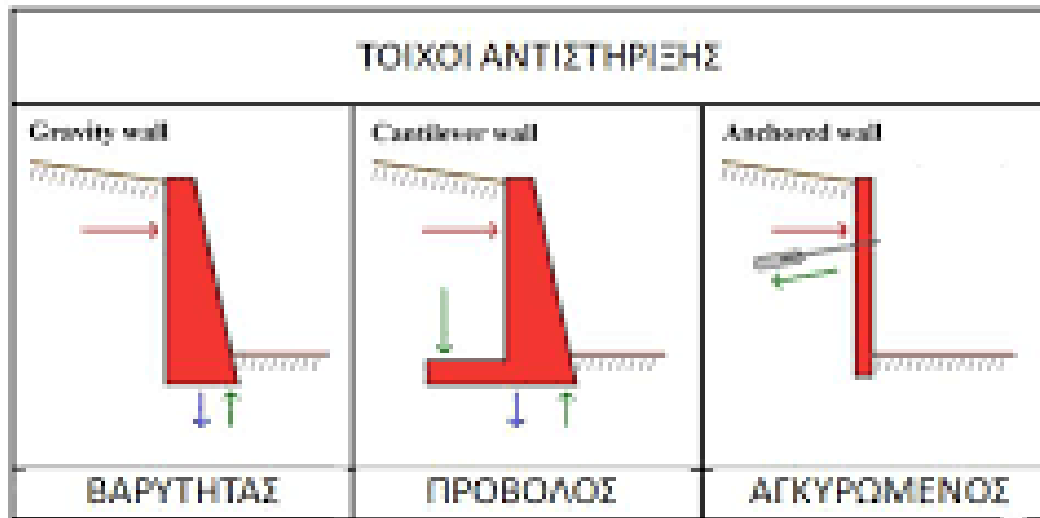


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ-- ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

6^η ΔΙΑΛΕΞΗ – ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ - ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΗΝ ΟΔΟΠΟΙΙΑ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2020

11.ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



Εικόνα Α. Σταθεροποίηση εδάφους

ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΑΦΩΝ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



Εικόνα Β. Σταθεροποίηση αδρανών -γεωκυψέλες

11.1. ΛΟΓΟΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

- ✓ Πολλές φορές, κατά την εκτέλεση έργων οδοποιίας, εδαφικά υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή επιχωμάτων, στρώσεων έδρασης οδοστρώματος και οδοστρωσίας δεν πληρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις λόγω ισχνών μηχανικών χαρακτηριστικών.
- Αν ωστόσο, τα εδάφη αυτά κρίνονται ακατάλληλα στην φυσική τους κατάσταση για χρήση σε κατασκευές, διάφορες τεχνικές είναι δυνατό να επιφέρουν βελτίωση της μηχανικής τους συμπεριφοράς: συμπύκνωση, διόρθωση κοκκομετρίας, προσθήκη αδρανών, χημική σταθεροποίηση.
- Η χημική σταθεροποίηση (admixture stabilization), που συνήθως αναφέρεται και απλώς ως σταθεροποίηση, χαρακτηρίζεται από τη δράση πρόσθετων χημικών παραγόντων που ασκούν ευνοϊκή επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά του εδαφικού υλικού.
- Πρόκειται για μία τεχνική που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην κατασκευή οδών από πολλές δεκαετίες, παραμένει όμως σε μεγάλο βαθμό άγνωστη στον Ελληνικό χώρο, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στην κατασκευή νέων οδικών αρτηριών υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου, όσο και στην επανακατασκευή παλαιότερων οδών χωρίς ασφαλτοτάπητα.
- Αντίθετα, σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες, στις οποίες τα αδρανή υλικά είναι σπάνια (Ολλανδία, Βέλγιο), η τεχνική της σταθεροποίησης είναι ευρύτατα διαδεδομένη.

11.1. ΛΟΓΟΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

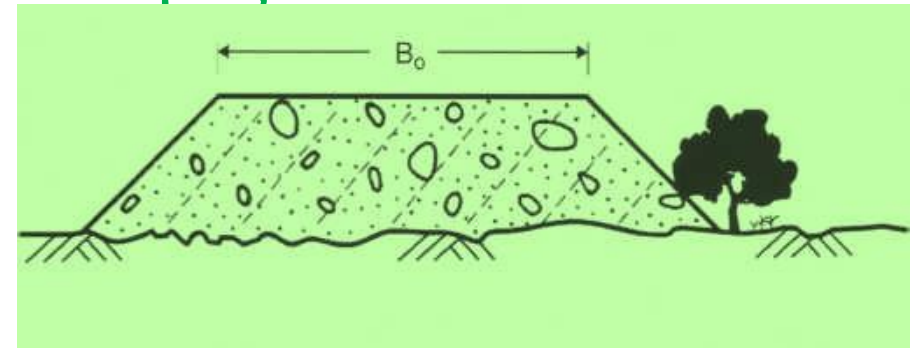
- Η χρήση της τεχνικής αυτής περιορίσθηκε, στην Ελλάδα, για πολλά χρόνια στην κατασκευή βοηθητικών εργοταξιακών οδών από εδάφη σταθεροποιημένα με υδράσβεστο.
- Πρόσφατα, στα τέλη της δεκαετίας του '90, χρησιμοποιήθηκε, για κατασκευή στρώσεων οδοστρωσίας αυτοκινητοδρόμων, σταθεροποιημένο (κατεργασμένο) θραυστό αμμοχάλικο (ΚΘΑ) με αμφιλεγόμενα, από τεχνικής άποψης, αποτελέσματα.
- ✓ Ορισμένοι από τους λόγους χημικής επεξεργασίας των εδαφικών και αδρανών υλικών για κατασκευή οδικών έργων είναι οι εξής:
 - μικρή φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους
 - χαμηλή ποιότητα υλικών βάσης και υπόβασης
 - ακαταλληλότητα προϊόντων εκσκαφών για κατασκευή επιχωμάτων
 - έλεγχος υγρασίας και περιορισμός διόγκωσης των εδαφικών υλικών
 - ανακατασκευή οδών δια χρήσεως υφισταμένων υλικών
 - κατασκευή στρώσεων κυκλοφορίας δευτερευουσών οδών.

11.1. ΛΟΓΟΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

- Σε κάθε μία από τις περιπτώσεις αυτές πρέπει να χρησιμοποιείται ο κατάλληλος χημικός παράγοντας που επιφέρει το καλύτερο αποτέλεσμα. Η χρήση, φυσικά, των παραγόντων αυτών είναι πάντοτε συνάρτηση των προδιαγραφών του κάθε έργου και της οικονομίας του προβλήματος.
- Στην περίπτωση που οδικά επιχώματα πρόκειται να κατασκευασθούν από προϊόντα εκσκαφών με ισχνά μηχανικά χαρακτηριστικά, η λύση της σταθεροποίησης, αντί της αναζήτησης υγιών υλικών εκ δανειοθαλάμου, μπορεί να είναι περισσότερο συμφέρουσα από οικονομική και οικολογική άποψη.
- Απαλλάσσει τον κατασκευαστή από το πρόβλημα της απόθεσης, καθώς και από τη δαπάνη προμήθειας υγιών υλικών.
- Παραμένει το θέμα του κόστους του χημικού πρόσμικτου για τη σταθεροποίηση, ενώ καθοριστική μπορεί να είναι η δυνατότητα μείωσης του εύρους κατάληψης καθώς και η σημαντική αντίσταση της σταθεροποιημένης γεωκατασκευής σε διάβρωση (Σχ. 76). Πολλές φορές, η λύση της χημικής σταθεροποίησης των διαθέσιμων υλικών δεν είναι η περισσότερο συμφέρουσα.
- Για την κατασκευή ενός έργου υψηλών τεχνικών απαιτήσεων μπορεί να είναι προτιμότερη η αναζήτηση υγιών υλικών από άλλες πηγές, όπως από λατομεία και δανειοθαλάμους.



α. Συμβατική κατασκευή



Σχήμα 76. Κατασκευή σταθεροποιημένων επιχωμάτων

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

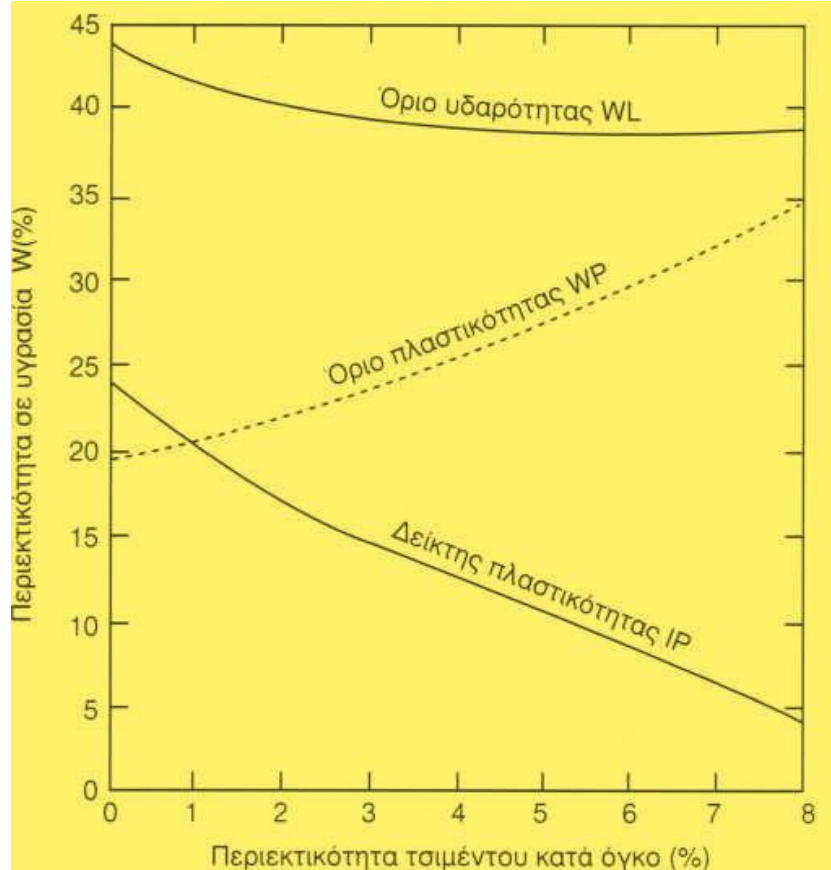
- ✓ Το τσιμέντο είναι το συνηθέστερο χημικό πρόσμικτο που χρησιμοποιείται για σταθεροποίηση εδαφών και αδρανών υλικών.
- Η τεχνική της επεξεργασίας δια τσιμέντου συνίσταται στην ανάμιξη μιας ποσότητας τσιμέντου στο - κονιοποιημένο έδαφος, ενώ στην συνέχεια ακολουθεί η αναμόχλευση, η διαβροχή και η σκλήρυνση του τσιμέντου που προκαλεί αύξηση της μηχανικής αντοχής της σταθεροποιημένης μάζας.
- Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την σταθεροποίηση ενός εδάφους δεν είναι απόλυτα γνωστές.
- Πιστεύεται ότι τα διάφορα οξείδια του τσιμέντου (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) δημιουργούν πρόσθετους δεσμούς μεταξύ των μορίων ενός εδάφους πυριτικής βάσης.
- Έτσι εξηγείται σε μεγάλο βαθμό η δράση του τσιμέντου σε αμμώδη εδάφη, ενώ αντίθετα στα αργιλικά εδάφη δεν είναι εντελώς καθορισμένη η χημική ερμηνεία της σταθεροποίησης.
- Η διαδικασία ανάμιξης μπορεί να γίνει απευθείας στο εργοτάξιο, ενώ όταν πρόκειται για αδρανή υλικά που προορίζονται για σταθεροποιημένες βάσεις, η ανάμιξη σε μηχανικό αναμικτήρα φέρει τα καλύτερα αποτελέσματα.

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

- Σχεδόν όλα τα ανόργανα εδάφη είναι δυνατό να υποστούν χημική επεξεργασία με τσιμέντο, αν και οι αναλογίες πρόσμιξης και τα αποτελέσματα της σταθεροποίησης ποικίλλουν ανάλογα με τη φύση του εδαφικού υλικού.
- Η ύπαρξη οργανικών ουσιών δυσχεραίνει τη διαδικασία σταθεροποίησης και μειώνει τη μηχανική αντοχή του σταθεροποιημένου εδάφους.
- Συνήθως θεωρείται απαγορευτική η παρουσία οργανικών ουσιών σε ποσοστό μεγαλύτερο από 2% στο έδαφος.
- Η πιο ευεργετική επίδραση της επεξεργασίας δια τσιμέντου παρατηρήθηκε σε εδάφη καλής διαβάθμισης με διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο No 200 μικρότερο του 50% και όρια Atterberg,

WL < 50, IP < 20.

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου



- Η επεξεργασία δια τσιμέντου λεπτόκοκκων εδαφών επιφέρει ελαφρά μείωση του ορίου υδαρότητας, αύξηση του ορίου πλαστικότητας και μείωση του δείκτη πλαστικότητας (Σχ. 77)
- όπως προκύπτει από παρατηρήσεις και γραφήματα με αναπαράσταση των μέσων τιμών ορίων Atterberg διαφόρων εδαφικών υλικών.

Σχήμα 77. Επίδραση της σταθεροποίησης στα όρια Atterberg [45].

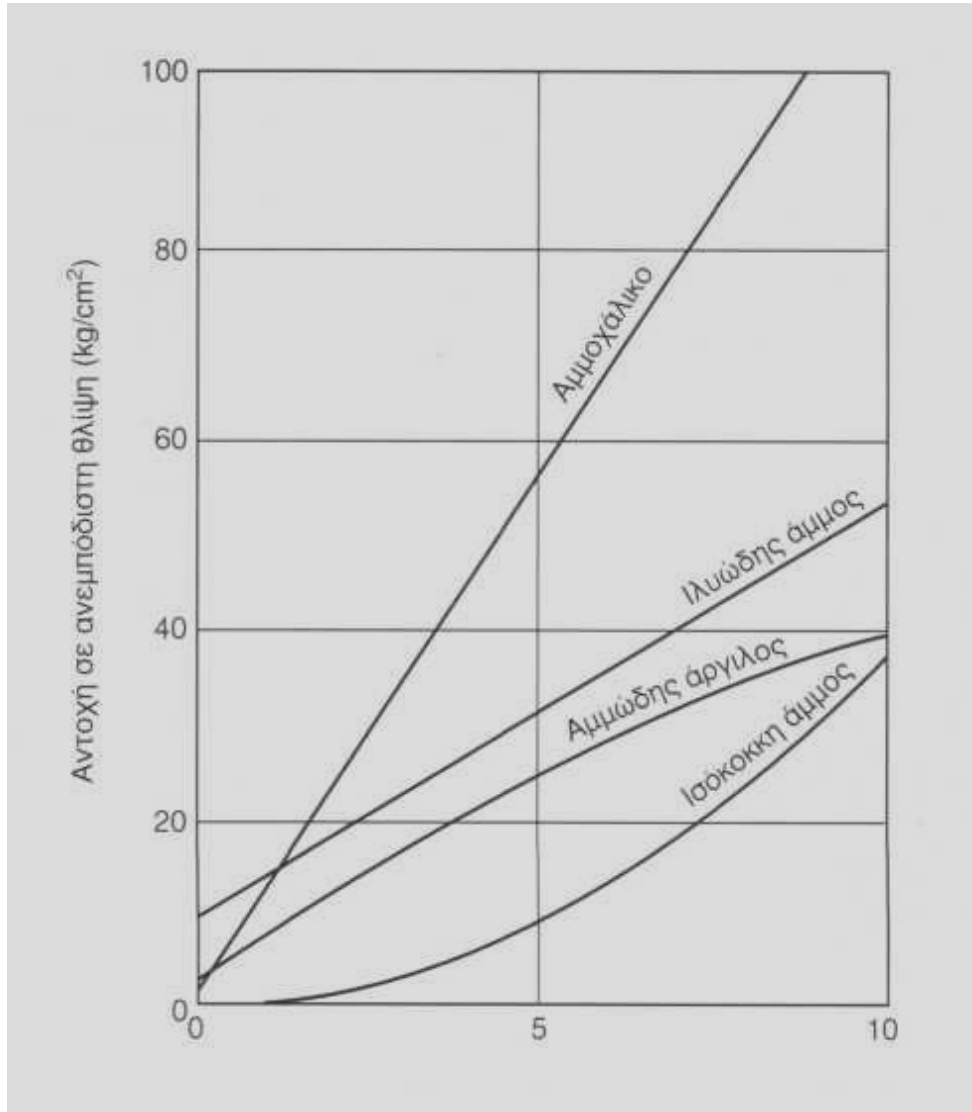
11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

- Οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους μεταβάλλονται ανάλογα με την ποσότητα του τσιμέντου και άλλους παράγοντες.
- Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη διαφόρων εδαφικών υλικών σταθεροποιημένων με τσιμέντο σε αναλογία 10%, όπως αυτή προκύπτει από πραγματικές εμπειρίες, δίδεται στον Πίνακα 43.

Έδαφος	R_c (kg/cm ²)
Πλαστική άργιλος, οργανικά εδάφη	< 3,5
Ιλύς, ιλυώδης άργιλος, άμμος κακής διαβάθμισης, μετρίως οργανικά εδάφη	3,5 ÷ 10
Αργιλώδης ιλύς, αμμώδης ιλύς, άμμος και αμμοχάλικο κακής διαβάθμισης	7 ÷ 17,5
Ιλυώδης άμμος, καθαρή άμμος, αμμοχάλικο	17,5 ÷ 35
Αργιλώδης άμμος καλής διαβάθμισης, μίγμα αργίλου και χαλίκων, διαβαθμισμένο αμμοχάλικο	25 ÷ 100

Πίνακας 43. *Αντοχή σε θλίψη σταθεροποιημένων εδαφών με τσιμέντο [45]*

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου



Σχήμα 78. Επίδραση ποσοστού τσιμέντου στη μηχανική αντοχή [30]

- Το θέμα της αναλογίας του τσιμέντου προς το εδαφικό υλικό είναι αρκετά πολύπλοκο, ενώ το βέλτιστο ποσοστό αποτελεί αντικείμενο μιας μελέτης σύνθεσης.
- Γενικά, το ποσοστό κατά βάρος του τσιμέντου εξαρτάται από την κοκκομετρική σύνθεση και τα όρια Atterberg του υλικού.
- Στους Πίνακες 44 και 45 δίδονται οι βέλτιστες αναλογίες τσιμέντου για αμμώδη και λεπτόκοκκα εδάφη αντίστοιχα, ενώ η επίδραση του ποσοστού στη μηχανική αντοχή φαίνεται να είναι καθοριστική για τα χονδρόκοκκα εδάφη (Σχ. 78).

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

- ✓ Η επεξεργασία ενός εδάφους με τσιμέντο σε διάφορες αναλογίες δημιουργεί υλικά με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά.
- Γενικά ένα υψηλότερο ποσοστό τσιμέντου εξασφαλίζει υψηλότερη μηχανική αντοχή.
- Πολλές φορές, ωστόσο, για την επιλογή του βέλτιστου ποσοστού τσιμέντου χρησιμοποιείται το κριτήριο της μέγιστης ξηράς πυκνότητας κατά Proctor, επειδή εξασφαλίζει σταθερότητα δομής στο μίγμα. Πειραματικές δοκιμές κατέγραψαν αύξηση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με την αύξηση της αναλογίας τσιμέντου σε διάφορα είδη εδαφών.

Συγκρατούμενο ποσοστό στο κόσκινο Νο4 (%)	Ποσοστό διερχόμενο από το κόσκινο Νο40 (%)	Αναλογία τσιμέντου (%)					
		Μέγιστη πυκνότητα (t/m ³)					
		1,6÷1,7	1,7÷1,8	1,8÷1,9	1,9÷2,0	2,0÷2,1	> 2,1
0-14	0-19	10	9	8	7	6	5
	20-39	9	8	7	7	5	5
	40-50	11	10	9	8	6	5
15-29	0-19	10	9	8	6	5	5
	20-39	9	8	7	6	6	5
	40-50	12	10	9	8	7	6
30-45	0-19	10	8	7	6	5	5
	20-39	11	9	8	7	6	5
	40-50	12	11	10	9	8	6

Πίνακας 44. Αναλογία τσιμέντου για σταθεροποίηση αμμωδών εδαφών [45]

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

- ✓ Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απλή αύξηση της τιμής της αντοχής σε θλίψη (R_c) ενός εδάφους σταθεροποιημένου με τσιμέντο δεν αποτελεί οδηγό επιτυχίας μιας γεωκατασκευής.
- Αντιθέτως, το ζητούμενο είναι, μέσω της κατάλληλης κατεργασίας, να επιτευχθεί μια υψηλή τιμή αντοχής σε εφελκυσμό (R_t) και ένα σχετικά μικρό μέτρο ελαστικότητας (E). Στην περίπτωση αυτήν, η απορρόφηση τάσεων είναι μικρή και ο κίνδυνος αστοχίας αμελητέος.
- Σε περιπτώσεις σημαντικών έργων, μια πλήρης εργαστηριακή διερεύνηση του βέλτιστου ποσοστού τσιμέντου στο μίγμα είναι απαραίτητη.
- ✓ Μετά από δοκιμές κατάταξης, επιλέγονται 3 ή 4 αναλογίες τσιμέντου και παρασκευάζονται αντίστοιχα δοκίμια που υποβάλλονται σε δοκιμές ανθεκτικότητας (υγείας).
- Τα δοκίμια συμπυκνώνονται με τη βέλτιστη υγρασία στη μέγιστη ξηρά πυκνότητα. Μετά από διάστημα συντήρησης (curing) 7 ημερών, τα δοκίμια περνούν 12 κύκλους “ύγρυνσης-ξηράνσης” και στο τέλος της διαδικασίας μετράται η απώλεια βάρους (%).

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

Πίνακας 45. *Αναλογία τσιμέντου για σταθεροποίηση λεπτόκοκκων εδαφών [45]*

Δείκτης ομάδας	Ποσοστό υλικού μεταξύ 0,05-0,005 mm (%)	Αναλογία τσιμέντου (%)					
		Μέγιστη πυκνότητα (t/m ³)					
		1,5÷1,6	1,6÷1,7	1,7÷1,8	1,8÷1,9	1,9÷2,0	> 2,0
0+3	0-19	11	10	8	8	7	7
	20-39	11	10	9	8	8	7
	40-59	12	11	9	9	8	8
	60 και άνω	—	—	—	—	—	—
4+7	0-19	12	11	9	8	7	7
	20-39	12	11	10	9	8	8
	40-59	13	12	10	10	9	8
	60 και άνω	14	12	11	10	9	9
8+11	0-19	13	11	10	9	8	8
	20-39	14	11	10	9	9	9
	40-59	14	12	11	10	10	9
	60 και άνω	15	13	11	10	10	10
12+15	0-19	14	13	12	11	9	9
	20-39	15	13	12	11	10	10
	40-59	16	14	13	12	11	10
	60 και άνω	16	14	13	12	11	11
16+20	0-19	16	14	13	12	11	10
	20-39	17	15	14	13	11	11
	40-59	18	15	14	14	12	12
	60 και άνω	19	16	15	14	13	12

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

- Η απώλεια βάρους και η μείωση όγκου κατά τη δοκιμή ανθεκτικότητας (durability), ανάλογα με την ομάδα κατάταξης του κάθε υλικού δίδονται στον Πίνακα 46.

Πίνακας 46. Δοκιμή ανθεκτικότητας σε σταθεροποιημένα εδάφη

Ομάδα εδάφους	Κατάταξη AASHTO	A-1, A-3, A-2-4, A-2-5	A-2-6, A-2-7	A-6, A-7	A-6, A-7
	Κατάταξη USCS	GF, SF, GW, SW, GP, SP (*)	ML, CI, CL, MH (*)	ML, CI, CL, CH (*)	Pt, OH, OL, CH
	Περιγραφή	Αμμοχαλικώδη και αμμιώδη εδάφη	Γλυώδη εδάφη	Αργιλώδη και αργιλοίλυδα εδάφη	Οργανικά και αργιλικά εδάφη
Επίπτωση σταθεροποίησης στη μηχανική αντοχή	Μεγάλη αύξηση	Αύξηση αντοχής	Περιορισμένη αύξηση	Μικρές επιπτώσεις	
Ελάχιστη απαιτούμενη αντοχή	$R_c \geq 18 \text{ kg/cm}^2$	$R_c \geq 18 \text{ kg/cm}^2$	$R_c \geq 18 \text{ kg/cm}^2$	—	
Μέγιστη επιτρεπόμενη απώλεια όγκου	2%	2%	2%	—	
Μέγιστη επιτρεπόμενη απώλεια βάρους	14%	10%	7%	—	
Ποσοστό τσιμέντου	6-10%	8-12%	10-14%	—	

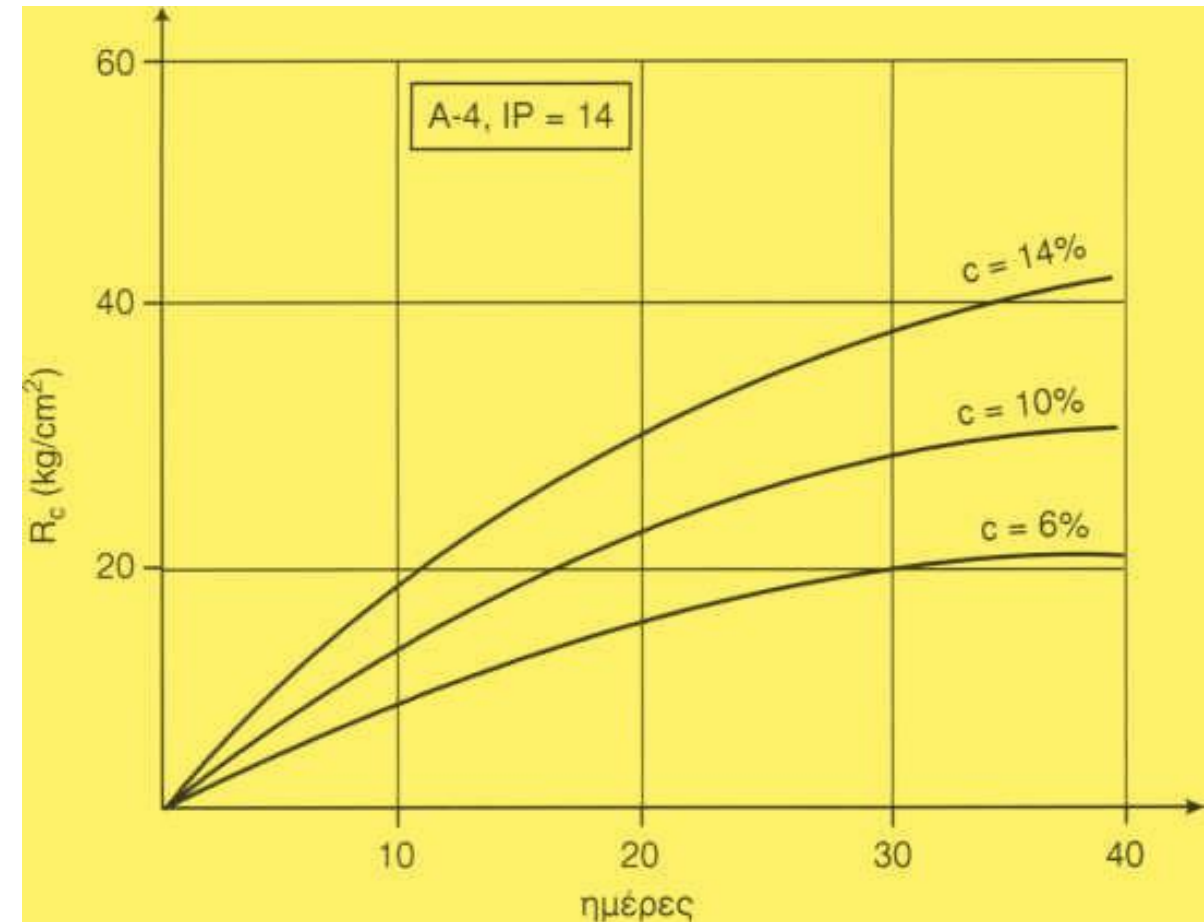
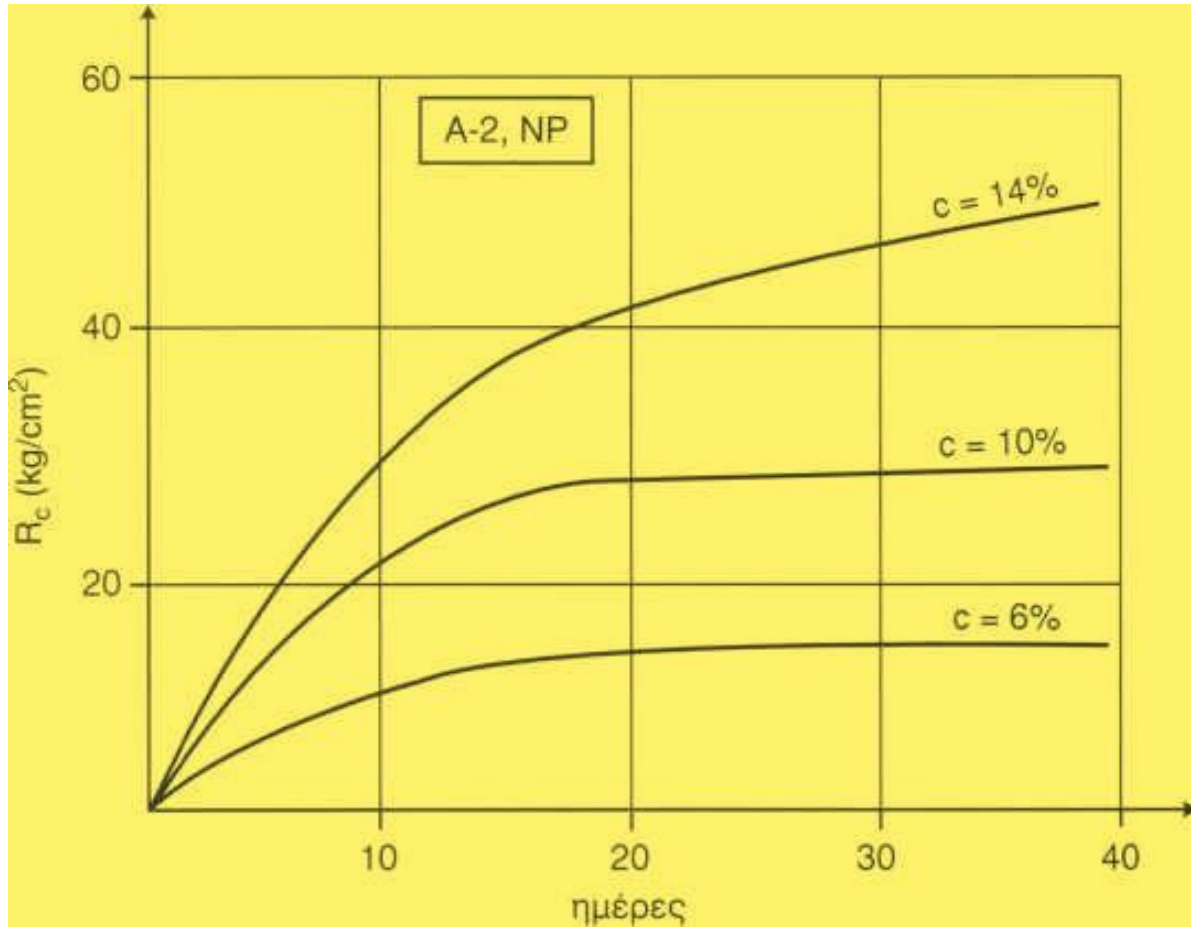
(*) Ως GF συμβολίζεται η ενδιάμεση ομάδα GM/GC, ως CI η ενδιάμεση ομάδα CL/CH

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

- Όταν πρόκειται για σταθεροποίηση εδαφικών υλικών, το σύνολο της διαδικασίας ανάμιξης, αναμόχλευσης, διαβροχής πραγματοποιείται στο εργοτάξιο, επί τόπου του έργου.
- Η διαδικασία της σταθεροποίησης περιλαμβάνει σε πρώτη φάση αναμόχλευση και κονιοποίηση του εδαφικού υλικού.
- Στο στάδιο αυτό χρησιμοποιούνται διαμορφωτές και κοινά γεωργικά μηχανήματα.
- Κατά την εκτέλεση της επεξεργασίας του υλικού απαιτείται η κονιοποίηση να προχωρήσει σε βαθμό ώστε ποσοστό 80% του υλικού τουλάχιστο να διέρχεται από το κόσκινο No 4.
- Σε δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η διάστρωση του τσιμέντου δια χειρός ή μηχανικών μέσων και η ανάμιξη εδάφους-τσιμέντου.
- Η ανάμιξη πραγματοποιείται εν ξηρώ σε στρώσεις 30-60 cm ανάλογα με τη φύση του υλικού, με στόχο να επιτευχθεί πλήρης ομοιογένεια του υλικού.
- Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία ανάμιξης, το υλικό διαβρέχεται και συμπυκνώνεται με οδοστρωτήρες με μεταλλικούς κυλίνδρους ή με ελαστικά.

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

Σχήμα 79. Επίδραση της αναλογίας τσιμέντου στην αντοχή σε θλίψη



11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

- ✓ Είναι ακόμη δυνατό να χρησιμοποιηθούν οδοντωτοί οδοστρωτήρες (κατσικοπόδαρα).
- Η συμπύκνωση πρέπει να πραγματοποιηθεί όσο το δυνατό ταχύτερα, ούτως ώστε η προβλεπόμενη από τις εργαστηριακές δοκιμές τιμή της ξηράς πυκνότητας να επιτευχθεί πριν ολοκληρωθεί η πρώτη φάση των χημικών διεργασιών του τσιμέντου.
- ✓ Τελικό στάδιο της κατασκευής αποτελεί η τελική συμπύκνωση με οδοστρωτήρες με λείους κυλίνδρους που διαμορφώνουν την τελική στάθμη της υπό κατασκευή στρώσης.
- Στο στάδιο αυτό, είναι συνήθως απαραίτητο, η εκτέλεση των εργασιών να συνοδεύεται από ελαφρά διαβροχή.
- Η φάση της συντήρησης (curing time) που ακολουθεί είναι σημαντική για την επιτυχία της κατασκευής.
- Η φάση αυτή διαρκεί από 2-5 ημέρες και κατά τη διάρκειά της θα πρέπει η σταθεροποιημένη στρώση να προστατεύεται από ταχεία εξάτμιση του ύδατος μέσω κατάλληλης προσωρινής επένδυσης (πανιά, λινάτσες).

11.2. Σταθεροποίηση δια τσιμέντου

- ✓ Το μέτωπο εργασίας δεν θα πρέπει να έχει μεγάλο μήκος, ενώ εκ παραλλήλου, απαιτείται, σε κάθε τμήμα της οδού, να ολοκληρώνονται οι εργασίες πριν αρχίσουν στο επόμενο.
- Η συναρμογή μιας νέας με μια προγενέστερη κατασκευή πραγματοποιείται μέσω αρμών εργασίας.
- Η μέθοδος σταθεροποίησης εδαφικών υλικών με τσιμέντο έχει μικρό ενδιαφέρον και ελάχιστη εφαρμογή στην Ελλάδα.
- Η σταθεροποίηση αποτελεί, γενικώς, μια ενδιαφέρουσα και αποτελεσματική τεχνική εκεί όπου τα καλής ποιότητας χονδρόκοκκα εδάφη και τα αδρανή υλικά είναι σπάνια, οπότε η αξιοποίηση υποδεέστερων υλικών είναι, ουσιαστικά, μονόδρομος.
- ✓ Στην Ελλάδα υπάρχουν, στις περισσότερες περιοχές, χονδρόκοκκα υλικά, καλής ποιότητας και ασβεστολιθικής, συνήθως, προέλευσης όπως και άλλα αδρανή υλικά από υγιή πετρώματα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές οδοποιίας.
- Αν επιπλέον ληφθεί υπόψη και το υψηλό κόστος του τσιμέντου, γίνεται κατανοητή η εργοταξιακή πρακτική που έχει απορρίψει τη συγκεκριμένη τεχνική από τον χώρο των κατασκευών οδοποιίας.

11.3. Σταθεροποίηση θραυστών υλικών δια τσιμέντου

- Η επεξεργασία θραυστών υλικών δια τσιμέντου για την κατασκευή βάσεων και υποβάσεων οδοστρωμάτων αποτελεί την περισσότερο διαδεδομένη εφαρμογή χημικής σταθεροποίησης.
- Τα οδοστρώματα με σταθεροποιημένες στρώσεις παρουσιάζουν μία ενδιάμεση συμπεριφορά μεταξύ των εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και ονομάζονται ημιάκαμπτα ή μικτά οδοστρώματα.
- Σε πολλές χώρες τα σταθεροποιημένα θραυστά αμμοχάλικα παίζουν πρωτεύοντα ρόλο από πλευράς κατασκευών οδοποιίας, χρησιμοποιούμενα σε στρώσεις βάσης και υπόβασης οδών με βαριά κυκλοφορία.
- ✓ Ο λόγος είναι ανάλογος με αυτόν που αναφέρθηκε προηγουμένως.
- Η έλλειψη πρώτων υλών και, ενδεχομένως, το υψηλό κόστος των αδρανών οδηγεί στη λύση των σταθεροποιημένων βάσεων και υποβάσεων.
- Κατά τον τρόπο αυτόν, στρώσεις οδοστρωσίας από ασύνδετα αδρανή μεγάλου πάχους ($d = 80-100 \text{ cm}$) υφίστανται κατεργασία με τσιμέντο και η απαίτηση πάχους υποδιπλασιάζεται ($d' = 40-50 \text{ cm}$).

11.3. Σταθεροποίηση θραυστών υλικών δια τσιμέντου

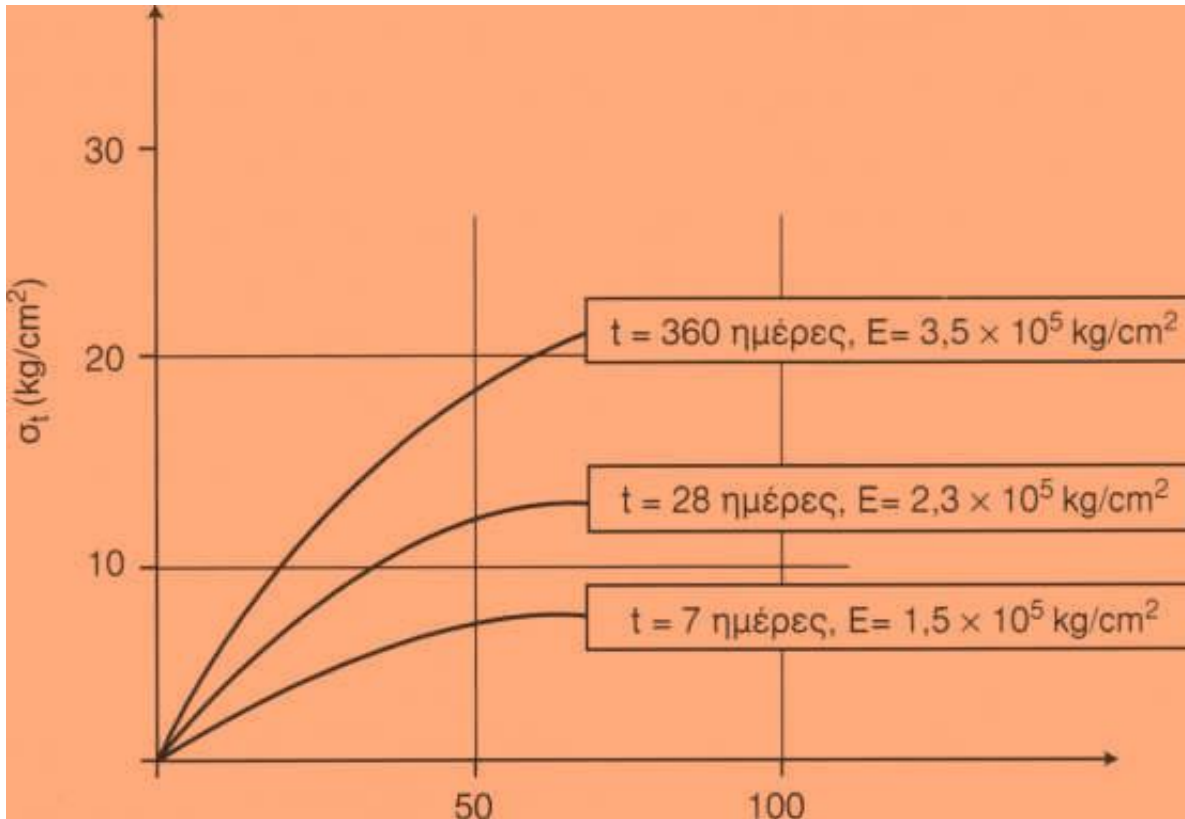


Σχήμα 80. Διατομή ημιάκαμπτου οδοστρώματος [12].

- Ο ασφαλτοτάπητας κυκλοφορίας που τοποθετείται στα οδοστρώματα αυτά, για επαρχιακές και εθνικές οδούς, σπάνια ξεπερνά σε πάχος τα 10 cm.
- Μία αντιπροσωπευτική διατομή κατά τους Γαλλικούς κανονισμούς διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων δίδεται στο Σχήμα 80.
- Σε μια τέτοια δομή το σταθεροποιημένο αμμοχάλικο είναι αποκλειστικός παραλήπτης των εξωτερικών φορτίων, τα οποία κατανέμει και μεταβιβάζει στο έδαφος έδρασης, ενώ ο ασφαλτοτάπητας παραλαμβάνει τις επαφτομενικές τάσεις και προστατεύει τις υποκείμενες στρώσεις από διείσδυση επιφανειακών υδάτων.
- Ο ρόλος που παίζουν οι στρώσεις από σταθεροποιημένα αμμοχάλικα είναι καθοριστικός για τη σωστή λειτουργία του οδοστρώματος και, κατά συνέπεια, επιβάλλεται ο έλεγχος και ο σαφής προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών, ούτως ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα συστηματικής υποδιαστασιολόγησης που παρατηρήθηκαν παλαιότερα.

11.3. Σταθεροποίηση θραυστών υλικών δια τσιμέντου

- Στις σταθεροποιημένες στρώσεις της οδού, βάσεις και υποβάσεις οδοστρωμάτων, αναπτύσσονται στην επιφάνεια έδρασης τους τάσεις εφελκυσμού.
- Ένα χαρακτηριστικό στοιχείο, λοιπόν, μηχανικής αντοχής αποτελεί για τα υλικά των στρώσεων αυτών η αντοχή σε εφελκυσμό. Οι καμπύλες τάσεων- παραμορφώσεων σε δοκιμές άμεσου εφελκυσμού επί δοκιμίων σταθεροποιημένου θραυστού αμμοχάλικου εμφανίζουν έναν έντονα γραμμικό ελαστικό χαρακτήρα (Σχ. 81) για μικρές τιμές της αναπτυσσόμενης τάσης ($\sigma_t < 10 \text{ kg/cm}^2$).



Σχήμα 81. Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων σταθεροποιημένου αμμοχάλικου σε εφελκυσμό.

11.3. Σταθεροποίηση θραυστών υλικών δια τσιμέντου

- Η μηχανική αντοχή σταθεροποιημένων με υδραυλικές κονίες υλικών βάσης και υπόβασης οδοστρωμάτων πρέπει να παρουσιάζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, αντοχής σε εφελκυσμό R_t και μέτρου ελαστικότητας E_t (Πιν. 47).

- Στον Πίνακα 47 δεν γίνεται διάκριση μεταξύ υλικών βάσεων και υποβάσεων. Οι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής είναι ίδιες και για τις δύο στρώσεις.

Υδραυλική κονία		Μηχανικά χαρακτηριστικά σταθεροποιημένης στρώσης	
		R_t (360) MPa*	E_t (360) 10^3 MPa
1	Τσιμέντο, υδραυλική τέφρα	$\geq 1,10$	≤ 40
2	Σκωρίες χαλυβουργίας	$\geq 0,65$	≤ 20
3	Τέφρα και υδράσβεστος	$\geq 1,40$	≤ 45

* 1MPa \approx 10 kg/cm²

Πίνακας 47. Μηχανικά χαρακτηριστικά σταθεροποιημένων θραυστών αμμοχάλικων [37]

11.3. Σταθεροποίηση θραυστών υλικών δια τσιμέντου

- ✓ Προϋποθέσεις σταθεροποίησης με τσιμέντο βάσεων και υποβάσεων οδοστρωμάτων προβλέπουν οι ελληνικοί και διεθνείς κανονισμοί. Το μέγεθος της αντοχής δοκιμίων σταθεροποιημένων υλικών σε θλίψη (R_c) ή σε εφελκυσμό (R_t) χρησιμοποιείται συνήθως στους κανονισμούς αυτούς.
- ✓ Οι ελληνικοί κανονισμοί προβλέπουν αντοχή σε θλίψη $R_{c(7)} \geq 70 \text{ kg/cm}^2$
- ✓ Οι γαλλικοί κανονισμοί για οδοστρώματα του πρωτεύοντος δικτύου ορίζουν αντοχή σε εφελκυσμό $R_t \geq 11 \text{ kg/cm}^2$
- ✓ Οι βρετανικοί κανονισμοί, ανάλογα με την κατηγορία της οδού προβλέπουν:
 - $R_{t(360)} \geq 4.5-27 \text{ kg/cm}^2$
 - Για μίγματα συμβατικών αδρανών με τσιμέντο, υπό συνήθεις αναλογίες θεωρείται ότι $R_{t(360)} = 1,5 R_{t(14)}$.
 - Για μίγματα συμβατικών αδρανών με τσιμέντο, υπό συνήθεις αναλογίες θεωρείται ότι $R_t = 1,5 R_{t(14)}$.
- Το θραυστό αμμοχάλικο που χρησιμοποιείται στην τεχνική της σταθεροποίησης έχει συνήθως μέγιστη διάσταση κόκκων 20 mm και ανταποκρίνεται σε ορισμένες προδιαγραφές κοκκομετρικής σύνθεσης. Η αναλογία του τσιμέντου κυμαίνεται γύρω στο 3,5% ενώ σπάνια ξεπερνά το 5%.

11.3. Σταθεροποίηση θραυστών υλικών δια τσιμέντου

- Η κοκκομετρική διαβάθμιση θραυστών υλικών που προορίζονται για σταθεροποιημένες βάσεις και υποβάσεις δίδεται στον Πίνακα 48 [37].

Πίνακας 48. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών σταθεροποιημένων στρώσεων [37]

Κόσκινα	Διερχόμενο ποσοστό	
	Θραυστό αμμοχάλικο 0/20	Θραυστό αμμοχάλικο 0/14
3/4"	85-100	100
3/8"	55-80	68-90
1/4"	42-66	50-72
No4	32-56	38-60
No10	23-43	26-46
No200	4-10	5-11

11.3. Σταθεροποίηση θραυστών υλικών δια τσιμέντου

- ❖ Η φάση της κατασκευής των σταθεροποιημένων βάσεων και υποβάσεων είναι αρκετά δύσκολη και απαιτεί σοβαρή οργάνωση και μεγάλη προσοχή.
- ❖ Μικρές αποκλίσεις από τον αρχικό σχεδιάσμά ή από τις προδιαγραφές αλλά και θέματα συνθηκών περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία, ο άνεμος και η υγρασία, μπορούν να επιδράσουν σημαντικά και να οδηγήσουν, ενδεχομένως, την κατασκευή σε αστοχία.
- ✓ Ορισμένοι βασικοί κανόνες για την επιτυχία της κατασκευής είναι:
 - Το αδρανές υλικό να είναι καθαρό, απαλλαγμένο από προσμίξεις, οργανικά
 - Η ανάμιξη που γίνεται σε αναμικτήρα μόνιμης εγκατάστασης να είναι πλήρης, με τις σωστές αναλογίες για τα υλικά και τα τυχόν πρόσμικτα (επιβραδυντές) που προβλέπει η μελέτη σύνθεσης
 - Η απόσταση μεταφοράς μέχρι το εργοτάξιο να είναι μικρή
 - Οι θερμοκρασιακές συνθήκες να είναι ήπιες (10-20° C)
 - Η στρώση έδρασης (ΣΕΟ) να μην παρουσιάζει υπερβολικά μεγάλη διαπερατότητα (βραχώδη υλικά επιχωμάτων)
 - Οι σταθεροποιημένες στρώσεις να διαστρώνονται σε πάχος 15-30 cm, αν και το σύνηθες πάχος της στρώσης κυμαίνεται γύρω στα 20 cm
 - Η βέλτιστη φυσική υγρασία να κυμαίνεται μεταξύ 5,5 και 6,5%

11.3. Σταθεροποίηση θραυστών υλικών δια τσιμέντου

- Τα μηχανήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάστρωση είναι ο ισοπεδωτής, ο συνδυασμός προωθητή-ισοπεδωτή, ο διαστρωτήρας σκυροδέματος ολισθαίνοντος τύπου, ο διαστρωτήρας ασφαλτομιγμάτων (φίνισερ)
- Οι εγκάρσιοι αρμοί θα πρέπει να διαμορφώνονται ανά αποστάσεις 4-6 μέτρων στο νωπό μίγμα προ της παρέλευσης 24 ωρών από τη διάστρωση
- Το θέμα της συντήρησης είναι σημαντικό και θα πρέπει να προβλέπονται τα κατάλληλα μέτρα προστασίας της συμπυκνωμένης στρώσης για ένα διάστημα 3-5 ημερών μετά τη διάστρωση.
- ✓ Στην Ελλάδα υπάρχει τεχνική οδηγία (ΕΟΑΕ) για κατεργασμένα θραυστά αμμοχάλικα (ΚΘΑ) που προβλέπει, συνοπτικά, τα εξής [47]:
 - Τα αδρανή θα πρέπει να είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις της προδιαγραφής ΠΤΠ 0-155, διαβάθμιση E, μέγιστου κόκκου $D = 1''$ και αντοχής σε φθορά $LA < 40$
 - Το μίγμα τσιμέντου-αδρανών θα πρέπει, καθοριζόμενο ως προς τις αναλογίες από τη μελέτη σύνθεσης, να εξασφαλίζει $R_c (7) > 7 \text{ MPa}$ ή $R_c (90) > 10,5 \text{ MPa}$
 - Η ελάχιστη αναλογία τσιμέντου να είναι 3,5% κατά βάρος αδρανών

11.3. Σταθεροποίηση θραυστών υλικών δια τσιμέντου

- Διάστρωση και συμπύκνωση του υλικού θα πρέπει να γίνεται ενιαία και μια μόνο φορά για κάθε στρώση. Η συμπύκνωση θα γίνεται μέχρις επίτευξης εργοταξιακής πυκνότητας ίσης προς το 97% της αντίστοιχης μέγιστης εργαστηριακής
- Η συμπύκνωση να γίνεται με δονητικούς οδοστρωτήρες με δονητικό φορτίο μεγαλύτερο από 30 kg/cm περιφέρειας τυμπάνου ή με ελαστικοφόρους οδοστρωτήρες βάρους 3 t ανά τροχό.
- Το έρεισμα του οδοστρώματος συμπυκνώνεται, μαζί με τη σταθεροποιημένη βάση από στατικό οδοστρωτήρα που κινείται εν μέρει επί της επιφάνειας του ερείσματος και εν μέρει επί της σταθεροποιημένης βάσης
- Ο ποιοτικός έλεγχος της ομαλότητας της επιφάνειας της σταθεροποιημένης στρώσης δεν επιτρέπει αποκλίσεις μεγαλύτερες των 15 mm
- Για τη συντήρηση της υπόβασης, εφόσον δεν προβλέπεται άμεσα η κατασκευή της βάσης, γίνεται επάλειψη με ασφαλτικό κατιονικό γαλάκτωμα ($\text{pH} > 4$) σε αναλογία 400 gr/m² και διάστρωση ψηφίδας $d = 14\text{-}20$ mm σε ποσότητα 7-8 lit/m²
- Ανάλογη είναι και η διαδικασία προστασίας και συντήρησης της στρώσης βάσης με τη διαφορά ότι η ασφαλτική επάλειψη (surface dressing) γίνεται με ψηφίδα $d = 4\text{-}6$ mm.
- ✓ Αν και η τεχνική των σταθεροποιημένων οδοστρωμάτων είναι γνωστή και διαδεδομένη στην Ευρώπη εδώ και πολλά χρόνια, ωστόσο, οι πρώτες εφαρμογές των κατεργασμένων θραυστών αμμοχάλικων σε οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμων στην Ελλάδα δεν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Πιθανολογείται ότι η διαδικασία συντήρησης που εφαρμόσθηκε δεν ήταν πλήρης και τεχνικά επιμελημένη και, εξ αυτού, παρατηρήθηκαν σοβαρές αστοχίες στις ολοκληρωμένες κατασκευές.

11.4. Σταθεροποίηση δι' ασφάλτου

- ✓ Η επεξεργασία εδαφικών υλικών με άσφαλτο (bitumen) αποσκοπεί στην αύξηση της μηχανικής αντοχής καθώς και στη μείωση της ποσότητας του ύδατος που απορροφάται από τα λεπτόκοκκα συστατικά του εδάφους.
- Στην πρώτη περίπτωση η αναλογία του συνδετικού που χρησιμοποιείται είναι αισθητά μεγαλύτερη από ό,τι στη δεύτερη.
- Για τα λεπτόκοκκα εδάφη απαιτείται προ της ανάμιξης μια επιμελής κονιοποίηση του υλικού και διάσπαση των συσσωματωμάτων. Το έδαφος δεν πρέπει να εμφανίζει μεγάλη πλαστικότητα $WL < 40$, $IP < 18$, ενώ το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου κυμαίνεται μεταξύ 4% και 8% ανάλογα με το είδος του εδάφους.
- Το λεπτόκοκκο κλάσμα, το διερχόμενο από το No200 μπορεί να φθάνει μέχρι και το 25%.
- Το εδαφικό υλικό πρέπει να περιέχει ελάχιστη ποσότητα υγρασίας ούτως ώστε να εξασφαλίζεται τέλεια ανάμιξη.
- Η εκτέλεση των εργασιών στο εργοτάξιο απαιτεί ειδικευμένο προσωπικό με εμπειρία στη συγκεκριμένη τεχνική.

11.4. Σταθεροποίηση δι' ασφάλτου

- Τα θραυστά αμμοχάλικα τύπου 3A είναι δυνατό να υποστούν επεξεργασία εν θερμώ με άσφαλτο μικρής εισδυτικότητας 40/50 ή 20/30 για να αποτελέσουν υλικά βάσης και υπόβασης οδοστρωμάτων με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο.
- Το θραυστό υλικό πρέπει να έχει μια συνεχή κοκκομετρική καμπύλη και συγκεκριμένα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά [33].
- Η αναλογία του συνδετικού υλικού είναι της τάξης του 4% ενώ το υλικό στην τελική του μορφή έχει αντοχή σε θλίψη $R_c > 40 \text{ kg/cm}^2$.
- Μετά την επεξεργασία σε μόνιμη εγκατάσταση, ανάλογη με εκείνη στην οποία παρασκευάζονται τα ασφαλτικά σκυροδέματα, το υλικό μεταφέρεται με αυτοκίνητα και διαστρώνεται με φίνισερ σε μια θερμοκρασία 135°C ή με ισοπεδωτή όταν πρόκειται για μικρές επιφάνειες.
- Επακολουθεί στη συνέχεια η συμπύκνωση, η οποία πραγματοποιείται με οδοστρωτήρες με ελαστικά ή με δονητικά μηχανήματα συμπύκνωσης.
- Γενικά η τεχνική αυτή δεν εφαρμόζεται σε στρώσεις πάχους μικρότερου των 10 cm, αλλά και σε περίπτωση που απαιτείται στρώση μεγαλύτερου πάχους, 20-25 cm, η διάστρωση εκτελείται ενιαία σε όλο το πάχος.

Ιδιότητα	Βάση	Υπόβαση
Μέγιστη διάσταση κόκκου	D = 20 mm	D = 31 mm
Ισοδύναμο άμμου	SE > 40	SE > 35
Αντοχή σε φθορά	LA < 30	LA < 40
Όρια Atterberg	NP	NP

Πίνακας 49. Χαρακτηριστικά θραυστού αμμοχάλικα για σταθεροποίηση με άσφαλτο

11.4. Σταθεροποίηση δι' ασφάλτου

- **Ανάλογη είναι η τεχνική της επεξεργασίας αμμωδών υλικών με άσφαλτο. Πρόκειται για φυσικά αμμώδη υλικά με υψηλό δείκτη πόρων, τα οποία προ της επεξεργασίας υφίστανται διόρθωση κοκκομετρίας με λεπτότερα συστατικά (άμμο λατομείου).**
- ✓ Τα χαρακτηριστικά των αμμωδών εδαφών που μπορούν να υποστούν τη διαδικασία της σταθεροποίησης δίδονται στον Πίνακα 50.
- Η βέλτιστη αναλογία ασφάλτου για τα αμμώδη εδάφη κυμαίνεται μεταξύ 3% και 4%.
- ✓ Η τεχνική των σταθεροποιημένων με άσφαλτο στρώσεων χρησιμοποιείται για την κατασκευή η ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων και για την ενίσχυση υφιστάμενων οδοστρωμάτων.
- **Πλεονέκτημα της δι' ασφάλτου σταθεροποίησης, και ιδιαίτερα στην περίπτωση χρησιμοποίησης ασφαλικών γαλακτωμάτων, είναι η δυνατότητα εκτέλεσης των εργασιών καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Σε περίπτωση που κατασκευάζονται στρώσεις μικρού πάχους κάτω από ιδιαίτερα βαριές καιρικές συνθήκες, οι εργασίες θα πρέπει να διακόπτονται κατά την περίοδο του χειμώνα.**

Ιδιότητα	Τιμή παραμέτρου
Μέγιστη διάσταση κόκκου	D = 6 mm
Ισοδύναμο άμμου	SE > 40
Όρια Atterberg	NP
Περιεκτικότητα σε οργανικά	< 0,2%

Πίνακας 50. Χαρακτηριστικά αμμωδών εδαφών για σταθεροποίηση με άσφαλτο [33]

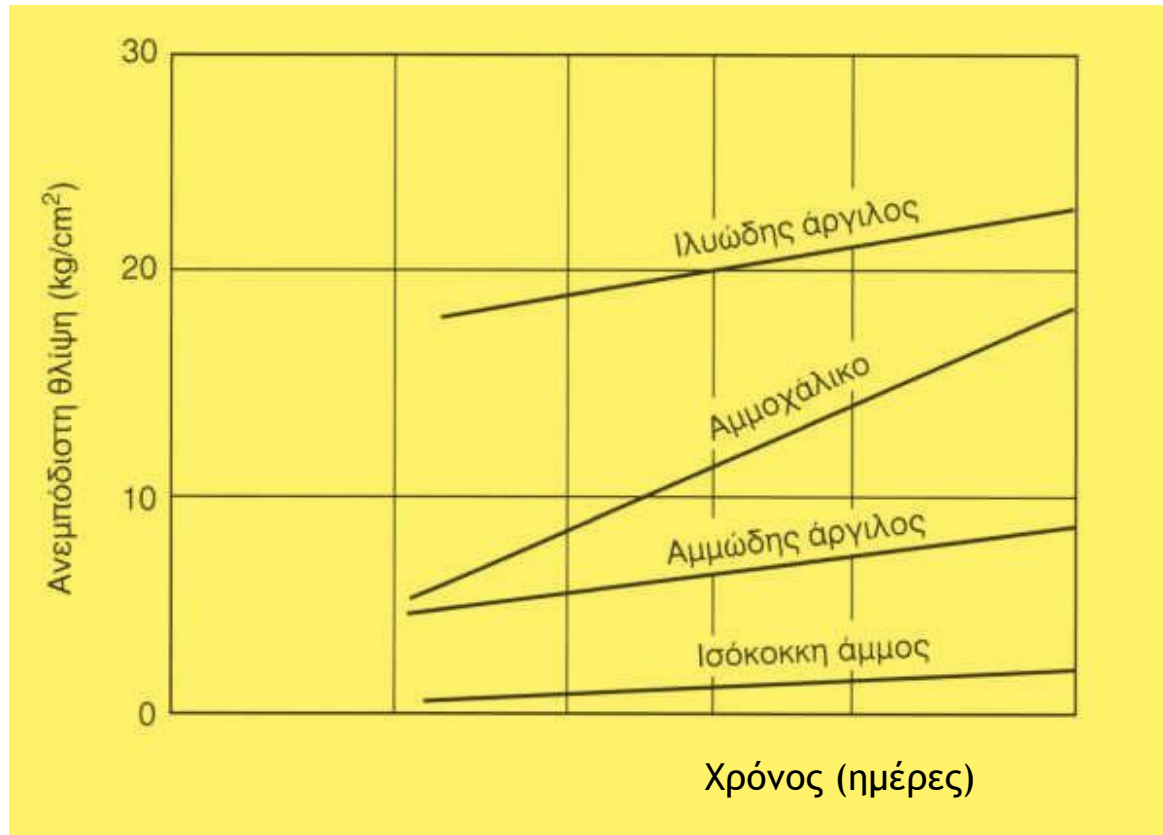
11.5. Σταθεροποίηση με υδρασβεστο

- Η προσθήκη υδρασβέστου (lime) σε ένα έδαφος προκαλεί μείωση της πυκνότητας, μεταβάλλει τα όρια Atterberg και αυξάνει την μηχανική αντοχή. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται σε διάφορες χημικές αντιδράσεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στα μόρια των εδαφικών υλικών παρουσία της υδρασβέστου.
- Η τεχνική αυτή έχει περιορισμένα αποτελέσματα σε χονδρόκοκκο εδάφη τα οποία δεν αντιδρούν στην άσβεστο. Αντίθετα, σε αργιλικά εδάφη η προσθήκη υδρασβέστου βελτιώνει τα χαρακτηριστικά και την ανθεκτικότητα των γεωκατασκευών [39]. Η τεχνική, ωστόσο, θα πρέπει να αποφεύγεται σε περιοχές που παρουσιάζουν κίνδυνο παγοπληξίας.
- Η διάσθρωση και ανάμιξη των υλικών γίνεται επί τόπου με χωματουργικά αλλά και γεωργικά μηχανήματα. Απαραίτητη είναι, προ της ανάμιξης, η επιμελής κατεργασία του εδαφικού υλικού ώστε να διασπασθούν τα κάθε είδους συσσωματώματα αργίλου και να επιτευχθεί η ομογενοποίηση του μίγματος.



Εικόνα 44. Διάσθρωση υδρασβέστου για σταθεροποίηση υλικού επίχωσης [39].

11.5. Σταθεροποίηση με υδράσβεστο



Σχήμα 82. Εξέλιξη της αντοχής μέσα στο χρόνο για μίγματα με 5% υδράσβεστο [45]

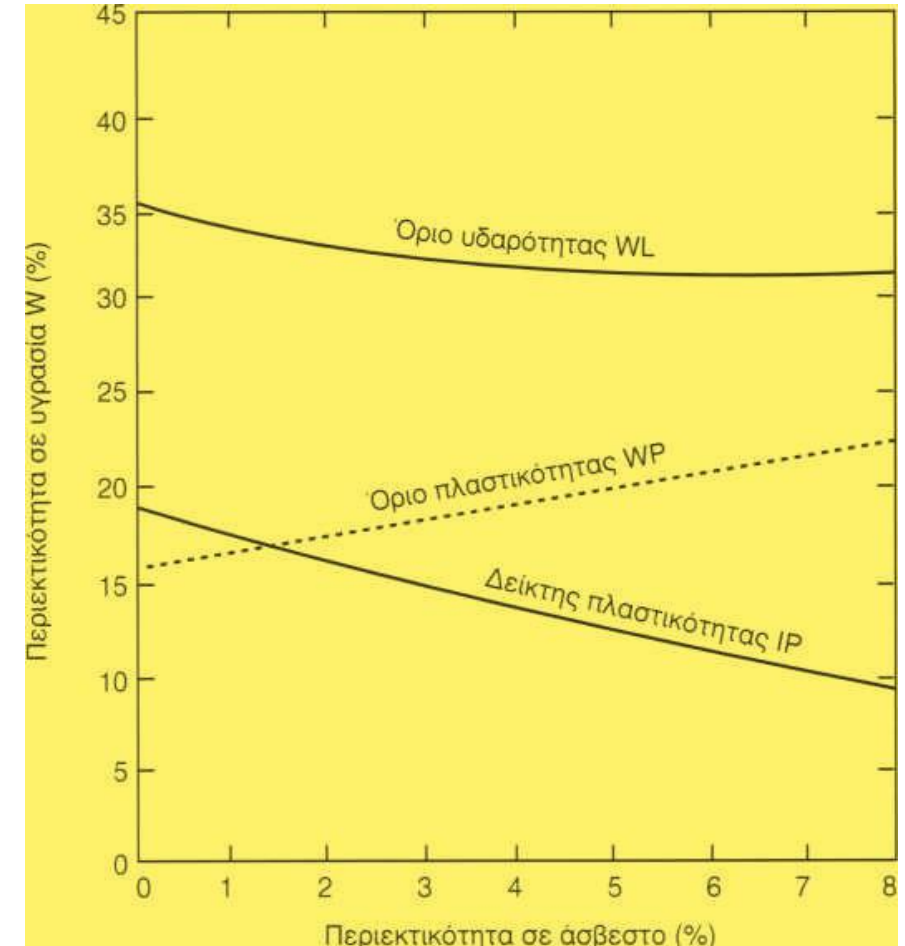
- Η ανάμιξη γίνεται εν ξηρώ και εν συνεχεία προστίθεται ποσότητα ύδατος που αντιστοιχεί στη βέλτιστη φυσική υγρασία κατά Proctor.
- Μετά τη συμπύκνωση της διαμορφωμένης επιφάνειας ακολουθεί περίοδος συντήρησης 5 ημερών, ούτως ώστε το μίγμα να αποκτήσει τα ελάχιστα απαιτούμενα μηχανικά χαρακτηριστικά πριν η στρώση κυκλοφορηθεί.
- Από πλευράς μηχανικής αντοχής, θα πρέπει να τονισθεί ότι η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σταθεροποιημένου με άσβεστο εδάφους ακολουθεί μια βραδεία πορεία, στα περισσότερα εδάφη (Σχ. 82).
- ✓ Οι αντιπροσωπευτικές τιμές της αντοχής σε θλίψη των σταθεροποιημένων εδαφών, για δοκίμια 28 ημερών, είναι $R_c = 5-20 \text{ kg/cm}^2$.
- ✓ Συνήθεις αναλογίες ασβέστου για σταθεροποίηση αργιλικού υπεδάφους κυμαίνονται μεταξύ 5 και 10%. Οι αναλογίες είναι μεγαλύτερες όσο περισσότερο λεπτόκοκκο είναι το έδαφος.

11.5. Σταθεροποίηση με υδράσβεστο

- Για την κατασκευή στρώσεων επιχωμάτων ή για σταθεροποίηση εργοταξιακών οδών, το πάχος της στρώσης από μίγμα “εδάφους-ασβέστου” κατασκευάζεται από 20-50 cm ανάλογα με το είδος του εδάφους, όπως ορίζουν οι προδιαγραφές και για μη σταθεροποιημένες στρώσεις.

α/α	Κατηγορία εδάφους	Ποσοστό υδρασβέστου
1.	Θραυστό αμμοχάλικο	—
2.	Αργιλικό αμμοχάλικο	3%
3.	Καθαρή άμμος	—
4.	Αμμώδης άργιλος	5%
5.	Ιλυώδης άργιλος	2-4%
6.	Πλαστική άργιλος	3-8%
7.	Οργανικό έδαφος	—

Πίνακας 51. Αναλογία υδρασβέστου για διάφορα εδάφη [30]



Σχήμα 83. Επίδραση της ασβέστου στα όρια Atterberg [45].

11.6. Σταθεροποίηση με ιπτάμενη τέφρα

- ✓ Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα βιομηχανικό παραπροϊόν που παράγεται κατά την καύση λιγνιτών και γαιανθράκων σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς.
- ✓ Οι τέφρες των θερμοηλεκτρικών σταθμών παρουσιάζουν υδραυλικές ιδιότητες (ασβεστοθειϊκές τέφρες C) ή πουζολανικές ιδιότητες (αργιλοπυριτικές τέφρες F) και, ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σταθεροποίηση εδαφών και αδρανών υλικών, αλλά ακόμη και με προσθήκη τσιμέντου, για παρασκευή σκυροδέματος.
- Παρουσιάζουν, σε σχέση με τα προαναφερθέντα υλικά σταθεροποίησης, το μεγάλο πλεονέκτημα του μηδενικού κόστους.
- Το Εργαστήριο Οδοποιίας του ΑΠΘ διεξήγαγε μακροχρόνιες έρευνες για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας σε σταθεροποίηση εδαφικών και θραυστών αδρανών υλικών.
- Επιλεκτικά, ορισμένα από τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών δίδονται στον Πίνακα 52.

Ιδιότητα	Έδαφος	Θραυστό αμμοχάλικο
Εφαρμογή στην οδοποιία	Σταθεροποιημένη στρώση έδρασης οδοστρώματος	Σταθεροποιημένη βάση οδοστρώματος
Κατάταξη υλικού	GM – SM	Θραυστό λατομείου
Αρχική φέρουσα ικανότητα	CBR = 12	CBR = 83
Βέλτιστη αναλογία τέφρας	c = 5-10%	c = 6-12%
Αντοχή 7 ημερών	$R_c(7) = 23-32 \text{ kg/cm}^2$	$R_c(7) = 34-70 \text{ kg/cm}^2$
Αντοχή 28 ημερών	$R_c(28) = 30-39 \text{ kg/cm}^2$	$R_c(28) = 66-84 \text{ kg/cm}^2$
Αντοχή σε εφελκυσμό	$R_t(7) = 3-4 \text{ kg/cm}^2$	$R_t(7) = 4-5 \text{ kg/cm}^2$

Πίνακας 52. *Ιδιότητες υλικών σταθεροποιημένων με ιπτάμενη τέφρα*

11.6. Σταθεροποίηση με ιπτάμενη τέφρα

- ✓ Σε ορισμένες περιπτώσεις, για αύξηση της εργασιμότητας των μιγμάτων, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής, ενώ ακόμη υψηλότερες τιμές αντοχής επιτεύχθηκαν σε μίγματα “τέφρας-αδρανών” στα οποία προστέθηκε και ποσοστό 1% κονιοποιημένης σκωρίας.
- Η εργαστηριακή και εργοταξιακή έρευνα κατέγραψε μια απόλυτα θετική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων με τέφρα υλικών οδοποιίας.
- Ως μειονεκτήματα της τεχνικής θα πρέπει να αναφερθούν η μεταβαλλόμενη σύσταση της τέφρας και, σε περίπτωση έργων που απέχουν σημαντικά από τον τόπο παραγωγής, το κόστος μεταφοράς.
- Κατά τα λοιπά, και για το σύνολο των τεχνικών έργων, είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει ένα βιομηχανικό παραπροϊόν που να παρουσιάζει ιδιότητες ανάλογες με εκείνες του τσιμέντου χωρίς η χρήση του να δημιουργεί την οποιαδήποτε οικονομική επιβάρυνση.

11.7. Άλλες τεχνικές σταθεροποίησης

- Εκτός από τις προαναφερθείσες τεχνικές, η χρήση των οποίων καταλαμβάνει στην Οδοποιία το μεγαλύτερο μέρος του πεδίου εφαρμογής, διάφορα άλλα υλικά είναι δυνατό να αναμιχθούν με το έδαφος για να βελτιώσουν τα μηχανικά του χαρακτηριστικά.
- Πρωτόπορα και εντυπωσιακά επιτυχημένη ήταν η εργαστηριακή και πιλοτική έρευνα που διεξήγαγε το Εργαστήριο Οδοποιίας του ΑΠΘ (1993-2003) στη σταθεροποίηση εδαφών με ερυθρά ιλύ. Το πειραματικό οδικό επίχωμα που κατασκευάστηκε στον Αγ. Νικόλαο Βοιωτίας από σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά με ερυθρά ιλύ σε μεγάλη αναλογία (40%) είναι η πρώτη, από ποιοτική άποψη, τεχνική εφαρμογή στο είδος της παγκοσμίως. Δεδομένου ότι πρόκειται για χρήση ενός βιομηχανικού απόβλητου, της ερυθρός ιλύος, το εγχείρημα αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία.
- Χλωριούχα άλατα χρησιμοποιούνται ως παράγοντες διατήρησης της υγρασίας, μειώνοντας την ταχύτητα εξάτμισης του ύδατος σε χονδρόκοκκο υλικά. Τέλος οι σκωρίες υψικαμίνων και χαλυβουργίας σε κονιοποιημένη μορφή μπορούν, σε συνδυασμό με υδράσβεστο ή με τέφρα, να χρησιμοποιηθούν για σταθεροποίηση στρώσεων βάσης και υπόβασης ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων.



Εικόνα 45. Οδικό επίχωμα κατασκευασμένο από ερυθρά ιλύ.

Άλλες τεχνικές σταθεροποίησης



*Εικόνα Γ. Ενίσχυση εδάφους με
ρητίνες και γεωύφασμα.*

Κεφάλαιο 12

12.ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΗΝ

ΟΔΟΠΟΙΙΑ

12.1. Προέλευση γεωσυνθετικών υλικών

- ✓ Τα γεωσυνθετικά υλικά είναι σύγχρονα υλικά ευρείας χρήσεως στην οδοποιία, όπου χρησιμοποιούνται για σταθεροποίηση και ενίσχυση γεωκατασκευών, για υδατοστεγάνωση και προστασία τεχνικών έργων, αλλά και σε ποικίλες άλλες εφαρμογές.
- Η ονομασία των γεωσυνθετικών υλικών προέρχεται από τη σύνθεση των λέξεων γεω- (γη-έδαφος) και -συνθετικό που σημαίνει κάτι το τεχνητό ή το βιομηχανοποιημένο.
- Η πρώτη λέξη (γη) δείχνει τον προορισμό, δηλαδή τα εδάφη, τις γεωκατασκευές και η δεύτερη τη σύσταση των υλικών, από πλαστικά ή πολυμερή προϊόντα.
- Τα βασικότερα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή γεωσυνθετικών υλικών είναι: το πολυαιθυλένιο (PE) υψηλής (HDPE) ή χαμηλής (LDPE) πυκνότητας, το πολυπροπυλένιο (PP), ο πολυεστέρας (PET) και το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC).
- Τα κύρια αυτά υλικά που συνίστανται, κατά κύριο λόγο, από οργανικές ενώσεις, στοιχεία υδρογόνου και ορισμένες φορές, στοιχεία αζώτου και χλωρίου, αποτελούν παράγωγα του άνθρακα και του πετρελαίου
- Στα βασικά χαρακτηριστικά των πολυμερών περιλαμβάνονται η ικανοποιητική αντοχή σε επιμήκυνση υπό θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η δυνατότητα παραμόρφωσης υπό στατικά φορτία ή από ερπυσμό χωρίς ρηγμάτωση, η βαθμιαία μόνο και περιορισμένη μείωση της αντοχής με το χρόνο και, ο ικανοποιητικός χρόνος ζωής σε συνήθεις συνθήκες εδαφικού περιβάλλοντος λόγω αντοχής έναντι χημικής και βιολογικής προσβολής.

12.1. Προέλευση γεωσυνθετικών υλικών

- ✓ Τα πολυμερή υλικά υφίστανται χημική επεξεργασία που τους προσδίδει τραχεία υφή και στη συνέχεια με περαιτέρω επεξεργασία, που περιλαμβάνει τήξη, εξώθηση και περιδίνηση, αποκτούν τελικά τη μορφή με την οποία διατίθενται στο εμπόριο, π.χ. σε ρολά, ταινίες και νήματα.
- Κατά τη διάρκεια της χημικής επεξεργασίας τους προστίθενται ταυτόχρονα στα πολυμερή, διάφορα πρόσμικτα για τη βελτίωση των ασθενέστερων ιδιοτήτων τους, όπως είναι για παράδειγμα η ευπάθειά τους σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις προστίθενται και χρωστικές ουσίες.
- Στην τελική φάση επεξεργασίας τα ημικατεργασμένα προϊόντα μετατρέπονται σε νήματα, ταινίες και υφάσματα, και εισέρχονται στην τελική διαδικασία που περιλαμβάνει την ύφανση, τη ραφή ή και τη συγκόλληση των μεμβρανών όπου αυτό απαιτείται.

Τελικό προϊόν της χημικής επεξεργασίας των πολυμερών αποτελούν :

- τα γεωυφάσματα,
- τα γεωπλέγματα,
- οι γεωμεμβράνες,
- οι γεωκυψέλες,
- τα γεωσύνθετα,
- οι γεωσωλήνες και
- άλλα γεωσυνθετικά υλικά.

Είδη γεωσυνθετικών υλικών



α



β



γ

Σχήμα

α. Αποστραγγιστική μεμβράνη.

β. γεώπλεγμα

γ. γεωκυψέλες

δ. γεώπλεγμα

ε. γεωύφασμα



δ



ε

12.2. Πεδίο εφαρμογής γεωσυνθετικών υλικών

- 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. Η ποικιλία λοιπόν τόσο στους τύπους των γεωσυνθετικών υλικών όσο και στις επιμέρους ιδιότητές τους επιτρέπει την εκμετάλλευσή τους για την εξυπηρέτηση πρόσθετων λειτουργιών, σύμφωνα με επίσημη κατηγοριοποίηση (International Geosynthetic Society) ως εξής:
- Συγκράτηση (containment), για τη συγκράτηση κόκκων εδάφους σε γεωτεχνικά έργα με σκοπό τη διατήρηση συγκεκριμένης γεωμετρίας.
 - Αποστράγγιση (drainage), για τη συλλογή και τη διοχέτευση υπογείων υδάτων σε συγκεκριμένες διαδρομές.
 - Προστασία (protection). Γεωυφάσματα, συνήθως, χρησιμοποιούνται για προστασία γεωμεμβρανών και άλλων ρητινούχων ή ασφαλικών προϊόντων από επιμήκη, κοφτερά αδρανή του υπεδάφους ή της επένδυσης.
 - Όπλιση (reinforcement), για την ενίσχυση της αντοχής του εδάφους, οδοστρωσίας και ασφαλοταπήτων κυρίως μέσω της εφελκυστικής αντοχής των γεωσυνθετικών υλικών.
 - Διαχωρισμός (separation), για την αποφυγή ανάμιξης εδαφικών υλικών διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης.
 - Προστασία έναντι επιφανειακής διάβρωσης (superficial erosion control), για την αποφυγή της αιολικής διάβρωσης και της διάβρωσης εξαιτίας της επιφανειακής απορροής υδάτων.
 - Ακόμα λειτουργούν ως ζώνες διήθησης και προστασίας (filtration), για τη διευθέτηση της ροής των υδάτων εντός του εδάφους με την ταυτόχρονη διατήρηση των εδαφικών κόκκων στη θέση τους.
 - Τέλος, γεωσυνθετικά υλικά (γεωμεμβράνες) χρησιμοποιούνται ως φράγματα (barriers) για την αποφυγή εισροής ή διαφυγής υγρών (π.χ. υπογείων υδάτων) ή αερίων.

12.2. Πεδίο εφαρμογής γεωσυνθετικών υλικών



Εικόνα 46. Γεωκυψέλες για επένδυση πρανούς.

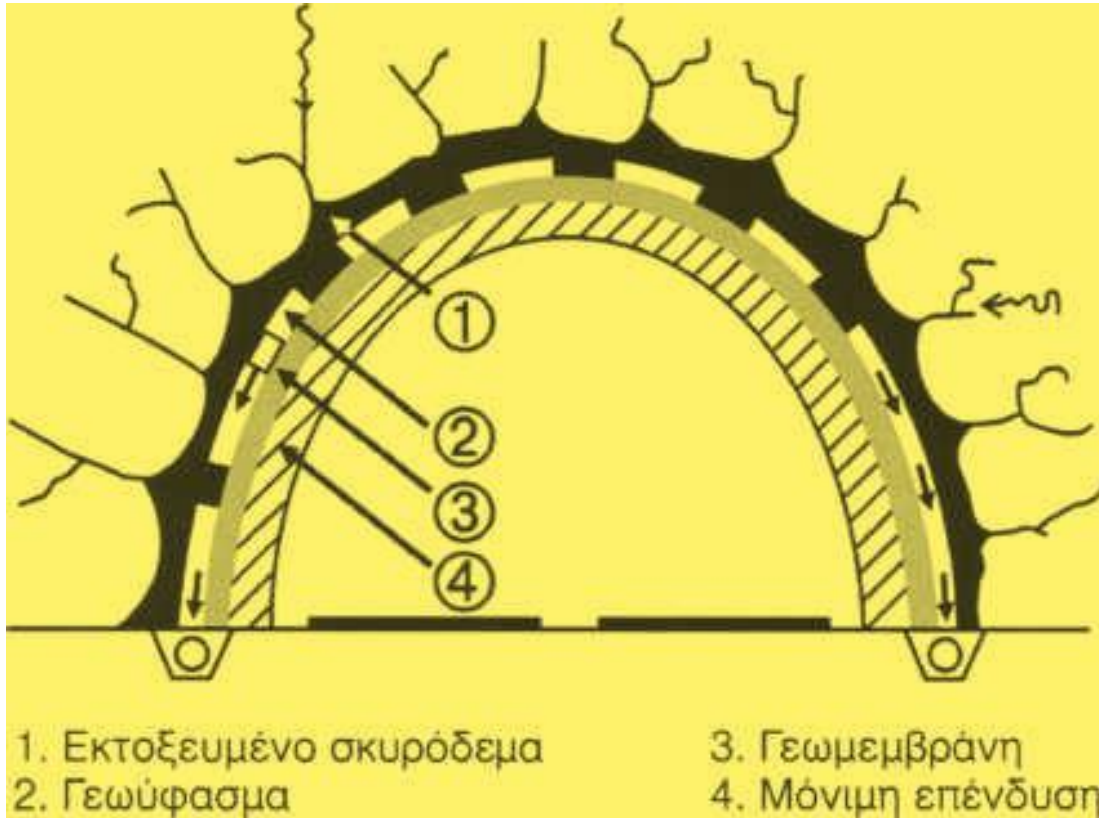
- ✓ Για κάθε συγκεκριμένη λειτουργία επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος γεωσυνθετικού υλικού με σκοπό την αποτελεσματικότερη χρήση του στις διάφορες εφαρμογές.
- Ορισμένα παραδείγματα του πεδίου εφαρμογής των διαφόρων τύπων γεωσυνθετικών υλικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 53.
- Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ειδικά στο χώρο της οδοποιίας, η χρήση γεω-συνθετικών υλικών έχει επεκταθεί και ήδη εφαρμόζονται ευρύτατα σε ενίσχυση στρώσεων οδοστρωσίας και ασφαλτοταπήτων, όπου ασφαλικά γεωπλέγματα ή γεωσύνθετα αυξάνουν την αντοχή και αποτρέπουν τη διάδοση ρωγμών (reflective cracking).

Τύπος	Λειτουργίες					
	Λιαχωρισμός	Όπλιση	Ζώνες διήθησης	Αποστράγγιση	Υδατο-στεγάνωση	Προστασία έναντι διάβρωσης
Γεωύφασμα	**	*	**	**	—	*
Γεωπλέγμα	*	**	—	—	—	*
Γεωδίχτυ	*	—	—	**	—	—
Γεωμεμβράνη	*	*	—	—	**	—
Συνδυασμένα γεωσυνθετικά	*	**	*	*	*	*
Γεωκυψέλες	—	—	—	*	—	**

Πίνακας 53. Πεδία εφαρμογής των διαφόρων τύπων των γεωσυνθετικών υλικών

12.3. Εφαρμογές σε γεωκατασκευές οδοποιίας

❖ α) Αποστράγγιση



1. Εκτοξευμένο σκυρόδεμα
2. Γεωύφασμα

3. Γεωμεμβράνη
4. Μόνιμη επένδυση

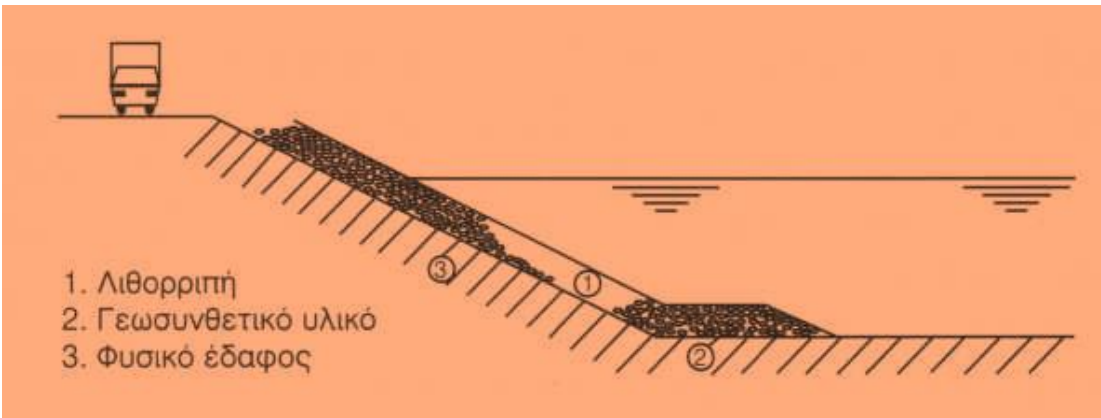
- Οι διάφοροι τύποι γεωυφασμάτων με τις ποικίλες ιδιότητές τους σε ό,τι αφορά την υδατοπερατότητα τους, γνωρίζουν μεγάλη εφαρμογή σε διάφορα έργα οδοποιίας για τη διοχέτευση υπογείων υδάτων σε επιθυμητές πορείες και θέσεις.
- Σε υπόγεια έργα, η τοποθέτηση γεωυφασμάτων δημιουργεί υδραυλική βαθμίδα λόγω της μεγαλύτερης διαπερατότητας που έχει το γεωύφασμα σε σχέση με το έδαφος. Συνήθη πρακτική σε εργασίες υπεδάφιας αποστράγγισης υπογείων έργων (σήραγγων), αποτελεί η χρησιμοποίηση γεωυφασμάτων εξωτερικά από τη μόνιμη επένδυσή τους.
- Ανάμεσα από το γεωύφασμα και τη μόνιμη επένδυση εξοπλισμένου σκυροδέματος τοποθετείται γεωμεμβράνη προστασίας (υδατοστεγάνωση) της επένδυσης της σήραγγας (Σχ. 84).

Σχήμα 84. Γεωσυνθετικά υλικά στην επένδυση σήραγγας.

12.3. Εφαρμογές σε γεωκατασκευές οδοποιίας

❖ β) Προστασία έναντι επιφανειακής διάβρωσης - Συγκράτηση

- Η χρήση γεωσυνθετικών υλικών βρίσκει επίσης εφαρμογή στον τομέα της προστασίας έναντι επιφανειακών διαβρώσεων, όπως, για παράδειγμα, για την προστασία έναντι διάβρωσης της όχθης και της κοίτης ενός καναλιού εξαιτίας της επιφανειακής απορροής υδάτων.
- Υφαντά ή μη υφαντά γεωυφάσματα από πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο και πολυεστέρα αποτελούν τα πλέον κατάλληλα υλικά για τη συγκράτηση των εδαφικών κόκκων της όχθης ώστε να διατηρείται σταθερό το έδαφος σε περίπτωση κατασκευής οδού παραπλεύρως του καναλιού.
- Το γεωσυνθετικό υλικό καλύπτεται συχνά από μια στρώση λιθορριπής με σκοπό να αποτρέπεται η φθορά του από την πτώση λίθων αλλά και η συνεχής έκθεσή του στην ακτινοβολία και τις κλιματικές συνθήκες.
- Η χρήση του σε τέτοιου είδους εφαρμογές παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι το γεωύφασμα διαθέτει ικανοποιητική ελαστικότητα για να διαμορφώνεται, κατά την τοποθέτησή του, ανάλογα με το ανάγλυφο του εδάφους.



Σχήμα 85. Προστασία όχθης καναλιού από διάβρωση.

12.3. Εφαρμογές σε γεωκατασκευές οδοποιίας

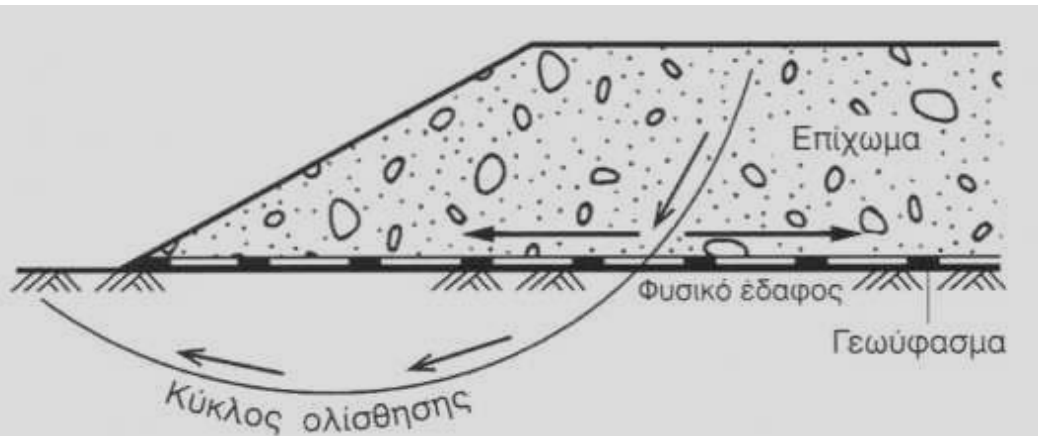
❖ γ) Οπλισμός - Ενίσχυση

- Τα γεωσυνθετικά υλικά που χρησιμοποιούνται για όπλιση εδαφών έχουν ως πρωταρχικό στόχο την αποφυγή της κατάρρευσης και των μόνιμων μεγάλων παραμορφώσεων των διαφόρων γεωτεχνικών κατασκευών.
- Η συμβολή τους στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής των γεωκατασκευών βασίζεται στην παραλαβή μέρους των τάσεων μέσω της εφελκυστικής αντοχής κατά τρόπο ανάλογο με τον χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Η θετική επίδραση της χρήσης τους για όπλιση τεκμηριώνεται από πολλές εφαρμογές, όπως:

12.3. Εφαρμογές σε γεωκατασκευές οδοποιίας

❖ **Θεμελίωση επιχωμάτων σε χαμηλής φέρουσας ικανότητας εδάφη**

- Σε πολλές περιπτώσεις, κατά την κατασκευή επιχώματος σε εδάφη χαμηλής φέρουσας ικανότητας παρεμβάλλονται στρώσεις υφαντού γεωυφάσματος από πολυεστέρα υψηλού μέτρου ελαστικότητας, για την αποφυγή αστοχίας του επιχώματος που μπορεί να προκληθεί από θραύση του υπεδάφους. Ως εκ τούτου, απαιτούνται γεωσυνθετικά υλικά υψηλής εφελκυστικής αντοχής, μικρής επιμήκυνσης και παραμόρφωσης ερπυσμού. Το παρεμβαλλόμενο γεωύφασμα θα πρέπει να εξασφαλίζει ανάπτυξη υψηλής τριβής ανάμεσα στο υπέδαφος και το έδαφος του επιχώματος.



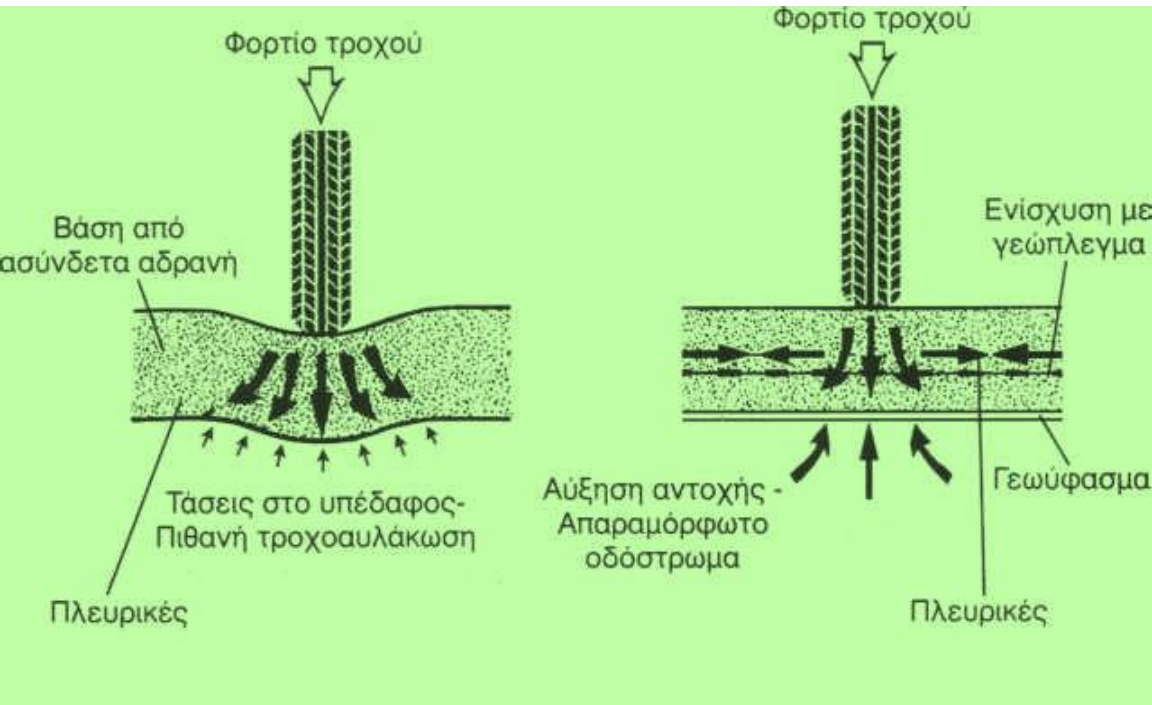
Σχήμα 86. Ενίσχυση επιχώματος επί υπεδάφους χαμηλής αντοχής.

- ✓ Παράλληλα, είναι απαραίτητη η ύπαρξη επαρκούς υδατοπερατότητας ώστε να πραγματοποιείται η στερεοποίηση του υπεδάφους και να μειώνεται η πίεση του νερού των πόρων. Παραλλαγή της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι η τοποθέτηση γεωυφάσματος στην εξυγιαντική στρώση έδρασης του επιχώματος που είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις ιδιαίτερα συμπιεστών και χαλαρών εδαφών.

12.3. Εφαρμογές σε γεωκατασκευές οδοποιίας

❖ Ενίσχυση υπόβασης οδοστρώματος

- Ένας άλλος τομέας εφαρμογής όπου τα γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται ως στοιχεία όπλισης, είναι η ενίσχυση της υπόβασης του οδοστρώματος. Σε έργα συγκοινωνιακής υποδομής τοποθετείται στρώση υφαντού υλικού από πολυεστέρα με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας εντός της υπόβασης, για αύξηση της φέρουσας ικανότητας και ταυτόχρονα μείωση του συνολικού πάχους της (Σχ. 87).

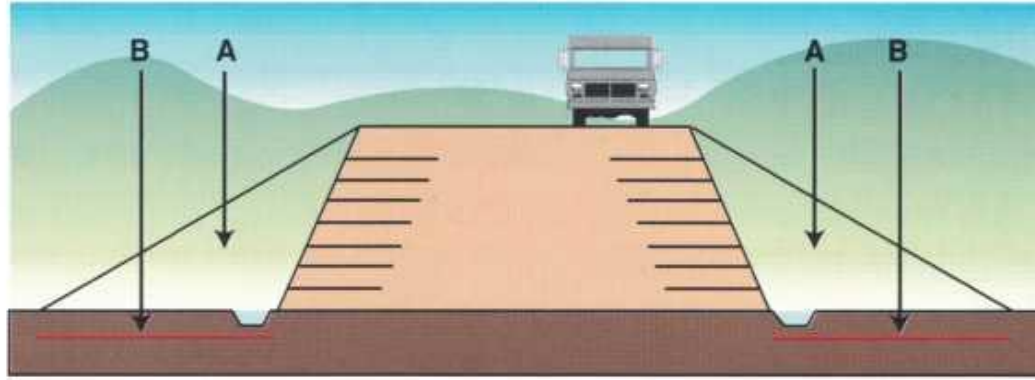


Σχήμα 87. Ενίσχυση υπόβασης οδοστρώματος πάνω σε έδαφος χαμηλής φέρουσας ικανότητας

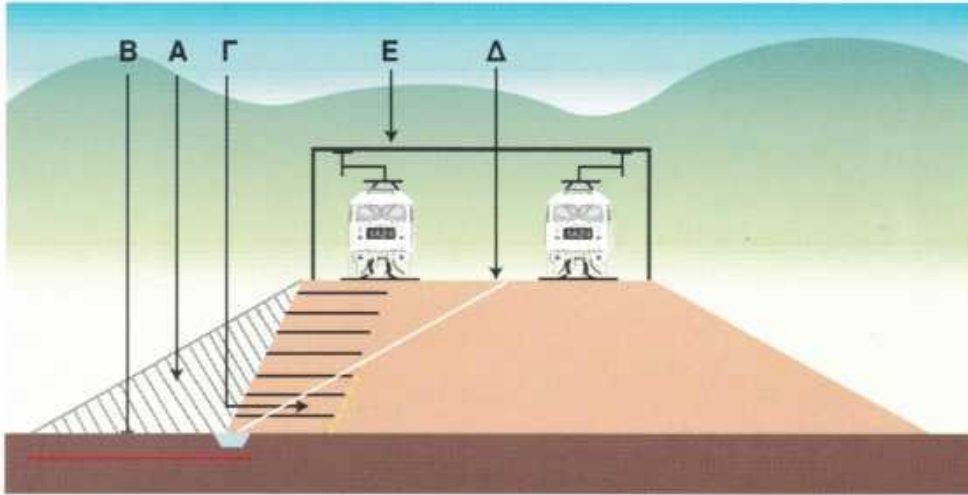
- Σε περίπτωση που το γεωσυνθετικό υλικό βρίσκεται ανάμεσα από στρώματα κοκκωδών εδαφών ενδείκνυται η χρήση γεω- πλέγματος. Το γεώπλεγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνο του είτε σε συνδυασμό με γεωύφασμα.
- Παραλλαγές της τεχνικής αυτής υπάρχουν πολλές. Τα γεωσυνθετικά υλικά μπορούν να τοποθετηθούν στην επιφάνεια της τελικής χωματοουργικών ή και σε ενδιάμεσες στρώσεις οδοστρωσίας. Ανάλογο είναι, σε κάθε περίπτωση, και το είδος του γεωσυνθετικού που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση.

12.3. Εφαρμογές σε γεωκατασκευές οδοποιίας

❖ Οπλισμός επιχώματος απότομων κλίσεων



α. Κατασκευή οδικού επιχώματος σε περιορισμένο εύρος κατάληψης



β. Διαπλάτυνση σιδηροδρομικού επιχώματος

A: Μείωση όγκου υλικών επίχωσης, B: Μείωση εύρους κατάληψης,
Γ: Εκσκαφή, Δ: Αρχικό πρηνές, Ε: Νέα γραμμή

- Γεωσυνθετικά υλικά που λειτουργούν ως στοιχεία όπλισης, έχουν χρησιμοποιηθεί ενσωματωμένα και σε καθορισμένη πυκνότητα στο έδαφος, για την κατασκευή επιχωμάτων με απότομες έως εντελώς κατακόρυφες κλίσεις.
- Η μείωση του εύρους κατάληψης των επιχωμάτων, σε περίπτωση που επιλεγεί η λύση της “όπλισης”, καθιστά την κατασκευή τους ιδιαίτερα ανταγωνιστική, καθώς μειώνεται η έκταση των απαιτούμενων απαλλοτριώσεων (π.χ. σε περιοχές διέλευσης νέων οδών), και ο όγκος των απαιτούμενων υλικών κατασκευής. Αντίστοιχα, τα στοιχεία όψης που χρησιμοποιούνται, στην περίπτωση κατασκευής κατακόρυφων τοίχων στέψης οπλισμένου εδάφους, ικανοποιούν και τους πλέον αυστηρούς περιβαλλοντικούς περιορισμούς.
- Για την όπλιση επιχωμάτων απότομων κλίσεων χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο γεφυφάσματα και γεωπλέγματα.

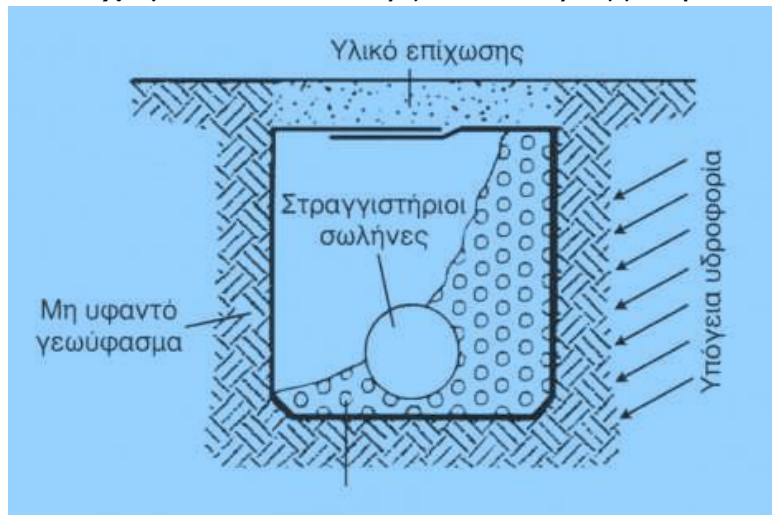
➤ Το θέμα αυτό, λόγω του ενδιαφέροντος που παρουσιάζει για τη σύγχρονη οδοποιία, αναπτύσσεται σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

Σχήμα 88. Οπλισμός επιχώματος απότομων κλίσεων.

12.3. Εφαρμογές σε γεωκατασκευές οδοποιίας



Εικόνα 47. Γεωφάσμα σε θέσεις έδρασης
Επιχώματος και σε έργα αποστράγγισης



Σχήμα 89. Αποστραγγιστική τάφρος.

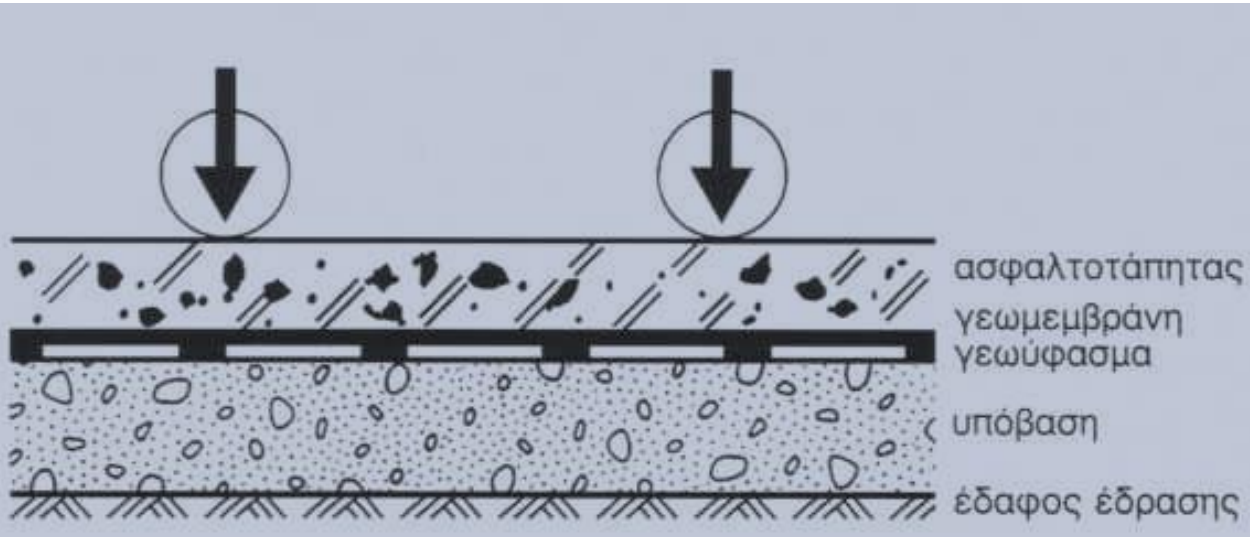
❖ δ) Διαχωρισμός

- Γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται για να αποφευχθεί η ανάμιξη διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών, για παράδειγμα κατά την τοποθέτηση επιχώματος από κοκκώδη υλικά σε υπέδαφος με υψηλό ποσοστό αργιλικών ή σε αποστραγγιστικές τάφρους.
- Κυρίως χρησιμοποιούνται μη υφαντά γεωυφάσματα από πολυεστέρα, πολυαιθυλένιο ή πολυπροπυλένιο, τα οποία παρουσιάζουν επαρκή ελαστικότητα για να μπορούν να ακολουθούν την καθίζηση του φυσικού εδάφους και εξασφαλίζουν την απαραίτητη υδατοπερατότητα και σταθερότητα του έργου.
- Συχνά επίσης, γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται ως φίλτρα καθορισμένης κοκκομετρικής διαβάθμισης για την προστασία έναντι διείσδυσης λεπτόκοκκων εντός επιχωμάτων ή ακόμη και φραγμάτων.

12.3. Εφαρμογές σε γεωκατασκευές οδοποιίας

❖ ε) Προστασία

- Γεωυφάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προστασία γεωμεμβρανών και φύλλων στεγάνωσης (ασφαλτόπανων, κλπ.) που εμφανίζουν κίνδυνο διάτρησης από υποκείμενες ή υπερκείμενες στρώσεις με αιχμηρά αδρανή.
- Η ικανότητα προστασίας, στις περιπτώσεις αυτές, εξαρτάται από την πυκνότητα του γεωυφάσματος και την αντοχή σε διάτρηση. Συνήθως χρησιμοποιούνται μη υφαντά γεωυφάσματα των 400 gr/m^2 κατ' ελάχιστον.
- Η τεχνική αυτή βρίσκει εφαρμογή σε στρώσεις οδοστρωμάτων (Σχ. 90) αλλά και σε δομικές κατασκευές όπως σε οχετούς, γέφυρες, σήραγγες.
- Σημαντικό κατασκευαστικό ζήτημα είναι η συμβατότητα παραμορφωσιμότητας γεωμεμβράνης και γεωυφάσματος που είναι απαραίτητη για την επιτυχία της εφαρμογής.



Σχήμα 90. Γεωύφασμα προστασίας.

12.3. Εφαρμογές σε γεωκατασκευές οδοποιίας

❖ στ) Επένδυση

- Γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται ως επένδυση πρανών για προστασία από επιφανειακή διάβρωση. Φυτικά γεωπλέγματα (jute), γεωυφάσματα και γεωκυψέλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρανή ορυγμάτων και επιχωμάτων, ενώ η τελική επιλογή του υλικού είναι συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της ποιότητας του εδάφους της γεωκατασκευής.

❖ ζ) Στεγάνωση

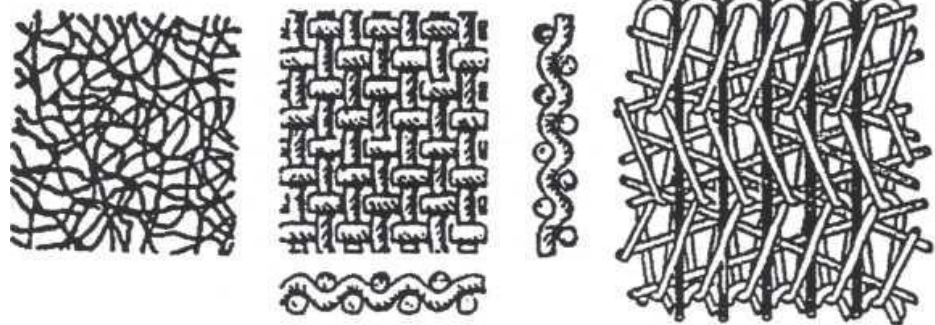
- Η υδατοστεγάνωση είναι συχνά απαραίτητη σε τεχνικές εφαρμογές οδοποιίας, όπως στην τελική επένδυση σηράγγων, σε ασφαλτικά οδοστρώματα, σε προστασία τεχνικών έργων.
 - Οι γεωμεμβράνες, αλλά και ο συνδυασμός γεωμεμβρανών με άλλα γεωσυνθετικά υλικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις περιπτώσεις αυτές.
 - Ακόμη, οι γεωμεμβράνες χρησιμοποιούνται για να αποτρέψουν την κατείσδυση τοξικών ουσιών και να προστατεύσουν υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες όπως, επί παραδείγματι, στις περιπτώσεις χώρων απόθεσης αστικών απορριμμάτων ή βιομηχανικών αποβλήτων.
- Στις εφαρμογές αυτές, συνήθως, οι γεωμεμβράνες χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με γεωυφάσματα που εξασφαλίζουν προστασία έναντι διάτρησης και βελτιώνουν τη συνολική μηχανική αντοχή του προστατευτικού παρεμβλήματος.

12.4. Περιγραφή και ιδιότητες γεωσυνθετικών υλικών

□α) Γεωυφάσματα

- Τα γεωυφάσματα αποτελούνται από βιομηχανοποιημένες συνθετικές ίνες, οι οποίες προέρχονται από διάφορα πολυμερή, συνηθέστερα από το πολυπροπυλένιο και τον πολυεστέρα. Η διάμετρος των ινών ποικίλλει από 10-30 mm, ενώ τα γεωυφάσματα έχουν πάχος από 0,4 έως 3,0 mm και βάρος μεγαλύτερο από 100 gr/m². Είναι προϊόντα σταθερής σύστασης και συμπεριφοράς, μη αποσυντιθέμενα όταν τοποθετούνται σε γαιώδες περιβάλλον.
- ✓ Τα γεωυφάσματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα υφαντά και τα μη υφαντά.
- Τα υφαντά γεωυφάσματα προκύπτουν από μια διασταύρωση δύο κάθετων μεταξύ τους στρωμάτων ινών, με μια διαδικασία επεξεργασίας αντίστοιχη με τον αργαλειό. Λόγω του τρόπου κατασκευής τους είναι ιδιαίτερα ανισότροπα σε σχέση με τα μη υφαντά που παρουσιάζουν σχεδόν ισότροπη συμπεριφορά. Επίσης, κατά την αλληλοδιασταύρωσή τους οι ίνες παίρνουν μια κυματοειδή μορφή, με αποτέλεσμα να έχουν μια αρχική παραμόρφωση.
- Στα μη υφαντά γεωυφάσματα οι ίνες είναι τοποθετημένες ακανόνιστα πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα μια πολύ πιο ισότροπη συμπεριφορά σε σχέση με τα υφαντά. Για την παραγωγή τους χρησιμοποιούνται τεχνικές πολύ πιο σύγχρονες, σε σχέση με τα υφαντά, οι οποίες άρχισαν να αναπτύσσονται στα τέλη της δεκαετίας του 70 για έργα μηχανικού. Τα ελαφρά και μέσου βάρους μη υφαντά γεωυφάσματα αποδεικνύονται εξαιρετικά φίλτρα που επιτρέπουν τη ροή των υπογείων υδάτων, ενώ ταυτόχρονα απαγορεύουν στο περιβάλλον έδαφος να προκαλέσει έμφραξη του συστήματος. Τα βελονωτά μη υφαντά ενδείκνυνται για την ενίσχυση του υπεδάφους σε κατασκευές οδοστρωμάτων, σε κατασκευές αποστραγγιστικών τάφρων και κλινών καθώς και σε διατάξεις αντιδιαβρωτικής προστασίας.

12.4. Περιγραφή και ιδιότητες γεωσυνθετικών υλικών



Σχήμα 91. Απεικόνιση μη υφαντού, υφαντού και μη υφαντού με εν θερμώ συγκολλημένες ίνες γεωφάσματος.



Εικόνα 48. Τοποθέτηση γεωφάσματος σε αγωγό στραγγιστηριού.

12.4. Περιγραφή και ιδιότητες γεωσυνθετικών υλικών

- Ανεξάρτητα από τον τύπο τους, για τη σύνδεση μεταξύ των ινών χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τεχνικές: η τεχνική της θερμοσυγκόλλησης μεταξύ των στρωμάτων ινών που έρχονται σε επαφή με ημιτετηγμένη μορφή (εφαρμόζεται κυρίως σε γεφυφάσματα μικρού και μέσου πάχους), καθώς και η τεχνική της διάνοιξης οπών σε ένα συνεχές στρώμα ινών που είναι τυχαία διατεταγμένες (εφαρμόζεται ως επί το πλείστον σε γεφυφάσματα μεγάλου πάχους).
- Χαρακτηριστικές ιδιότητες των γεφυφασμάτων είναι:
 - το βάρος ανά επιφάνεια, με εύρος τιμών 100-500 gr/m²
 - το πάχος, κυμαινόμενο μεταξύ 0,5 και 7,5 mm
 - το άνοιγμα βροχίδας, συνήθως μεταξύ 0,1 και 0,5 mm η υδατοπερατότητα (transmittivity), $\psi = 0,5-5,0 \text{ sec}^{-1}$.
 - Η κύρια μηχανική ιδιότητα των γεφυφασμάτων είναι η εφελκυστική αντοχή, η οποία και χαρακτηρίζει, ουσιαστικά, το κάθε είδος γεφυφάσματος. Το εύρος των τιμών είναι πολύ μεγάλο, ενώ, για τις εφαρμογές οδοποιίας, οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 2 και 50 kN/m. Σε ειδικές περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται και γεφυφάσματα μεγαλύτερης αντοχής.
- Ακόμη, μηχανικές ιδιότητες που καθορίζουν τον τύπο του γεφυφάσματος είναι:
 - η επιμήκυνση στο όριο διαρροής (elongation at break), $\Delta l = 50-100\%$
 - η αντοχή διάτρησης (static puncture), $SP = 150-500 \text{ N}$
 - η τραπεζοειδής διάτμηση (tear resistance), $TR = 100-500 \text{ N}$.

12.4. Περιγραφή και ιδιότητες γεωσυνθετικών υλικών



Εικόνα 49. Διάστρωση γεωφάσματος σε εξυγιαντική κλίνη.

- ✓ Όλα τα πεδία τιμών που αναφέρονται παραπάνω καλύπτουν συνήθεις εφαρμογές. Ειδικά προϊόντα, ωστόσο, που παράγονται από συγκεκριμένες εταιρείες για εξειδικευμένη χρήση είναι δυνατόν να παρουσιάζουν τιμές των χαρακτηριστικών αυτών εκτός των συνήθων ορίων.
- Τέλος, η αντίσταση σε υπεριώδη ακτινοβολία, που συχνά εκφράζεται ως ποσοστό της παραμένουσας αντοχής μετά από έκθεση 500 ωρών αποτελεί επίσης ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για κάποιες εφαρμογές. Οι αντίστοιχες προδιαγραφές απαιτούν το ποσοστό αυτό να μην είναι μικρότερο από 70%.
- Οι εργαστηριακές δοκιμές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ως άνω χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των γεωφασμάτων περιγράφονται από εθνικές και διεθνείς προδιαγραφές.
- Περισσότερο διαδεδομένες και ευρείας εφαρμογής στην Ελλάδα είναι οι Αμερικανικές προδιαγραφές ASTM (American Standards for Testing Materials).

12.4. Περιγραφή και ιδιότητες γεωσυνθετικών υλικών

- Τα γεωπλέγματα αποτελούν έναν ταχύτατα αναπτυσσόμενο κλάδο των γεω-συνθετικών υλικών.
- Πρόκειται για πολυμερή υλικά, παραγόμενα από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο ή πολυπροπυλένιο, που αποτελούνται από παράλληλες, διατεταγμένες σε κάνναβο ίνες (ribs), με ενδιάμεσα ανοίγματα ικανής απόστασης, ώστε να επιτρέπουν δια μέσου αυτών την αλληλοεμπλοκή των εδαφικών κόκκων.



Εικόνα 50. Φυτικό γεώπλεγμα προστασίας πρανών.

12.4. Περιγραφή και ιδιότητες γεωσυνθετικών υλικών

- Η διαδικασία παραγωγής τους περιλαμβάνει αρχική επεξεργασία σε βαριά φύλλα πολυαιθυλενίου ή πολυπροπυλενίου, πάχους συνήθως από 4 έως 6 mm, τα οποία διατρήονται σε καθορισμένα σχήματα και στη συνέχεια, μέσω θερμικής κατεργασίας εφελκύνονται κατά μήκος ενός ή δύο αξόνων.
- Κατά τη διαδικασία αυτήν ελέγχονται τόσο η θερμοκρασία όσο και οι παραμορφώσεις, ώστε να αποφευχθεί η διαρροή του υλικού στην κατάσταση επιμήκυνσης.
- Εφόσον οι ίνες των γεωπλεγμάτων είναι διατεταγμένες κατά μήκος ενός άξονα, αυτά καλούνται μονοαξονικά (uniaxial), ενώ εάν είναι διατεταγμένες κατά μήκος δύο καθέτων αξόνων καλούνται διαξονικά (biaxial).
- Οι ίνες των γεωπλεγμάτων, επιμήκεις και εγκάρσιες, είναι δυνατό να κατασκευαστούν από μια σειρά διαφορετικών υλικών.
- Τις περισσότερες φορές είναι πιο δύσκαμπτες από τις ίνες των γεωυφασμάτων, ενώ οι συνδέσεις τους γίνονται με μηχανικές ή θερμικές μεθόδους.
- Το κύριο χαρακτηριστικό των γεωπλεγμάτων είναι τα μεγάλα ανοίγματα (apertures), μεγέθους από 10 έως 100 mm και η μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τα γεωυφάσματα.
- Τα γεωπλέγματα βρίσκουν πολλές εφαρμογές στα τεχνικά έργα και ιδιαίτερα στην οδοποιία με βασική όμως λειτουργία την ενίσχυση/όπλιση του εδάφους.
- Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών αποτελούν τα **οπλισμένα επιχώματα στο χώρο των γεωκατασκευών, οι οπλισμένες στρώσεις ασφαλοταπήτων στο χώρο των ασφαλτικών και οι ενισχυμένες στρώσεις έδρασης στο χώρο των οδοστρωμάτων**

12.4. Περιγραφή και ιδιότητες γεωσυνθετικών υλικών

□ Πολλές από τις φυσικές ιδιότητες των γεωπλεγμάτων μπορούν να μετρηθούν σχετικά απλά, όπως η δομή τους, ο τύπος της σύνδεσής τους, το μέγεθος του ανοίγματος (10-70 mm), το πάχος τους (0,5-1,5 mm), το ποσοστό των κενών επιφάνειας που κυμαίνεται από 40 έως 95% και το ειδικό βάρος, που έχει μεγάλο εύρος διακύμανσης (από 200 έως 1000 gr/m²).

□ Μια φυσική ιδιότητα των γεωπλεγμάτων, που είναι ιδιαίτερης σημασίας για την εργασιμότητα τους, είναι η δυσκαμψία (stiffness), που προσδιορίζεται με τη μέθοδο ASTM D1388.

Πρόκειται για ποσοτική μέθοδο προσδιορισμού της δυσκαμψίας των γεωπλεγμάτων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ποιοτικό διαχωρισμό των γεωπλεγμάτων σε δύο τύπους:

- ✓ Τα δύσκαμπτα (stiff) γεωπλέγματα, που κατασκευάζονται κυρίως από πολυαιθυλένιο ή πολυπροπυλένιο και χαρακτηρίζονται από τιμές καμπτικής αντοχής (flexural rigidity) μεγαλύτερες από 1000 gr.cm.
- ✓ Τα εύκαμπτα (flexible) γεωπλέγματα, των οποίων η κατασκευή περιλαμβάνει μια διαδικασία παραγωγής υφάσματος από υλικά όπως ο πολυεστέρας, το νάιλον και οι ίνες γυαλιού (fiberglass).
- ✓ Χαρακτηρίζονται από τιμές καμπτικής αντοχής μικρότερες των 1000 gr.cm.

12.4. Περιγραφή και ιδιότητες γεωσυνθετικών υλικών

❖ Σημαντικές μηχανικές ιδιότητες των γεωπλεγμάτων είναι η εφελκυστική αντοχή (tensile strength), η επιμήκυνση στο όριο θραύσης και η αντίσταση εξόλκευσης.

❖ Οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχής, ανάλογα με τον τύπο του γεω-πλέγματος, προσδιορίζονται κατά τη μία ή κατά τις δύο διευθύνσεις από αντίστοιχες δοκιμές (ASTM D4595) μέσω των οποίων, προσδιορίζονται επίσης, οι αναπτυσσόμενες τάσεις εφελκυσμού σε επιμήκυνση 5% ή 10%, καθώς και η επιμήκυνση στο όριο διαρροής. Αν και το πεδίο τιμών των παραμέτρων αυτών είναι ιδιαίτερα μεγάλο, ωστόσο, στις συνήθεις εφαρμογές παρατηρείται:

- εφελκυστική αντοχή $R_t = 20-400 \text{ kN/m}$
- επιμήκυνση στο όριο διαρροής $\Delta l = 5-15\%$.
- η αντίσταση εξόλκευσης (pullout resistance) προσδιορίζεται εργαστηριακά για κάθε γεώπλεγμα σε συνδυασμό με το έδαφος (τοποθετείται ως ενίσχυση).

Οι τιμές της παραμέτρου αυτής εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του γεωπλέγματος (υφή, πλέξη, άνοιγμα βροχίδας) και από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους.



Εικόνα 51. Τοποθέτηση διαζονικού γεωπλέγματος για ενίσχυση έρματος σιδηροδρομικής γραμμής.

12.4. Περιγραφή και ιδιότητες γεωσυνθετικών υλικών

❖ γ) Γεωμεμβράνες

- Οι γεωμεμβράνες είναι μικρού πάχους συνεχή φύλλα από εύκαμπτα θερμοπλαστικά πολυμερή υλικά. Οι συνηθέστεροι τύποι γεωμεμβρανών κατασκευάζονται από πολυαιθυλένιο (PE) ή χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC).
- Το πάχος, η πυκνότητα, η τραχύτητα και ο δείκτης τήξης (melt index) είναι οι χαρακτηριστικές φυσικές ιδιότητες μιας γεωμεμβράνης. Η εφελκυστική αντοχή και η τραπεζοειδής διάτμηση είναι οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των γεωμεμβρανών.
- Το θέμα των ενώσεων και της συνδεσμολογίας είναι ιδιαίτερα σοβαρό ζήτημα για τη σωστή λειτουργία των γεωμεμβρανών. Ανάλογα με τη σύσταση του υλικού και το έργο για το οποίο προορίζεται η γεωμεμβράνη, εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές ενώσεων, όπως οι θερμικές, οι χημικές ενώσεις και οι συγκολλήσεις. Ιδιαίτερη είναι και η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον ποιοτικό έλεγχο των διαφόρων τύπων ενώσεων γεωμεμβρανών ώστε να είναι εξασφαλισμένη η άρτια λειτουργία τους και η ανθεκτικότητά τους στη διάρκεια ζωής του τεχνικού έργου.

❖ δ. Άλλα γεωσυνθετικά υλικά, όπως οι γεωκυψέλες, τα γεωδίχτυα, οι γεωσωλήνες και τα γεωσύνθετα

- αποτελούν ιδιαίτερες περιπτώσεις, από πλευράς σύστασης και χαρακτηριστικών εφαρμογής. Για τα έργα οδοποιίας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι γεωκυψέλες που χρησιμοποιούνται σε επενδύσεις πρανών και τα γεωσύνθετα, αποτελούμενα από δύο επιμέρους υλικά (π.χ. γεωύφασμα και γεώπλεγμα) που τοποθετούνται σε εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα.