάγλυφου σε μια περιοχή (π.χ. σε πρηνή οδοποιίας), άλλοτε στην απαίτηση διατήρησης ευφόρου για καλλιέργεια εδάφους, άλλοτε στη διατήρηση της λειτουργικότητας της αποχέτευσης / αποστράγγισης οδών (π.χ. έμφραξη φρεατίων λόγω φερτών υλικών) και άλλοτε στην προστασία ιδιωτικής ή δημόσιας περιουσίας σε διαβρώσιμες ακτές που έχουν ως φυσικό επακόλουθο σε πολλές περιπτώσεις κατολισθήσεις.

Τονίζεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η φυσική βλάστηση παρέχει επαρκή αντιδιαβρωτική προστασία, εν τούτοις πολύ συχνά πρόσθετα μέτρα προστασίας απαιτούνται σε πρόσφατα κατασκευασμένα πρηνή (π.χ. σε έργα οδοποιίας), σε φυσικές ή τεχνητές διαδρομές ροής υδάτων με περιστασιακά υψηλής ταχύτητας παροχές (π.χ. σε όχθες ποταμών, χειμάρρων, σε τάφρους, σε αντιπλημμυρικά αναχώματα, σε υπερχειλιστές φραγμάτων κτλ)

ή σε περιοχές εκτεθειμένες σε πλημμύρες, ή σε κυματισμούς (π.χ. ακτογραμμές).

Τα τελευταία χρόνια, μεταξύ άλλων τεχνικών δυνατοτήτων, η χρήση γεωσυνθετικών υλικών σε έργα αντιδιαβρωτικής προστασίας βρίσκει ευρύτατο πεδίο εφαρμογής σε τέτοιο βαθμό δε, που η χρησιμοποίησή τους αποτελεί πλέον τη βέλτιστη, κοινά αποδεκτή, τεχνική λύση.

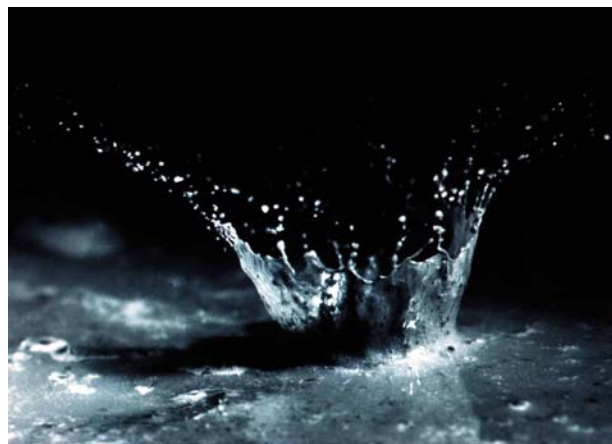
## 2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Σε γενικές γραμμές οι μηχανισμοί διάβρωσης του εδάφους μπορεί συνοπτικά να διακριθούν στις ακόλουθες κατηγορίες (Gouge 1994):

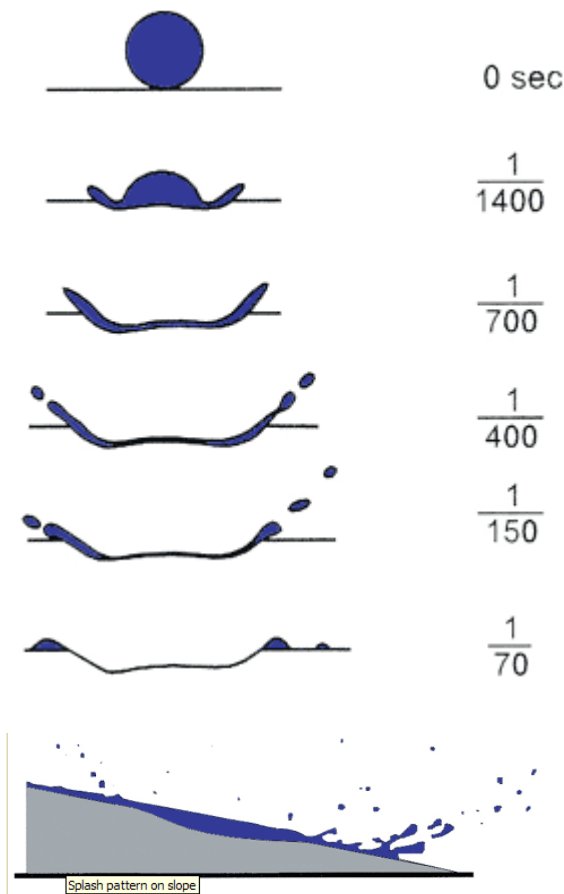
- Διάβρωση πρηνών εξαιτίας της βροχόπτωσης και της επακόλουθης επιφανειακής απορροής,
- Διάβρωση τάφρων, χειμάρρων, ποταμών, καναλιών εξαιτίας της ροής των υδάτων,
- Διάβρωση ακτών εξαιτίας κυματισμών,
- Αιολική διάβρωση.

### 2.1 Δράση βροχόπτωσης και επιφανειακής απορροής

Η δράση της βροχόπτωσης αποτελεί τη βασικότερη αιτία πρόκλησης διάβρωσης στα πρηνή εξαιτίας της ενέργειας που στιγμιαία μεταφέρεται στους εδαφικούς κόκκους τη στιγμή της πρόσκρουσής των σταγόνων στην επιφάνεια του εδάφους. Κατά τη στιγμή της πρόσκρουσης η δομή των εδαφικών κόκκων καταστρέφεται, οι κόκκοι αποκολλώνται, ανασηκώνονται στον αέρα (Φωτ. 2, Σχήματα 1 και 2) και μεταφέρονται από την αρχική τους θέση (Weggel & Ruston 1992).

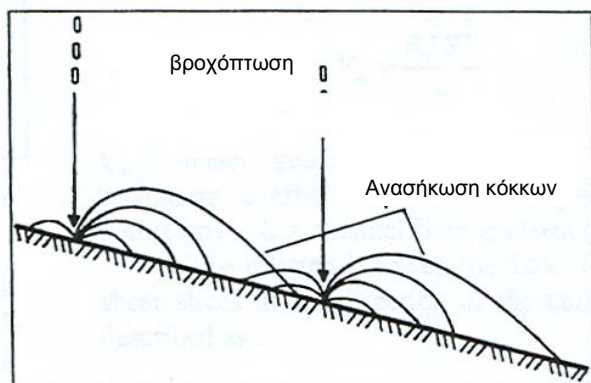


Φωτογραφία 2. Πρόσκρουση σταγόνας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του εδάφους.  
Photograph 2. Raindrop splash on ground surface (Courtesy U.S. Soil Conservation service).



Σχήμα 1. Μεταβολές γεωμετρίας προσκρούμενης σταγόνας βροχόπτωσης.  
Figure 1. Sequential profile of a raindrop splash pattern

Σε επίπεδο μορφολογικά ανάγλυφο η επίδραση της βροχόπτωσης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και στα πρανή. Στην περίπτωση αυτή και εφόσον ο ρυθμός διήθησης των υδάτων στο έδαφος είναι μικρότερος από την ένταση της βροχό-



Σχήμα 2. Μηχανισμός ανασθήκωσης και μεταφοράς εδαφικών κόκκων λόγω βροχόπτωσης.  
Figure 2. Soil particle dislodge and transportation mechanism due to raindrop impact (Weggel & Rustom 1992).

πτωσης ξεκινά η επιφανειακή απορροή, η οποία παρασύρει τους αποκολλημένους από την αρχική τους θέση εδαφικούς κόκκους προκαλώντας διάβρωση.

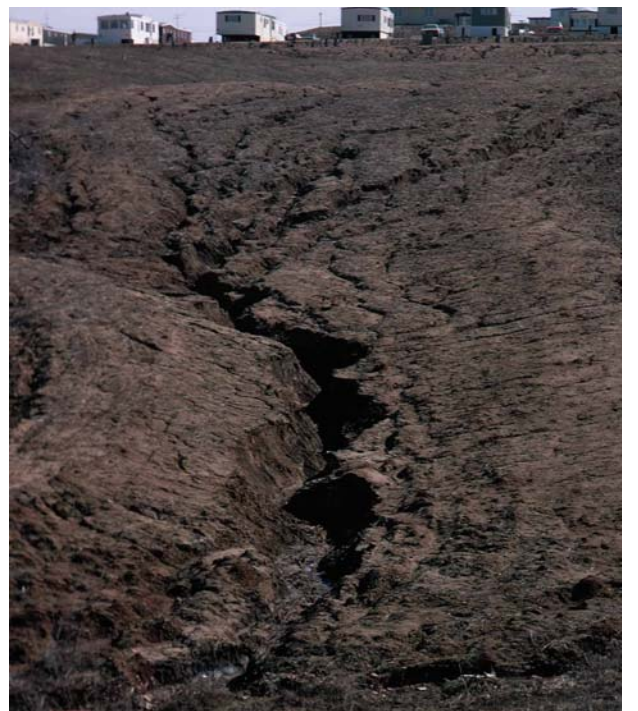
### 2.1.1 Τύποι εδαφικής διάβρωσης πρανών

Το αποτέλεσμα της διάβρωσης στα πρανή ανάλογα με το βαθμό της σοβαρότητάς της διακρίνεται σε τρία επίπεδα (Schwab & Frevert 1985):

- Επιφανειακή ομοιόμορφη διάβρωση (sheet erosion)
- Αυλακωτή διάβρωση (rill erosion)
- Χαραδρωτική διάβρωση (gully erosion)



Φωτογραφία 3. Αυλακωτή διάβρωση πρανών.  
Photograph 3. Rill slope erosion



Φωτογραφία 4. Χαραδρωτική διάβρωση πρανών.  
Photograph 4. Gully slope erosion

## 2.1.2 Εκτίμηση εδαφικών απωλειών

Την πλέον αποδεκτή μέθοδο εκτίμησης της ποσότητας του εδάφους που διαβρώνεται από μια εδαφική επιφάνεια (φυσικού ή τεχνητού πρηνούς) αποτελεί η Παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας (Universal Soil Loss Equation - USLE) που προτάθηκε από τους (Wishmeier & Smith 1960) βάσει της οποίας:

$$A=R \times K \times LS \times C \times P$$

όπου

A: ετήσια απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (tn ανά εκτάριο)

R: συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης

K: συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους

LS: αδιάστατος τοπογραφικός συντελεστής

C: αδιάστατος συντελεστής φυτοκάλυψης (cover and management factor)

P: αδιάστατος συντελεστής διαχείρισης εδαφών κατά της διάβρωσης (support practice factor)

Περιγραφή των τιμών που λαμβάνουν οι επιμέρους συντελεστές της ανωτέρω εξίσωσης παρουσιάζονται στο USDA (1997). Η παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας (USLE) παρέχει μια απλή, εύκολα κατανοητή μεθοδολογία εκτίμησης του μεγέθους διάβρωσης εδαφών. Τους περιορισμούς εφαρμογής της μεθόδου περιγράφουν οι Gray & Sotir (1996) και Weggel & Rustom (1992).

Προτάσεις διαφοροποίησης / βελτίωσης της παγκόσμιας εξίσωσης εδαφικής απώλειας πραγματοποιήθηκαν από πολλούς ερευνητές (π.χ. Williams (1972). Ωστόσο την πλέον αποδεκτή βελτίωση της εξίσωσης πραγματοποιήσαν οι Renard et. al. (1987) η οποία είναι γνωστή ως η τροποποιημένη παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE).

Σε ότι αφορά στη μελετητική διαδικασία ο έλεγχος ικανοποίησης των μέγιστων επιτρεπτών ορίων διαβρωσιμότητας σε ένα έδαφος πραγματοποιείται ελέγχοντας σταδιακά την ικανοποίηση των ελαχίστων ορίων (που ορίζονται συνήθως από περιβαλλοντικούς όρους) δίχως τη χρήση αντιδιαβρωτικών μέτρων. Εφόσον τα ελάχιστα ορισθέντα αποδεκτά όρια δεν πληρούνται, ελέγχεται η συνεισφορά αρχικά προσωρινών βιοδιασπώμενων γεωσυνθετικών υλικών επένδυσης στα πρηνή και ενδεχομένως πιο βαριών μέτρων προστασίας. Η ευεργετική συνεισφορά των μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας διαπιστώνεται μέσω των διαφοροποιήσεων των επιμέρους συντελεστών

της USLE, και κυρίως του συντελεστή C που προκαλεί μείωση του γινόμενου της τιμής της ετήσιας εδαφικής απώλειας (A).

## 2.2 Δράση ροής σε κανάλια, ποτάμια

Πέραν της ενέργειας της βροχόπτωσης, η ροή των υδάτων κατά μήκος υδάτινων διαδρομών αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα πρόκλησης διάβρωσης σε όχθες και πρηνή.

Η ταχύτητα της ροής του νερού κατά μήκος φυσικών ή τεχνητών διαδρομών (κανάλια, χείμαρροι, ποτάμια κτλ) δημιουργεί διατμητικές τάσεις στα τοιχώματα και στον πυθμένα οι οποίες εφόσον ξεπεράσουν τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή του εδάφους επί του οποίου το νερό ρέει προκαλείται διάβρωση.

Η μέση διατμητική τάση επί του εδάφους στα τοιχώματα της βρεχόμενης περιμέτρου κατά μήκος της ροής προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_0 = \gamma R S_0$$

όπου

$\tau_0$ : μέση διατμητική τάση (N/m<sup>2</sup>)

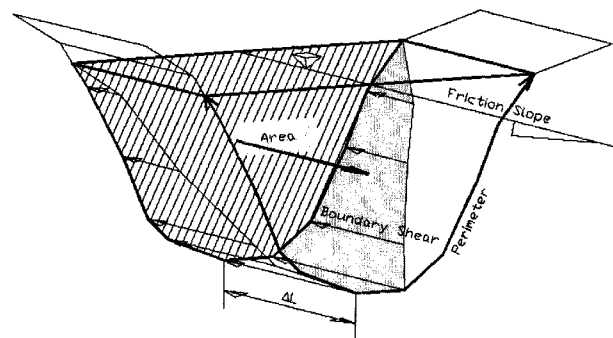
$\gamma$ : ειδικό βάρος νερού (9810 N/m<sup>3</sup>)

$R_h$ : υδραυλική ακτίνα (εμβαδόν διά βρεχόμενη περίμετρο) (m)

$S_0$ : κλίση γραμμής ενέργειας σε απόλυτο αριθμητικό μέγεθος. Για ομοιόμορφη ροή η κλίση S είναι ίση με την κλίση του πυθμένα.

Η κατανομή των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων επί του εδάφους δεν είναι ομοιόμορφη και παρουσιάζει την τριγωνική περίπου κατανομή με το βάθος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.

Είναι προφανές ότι η μέγιστη διατμητική τάση στον πυθμένα και στα τοιχώματα εξαρτάται κατά πολύ από τη γεωμετρία της διατομής επί



Σχήμα 3. Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος από τη ροή στα τοιχώματα του εδάφους.

Figure 3. Distributions of shear stresses due to the flow, with respect to depth, on the soil of the side slopes (USDT 2005).



α



β

Φωτογραφίες 5α, β. Διάβρωση παρειών ποταμού  
Photographs 5α, β. Side slope river erosion

της οποίας πραγματοποιείται η ροή και για λόγους απλοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη σχέση για τον προσδιορισμό της μέγιστης διατμητικής τάσης στον πυθμένα:

$$\tau_d = \gamma d S_0$$

όπου

$\tau_d$ : μέγιστη διατμητική τάση στον πυθμένα ( $N/m^2$ )

$\gamma$ : ειδικό βάρος νερού ( $9810 N/m^3$ )

$d$ : μέγιστο βάθος ροής για την παροχή σχεδιασμού (m)

Συσχετίσεις για τον προσδιορισμό της διατμητικής τάσης στα τοιχώματα της διατομής που πραγματοποιείται η ροή με βάση την τιμή της  $\tau_d$  παρουσιάζονται από τους Anderson et. al. (1970). Λοιπές διορθώσεις των τιμών της  $\tau_d$  εξαιτίας της αύξησης των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων σε θέσεις αλλαγών της κατεύθυνσης ροής κτλ. παρουσιάζονται στο USDT (2005).

Η συσχέτιση μεταξύ της επιτρεπόμενης ταχύτητας ροής και της επιτρεπόμενης διατμητικής τάσης μπορεί να γίνει μέσω του τύπου των

Stickler-Manning. Για την περίπτωση ομοιόμορφης ροής, η επιτρεπόμενη ταχύτητα ροής  $V_p$  δίνεται από τη σχέση:

$$V_p = \frac{R^{1/6} \tau_p^{1/2}}{n \sqrt{\gamma d}}$$

όπου

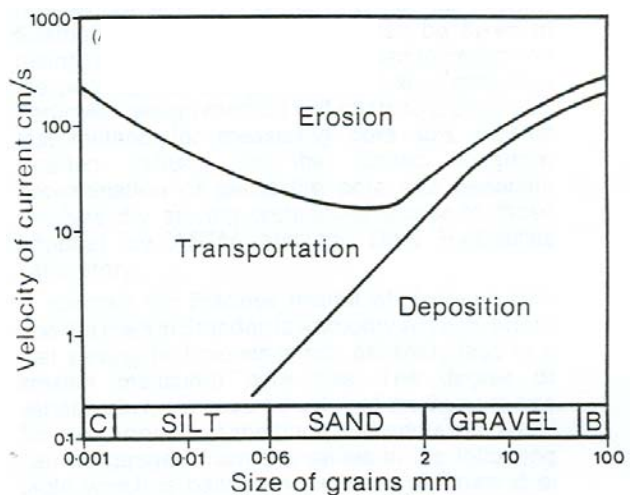
$V_p$ : επιτρεπόμενη ταχύτητα ροής (m/sec)

$\tau_p$ : επιτρεπόμενη διατμητική τάση ( $N/m^2$ )

Σε ότι αφορά την προτιμητέα μέθοδο ελέγχου κρίνεται ότι η χρήση του όρου της μέγιστης επιτρεπόμενης διατμητικής τάσης υπερτερεί έναντι της μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας ροής, με την οποία είναι ωστόσο πιο εξοικειωμένοι οι μελετητές διότι: i) οι επιτρεπόμενες τιμές αντιδιαβρωτικής προστασίας έχουν ορισθεί με κριτήριο την επιτρεπόμενη διατμητική τάση και ii) η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων προστασίας είναι πρακτικά πιο εύκολη στο πεδίο μετρώντας βάθος ροής και κλίση παρά ταχύτητα.

Στο ακόλουθο Σχήμα 4 παρατίθενται εύρη ζωνών βαθμού διαβρωσιμότητας συσχετίζοντας την ταχύτητα επιφανειακής απορροής με το μέγεθος του εδαφικού κόκκου (Hjulstrom 1935).

Μια ειδική περίπτωση διάβρωσης που ανήκει εν μέρει στην συγκεκριμένη κατηγορία αποτελεί η υδραυλική υποσκαφή του εδάφους κάτω από τις θεμελιώσεις τεχνικών (π.χ. γεφυρών) εντός ποταμών. Στις περιπτώσεις αυτές ο μηχανισμός διάβρωσης είναι αρκετά σύνθετος και είναι συνάρτηση μεταξύ άλλων του σχήματος του θεμελίου, του βάθους και της διάρκειας της ροής, της γεωμετρίας του καναλιού, του επιτόπου εδάφους κτλ.



Σχήμα 4. Βαθμός διαβρωσιμότητας εδαφικών κόκκων σε σχέση με την ταχύτητα επιφανειακής απορροής.

Figure 4. Erodibility of soil particles with respect to surface runoff speed.



Φωτογραφία 6. Καταστροφή συστήματος προστασίας όχθης καναλιού από διάβρωση.  
Photograph 1. Destruction of bank protection measures due to erosion.

### 2.3 Δράση κυματισμών σε ακτές

Η διάβρωση των ακτών εξαιτίας της δράσης κυματισμών οφείλεται στην ενέργεια πρόσκρουσης αυτών στην ακτή και στις συνεχείς και ταχείες μεταβολές των συνθηκών ροής. Πρόκειται για ένα πολύ σύνθετο υδροδυναμικό πρόβλημα που ξεφεύγει από το αντικείμενο του παρόντος άρθρου. Αναλυτική προσέγγιση του ζητήματος παρατίθεται από τον Pilarczyk (2000a).

Το πρόβλημα της διάβρωσης των ακτών, μετά τις Ηνωμένες Πολιτείες που έχουν δραστηριοποιηθεί για εξεύρεση λύσεων προ δεκαπενταετίας περίπου, έχει απασχολήσει τα τελευταία χρόνια και την Ευρωπαϊκή Ένωση που πλέον (μέσω της Ευρωπαϊκής Επιτροπής) αναγνώρισε το πρόβλημα της διάβρωσης των παράκτιων περιοχών των κρατών μελών της. Βάσει σχετικής μελέτης (EuroSION 2004) το ένα πέμπτο περίπου των ακτών της διευρυμένης ΕΕ έχει ήδη πληγεί σοβαρά, δεδομένου ότι αυτές υποχωρούν κατά 0,5 έως 2 μέτρα ετησίως και, σε μερικές περιπτώσεις, κατά 15 μέτρα, λόγω των κυματισμών, των ανθρώπινων παρεμβάσεων, της ανόδου της στάθμης της θάλασσας, της μεγάλης πλέον συχνότητας καταιγίδων και πλημμύρων που έχουν σοβαρές επιπτώσεις σε i) απώλειες γης οικολογικής και οικονομικής αξίας, ii) απώλειες περιουσίας, iii) κινδύνους για ανθρώπινες ζωές, iv) καταστροφή των φυσικών και τεχνητών μέσων άμυνας κατά των θαλάσσιων κινδύνων κτλ.

Στη χώρα μας το πρόβλημα της διάβρωσης των ακτών είναι επίσης υπαρκτό (π.χ. Ξειδάκης 2006α, 2006β), και μόνον λίγες είναι οι περιπτώσεις εφαρμογής μέτρων αντιμετώπισης. Δυο εφαρμογές μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας σε Ελληνικές ακτές παρουσιάζονται από τον Spyropoulos (2004).



α



β

Φωτογραφίες 7α, β. Διάβρωση ακτογραμμών.  
Photograph 7α, β. Coastal erosion.

### 2.4 Δράση ανέμου

Η δράση του ανέμου ως παράγοντα εκδήλωσης του φαινομένου της διάβρωσης αφορά κυρίως περιοχές της υψηλίου με ξηρό ή ημι-ξηρό κλίμα. Η επίδραση του ανέμου στη διαβρωσιμότητα εδαφών σχετίζεται μόνον με την έντασή αυτού.

Εκτενέστερη αναφορά για την αιολική διάβρωση στο παρόν άρθρο δεν γίνεται, καθώς δεν αποτελεί για τη χώρα μας παράγοντα υψηλής επικινδυνότητας. Συνοπτικές πληροφορίες περί της αιολικής διάβρωσης και των πιθανών μέτρων αντιμετώπισης αυτής παρατίθενται μεταξύ άλλων από τους Schwab & Frevert (1985).



Φωτογραφία 8. Αιολική διάβρωση  
Photograph 8. Wind erosion

### 3. ΔΙΑΒΡΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΩΝ

Με τον όρο διαβρωσιμότητα ορίζεται η προδιάθεση του εδαφικού υλικού, υπό κατάλληλες συνθήκες, να διαβρωθεί. Γενικά η διαβρωσιμότητα ενός εδάφους εξαρτάται από τις φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες και από τη χημική του σύσταση. Η βαρύτητα του κάθε ενός από τους ανωτέρω παράγοντες είναι συνάρτηση και του μηχανισμού της διάβρωσης.

Η διαβρωσιμότητα ορισμένων εδαφών (π.χ. ιλύων) εξετάζοντας κατ' αρχήν την προδιάθεση αυτών να διαβρωθούν είναι μεγαλύτερη από αυτή κάποιων άλλων (π.χ. καλά διαβαθμισμένης κοκκομετρίας άμμων, χαλίκων και της πλειοψηφίας των αργίλων). Σε ότι αφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαβρωσιμότητα των εδαφών, εκτός της κοκκομετρικής τους σύστασης, αναφέρονται το περιεχόμενο ποσοστό οργανικών, το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος, η δομή του εδάφους, η φυσική υγρασία, ο βαθμός κορεσμού, ο λόγος των κενών, η διαπερατότητα, η διατμητική αντοχή, το pH, η συγκέντρωση ηλεκτρολυτών και αλάτων κτλ. Γενικά η διαβρωσιμότητα των αδρομερών εδαφών εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και το βάρος των κόκκων, ενώ στα συνεκτικά από την κοκκομετρική διαβάθμιση, τη διατμητική αντοχή, τους δεσμούς των συσσωματωμάτων, τη διαπερατότητα, την περιεκτικότητα σε οργανικές και χημικές ουσίες, την πυκνότητα, τη φυσική υγρασία, την πλαστικότητα, το δυναμικό διόγκωσης / συρρίκνωσης (Morgan 1986). Πειραματική διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαβρωσιμότητα των συνεκτικών εδαφών παρουσίασαν οι Χουλιάρης κ.α. (2001). Βάσει των Gray & Leiser (1972), συνεκτιμώντας το βαθμό συμμετοχής των προαναφερθέντων παραγόντων το δυναμικό διαβρωσιμότητας:

- Είναι μικρό σε καλά διαβαθμισμένους χάλικες,
- Είναι υψηλό σε κυρίως ιλυώδη εδάφη και λεπτόκοκκες άμμους,
- Μειώνεται αυξανόμενου του ποσοστού της περιεχόμενης αργίλου και του ποσοστού των οργανικών,
- Μειώνεται σε εδάφη με μικρό λόγο κενών και αυξημένη φυσική υγρασία,
- Αυξάνεται όταν ο βαθμός απορρόφησης νατρίου αυξάνει και όταν οι δεσμοί των ιόντων του νερού μειώνονται.

Γενικά δεν υφίσταται ένας διεθνώς αποδεκτός δείκτης διαβρωσιμότητας εδαφών. Ωστόσο κατά καιρούς έχουν προταθεί σχετικές δοκι-

μές προσδιορισμού της διαβρωσιμότητας (Volk 1937, Emerson 1967, Sherard et. al 1976 κ.α.).

Μια απλοποιημένη πρόταση του βαθμού της διαβρωσιμότητας των εδαφών βάσει της κατάταξη αυτών στο ενιαίο σύστημα κατάταξης USCS προτάθηκε από τους Qian et .al. (2002):

#### Βαθμός διαβρωσιμότητας

Μεγαλύτερος → Μικρότερος

ML>SM>SP>SW>SC>MH>OL

>>

CL>CH>GM>GP>GW

Σημειώνεται ότι τα ανωτέρω αφορούν τη διαβρωσιμότητα αμιγώς εδαφικών υλικών. Ωστόσο, στη χώρα μας ειδικές κατηγορίες βραχωδών / ημιβραχωδών γεωυλικών παρουσιάζουν έντονη και ταχύτητα εξελισσόμενη αποσάθρωση (π.χ. ιλυόλιθοι, μολάσσειες κτλ) καθιστώντας ακόμη και τέτοιους, ανθεκτικούς στη φυσική τους κατάσταση, σχηματισμούς επιρρεπείς στη διάβρωση υπό κατάλληλες συνθήκες.

Τέλος, σε ότι αφορά στη διάβρωση των παράκτιων περιοχών σε συμπλήρωση των ανωτέρω παραγόντων που επηρεάζουν τη διαβρωσιμότητα των εδαφών, σημαντικό ρόλο δημιουργίας διαβρωτικών φαινομένων αποτελεί και:

- το ύψος των προσκρουόμενων κυματισμών σε μια ακτή,
- η κλίση των πρανών των ακτών,
- η διάρκεια και ένταση των καταιγίδων κτλ.

### 4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Η διάβρωση των εδαφών είναι ένα φυσικό φαινόμενο στο οποίο η ανθρώπινη παρέμβαση το μόνο πρακτικά το οποίο μπορεί να κάνει είναι να μειώσει την ταχύτητα εξέλιξής του. Η διάβρωση των εδαφών είναι ιδιαίτερα "επιθετική" στις θέσεις όπου ο άνθρωπος έχει επέμβει π.χ. χωματουργικά έργα οδοποιίας τροποποιώντας το φυσικό εδαφικό ανάγλυφο και λιγότερο "επιθετική" στις θέσεις όπου έχει αποκατασταθεί φυσική / μορφολογική ισορροπία. Για την περίπτωση των παράκτιων περιοχών το φαινόμενο της διάβρωσης των ακτών εξαιτίας της δράσης κυματισμών ή της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας είναι σε μόνιμη βάση εξελισσόμενο και αποτελεί ένα ζωντανό σύστημα.

Οι βασικές αρχές οι οποίες θα πρέπει να ακολουθούνται για τη μείωση της ταχύτητας

εξέλιξης του φαινομένου της διάβρωσης συνοψίζονται στα εξής:

- Προσαρμογή του έργου, όσο αυτό είναι δυνατόν, στο μορφολογικό ανάγλυφο του φυσικού εδάφους,
- Πρόβλεψη κατασκευής τεχνικών υδραυλικών διευθετήσεων σε θέσεις όπου αναμένονται αυξημένες ταχύτητες απορροών,
- Συγκράτηση ταχυτήτων απορροών σε χαμηλά επίπεδα,
- Διαπλάτυνση καναλιών, χειμάρρων, ποταμών,
- Απάλυνση κλίσεων πρανών,
- Αποφυγή, της επί μακρό, και τακτικές διακοπές της επιφανειακής απορροής σε απότομα πρανή και γενικά διαβρώσιμα εδάφη μέσω εγκαρσιών τάφρων και αναβαθμών,
- Διατήρηση φυσικής βλάστησης,
- Ελαχιστοποίηση των χρονικών διαστημάτων χωρίς φυτοκάλυψη,
- Κατασκευή φρακτών συγκράτησης του διαβρωμένου εδάφους για να αποφευχθεί η απομάκρυνσή του από τη θέση των έργων (silt fences),
- Προστασία των επισφαλών σε διάβρωση πρανών μέσω προσωρινών επενδύσεων,
- Έγκαιρη τοποθέτηση μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας,
- Παρακολούθηση και συντήρηση των αντιδιαβρωτικών μέτρων.

## 5. ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕ ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

### 5.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια το μέγεθος, οι οικονομικές επιπτώσεις της διάβρωσης των εδαφών, οι υψηλού επιπέδου απαιτήσεις αλλά και οι αυστηροί περιβαλλοντικοί όροι κατασκευής και λειτουργίας των έργων προώθησε την ανάπτυξη νέων μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας, που τείνουν πλέον να αντικαταστήσουν εξ' ολοκλήρου τις παλαιότερα εφαρμοζόμενες.

Τις πλέον καινοτόμες λύσεις αντιδιαβρωτικής προστασίας αποδείχθηκε ότι αποτελούν οι εφαρμογές με γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιώντας τα αδιαφιλονίκητα πλεονεκτήματά τους σε ότι αφορά στην ποικιλία των ιδιοτήτων τους αλλά και στις κατασκευαστικές ευκολίες που παρέχουν.

Η οικογένεια των γεωσυνθετικών υλικών για χρήση σε έργα αντιδιαβρωτικής προστασίας δύναται να διαχωριστεί σε δυο κατηγορίες λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο ζωής που καλού-



Φωτογραφία 9. Άποψη γειτονικών πρανών με και χωρίς σύστημα αντιδιαβρωτικής προστασίας

Photograph 9. View of adjacent slopes with and without erosion control measures.

νται να λειτουργήσουν. Βάσει αυτού του διαχωρισμού τα γεωσυνθετικά υλικά διακρίνονται σε αυτά με περιορισμένο χρόνο ζωής, στα οποία βασικός τους στόχος είναι η προστασία του εδάφους από διάβρωση μέχρι την ανάπτυξη επαρκούς βλάστησης η οποία από μόνη της θα παρέχει στο μέλλον ικανή αντιδιαβρωτική προστασία (Temporary Erosion and Revegetation Materials - TERMS) και στα μακροχρόνιας λειτουργίας γεωσυνθετικά υλικά (Permanent Erosion and Revegetation Materials - PERMs) τα οποία άλλοτε σε συνδυασμό με τη βλάστηση (Biotechnical related) και άλλοτε σε συνδυασμό με βαριά μέτρα προστασίας όπως π.χ. συρματοκιβώτια, λιθορριπές κτλ. (hard-armor related) μπορεί να παρέχουν την απαιτούμενη αντιδιαβρωτική προστασία.

### 5.2 Προσωρινά αντιδιαβρωτικά μέτρα

#### 5.2.1 Διαθέσιμοι τύποι γεωσυνθετικών

Αποτελούν εξέλιξη / βελτίωση παλαιότερων ή πιο απλών μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας που συνίστατο π.χ. από την αχυροκάλυψη των επενδυσόμενων πρανών με υδραυλική υδροσπορά. Σε εξέλιξη λοιπόν αυτών των μεθόδων και διατηρώντας σε μεγάλο βαθμό τα πλεονεκτήματα και τις ιδιότητες τους αλλά ενισχύοντας τα μειονεκτήματά τους π.χ. μικρή σταθερότητα και ευστάθεια, η προσθήκη γεωσυνθετικών υλικών αυξάνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα τέτοιων αντιδιαβρωτικών μέτρων. Τα γεωσυνθετικά υλικά της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι βιοδιασπώμενα. Αποσυντίθενται δηλαδή κυρίως

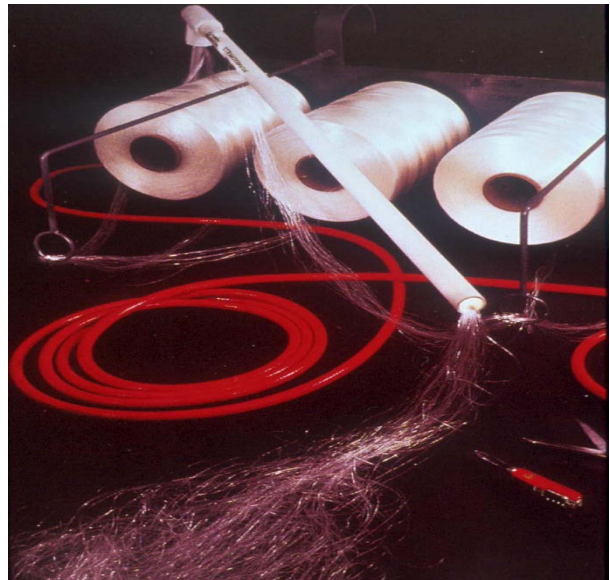
με την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο χρόνος ζωής τους ανέρχεται σε περίπου τρία με τέσσερα χρόνια.

Την πιο απλή μέθοδο προσωρινής αντιδιαβρωτικής προστασίας με γεωσυνθετικά υλικά αποτελεί η ταυτόχρονη προσθήκη γεωσυνθετικών ινών ή μικροπλεγμάτων κατά τη διαδικασία της υδραυλικής υδροσποράς για την αύξηση της συνοχής και της σταθερότητας του μείγματος στο προς φύτευση πρανές (hydraulic mulch geofibers). Η μέθοδος συνίσταται στην εισαγωγή των γεωσυνθετικών πρόσμικτων εντός του μείγματος της υδραυλικής υδροσποράς στο οποίο τοποθετούνται και υλικά επικάλυψης (mulches) που συνίστανται συνήθως είτε i) από ίνες φυτών π.χ. άχυρο από σιτάρι, κριθάρι ή βρώμη ii) είτε από ψιλοκομμένα ξύλα ή φλοιούς ξύλου, iii) είτε υδραυλικό μαλς από ανακυκλωμένο χαρτί, iv) είτε από υδραυλικό μαλς από ίνες ξύλου, v) είτε από κυτταρίνη κτλ.

Μια άλλη μέθοδος αντιδιαβρωτικής προστασίας πρανών συνίσταται στην κατ'αρχήν εκτέλεση της εργασίας της υδραυλικής υδροσποράς και αντί της συνηθισμένης αχυροκάλυψης να πραγματοποιηθεί κάλυψη του πρανούς με βιοδιασπώμενο επίμηκες γεωσυνθετικό νήμα (π.χ. υάλου ή συνήθως πολυπροπυλενίου, Φωτ. 10) μέσω κατάλληλου εκτοξευτή με χρήση αέρα υπό πίεση (fiber roving systems). Η εργασία ολοκληρώνεται με την εκτόξευση, ανεκτού από τα φυτά σταθεροποιητικού ασφαλτικού γαλακτώματος. Η λύση αυτή εφόσον οι ίνες υποστούν περαιτέρω επεξεργασία (για την αύξηση της ανθεκτικότητάς τους στην υπεριώδη ακτινοβολία) δύναται να αποτελέσει μόνιμο μέτρο αντιδιαβρωτικής προστασίας σε συνδυασμό βέβαια με βλάστηση.

Η μέθοδος αντιδιαβρωτικής προστασίας με χρήση γεωσυνθετικών υλικών, που εφαρμόζεται αρκετά συχνά και στη χώρα μας τα τελευταία χρόνια συνίσταται από τη χρήση γεωυφάσματος με ανοικτούς βρόχους (γεωδίκτυα) από γιούτα ή κοκκοφοίνικα (πάχους της τάξεως των 5mm και βάρους 500gr/m<sup>2</sup> περίπου) τα οποία τοποθετούνται επί των πρανών κατόπιν της ολοκλήρωσης της εργασίας της υδραυλικής υδροσποράς (erosion control meshes & nets). Στο εμπόριο διατίθενται για αντίστοιχη εφαρμογή και πλέγματα πολυαιθυλενίου και πολυπροπυλενίου δίχως προστασία από την καταστροφική για αυτά υπεριώδη ακτινοβολία του ηλίου.

Τέλος, στην οικογένεια των προσωρινών μέτρων προστασίας των πρανών ανήκουν και οι αντιδιαβρωτικοί τάπητες (erosion control blankets) που συνίστανται είτε από μηχανικά ή χημικά συγκολλημένες φυσικές ή τεχνητές ίνες,



Φωτογραφία 10. Επίμηκες γεωσυνθετικές ίνες αντιδιαβρωτικής προστασίας πρανών  
Photograph 10. Continuous geosynthetic yarns for erosion control of slopes



Φωτογραφία 11. Αντιδιαβρωτικός τάπητας από άχυρο επί γεωπλέγματος  
Photograph 11. Erosion control blanket consisting of straw bonded on a geogrid (TerraGuard™)

είτε από διαξονικά πλέγματα πολυαιθυλενίου ή πολυπροπυλενίου όπου επί της μιας ή και των δυο πλευρών τους προσκολλώνται τάπητες από άχυρο, ή κοκκοφοίνικα ή πολυμερείς βιοδιασπώμενες ίνες (Φωτ. 11). Οι αντιδιαβρωτικοί τάπητες προμηθεύονται σε ρολά και ξεδιπλώνονται επί των πρανών παρέχοντας κατασκευαστική ευκολία και ταχύτητα τοποθέτησης (Φωτ. 12).



Φωτογραφία 12. Τοποθέτηση αντιδιαβρωτικού τάπητα σε πρανή  
 Photograph 12. Installation of erosion control blanket on a slope

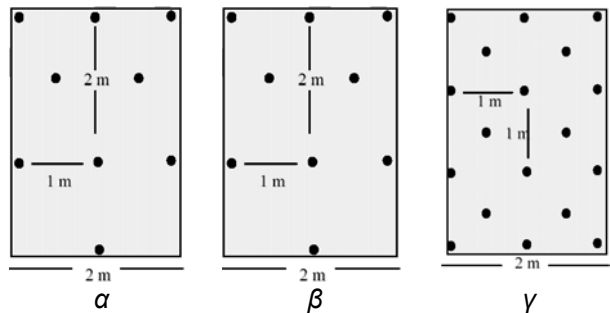
### 5.2.2 Τοποθέτηση γεωσυνθετικών σε πρανή

Για τη συγκράτηση των γεωσυνθετικών υλικών στα πρανή απαιτείται η αγκύρωσή τους στο φρύδι και στον πόδα σε κατάλληλων διαστάσεων τάφρους (της τάξεως του 0.3 - 0.5m βάθους σε απόσταση 1.0m από το φρύδι). Αντίστοιχη συγκράτηση των γεωσυνθετικών απαιτείται και στις επιφάνειες των πρανών, η οποία επιτυγχάνεται τις περισσότερες φορές μέσω ειδικών χαλύβδινων δίχαλων ή αγκυρίων. Ενδεικτικές διατάξεις της στήριξης και της πυκνότητας τοποθέτησης των δίχαλων στα πρανή παρατίθεται στο ακόλουθο Σχήμα 5.

## 5.3 Μόνιμα αντιδιαβρωτικά μέτρα

### 5.3.1 Γενικά

Σε πολλές περιπτώσεις π.χ σε πρανή εκτεθειμένα σε μόνιμες, υψηλών ταχυτήτων ροές υδάτων ή σε κυματισμούς η ανάπτυξη βλάστησης από μόνη της δεν επαρκεί ως μακροχρόνιο αντιδιαβρωτικό μέτρο ή ακόμη ίσως δεν είναι καθόλου εφικτή με αποτέλεσμα η αντιδιαβρωτική προστασία να παρέχεται μέσω μόνιμων συστημάτων προστασίας. Τα μόνιμα συστήματα-



α) Για σχετικά μικρές κλίσεις έως 1:3 (κατακ:οριζ) συνίσταται η τοποθέτηση 1 δίχαλου /  $m^2$ .

β) Για μέσες κλίσεις έως 2:3 (κατακ:οριζ) συνίσταται η τοποθέτηση 1.5 δίχαλων /  $m^2$ .

γ) Για έντονες κλίσεις έως 1:1 (κατακ:οριζ) συνίσταται η τοποθέτηση 4 δίχαλων /  $m^2$ .

Σχήμα 5. Διατάξεις στερέωσης γεωσυνθετικών σε πρανή

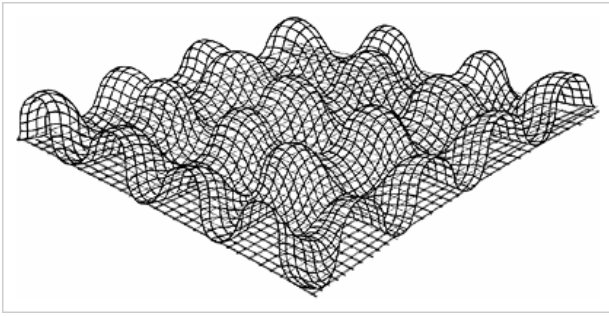
Figure 5. Support layout of a geosynthetic on a slope

αντιδιαβρωτικής προστασίας διακρίνονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το εάν αυτά θα λειτουργήσουν σε συνδυασμό με την ανάπτυξη βλάστησης ή όχι (περίπτωση μετρων βαριάς προστασίας).

### 5.3.2 Γεωσυνθετικά σε συνδυασμό με βλάστηση

Στην κατηγορία των μόνιμων αντιδιαβρωτικών μέτρων τα οποία προβλέπεται να συνδυαστούν για την απαιτούμενη προστασία έναντι της διάβρωσης με βλάστηση ανήκουν οι μόνιμοι τρισδιάστατοι, ανοικτής δομής, γεωσυνθετικοί τάπητες ή πλέγματα (Turf Reinforcement Mats, φωτ. 13) και οι τρισδιάστατες γεωσυνθετικές κυψέλες (Geocellular Containment Systems, Σχήμα 6, Φωτ. 16). Όπως προαναφέρθηκε στην κατηγορία αυτή, και υπό τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, δύναται να ενταχθούν και τα συστήματα επικάλυψης με μη πλέον βιοδιασπώμενο επίμηκες γεωσυνθετικό νήμα (fiber roving systems).

Οι τρισδιάστατοι γεωσυνθετικοί τάπητες ή πλέγματα (πάχους 6mm περίπου) συνίστανται από συνθετικές ίνες (π.χ. πλαστικοποιημένο PVC), που έχουν υποστεί ειδική επεξεργασία για να είναι ανθεκτικές στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV – stabilized) και στις χημικές προσβολές που πιθανά να υποστούν από το έδαφος, έχουν ιδιαίτερα ανοικτή δομή (πορώδες της τάξεως του 85%) με αποτέλεσμα να επιτρέπουν την ενδιάμεση πλήρωσή τους με εδαφικό υλικό και την ανάπτυξη και αλληλοεμπλοκή του ριζικού συστήματος εντός αυτών (Φωτ. 14). Δύναται να τοποθετηθούν κυρίως προ, αλ-



Φωτογραφία 13. Μόνιμος τρισδιάστατος γεωσυνθετικός τάπητας  
 Photograph 13. Permanent three dimensional geosynthetic mat (Tensar).

λά και μετά την εκτέλεση των εργασιών υδραυλικής υδροσποράς σε πρανή και ανήκουν στην οικογένεια των μη βιοδιασπώμενων γεωσυνθετικών υλικών παρέχοντας σε συνδυασμό με τη βλάστηση την απαιτούμενη μακροχρόνια αντιδιαβρωτική προστασία. Οι τρισδιάστατοι γεωσυνθετικοί τάπητες έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν ιδιαίτερα ανθεκτικό αντιδιαβρωτικό μέτρο, σε σημείο που σε πολλές περιπτώσεις έχουν αντικαταστήσει τεχνικές λύσεις με συρματοκιβώτια ή και λιθορριπές σε πρανή καναλιών. Από εργαστηριακές δοκιμές αλλά και επιτόπου παρατηρήσεις έχει διαπιστωθεί η ικανότητα φυτρωμένου τρισδιάστατου τάπητα να ανθίστανται σε ταχύτητες έως 4m/sec για διάρκεια ροής 48 ωρών (Carroll et. al. 1991).

Στη Φωτογραφία 15 παρουσιάζεται τυπική εφαρμογή τρισδιάστατου γεωσυνθετικού τάπητα στο οποίο βιομηχανικά έχει συμπληρωθεί



Φωτογραφία 14. Μακροχρόνια ενίσχυση του ριζικού συστήματος από την παρουσία του τρισδιάστατου γεωσυνθετικού τάπητα.  
 Photograph 14. Long term root reinforcement due to the presence of the three-dimensional geosynthetic mat (Colbond Inc).

και χαλύβδινο πλέγμα για περαιτέρω ενίσχυση του συστήματος σε αποκατεστημένο, μετά από κατολίσθηση, πρανές σε ευαποσάθρωτους ιλυολιθικούς σχηματισμούς για την ταχεία αποκατάσταση της βλάστησης.

Η τοποθέτηση των τρισδιάστατων γεωσυνθετικών ταπήτων ή πλεγμάτων στα πρανή πραγματοποιείται συνήθως με την αγκύρωση των πλεγμάτων σε τάφρους στα ανάντη και εάν απαιτείται και στα κατόντη με ενδιάμεσες στηρίξεις με μικρού μήκους δίχαλα ή αγκύρια σε κατάλληλο κάρναβο.

Μια πιο ανθεκτική λύση αντιδιαβρωτικής προστασίας, για τις περιπτώσεις όπου δεν επαρκεί ο συνδυασμός βλάστησης και τρισδιάστατου τάπητα, αποτελούν οι τρισδιάστατες γεωκυψέλες. Συνίστανται από λωρίδες υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) ή πολυεστέρα πλάτους της τάξεως των 100mm και πάχους 1.2mm περίπου οι οποίες συνδέονται στην πλευρά της μέγιστης διάστασής τους ανά περίπου 300mm. Επιτόπου του έργου μεταφέρονται συρρικνωμένες, και κατά την τοποθέτηση επιμηκύνονται όπως ένα ακορντεόν, δημιουργώντας μια κατασκευή τύπου κερήθρας μελισσών. Το σύστημα χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευκαμψία και έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται εύκολα σε μορφολογικές διαφοροποιήσεις. Η εργασία τοποθέτησης ολοκληρώνεται με την πλήρωση στα ενδιάμεσα κενά με



Φωτογραφία 15. Εφαρμογή σε κατολισθημένο πρανές στη Ναύπακτο τρισδιάστατου γεωσυνθετικού πλέγματος συνδυασμένου βιομηχανικά με χαλύβδινο δομικό πλέγμα (τύπου Mac-Mat® - Maccafferri)

Photograph 15. Installation on a failed slope in Naupaktos of a three dimensional geosynthetic mat combined during the manufacturing process with a steel wire mesh.

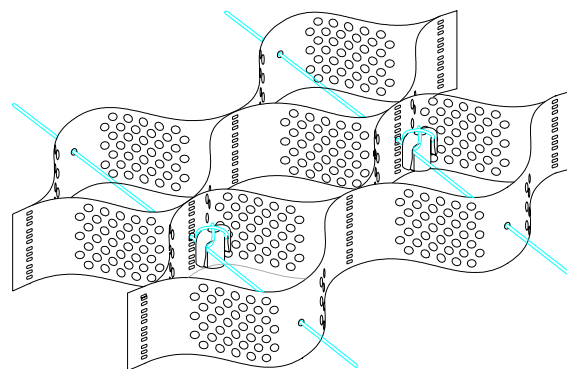
εδαφικό υλικό ή εφόσον κριθεί απαραίτητο μόνον με αδρόκκοκο υλικό δημιουργώντας μια πιο ανθεκτική στη διάβρωση κατασκευή (μεγαλύτερες επιτρεπτές ταχύτητες ροής). Η τελική επένδυση υποβοήθησης της φυτοκάλυψης δύναται να πραγματοποιηθεί με τα πιο απλής μορφής βιοδιασπώμενα γεωσυνθετικά υλικά επιφανείας και εφόσον απαιτείται ακολουθεί ψεκασμός με ασφαλτικό γαλάκτωμα ανάλογα και με την κλίση του πρανούς στα οποία τοποθετείται. Η γεωσυνθετικές κυψέλες σε συνδυασμό με βλάστηση συνίσταται να τοποθετούνται σε περιπτώσεις ροών ταχύτητας έως 2-3m/sec καθώς σε μεγαλύτερες ταχύτητες έχουν παρατηρηθεί υποσκαφές. Στο εμπόριο διατίθενται διάφορα παρόμοια συστήματα, στα οποία για διευκόλυνση της αποστράγγισης, η μεγάλης διάστασης πλευρά των λωρίδων μπορεί να φέρει οπές, μέσα από τις οποίες και για την περαιτέρω ενίσχυση του συστήματος δύναται να διέρχονται και τένοντες τάνυσης / στερέωσης. Η στήριξη των τρισδιάστατων γεωκυψελών στα πρανή πραγματοποιείται με την αγκύρωσή τους στο φρύδι των πρανών και με ενδιάμεσα πατενταρισμένα σε κάθε σύστημα αγκύρια. Συχνά προ της τοποθέτησης των τρισδιάστατων γεωκυψελών προβλέπεται η διάστρωση γεωυφάσματος που καλείται να λειτουργήσει ως υλικό φιλτραρίσματος.

### 5.3.3 Γεωσυνθετικά σε συνδυασμό με βαριά μέτρα προστασίας

Για την περίπτωση όπου η ανάπτυξη βλάστησης είναι πρακτικά αδύνατη ή εφόσον οι απαιτήσεις αντιδιαβρωτικής προστασίας είναι μεγάλες οι πιθανές εναλλακτικές λύσεις στρέφονται προς βαριά και υψηλού κόστους μέτρα. Τέτοιες λύσεις (hard armor systems) συνήθως αποτελούν διάφορες διατάξεις όπως επενδεδυμένες με σκυρόδεμα τρισδιάστατες γεωσυνθετικές κυψέλες (Geocellular Containment Systems, Φωτ. 17), τα συρματοκιβώτια (Gabions, Φωτ. 18), οι χαλικορριπές ή λιθορριπές (Stone Rip-Rap, Φωτ. 19) και οι λύσεις της μόνιμης επένδυσης με οπλισμένο ή άοπλο σκυρόδεμα η έγχυση του οποίου πολλές φορές συνδυάζεται μέσω ή εντός γεωσυνθετικών υλικών (Fabric Formed Revetments). Η χρήση των γεωσυνθετικών υλικών σε πολλές από αυτές τις περιπτώσεις, παρότι δεν αποτελεί αυτοτελώς το βασικό αντιδιαβρωτικό μέσο, παρέχει ωστόσο σημαντικές δευτερεύουσες λειτουργίες που είναι απαραίτητες για την ευστάθεια του όλου συστήματος. Τα πλεονεκτήματα των γεωσυνθετικών υλικών χρησιμοποιήθηκαν σε

αντίστοιχες κατασκευές από το 1960 (Barrett 1966).

Η πλήρωση των κενών των τρισδιάστατων γεωκυψελών με σκυρόδεμα αντί εδαφικού υλικού αποτελεί μια πιθανή λύση σε περιπτώσεις όπου οι ταχύτητες ροής σε κανάλια υπερβαίνουν τα σχετικά επιτρεπτά όρια (ανάπτυξη



Σχήμα 6. Άποψη τρισδιάστατων γεωσυνθετικών κυψελών επένδυσης πρανών. Figure 6. View of three-dimensional cells for slope lining (Presto Product Company).



α



β

Φωτογραφία 16. Τρισδιάστατες κυψέλες επένδυσης πρανών  
Photograph 16. Three dimensional cells for slope lining (Presto Product Company)



Φωτογραφία 17. Σκυροδέτηση τρισδιάστατων γεωσυνθετικών κυψελών σε απότομο πρανές.  
Photograph 17. Concrete pouring within the geosynthetic cells installed on a steep slope.

υψηλών διατμητικών τάσεων) ή για συνθήκες ανομοιομορφων ροών. Εκτός αυτού μια άλλη εφαρμογή των τρισδιάστατων γεωκυψελών αποτελεί η δυνατότητα συγκράτησης, κατά την έγχυση, του νωπού σκυροδέματος σε περιπτώσεις όπου η κλίση των πρανών θα απαιτούσε την τοποθέτηση προσωρινών ξυλότυπων, που αποτελεί σε αντίστοιχες περιπτώσεις σημαντικό κατασκευαστικό πρόβλημα. Σημειώνεται ότι παρότι οι επενδεδυμένες με σκυρόδεμα τάφροι ή κανάλια παρέχουν ικανή αντιδιαβρωτική προστασία δεν είναι λίγες οι φορές που παρουσιάζουν προβλήματα υποσκαφών εξαιτίας διαρροών από συστολές διαστολές της επένδυσης, ή υποσκαφές και σταδιακή διάβρωση στα έργα εξόδου.

Στις λύσεις αντιδιαβρωτικής προστασίας με λιθοπλήρωτα συρματοκιβώτια (σαραζανέτ), στρώμενες ή λιθορριπές (Φωτ. 18, 19) τα γεωσυνθετικά υλικά δύνανται να αντικαταστήσουν τις υποκείμενες των λιθορριπών επάλληλες στρώσεις εδαφικών φίλτρων, που σε αρκετές περιπτώσεις το πάχος των οποίων ξεπερνά το ένα μέτρο (1.0m). Στις περιπτώσεις αυτές τα γεωσυνθετικά υλικά (και κυρίως τα γεωυφάσματα) καλούνται να λειτουργήσουν ως ζώνες φιλτραρίσματος.



Φωτογραφία 18. Αντιδιαβρωτική προστασία κοίτης Αλφειού ποταμού με λιθοπληρωμένα συρματοκιβώτια  
Photograph 18. Erosion control measures along Alfios river banks using gabions.

Μια άλλη εφαρμογή των γεωσυνθετικών υλικών σε αντιδιαβρωτικά έργα αποτελεί η δυνατότητα έγχυσης σκυροδέματος εντός ενός ειδικά κατασκευασμένου ζεύγους, συνήθως υφαντών, γεωυφασμάτων (concrete filled geomattresses). Το ζεύγος των δυο γεωυφασμάτων που συνδέεται μεταξύ τους σε κατάλληλων διαστάσεων κάνναβο (Φωτ. 21) τοποθετείται στο προς προστασία πρανές και σκυροδετείται το ενδιάμεσο τους τμήμα επιτόπου παρέχοντας μια ιδιαίτερα οικονομική λύση (Richardson & Koerner 1990).



Φωτογραφία 19. Μόνιμη αντιδιαβρωτική προστασία με χρήση λιθορριπής τοποθετούμενης επί γεωυφάσματος  
Photograph 19. Permanent erosion control measures using stone riprap on a geotextile.

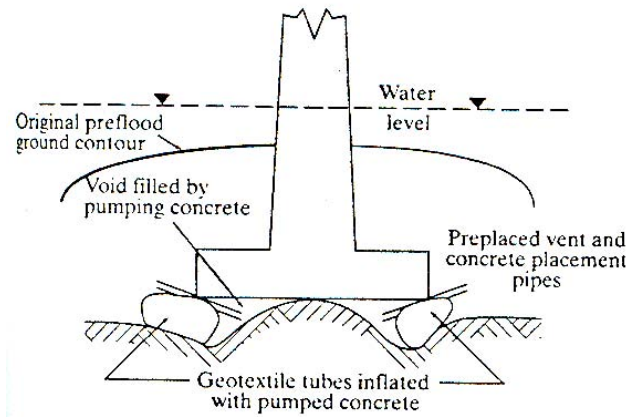


Φωτογραφία 20. Μόνιμη αντιδιαβρωτική προστασία ακτογραμμής με χρήση προκατασκευασμένων τεμαχίων σκυροδέματος  
 Photograph 20. Permanent erosion control coastal measures using pre-cast concrete blocks.



Φωτογραφία 21. Μόνιμη αντιδιαβρωτική προστασία όχθης ποταμού με ζεύγος γεωφασμάτων πληρωμένων ενδιάμεσα με σκυροδέμα  
 Photograph 21. Permanent erosion control measures on riverbank using a pair of geotextiles filled in between with lean concrete.

Σε αντίστοιχη αρχή στηρίζεται και η μέθοδος αποκατάστασης του εδάφους θεμελίωσης κατασκευών (π.χ. μεσοβάθρων γεφυρών) που βρίσκονται εντός της ροής των υδάτων. Δεν είναι σπάνια η περίπτωση υποσκαφής του εδάφους περιμετρικά π.χ. πασσάλων και κάτω από τον κεφαλόδεσμο της θεμελίωσης. Μια αποτελεσματική, για τέτοιες περιπτώσεις, επισκευαστική λύση η οποία δεν απαιτεί την προσωρινή εκτροπή της ροής των υδάτων αποτελεί η χρήση εύκαμπτων τύπων έγχυσης σκυροδέματος που συνίσταται από γεωφάσμα. Η χρήση γεωφάσματος παρέχει το πλεονέκτημα της ευκαμψίας έτσι ώστε το σύστημα του "σάντουιτς" των γεωφασμάτων με το σκυροδέμα εντός αυτού να μπορεί να διεισδύσει και να πληρώσει όλα τα πιθανά κενά  
 Σχήμα 7.



Σχήμα 7. Υποθεμελίωση βάθρου γέφυρας με έγχυση σκυροδέματος εντός εύκαμπτων τύπων από γεωφάσματα.  
 Figure 7. Underpinning of scoured bridge pier using grout-filled geotextile forms (Welsh 1977).

## 6. ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

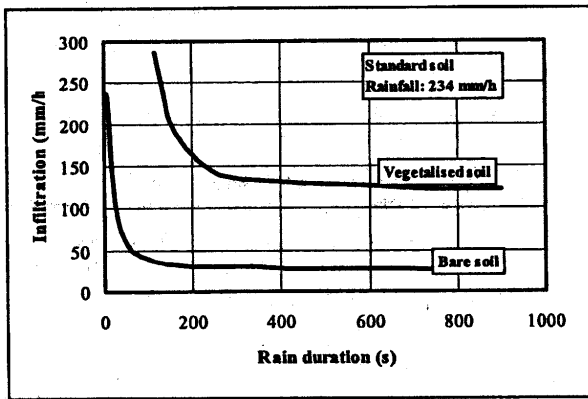
### 6.1 Πρανή χωματοουργικών έργων

Η παρουσία γεωσυνθετικών υλικών και η ανάπτυξη βλάστησης λειτουργεί ως αντιδιαβρωτική προστασία μέσω της απορρόφησης ποσοστού της ενέργειας που μεταφέρουν οι σταγόνες μιας βροχόπτωσης, μέσω της αύξησης της διατμητικής αντοχής του επιφανειακού εδαφικού φλοιού εξαιτίας της ευεργετικής παρουσίας του ριζικού συστήματος, μέσω της μείωσης της ταχύτητας της επιφανειακής απορροής και τέλος, μέσω της αύξησης του ποσοστού των υδάτων που διηθείται στο έδαφος (Σχήμα 8).

### 6.2 Πρανή υδάτινων διαδρομών

Η παρουσία γεωσυνθετικών υλικών, είτε πρόκειται για προσωρινού βιοδιασπώμενου τύπου είτε για μόνιμα αυξάνει τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή στις παρειές του εδάφους που βρίσκεται σε επαφή με το νερό κατά μήκος υδάτινων διαδρομών του. Εφόσον διαπιστωθεί ότι οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις των ανεπένδυτων πρανών είναι μεγαλύτερες από τις μέγιστες ανεκτές απαιτείται η λήψη μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας.

Για την περίπτωση των μη συνεκτικών εδαφών η ανεκτή διατμητική τάση των λεπτόκοκκων εδαφών [ $D_{75} < 1.3\text{mm}$  (0.05in)] είναι σχεδόν σταθερή κυμαινόμενη συντηρητικά γύρω στο  $1.0\text{N/m}^2$ . Για τα λιγότερο λεπτόκοκκα μη συνε-



Σχήμα 8. Ευεργετική επίδραση της βλάστησης στην αντιδιαβρωτική προστασία του εδάφους εξαιτίας της αύξησης του ποσοστού διήθησης.  
Figure 8. Beneficial influence of vegetation on soil erosion control process, due to infiltration increase (Gourc 1994).

κτικά εδάφη [ $1,3\text{mm} (0.05\text{in}) < D_{75} < 50\text{mm} (2\text{in})$ ] ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$T_{p,soil} = \alpha D_{75}$$

όπου

$T_{p,soil}$  = ανεκτή διατμητική τάση εδάφους

$\alpha$  = σταθερά με τιμή 0.75

$D_{75}$  = 75% του υλικού είναι λεπτότερο της συγκεκριμένης διαμέτρου

Για τα συνεκτικά εδάφη η επιτρεπόμενη / ανεκτή διατμητική τάση δίδεται από τη σχέση:

$$T_{p,soil} = (c_1 PI^2 + c_2 PI + c_3)(c_4 + c_5 e)^2 c_6$$

όπου

$T_{p,soil}$  = ανεκτή διατμητική τάση εδάφους

PI = δείκτης πλαστικότητας

e = λόγος κενών

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$  = συντελεστές από Πίνακα 1

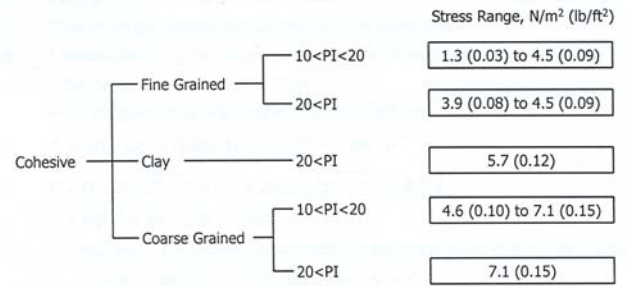
Μια απλοποιημένη αρχική εκτίμηση της μέγιστης ανεκτής διατμητικής τάσης συνεκτικών εδαφών παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.

Αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων υπο-

Πίνακας 1. Συντελεστές ανεκτών διατμητικών τάσεων σε συνεκτικά εδαφικά υλικά.

Table 1. Cohesive soil permissible shear stress coefficients (USDA 1987).

ASTM Soil Classification <sup>(1)</sup>	Applicable Range	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$ (SI)	$c_6$ (CU)
GM	$10 \leq PI \leq 20$ $20 < PI$	1.07	14.3	47.7 0.076	1.42 1.42	-0.61 -0.61	$4.8 \times 10^4$ 48	$10^4$ 1.0
GC	$10 \leq PI \leq 20$ $20 < PI$	0.0477	2.86	42.9 0.119	1.42 1.42	-0.61 -0.61	$4.8 \times 10^4$ 48	$10^4$ 1.0
SM	$10 \leq PI \leq 20$ $20 < PI$	1.07	7.15	11.9 0.058	1.42 1.42	-0.61 -0.61	$4.8 \times 10^4$ 48	$10^4$ 1.0
SC	$10 \leq PI \leq 20$ $20 < PI$	1.07	14.3	47.7 0.076	1.42 1.42	-0.61 -0.61	$4.8 \times 10^4$ 48	$10^4$ 1.0
ML	$10 \leq PI \leq 20$ $20 < PI$	1.07	7.15	11.9 0.058	1.48 1.48	-0.57 -0.57	$4.8 \times 10^4$ 48	$10^4$ 1.0
CL	$10 \leq PI \leq 20$ $20 < PI$	1.07	14.3	47.7 0.076	1.48 1.48	-0.57 -0.57	$4.8 \times 10^4$ 48	$10^4$ 1.0
MH	$10 \leq PI \leq 20$ $20 < PI$	0.0477	1.43	10.7 0.058	1.38 1.38	-0.373 -0.373	$4.8 \times 10^4$ 48	$10^3$ 1.0
CH	$20 \leq PI$			0.097	1.38	-0.373	48	1.0

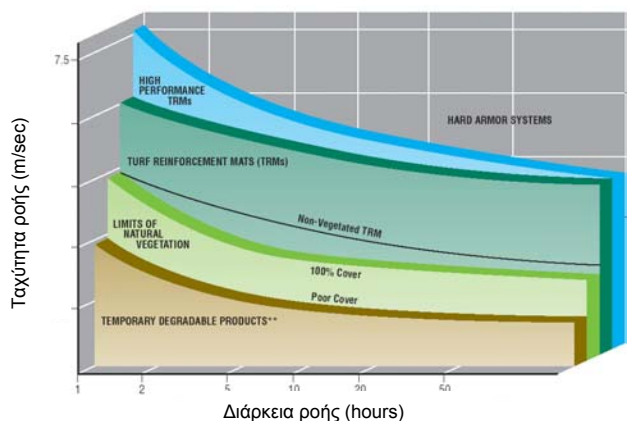


Σχήμα 9. Ανεκτές διατμητικές τάσεις σε συνεκτικά εδαφικά υλικά.

Figure 9. Cohesive soil permissible shear stress (USDT 2005).

λογισμού της διαθέσιμης διατμητικής αντίστασης (ανεκτή διατμητική τάση) των επενδεδυμένων με γεωσυνθετικά υλικά, με ή και χωρίς την παρουσία βλάστησης παρουσιάζεται στο USDT (2005). Επιτρεπτές τιμές διατμητικών τάσεων δεν δύναται να ορισθούν για τα διάφορα προσωρινά ή μόνιμα μέτρα αντιδιαβρωτικής προστασίας με γεωσυνθετικά υλικά καθώς αυτές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από τον τύπου του εδάφους που καλούνται να προστατεύσουν.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι ιδιαίτερης σημασίας στο σχεδιασμό των μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας, η ρεαλιστική εκτίμηση της αναμενόμενης διάρκειας της παροχής σχεδιασμού. Από το Σχήμα 10 φαίνεται ότι τα κριτήρια σχεδιασμού δεν απαιτείται μόνο να στηρίζονται στη μέγιστη αναμενόμενη ταχύτητα ροής αλλά και στην αναμενόμενη διάρκειά της καθώς παρατηρείται αύξηση των απαιτήσεων προστασίας με δεδομένη ταχύτητα ροής αλλά με αυξανόμενη διάρκεια.



Σχήμα 10. Προτεινόμενες μέγιστες ταχύτητες σχεδιασμού διαφόρων μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας.

Figure 10. Recommended maximum design velocities for various erosion control measures (Theisen 1992).

## 6.2 Λειτουργία γεωσυνθετικών σε συστήματα βαριάς αντιδιαβρωτικής προστασίας

Εφόσον οι αντιδιαβρωτικές απαιτήσεις είναι υψηλές, οι τεχνικές λύσεις στρέφονται προς τα βαριά συστήματα προστασίας, π.χ. λιθορριπές, λιθοπληρωμένα συρματοκιβώτια κτλ. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η προστασία και συγκράτησης του υποκείμενου εδαφικού υλικού έναντι της έκπλυσης / υποσκαφής την οποία κινδυνεύει να υποστεί. Για αυτές τις χρήσεις τα γεωσυνθετικά υλικά καλούνται να λειτουργήσουν ως ζώνες φιλτραρίσματος. Τα γεωσυνθετικά υλικά δηλαδή απαιτείται να παρέχουν τόσο ικανή διαπερατότητα κάθετα στο επίπεδό τους (permittivity) για την αποστράγγιση των, έως και μεταβαλλόμενης κατεύθυνσης, ροών όσο και επαρκή συγκράτηση των εδαφικών κόκκων με στόχο να αποφευχθούν τυχόν υποσκαφές. Αναλυτική παρουσίαση του προβλήματος παρουσιάζεται από τους Luettich et. al. (1992), την προσέγγιση των οποίων υιοθετεί και ο Koerner (1998).

Με τον όρο διαπερατότητα εγκάρσια στο επίπεδο του γεωυφάσματος (permittivity,  $\Psi$ ) ορίζεται ο λόγος:

$$\Psi = \frac{k}{t}$$

όπου

k: συντελεστής διαπερατότητας εγκάρσια στο επίπεδο του γεωσυνθετικού

t: πάχος γεωσυνθετικού για δεδομένη τάση

Εκτιμώντας την παροχή σχεδιασμού, επιλέγεται ο τύπος του γεωσυνθετικού (συνήθως γεωυφάσματος) ο οποίος δύναται να αποστραγγίζει επαρκώς την ποσότητα των υδάτων. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την επιλογή του γεωυφάσματος θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι οριζόμενοι μερικοί συντελεστές ασφαλείας βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$\Psi_{allow} = \frac{\Psi_{ult}}{(RF_{SCB} \times RF_{CR} \times RF_{IN} \times RF_{CC} \times RF_{BC})}$$

όπου

RF<sub>SCB</sub>: μερικός συντελεστής απομείωσης εξαιτίας έμφραξης από εδαφικό υλικό

RF<sub>CR</sub>: μερικός συντελεστής απομείωσης εξαιτίας ερπυστικής μείωσης του ανοίγματος των κενών

RF<sub>IN</sub>: μερικός συντελεστής απομείωσης εξαιτίας της ανεπιθύμητης παρουσίας εδαφικών κόκκων στα κενά

RF<sub>CC</sub>: μερικός συντελεστής απομείωσης εξαιτίας χημικής έμφραξης

RF<sub>BC</sub>: μερικός συντελεστής απομείωσης εξαιτίας χημικής έμφραξης

Τιμές των επιμέρους μερικών συντελεστών ασφαλείας της παραπάνω εξίσωσης δίνονται από τον Koerner (1998).

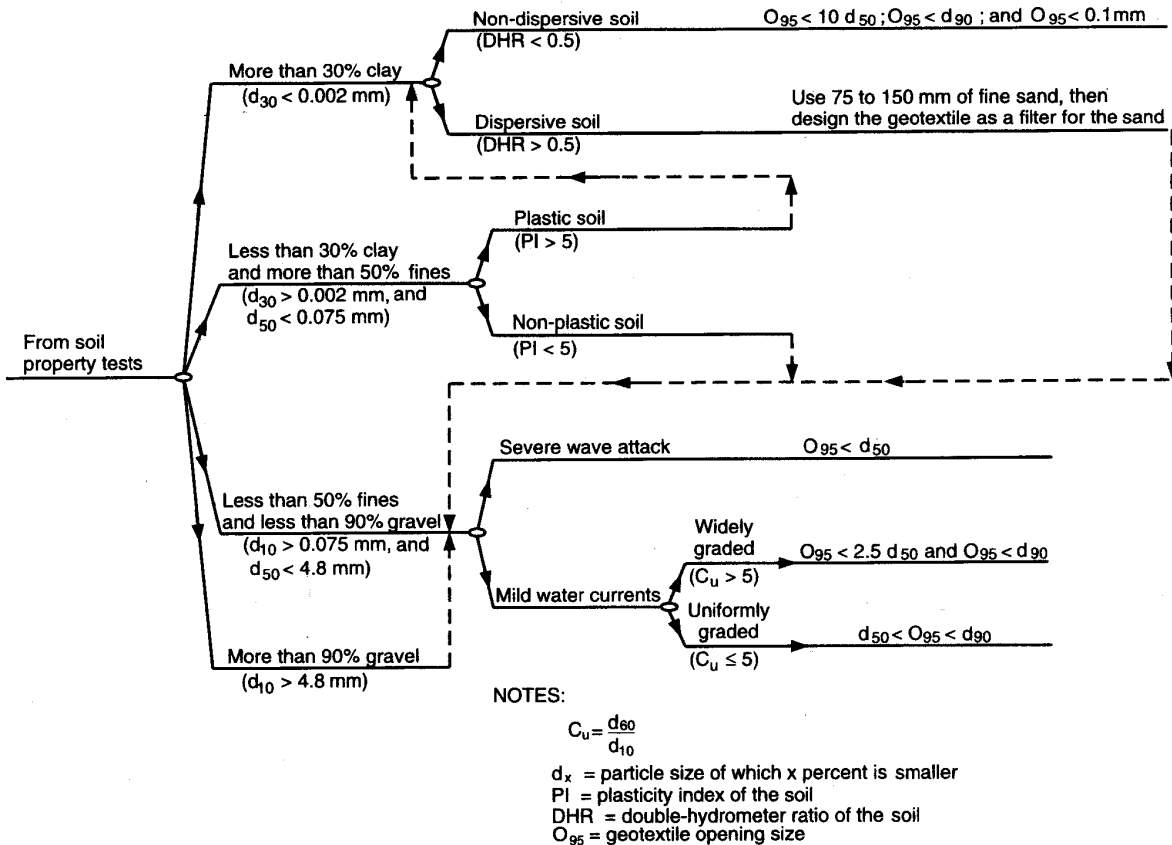
Αντίστοιχα, η ικανότητα του γεωσυνθετικού να διαχωρίσει / συγκρατήσει το ανάντη εδαφικό υλικό στη θέση του εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων που είναι συνάρτηση των φυσικών ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού. Την πληρέστερη προσέγγιση για το ζήτημα πραγματοποίησαν οι Luettich et. al. (1992) οι οποίοι διαχώρισαν τα κριτήρια σχεδιασμού και επιλογής του καταλληλότερου τύπου γεωσυνθετικού υλικού ανάλογα με τις συνθήκες ροής i) μόνιμες συνθήκες ροών και ii) δυναμικές (έντονα μεταβαλλόμενες) συνθήκες ροών (Σχήματα 11α, β).

Συνδυάζοντας τις δυο ανωτέρω επιμέρους απαιτήσεις γίνεται επιλογή του καταλληλότερου γεωσυνθετικού υλικού μεταξύ των διαθέσιμων στο εμπόριο.

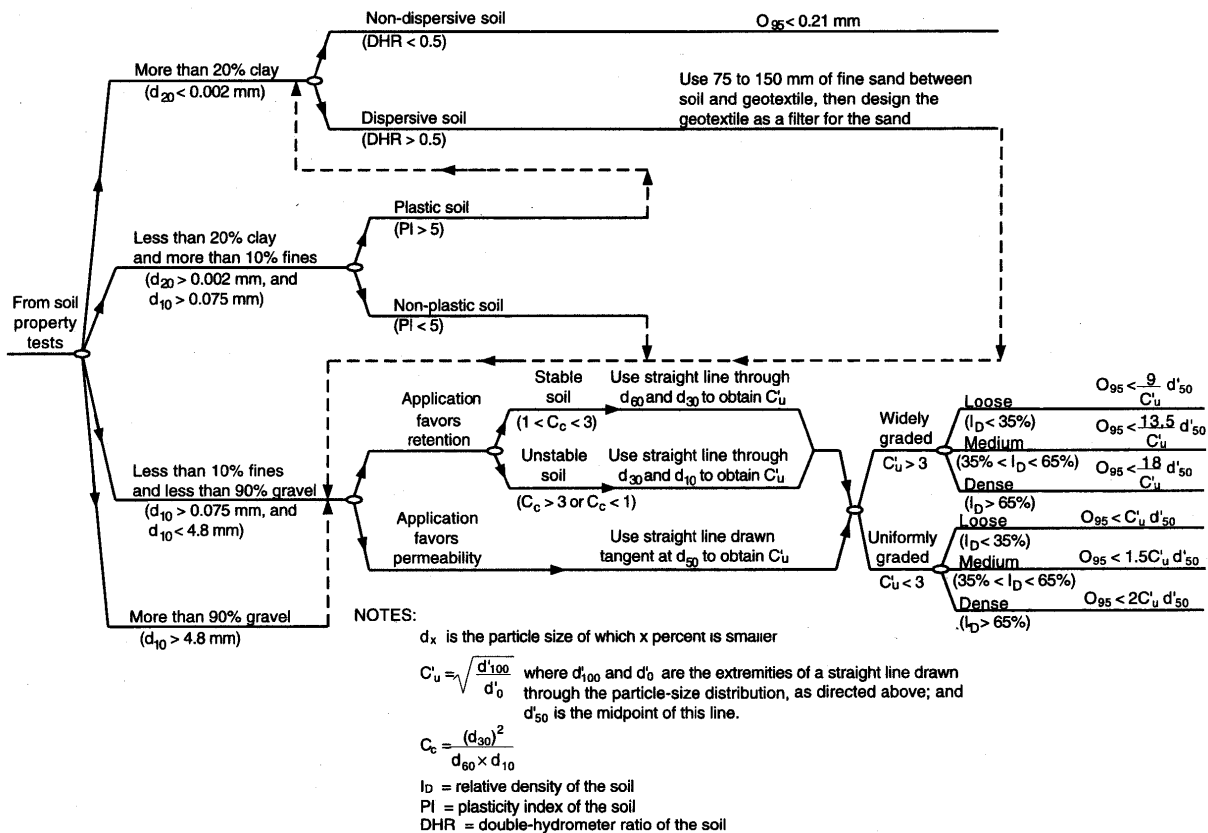
## 7. ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΕΣ ΜΕ ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

### 7.1 Γεωσωλήνες

Ο τομέας των γεωσυνθετικών υλικών παρέχει τα τελευταία χρόνια ευρύ πεδίο για την ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών. Μεταξύ των καινοτομιών που αναπτύχθηκαν την τελευταία περίπου δεκαπενταετία συμπεριλαμβάνονται και τα συστήματα των γεωσωλήνων. Η χρήση των γεωσωλήνων εμφανίζει, παγκοσμίως, ολοένα και μεγαλύτερη αποδοχή από τον τεχνικό κόσμο λόγω της πληθώρας των εφαρμογών στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν με ανταγωνιστική ταχύτητα κατασκευής, κόστος, και τεχνικές δυνατότητες. Πρόκειται για αναδιπλωμένα κυρίως γεωυφάσματα, σε μορφή σωλήνα το εσωτερικό των οποίων πληρώνεται, ανάλογα με τη χρήση είτε με νερό είτε με διαθέσιμα στις περιοχές των έργων εδαφικά υλικά. Η χρήση γεωσωλήνων βρίσκει εφαρμογή σε έργα αντιδιαβρωτικής προστασίας, κυρίως σε ακτές (Φωτ. 23, Σχήμα 12), σε έργα αντιπλημμυρικής προστασίας, σε γεωπεριβαλλοντικές εφαρμογές κτλ. Διαδικτυακοί τόποι κατασκευαστών με αναλυτικές πληροφορίες για τα συστήματα των γεωσωλήνων βρίσκονται στις ακόλουθες διευθύνσεις: [www.geo.tubes.com](http://www.geo.tubes.com), [www.aquabarier.com](http://www.aquabarier.com), [www.waterstructures.com](http://www.waterstructures.com), [www.usfloodcontrol.com](http://www.usfloodcontrol.com).



α



β

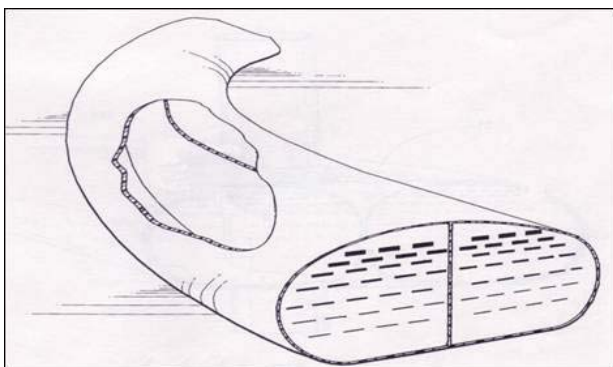
Σχήμα 11. Κριτήρια συγκράτησης εδάφους α) συνθήκες μόνιμης ροής β) δυναμικές συνθήκες ροής.  
Figure 11. Soil retention criteria for a) steady state flow conditions β) for dynamic flow conditions (Luettich et. al. 1992).

## 7.2 Αντιδιαβρωτική προστασία με γεωσωλήνες

Η εφαρμογή γεωσωλήνων σε έργα αντιδιαβρωτικής προστασίας παρέχει εύκαμπτες λύσεις, χρησιμοποιώντας επιτόπου διαθέσιμα υλικά, καταργώντας την απαίτηση κατασκευής υψηλού κόστους και δυσεύρετων πολλών φορές υλικών κατασκευής λιθορριπών (Heerten, 2000). Οι γεωσωλήνες, διαστάσεων σε διάμετρο έως περίπου 6.0m και μήκους που μπορεί να ξεπερνά τα 15m, συνίστανται συνήθως από γεωύφασμα πολυεστερικό ή πολυπροπυλενίου το οποίο πληρούται στο εσωτερικό του επιτόπου στο έργο με διαθέσιμα εδαφικά υλικά της περιοχής. Η υδραυλική πλήρωση των γεωσωλήνων γίνεται μέσω ειδικών στομιών (Φωτ. 24) και μπορεί να χρησιμοποιηθούν απ' ευθείας μέχρι και υλικά βυθοκορημάτων. Για την αύξηση της ευστάθειάς τους, έναντι του κινδύνου της υδραυλικής υποσκαφής, σε πολλές περιπτώσεις προβλέπεται η προσαρμογή κατάλληλης αμφίπλευρης αγκύρωσης με δυο γεωυφάσματα (Φωτ. 25), τα οποία στα άκρα τους με τη σειρά τους επίσης αγκυρώνονται (Kim et. al. 2004).

Η μεθοδολογία και οι κατασκευαστικές οδηγίες / προδιαγραφές εφαρμογής λύσεων με γεωσωλήνες βρίσκονται στις μέρες μας υπό συνεχή εξέλιξη και βελτίωση (U.S. Army Corps of Eng. 2006). Σε πολλές χώρες οι λύσεις με γεωσωλήνες έχουν τύχει ευρείας αποδοχής, και σε πολλές περιπτώσεις δε, σε τέτοιο επίπεδο που δεν αποτελούν μόνον μια πιθανή εναλλακτική λύση αλλά τη συνήθη πρακτική.

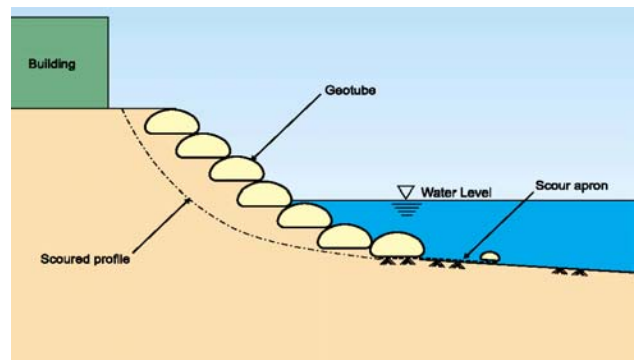
Επιτυχείς εφαρμογές των γεωσωλήνων ως μέτρα αντιδιαβρωτικής προστασίας ακτών παρουσιάζουν οι Restall S.J. et. al. (2002) για έργα στην Αυστραλία, σε μια ήπειρο όπου γενικά προτιμούνται οι εύκαμπτες κατασκευές, μιας και απαιτείται εκτός των άλλων η αποφυγή



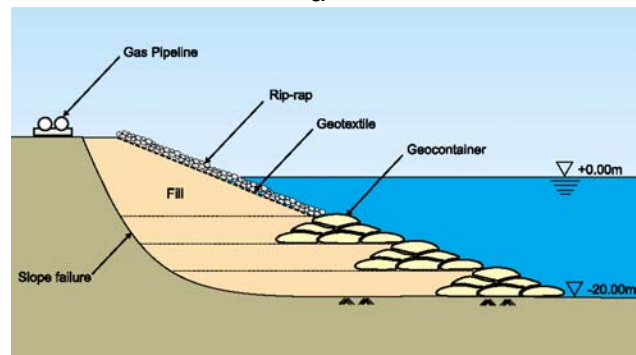
Φωτογραφία 22. Άποψη γεωσωλήνα.  
Photograph 22. Perspective view of a geotube (Hydro-Solutions, Inc).



Φωτογραφία 23. Αντιδιαβρωτική προστασία ακτής με γεωσωλήνες.  
Photograph 23. Coastal erosion protection using geotubes (Ten Cate Nicolon).



α



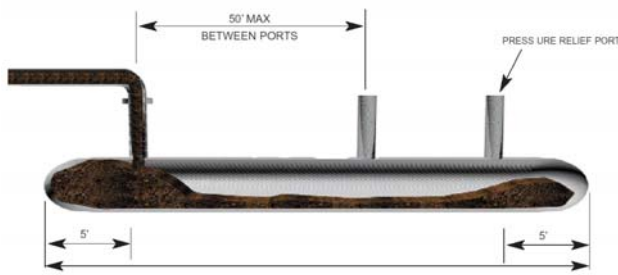
β

Σχήμα 12. Αντιδιαβρωτικά μέτρα ακτής με χρήση α) γεωσωλήνων και β) με χρήση γεωσωλήνων και λιθορριπής.

Figure 12. Erosion control measures using α) geotubes and β) both geotubes and stone rip-rap (Ten Cate Nicolon).

τραυματισμού των αθλητών που ασχολούνται με το πολύ διαδεδομένο άθλημα του surf. Αντίστοιχες επιτυχείς εφαρμογές περιγράφονται από τους Heerten et. al (2000) για έργα στην Ευρώπη και στην Ασία και τους Fowler & Trainer (1998) για έργα στις ΗΠΑ.

Αντίστοιχη αρχή εφαρμογής με τους γεωσωλήνες έχουν και οι γεωσάκκοι (geobags). Ωστόσο η χρήση της προορίζεται κυρίως σε αντιπλημμυρικά έργα π.χ. όχθες καναλιών κτλ.

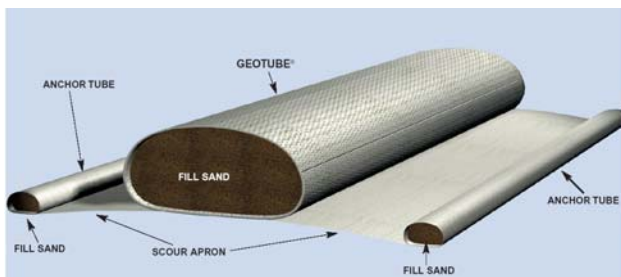


α



β

Φωτογραφία 24. Γεωσωλήνας: α) διαδικασία υδραυλικής πλήρωσης β) Στόμιο εισόδου.  
Photograph 24. Geotube: α) hydraulic filling procedure β) inlet port. (Ten Cate Nicolon).



Φωτογραφία 25. Άποψη γεωσωλήνα και των πλευρικών αγκυρώσεών του.  
Photograph 25. Geotube view with side anchorage. (Ten Cate Nicolon).

### 7.3 Λοιπές ειδικές εφαρμογές γεωσωλήνων

Πέραν του πεδίου εφαρμογής των γεωσωλήνων ως μέτρα αντιδιαβρωτικής προστασίας, τα πλεονεκτήματα των ιδιοτήτων των γεωσυνθετικών υλικών από τα οποία συνίστανται δύνανται να χρησιμοποιηθούν για χρήση τους σε γεωπεριβαλλοντικές εφαρμογές, σε λιμενικά έργα, σε κατασκευές τεχνητών νησίδων κτλ.

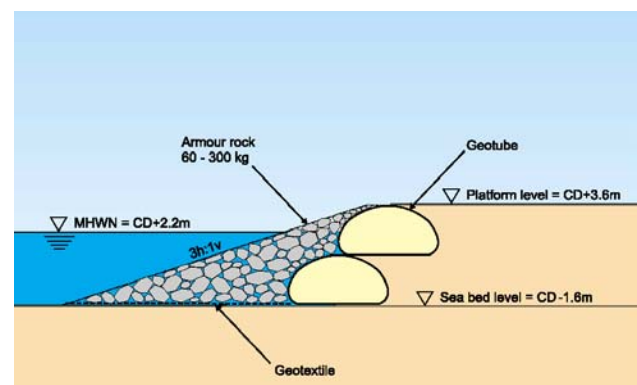
Συνοπτικά αναφέρεται ότι οι γεωσωλήνες δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως μέσα αφυδάτωσης και αποθήκευσης της λυματολάσπης σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού (Fowler J. et. al 1996, Moo-Young et. al. 1998), με ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά συγκράτησης, και με μικρό ποσοστό διαφυγών επικίνδυνων για το περι-

βάλλον ουσιών π.χ. διοξινών (Mori et. al. 2002). Μια άλλη κατασκευαστική καινοτομία που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα που παρέχουν τα εξωτερικά γεωυφάσματα να συγκρατούν εντός των γεωσωλήνων εδαφικά υλικά είναι η κατασκευή τεχνητών νησιών. Η μέθοδος εφαρμόστηκε επιτυχώς σε πολλές περιοχές, μεταξύ των οποίων και στα ραγδαία τουριστικά αναπτυσσόμενα κράτη του Περσικού Κόλπου (π.χ. Μπαχρέιν, Σχήμα 13, Φωτ. 27), όπου εκτός των άλλων υπάρχει έλλειψη διαθέσιμων βραχωδών υλικών (Fouler et. al 2002a, Fouler et. al 2002b). Η αρχή κατασκευής των τεχνητών αυτών νησιών είναι η αρχική διαμόρφωση της περιμέτρου αυτών, οποιοδήποτε σχήματος, και ακολούθως η πλήρωση στο εσωτερικό τους με εδαφικό υλικό το οποίο δεν έχει την δυνατότητα απομάκρυνσης καθώς περιορίζεται από το περιμετρικό “φράγμα” των γεωσωλήνων.

Παραλλαγή της μεθόδου πλήρωσης των γεωσωλήνων με εδαφικά υλικά, αποτελούν οι λύσεις, προσωρινής ωστόσο χρονικής διάρκειας, με πλήρωση των σωλήνων με νερό. Στην περίπτωση αυτή οι γεωσωλήνες συνίστανται



Φωτογραφία 26. Αφυδάτωση και αποθήκευση λυματολάσπης σε γεωσωλήνα.  
Photograph 26. Dewatering and sludge solid containment within a geotube.



Σχήμα 13. Ενδεικτική διάταξη γεωσωλήνων στην περίμετρο τεχνητής νησίδας.  
Figure 13. Indicative geotube layout around island perimeter (Ten Cate Nicolon).



Φωτογραφία 27. Δορυφορική άποψη τεχνητού νησιού Amwaj (Μπαχρέιν) κατασκευασμένο με χρήση γεωσωλήνων.  
 Photograph 27. Satellite view of Amwaj artificial island (Bahrain) constructed using geotubes (Fouler et. al 2002b).

από διπλό αδιαπέρατο γεωύφασμα πολυαιθυλενίου και ένα τρίτο εξωτερικό, υψηλής αντοχής υφαντό γεωύφασμα πολυπροπυλενίου. Οι γεωσωλήνες που γεμίζουν με το διαθέσιμο νερό από την περιοχή του έργου, δύναται να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα έργα στα οποία απαιτείται να απομακρυνθούν προσωρινά τα νερά όπως π.χ. για την προσωρινή απομάκρυνση / εκτροπή υδάτων σε θέσεις τεχνικών εντός ποταμών (Φωτ. 28) ή για την επισκευή της στεγάνωσης, δίχως την εξ' ολοκλήρου απομάκρυνση των υδάτων από μια λιμνοδεξαμενή (φωτ. 29).

#### 7.4 Υπολογιστικά εργαλεία

Στη βιβλιογραφία υφίστανται διάφορες μαθηματικές εξισώσεις για την προσέγγιση του σύνθετου προβλήματος της διαστασιολόγησης και των καθιζήσεων μεμονωμένων ή στοιβαγμένων γεωσωλήνων που γεμίζουν με ρευστοποιημένο εδαφικό υλικό. Μεταξύ των διαθέσιμων μεθόδων είναι αυτές των Liu & Silvester (1977), Kazimirowicz (1994), Leshchinsky et. al. (1996), Plaut & Suherman (1998), Palmerton (1998), Miki et. al. (1996) και Plaut & Klusman (1999).

Από τις ανωτέρω μεθόδους, αυτές των Leshchinsky et. al. 1996 και Palmerton (1998) διατίθενται στο εμπόριο με τη μορφή προγραμμάτων H/Y που καλούνται GeoCoPs και SOFFTWIN – SOFFTCON αντίστοιχα. Από τον Pilarczyk (2000) χρησιμοποιείται η μέθοδος των Miki et. al. (1996), η οποία ωστόσο χρησιμοποιεί απλοποιητικές παραδοχές, με



Φωτογραφία 28. Επισκευή βάθρων γέφυρας με χρήση γεωσωλήνων με νερό για την εκτροπή της ροής.  
 Photograph 28. Bridge footing repair using water filled geotubes for flow diversion (Water Structures Unlimited)



Φωτογραφία 29. Χρήση γεωσωλήνων με νερό για την επισκευή γεωμεμβράνης λιμνοδεξαμενής.  
 Photograph 29. Water filled geotubes for ponds' geomembrane repair (Water Structures Unlimited)

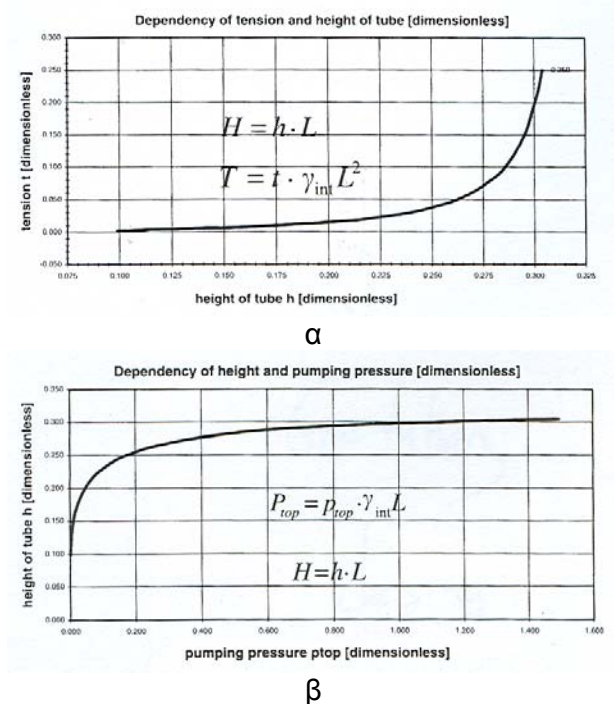
στόχο να επιλύσει και το πρόβλημα των αλληλοστοιβαγμένων γεωσωλήνων. Στην πλειοψηφία των μεθόδων γίνεται η παραδοχή ότι η μεγιστη αναπτυσσόμενη εφελκυστική δύναμη στο περιμετρικό του γεωσωλήνα γεωύφασμα πραγματοποιείται κατά τη στιγμή της πλήρωσης, και ότι οι γεωσωλήνες τοποθετούνται σε ασυμπίεστο έδαφος. Το ζήτημα της μεταβολής του ύψους του γεωσωλήνα λόγω της στερεοποίησης που υπόκειται το υλικό πλήρωσης από την απομάκρυνση των περιεχόμενων υδάτων αντιμετωπίζεται απλοποιητικά από τον Leshchinsky et. al. (1996).

Τα αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων ανάλυσης των γεωσωλήνων καταλήγουν σε συγκρίσιμα αποτελέσματα (Cantré 2002). Οι πλέον εύχρηστες για εφαρμογή αριθμητικές εξισώσεις είναι αυτές των Plaut & Suherman (1998), με τη βοήθεια των οποίων ο Cantré (2002) σχεδίασε αδιάστατα νομογραφήματα

για τον κατ' αρχήν προσδιορισμό των σημαντικότερων μεγεθών για τη διαστασιολόγηση γεωσωλήνων (Σχήμα 14).

## 8. ΣΥΝΟΨΗ

Παρουσιάστηκαν συνοπτικά τα είδη, οι χρήσεις και ο τρόπος εφαρμογής των γεωσυνθετικών υλικών για την αντιδιαβρωτική προστασία εδαφών. Παρότι η χρήση γεωσυνθετικών υλικών πρωτοεφαρμόστηκε, με επιτυχή αποτελέσματα, προ περίπου 45 ετών, τα τελευταία χρόνια ο τομέας εφαρμογής τους έχει παρουσιάσει ραγδαία ανάπτυξη, με νέα υλικά να κάνουν την εμφάνισή τους κάθε τόσο. Έχοντας ως πλεονέκτημα την πληθώρα των ιδιοτήτων τους, τα γεωσυνθετικά υλικά έτυχαν ευρείας απόδοχής από τον τεχνικό κόσμο παρέχοντας υψηλού επιπέδου αποτελεσματικότητα σε συνδυασμό με ανταγωνιστικό κόστος. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αποτελεσματικότητα των λύσεων με γεωσυνθετικά υλικά συνίσταται



όπου  $T$ : εφελκυστική δύναμη  
 $L$ : περίμετρος γεωσωλήνα  
 $H$ : ύψος γεωσωλήνα  
 $P_{tot}$ : Εφαρμοζόμενη πίεση

Σχήμα 14. Νομογραφήματα σχεδιασμού γεωσωλήνων: α) Εκτίμηση περιμετρικής εφελκυστικής δύναμης β) εκτίμηση ύψους γεωσωλήνα συναρτήσει της εφαρμοζόμενης πίεσης.

Figure 14. Geotube design charts α) Circumferential tension estimation β) tubes' height estimation versus applied pumping pressure (Cantré 2002).

τόσο στη σωστή επιλογή του καταλληλότερου διαθέσιμου στο εμπόριο προϊόντος όσο και στη σχολαστική - τοποθέτηση, κατασκευή των έργων και εν συνεχεία συντήρησή τους.

Τα διαθέσιμα υλικά αντιδιαβρωτικής προστασίας διακρίνονται στα προσωρινά στόχος των οποίων είναι η ανάσχεση της εδαφικής διάβρωσης έως την ανάπτυξη της βλάστησης και στα μόνιμα τα οποία καλούνται να λειτουργήσουν άλλοτε σε συνδυασμό με τη βλάστηση, άλλοτε από μόνα τους ή άλλοτε υποβοηθώντας άλλα μέτρα.

Ο βαθμός αποτελεσματικότητας των αντιδιαβρωτικών μέτρων με χρήση γεωσυνθετικών υλικών είναι γενικά υψηλός της τάξεως του 60% (Rustom & Weggel 1993) σε σχέση με τη διάβρωση ενός απροστάτευτου πρανού. Ωστόσο, σημειώνεται ότι από τα διάφορα διαθέσιμα υλικά άλλα είναι πιο αποτελεσματικά στην μείωση της έντασης πρόσκρουσης της βροχόπτωσης επί του εδάφους που συνεπάγεται μείωση του δυναμικού διάβρωσης και άλλα είναι πιο αποτελεσματικά στην μείωση της ταχύτητας ροής των υδάτων που εμμέσως προκαλεί τη μείωση του δυναμικού διάβρωσης.

Οι εφαρμογές γεωσυνθετικών υλικών για την αντιδιαβρωτική προστασία εδαφών εξακολουθεί να αποτελεί ένα αντικείμενο πρόκλησης για την ανάπτυξη νέων καινοτομιών. Μεταξύ των καινοτομιών αυτών συγκαταλέγονται και τα συστήματα των γεωσωλήνων που αποτελούν οικονομικές, εύκαμπτες, ευέλικτες, φιλικές προς το περιβάλλον και ταχείας κατασκευής λύσεις με μικρές απαιτήσεις σε ότι αφορά στις ιδιότητες των υλικών πλήρωσής τους.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anderson, Alvine G., Amreek S., Paintal A.S. & Davenport J.T. (1970). "Tentative Design Procedure for Riprap Lined Channels." NCHRP Report No. 108, Highway Research Board, National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- Barrett R.J. (1966). "Use of plastic filters in coastal structures". Proc. 16<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Eng. pg. 1048-1067.
- Carroll G.J., Rodencal J. & Thiesen M.S. (1991). "Evaluation of turf reinforcement mats and erosion control and revegetation mats under high velocity flows". Proc. XXII Annual Conf. of the Int. Erosion Control Ass. Orlando, FL.

- Cantré S. (2002). "Geotextile tubes – analytical design aspects". Geotextiles and Geomembranes Vol. 20, pg. 305-319.
- EuroSION (2004). "Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability". European commission on coastal erosion. Report Online, Parts 1-5. www.euroSION.org
- Emerson W.W. (1967). "A classification of soil aggregates based on their coherence in water". Australian J. Soil Res. 2. pg. 211-217.
- HEC-15 (1988) Chen, Y.H. and G.K. Cotton, Design of Roadside Channels with Flexible Linings, US Federal Highway Administration report /FHWA-1P-87-7, McLean, VA, USA.
- Fowler J., Baby R.M., & Trainer E. (1996). "Dewatering sewage sludge with geotextile tubes". Proc. 49<sup>TH</sup> Canadian Geotechnical conference. Sept. 23-25 1996. St. John's New Foundland, Canada).
- Fowler J., Stephens T.C., Santiago M. & de Bruin, P. (2002a). "Amwaj islands constructed with geotubes, Bahrain". Western Dredging Association Twenty-Second Technical Conference and Thirty-Forth Annual Texas A&M Dredging Seminar", Denver, CO
- Fowler J., Ortiz C., Ruiz N & Martinez E. (2002b). "Use of geotubes in Colombia, South America". 7<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics," 22-27 Sept 2002, Nice, French Riviera
- Fowler J., & Trainer E. (1998). "Overview of geocontainer projects in the United States". Proc. 15<sup>th</sup> World Dredging Congress, World Organization of Dredging Association, Las Vegas, Nevada, USA.
- Fowler J., Arroyo R. & Ruiz N. (2004). "Riprap covered geotextile tube Jetties, Nautical Club Stella Maris, Casa Blanca, Province of Esmeraldas, Ecuador". Western Dredging Association 24<sup>th</sup> Technical Conference and 36th Annual Texas A&M Dredging Seminar, Orlando, FL
- Gourc J.P. (1994). "Geosynthetics and environmental engineering". Mercer Lecture.
- Gray D. H. & Leiser A.T. (1972). "Biotechnical slope protection and erosion control". Van Nostrand-Reinhold, NY.
- Gray D.H. & Sotir R.B. (1996). "Biotechnical and soil Bioengineering slope stabilization". John Wiley & Sons, NY.
- Gibeaut J. C., Hepner T. L., Waldinger R., Andrews J. R., Smyth R. C. & Gutierrez R. (2003). "Geotubes for temporary erosion control and storm surge protection along the gulf of Mexico Shoreline of Texas". Proc. 13th biennial Coastal zone conf. Baltimore, MD.
- Heerten G. (2000). "New Developments with Mega Sand Containers of Non- Woven Needle-Punched Geotextiles for Construction of Coastal Structures". 27<sup>th</sup> Int. Conf. on Coastal Engineering.
- Heerten G., Jackson A., Restall S. & Stelljes K. (2000) "Environmental benefits of sand filled geotextiles structures for coastal application". Proc. GeoEng 2000 - Melbourne, Australia
- Hewlett H.W.M., Boorman L.A. & Bramley M.E. (1987). "Design of reinforced grass waterways". CIRIA Report 116. London.
- Holtz R. D., Christopher, B. R., & Berg, R. R. (1997). "Geosynthetic Engineering". BiTech Publishers, Vancouver, British Columbia, Canada., 451 pp.
- Holtz R.D. (2001). "Geosynthetics for soil reinforcement". 9<sup>th</sup> Spencer J. Buchanan Lecture.
- Hjulstrom F (1935). "Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyries". Bulletin Geol. Univ. Uppsala, 25. pg. 221-527.
- International Geosynthetics Society (1998). "Recommended descriptions of geosynthetics functions, geosynthetics terminology, mathematical and graphical symbols". IGS South Carolina USA.
- Kazimirowicz K. (1994). "Simple analysis of deformation of sand-sausages". 5<sup>th</sup> Int. Conf. on geotextiles, geomembranes and related products. Vol. 2. Hydraulic applications and related research, Singapore, pg. 775-778.
- Koerner R.M. (1998). "Designing with Geosynthetics". 4th ed., Prentice-Hall.
- Kim M., Freeman M., FitzPatrick B.T., Nevius D.B., Plaut R.H. & Filz G.M. (2004). "Use of an apron to stabilize geomembrane tubes for fighting floods". Geotextiles & Geomembranes Vol. 22, Issue 4, pg. 239-254.
- Leshchinsky D., Leshchinsky O., Ling H.I. & Gilbert P. (1996). "Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects". ASCE Journal of Geotech. Eng. Pg. 682 - 690
- Liu G.S. & Silvester R. (1977). "Sand sausages for beach defence work". Proc. 6<sup>th</sup> Australasian Hydraulics and Fluid mechanics conf. Adelaide, Australia

- Lombard G., Mlynarek J, & Bernard F. (2000). "Geosynthetics for erosion control systems" Proc. Filters and Drainage in Geotech. and Environmental Engineering. Ed. Wolski & Mlynarek. Balkema Rotterdam.
- Luetlich S.M., Giroud J.P. & Bachus R.C. (1992). "Geotextile filter design guide". Journal of Geotextiles & Geomembranes, Vol. 11, No. 4-6, pg. 19-34.
- Miki H. et. al. (1996). "Experimental study on geotextile tube dehydration method of dredged soil". Proc. 1<sup>st</sup> European geosynthetics conf. EuroGeo 1, pg.933-941
- Morgan R.P.C. (1986). "Soil erosion and conservation". Longman, Hong Kong.
- Mori H., Miki H. & Tsyneoka N., (2002). "The geotube method for dioxin-contaminated soil". Geotextiles and Geomembranes Vol. 20. pg. 281-288.
- Muthukumaran A.E. & Ilamparuthi K. (2006). "Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering" Geotextiles and Geomembranes Vol. 24. Issue 4. pg. 210-219.
- Moo-Young H., Meyers T., & Townsend D., (1998) "Evaluation of geosynthetic fabric containers to contain contaminated dredged sediment". 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Geosynthetics. March 25-29 Atlanta, Georgia USA pg. 1173-1176.
- Palmerton J.B. (1998). "SOFFTWIN – Simulation of fluid filled tubes for WINDOWS & SOFFTCON – Simulation of fluid filled tubes with consolidation". Computer program manual.
- Pilarczyk K. W. (2000a). "Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering". Balkema, Rotterdam.
- Pilarczyk K. & Breteler M.K. (2000). "Geotextiles in revetment structures – A Dutch approach" Proc. Filters and Drainage in Geotech. and Environmental Engineering. Ed. Wolski & Mlynarek. Balkema Rotterdam.
- Pilarczyk K. (2000b). "Geomattresses in erosion control – An overview of design criteria" Proc. Filters and Drainage in Geotech. and Environmental Engineering. Ed. Wolski & Mlynarek. Balkema Rotterdam.
- Pilarczyk K. (2003). "Alternative systems for coastal protection - an overview". Proc. Int. Conf. on Estuaries and Coasts. Hangzhou, China.
- Plaut R.H. & Suherman S. (1998). "Two dimensional analysis of geosynthetic tubes". Acta Mechanica 129, pg. 207-218.
- Plaut R.H. & Klusman C.R. (1999). "Two dimensional analysis of stacked geosynthetic tubes on deformable foundation". Thin-walled structures 34, pg. 179-194.
- Qian X., Koerner R.M. & Gray D.H. (2002). "Geotechnical aspects of landfill design and construction". Prentice Hall. N.Y.
- Schwab G.O. & Frevert R.K. (1985). "Elementary soil and water engineering" John Wiley & Sons.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K, & Yoder D.C. (1987). "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE)". U.S. Dept. of Agriculture, Agric. Handbook No. 703.
- Restall S.J., Jackson S.A., Heerten G. & Hornsey W.P. (2002) "Case studies showing the growth and development of geotextile sand containers: an Australian perspective". Geotextiles and Geomembranes Vol. 20. pg. 321-342).
- Richardson G.N. & Koerner R.M. (1990). "A design primer: Geotextiles and related materials". Industrial Fabrics Association Int. St Paul.
- Rustom R. & Weggel J.R. (1993). "A study of erosion control systems: Experimental results". Proc. Int. Erosion Control Assoc. Steamboat Springs. CO. pg. 239-251.
- Spyropoulos K. (2004). "Mesollogi & Lakkopetra". [www.euroasion.org/shoreline/20mesollogi.html](http://www.euroasion.org/shoreline/20mesollogi.html) & [www.euroasion.org/shoreline/19lakkopetra.html](http://www.euroasion.org/shoreline/19lakkopetra.html)
- Sherard J.L. et. al (1976). "Pinhole test for identifying dispersive soils". Journal of Geotech. Eng. ASCE Vol. 102. No 1, pg. 69-85
- Theisen M.S. (1992). "Geosynthetics in erosion and sediment control". Geotextiles & Geomembranes Vol. 11. No. 4-6.
- U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (1995). "Environmental effects of dredging. Technical notes". EEDP-05-01.
- U.S. Army Corps of Engineers (2006). "Geotextile tube structures guidelines for contact specifications". ERDC/CHL CHETN-II-50
- U.S. Department of Agriculture (1987). "Stability of grassed-lined open channels". Agricultural research Service, Agricultural Handbook No. 667.
- U.S. Department of Agriculture (1997). "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised

- Universal Soil Loss Equation (RUSLE)". Agricultural Handbook No. 703.
- U.S. Department of Transportation (2005). "Design of Roadside Channels with Flexible Linings". Hydraulic Engineering Circular, No. 15, Federal Highway Administration, 3<sup>rd</sup> Edition, Publication No. FHWA-NHI-05-114
- Van Herpen J.A. (1997). "Rrosion control enkammat design guide". Project number 80233.
- Volk G.M. (1937). "Methods of determining the degree of dispersion of the clay fraction of soils". Proc. Soil Sci. Soc. Amer. Pg. 432-445.
- Welsh J.P. (1977). "PennDOT Uses a new method for solving scour problems beneath bridge piers". Highway Focus, Vol. 9, No. 1, pg. 72-81.
- Weggel J.R. & Rustom R. (1992). "Soil erosion by rainfall and run-off – State of the Art". Geotextiles and Geomembranes, 11 pg. 551-572
- Wishmeier W.H. & Smith D.D. (1960). "A universal soil-loss equation to quide conservation farm planning" 7<sup>th</sup> int. Conf on soil Science, Madison.
- Williams J.R. (1972). "Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor" Proc. of the sediment yield workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, MS, USDA-ARSS40
- Ξειδάκης Γ.Σ. (2006α). "Αστοχίες θαλασσίων πρανών σε ημι-λιθοποιημένα εδάφη των ακτών της Θράκης. Μέρος Α. Μηχανισμοί διάβρωσης και μορφές αστοχιών" Πρακ. 5<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδ. Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Ξάνθη.
- Ξειδάκης Γ.Σ. (2006β). "Αστοχίες θαλασσίων πρανών σε ημι-λιθοποιημένα εδάφη. Μέρος Β. Μορφές και τρόποι ανάλυσης – Παραδείγματα από τις ακτές της Θράκης" Πρακ. 5<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδ. Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Ξάνθη.
- Παπακυριακόπουλος Π. & Γάκης Ν. (2001). "Εκτίμηση διαβρωσιμότητας αργιλικών εδαφών σε τεχνητά πρανή" Πρακ. 4<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδ. Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Αθήνα.
- Χουλιάρας Ι.Γ., Τσότσος Σ.Σ., Μισοπόλινος Ν. & Αραμπατζής Θ. (2001). "Πειραματική μελέτη των παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν τη διαβρωσιμότητα των συνεκτικών εδαφών" Πρακ. 4<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδ. Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Αθήνα.