



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΩΣΗ - ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ  
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΣΕΩΝ  
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ**

**ΣΤΕΦΑΝΙΔΗ ΦΙΛΙΩ  
ΚΑΡΑΓΚΟΥΝΗ ΓΛΥΚΕΡΙΑ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΛΟΥΚΙΝΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

**ΠΑΤΡΑ – ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2010**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η γνώση των ιδιοτήτων και της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό της μεγάλης πλειοψηφίας των κατασκευών. Όταν το έδαφος έχει ακριβώς τις ιδιότητες που απαιτούνται από την κατασκευή, τότε οι συνθήκες μπορούν να χαρακτηριστούν ως ιδανικές. Σε αντίθετη περίπτωση, και θεωρώντας ότι ο σχεδιασμός της κατασκευής δεν μπορεί να τροποποιηθεί, πρέπει το υπάρχον εδαφικό υλικό είτε να παρακαμφθεί τελείως, είτε να αντικατασταθεί με άλλο καταλληλότερο, είτε να βελτιωθεί. Οι πιο κοινές μέθοδοι βελτίωσης - ενίσχυσης εδαφών που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα είναι (α) η συμπύκνωση με δονήσεις, (β) η συμπίεση ή στερεοποίηση πριν από την κατασκευή, (γ) η όπλιση με κατάλληλα υλικά και (δ) οι ενέσεις.

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτελεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση του τρόπου βελτίωσης - ενίσχυσης των εδαφών με τη μέθοδο των ενέσεων. Με τον όρο ένεση εννοείται η διοχέτευση, υπό πίεση, ενός ρευστού υλικού στο απαιτούμενο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Το ρευστό υλικό πήζει και σκληρύνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας, την αύξηση της διατμητικής αντοχής, την μείωση της συμπιεστότητας και την μείωση της διαπερατότητας του εδάφους.

Οι κατηγορίες των ενέσεων διαφοροποιούνται, αρχικά, ως προς το αν έχουμε μετατόπιση ή αντικατάσταση του εδάφους. Οι ενέσεις που πραγματοποιούνται χωρίς μετατόπιση ή αντικατάσταση του εδάφους χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, (α) τις ενέσεις εμποτισμού και (β) τις ενέσεις πλήρωσης. Αντίστοιχα, οι ενέσεις που πραγματοποιούνται με μετατόπιση ή αντικατάσταση του εδάφους χωρίζονται σε τέσσερις υποκατηγορίες, (α) τις ενέσεις διάρρηξης, (β) τις ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης, (γ) τις ενέσεις συμπύκνωσης και (δ) τις ενέσεις αποκατάστασης. Οι κατηγορίες των ενέσεων που παρουσιάστηκαν προσφέρουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών βελτίωσης, ωστόσο υπόκεινται σε μια σειρά περιορισμών (φυσικών ή οικονομικών) που καθιστούν, την καθεμία από αυτές, περισσότερο κατάλληλη για συγκεκριμένες εφαρμογές και ακατάλληλη (ή μη συμφέρουσα) για κάποιες άλλες. Οι κυριότερες εφαρμογές των διαφόρων τύπων ενέσεων αφορούν (α) τη μείωση της διαπερατότητας του εδάφους, (β) την κατασκευή αδιαπέρατου

διαφράγματος, (γ) την ενίσχυση εδαφών προς βελτίωση των συνθηκών θεμελίωσης, (δ) την βελτίωση της ευστάθειας τοιχωμάτων εκσκαφών, (ε) την συμπύκνωση εδαφών έναντι ρευστοποίησης, (στ) την ενίσχυση θεμελίωσης υπάρχουσας κατασκευής, (ζ) την ενίσχυση εδαφών προς διάνοιξη σηράγγων και φρεάτων και (η) τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων.

Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, διαφοροποιείται και η μέθοδος ενεμάτωσης. Το ίδιο ισχύει και για την επιλογή του ενέματος, δηλαδή του υλικού το οποίο εισπιέζεται εντός του εδάφους και με την πάροδο του χρόνου πήζει και σκληρύνεται προσδίδοντας στο φυσικό έδαφος τις βελτιωμένες ιδιότητες. Σήμερα διατίθενται διάφοροι τύποι ενεμάτων και ποικιλία υλικών, από τα οποία ο μηχανικός έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τα πλέον κατάλληλα, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις του έργου. Η επιλογή των υλικών γίνεται με βάση τα εξής κριτήρια: α) τη μέθοδο ενεμάτωσης, β) το είδος της εφαρμογής και του φυσικού εδάφους και γ) το κόστος και την ευκολία εφαρμογής. Τα ενέματα, ανάλογα με τον τρόπο σύνθεσής τους, διακρίνονται σε (α) αιωρήματα, σε (β) διαλύματα και (γ) σε κονιάματα.

Τα αιωρήματα παρασκευάζονται με διάχυση των σωματιδίων του υλικού και αιώρηση στο μέσο διασποράς (νερό), τα διαλύματα προκύπτουν με διάλυση του υλικού σε κάποιον ανόργανο ή οργανικό διαλύτη, ενώ τα κονιάματα παρασκευάζονται με μείξη αδρανών υλικών και συγκολλητικής ουσίας. Τα αιωρήματα αποτελούν την πιο οικονομική λύση σε σύγκριση με άλλα ενέματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βελτίωση τόσο της υδραυλικής όσο και της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών. Το ιξώδες αυτών των αιωρημάτων είναι σχετικά υψηλό και αυξάνεται σημαντικά με το χρόνο. Απαιτούνται από λίγες ώρες έως και μερικές ημέρες για να αποκτήσουν ικανοποιητική αντοχή, ενώ έχουν, γενικά, αρκετά μεγάλους χρόνους πήξης. Ενέματα τέτοιου τύπου, εκτός από αιωρήματα τσιμέντου Portland και λεπτόκοκκων τσιμέντων, είναι τα αιωρήματα αργίλου και μπεντονίτη και τα αιωρήματα μείγματος μπεντονίτη–τσιμέντου ή μείγματος ποζολανών–τσιμέντου.

Τα διαλύματα, ανάλογα με τον τύπο του υλικού που χρησιμοποιείται για την παρασκευή τους, διακρίνονται σε πραγματικά διαλύματα και σε κολλοειδή διαλύματα. Τα πραγματικά διαλύματα εμφανίζουν πολύ χαμηλό ιξώδες που

παραμένει σταθερό ως την σκλήρυνση του ενέματος η οποία επέρχεται απότομα (από μερικά δευτερόλεπτα ως μία ώρα). Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι ρητίνες. Από τους διάφορους τύπους ρητινών που προτάθηκαν ως υλικά για ενέσεις εμποτισμού, τα φαινοπλαστικά, τα αμινοπλαστικά, τα πολυμερή και τα πολυμεθυλικά ακρυλικά χρησιμοποιούνται ακόμη, ενώ τα ακρυλαμίδια και τα λιγνοσουλφονικά δεν χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια σε γεωτεχνικές εφαρμογές λόγω της τοξικότητάς τους. Στα κολλοειδή διαλύματα οι κόκκοι των στερεών έχουν μεγαλύτερο μέγεθος από τα μόρια των πραγματικών διαλυμάτων, αλλά μικρότερο μέγεθος από τα στερεά των αιωρημάτων. Η πιο μοντέρνα σύνθεση αυτών των διαλυμάτων έχει ως βάση το πυριτικό νάτριο και προβλέπει κατά κύριο λόγο τη διάλυση πυριτικού νατρίου στο νερό μαζί με έναν ανόργανο ή οργανικό σκληρυντή. Η αντοχή τους εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε πυρίτιο (αύξηση της περιεκτικότητας επιφέρει αύξηση της αντοχής) και τον τύπο του σκληρυντή. Γενικά, τα ενέματα αυτά δεν παρουσιάζουν υψηλές αντοχές και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως για βελτίωση των υδραυλικών χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών.

Τα κονιάματα που χρησιμοποιούνται στις ενεματώσεις του εδάφους είναι συνήθως τσιμεντοκονιάματα, στα οποία ως αδρανές υλικό χρησιμοποιείται λεπτή έως μεσαία άμμος. Χαρακτηρίζονται από υψηλή εσωτερική τριβή και χρησιμοποιούνται για ενεματώσεις συμπύκνωσης ή για την πλήρωση κοιλοτήτων, μεγάλων και ανοικτών ρωγμών καθώς επίσης και κενών (σε κοκκώδη εδάφη). Η τοποθέτηση των κονιαμάτων εντός του εδάφους γίνεται, κυρίως, μέσω βαρύτητας, ενώ η εργασιμότητά τους προσδιορίζεται μέσω δοκιμών κάθισης σε κατάλληλα επιλεγμένους κώνους ροής.

Η οικονομικότητα ενός προγράμματος ενέσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ρυθμό με τον οποίο το υλικό της ένεσης εμποτίζει το έδαφος. Προκαταρκτικές εκτιμήσεις της δυνατότητας πραγματοποίησης ένεσης μπορούν να γίνουν με βάση (α) την κοκκομετρία του εδάφους, (β) τη διαπερατότητα του εδάφους και (γ) το ιξώδες των ενεμάτων. Επομένως, ενέσεις αιωρημάτων δεν είναι δυνατόν να γίνουν σε εδάφη με κοκκομετρία λεπτότερη από χονδρόκοκκες άμμους. Για πιο λεπτόκοκκα υλικά, μέχρι και ιλύες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενέσεις χημικών ουσιών ανάλογα με το ιξώδες τους, ενώ εδάφη με κοκκομετρία αργίλου δεν είναι δυνατόν να

εμποτιστούν από οποιοδήποτε είδος υλικού ένεσης. Επιπλέον, εδάφη με συντελεστή διαπερατότητας ίσο ή μεγαλύτερο του  $10^{-1}$  cm/sec δέχονται ενέσεις αιωρημάτων. Ενέσεις χημικών ουσιών υψηλού ιξώδους μπορούν να εμποτίσουν εδάφη με συντελεστή διαπερατότητας ως  $10^{-3}$  cm/sec ενώ για μικρότερες διαπερατότητες (ως  $10^{-4}$  cm/sec) χρησιμοποιούνται ενέσεις χαμηλού ιξώδους. Εδάφη με διαπερατότητα ίση ή μικρότερη του  $10^{-5}$  cm/sec δεν εμποτίζονται. Επισημαίνεται ακόμη ότι, χονδρόκοκκες άμμοι και χαλίκια εμποτίζονται από ενέσεις αιωρημάτων και χημικών διαλυμάτων με ιξώδες έως 50cp, άμμοι μέσης κοκκομετρικής σύνθεσης εμποτίζονται από αιωρήματα και χημικά διαλύματα με ιξώδες μικρότερο των 15cp, ενώ λεπτόκοκκες άμμοι έως και χονδρόκοκκες ιλύες εμποτίζονται, κυρίως, από διαλύματα με ιξώδες 5cp και 2cp, αντίστοιχα. Πέραν βέβαια των προκαταρκτικών εκτιμήσεων είναι αναγκαίο πριν από την εκτέλεση του κύριου προγράμματος ενέσεων να έχει πραγματοποιηθεί πλήρης γεωτεχνική διερεύνηση και να έχουν εκτελεστεί επιτόπου δοκιμές διαπερατότητας ή ακόμη και δοκιμαστικές ενέσεις.

Για την εκτέλεση ενός προγράμματος ενέσεων απαιτείται ο κατάλληλος εξοπλισμός. Για τις ενέσεις εμποτισμού ο εξοπλισμός αυτός, γενικά, περιλαμβάνει (α) τον εξοπλισμό διάτρησης και έμπηξης, (β) τον εξοπλισμό ανάμειξης και ανάδευσης, (γ) τον εξοπλισμό άντλησης, (δ) τις σωληνώσεις εισπίεσης και τα παρεμβύσματα και (ε) τον εξοπλισμό καταγραφής και ελέγχου. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την εκτέλεση ενέσεων συμπύκνωσης διαφοροποιείται από τον εξοπλισμό των ενέσεων εμποτισμού λόγω της σύστασης και των χαρακτηριστικών του υλικού της ένεσης. Οι συσκευές ανάμειξης και προώθησης του υλικού μοιάζουν περισσότερο με τις χρησιμοποιούμενες για σκυρόδεμα. Οι ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης απαιτούν ειδικό εξοπλισμό που περιλαμβάνει ειδική γεωτρητική κεφαλή εφοδιασμένη με ακροφύσια που εκτοξεύουν οριζόντια νερό και αέρα και προκαλούν διάβρωση-εκσκαφή-κατακερματισμό του εδάφους. Από τα οριζόντια ακροφύσια διοχετεύεται, ακολούθως, υλικό ένεσης που αναμειγνύεται με τους κόκκους του εδάφους και καθώς η γεωτρητική κεφαλή κινείται προς την επιφάνεια του εδάφους δημιουργείται όγκος υλικού με υψηλή αντοχή και χαμηλή διαπερατότητα. Για την εκτέλεση ενέσεων με φλέβα υψηλής πίεσης απαιτείται σιλό τσιμέντου και συγκρότημα παραγωγής ενέματος με δυνατότητα παραγωγής, τουλάχιστον,  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  που περιλαμβάνει αναμεικτήρα βίαιης

ανάμειξης και αναδευτήρα. Επισημαίνεται τέλος, ότι ο εξοπλισμός διαχείρισης των ενεμάτων πρέπει να αντέχει με ασφάλεια τη μέγιστη αναμενόμενη πίεση ενεμάτωσης που πρόκειται να ασκηθεί.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ – ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

1.1	Εισαγωγή.....σελ.	1
1.2	Ιστορική αναδρομή.....σελ.	1
1.3	Μέθοδοι βελτίωσης – ενίσχυσης.....σελ.	4
1.4	Σύνοψη.....σελ.	11

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΕΛΤΙΩΣΗ – ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΕΝΕΣΕΙΣ

2.1	Ορισμός.....σελ.	12
2.2	Ιστορικά στοιχεία – εξέλιξη της μεθόδου.....σελ.	12
2.3	Κατηγορίες των ενέσεων.....σελ.	14
2.4	Κυριότερες εφαρμογές των μεθόδων ενεμάτωσης.....σελ.	17
2.4.1	Ενέσεις εμποτισμού.....σελ.	18
2.4.2	Ενέσεις συμπύκνωσης.....σελ.	21
2.4.3	Ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης.....σελ.	24
2.5	Επιλογή μεθόδων βελτίωσης εδάφους.....σελ.	27

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ – ΥΛΙΚΑ ΕΝΕΣΕΩΝ

3.1	Εισαγωγή.....σελ.	28
3.2	Ιδιότητες, υλικά και εφαρμοσιμότητα των αιωρημάτων.....σελ.	29
3.2.1	Ιδιότητες των αιωρημάτων.....σελ.	30
3.2.2	Υλικά των αιωρημάτων.....σελ.	31
3.2.3	Τυπικές συνθέσεις ενέσεων αιωρημάτων.....σελ.	37
3.3	Ιδιότητες, υλικά και εφαρμοσιμότητα των διαλυμάτων.....σελ.	39
3.3.1	Ιδιότητες των διαλυμάτων.....σελ.	40
3.3.2	Υλικά και σύνθεση των διαλυμάτων.....σελ.	42
3.3.3	Τυπικές συνθέσεις ενέσεων διαλυμάτων.....σελ.	45
3.4	Υλικά και σύνθεση των κονιαμάτων.....σελ.	47
3.5	Διαδικασία και κριτήρια επιλογής κατάλληλου ενέματος.....σελ.	48
3.5.1	Εκτίμηση δυνατότητας πραγματοποίησης ένεσης.....σελ.	49

3.5.2 Γεωτεχνική διερεύνηση.....σελ.	53
3.5.3 Επιτόπου δοκιμές διαπερατότητας.....σελ.	54
3.5.4 Εκτέλεση δοκιμαστικών ενεματώσεων.....σελ.	64

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΣΕΩΝ**

4.1 Εισαγωγή.....σελ.	66
4.2 Ενέσεις εμποτισμού.....σελ.	66
4.2.1 Εξοπλισμός διάτρησης.....σελ.	66
4.2.2 Εξοπλισμός ανάμειξης και ανάδευσης.....σελ.	68
4.2.3 Εξοπλισμός και διαδικασία εισπίεσης.....σελ.	72
4.2.4 Αλληλουχία ενεματώσεων.....σελ.	77
4.2.5 Απαιτήσεις καταγραφών, μετρήσεων και ποιοτικών ελέγχων.....σελ.	79
4.3 Ενέσεις συμπύκνωσης.....σελ.	81
4.3.1 Υλικό ενέματος.....σελ.	81
4.3.2 Εξοπλισμός - σωλήνωση.....σελ.	82
4.4 Ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης.....σελ.	83
4.4.1 Μέθοδοι κατασκευής.....σελ.	84
4.4.2 Εξοπλισμός.....σελ.	88
4.4.3 Στοιχεία σχεδιασμού.....σελ.	91
4.4.4 Ποιοτικοί έλεγχοι των κατασκευασμένων πασσάλων.....σελ.	93

#### **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΙΣΧΥΟΥΣΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΚΕΙΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΝΕΜΑΤΩΣΗΣ.....σελ.**

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ.</b>	<b>101</b>
------------------------------	------------



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ – ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

### 1.1 Εισαγωγή

Η γνώση των ιδιοτήτων και της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό της μεγάλης πλειοψηφίας των κατασκευών. Αυτό συμβαίνει επειδή άλλες κατασκευές θεμελιώνονται πάνω ή μέσα στο έδαφος και άλλες περιλαμβάνουν το έδαφος σαν υλικό κατασκευής (γαιωκατασκευές όπως επιχώματα, τοίχοι αντιστήριξης κα). Όταν το έδαφος έχει ακριβώς τις ιδιότητες που απαιτούνται από την κατασκευή, τότε οι συνθήκες μπορούν να χαρακτηριστούν ως ιδανικές. Επειδή όμως κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει συνήθως, έχουμε να επιλέξουμε ανάμεσα στις ακόλουθες τέσσερις εναλλακτικές λύσεις:

- α) Να παρακάμψουμε τελείως το ακατάλληλο έδαφος (πχ με μεταφορά της κατασκευής σε άλλη θέση ή με εφαρμογή βαθειάς θεμελίωσης)
- β) Να αντικαταστήσουμε το προβληματικό έδαφος με άλλο που έχει τις κατάλληλες ιδιότητες.
- γ) Να τροποποιήσουμε το σχεδιασμό της κατασκευής, ώστε να μειωθούν οι απαιτήσεις.
- δ) Να βελτιώσουμε ή να ενισχύσουμε κατάλληλα το υπάρχον εδαφικό υλικό.

### 1.2 Ιστορική αναδρομή

Όλες οι παραπάνω εναλλακτικές λύσεις έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη έκταση στο παρελθόν, από τα πρώτα ιστορικά ακόμα χρόνια, καθώς ο άνθρωπος αποκτούσε ολοένα και μεγαλύτερη εμπειρία και γνώση, στην προσπάθεια να κατασκευάζει συνεχώς μεγαλύτερες και πιο πρωτοποριακές, χωμάτινες (όπως το χωμάτινο φράγμα Jawa στην Ιορδανία κατασκευασμένο περί το 4000 π.Χ., τα αντιπλημμυρικά αναχώματα της Μέμφιδας στο Νείλο περί το 3000 π.Χ.) ή λίθινες mega-κατασκευές (όπως η Μεγάλη πυραμίδα του Χέοπα περί το 3000 π.Χ. ή το Ζιγκουράτ της πόλης

Ούρ στη Μεσοποταμία περί το 2500π.Χ.). Η εμπειρική αυτή γνώση καταγράφεται σε αρχαίους και νεότερους κατασκευαστικούς κώδικες που διασώζονται, όπως:

- Ο «Οικοδομικός Κανονισμός» του βασιλέα Χαμουραμπί (Βαβυλώνα, 1700 π.Χ.)
- Τα «Δέκα Βιβλία Αρχιτεκτονικής» του Ρωμαίου Βιτρούβιου (25 π.Χ.) με οδηγίες για θεμελιώσεις πάνω ή κάτω από το νερό και αντιστηρίξεις.
- Το Ινδικό εγχειρίδιο «Manasara Shilpashstra» γραμμένο μεταξύ 200 μ.Χ.–700 μ.Χ.
- Ο κινεζικός κανονισμός Sung (1100 μ.Χ.) για θεμελιώσεις και ξύλινες κατασκευές.
- Το αιγυπτιακό εγχειρίδιο «Kitab al Ipadah Wa Tibar» (1200 μ.Χ. – 1300 μ.Χ.) για θεμελιώσεις κάτω από το νερό.
- Τα βιβλία του Γάλλου στρατιωτικού μηχανικού Vauban (1684 μ.Χ.) για την κατασκευή τοίχων αντιστήριξης, με βάση την εμπειρία από την κατασκευή 300 περίπου οχυρωμάτων.

Από τα γραπτά μνημεία και πληροφορίες αλλά και από τις ανακαλύψεις της αρχαιολογικής σκαπάνης, γνωρίζουμε ότι η γνώση, για παράδειγμα, ότι η θεμελίωση πάνω σε βράχο υπερέχει σε σχέση με τη θεμελίωση σε άμμο, έχει ηλικία πολλών χιλιάδων ετών και εφαρμόστηκε ακόμα και στην πυραμίδα του Χέοπα, η θεμελίωση της οποίας έγινε σε ασβεστολιθικές πλάκες που διαστρώθηκαν πάνω στο υποκείμενο βραχώδες υπόστρωμα.

Οι αρχαίοι Έλληνες φρόντιζαν να κατασκευάζουν τα θεμέλια τους σε σταθερό έδαφος, πιθανώς γιατί είχαν κατανοήσει ότι έτσι θα αποφεύγονταν οι διαφορικές μετακινήσεις (πχ στο Ακρωτήρι της Σαντορίνης (1500 π.Χ.) όπου φαίνεται η φροντίδα για γερά θεμέλια, την Ποσειδωνία όπου το βάθος του στερεοβάτη έφτανε τα δύο μέτρα, το Ασκληπιείο της Επιδαύρου με στερεοβάτη βάθους πέντε μέτρων). Από το βάθος έδρασης και το πλάτος των θεμελίων φαίνεται η αναζήτηση του καλού εδάφους και η αναλογία των φορτίων της ανωδομής. Τα στοιχεία αυτά είναι έκδηλα και στο Θησείο, όπου τα πάχη των θεμελίων είναι τέτοια ώστε να αναιρούν την ποικιλότητα του εδάφους, καθώς επίσης και σε ένα ναό στη Δήλο, όπου υπάρχει μια ποικιλία στερεοβατών μέχρι το σταθερό έδαφος. Τα θεμέλια κατασκευάζονταν πάντα από πέτρα καλής

ποιότητας, ενώ υπάρχουν ακόμα και παραδείγματα οπλισμένων θεμελιοδοκών, με παρουσία δηλαδή σιδηροοπλισμού σε όλο το μήκος της θεμελιοδοκού (Θησαυρός των Θηβών στους Δελφούς και στον Ακράγαντα στη Σικελία).

Πανάρχαια θεωρείται επίσης η χρήση πασσάλων στις θεμελιώσεις. Αρχικά, από το 5000 π.Χ. ο άνθρωπος κατασκεύαζε ξύλινες καλύβες πάνω σε πασσάλους εμπηγμένους στον πυθμένα λιμνών, οι οποίοι στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση θεμελιώσεων λίθινων κατασκευών (στο Δισπηλιό, στη λίμνη της Καστοριάς, στη γέφυρα της Αμφιπόλεως στον Στρυμόνα - 5ος αιώνας π.Χ., στο Ναό του Σολωμόντα κ.α.). Οι πάσσαλοι ήταν ξύλινοι με διαμέτρους που ξεκινούσαν από 20cm, κατασκευάζονταν με σιδερένιες αιχμές και τοποθετούνταν σε ομάδες. Μάλιστα από τον 5ο αιώνα π.Χ. η εμπηγή τους γινόταν μηχανικά με γεραμούς και παλάγκα.

Αρκετά προχωρημένη θεωρείται η γνώση των αρχαίων Ελλήνων και στα θέματα της βελτίωσης εδαφών, οι οποίοι εφαρμόζαν εκτεταμένα τη συμπίκνωση και την εξυγίανση του εδάφους. Όπου δεν υπήρχαν δυνατότητες αφαίρεσης του εδάφους κακής ποιότητας, είχαν αναπτύξει αρκετά τον τομέα των βελτιώσεων και η χρήση τροφοδοσίας στερεού υλικού, αμμοχάλικων και πέτρας, ήταν ιδιαίτερα συχνή. Καταγράφεται η περίπτωση της Καρχηδόνας, που όταν καταστράφηκε και χτίστηκε πάνω στα μπάζα της η νέα ρωμαϊκή Καρχηδόνα, οι αρχαίοι "άνοιξαν φρέατα διαμέτρου τριών μέτρων μέσα στα οποία χτίστηκαν λιθοδομές ύψους δέκα μέτρων για να θεμελιώσουν τα μεγαλύτερα φορτία, τουλάχιστον, σε δημόσια κτίρια και σε ναούς. Άλλο παράδειγμα είναι ο ναός της Αρτέμιδος στην Έφεσο ο οποίο είχε κατασκευαστεί πάνω σε ελώδες έδαφος και προκειμένου να αποφευχθεί η υποχώρηση των θεμελίων μιας τόσο μεγάλης μάζας πάνω στο ενδοτικό και ασταθές έδαφος, οι θεμελιώσεις είχαν υπόβαση από συμπυκνωμένο ξυλοκάρβουνο και μαλλί προβάτου από πάνω. Τέλος, περίπτωση βελτίωσης εδάφους συναντάται και στην πολιορκία της νήσου Τύρου, κοντά στη Συρία, κατά την εκστρατεία του Μ. Αλεξάνδρου. Επειδή ο θαλασσινός διάπλους από τη ξηρά προς την πόλη Τύρο ήταν γεμάτος λάσπη, έμπηξαν πασσάλους στον πηλό για να δημιουργηθεί μια φέρουσα ικανότητα και κατόπιν μπάζωσαν με πέτρες και όπλισαν τη λιθορριπή με ξυλεία, δημιουργώντας "ένα μικτό σύστημα από βελτίωση - πασσάλωση για το πέρασμα ενός αρκετά επικίνδυνου αναχώματος".

Τέλος, από τις παλιές εφαρμογές είναι και η χρήση οπλισμού στο έδαφος, την οποία οι πρόγονοί μας προφανώς εμπνεύστηκαν από την ίδια τη φύση, παρατηρώντας για παράδειγμα το ριζικό σύστημα των δέντρων ή τις φωλιές των πουλιών. Η πρώτη καταγεγραμμένη εφαρμογή της μεθόδου είναι η χρήση ινών άχυρου ή μαλλιού στην κατασκευή ωμόπλινθων από άργιλο ή ακόμα και πλεγμάτων από κλαδιά ή καλάμια, ως ενισχυμένη ζώνη (σενάζι) ανάμεσα στις στρώσεις των πλίνθων. Αργότερα, στους ελληνιστικούς και μεταγενέστερους χρόνους, ήταν συχνή η κατασκευή οπλισμένων αναχωμάτων, αντιστηρίξεων, οχυρώσεων με χρήση ξύλινων δοκαριών ή ακόμα και μεταλλικών ελασμάτων ή ράβδων.

Οι περιορισμοί σε ιδανικές φυσικές εκτάσεις και υλικά, σε συνδυασμό με την αλματώδη πρόοδο της επιστήμης και της τεχνολογίας, κυρίως κατά τους τελευταίους δύο αιώνες, επέτρεψαν την ανάπτυξη και εξέλιξη μιας σειράς μεθόδων με τη βοήθεια των οποίων μπορούμε πλέον να ξεπερνάμε τους όποιους περιορισμούς βάζει η φύση στην κατασκευή των τεχνικών έργων, με τη βελτίωση των μηχανικών και υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους. Συνεπώς, ολοένα και κερδίζει έδαφος η τέταρτη κατά σειρά κατασκευαστική λύση, αυτή της βελτίωσης – ενίσχυσης του εδάφους, η οποία έχει αλλάξει εντελώς τη φιλοσοφία του σχεδιασμού των κατασκευών.

### **1.3 Μέθοδοι βελτίωσης - ενίσχυσης**

Κάθε επιτυχημένο πρόγραμμα βελτίωσης – ενίσχυσης του εδάφους πρέπει να ικανοποιεί έναν, ή περισσότερους ταυτόχρονα, από τους ακόλουθους βασικούς στόχους: αύξηση της αντοχής, μείωση της φυσικής υγρασίας, μείωση της διαπερατότητας και μείωση της συμπιεστότητας.

Οι πιο κοινές μέθοδοι βελτίωσης - ενίσχυσης εδαφών που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα είναι οι εξής:

- 1) Συμπύκνωση με δονήσεις με ή χωρίς ταυτόχρονη εκτόπιση εδαφικού υλικού

Συμπύκνωση ονομάζεται η δια μηχανικών μέσων αναδιάταξη του πλέγματος των κόκκων των εδαφικών υλικών σε μία πυκνότερη δομή. Η μακροσκοπική φυσική έκφραση του φαινομένου είναι η αύξηση της πυκνότητας του υλικού. Ως μέθοδος βελτίωσης των χαρακτηριστικών του εδάφους η

συμπύκνωση εντάσσεται, μαζί με τη διόρθωση της κοκκομετρίας εδαφικών και αδρανών υλικών, στις κύριες μεθόδους μηχανικής σταθεροποίησης.

Η συμπύκνωση είναι η πιο παλιά και η πιο σημαντική μέθοδος σταθεροποίησης ενώ, παράλληλα, είναι και η περισσότερο οικονομική από τις εν χρήσει τεχνικές. Τα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρει η συμπύκνωση στις εδαφικές δομές, σε σχέση με τη βραχυχρόνια και μακροχρόνια συμπεριφορά τους, είναι πολλά. Συγκεκριμένα με τη συμπύκνωση βελτιώνεται 1) η παραμορφωσιμότητα και η προκαλούμενη καθίζηση, 2) η διατμητική αντοχή, 3) η διαπερατότητα και 4) η τάση μεταβολής του όγκου.

Η συμπύκνωση επιτυγχάνεται με τους παρακάτω τρόπους:

- α) Δονητικούς οδοστρωτήρες
- β) Εκρήξεις στο εσωτερικό του εδάφους
- γ) Δόνηση στο εσωτερικό του εδάφους
- δ) Πάσσαλους συμπύκνωσης
- ε) Δυναμική συμπύκνωση με κρούσεις στην επιφάνεια του

εδάφους

## 2) Συμπίεση ή στερεοποίηση πριν από την κατασκευή

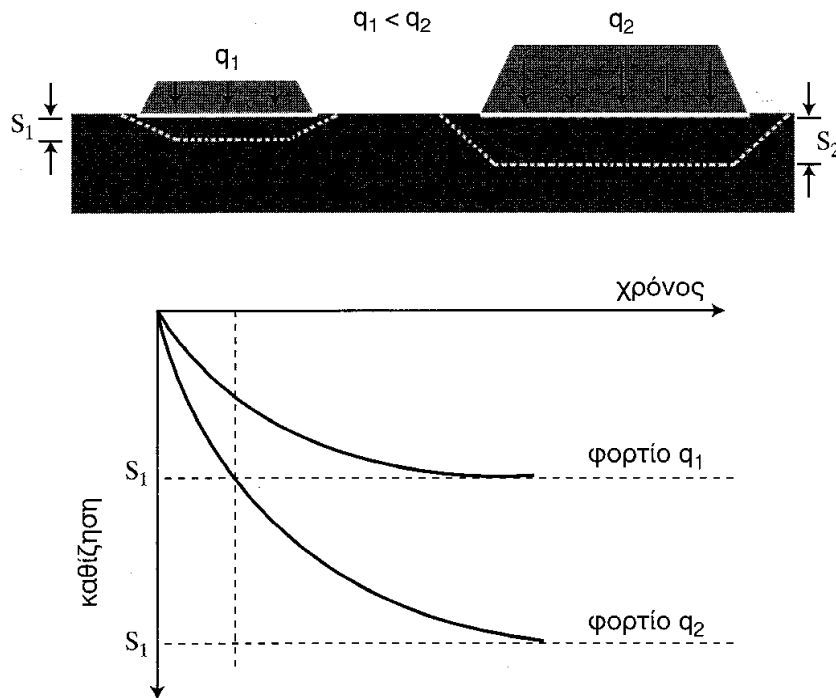
Πραγματοποιείται με τις ακόλουθες τεχνικές:

- α) Προφόρτιση
- β) Υπερφόρτιση
- γ) Αμμοπάσσαλοι
- δ) Δυναμική στερεοποίηση
- ε) Ηλεκτρο - όσμωση

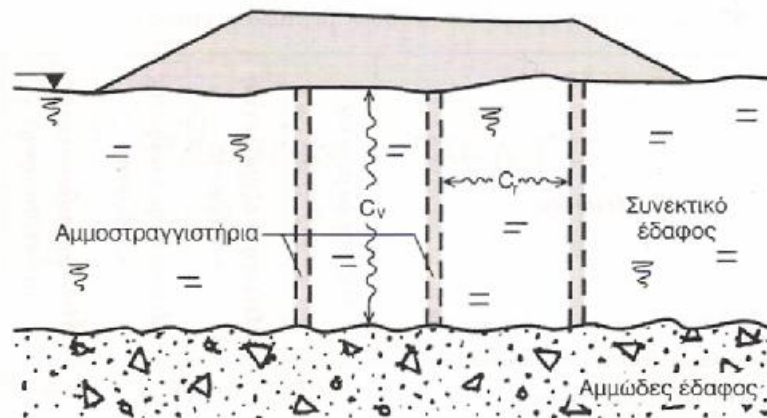
Η προφόρτιση εφαρμόζεται για να επιταχυνθεί η διαδικασία της στερεοποίησης συνεκτικών εδαφών υπό την επίδραση αυξημένου κατακόρυφου φορτίου. Το πρόσθετο φορτίο  $\Delta q$ , συνήθως από εδαφικά ή θραυστά υλικά επί της στέψης του επιχώματος, αφαιρείται στην τελική φάση κατασκευής για να τοποθετηθεί το οδόστρωμα (Βλ. Σχήμα 1.1). Για την εκτέλεση της προφόρτισης απαιτείται προηγουμένως έλεγχος της ευστάθειας του επιχώματος, το οποίο κινδυνεύει να ολισθήσει υπό την επίδραση αυξημένου φορτίου, αν η διατμητική αντοχή του υπεδάφους είναι μικρή.

Η εκτέλεση αμμοστραγγιστηρίων και χαλικοπασσάλων ενδείκνυται για βελτίωση λεπτόκοκκων εδαφών, επιταχύνοντας το φαινόμενο της

στερεοποίησης (Σχήμα 1.2). Κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής η αποστράγγιση εκτελείται προς τα αμμοστραγγιστήρια διανύοντας μικρότερες αποστάσεις.



**Σχήμα 1.1** Βελτίωση υπεδάφους με προφόρτιση



**Σχήμα 1.2** Βελτίωση υπεδάφους με χρήση αμμοστραγγιστηρίων

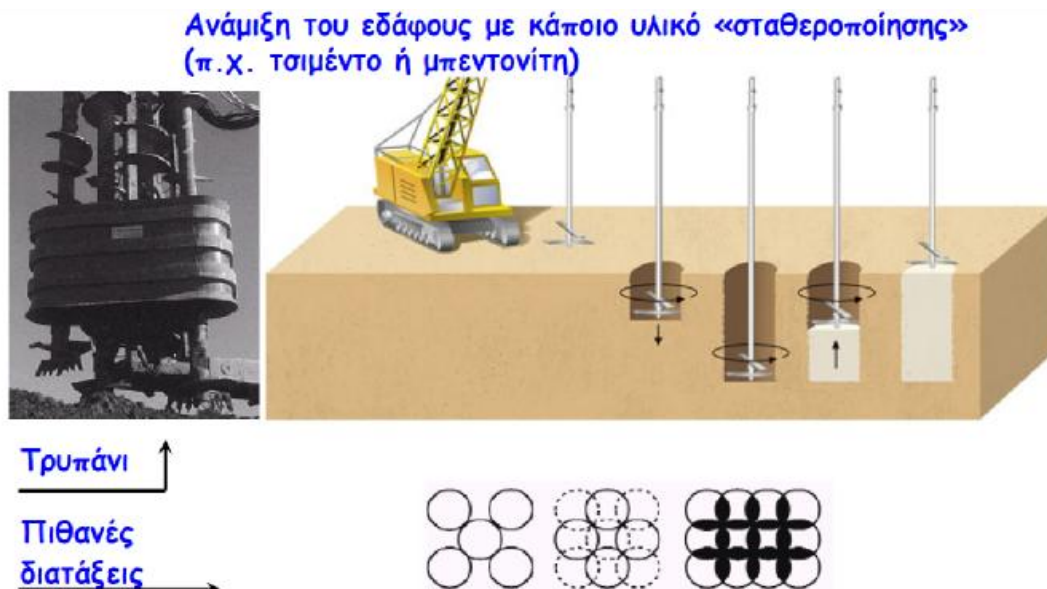
3) Θερμικές διεργασίες

- α) Ξήρανση – Υπερθέρμανση (όπτηση)
- β) Πάγωμα

#### 4) Οπλισμός – Ενίσχυση

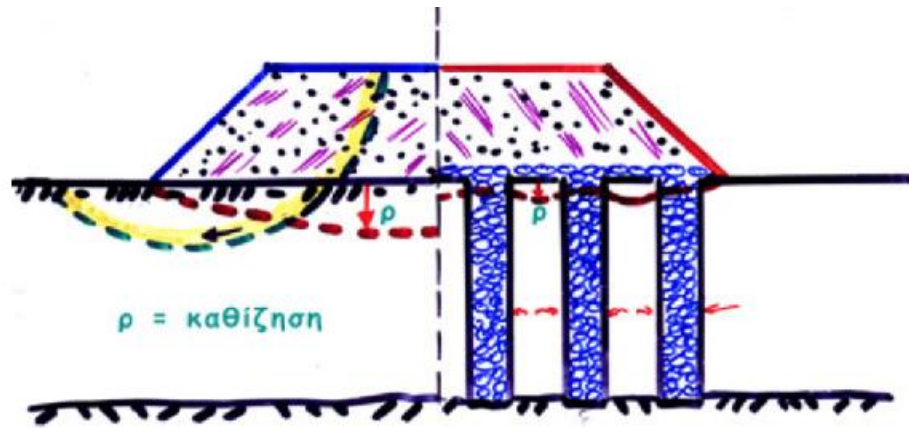
- α) Πάσσαλοι ή διαφράγματα με επιτόπου ανάμειξη του εδάφους με σταθεροποιητικό υλικό
- β) Χαλικοπάσσαλοι
- γ) Οπλισμός με κατάλληλα υλικά (οπλισμένο έδαφος)

Πάσσαλοι ή διαφράγματα κατασκευασμένοι με τη μέθοδο της βαθιάς ανάμειξης (deep mixing) (Σχήμα 1.3) χρησιμοποιούνται για την βελτίωση αντοχής των υποκείμενων μαλακών στρώσεων, στο στάδιο όπου τα αναφερθέντα ανωτέρω μέτρα αδυνατούν να δώσουν την επιθυμητή λύση. Η μέθοδος της βαθιάς ανάμειξης αποσκοπεί στη ταυτόχρονη ανάμειξη τσιμέντου μέσα στο έδαφος, ώστε να αποφευχθούν άλλες εργασίες αλλά και πολύτιμος χρόνος κατά την υλοποίηση της κατασκευής. Γενικώς, η αναφερόμενη μέθοδος συγκαταλέγεται στις δαπανηρότερες και εφαρμόζεται στο στάδιο όπου η έμπηξη των κατακόρυφων πλαστικών στραγγιστηρίων είναι αδύνατη.

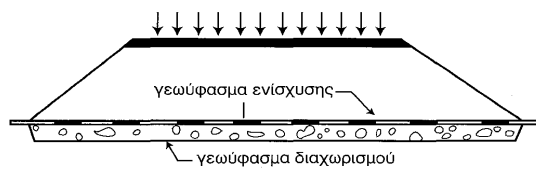
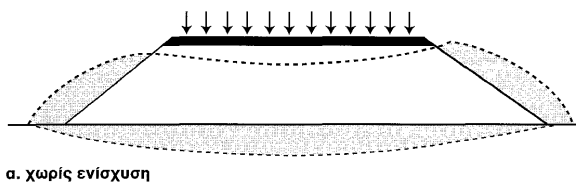
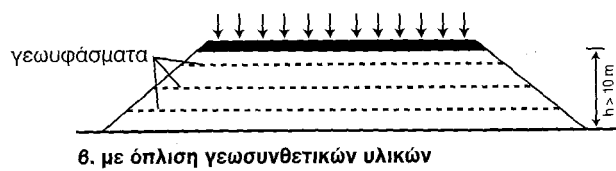
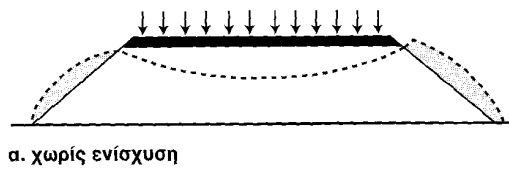
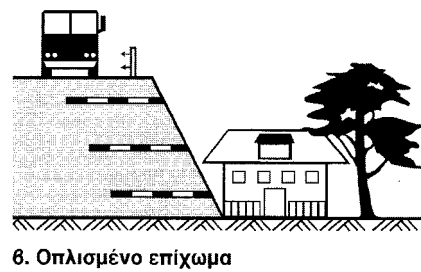


**Σχήμα 1.3** Ενίσχυση υπεδάφους με βαθιά ανάμειξη

Οι χαλικοπάσσαλοι, εκτός από την λειτουργία τους σαν στραγγιστήρια και τη συμβολή τους στην επιτάχυνση της στερεοποίησης, λειτουργούν παράλληλα ως ενίσχυση, παραλαμβάνοντας ένα μέρος του φορτίου και μειώνοντας κατά ένα ποσοστό το μέγεθος της τελικής καθίζησης.



Σχήμα 1.4 Ευεργετική δράση χαλικοπασσάλων



Σχήμα 1.5 Εφαρμογές με οπλισμένο έδαφος



5) Ενέσεις

- α) Κοκκώδη αιωρήματα
- β) Χημικά διαλύματα
- γ) Ενέσεις με εκτόπιση εδαφικού υλικού
- δ) Ηλεκτροκινητικά φαινόμενα

6) Άλλες μέθοδοι

- α) Αντικατάσταση εδάφους
- β) Γεωσυνθετικά υλικά
- γ) Φραγμοί υγρασίας
- δ) Προϋγρανση
- ε) Φέρον πλευρικό επίχωμα

Η μερική ή ολική αντικατάσταση του υπεδάφους εκτελείται πριν αρχίσουν οι εργασίες επιχωμάτωσης με εκσκαφή σε βάθος ανάλογο με το πάχος του συμπιεστού στρώματος και απομάκρυνση του υλικού. Στη συνέχεια, τοποθετείται στη θέση του υγιές υλικό, συνήθως θραυστό λατομείου ή κροκάλες, μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και για τον λόγο αυτόν, η τεχνική αυτή ονομάζεται και εξυγίανση του υπεδάφους.

Τα γεωσυνθετικά υλικά είναι σύγχρονα υλικά ευρείας χρήσεως στην οδοποιία, όπου χρησιμοποιούνται για σταθεροποίηση και ενίσχυση των γεωκατασκευών, για υδατοστεγάνωση και προστασία των τεχνικών έργων, αλλά και σε ποικίλες άλλες εφαρμογές. Κατασκευάζονται από ανθεκτικά πολυμερή υλικά και διακρίνονται σε γεωυφάσματα, γεωπλέγματα, γεωμεμβράνες, γεωκυψέλες, γεωσύνθετα, γεωσωλήνες και άλλα γεωσυνθετικά υλικά. Ο κατάλληλος τύπος γεωσυνθετικού υλικού επιλέγεται για κάθε συγκεκριμένη λειτουργία με σκοπό την αποτελεσματικότερη χρήση του στις διάφορες εφαρμογές. Ορισμένα παραδείγματα του πεδίου εφαρμογής των διαφόρων τύπων γεωσυνθετικών υλικών απεικονίζονται στον παρακάτω Πίνακα 1.1.

Συνοψίζοντας, στον παρακάτω Πίνακα 1.2, παρουσιάζεται η χρησιμότητα διαφόρων μεθόδων βελτίωσης του εδάφους που χρησιμοποιούνται ευρύτατα.

**Πίνακας 1.1** Χρήσεις γεωσυνθετικών υλικών

Τύπος	Λειτουργίες					
	Διαφορισμός	Όπλιση	Ζώνες διήθησης	Αποστράγγιση	Υδατο-στεγάνωση	Προστασία έναντι διάβρωσης
Γεώφρασμα	**	*	**	**	—	*
Γεώπλεγμα	*	**	—	—	—	*
Γεωδίχτυ	*	—	—	**	—	—
Γεωμεμβράνη	*	*	—	—	**	—
Συνδυασμένα γεωσυνθετικά	*	**	*	*	*	*
Γεωκυψέλες	—	—	—	*	—	**

\*\* ευρέως διαδεδομένα, \* συνήθης μέθοδος, -- σπανίως εφαρμόσιμη

**Πίνακας 1.2** Χρησιμότητα των πιο συνηθισμένων μεθόδων βελτίωσης εδάφους

a/a	Μέθοδος	Αύξηση φέρουσας ικανότητας	Μείωση ή εξομάλυνση καθίζησης	Μείωση της διάρκειας καθίζησης	Μείωση πιθανότητας ρευστοποίησης	Βελτίωση ευστάθειας έναντι ολίσθησης
1.	Δονητική συμπίκνωση	**	*	—	**	(*)
2.	Αντικατάσταση δι' εκρηκτικών	*	*	—	(*)	—
3.	Δυναμική συμπίκνωση	**	*	—	**	(*)
4.	Προφόρτιση	*	—	*	—	—
5.	Κατακόρυφα στραγγιστήρια	(*)	*	**	—	(*)
6.	Πλευρικά αναχώματα	—	(*)	—	—	**
7.	Εξυγίανση	(*)	(*)	—	(*)	(*)
8.	Χαλικοπάσσαλοι	**	**	*	*	(*)
9.	Τσιμεντενέσεις	*	*	—	—	*
10.	Διατάξεις γεωσυνθετικών	(*)	*	—	—	(*)

\*\* ευρέως διαδεδομένα, \* συνήθης μέθοδος, -- σπανίως εφαρμόσιμη

## 1.4 Σύνοψη

Από τις προαναφερθείσες μεθόδους βελτίωσης - ενίσχυσης του εδάφους, μόνο αυτή των ενέσεων αποτελεί αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας και παρουσιάζεται αναλυτικά στα κεφάλαια που ακολουθούν. Αυτό σε καμία περίπτωση δε σημαίνει ότι είναι περισσότερο ή λιγότερο σημαντική από τις υπόλοιπες, ή ότι η καθεμία από αυτές χρησιμοποιείται μεμονωμένα και όχι σε συνδυασμό με άλλες. Η καταλληλότητα της κάθε μεθόδου ή των πιθανών συνδυασμών τους, εξαρτάται από τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς του συγκεκριμένου κάθε φορά προβλήματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΒΕΛΤΙΩΣΗ – ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΕΝΕΣΕΙΣ

#### 2.1 Ορισμός

Η χρήση ενέσεων θεωρείται σήμερα μία από τις πλέον διαδεδομένες και αποτελεσματικές μεθόδους για τη βελτίωση των ιδιοτήτων και της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών. Με τον όρο ένεση εννοείται η διοχέτευση, υπό πίεση ενός ρευστού υλικού στο απαιτούμενο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Το υλικό της ένεσης, που είναι είτε αιώρημα στερεών κόκκων σε νερό είτε διάλυμα χημικών ουσιών, εκτοπίζει το νερό των πόρων του εδάφους και πήζει ή στερεοποιείται σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα. Γενικά, με τις ενέσεις επιδιώκεται η αύξηση της διατμητικής αντοχής, η αύξηση της πυκνότητας, η αύξηση της ακαμψίας, η μείωση της συμπιεστότητας, ή η μείωση της διαπερατότητας του εδάφους. Ένα κατάλληλο πρόγραμμα ενέσεων μπορεί (α) να εκτελεστεί σαν μέρος των προκαταρκτικών εργασιών πεδίου πριν από την έναρξη κατασκευής ενός έργου, (β) να αποτελεί τμήμα της κατασκευής του κυρίως έργου, ή (γ) να σχεδιαστεί και να εκτελεστεί σαν “θεραπευτική αγωγή” όταν εμφανίζονται απρόβλεπτες συνθήκες κατά τη διάρκεια κατασκευής ενός έργου.

#### 2.2 Ιστορικά στοιχεία – εξέλιξη της μεθόδου

Ο Γάλλος μηχανικός Charles Berigny θεωρείται ο πρώτος που χρησιμοποίησε ενέσεις για να αντιμετωπίσει προβλήματα υπάρχουσας κατασκευής. Το 1802 χρησιμοποίησε ενέσεις αργίλου και οξειδίων του ασβεστίου για να σταθεροποιήσει λιθόκτιστους τοίχους στο λιμάνι της Διέππης που είχαν χάσει την αντοχή τους επειδή είχε διαβρωθεί το υλικό σύνδεσης των λίθων. Ενέσεις με τσιμέντο Portland χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1838 στη Αγγλία από τον Marc Isambard Brunel κατά την κατασκευή της πρώτης σήραγγας του Τάμεση. Η ανάπτυξη των σιδηροδρομικών δικτύων κατά το πρώτο μισό του περασμένου αιώνα οδήγησε σε ευρεία χρήση τσιμεντενέσεων ιδίως για την επισκευή και την ενίσχυση της θεμελίωσης των βάθρων των σιδηροδρομικών γεφυρών ώστε να αντιμετωπιστούν τα αυξημένα

φορτία των συρμών. Μεταξύ 1900 και 1930, και με πρωτοπόρο τον James Greathead, αναπτύχθηκαν μηχανικά συστήματα και αντλίες ικανά να διοχετεύσουν με υψηλές πιέσεις το υλικό των τσιμεντενέσεων σε μεγάλο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Έτσι λύθηκαν προβλήματα σχετικά με μεγάλα φράγματα που άρχισαν να κατασκευάζονται την εποχή εκείνη και ιδιαίτερα προβλήματα ελέγχου των υπόγειων ροών και ενίσχυσης των αντερεισμάτων των φραγμάτων.

Παράλληλα με την ανάπτυξη και τελειοποίηση της τεχνικής των ενέσεων με αιωρήματα τσιμέντου, εμφανίστηκαν τα πρώτα υλικά ενέσεων με βάση χημικές ουσίες σε μορφή διαλύματος. Το 1887 ο Jeziorsky πήρε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μία μέθοδο ενέσεων “δύο σταδίων” (σε μια γεώτρηση διοχετεύονταν πυκνό πυριτικό νάτριο και σε γειτονική γεώτρηση ένας καταλύτης που προκαλούσε πήξη του ρευστού). Ακολούθησαν προσπάθειες (Lemaire και Dupont περί το 1904 και Francois το 1914) για την ανάπτυξη μεθόδων χημικών ενέσεων “ενός σταδίου” που απέδωσαν όμως μόνο σε περιπτώσεις ελέγχου των υπόγειων ροών. Ο Joosten το 1925 τελειοποίησε τη μέθοδο “δύο σταδίων” με βάση το ένυδρο πυριτικό νάτριο και διεύρυνε το πεδίο εφαρμογής της μέχρι και για εδάφη με κοκκομετρία λεπτής άμμου. Τα τελευταία τριάντα χρόνια αναπτύχθηκε μεγάλος αριθμός χημικών διαλυμάτων με ενέσεις. Πολλά από αυτά έχουν περιορισμένη χρήση ή αποσύρθηκαν από το εμπόριο επειδή περιέχουν ουσίες τοξικές ή γενικά επικίνδυνες για την υγεία και το περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια (από το 1980 περίπου) γίνεται προσπάθεια για τη δημιουργία ανόργανων αιωρημάτων με τέτοια χαρακτηριστικά και ιδιότητες που να αντικαταστήσουν σε ικανό βαθμό τα επικίνδυνα ή ακατάλληλα χημικά διαλύματα.

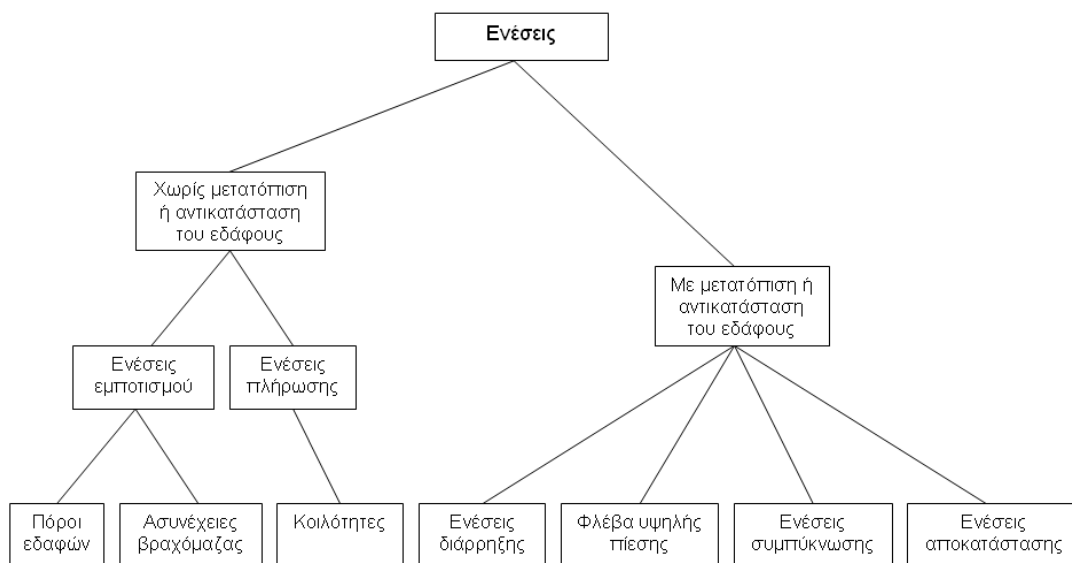
Πέρα από την “κλασική” μέθοδο των ενέσεων, που βασίζεται στη πλήρωση των πόρων (εμποτισμό) ενός εδάφους με κατάλληλο υλικό, έχουν αναπτυχθεί και άλλες τεχνικές που εντάσσονται στην κατηγορία της βελτίωσης εδαφών με ενέσεις. Από αυτές, οι δύο μέθοδοι που έχουν σχετικά ευρεία εφαρμογή είναι οι ενέσεις συμπίκνωσης (compaction grouting) και οι ενέσεις με πίδακα (jet grouting). Η εξέλιξη των ενέσεων συμπίκνωσης άρχισε στα μέσα της δεκαετίας του 1930 όμως η συστηματική της χρήση άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του 1960. έχει εφαρμογή μόνο σε ορισμένους τύπους εδαφών και βασίζεται στη δημιουργία ενός “βολβού” από υλικό ένεσης του οποίου ο όγκος

αυξάνει όσο διοχετεύεται στο έδαφος νέο υλικό ένεσης υπό υψηλή πίεση. Το υλικό της ένεσης έχει υψηλό ιξώδες και λειτουργεί σαν τριδιάστατος “γρύλος” μετατοπίζοντας τους κόκκους του εδάφους με τελικό αποτέλεσμα τη συμπύκνωση του εδάφους.

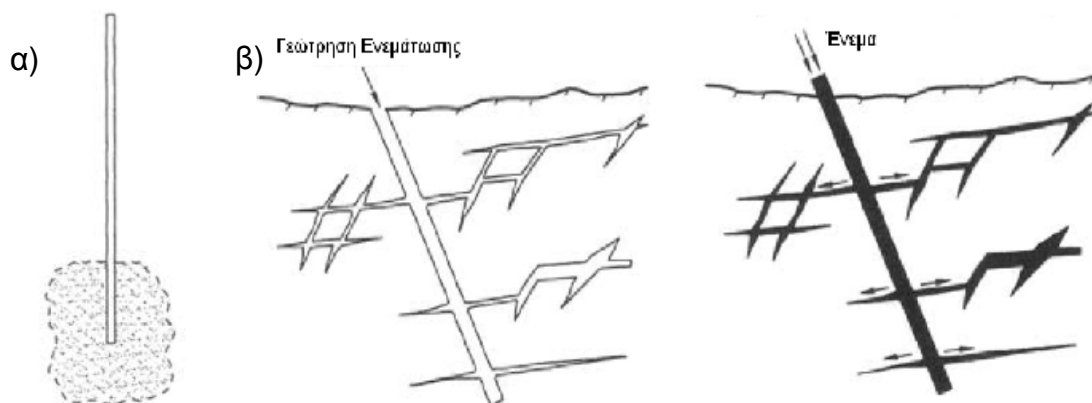
Ενέσεις με πίδακα υψηλής πίεσης χρησιμοποιούνται στην Ιαπωνία από το 1970 περίπου. Πρωτοεμφανίστηκαν στη Ευρώπη προ δεκαετίας και μόλις πρόσφατα άρχισαν να αποκτούν αναγνώριση σαν τεχνικά αποδεκτές εναλλακτικές λύσεις στις Η.Π.Α. και αλλού. Πρόκειται για μια τεχνική που χρησιμοποιεί ειδικές γεωτρητικές κεφαλές εξοπλισμένες με ακροφύσια που εκτοξεύουν νερό και υλικό ένεσης με μεγάλη ταχύτητα κάτω από υψηλή πίεση. Το νερό κατ’ αρχήν διαβρώνει το εδαφικό υλικό που ακολούθως αναμειγνύεται με υλικό ένεσης. Έτσι δημιουργείται ένα νέο υλικό (μείγμα εδάφους και υλικού ένεσης) που έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.

### **2.3 Κατηγορίες των ενέσεων**

Στο σχεδιάγραμμα του Σχήματος 2.1 που ακολουθεί, απεικονίζεται η βασική κατηγοριοποίηση των ενέσεων. Όπως μπορεί να δει κανείς, οι ενέσεις χωρίζονται αρχικά σε δύο μεγάλες υπο-κατηγορίες: α) τις ενεματώσεις χωρίς εκτόπιση του εδάφους και β) τις ενεματώσεις με εκτόπιση του εδάφους. Στην πρώτη υπο-κατηγορία ανήκουν οι ενέσεις πλήρωσης και εμποτισμού. Η μέθοδος των ενέσεων εμποτισμού βασίζεται στην αντικατάσταση του νερού ή του αέρα των πόρων του εδάφους ή των ασυνχειών της βραχώμαζας από ένεμα που εισπιέζεται υπό σχετικά χαμηλή πίεση ώστε να μην προκαλείται διαταραχή του εδαφικού σχηματισμού. Αποτελεί την παλαιότερη μέθοδο ενέσεων και συνήθως εφαρμόζεται σε εδαφικές ζώνες σχετικά μικρού όγκου που βρίσκονται σε απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους. Η συγκεκριμένη μέθοδος απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.



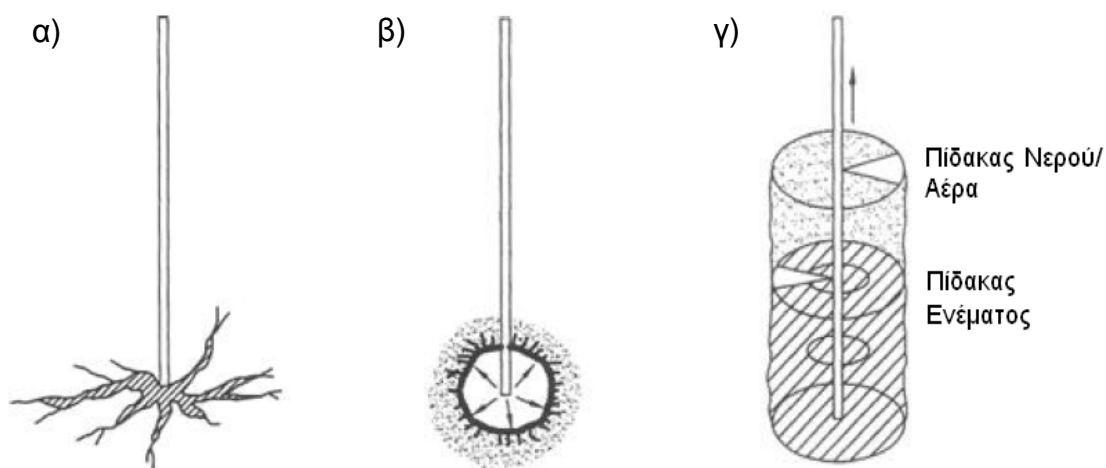
**Σχήμα 2.1** Οι βασικές κατηγορίες των ενέσεων



**Σχήμα 2.2** Ενέσεις εμπλοτισμού: α) ροή ενέματος μέσα από τους πόρους του εδάφους και β) ροή ενέματος και πλήρωση ασυνεχειών βραχώμαζας

Στη δεύτερη υπο-κατηγορία ανήκουν οι ενέσεις διάρρηξης (ή υδραυλικής θραύσης), οι ενέσεις συμπίκνωσης και οι ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης. Οι ενέσεις διάρρηξης αποτελούν τεχνική κατά την οποία ένεμα υψηλής πυκνότητας και χαμηλού ιξώδους διοχετεύεται εντός του εδαφικού σχηματισμού προκαλώντας τη διάρρηξή του και τελικά την μετακίνησή του από την αρχική του θέση. Λόγω της διάρρηξης που προκαλούν χαρακτηρίζονται και ως μη

ελεγχόμενες ενέσεις. Η μέθοδος των ενέσεων συμπίκνωσης βασίζεται στη δημιουργία βολβών εντός του εδάφους με ένεμα υψηλής πυκνότητας και υψηλού ιξώδους προκαλώντας την συμπίκνωση του όμορου εδάφους, χωρίς να προκαλείται αστοχία στο έδαφος (ελεγχόμενες ενέσεις). Οι βολβοί που τελικά δημιουργούνται είναι ισχυροί και σχετικά άκαμπτοι. Οι ενέσεις αποκατάστασης βασίζονται σε υλικά και τεχνική που είναι όμοια με αυτά των ενέσεων συμπίκνωσης και στοχεύουν στην αποκατάσταση (επαναφορά σε αρχική θέση) κατασκευών ή εδαφικών όγκων που έχουν υποστεί καθίζηση ή μετατόπιση. Με την μέθοδο της φλέβας υψηλής πίεσης, προκαλείται διάβρωση συγκεκριμένου όγκου εδάφους στο εσωτερικό του εδαφικού σχηματισμού, και εν συνεχεία, το διαβρωμένο υλικό αναμειγνύεται με ένεμα. Η διάβρωση του εδάφους επιτυγχάνεται με την εκτόξευση, με μεγάλη ταχύτητα και πίεση, ρευστού/ρευστών ή/και αέρα από ακροφύσια που προσαρμόζονται σε ειδικές γεωτρητικές κεφαλές. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται στήλες εντός του εδάφους με τις οποίες επιτυγχάνεται αύξηση της αντοχής και μείωση της διαπερατότητάς του.



**Σχήμα 2.3** Ενέσεις με εκτόπιση του εδάφους: α) Ενέσεις διάρρηξης (διάρρηξη - μετατόπιση - πλήρωση), β) Ενέσεις συμπίκνωσης (μετατόπιση - πλήρωση) και γ) Ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης (μερική αντικατάσταση – ανάμειξη)



## 2.4 Κυριότερες εφαρμογές των μεθόδων ενεμάτωσης

Γενικά, η επέμβαση με χρήση ενέσεων στο φυσικό έδαφος ή σε μία γεωκατασκευή, αποσκοπεί στην βελτίωση των μηχανικών ή/και υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους, ανάλογα κάθε φορά με το είδος του έργου και τις ανάγκες που έρχεται να καλύψει η διαδικασία της βελτίωσης. Όλες οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν παραπάνω προσφέρουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών βελτίωσης, ωστόσο υπόκεινται σε μια σειρά περιορισμών (φυσικών ή οικονομικών) που καθιστούν, την καθεμία από αυτές, περισσότερο κατάλληλη για συγκεκριμένες εφαρμογές και ακατάλληλη (ή μη συμφέρουσα) για κάποιες άλλες. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικότερες εφαρμογές της κάθε μεθόδου, ενώ στις ακόλουθες υπο-ενότητες αναφέρονται αναλυτικότερα οι εφαρμογές αυτές ανά κατηγορία.

**Πίνακας 2.1** Εφαρμογές των διαφόρων μεθόδων ενεμάτωσης

Χρήσεις	Μέθοδοι Ενεμάτωσης					
	Εμποτισμού	Ενέσεις σε βράχο	Διάρρηξης	Συμπύκνωσης	Με πίδακα υψηλής πίεσης	Αποκατάστασης
Μείωση διαπερατότητας του εδάφους	Ö	Ö	Ö			
Κατασκευή αδιαπέρατου διαφράγματος	Ö	Ö			Ö	
Ενίσχυση εδαφών προς βελτίωση συνθηκών θεμελίωσης	Ö			Ö	Ö	
Βελτίωση ευστάθειας τοιχωμάτων εκσκαφών	Ö				Ö	
Συμπύκνωση εδάφους έναντι ρευστοποίησης	Ö			Ö	Ö	
Ανύψωση κατασκευών				Ö		
Ενίσχυση θεμελίωσης υπάρχουσας			Ö	Ö	Ö	

κατασκευής						
Ενίσχυση εδαφών προς διάνοιξη σηράγγων και φρεάτων	Ö		Ö		Ö	
Περιορισμός αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων	Ö		Ö			Ö

#### 2.4.1 Ενέσεις εμποτισμού

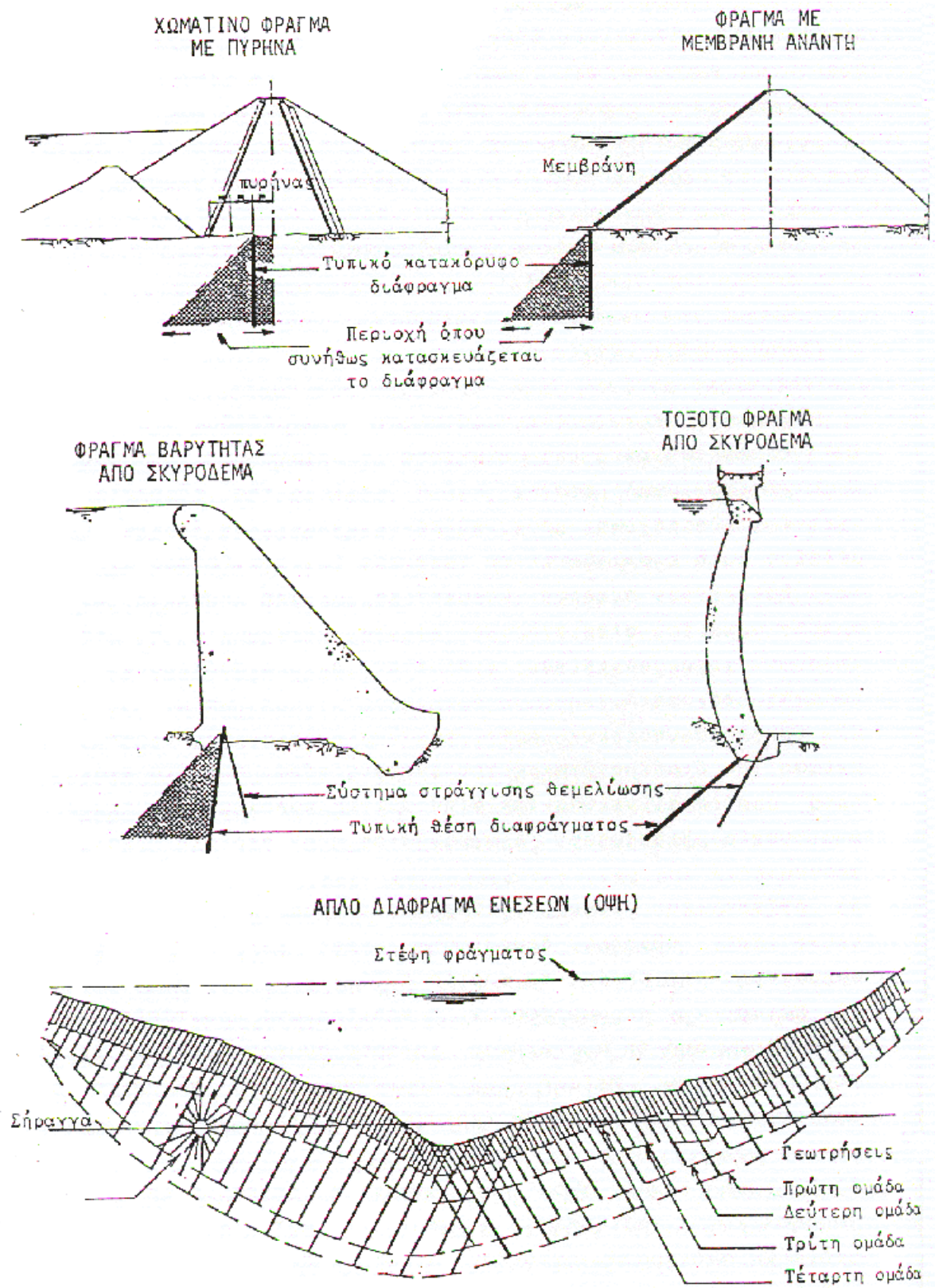
Η χρήση ενέσεων εμποτισμού έχει γενικά υψηλό κόστος και η επιλογή της εξαρτάται από το σχετικό κόστος ως προς άλλες εναλλακτικές λύσεις. Γενικά, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε εδαφικές ζώνες με μικρό σχετικά όγκο που βρίσκονται συνήθως σε σχετικά μεγάλη απόσταση από κάποιο σημείο προσιτό στον άνθρωπο και τα μηχανήματα. Η μέθοδος των ενέσεων χρησιμοποιείται για έναν ή για περισσότερους από τους παρακάτω λόγους :

(α) Έλεγχος υπόγειων ροών και δημιουργία “αδιαπέρατων” ζωνών: μείωση της διαπερατότητας του εδάφους γύρω από μια εκσκαφή και, κατά συνέπεια, μείωση της διηθούμενης παροχής προς την εκσκαφή. Δημιουργία αδιαπέρατου διαφράγματος στην περιοχή ή κάτω από ένα φράγμα.

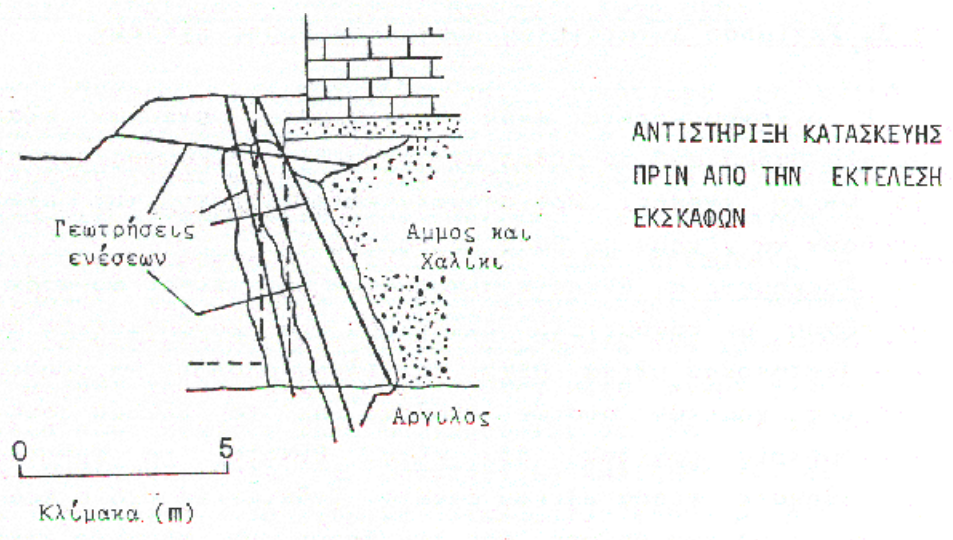
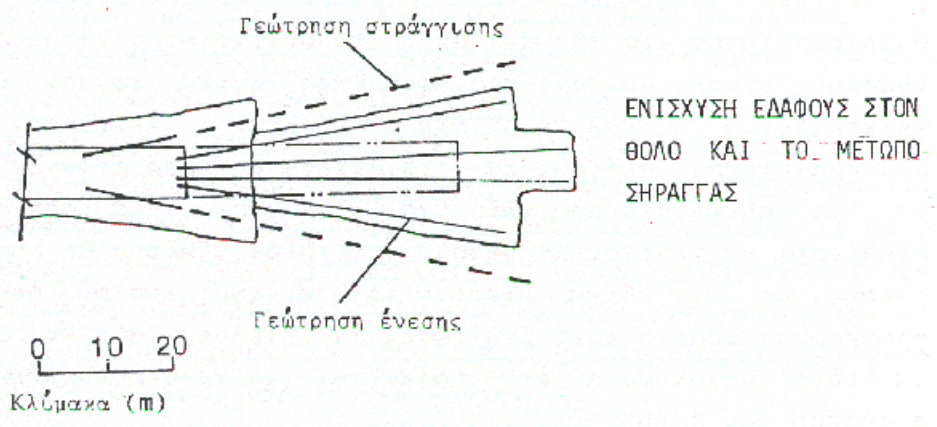
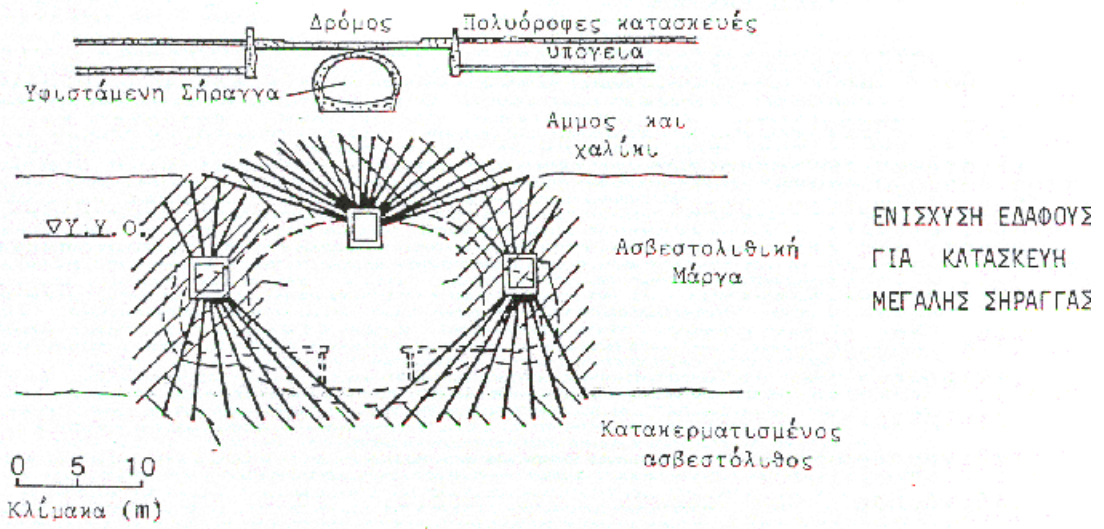
(β) Αύξηση της αντοχής εδαφικού σχηματισμού: αύξηση φέρουσας ικανότητας εδάφους θεμελίωσης νέας κατασκευής ή παλαιάς κατασκευής της οποίας το φορτίο αυξάνεται.

(γ) Μείωση των παραμορφώσεων ή καθιζήσεων: προστασία υπαρχουσών κατασκευών από τη συμπύκνωση χαλαρού αμμώδους υλικού θεμελίωσης λόγω δονήσεων. Μείωση των απαιτήσεων για πλευρική στήριξη (αντιστήριξη) των παρειών εκσκαφών που συνορεύουν με υπάρχουσες κατασκευές.

(δ) Πλήρωση κενών: γύρω από κατασκευές (ενέσεις επαφής). Μείωση υπερβολικών καθιζήσεων ή αποτροπή αστοχίας στην περίπτωση υπόγειων ανοιγμάτων-εγκοίλων.



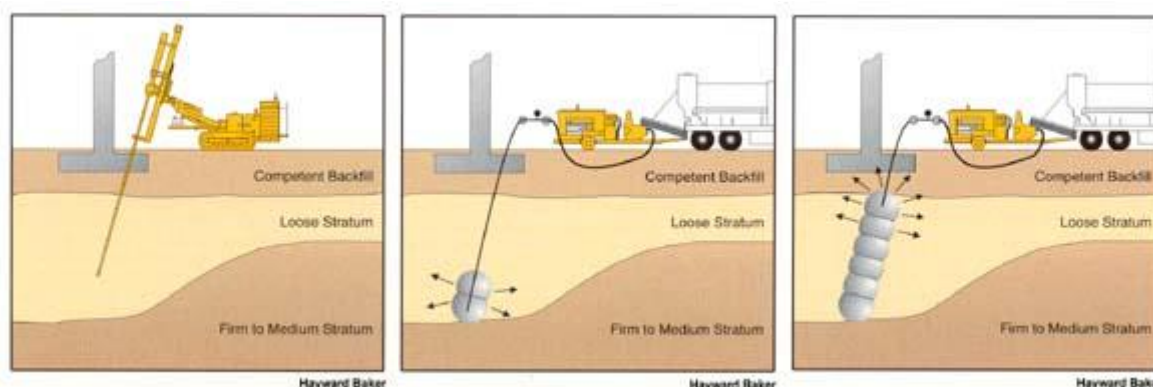
Σχήμα 2.4α Περιπτώσεις εφαρμογής ενέσεων εμπότισμού



Σχήμα 2.4β Περιπτώσεις εφαρμογής ενέσεων εμποτισμού (συνέχεια)

### 2.4.2 Ενέσεις συμπύκνωσης

Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, το υλικό της ένεσης δεν εμποτίζει το έδαφος αλλά παραμένει μία ομογενής μάζα της οποίας ο όγκος αυξάνεται, ελεγχόμενος από τον κατασκευαστή, έτσι ώστε να προκαλέσει συμπύκνωση χαλαρών εδαφών και/ή «ανύψωση» κατασκευών. Αρχικά είχε σαν στόχο τη διόρθωση προβλημάτων σε κατασκευές που είχαν προκληθεί από καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης αργιλικών στρώσεων στο έδαφος θεμελίωσης, όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 2.5 και 2.6.



**Σχήμα 2.5** Ανύψωση θεμελίωσης με ενέσεις συμπύκνωσης



**Σχήμα 2.6** Ανύψωση οδοστρώματος με ενέσεις συμπύκνωσης

Αργότερα, η μέθοδος επεκτάθηκε και σε άλλες εφαρμογές όπως:

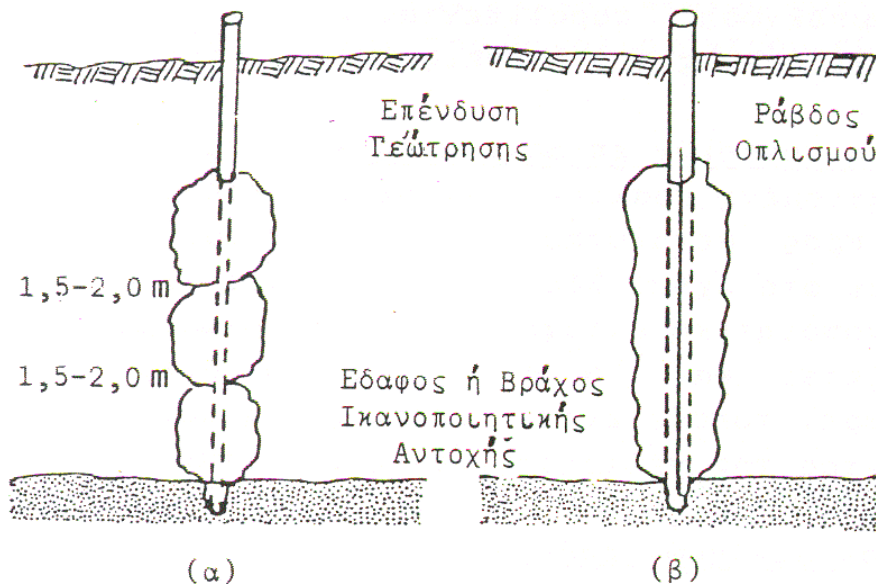
(α) για τον έλεγχο των καθιζήσεων κατά τη διάρκεια διάνοιξης σηράγγων σε εδάφη και σε σχετικά μικρό βάθος από την επιφάνεια,

(β) για τη μείωση της πιθανότητας ρευστοποίησης εδαφών λόγω δυναμικών φορτίσεων και

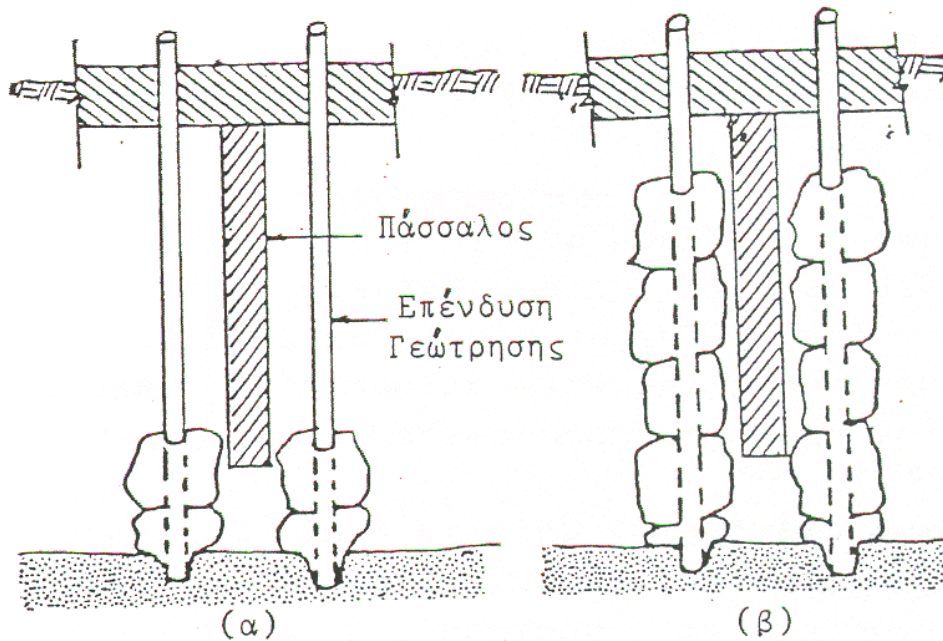
(γ) γενικά για τη βελτίωση της συμπεριφοράς και των μηχανικών ιδιοτήτων εδαφών αυξάνοντας την πυκνότητά τους.

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου για τη βελτίωση συνθηκών επιφανειακής θεμελίωσης. Η συνηθισμένη πρακτική είναι η εκτέλεση ενέσεων, από μικρό βάθος προς μεγαλύτερο, ανά αποστάσεις 1,5 ως 2,0 m, μέχρι μια εδαφική στρώση ή βράχο με ικανοποιητική αντοχή και παραμορφωσιμότητα. Μερικές φορές εφαρμόζεται και η αντίστροφη διαδικασία. Σ' αυτή την περίπτωση, τοποθετείται πολλές φορές και μια ράβδος οπλισμού στο κέντρο της γεώτρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7β.

Η περίπτωση βελτίωσης συνθηκών βαθιάς θεμελίωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που το πρόβλημα εμφανίζεται στην περιοχή έδρασης του πασσάλου (αντοχή αιχμής μικρότερη της επιθυμητής), οπότε γίνεται βελτίωση των εδαφικών στρώσεων γύρω και κάτω από την αιχμή των πασσάλων. Όταν το πρόβλημα εμφανίζεται σε πασσάλους "τριβής" η διαδικασία των ενέσεων ξεκινά από θέση κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και επεκτείνεται μέχρι μια εδαφική στρώση με κατάλληλες παραμέτρους αντοχής και παραμορφώσεων.



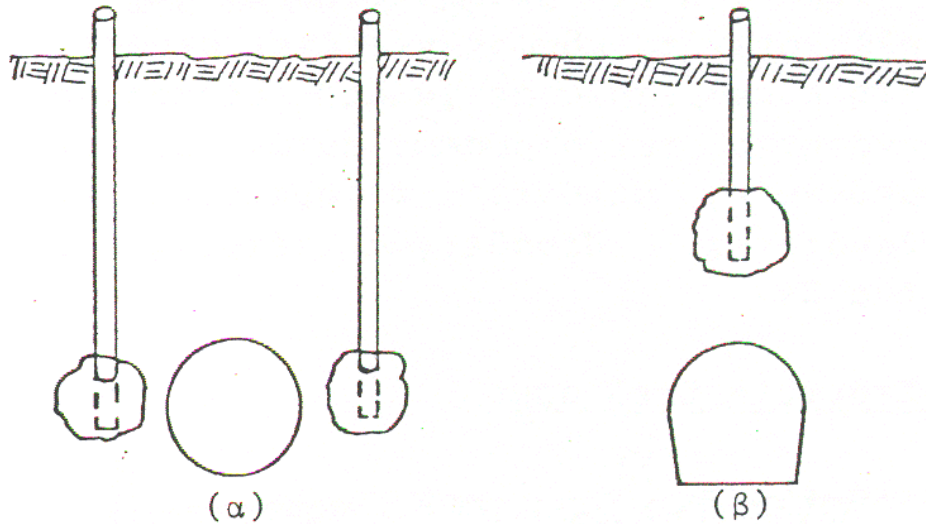
**Σχήμα 2.7** Ενέσεις συμπύκνωσης για τη βελτίωση συνθηκών επιφανειακής θεμελίωσης



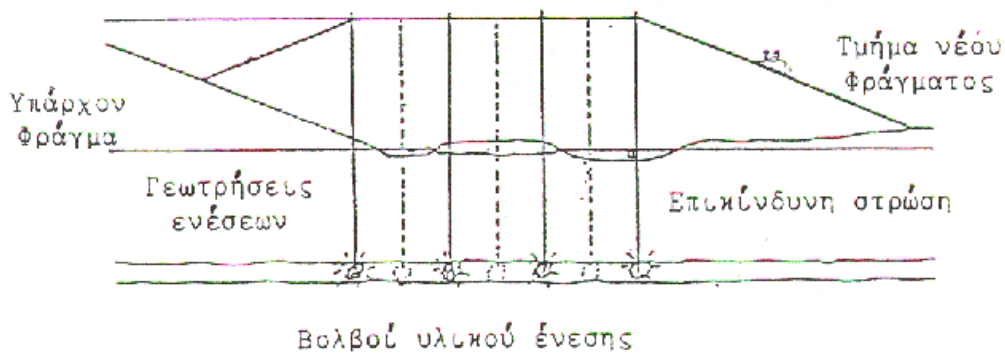
**Σχήμα 2.8** Ενέσεις συμπίκνωσης για τη βελτίωση συνθηκών βαθιάς Θεμελίωσης

Για την πρόληψη αστοχίας λόγω αύξησης του υπερκείμενου φορτίου είτε για την πρόληψη παραμορφώσεων σε περίπτωση αστοχίας σε αγωγούς, εκτελείται μια σειρά ενέσεων κατά μήκος κάθε πλευράς του αγωγού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9α. Για την περίπτωση εκσκαφής σήραγγων, προετοιμάζονται θέσεις ενέσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας και σε απόσταση 1,8 m ως 2,4 m από την οροφή της σήραγγας (Σχήμα 2.9β). Οι ενέσεις εκτελούνται καθώς περνά κάτω από τη θέση ένεσης το μέτωπο της σήραγγας και αναπληρώνεται ο όγκος του εδάφους που "χάθηκε" λόγω διαταραχών ή διέρρευσε προς το κενό της σήραγγας.

Οι πιθανότητες ρευστοποίησης από δυναμική φόρτιση είναι υψηλές όταν το έδαφος περιέχει στρώσεις αμμώδεις με μέση προς λεπτή κοκκομετρία σε χαλαρή κατάσταση. Η αύξηση της σχετικής πυκνότητας των στρώσεων αυτών με κατάλληλη εφαρμογή ενέσεων συμπίκνωσης μειώνει ή πρακτικά εξουδετερώνει αυτές τις πιθανότητες (Σχήμα 2.10).



**Σχήμα 2.9** Ενέσεις συμπύκνωσης για την πρόληψη ή διόρθωση αστοχιών σε υπόγειους αγωγούς και σήραγγες



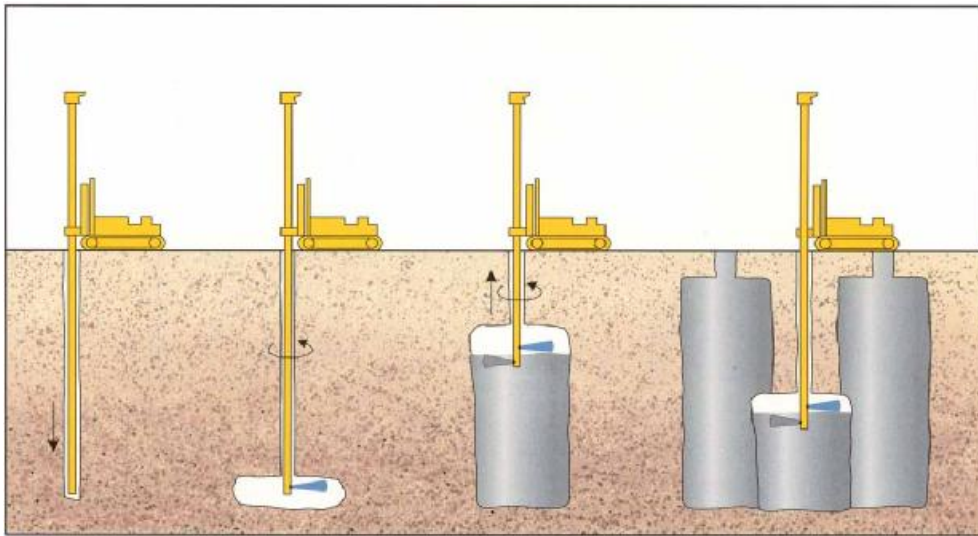
**Σχήμα 2.10** Ενέσεις συμπύκνωσης για τη μείωση πιθανότητας ρευστοποίησης

#### 2.4.3 Ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης

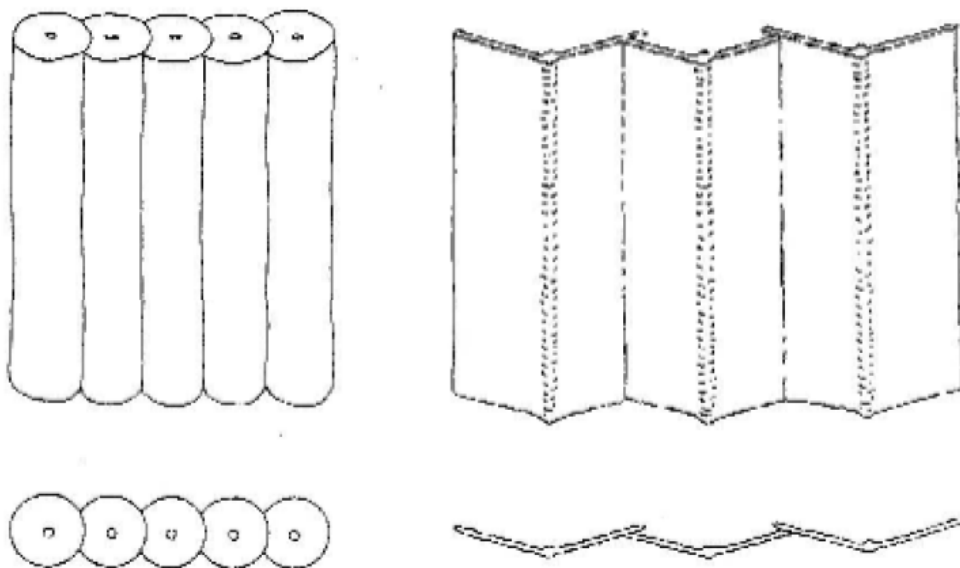
Η χρήση πιδάκων νερού για την εκσκαφή εδαφών είναι ίσως η παλαιότερη εφαρμογή των πιδάκων και χρονολογείται από τους αρχαίους χρόνους όταν σαν πηγή ενέργειας υπήρχε μόνο η βαρύτητα. Από τα μέσα του περασμένου αιώνα χρησιμοποιήθηκαν πίδακες νερού υπό πίεση σε ορυχεία, κυρίως ορυχεία άνθρακος, και για την εκσκαφή και απομάκρυνση εδαφικών στρώσεων σε εργοτάξια. Για τις εφαρμογές αυτές απαιτούνται συνήθως σχετικά χαμηλές πιέσεις (1 ως 10 kg/cm<sup>2</sup>) και μεγάλοι όγκοι νερού (5 ως 20m<sup>3</sup>/λεπτό). Κατά τις αρχές της δεκαετίας τους 1970, άρχισε η ανάπτυξη μιας μεθόδου για τη βελτίωση και ενίσχυση εδαφών που βασίζεται στη χρήση πιδάκων υψηλής πίεσης και μεγάλης ταχύτητας του ρευστού. Με τη



συγκεκριμένη μέθοδο επιτυγχάνεται ανάμειξη του προϋπάρχοντος εδάφους, αφού πρώτα καταστραφεί η δομή του, με το ένεμα προκειμένου να κατασκευαστεί μία στήλη «ενισχυμένου» εδάφους (εδαφοπάσσαλος) στην περίπτωση περιστρεφόμενου πίδακα, ή πέτασμα στην περίπτωση μη περιστρεφόμενου πίδακα.



**Σχήμα 2.11** Διαδικασία κατασκευής εδαφοπάσσων



**Σχήμα 2.12** Κατασκευή συνεχών διαφραγματικών τοίχων με πίδακα υψηλής πίεσης



**Σχήμα 2.13** Στήλες ενισχυμένου εδάφους (εδαφοπάσσαλοι)

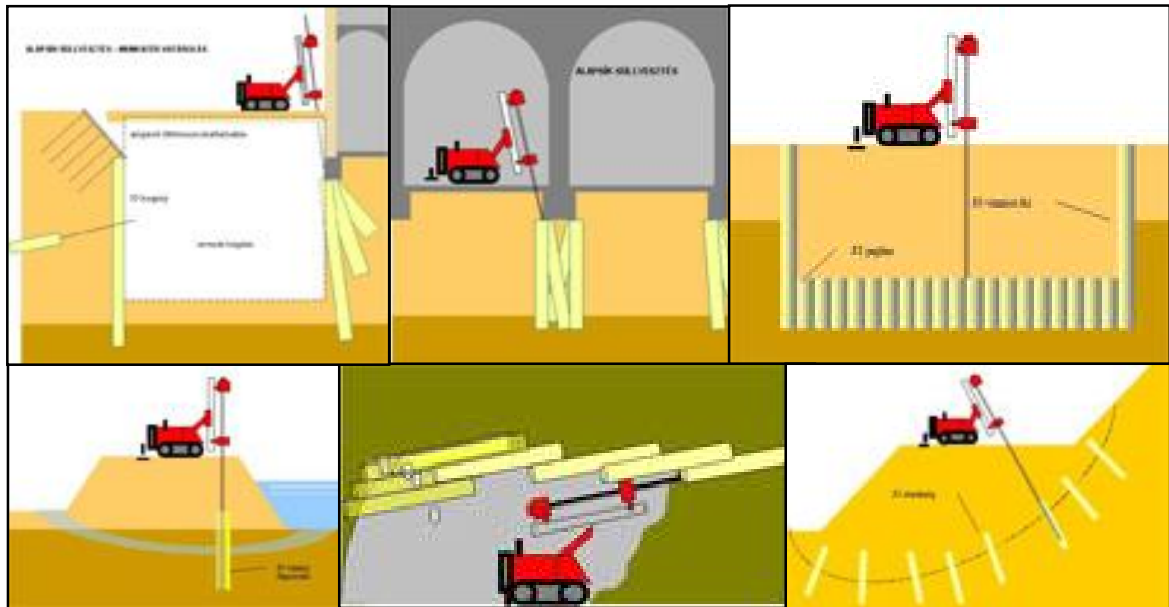
Η συγκεκριμένη τεχνική βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε προβλήματα όπως:

(α) βελτίωση συνθηκών θεμελίωσης (υποστήριξη) υπάρχουσων κατασκευών ή βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης για νέες κατασκευές (κτίρια, αναχώματα, τοίχοι αντιστήριξης)

(β) σταθεροποίηση εδάφους σε περιπτώσεις ανοιχτών εκσκαφών (πλευρικά τοιχώματα) ή υπόγειων εκσκαφών (σήραγγες) σε μικρό βάθος

(γ) βελτίωση της ευστάθειας πρανών

Παραδείγματα της εφαρμογής της μεθόδου σε περιπτώσεις προβλημάτων όπως αυτά που αναφέρονται παραπάνω, παρουσιάζονται στα σκαριφήματα του Σχήματος 2.14.



**Σχήμα 2.14** Παραδείγματα προβλημάτων που αντιμετωπίζονται με εφαρμογή των ενέσεων με φλέβα υψηλής πίεσης

## 2.5 Επιλογή μεθόδων βελτίωσης εδάφους

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση ενέσεων είναι μια μέθοδος βελτίωσης των υλικών που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης, ώστε να βελτιωθούν τα μηχανικά και άλλα χαρακτηριστικά. Ωστόσο, αυτή η βελτίωση που επέρχεται μέσω των ενέσεων μπορεί να μην επαρκεί και ίσως να απαιτούνται και άλλες μέθοδοι βελτίωσης συμπληρωματικά. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου βελτίωσης ή συνδυασμού μεθόδων θα πρέπει να βασίζεται στην εκτίμηση του προβλήματος από κάθε πλευρά, συμπεριλαμβανομένων των γεωτεχνικών αναγκών, των συνθηκών κάτω από την επιφάνεια της γης καθώς και των οικονομικών παραγόντων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ – ΥΛΙΚΑ ΕΝΕΣΕΩΝ

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφησαν οι διάφορες κατηγορίες των ενέσεων και οι βασικότερες εφαρμογές τους. Όπως έγινε αντιληπτό, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, διαφοροποιείται και η μέθοδος ενεμάτωσης. Ομοίως ισχύει και για την επιλογή του ενέματος, δηλαδή του υλικού το οποίο εισπνέζεται εντός του εδάφους και με την πάροδο του χρόνου επικάθεται, πήζει και σκληρύνεται προσδίδοντας στο φυσικό έδαφος τις βελτιωμένες ιδιότητες. Σήμερα διατίθενται διάφοροι τύποι ενεμάτων και τεράστια ποικιλία υλικών, από τα οποία ο μηχανικός έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τα πλέον κατάλληλα, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις του έργου που τον απασχολεί. Η επιλογή των υλικών γίνεται με βάση τα εξής κριτήρια: α) τη μέθοδο ενεμάτωσης, β) το είδος της εφαρμογής και του φυσικού εδάφους και γ) το κόστος και την ευκολία εφαρμογής. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει εκτενής αναφορά στα είδη των ενεμάτων, στις βασικές τους ιδιότητες και στα κριτήρια επιλογής και εφαρμοσιμότητας τους.

Τα ενέματα, ανάλογα με τον τρόπο σύνθεσής τους, διακρίνονται σε:

- Αιωρήματα : είτε στερεών σωματιδίων είτε κολλοειδή αιωρήματα
- Διαλύματα : είτε αληθή είτε κολλοειδή διαλύματα
- Κονιάματα

Τα αιωρήματα παρασκευάζονται με διάχυση των σωματιδίων του υλικού (ή μείγματος υλικών) και αιώρηση στο μέσο διασποράς (νερό). Στη δεύτερη κατηγορία, η υγρή φάση του ενέματος προκύπτει με διάλυση του υλικού σε κάποιον ανόργανο ή οργανικό διαλύτη, ενώ τα κονιάματα παρασκευάζονται με μείξη αδρανών υλικών και κάποιας συγκολλητικής ουσίας. Τα συστατικά υλικά των ενεμάτων θα πρέπει να ικανοποιούν τις προδιαγραφές των έργων καθώς επίσης και τις απαιτήσεις των σχετικών ευρωπαϊκών προτύπων EN ή των εθνικών προτύπων.

Οι ιδιότητες των ενεμάτων, που αποτελούν αντικείμενο διερεύνησης και αξιολόγησης, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: α) σε εκείνες που χαρακτηρίζουν

τη συμπεριφορά του ρευστού ενέματος κατά την διαδικασία εισπίεσης του στο έδαφος (πριν την πήξη) και β) στις ιδιότητες του σκληρημένου ενέματος στην τελική του θέση στο έργο (μετά την πήξη). Οι κυριότερες από αυτές, για τους τρεις τύπους ενεμάτων, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί.

**Πίνακας 3.1** Παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις ιδιότητες των ενεμάτων

	Αιωρήματα	Διαλύματα	Κονιάματα
Πριν την πήξη	χρόνος πήξης, πυκνότητα, pH, κοκκομετρική διαβάθμιση, ιξώδες, συνοχή, διαρροή, θιξοτροπία* και ικανότητα κατακράτησης νερού	χρόνος πήξης, πυκνότητα, pH, επιφανειακή τάση εφελκυσμού, χρόνος πήγματος, ιξώδες, συνοχή και θιξοτροπία	χρόνος πήξης, πυκνότητα, pH, κοκκομετρική διαβάθμιση, ιξώδες, εργασιμότητα και ικανότητα κατακράτησης νερού
Μετά την πήξη	χρόνος σκλήρυνσης, τελική αντοχή, παραμορφωσιμότητα ανθεκτικότητα, συστολικότητα, διασταλτικότητα, πυκνότητα και διατμητική αντοχή	σκλήρυνση, τελική αντοχή, pH, παραμορφωσιμότητα ανθεκτικότητα, συστολικότητα, διασταλτικότητα, διατμητική αντοχή και συναίρεση** (πυριτικά διαλύματα)	χρόνος σκλήρυνσης, τελική αντοχή, παραμορφωσιμότητα, ανθεκτικότητα, συστολικότητα και διασταλτικότητα

### 3.2 Ιδιότητες, υλικά και εφαρμοσιμότητα των αιωρημάτων

Τα αιωρήματα είναι μείγματα νερού και στερεών, με μέγεθος κόκκων που ποικίλλει σημαντικά. Αποτελούν την πιο οικονομική λύση σε σύγκριση με άλλα ενέματα εμποτισμού και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βελτίωση τόσο

\* Το φαινόμενο μετατροπής μιας πηχτής σε ρευστότητα ύλης, σε κολλοειδές διάλυμα, μετά από ανάδευση.

\*\* Η καταστροφή (ή κατάρρευση) του κολλοειδούς πήγματος (Silica Gel), η οποία μπορεί να οφείλεται στην πάροδο του χρόνου, είτε σε μηχανική και χημική καταπόνηση.

της υδραυλικής όσο και της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών. Το ιξώδες αυτών των αιωρημάτων είναι σχετικά υψηλό και αυξάνεται σημαντικά με το χρόνο. Απαιτούνται λίγες ώρες ως και μερικές ημέρες για να αποκτήσουν ικανοποιητική αντοχή και έχουν γενικώς αρκετά μεγάλους χρόνους πήξης. Για το λόγο αυτό, οι πρώτες ύλες αναμειγνύονται στην επιφάνεια του εδάφους και διατηρούνται σε κατάλληλα δοχεία με συνεχή ανάδευση ώστε να αποφεύγεται η καθίζηση των αιωρούμενων κόκκων. Ενέματα τέτοιου τύπου, εκτός από αιωρήματα τσιμέντου Portland και λεπτόκοκκων τσιμέντων, είναι τα αιωρήματα αργίλου και μπεντονίτη και τα αιωρήματα μείγματος μπεντονίτη–τσιμέντου ή μείγματος ποζολανών–τσιμέντου.

### 3.2.1 Ιδιότητες των αιωρημάτων

Για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας ενός αιωρήματος σε σχέση με τις ανάγκες ενός έργου, είναι απαραίτητη η τεκμηρίωση των ιδιοτήτων του. Οι ιδιότητες που αποτελούν τα βασικά κριτήρια επιλογής είναι το ιξώδες και η ρεολογική συμπεριφορά, οι χρόνοι πήξης, ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής, η τελική αντοχή, η ευστάθεια, και η ενεσιμότητα. Κατά περίπτωση, μπορεί να χρειαστεί να εξεταστούν η διαπερατότητα, η μονιμότητα (ανθεκτικότητα στον χρόνο), η συρρίκνωση, η ανάπτυξη θερμοκρασίας κατά την ενυδάτωση ή άλλες δευτερεύουσες ιδιότητες. Ο προσδιορισμός της τιμής ή/και του εύρους τιμών μιας ιδιότητας γίνεται με βάση παράγοντες που ισχύουν ειδικά για το έργο που απαιτεί πρόγραμμα βελτίωσης με ενέσεις. Η διερεύνηση γίνεται συνήθως εργαστηριακά και τα αποτελέσματά της, σε συνδυασμό με τα στοιχεία της τεχνικοοικονομικής μελέτης και την εμπειρία που έχει αποκτηθεί από παρόμοια έργα, οδηγούν στην τελική επιλογή των αιωρημάτων.

Τα αιωρήματα χαρακτηρίζονται από :

- Την κοκκομετρική διαβάθμιση των στερεών σωματιδίων
- Την αναλογία νερού/στερεών σωματιδίων
- Το ρυθμό ιζηματοποίησης
- Την ικανότητα κατακράτησης νερού
- Τις ρεολογικές τους ιδιότητες και την εν γένει συμπεριφορά τους με το χρόνο.

Ο προσδιορισμός της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης των στερεών σωματιδίων στα λεπτόκοκκα αιωρήματα θα πρέπει να γίνεται με κατάλληλα όργανα μεγάλης ακρίβειας.

Η τάση κροκκίδωσης των αιωρούμενων στερεών (ειδικά σε λεπτόκοκκα αιωρήματα) θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Επιπλέον, η τάση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων να επικάθονται εξαιτίας της βαρύτητας θα πρέπει να εξετάζεται σε συνάρτηση με τη φύση και με τις ιδιότητες του υπό ενεμάτωση γεωυλικού.

Η απαραίτητη επεξεργασία των κολλοειδών αργιλικών αιωρημάτων πριν την ενεμάτωση αφορά στη σχολαστική αποκροκκίδωση των αργιλικών σωματιδίων.

### *3.2.2 Υλικά των αιωρημάτων*

Ενέματα τύπου αιωρήματος μπορούν να είναι ακόμα και μείγματα εδάφους–νερού, τα οποία αποτελούν και την πιο οικονομική λύση, αλλά παράλληλα εμφανίζουν πολλά και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως χαμηλή αντοχή και δυσκολία διεύθυνσης στους προς βελτίωση εδαφικούς σχηματισμούς. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα ενέματα τύπου αιωρήματος είναι εκείνα που έχουν ως βάση το κοινό τσιμέντο Portland. Ανάλογα με τις ανάγκες κάθε εφαρμογής (π.χ. υψηλή αρχική αντοχή, αντίσταση σε χημικό περιβάλλον) είναι δυνατό αντί κοινού τσιμέντου να χρησιμοποιηθούν διαφορετικού τύπου τσιμέντα (αλουμινικά, σκωριακά κ.α). Επιπλέον, είναι δυνατό να προστεθούν στα ενέματα ορισμένα στερεά (άμμος, άργιλος) με στόχο, κυρίως, τη μείωση του κόστους των ενέσεων. Η χρήση άλλων προσμίκτων όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία και η πυριτική παιπάλη, καθώς και η προσθήκη χημικών βελτιωτικών (υπερρευστοποιητές, μειωτές νερού, επιταχυντές πήξης κ.α) έχει ως στόχο τη βελτίωση κάποιων ιδιοτήτων των αιωρημάτων. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των συστατικών που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή ενεμάτων τσιμέντου και αναφέρεται η επίδρασή τους στις ιδιότητες των ενεμάτων.

### Νερό

Τα χαρακτηριστικά των αιωρημάτων τσιμέντου επηρεάζονται σημαντικά από την ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται για την παρασκευή τους και

για το λόγο αυτό θα πρέπει να εξετάζεται το νερό πριν από τη χρήση του. Η τιμή του pH αποτελεί την σημαντικότερη παράμετρο επιρροής επειδή η οξύτητα του νερού επηρεάζει τον χρόνο πήξης των ενεμάτων. Για τιμές  $6 < \text{pH} < 8$  η επίδραση της οξύτητας είναι αμελητέα. Σε περιπτώσεις που το νερό έχει πολύ μικρή περιεκτικότητα σε άλατα, κρίνεται ακατάλληλο για χρήση. Νερό που περιέχει σουλφονικά ( $> 0.1\%$ ), χλώριο ( $> 0.5\%$ ), σάκχαρα, οργανικά αιωρούμενα στερεά ή έχει υψηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται. Γενικά, το πόσιμο νερό θεωρείται κατάλληλο για την παρασκευή αιωρημάτων τσιμέντου, ενώ δεν αποκλείεται η χρήση ακόμα και θαλασσινού νερού, εφόσον δεν αλλοιώνονται οι ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου ενέματος.

### Τσιμέντο

Κατά κύριο λόγο, στις ενέσεις εμποτισμού για την παρασκευή ενεμάτων χρησιμοποιούνται κοινά τσιμέντα Portland, τα οποία κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητα που εμφανίζουν στα επιμέρους συστατικά (κλίνκερ, ποζολάνες, γύψος κτλ). Η κατάταξη που ακολουθούν τα Αμερικανικά πρότυπα (ASTM C150-04) διαφέρει από εκείνη των Ευρωπαϊκών (EN 197-1:2000) και δεν υπάρχει απευθείας αντιστοιχία μεταξύ αυτών των κατηγοριών. Τα τσιμέντα χαρακτηρίζονται από μηχανικές και φυσικές ιδιότητες που προσδιορίζονται με την εκτέλεση πρότυπων δοκιμών. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1:2000, οι ιδιότητες αυτές είναι: η αντοχή μετά από 2, 7 και 28 ημέρες, ο αρχικός χρόνος πήξης και η διόγκωση μετά την πήξη. Σημαντικές ιδιότητες των τσιμέντων Portland αποτελούν, ακόμη, η λεπτότητα κατά Blaine, η πυκνότητα και το χαλαρό φαινόμενο βάρος.

Οι απαιτήσεις τού κάθε έργου (υψηλή αρχική αντοχή, χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης, αντοχή σε χημικά “επιθετικό” περιβάλλον κ.α.) καθορίζουν τα κριτήρια για την επιλογή του καταλληλότερου τύπου τσιμέντου. Παρ’όλα αυτά, στις περιπτώσεις των ενέσεων εμποτισμού το βασικότερο κριτήριο επιλογής είναι η λεπτότητα του τσιμέντου, που εκφράζεται με την ειδική επιφάνεια κατά Blaine (σε  $\text{m}^2/\text{kg}$  ή  $\text{cm}^2/\text{g}$ ). Γενικά, στα κοινά τσιμέντα Portland η λεπτότητα είναι περίπου ίση με  $350\text{m}^2/\text{kg}$ . Στις περισσότερες περιπτώσεις, αιωρήματα με τσιμέντα υψηλής λεπτότητας εμφανίζουν μεγαλύτερη διεισδυτικότητα στους



εδαφικούς σχηματισμούς, όμως για την εξασφάλιση βέλτιστων αποτελεσμάτων πρέπει να λαμβάνεται εξίσου υπόψη η κοκκομετρική καμπύλη του τσιμέντου.

### Πρόσθετα

Με τον όρο “πρόσθετα” αναφέρονται τα υλικά φυσικής προέλευσης που προστίθενται σε ενέματα τσιμέντου για να βελτιώσουν ορισμένες ιδιότητες ή/και για να μειώσουν το κόστος παρασκευής των ενεμάτων. Στη διεθνή βιβλιογραφία εμφανίζονται με διάφορους όρους αλλά κυρίως με τον όρο “υλικά πλήρωσης” και διαχωρίζονται στα υλικά που είναι αδρανή και στα υλικά που είναι ενεργά. Τα κυριότερα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται ως συστατικά σε αιωρήματα τσιμέντου είναι οι λεπτές άμμοι και οι άργιλοι. Στην κατηγορία των ενεργών συστατικών εντάσσονται οι ποζολάνες που είναι πυριτικά και αλουμινοπυριτικά υλικά και δεν εμφανίζουν από μόνες τους ικανότητες τσιμέντωσης. Έχουν, όμως, τη δυνατότητα, παρουσία ελεύθερου ασβεστίου του τσιμέντου, να λάβουν μέρος στη διαδικασία ενυδάτωσης. Διακρίνονται σε φυσικές και τεχνητές ποζολάνες και οι κυριότερες από αυτές είναι η σκωρία, η ιπτάμενη τέφρα, η πυριτική παιπάλη και η φυσική ποζολάνη.

Λεπτές άμμοι προστίθενται στα αιωρήματα τσιμέντου με στόχο την παραγωγή οικονομικών ενεμάτων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά, μικρή περιεκτικότητα σε νερό και σχετικά υψηλή διατμητική αντοχή. Το μέγεθος κόκκων της άμμου είναι δεσμευτικό ως προς το μέγεθος των κενών που μπορεί να εμποτιστούν.

Οι άργιλοι προστίθενται σε αιωρήματα τσιμέντου λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων τους, της ικανότητας να προσροφούν νερό, αλλά και επειδή η παρουσία τους, ακόμη και σε μικρές ποσότητες, αποτρέπει την εξίδρωση. Η πιο διαδεδομένη άργιλος στο πεδίο των ενέσεων είναι ο μπεντονίτης. Ο μπεντονίτης είναι ηφαιστειακή άργιλος με ικανότητα προσρόφησης νερού μεγαλύτερη του 500%. Με την χρήση μπεντονίτη επιτυγχάνεται βελτίωση της αντίστασης σε εξαναγκασμένη εξίδρωση, καθώς και αύξηση της ευστάθειας και της διεισδυτικότητας του ενέματος. Παράλληλα, επέρχεται αύξηση του ιξώδους και της συνοχής και σημαντική μείωση τόσο του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής όσο και της τελικής αντοχής των ενεμάτων.

Η σκωρία είναι τεχνητή ποζολάνη και αποτελεί μη-μεταλλικό παραπροϊόν της επεξεργασίας μεταλλεύματος σιδήρου. Ο κυριότερος τύπος

σκωρίας που χρησιμοποιείται στην παρασκευή ενεμάτων τύπου αιωρήματος είναι η σκωρία υψικαμίνου που συμμετέχει ως υποκατάστατο του τσιμέντου στα ενέματα σε ποσοστό ως και 45%. Λαμβάνει μέρος ενεργά κατά την διαδικασία ενυδάτωσης του τσιμέντου και είναι δυνατό να αντιδράσει με άλλα πρόσθετα για τη δημιουργία εττρινγκίτη. Όμως ο ρυθμός ενυδάτωσης είναι πολύ βραδύς και για αυτό το λόγο πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται συνδυαστικά με τσιμέντο. Αυτή η μειωμένη ικανότητα ενυδάτωσης της σκωρίας είναι ιδανική για καθυστέρηση του αρχικού χρόνου πήξης και αξιοποιείται για τον έλεγχο του χρόνου πήξης των λεπτόκοκκων τσιμέντων. Επιπλέον, η σκωρία προστίθεται σε αιωρήματα τσιμέντου για να αντιδράσει με το υδροξείδιο του ασβεστίου ώστε να επιτυγχάνεται μείωση του πορώδους της μάζας του αιωρήματος και βελτίωση της αντίστασης έναντι χημικών.

Η ιπτάμενη τέφρα είναι μια φθινή τεχνητή ποζολάνη που προέρχεται από τον καπνό στις καμινάδες των εγκαταστάσεων καύσης άνθρακα. Υπάρχουν δύο τύποι τέφρας (τύποι C και F), που έχουν διαφορετική χημική σύνθεση επειδή αυτή εξαρτάται από τον τύπο του άνθρακα που χρησιμοποιείται στην καύση. Η προσθήκη τέφρας σε αιωρήματα τσιμέντου μειώνει ελαφρώς την εξίδρωση, βελτιώνει την αντίσταση έναντι εξαναγκασμένης εξίδρωσης και την μονιμότητα και επιβραδύνει την διαδικασία ενυδάτωσης και τον ρυθμό ανάπτυξης αντοχής. Σε αιωρήματα λεπτόκοκκων τσιμέντων έχει την ίδια επίδραση με την σκωρία, αλλά παράγει ενέματα μικρότερης αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη. Σημειώνεται ότι η συμμετοχή ιπτάμενης τέφρας τύπου C, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 15% κατά βάρος τσιμέντου στα ενέματα οδηγεί σε ταχύτερη αλλοίωσή τους.

Η πυριτική παιπάλη είναι παραπροϊόν της παραγωγής πυριτίου ή των κραμάτων που περιέχουν πυρίτιο σε περιεκτικότητα τουλάχιστον 75%. Είναι λεπτόκοκκη σκόνη (μέγεθος κόκκων < 1μm) και χρησιμοποιείται στα αιωρήματα τσιμέντου για να βελτιώσει την δεισδυτικότητα και την μονιμότητα και να μειώσει την διαπερατότητα του αιωρήματος. Επίσης, με τη χρήση πυριτικής παιπάλης είναι δυνατή η βελτίωση της ευστάθειας, της αντίστασης έναντι εξαναγκασμένης εξίδρωσης αλλά και της αντοχής του αιωρήματος με την μείωση του πορώδους της μάζας του. Γενικά, χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο του τσιμέντου σε περιεκτικότητα το πολύ ως 10% κατά βάρος ξηρού τσιμέντου.

Η φυσική ποζολάνη απαντάται στη φύση σε διάφορους βραχώδεις σχηματισμούς ή μπορεί να προκύψει από τις αργίλους και τους σχιστόλιθους. Γνωστοί τύποι φυσικής ποζολάνης είναι η θηραϊκή γη και η τράσση, για τις οποίες έχει αναφερθεί η επιτυχημένη χρήση τους σε αιωρήματα τσιμέντου. Συγκεκριμένα, αντιδρούν με το υδροξείδιο του ασβεστίου προς παραγωγή δευτερογενούς επτρινγκίτη, αποδίδοντας με αυτόν τον τρόπο ενέματα με βελτιωμένη μονιμότητα. Επιπλέον, η χρήση των υλικών αυτών επιφέρει επιβράδυνση του ρυθμού ανάπτυξης αντοχής και μείωση της εκλυόμενης θερμότητας των αντιδράσεων. Η τελευταία επίδραση θεωρείται επιθυμητή σε περιπτώσεις που απαιτούνται μεγάλες ποσότητες αιωρήματος.

#### Χημικά βελτιωτικά των ιδιοτήτων

Ο όρος “χημικά βελτιωτικά των ιδιοτήτων” αναφέρεται στα χημικά προϊόντα που προστίθενται σε μικρές ποσότητες σε ενέματα τσιμέντου για να βελτιώσουν συγκεκριμένες ιδιότητές τους, κυρίως τις ρεολογικές ιδιότητες και το χρόνο πήξης. Γενικά, στην διεθνή βιβλιογραφία αυτά τα υλικά εμφανίζονται με διάφορους όρους και κυρίως με τον όρο “πρόσμικτα”, που υιοθετήθηκε και από τα Ευρωπαϊκά πρότυπα (EN 934-2:2001). Στις Η.Π.Α. ο ίδιος όρος αναφέρεται σε όλα τα υλικά που είναι δυνατό να προστεθούν σε αιωρήματα τσιμέντου, είτε αυτά είναι χημικά προϊόντα είτε είναι ενεργά υλικά φυσικής προέλευσης. Οι κυριότεροι τύποι των χημικών βελτιωτικών των ιδιοτήτων είναι οι πλαστικοποιητές, οι επιταχυντές, οι επιβραδυντές και τα βελτιωτικά του ιξώδους.

Οι πλαστικοποιητές αποτελούν την κυριότερη και πιο διαδεδομένη κατηγορία χημικών βελτιωτικών των ιδιοτήτων του σκυροδέματος και των ενεμάτων. Στη διεθνή βιβλιογραφία αλλά και στα διεθνή πρότυπα (EN 934-2:2001, ASTM C494-04) αναφέρονται και με τον όρο “μειωτές νερού”. Οι πλαστικοποιητές επιφέρουν βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων των ενεμάτων, προκαλώντας μείωση του ιξώδους και της συνοχής τους, με αποτέλεσμα να παρέχεται η δυνατότητα παρασκευής ενεμάτων με χαμηλότερους λόγους νερού προς τσιμέντο, N/T, με τα ίδια ρεολογικά χαρακτηριστικά. Τυπικά αναφέρεται ότι ένα αιώρημα τσιμέντου με λόγο N/T ίσο προς 1:1 που περιέχει πλαστικοποιητή, παρουσιάζει συγκρίσιμες ρεολογικές ιδιότητες με ένα αιώρημα τσιμέντου χωρίς πλαστικοποιητή και λόγο N/T 3:1 ή 4:1, που όμως έχουν

σημαντικά χαμηλότερη αντοχή και σημαντικά μεγαλύτερη κάθιση (ασταθή αιωρήματα). Υλικά με ακόμη μεγαλύτερη δυνατότητα επίδρασης στις ρεολογικές ιδιότητες των αιωρημάτων τσιμέντου καλούνται υπερπλαστικοποιητές ή υπερμειωτές νερού. Πολλοί πλαστικοποιητές που διατίθενται στο εμπόριο είναι δυνατό να παρουσιάζουν συνδυαστικές δράσεις στα αιωρήματα τσιμέντου. Έτσι, διακρίνονται πλαστικοποιητές με δυνατότητα επιτάχυνσης της πήξης ή της σκλήρυνσης, επιβράδυνσης πήξης και υπερπλαστικοποιητές με δυνατότητα επιβράδυνσης της πήξης (EN 934-2:2001, ASTM C494-04).

Οι επιταχυντές είναι, κατά κύριο λόγο, ανόργανα άλατα που χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τον ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής του αιωρήματος επιταχύνοντας την διαδικασία ενυδάτωσης. Τα υλικά αυτά διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τους επιταχυντές πήξης και τους επιταχυντές σκλήρυνσης. Στην πράξη, τα περισσότερα υλικά αυτού του τύπου (π.χ χλωριώδες ασβέστιο) προκαλούν και τα δύο αποτελέσματα και, για αυτό το λόγο, θεωρείται δύσκολη η ένταξη ενός προϊόντος σε μια από τις δύο επιμέρους κατηγορίες. Ως τυπικοί επιταχυντές πήξης αναφέρονται το πυριτικό νάτριο (υδρύαλος), το χλωριώδες ασβέστιο και το αλουμινικό νάτριο και ως τυπικοί επιταχυντές σκλήρυνσης αναφέρονται το ανθρακικό κάλιο και το ανθρακικό νάτριο. Η δόση του επιταχυντή πρέπει να υπολογίζεται με ακρίβεια καθώς λανθασμένη χρήση μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητα αποτελέσματα, όπως επιβράδυνση της πήξης ή υπερβολικά ταχεία ενυδάτωση. Επίσης, η επιλογή του κατάλληλου επιταχυντή πρέπει να βασίζεται στον τύπο του τσιμέντου που χρησιμοποιείται. Αναφέρεται, για παράδειγμα, ότι το χλωριώδες ασβέστιο λειτουργεί ως επιβραδυντής σε ενέματα με βάση σκωριακά και αλουμινικά τσιμέντα.

Οι επιβραδυντές έχουν αντίθετη επίδραση στη συμπεριφορά των ενεμάτων σε σύγκριση με τους επιταχυντές. Συγκεκριμένα, προκαλούν αύξηση του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την έναρξη της διαδικασίας ενυδάτωσης. Τυπικοί επιβραδυντές είναι τα σάκχαρα, το κιτρικό οξύ και τα λιγνοσουλφονικά. Γενικά, η χρήση επιβραδυντών στο πεδίο των ενέσεων δεν είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη.

Τα βελτιωτικά ιξώδους είναι χημικά προϊόντα που έχουν την ικανότητα να ρυθμίζουν τις ιδιότητες ροής των ενεμάτων και να τις προσαρμόζουν στις

απαιτήσεις των έργων. Διακρίνονται στα υλικά υψηλού μοριακού βάρους που δημιουργούν ενέματα με ροή “μικρής διάρκειας” και στα υλικά χαμηλού μοριακού βάρους που δημιουργούν ενέματα με ροή “μακράς διάρκειας” (ενέματα σε ρευστή κατάσταση για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα). Γενικά, θεωρείται ότι τα βελτιωτικά ιξώδους διαμορφώνουν ενέματα με ψευδο-πλαστική ρεολογική συμπεριφορά, που εμφανίζουν ροή όταν υφίστανται πίεση και σκληρύνονται απότομα όταν βρίσκονται σε ηρεμία. Με αυτόν τον τρόπο, τα ενέματα εμφανίζουν αυξημένη αντίσταση έναντι εξαναγκασμένης εξίδρωσης, η οποία μπορεί να βελτιωθεί ως και 10 φορές.

### 3.2.3 Τυπικές συνθέσεις ενέσεων αιωρημάτων

Παρακάτω ακολουθούν οι πιο συνηθισμένοι τύποι ενέσεων αιωρημάτων και οι κύριες εφαρμογές τους.

#### Άμμος / Τσιμέντο

*Υλικά, Αναλογία:* Ο λόγος άμμου προς τσιμέντο που χρησιμοποιείται είναι από 2:1 ως 10:1 (υλικά ξηρά κατ’ όγκο σε χαλαρή κατάσταση) και νερού προς τσιμέντο από 2:1 ως 5:1 (κατ’ όγκο). Η προσθήκη μπετονίτη ή ιπτάμενης τέφρας μειώνει το διαχωρισμό των αδρανών και διευκολύνει την άντληση του μείγματος.

*Διαδικασία:* Κατά τη διαδικασία της ένεσης χρησιμοποιούνται αντλίες με μεγάλη διάμετρο ανοίγματος βαλβίδων. Το σύστημα ανάμειξης των υλικών έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από το σύστημα που χρησιμοποιείται για ενέσεις τσιμέντου.

*Πεδίο εφαρμογής:* Αυτός ο τύπος ένεσης βρίσκει εφαρμογή στην πλήρωση εγχοίλων στο έδαφος (πέτρωμα) θεμελίωσης καθώς, και οι ενέσεις “επαφής” στην περίμετρο κατασκευών ή σηράγγων. Επίσης, στην κάλυψη ανωμαλιών της βραχώδους επιφάνειας φραγμάτων (με μικρή ή μηδενική πίεση) και στον εμποτισμό χαλικωδών εδαφών, ανάλογα με την κοκκομετρία της άμμου στο μείγμα  $D_{10}$  χαλίκων  $\approx 20\text{mm}$ . Η αντοχή της κυμαίνεται από 10 έως  $50\text{Kg/cm}^2$  ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νερό.

### Άργιλος / Τσιμέντο

*Υλικά, Αναλογία:* Συνήθως χρησιμοποιείται άργιλος CH με λόγο αναλογίας προς τσιμέντο Portland από 3:1 ως 8:1 (υλικά ξηρά, κατ' όγκο, σε χαλαρή κατάσταση) και λόγο νερού προς αργίλου από 3:1 ως 10:1 κατ' όγκο.

*Διαδικασία:* Ο μεγάλος χρόνος πήξης της ένεσης επιτρέπει τη συνεχή ή διακεκομμένη εκτέλεσή της σε μια γεώτρηση χωρίς κίνδυνο αστοχίας. Η άργιλος πρέπει να κοσκινίζεται πριν από την ανάμειξη των υλικών για να αφαιρούνται τυχόν μεγάλης διαμέτρου κόκκοι.

*Πεδίο εφαρμογής:* Χρησιμοποιείται για να εμποτίσει άμμους με περίπου την ίδια κοκκομετρία που εμποτίζονται από ενέσεις τσιμέντου. Για σχετικά μεγάλα κενά, πλεονεκτεί επειδή η άργιλος βελτιώνει την οικονομία (κόστος) της ένεσης. Η αντοχή της υπολογίζεται περίπου στα 10Kg/cm<sup>2</sup> και εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από την αναλογία νερού προς τσιμέντο (N/T).

### Τσιμέντο / Μπετονίτης.

*Υλικά, Αναλογία:* Γίνεται χρήση αιωρήματος τσιμέντου και μπετονίτη, ο οποίος χρησιμοποιείται για να μειώνει το ρυθμό καθίζησης των κόκκων του τσιμέντου. Οι αναλογίες ρυθμίζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις αντοχής, διαπερατότητας και αντλησιμότητας.

*Διαδικασία:* Για τη διαδικασία της ένεσης προστίθεται μείγμα ξηρού τσιμέντου και μπετονίτη στο νερό και αναμειγνύονται.

*Πεδίο εφαρμογής:* Ο τύπος αυτός ένεσης παρουσιάζει σχετικά μικρή αντοχή και βοηθά στη μείωση της διαπερατότητας των χονδρόκοκκων εδαφών και ρηγματωμένων βράχων. Τέλος, βρίσκει εφαρμογή στην κατασκευή αδιαπέρατων διαφραγμάτων.

### Τσιμέντο Portland

*Υλικά, Αναλογία:* Ο λόγος νερού προς τσιμέντο που χρησιμοποιείται είναι 1:1 ως 4:1. Χρησιμοποιούνται επίσης, διάφορα πρόσθετα όπως μπετονίτης, πυριτικές ενώσεις, ποζολάνες (για μείωση του διαχωρισμού και περιορισμό της εξίδρωσης), χλωριούχο ασβέστιο (για ταχύτερη πήξη) και τέλος, θειολιγνίνη (για βελτίωση της αντλησιμότητας).

*Διαδικασία:* Κατά τη διαδικασία της ένεσης παρουσιάζονται από χαμηλές έως πολύ υψηλές πιέσεις ανάλογα με το βάθος από την επιφάνεια του

εδάφους. Οι αναλογίες νερού προς τσιμέντο (N/T) και οι ποσότητες πρόσθετων στοιχείων είναι μεταβλητές, ανάλογα με τις αλλαγές συνθηκών στο πεδίο. Για την αύξηση του μήκους του εμποτισμού χρησιμοποιείται λεπτό τσιμέντο τύπου III (κόκκοι μικρότεροι των 0,03mm).

*Πεδίο εφαρμογής:* Αυτός ο τύπος ένεσης βρίσκει εφαρμογή σε χονδρόκοκκα εδάφη με  $D_{10} \geq 1$  mm και έχει μεγαλύτερο μήκος εμποτισμού σε χαλαρές από ότι σε πυκνές άμμους. Εμποτίζονται επίσης, ρωγμές βράχων με άνοιγμα από 0,01mm έως 0,06mm ανάλογα με την πίεση, το λόγο νερού προς τσιμέντο και τον τύπο του τσιμέντου. Είναι τέλος, ακατάλληλο για μεγάλα ανοίγματα με υπόγειες ροές μεγάλης ταχύτητας.

### Ασφαλτικά Αιωρήματα

*Υλικά, Αναλογία:* Η διάμετρος των ασφαλτικών κόκκων κυμαίνεται μεταξύ 0,001mm και 0,005mm.

*Διαδικασία:* Η ταχύτητα θρόμβωσης, μετά τον εμποτισμό, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χημεία του εδάφους ή του υπόγειου νερού. Απαιτείται επομένως, λεπτομερής έλεγχος και προσοχή στην εκτέλεση για να επιτευχθεί το επιθυμητό μήκος εμποτισμού.

*Πεδίο εφαρμογής:* Έχουν περιορισμένη χρήση, καθώς προκαλούν μείωση της διαπερατότητας των άμμων με  $D_{10}$  έως 0,1mm και αμελητέα αύξηση της αντοχής.

### **3.3 Ιδιότητες, υλικά και εφαρμοσιμότητα των διαλυμάτων**

Για πολλά χρόνια ο όρος "ένεση με διάλυμα" ήταν συνώνυμος με τη χρήση πυριτικού νατρίου και τη μέθοδο Joosten (μέθοδος δυο δόσεων ή δυο διαλυμάτων). Όμως, έχει αναπτυχθεί ποικιλία εφαρμογών με βάση το πυριτικό νάτριο όπως ακόμη έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλα υλικά που δεν έχουν σχέση με πυριτικό νάτριο. Ανάλογα με τον τύπο του υλικού που χρησιμοποιείται για την παρασκευή τους, διακρίνονται σε πραγματικά διαλύματα και σε κολλοειδή διαλύματα. Τα πραγματικά διαλύματα εμφανίζουν πολύ χαμηλό ιξώδες που παραμένει σταθερό ως την σκλήρυνση του αιωρήματος η οποία επέρχεται απότομα (από μερικά δευτερόλεπτα ως μία ώρα). Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι ρητίνες. Τα διαλύματα που χρησιμοποιούνται έχουν ιξώδες που

κυμαίνεται από 2 ως 10cP, συμπεριφέρονται ως Νευτώνια ρευστά και, γενικά, υφίστανται σημαντική συρρίκνωση, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένες αντοχές. Από τους διάφορους τύπους ρητινών που προτάθηκαν ως υλικά για ενέσεις εμποτισμού, τα φαινοπλαστικά, τα αμινοπλαστικά, τα πολυμερή (αφρώδη υλικά) και τα πολυμεθυλικά ακρυλικά (PMA) χρησιμοποιούνται ακόμη, ενώ τα ακρυλαμίδια και τα λιγνοσουλφονικά δεν έχουν χρησιμοποιηθεί τα τελευταία χρόνια σε γεωτεχνικές εφαρμογές λόγω της τοξικότητάς τους.

Στα κολλοειδή διαλύματα οι κόκκοι των στερεών έχουν μεγαλύτερο μέγεθος από τα μόρια αλλά μικρότερο μέγεθος από τα στερεά των αιωρημάτων ( $0.001\mu\text{m} < d < 0.1\mu\text{m}$ ). Το ιξώδες τους μεταβάλλεται με βάση τα πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται. Αμέσως μετά την ανάμειξη των υλικών, το ιξώδες είναι μικρό και αυξάνεται βαθμιαία κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης, η οποία μπορεί να διαρκέσει από αρκετά λεπτά ως και μερικές ώρες. Η πιο μοντέρνα σύνθεση αυτών των διαλυμάτων έχει ως βάση το πυριτικό νάτριο και προβλέπει κατά κύριο λόγο τη διάλυση πυριτικού νατρίου στο νερό μαζί με έναν ανόργανο (αλουμινικό νάτριο) ή οργανικό (εστέρας) σκληρυντή. Η αντοχή τους εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε πυρίτιο (αύξηση της περιεκτικότητας επιφέρει αύξηση της αντοχής) και τον τύπο του σκληρυντή. Γενικά, τα ενέματα αυτά δεν παρουσιάζουν υψηλές αντοχές και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως για βελτίωση των υδραυλικών χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών.

### *3.3.1 Ιδιότητες των διαλυμάτων*

Για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας ενός διαλύματος, σε σχέση με τις ανάγκες ενός έργου, είναι απαραίτητη η τεκμηρίωση των ιδιοτήτων του. Για την επιλογή υλικού ένεσης λαμβάνονται υπόψη οι μηχανικές ιδιότητες (μηχανική αλλοίωση, μήκος διείδυσης, αντοχή), οι χημικές ιδιότητες (χημική αλλοίωση, έλεγχος χρόνου πήξης, ευαισθησία, τοξικότητα) και οικονομικοί παράγοντες (κόστος, διαθέσιμη ποσότητα).

### Αλλοιώσεις

Όλα τα υλικά ένεσης, που αφού πήξουν και σκληρυνθούν περιέχουν νερό μη χημικά συνδεδεμένο με το υπόλοιπο υλικό, είναι δυνατόν να εμφανίσουν αλλοιώσεις αν υποβληθούν σε συνεχείς εναλλαγές παγετού τήξης



ή ξήρανσης ύγρυνσης. Ο ρυθμός αλλοίωσης ή καταστροφής του υλικού ένεσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την έκταση των φαινομένων αυτών. Πάντως πρόβλημα ξήρανσης δεν υπάρχει κοντά ή κάτω από τον υπόγειο ορίζοντα και ο παγετός δεν εκτείνεται περισσότερο από 1,5 ως 3,0 m σε βάθος από την επιφάνεια του εδάφους εκτός από περιοχές με ακραίες κλιματολογικές συνθήκες. Αλλοιώσεις λόγω χημικών διεργασιών εμφανίζονται στις περιπτώσεις που το υλικό ένεσης (α) αντιδρά με ουσίες στο έδαφος ή στο υπόγειο νερό και σχηματίζει προϊόντα διαλυτά στο νερό, (β) το ίδιο είναι διαλυτό στο νερό, και (γ) είναι χημικά ασταθές.

#### Ικανότητα εμποτισμού εδαφών

Για την εκτίμηση της ικανότητας ενός υλικού ένεσης (διαλύματος) να εμποτίσει έδαφος συγκεκριμένης κοκκομετρίας χρησιμοποιείται το ιξώδες του υλικού. Πολλές φορές αντί κοκκομετρίας εδάφους χρησιμοποιείται η διαπερατότητα.

Χονδρικά ισχύει ότι υλικό με ιξώδες μικρότερο των 2 cp, 5 cp και 10 cp εμποτίζει έδαφος με συντελεστή διαπερατότητας τουλάχιστον 10-4 cm/sec, 10-3 cm/sec και 10-2 cm/sec, αντίστοιχα. Στην κοκκομετρική σύνθεση του εδάφους το κλάσμα κατηγορίας ιλύος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20%.

#### Χρόνος πήξης

Με εξαίρεση τη μέθοδο Joosten, υπάρχει πάντα μια χρονική υστέρηση μεταξύ του χρόνου ανάμειξης των υλικών και της στιγμής που το μείγμα πήζει. Ο χρόνος πήξης εξαρτάται από τις αναλογίες των υλικών στο μείγμα και από τις ποσότητες καταλύτη και άλλων πρόσθετων.

#### Ευαισθησία

Ο χρόνος πήξης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Ο βαθμός που ο χρόνος πήξης ενός υλικού ένεσης επηρεάζεται από συγκεκριμένο παράγοντα ονομάζεται ευαισθησία του υλικού. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν : τη θερμοκρασία, τη διάλυση του υλικού ένεσης στο υπόγειο νερό, τα άλατα στο υπόγειο νερό, τη μεταβολή του pH, τα αιωρούμενα ή μη διαλυτά στερεά.

### Αντοχή

Σημασία έχει η αντοχή του εδάφους μετά τον εμποτισμό και τη σκλήρυνση του υλικού ένεσης και όχι η αντοχή του ιδίου του σκληρυμένου υλικού ένεσης. Στις πιο πολλές εφαρμογές οι ενέσεις γίνονται κάτω από τον υπόγειο ορίζοντα και συνεπώς το ενισχυμένο έδαφος θα είναι πάντα βυθισμένο και κορεσμένο. Άρα θα πρέπει οι εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των παραμέτρων αντοχής να εκτελούνται υπό παρόμοιες συνθήκες. Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης παρέχουν μόνο συγκριτικά στοιχεία. Η μηχανική συμπεριφορά και η αντοχή του ενισχυμένου εδάφους εξαρτάται από το υλικό ένεσης αλλά και από άλλες παραμέτρους όπως η κοκκομετρική σύνθεση και η πυκνότητα του εδάφους. Συνήθως, με την ένεση δεν βελτιώνεται η γωνία εσωτερικής τριβής αλλά προστίθεται "συνοχή" στο έδαφος. Άρα, η βελτίωση της αντοχής είναι σημαντική για μικρά φορτία.

### Τοξικότητα

Πολλές από τις ουσίες που είχαν χρησιμοποιηθεί αλλά και ακόμη διατίθενται στο εμπόριο έχουν χαρακτηριστεί σαν νευροτοξικές, καρκινογόνες, τοξικές κλπ. Οι κατασκευαστές των ουσιών αυτών είναι υποχρεωμένοι να συνοδεύουν τα προϊόντα τους με οδηγίες χρήσης για τον περιορισμό ανεπιθύμητων δράσεων.

### Οικονομικοί παράγοντες

Οι συγκρίσεις κόστους των πρώτων υλών δεν είναι ρεαλιστικές. Το κόστος εφαρμογής μειώνει σοβαρά τις διαφορές κόστους. Έτσι, αν και υπάρχει διαφορά κόστους που μπορεί να είναι της τάξης του 20:1 για υλικά ενέσεων, το κόστος μετά την εκτέλεση των ενέσεων έχει περιορισμένο εύρος τιμών (3:1 συνήθως για τα πιο κοινά υλικά ενέσεων).

#### *3.3.2 Υλικά και σύνθεση των διαλυμάτων*

Το ιδανικό υλικό θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- α) να έχει μορφή σκόνης διαλυτής σε νερό
- β) να είναι φτηνό και να παράγεται από πρώτες ύλες σε αφθονία
- γ) να μην αλλοιώνεται όσο και αν παραμείνει αποθηκευμένο
- δ) να μην είναι τοξικό, να μην προκαλεί σκούριασμα, να μην εκρήγνυται

- ε) μικρού ιξώδους σε μορφή διαλύματος
- στ) μικρής ευαισθησίας (μηδενικής, ιδανικά) σε μεταβολές θερμοκρασίας, σε άλατα συνήθη στο υπόγειο νερό, σε μεταβολές του pH
- ζ) να μην υφίσταται αλλοιώσεις από μηχανικούς ή χημικούς παράγοντες
- η) να έχει υψηλή αντοχή

Ωστόσο, τέτοιο υλικό δεν υπάρχει. Για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να προσδιορίζονται οι ιδιότητες εκείνες που είναι σημαντικές και με βάση αυτές να γίνεται η επιλογή του υλικού ένεσης. Τα υλικά που έχουν σήμερα την ευρύτερη χρήση είναι: διάφορες συνθέσεις με βάση το πυριτικό νάτριο, ακρυλαμίδια, λιγνίτες, φαινοπλαστικά, και αμινοπλαστικά.

#### Συνθέσεις πυριτικού νατρίου

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1950 υπάρχουν διπλώματα ευρεσιτεχνίας για συνθέσεις ένυδρου πυριτικού νατρίου στο οποίο προστίθεται αιθυλική αλκοόλη και /ή φορμαμίδη που ελέγχουν το χρόνο πήξης του υλικού. Βελτιώσεις αυτών των μειγμάτων χρησιμοποιούνται και σήμερα. Η αύξηση της ποσότητας πυριτίου στο μείγμα αυξάνει την αντοχή του εμποτισμένου εδάφους, αλλά αυξάνει ταυτόχρονα και το ιξώδες.

Η χρήση μερικών τύπων πυριτικών ενεμάτων θα πρέπει να γίνεται μετά από προσεκτική εκτίμηση της συμπεριφοράς τους με το χρόνο, εξετάζοντας όλους εκείνους τους παράγοντες που επιδρούν σε αυτήν (θερμοκρασιακές διαφορές, φαινόμενα συναίρεσης και διάλυσης του σκληρυμένου υλικού, περιβαλλοντικές επιπτώσεις). Τονίζεται ότι απαιτείται να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή : α) στην τοξικότητα των μεμονωμένων ρητινικών συστατικών των ενεμάτων, β) στον κίνδυνο διάλυσης του μείγματος του ενέματος στο υπόγειο νερό, οδηγώντας σε παράταση του χρόνου πήξης ή ακόμα και σε αναστολή εκδήλωσης της χημικής αντίδρασης, γ) στην τοξικότητα οποιασδήποτε ουσίας που απελευθερώνεται εντός του υπογείου ύδατος, στις περιπτώσεις όπου εντός του υπό ενεμάτωση γεωυλικού η χημική αντίδραση δεν πραγματοποιείται επιτυχώς.

#### Ακρυλαμίδια

Το πρώτο από αυτά τα υλικά ενέσεων, με εμπορικό όνομα AM-9, ανακαλύφθηκε το 1951. Είναι μείγμα οργανικών μονομερών που μπορεί να

πολυμεριστεί υπό κανονικές θερμοκρασίες. Ο χρόνος πήξης του είναι ευθέως ανάλογος της ποσότητας του καταλύτη που χρησιμοποιείται. Το ιξώδες και η πυκνότητα των διαλυμάτων προσεγγίζουν τις τιμές για καθαρό νερό περισσότερο από κάθε άλλο τύπο χημικού υλικού ένεσης. Γενικά, ενέσεις ακρυλαμιδίων είναι υλικά που προσεγγίζουν τις ιδανικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά συμπεριφοράς που απαιτούνται για ενέσεις χημικών ουσιών. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι τα ακρυλαμίδια είναι νευροτοξικά. Γι' αυτό αρκετά υλικά ενέσεων με βάση ακρυλαμίδια έχουν αποσυρθεί από την αγορά των Η.Π.Α. και κυκλοφορούν μόνο όσα έχουν σχετικά μειωμένη τοξικότητα.

### Λιγνίνες

Οι θειωμένες λιγνίνες είναι υγρό υποπροϊόν της βιομηχανίας επεξεργασίας ξύλου (π.χ. εργοστάσια χαρτιού). Συνεπώς, το προϊόν δεν παράγεται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες και η σύνθεσή του εξαρτάται από τον τύπο της ξυλείας και τη μέθοδο της κατεργασίας του πολτού. Το υλικό ένεσης περιέχει εκτός από τη θειωμένη λιγνίνη και κάποια ένωση εξασθενούς χρωμίου σαν καταλύτη. Αυτή ακριβώς η παρουσία διχρωμικών αλάτων στο μείγμα είναι το πιο μεγάλο μειονέκτημα των υλικών αυτών γιατί τα άλατα είναι τοξικά.

### Φαινοπλαστικά

Οι φαινοπλαστικές ρητίνες προκύπτουν από αντίδραση μιας φαινόλης με μια αλδεΐδη. Σαν υλικό ένεσης χρησιμοποιείται μείγμα της φαινόλης resorcinal και φορμαλδεΐδη. Ο χρόνος πήξης ελέγχεται απλά από το βαθμό διάλυσης των δύο συστατικών. Το pH ελέγχεται με ένα μικρό ποσό υδροξειδίου του νατρίου. Η φενολική ρητίνη βρίσκει εφαρμογή στην λεπτόκοκκη άμμο και τα αμμοχάλικα, με σκοπό τη σύσφιγξη της δομής. Η ακρυλική ρητίνη βρίσκει εφαρμογή σε κοκκώδη εδάφη και λεπτορηγματωμένους βράχους και έχει ως σκοπό τη μείωση της διαπερατότητας και τη βελτίωση της αντοχής. Η εποξική ρητίνη χρησιμοποιείται για ρηγματωμένους βράχους και έχει σαν σκοπό τόσο τη βελτίωση της αντοχής όσο και τη μείωση της διαπερατότητας.

### Αμινοπλαστικά

Τα κύρια συστατικά του υλικού αυτού είναι η ουρία και η φορμαλδεΐδη

και για να ολοκληρωθεί η αντίδραση απαιτείται όξινο περιβάλλον. Επειδή στα εδάφη το περιβάλλον είναι συνήθως βασικό, το πεδίο εφαρμογής είναι περιορισμένο σε περιοχές όπου το pH του εδάφους και του υπόγειου νερού είναι μικρότερο του 7.

#### Πολυμερή (αφρώδη υλικά)

Κυρίως χρησιμοποιείται αφρός πολυουρεθάνης με σκοπό τη σταθεροποίηση ή πλήρωση των τοπικών μεγάλων κενών και την παρεμπόδιση εισροής νερού.

#### *3.3.3 Τυπικές συνθέσεις ενέσεων διαλυμάτων*

##### Πυριτικό νάτριο. Ένεση ενός διαλύματος.

*Υλικά, Αναλογία:* Διάλυμα σε νερό του πυριτικού νατρίου και πηκτικού (π.χ. δισανθρακικό νάτριο).

*Διαδικασία:* Η ανάμειξη των υλικών γίνεται σε αναλογίες που καθορίζονται από τον απαιτούμενο χρόνο πήξης, ο οποίος μπορεί να κυμανθεί από μερικά λεπτά έως αρκετές ώρες.

*Πεδίο Εφαρμογής:* Δεν αποτελεί μόνιμη λύση καθώς, προκαλεί μείωση της διαπερατότητας σε άμμους με  $D_{10} \geq 0,08\text{mm}$  και η αντοχή της ενισχυμένης άμμου είναι πολύ μικρή.

##### Πυριτικό νάτριο. Ένεση ενός ή δύο διαλυμάτων.

*Υλικά, Αναλογία:* Οργανικές ή ανόργανες ουσίες αναμειγνύονται με το πυριτικό νάτριο και ελέγχουν το χρόνο πήξης ή δρουν ως σκληρυντικά. Μερικές φορές γίνεται και χρήση του τσιμέντου Portland.

*Διαδικασία:* Για τη διαδικασία του εμποτισμού γίνεται χρήση μίας ή δύο αντλιών ανάλογα με τον επιθυμητό τρόπο ανάμειξης των υλικών. Παρατηρείται επίσης, ευρύ φάσμα τιμών για το ιξώδες, την αντοχή και το χρόνο πήξης, ρυθμίσεις που γίνονται με βάση τις αναλογίες.

*Πεδίο Εφαρμογής:* Χρησιμοποιείται κυρίως για αύξηση της αντοχής αμμωδών εδαφών και εμποτίζει άμμους με  $D_{10} \geq 0,08\text{mm}$ , οι οποίες παρουσιάζουν αντοχή έως  $15\text{Kg/cm}^2$  και διαπερατότητα της τάξεως  $10^{-4}$  έως  $10^{-5}$  cm/sec.

### Πυριτικό νάτριο. Ένεση δύο διαλυμάτων.

*Υλικά, Αναλογία:* Αποτελείται από διάλυμα πυριτικού νατρίου και χωριστό διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου.

*Διαδικασία:* Κατά τη διαδικασία του εμποτισμού τα δύο υγρά διαλύματα διοχετεύονται στο έδαφος το ένα κατόπιν του άλλου, τα οποία αντιδρούν σχεδόν ακαριαία και παράγεται πυριτικό ασβέστιο. Αυτό που πρέπει να αποφεύγεται είναι η πρόωρη επαφή των διαλυμάτων.

*Πεδίο Εφαρμογής:* Εμποτίζει άμμους με  $D_{10} \geq 0,08\text{mm}$ , μειώνει τη διαπερατότητα και παρατηρείται αντοχή της εμποτισμένης άμμου της τάξης των 30 έως  $50\text{Kg/cm}^2$ .

### Ακριλαμίδια.

*Υλικά, Αναλογία:* Συνήθως διαλύονται σε νερό με αναλογία 7% ως 10%. Ο χρόνος πήξης τους ελέγχεται με καταλύτη (π.χ. ammonium persulfate).

*Διαδικασία:* Για τον εμποτισμό είναι υποχρεωτική η χρήση δύο αντλιών και ο χρόνος πήξης μπορεί να κυμανθεί από δευτερόλεπτα έως κάποιες ώρες. Έχει το χαμηλότερο ιξώδες από όλες τις ενέσεις-διαλύματα. Η πρώτη ύλη, σε σκόνη ή διάλυμα, είναι νευροτοξική, όχι όμως και το τελικό προϊόν.

*Πεδίο Εφαρμογής:* Εμποτίζει άμμους και ιλύες με  $D_{10} \geq 0,013\text{mm}$  και είναι κατάλληλο για περιοχές με έντονες υπόγειες ροές λόγω μικρού χρόνου πήξης. Η αντοχή της εμποτισμένης άμμου είναι της τάξεως των  $5\text{Kg/cm}^2$  με απόκλιση  $\pm 2\text{Kg/cm}^2$ .

### Χρωμιολιγνίνη.

*Υλικά, Αναλογία:* Γίνεται χρήση διάφορων συνδυασμών θειωμένης λιγνίνης και εξασθενών αλάτων χρωμίου συνήθως σε συνδυασμό με όξινα άλατα και άλλους καταλύτες.

*Διαδικασία:* Για τον εμποτισμό μπορεί να γίνει χρήση μίας ή δύο αντλιών και ο χρόνος πήξης, ο οποίος ρυθμίζεται ανάλογα με την ποσότητα του νερού στο μείγμα, κυμαίνεται από ένα λεπτό έως κάποιες ώρες.

*Πεδίο Εφαρμογής:* Η κύρια χρήση του είναι η μείωση της διαπερατότητας των άμμων με  $D_{10} \geq 0,08\text{mm}$ . Η αντοχή της εμποτισμένης άμμου κυμαίνεται από 1 έως  $4\text{Kg/cm}^2$  και η χρήση του είναι περιορισμένη λόγω τοξικότητας των διχρωμικών αλάτων.

### Αμινοπλαστικά

*Υλικά, Αναλογία:* Ουρεία – φορμαλδεΰδη ή άλλες φορμαλδεΰδες που συνήθως πήζουν με ένα άλας οξέως ή οξύ.

*Διαδικασία:* Κατά τη διαδικασία της ένεσης μπορεί να γίνει πρόσμειξη των υλικών, όπως στις περιπτώσεις ενέσεων ενός διαλύματος, ή χρήση δύο αντλιών και μείξη πριν από τη σωλήνωση ένεσης.

*Πεδίο Εφαρμογής:* Το μήκος του εμποτισμού και η αντοχή του εμποτισμένου εδάφους είναι όμοια με τις ενέσεις του πυριτικού νατρίου δύο διαλυμάτων. Είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις ανθρακορυχείων λόγω όξινου περιβάλλοντος, στις Η. Π. Α. ωστόσο, έχει περιορισμένη χρήση καθώς θεωρείται επικίνδυνο για την υγεία.

### Φαινοπλαστικά.

*Υλικά, Αναλογία:* Φαινολικές ρητίνες, οι οποίες συνήθως περιέχουν 150CN (κυανιούχες) και διάφορα άλατα ως πηκτικά.

*Διαδικασία:* Για τον εμποτισμό χρησιμοποιείται ένεση δύο διαλυμάτων. Διατίθενται συνθέσεις με χαμηλό ιξώδες και υψηλή αντοχή.

*Πεδίο Εφαρμογής:* Το μήκος του εμποτισμού και η αντοχή του εμποτισμένου εδάφους βρίσκεται μεταξύ των ακριλαμιδίων και των πυριτικών νατρίων. Η χρήση τους, τέλος, στις Η. Π. Α είναι περιορισμένη καθώς θεωρείται επικίνδυνο για την υγεία.

### **3.4 Υλικά και σύνθεση των κονιαμάτων**

Τα κονιάματα που χρησιμοποιούνται στις ενεματώσεις του εδάφους είναι συνήθως τσιμεντοκονιάματα, στα οποία ως αδρανές υλικό χρησιμοποιείται λεπτή έως μεσαία άμμος. Χαρακτηρίζονται από υψηλή εσωτερική τριβή και χρησιμοποιούνται για ενεματώσεις συμπύκνωσης ή για την πλήρωση κοιλοτήτων, μεγάλων και ανοικτών ρωγμών καθώς επίσης και κενών (σε κοκκώδη εδάφη).

Η τοποθέτηση των κονιαμάτων εντός του εδάφους, γίνεται μέσω βαρύτητας. Επισημαίνεται ότι κατά την επιλογή του τύπου του υδραυλικού συγκολλητικού για το ένεμα, η κοκκομετρική του σύνθεση θα πρέπει να επιλέγεται σε απόλυτη συνάρτηση με τις διαστάσεις των υπάρχουσών ρωγμών

ή των υπαρχόντων κενών του υπό ενεμάτωση εδάφους. Η εργασιμότητα των κονιαμάτων προσδιορίζεται μέσω δοκιμών κάθισης σε καταλλήλως επιλεγμένους κώνους ροής.

Με τον όρο υδραυλικά συγκολλητικά εννοούνται όλα τα τσιμεντοκονιάματα και τα παρόμοια προϊόντα που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενεμάτων με τη μορφή υδάτινου αιωρήματος. Τα πολύ λεπτόκοκκα υδραυλικά συγκολλητικά ή τσιμεντοκονιάματα χαρακτηρίζονται από μέγεθος κόκκου  $d_{95} < 20\text{mm}$  και η κοκκομετρική τους καμπύλη θα πρέπει να είναι πλήρως καθορισμένη. Ειδικότερα, σε κονιάματα, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ενεματώσεις συμπύκνωσης, το ελάχιστο ποσοστό λεπτόκοκκων που διέρχεται από το κόσκινο 0.1mm θα πρέπει να είναι 15%.

Τα τσιμεντοκονιάματα θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των EN 197-1:2000 ΚΑΙ EN 197-2:2000, ενώ οι δοκιμές των υπόκεινται στο EN 196.

### **3.5 Διαδικασία και κριτήρια επιλογής κατάλληλου ενέματος**

Πριν από την επιλογή ενός προγράμματος ενέσεων είναι απαραίτητη η γνώση του τύπου, της έκτασης και των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών των οποίων επιθυμείται η βελτίωση. Έρευνα πεδίου μπορεί να χρειαστεί για τον προσδιορισμό της φύσης, της έκτασης και των αιτιών του προβλήματος που μπορεί να επιλυθεί με ενέσεις. Η θέση και ο όγκος των εδαφικών στρώσεων που θα εμποτιστούν με ενέσεις καθορίζεται με τη βοήθεια γεωτρήσεων και κατάλληλης δειγματοληψίας. Στα δείγματα γίνεται κοκκομετρική ανάλυση και έλεγχος της πλαστικότητας ώστε να ταξινομηθούν σωστά. Πολλές φορές αρκεί ο χαρακτηρισμός και η ταξινόμηση των εδαφών στο πεδίο, κατά τη διάρκεια των γεωτρητικών εργασιών, εφόσον αυτό γίνεται από πεπειραμένο γεωτεχνικό μηχανικό. Η εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών διαπερατότητας για την εκτίμηση της δυνατότητας εμποτισμού ενός εδάφους είναι μάλλον περιορισμένης αξίας εφόσον έχει γίνει κοκκομετρική ανάλυση του υλικού. Αντίθετα, δοκιμές διαπερατότητας πεδίου, και ιδιαίτερα δοκιμές εισπίεσης, δίνουν τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Συνιστάται μάλιστα, η δοκιμή εισπίεσης να γίνεται με ρευστό του ίδιου ιξώδους με το υλικό της ένεσης, με τις ίδιες πιέσεις και όγκους ρευστού όπως και στο προγραμματιζόμενο έργο



βελτίωσης και, τέλος, κατά το δυνατόν με τα ίδια μηχανήματα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση του έργου.

### 3.5.1 Εκτίμηση δυνατότητας πραγματοποίησης ένεσης

Η οικονομικότητα ενός προγράμματος ενέσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ρυθμό με τον οποίο το έδαφος εμποτίζεται από το υλικό ένεσης. Προκαταρκτικές εκτιμήσεις της “ενεσιμότητας” μπορούν να γίνουν με βάση τα παρακάτω :

α) Κοκκομετρία. Ενέσεις αιωρημάτων δεν είναι δυνατόν να γίνουν σε εδάφη με κοκκομετρία λεπτότερη από χονδρόκοκκες άμμους. Για πιο λεπτόκοκκα υλικά, μέχρι και ιλύες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενέσεις χημικών ουσιών ανάλογα με το ιξώδες τους. Εδάφη με κοκκομετρία αργίλου δεν είναι δυνατόν να εμποτιστούν από οποιοδήποτε είδος υλικού ένεσης.

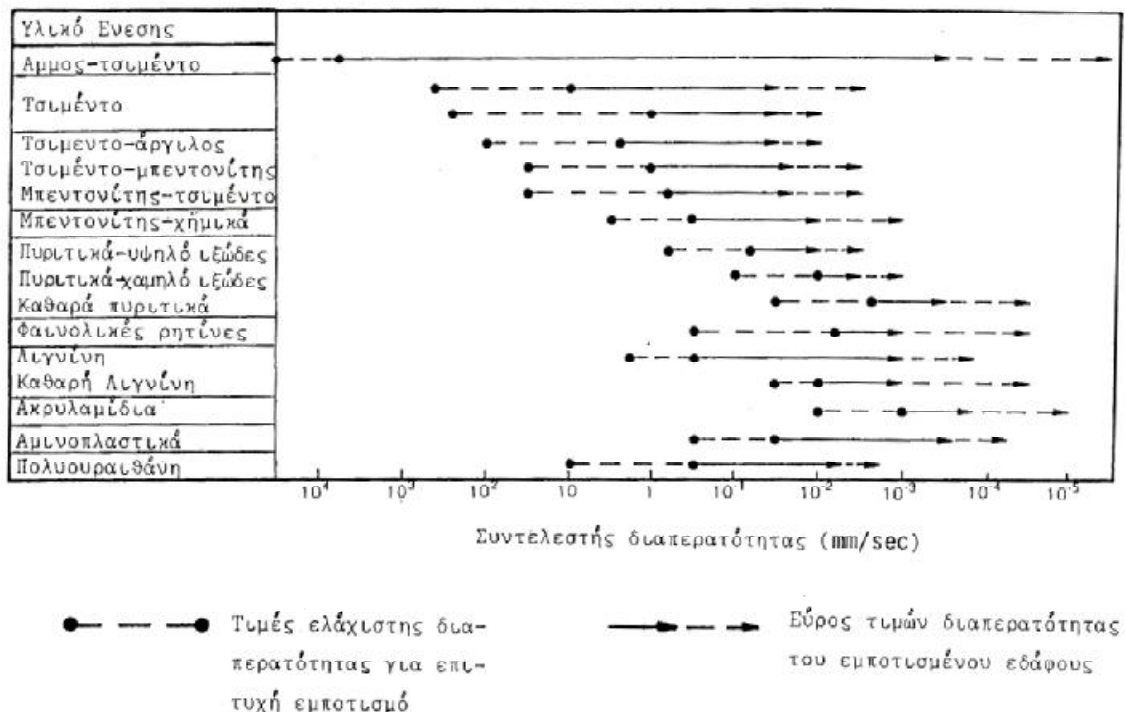
β) Διαπερατότητα. Εδάφη με συντελεστή διαπερατότητας ίσο ή μεγαλύτερο του  $10^{-1}$  cm/sec δέχονται ενέσεις αιωρημάτων. Ενέσεις χημικών ουσιών υψηλού ιξώδους μπορούν να εμποτίσουν εδάφη με συντελεστή διαπερατότητας ως  $10^{-3}$  cm/sec ενώ για μικρότερες διαπερατότητες (ως  $10^{-4}$  cm/sec) χρησιμοποιούνται ενέσεις χαμηλού ιξώδους. Εδάφη με διαπερατότητα ίση ή μικρότερη του  $10^{-5}$  cm/sec δεν εμποτίζονται. Μια ταξινόμηση εδαφών, ανάλογα με την τιμή του συντελεστή διαπερατότητάς τους, παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2. Επίσης, στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται το εύρος των τιμών του συντελεστή διαπερατότητας που απαιτείται για να γίνει εμποτισμός, για διάφορα υλικά ενεμάτων και το αντίστοιχο εύρος τιμών μετά τον εμποτισμό.

γ) Ιξώδες. Χονδρόκοκκες άμμοι και χαλίκια εμποτίζονται, εκτός από ενέσεις αιωρημάτων, και από ενέσεις χημικών διαλυμάτων με ιξώδες έως 50cp. Άμμοι μέσης κοκκομετρικής σύνθεσης εμποτίζονται από χημικά διαλύματα με ιξώδες μικρότερο των 15cp. Λεπτόκοκκες άμμοι και χονδρόκοκκες ιλύες εμποτίζονται από διαλύματα με ιξώδες 5cp και 2cp, αντίστοιχα.

δ) Υλικά Ενέσεων. Χονδρόκοκκες άμμοι εμποτίζονται από αιωρήματα τσιμέντου – αργίλου. Άμμοι μέσης και λεπτής προς μέση κοκκομετρίας εμποτίζονται από υψηλού και χαμηλού ιξώδους ενέσεις με βάση διαλύματα πυριτικού νατρίου. Άλλοι τύποι διαλυμάτων (aminoplasts, phenoplasts) είναι κατάλληλα για λεπτές και μέσες άμμους

**Πίνακας 3.2** Τιμές διαπερατότητας για διάφορους εδαφικούς σχηματισμούς

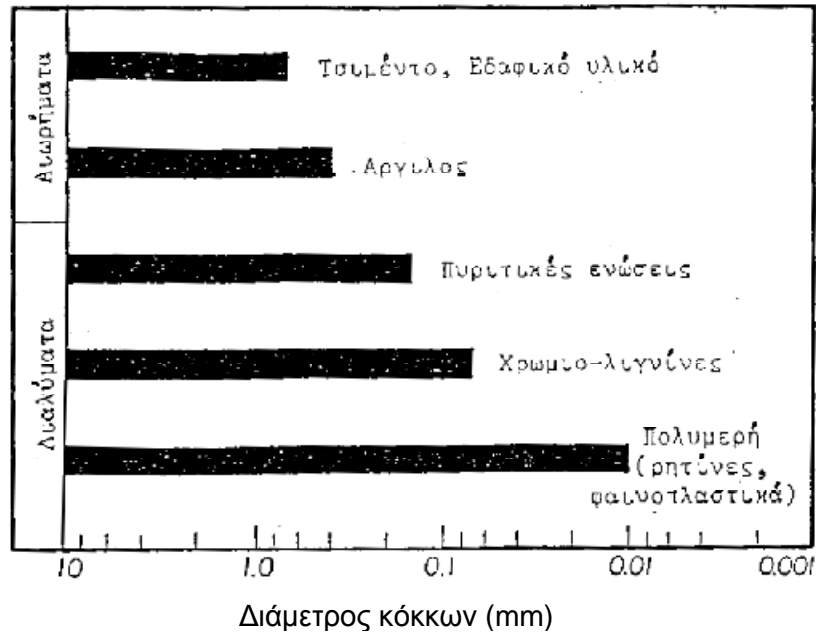
	k (cm/sec)	Αρρηκτο πέτρωμα	Ρωγματωμένο πέτρωμα	Εδαφος
	$10^{-10}$	Αργ. Σχιστόλιθος		Αργίλος ομοιογενής
	$10^{-9}$	Δολομίτης		
	$10^{-8}$	Γρανίτης		
	$10^{-7}$			
Μικρή παροχή-Πτωχή αποστράγγιση	$10^{-8}$	Ψαμμίτης	Ρωγμές πληρωμένες με άργιλο	Λεπτή άμμος, ιλύς, μίγματα άμμου και αργίλου
	$10^{-5}$			
	$10^{-4}$			
	$10^{-3}$			
Υψηλή παροχή-Ελεύθερη αποστράγγιση	$10^{-2}$		Πέτρωμα με διακλάσεις	Καθαρή άμμος-χαλίκια
	$10^{-1}$			
	1		Πολύ ρωγματωμένο πέτρωμα	Χαλίκια
	$10^1$			
	$10^2$			



**Σχήμα 3.1** Δυνατότητα χρήσης διάφορων υλικών ενέσεων ανάλογα με τη διαπερατότητα των εδαφών

ενώ διαλύματα με βάση πολυακρυλαμίδια μπορούν να εμποτίσουν ως και χονδρόκοκκες ιλύες. Το εύρος εμποτισμού με βάση την κοκκομετρία του εδάφους για διάφορα υλικά ενέσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζεται μια πιο ολοκληρωμένη ταξινόμηση του πεδίου εφαρμοσιμότητας των διαθέσιμων ενεμάτων, με βάση τον τύπο του υπό ενεμάτωση εδάφους και τη μέθοδο ενεμάτωσης.



	Χάλικες		Άμμος		Λεπτόκοκκα Εδάφη	
	Λεπτό	Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Χονδρή	Ιλύς
Αυλώματα	Τσιμέντο					
	Μπεντονίτης					
Διαλύματα	Πολυουραιθάνη και πολυακρυλαμίδια					
	Πυριτικές ενώσεις-υψηλού λεξόδους					
	Πυριτικές ενώσεις-χαμηλού λεξόδους					
	Αμινοπλαστικά					
	Φαινοπλαστικά					
	Ακρυλικά					
Ακρυλαμίδια						

**Σχήμα 3.2** Δυνατότητα χρήσης διαφόρων υλικών ενέσεων ανάλογα με την κοκκομετρία των εδαφών

**Πίνακας 3.3** Ενδεικτικοί τύποι ενέματος για διάφορους τύπους εδαφών

Υπό ενεμάτωση έδαφος / συνθήκες	Εύρος εφαρμογής	Ενεματώσεις χωρίς εκτόπιση			Ενεματώσεις με εκτόπιση
		Στεγανοποίηση	Ενεματώσεις ρωγμών ή ενεματώσεις επαφής	Πλήρωση κενών	
Κοκκώδες έδαφος	Χάλικες, χονδρόκοκκες άμμοι και αμμοχάλικα $K > 5 \times 10^{-3}$ m/s	Αιωρήματα καθαρού τσιμέντου, Αιωρήματα με κύριο συστατικό το τσιμέντο			
	Άμμοι $5 \times 10^{-5} < K < 5 \times 10^{-3}$ m/s	Πολύ λεπτόκοκκα αιωρήματα, Διαλύματα			Αιωρήματα με βάση τσιμέντου, κονίαμα
	Μέσο έως λεπτόκοκκες άμμοι $5 \times 10^{-6} < K < 1 \times 10^{-4}$ m/s	Πολύ λεπτόκοκκα αιωρήματα, Διαλύματα, Ειδικά χημικά			
Ρηγματωμένος βράχος	Ρήγματα, ρωγμές, καρστικές μορφές $e^* > 100$ mm		Κονιάματα με κύριο συστατικό το τσιμέντο, Αιωρήματα με κύριο συστατικό το τσιμέντο	Κονιάματα, Αιωρήματα με κύριο συστατικό το τσιμέντο και μικρό χρόνο πήξης. Διογκούμενες πολυουρεθάνες. Άλλα προϊόντα που αντιδρούν με το νερό.	
	Ρωγμές, διακλάσεις $0.1 \text{mm} < e < 100 \text{mm}$		Αιωρήματα με βάση τσιμέντο, Μικρολεπτόκοκκα αιωρήματα		
	Μικρορωγμές $e < 0.1 \text{mm}$		Πολύ λεπτόκοκκα αιωρήματα, Πυριτικά πήγματα (gel), Ειδικά χημικά		
Έγκοιλα	Μεγάλα κενά			Κονιάματα με κύριο συστατικό το τσιμέντο. Αιωρήματα με κύριο συστατικό το τσιμέντο και μικρό χρόνο πήξης, Διογκούμενες πολυουρεθάνες. Άλλα προϊόντα που αντιδρούν με το νερό	

\* e = πλάτος ρωγμής

### 3.5.2 Γεωτεχνική διερεύνηση

Η επιλογή του κατάλληλου κάθε φορά ενέματος γίνεται έχοντας ως βασικό στόχο : α) τον έλεγχο της ενεσιμότητας του εδάφους και β) τον προσδιορισμό των κατάλληλων τύπων ενέματος, τα οποία είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν.

Επισημαίνεται ότι, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις ακόλουθες συνθήκες και γεωτεχνικές ιδιότητες της περιοχής εκτέλεσης των ενεματώσεων :

1. Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των γεωυλικών.
2. Τη θέση, το επίπεδο θεμελίωσης και την κατάσταση υπαρχουσών ή μελλοντικών κατασκευών.
3. Την παρουσία τυχόν ανισότροπων ή διαπερατών οριζόντων, οι οποίοι είναι δυνατόν να επηρεάσουν τις εργασίες των ενεματώσεων.
4. Τον προσανατολισμό, τη συχνότητα και το πλάτος των ασυνεχειών των βράχων, καθώς επίσης τη σύσταση και τη φύση των τυχόν υλικών πλήρωσής τους.
5. Τη θέση και τη φύση πληρωμένων ή κενών εγκοίλων.
6. Την ύπαρξη εμποδίων, τα οποία απαιτούν τη εφαρμογή ειδικών τεχνικών διάτρησης και εκτέλεσης των ενεματώσεων.
7. Την παρουσία και τα χαρακτηριστικά των εδαφών, των οποίων η συμπεριφορά είναι δυνατόν να επηρεασθεί εξαιτίας των εργασιών διάτρησης ή ενεματώσεων με πιθανή εμφάνιση φαινομένων χαλάρωσης, αστάθειας, κατάρρευσης της δομής ή διόγκωσής τους.
8. Τις μεταβολές με το χρόνο της στάθμης των υπόγειων νερών.
9. Την ύπαρξη στρώσεων εντός των οποίων είναι δυνατόν να αναπτυχθεί καθεστώς υπόγειας ροής με μεγάλες υδραυλικές κλίσεις.
10. Την εξέταση της χημικής σύστασης, της οργανικής και βακτηριολογικής περιεκτικότητας των υπόγειων νερών ή των γεωυλικών, εφόσον αναμένονται προβλήματα.

Ιδιαίτερες χρήσιμες πληροφορίες είναι δυνατόν να αποκτηθούν κατά την εκτέλεση των αναγκαίων διατρήσεων και συνεπώς θα πρέπει καθ'όλη τη διάρκειά τους να καταγράφονται συστηματικά οι παρακάτω πληροφορίες :

1. Θέση και αιτία απωλειών του ενέματος.
2. Ζώνες αστάθειας και ληφθέντα μέτρα σταθεροποίησης.

3. Περιοχές απωλειών και εισροών νερού, μετρήσεις του επιστρεφόμενου νερού, το χρώμα του νερού και πιθανές αλλαγές του.
4. Χαρακτηριστικά της κίνησης των στελεχών διάτρησης.
5. Καταγραφή των παραμέτρων διάτρησης στην περίπτωση καταστροφικών γεωτρήσεων.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά τη διερεύνηση περιοχών, όπου πρόκειται να εκτελεσθούν εργασίες ενεμάτωσης γεωυλικών, και οι οποίες χαρακτηρίζονται είτε από επικράτηση συνθηκών μόλυνσης των γεωυλικών, είτε από την ύπαρξη υψηλών τάσεων. Πιο συγκεκριμένα : α) πριν την εκτέλεση ενεματώσεων οργανικών πηγμάτων, θα πρέπει να προηγηθεί βακτηριολογική εξέταση των υπό ενεμάτωση γεωυλικών, αλλά και των υπογείων υδάτων και β) το καθεστώς υψηλών τάσεων θα πρέπει να έχει πλήρως διερευνηθεί πριν την εκτέλεση ενεματώσεων.

### 3.5.3 Επιτόπου δοκιμές διαπερατότητας

Η διαπερατότητα των γεωυλικών είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με τη βοήθεια εκτέλεσης :

- α) επί τόπου δοκιμών διαπερατότητας ή δοκιμές άντλησης μεγάλης κλίμακας
- β) εργαστηριακών δοκιμών σε αντιπροσωπευτικά δείγματα  
ή να εκτιμηθεί έμμεσα μέσω της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της πυκνότητας των γεωυλικών.

Προτείνεται, σε κάθε ερευνητική οπή σε βράχο, να προσδιορίζονται μέσω κατάλληλων δοκιμών, η απορρόφηση νερού καθώς και υδροφόρες ζώνες και τα πιθανά έγκοιλα. Οι προαναφερθείσες δοκιμές είναι δυνατόν να εκτελούνται είτε κατά τη διάνοιξη της οπής, είτε με τη χρήση παρεμβυσμάτων μετά την ολοκλήρωση της διάτρησής της. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον περιορισμό αρτεσιανών υδροφόρων οριζόντων πριν την εκτέλεση των δοκιμών διαπερατότητας.

Οι *επιτόπου δοκιμές διαπερατότητας* ή *δοκιμές εισπίεσης νερού (Pumping in tests)*, αποτελούν τον καταλληλότερο τρόπο εκτίμησης του συντελεστή υδροπερατότητας  $k$  και κυρίως για το τμήμα του υπεδάφους που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή στην ακόρεστη ζώνη, στην περίπτωση των γεωτεχνικών μελετών και χαρακτηρίζονται από την

ταχύτητα εκτέλεσης, τη δυνατότητα συχνής επανάληψης αυτών κατά τη διάρκεια της διάτρησης, αλλά και για την καλή αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Δεν θα πρέπει πάντως να λησμονείται ότι η διαπερατότητα ακόμα και σε ένα ομοιόμορφο σχηματισμό μεταβάλλεται από το ένα σημείο στο άλλο ή ότι η παρουσία στρωσιγένειας υποδηλώνει συνήθως διαφορετική διαπερατότητα κατά την οριζόντια και την κατακόρυφο. Έτσι συνήθως μετράται η διαπερατότητα του πλέον υδροπερατού ορίζοντα. Εν τούτοις, καθώς δεν υπάρχει ικανοποιητική μέθοδος διαφοροποίησης της οριζόντιας από την κατακόρυφη διαπερατότητα, οι τιμές που λαμβάνονται στην ύπαιθρο θεωρούνται αντιπροσωπευτικές του εδαφικού στρώματος σαν σύνολο.

Κατά τις δοκιμές αυτές, είτε εισάγεται μέσα στη δειγματοληπτική γεώτρηση ποσότητα νερού και μετράται το επιβαλλόμενο φορτίο κάτω από δεδομένη πίεση είτε η στάθμη του νερού ανυψώνεται και καταγράφεται ο βαθμός πτώσης μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στη πρώτη περίπτωση πρόκειται για δοκιμές σταθερού φορτίου (Constant head test), ενώ στη δεύτερη για δοκιμές μεταβλητού φορτίου (Falling head test). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρεις κυριότερες δοκιμές που χρησιμοποιούνται στην πράξη:

#### **Δοκιμή MAAG (μεταβλητού φορτίου, για λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά)**

Η απλούστερη μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή υδροπερατότητας είναι η δοκιμή *Maag*, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών, δηλαδή υλικών με χαμηλή υδροπερατότητα.

Σύμφωνα με τη δοκιμή αυτή, παροχετεύεται νερό στη γεώτρηση και μετριέται ο χρόνος που χρειάζεται για να κατέβει η νέα στάθμη που δημιουργήθηκε σε μια πιο χαμηλή θέση. Αν το πρόσθετο υδραυλικό φορτίο σε σχέση με την υδροστατική στάθμη του υδροφόρου είναι σε ένα ύψος περισσότερο από 2 μέτρα, οι μετρήσεις χρόνου - στάθμης γίνονται κάθε φορά που η στάθμη πέφτει περίπου 10 εκατοστά. Αν το φορτίο είναι σε ύψος λιγότερο από ένα μέτρο, οι αναγνώσεις της πτώσης της στάθμης θα γίνονται κάθε 2,5-5 εκατοστά. Οι μετρήσεις συνεχίζονται μέχρι το φορτίο να μη είναι περισσότερο από 1/5 του αρχικού.

Στο Σχήμα 3.3 δίνεται τυπική διάταξη δοκιμής μεταβλητού (πίπτοντος) φορτίου για τις περιπτώσεις που το δοκιμαζόμενο τμήμα βρίσκεται είτε πάνω

από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (περίπτωση α) είτε κάτω από αυτήν (περίπτωση β).

Γενικά ο συντελεστής  $k$  υπολογίζεται με βάση το γενικό τύπο:

$$k = \frac{A}{Ft}$$

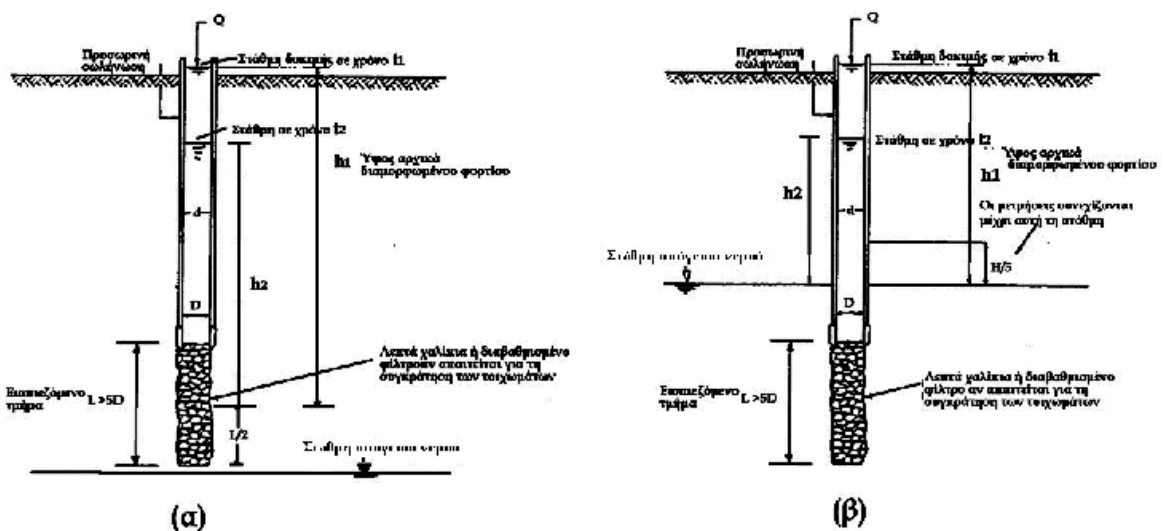
όπου:

$A$  = η διατομή της γεώτρησης στο βάθος εκτέλεσης της δοκιμής,

$F$  = αδιάστατος παράγοντας σχετιζόμενος με τη γεωμετρία της δοκιμής,

$t$  = ο χρόνος εκτέλεσης της δοκιμής.

Ο παράγοντας  $F$  υπολογίζεται με τη βοήθεια διαγραμμάτων, που σχετίζουν τους λόγους  $F/D$  και  $L/D$ .



**Σχήμα 3.3** Τυπική διάταξη δοκιμής μεταβλητού (πίπτοντος) φορτίου (δοκιμή Maag) με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού, (α) κάτω από το εισπνεζόμενο τμήμα της γεώτρησης και (β) πάνω από αυτό

Υπάρχουν διάφορες εκφράσεις του γενικού τύπου υπολογισμού του συντελεστή υδροπερατότητας, όπως:

$$k = \frac{A}{ct} \ln \frac{h_1}{h_2}$$



όπου:

**A** = η διατομή της στήλης του νερού μέσα στη γεώτρηση ( $\pi r^2$  σε  $\text{cm}^2$ ),

**c** = συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμαζόμενου τμήματος, δηλαδή:

**c** =  $4\pi r$  για σφαιρικού σχήματος δοκιμαζόμενο τμήμα, ακτίνας  $r$ ,

**c** =  $2,75d$  όταν το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι η κυκλική επιφάνεια του πυθμένα της γεώτρησης, με  $d$  την εσωτερική διάμετρο της προσωρινής σωλήνωσης στο βάθος της δοκιμής,

**c** =  $2d$  όταν η δοκιμή γίνεται στην επαφή υδροστεγανού – υδροπερατού σχηματισμού,

**c** =  $2\pi L/\ln(2L/D)$  όταν το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με σχέση  $L \geq 5D$ , και τέλος,

**c** =  $2\pi L/\sin^{-1}(L/D)$  όταν το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με σχέση  $5D > L > D/2$ .

**t** = ο χρόνος πτώσης της στάθμης του νερού σε  $\text{cm}$ ,

**$h_1$**  = το αρχικό ύψος της στάθμης πάνω από το επίπεδο αναφοράς,

**$h_2$**  = το τελικό ύψος της στάθμης πάνω από το επίπεδο αναφοράς.

Σαν επίπεδο αναφοράς λαμβάνεται η υδροστατική στάθμη, όταν η δοκιμή γίνεται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (βλέπε Σχήμα 3.4β).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και προκειμένου για δοκιμαζόμενο τμήμα διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με σχέση  $L \geq 5D$ , ο υπολογισμός μπορεί να γίνει βάσει του παρακάτω τύπου:

$$k = \left[ \frac{D}{L} \ln\left(\frac{4L+4D}{D}\right) \right] \times \left[ \frac{1}{8} \frac{D}{T_i} \ln \frac{h_0}{h_1} \right]$$

όπου:

**k** = συντελεστής υδροπερατότητας σε  $\text{cm}/\text{sec}$

**D** = εσωτερική διάμετρος σωλήνα ( $\text{cm}$ )

**L** = ασωλήνωτο τμήμα ( $\text{cm}$ )

**$T_i$**  = χρόνος ( $\text{sec}$ )

**$h_0$**  = υδροστατική στάθμη ( $\text{cm}$ )

$h_1(h_0-E)$ =υπέρ ή υποπίεση (cm), όπου  $E$  = η δυναμική στάθμη στο τέλος της δοκιμής (cm).

Από όλες τις παραπάνω αναφορές και σχολιασμούς διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής εξαρτώνται κυρίως από την καλή γνώση της υδροστατικής στάθμης του υπόγειου νερού, αλλά και των ορίων των υδροφόρων και των μη υδροφόρων στρωμάτων. Γι' αυτό είναι προτιμότερο οι δοκιμές να εκτελούνται αφού έχει προηγηθεί η διερεύνηση της στρωματογραφίας της περιοχής έρευνας.

### **Δοκιμή LEFRANC (σταθερού φορτίου, για αδρόκοκκα εδαφικά υλικά)**

Σύμφωνα με τη μέθοδο *Lefranc*, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αδρόκοκκων εδαφικών υλικών, δηλαδή υλικών με αυξημένη υδροπερατότητα, διοχετεύεται με τη βοήθεια αντλίας νερό στη γεώτρηση έτσι ώστε να διατηρείται η στάθμη σε επιθυμητό ύψος και μετριέται η παροχή σε ορισμένο, προδιαγεγραμμένο χρόνο (π.χ. 5-20 min). Γενικά, ο υπολογισμός του συντελεστή υδροπερατότητας εξαρτάται και εδώ από τη σχέση του εισπιεζόμενου τμήματος της γεώτρησης με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού.

Στο Σχήμα 3.4 δίνεται τυπική διάταξη δοκιμής σταθερού φορτίου για τις περιπτώσεις που το δοκιμαζόμενο τμήμα βρίσκεται είτε πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (περίπτωση α) είτε κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (περίπτωση β).

Γενικά ο συντελεστής  $k$  υπολογίζεται με βάση το γενικό τύπο:

$$k = \frac{Q}{ch}$$

όπου:

$Q$  = η παροχή του νερού σε  $\text{cm}^3/\text{sec}$ ,

$c$  = συντελεστής σχετιζόμενος με τη γεωμετρία του δοκιμαζόμενου τμήματος, ακριβώς όπως αναφέρθηκε στη δοκιμή Maag,

$h$  = το ύψος της φορτίζουσας στήλης, σε cm.

Μια εφαρμόσιμη μορφή του τύπου αυτού για τη συνήθη περίπτωση όπου το δοκιμαζόμενο τμήμα είναι κυλινδρικό διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με σχέση  $L \geq 5D$ , είναι η ακόλουθη:

$$k = \frac{Q}{2p \times L \times H} \times \ln \frac{L}{r}$$

όπου:

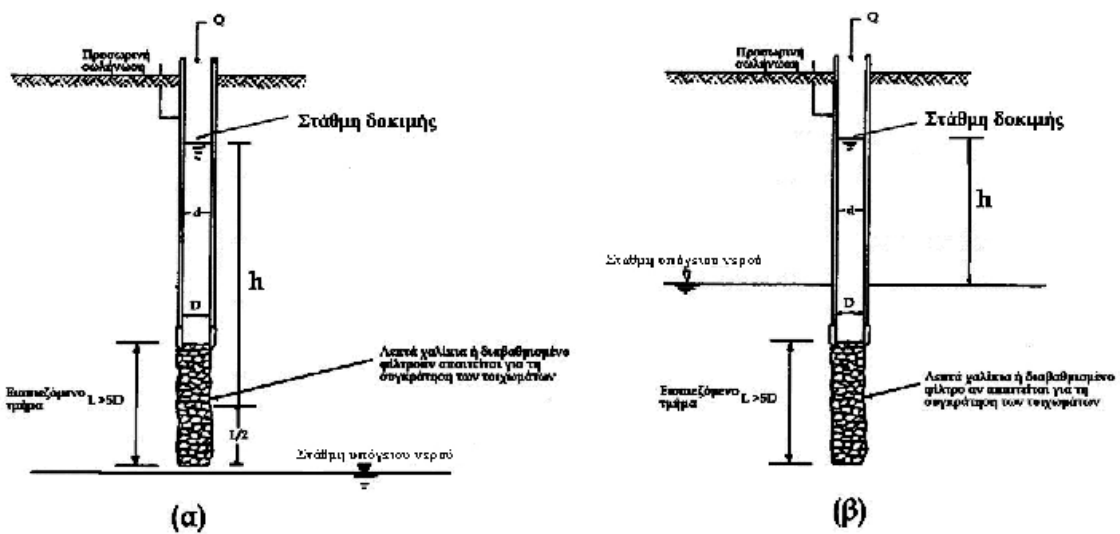
$k$  = συντελεστής υδροπερατότητας σε cm/sec

$Q$  = παροχή (lit/min)

$L$  = ασωλήνωτο τμήμα (cm)

$H$  = πρόσθετο υδραυλικό φορτίο (cm)

$r$  = εσωτερική ακτίνα του σωλήνα (cm).



**Σχήμα 3.4** Τυπική διάταξη δοκιμής σταθερού φορτίου (δοκιμή Lefranc) με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού, (α) κάτω από το εισπνεζόμενο τμήμα της γεώτρησης και (β) πάνω από αυτό

### Δοκιμή LUGEON (για βραχώδεις σχηματισμούς)

Για τους βραχώδεις σχηματισμούς χρησιμοποιούνται οι δοκιμές παρεμβυσμάτων (Packer tests). Πρόκειται για τις δοκιμές που είναι γνωστές με το όνομα Lugeon tests, από το όνομα Γάλλου ερευνητή.

Στη δοκιμή *Lugeon* το δοκιμαζόμενο τμήμα, μήκους συνήθως 3-5m, πάνω από τον πυθμένα της γεώτρησης, απομονώνεται από πάνω με κατάλληλο παρέμβυσμα (packer) το οποίο διογκούμενο με ειδική τεχνική, εφάπτεται ερμητικά με τα τοιχώματα της γεώτρησης, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια

της δοκιμής να μην επιτρέπει διαφυγές νερού. Μετά την απομόνωση, εισπνέζεται νερό από την επιφάνεια του εδάφους με τη βοήθεια αντλίας.

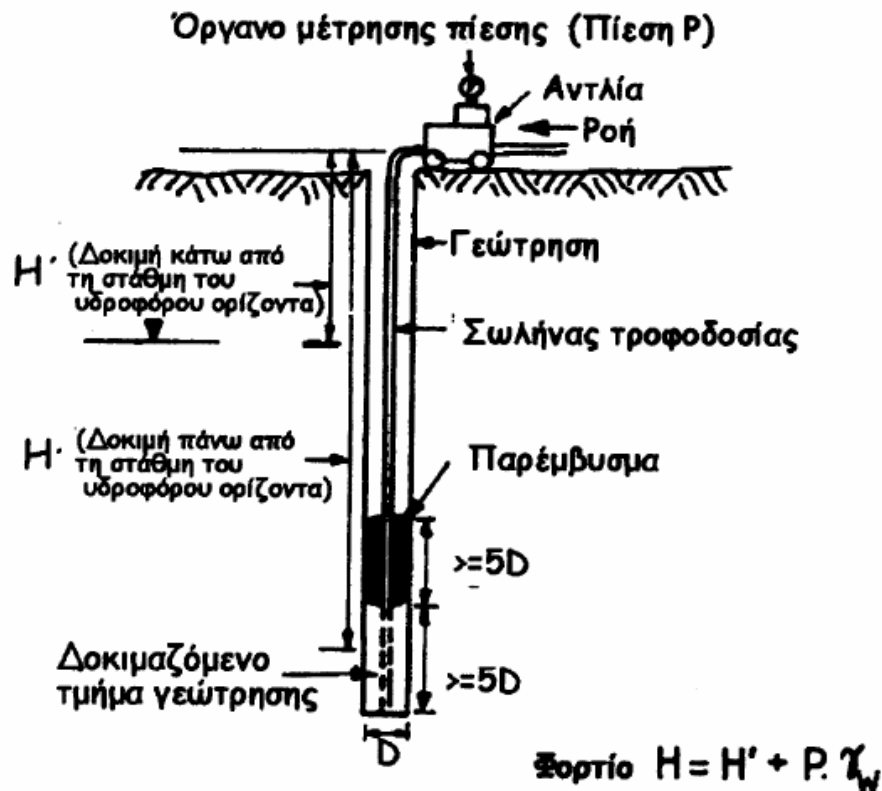
Ένα μανόμετρο, ένας υδρομετρητής και μία βαλβίδα ανακούφισης, προσαρμοσμένα σε κατάλληλο αεριοφυλάκιο (πιεστικό καζανάκι), επιτρέπουν την μέτρηση της ποσότητας νερού που απορροφήθηκε, για κάθε πίεση που εφαρμόστηκε. Η δοκιμή εκτελείται με την εφαρμογή πίεσης κατά βαθμίδες. Για κάθε σταθερή πίεση, η ποσότητα που απορροφάται μετριέται σε μια διάρκεια 5 ή καλύτερα 10min. Η δοκιμή γίνεται με την εφαρμογή κατάλληλα επιλεγμένων πιέσεων για το συγκεκριμένο τεχνικό έργο, σε αύξουσα σειρά μέχρι μια μέγιστη τιμή πίεσης και συνεχίζεται κατά φθίνουσα σειρά με πιέσεις αντίστοιχες της αύξουσας σειράς.

Στην πρόσθετη πίεση που εφαρμόζεται προστίθεται και η πίεση που δημιουργεί η στήλη της δοκιμής (για παράδειγμα δοκιμή σε βάθος 10 μέτρων επιφέρει αύξηση πίεσης κατά μία (1) ατμόσφαιρα), ενώ πρέπει να αφαιρούνται και οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών στην κίνηση του νερού μέσω του δικτύου της δοκιμής. Η τελευταίες είναι συνήθως πολύ μικρές και δύσκολο να μετρηθούν, οπότε και δεν λαμβάνονται υπόψη. Στο Σχήμα 3.5 δίνεται τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon.

Η δοκιμή μπορεί να εκτελεστεί και σε ανιόντα βήματα μέσα σε γεώτρηση που έχει ήδη ανορυχθεί, με τη βοήθεια διπλών παρεμβυσμάτων (Packers), που διογκώνονται με τη βοήθεια παροχέτευσης σε αυτά πεπιεσμένου αέρα. Ακόμα, για να μην αντιμετωπίζονται προβλήματα απωλειών σε πολύ κερματισμένα πετρώματα, χρησιμοποιούνται συστήματα πολλαπλών παρεμβυσμάτων.

Συνήθως στα αποτελέσματα δίνεται η σχέση των απωλειών νερού από το δοκιμαζόμενο τμήμα και των εφαρμοζόμενων βαθμίδων πίεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, ενώ οι μετρήσεις της υδροπερατότητας γίνονται σε μονάδες Lugeon.

Μια μονάδα Lugeon, είναι η υδροπερατότητα που έχει μια βραχώδης μάζα κάτω από πίεση 10 Atm (φορτίο 100m πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα), όταν ένα (1) m γεώτρησης διαμέτρου NX (76 mm) σε αυτή τη βραχομάζα επιτρέπει απώλειες ενός (1) λίτρου νερού ανά λεπτό.



**Σχήμα 3.5** Τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon απλού παρεμβύσματος με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού είτε πάνω από το εισπιεζόμενο τμήμα της γεώτρησης είτε κάτω από αυτό

Εξυπακούεται ότι είναι πολύ δύσκολο η μέγιστη πίεση να ξεπεράσει τις 10 Atm για να έχουμε τις μονάδες Lugeon για το σχηματισμό που εξετάζεται, αλλά και η μετατροπή των μονάδων αυτών σε τιμές του συντελεστή υδροπερατότητας  $k$  είναι πολύ δύσκολη λόγω των στοιχείων τυποποίησης της δοκιμής (δεν λαμβάνεται υπόψη πλήρως η γεωμετρία του εισπιεζόμενου τμήματος κλπ). Επί πλέον η έλλειψη ομοιογένειας στις κερματισμένες βραχομάζες μπορεί να οδηγήσει σε λάθος υπολογισμό του  $k$ . Εν τούτοις, για πρακτικούς λόγους εφαρμογής έχει καθιερωθεί ένας παράγοντας μετατροπής των μονάδων Lugeon σε τιμές συντελεστή  $k$  που εξισώνει ένα (1) Lugeon με  $10^{-5}$  cm/sec ( $10^{-7}$  m/sec).

Γενικά, έχουν διαμορφωθεί διάφοροι τύποι υπολογισμού του συντελεστή  $k$ , όπως αυτός που ακολουθεί:

$$k(\text{cm} / \text{sec}) = \frac{Q}{2p \times L \times P} \times \ln \frac{2L}{D}, \text{ όπου } L \geq 5D$$

και

Q = οι απώλειες σε  $\text{cm}^3 / \text{sec}$  (lit/min),

L = το μήκος του εισπνευζόμενου τμήματος σε cm,

P = η πίεση της δοκιμής σε cm (atm),

D = η διάμετρος της οπής της γεώτρησης σε cm.

Τύποι σαν τον παραπάνω για τη μέτρηση του k χρησιμοποιούνται κυρίως για πορώδη πετρώματα ή πετρώματα με πολύ πυκνό δίκτυο λεπτών ρωγμών και δεν διαφέρουν από αυτούς της μεθόδου Lefranc, καθώς το πέτρωμα εξομοιώνεται με έδαφος αυξημένης περατότητας, αλλά εφαρμόζονται κατ' επέκταση και στις άλλες περιπτώσεις στην πράξη.

Γενικά, η υδροπερατότητα που μετράται κατά τη δοκιμή Lugeon σχετίζεται με τον αριθμό, το εύρος και το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών, αλλά και με τη συμπεριφορά αυτών κατά τη διάρκεια της δοκιμής, δηλαδή αν ξεπλένονται, αποφράσσονται, διαστέλλονται κλπ. Επιπρόσθετα, υπάρχουν πέντε τιμές k για κάθε δοκιμή, δηλαδή όσες και τα βήματα αυτής.

Για το λόγο αυτό, είναι πολύ χρήσιμο κατ' αρχήν από τις τιμές Lugeon, για κάθε βήμα δοκιμής να καθορίζεται ο τύπος ροής και να περιγράφονται τα αποτελέσματα της δοκιμής. Έτσι, μπορεί να βρεθεί ο καλύτερος τρόπος υπολογισμού του συντελεστή υδροπερατότητας. Στον Πίνακα 3.4 δίνονται διαγραμματικά οι πιθανοί τύποι ροής που μπορεί να προκύψουν κατά την εκτέλεση μιας δοκιμής Lugeon και ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστή υδροπερατότητας (Houlsby, 1976), σύμφωνα με τον οποίο η τιμή Lugeon μπορεί να υπολογιστεί κατ' αρχήν από τη σχέση:

$1\text{Lugeon} = \text{οι απώλειες νερού στη δοκιμή (σε lit/min m)} \times 10\text{Atm/πίεση της δοκιμής (Atm)}$ .

**Πίνακας 3.4** Τύποι ροής, περιγραφή αποτελεσμάτων από τη δράση αυτών και καθορισμός του τρόπου προσδιορισμού της υδροπερατότητας

ΠΙΕΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΤΙΜΕΣ ΛΥΓΕΟΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΔΟΚΙΜΗ	ΤΥΠΟΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ
		Ομαλή ροή (Laminar flow): Όλες οι τιμές Lugeon είναι περίπου ίδιες. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των πέντε τιμών
		Τυρβώδης ροή (Turbulent flow): Οι τιμές Lugeon μειώνονται καθώς η πίεση αυξάνει: Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται η τιμή Lugeon που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη πίεση. Παρ/ση: Η ροή είναι πολύ σπάνια πλήρως τυρβώδης.
		Ροή διαστολής (Dilatation): Προκαλείται από το άνοιγμα των ασυνεχειών του πετρώματος στις υψηλές πιέσεις. Αυτό κρίνεται σαν προσωρινή εικόνα και όχι συνθησιαμένη ιδιότητα σε τυπικές πιέσεις του υδατικού νερού. Συνεχώς χρησιμοποιείται η μέση τιμή των δύο χαμηλών ή των δύο μέσων πιέσεων
		Απόκλιση (Wash-out): Τα υλικά πλήρωσης των ασυνεχειών ξεπλένονται από τη ροή του νερού. Εκτιμάται ότι η απόκλιση αυτή είναι σταθερή και χωρίς ανάκαμψη στα πετρώματα. Χρησιμοποιείται η μέγιστη (τελική) τιμή. Παρ/ση: Η κατάσταση αυτή μπορεί να σημαίνει ότι οι τιμές πίεσεως της δοκιμής είναι πολύ υψηλές.
		Πλήρωση ρωγμών (Void filling): Η περίπτωση αυτή προκαλείται με την πλήρωση των κενών από το νερό σε ένα μερικά κορεσμένο βραχώδη σχηματισμό. Εδώ, λαμβάνεται υπόψη η τελική τιμή ή κατά προτίμηση πραγματοποιείται μια δεύτερη δοκιμή για την επιβεβαίωση του κορεσμού.

Οι μονάδες Lugeon ή και οι τιμές του  $k$  που προκύπτουν από αυτές για μια βραχομάζα αποτελούν σημαντικό παράγοντα στην εκτίμηση των διαρροών κάτω από ένα τεχνικό έργο π.χ. φράγμα και κατ' επέκταση στον καθορισμό των μεθόδων περιορισμού των διαφυγών. Σημειώνεται ότι ο χαρακτηρισμός της υδροπερατότητας γίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 3.5. Στον Πίνακα 3.6 δίνεται το εύρος κύμανσης του συντελεστή υδροπερατότητας  $k$  για μερικές από τις πλέον σημαντικές κατηγορίες εδαφών ή και βραχωδών μαζών.

Επισημαίνεται ότι με τη βοήθεια των δοκιμών Lugeon σε βράχο μπορεί να αποκτηθεί μια γενική εικόνα για την υδροπερατότητά του, χωρίς όμως να είναι δυνατόν να καθοριστεί μια αξιόπιστη συσχέτιση με τη δυνατότητα απορρόφησης ενός συγκεκριμένου ενέματος. Την πληροφορία αυτή μπορούν να δώσουν μόνο πραγματικές, δοκιμαστικές ενεματώσεις, η διαδικασία των οποίων περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

**Πίνακας 3.5** Κατηγορίες υδροπερατότητας με βάση το συντελεστή  $k$

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	cm/sec	m/sec
Πολύ Υψηλής Υδροπερατότητας	$> 1$	$> 10^{-2}$
Υψηλής Υδροπερατότητας	$1 - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^{-4}$
Μέσης Υδροπερατότητας	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-4} - 10^{-5}$
Χαμηλής Υδροπερατότητας	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^{-5} - 10^{-7}$
Πολύ Χαμηλής Υδροπερατότητας	$10^{-5} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-9}$
Πρακτικά Αδιαπέρατος	$< 10^{-7}$	$< 10^{-9}$

**Πίνακας 3.6** Κύμανση του συντελεστή υδροπερατότητας (σε cm/sec) για διάφορες κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών

100	10	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$
Καθαρά χαλίκια	Καθαρές άμμοι & αμμοχαλίκια		Πολύ λεπτόκοκκες άμμοι, ιλύες & φυλλώδεις αργιλοϊλύες.		Μη ρωγματομένες άργιλοι & αργιλοϊλύες (με άργιλο $>20\%$ )		Συνεκτικές άργιλοι & χωρίς ρωγμάτωση			
Βραχομάζα πορωδών και σπηλαιωδών βασαλτών ή και σπηλαιωδών ανθρακικών πετρωμάτων		Βραχομάζα ψαμμιτών και κερματισμένων εκρηξιγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων		Βραχομάζα αργιολίθων, ιλυολιθικών σχιστολίθων		Μαζώδη σχιστολιθικών & γρανιτικών πετρωμάτων				
Σχηματισμοί πολύ υψηλής έως υψηλής υδροπερατότητας			Σχηματισμοί υδροπερατότητας				Πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί			
1 Μονάδα Lugeon (1UL) πρακτικά ισοδυναμεί με $k = 1 \times 10^{-5}$ cm/sec										

### 3.5.4 Εκτέλεση δοκιμαστικών ενεματώσεων

Η εκτέλεση δοκιμαστικών ενεματώσεων στοχεύει στον καθορισμό ή στην επιβεβαίωση των αρχών μιας μεθόδου ενεματώσεων. Τονίζεται ότι οι προαναφερθείσες δοκιμές πρέπει να αποτελούν μέρος της αρχικής επί τόπου



γεωτεχνικής διερεύνησης. Εναλλακτικώς, είναι δυνατόν να εκτελεστούν κατά τη διάρκεια της φάσης οριστικής μελέτης ή στο πρώτο μέρος της φάσης των εργασιών κατασκευής. Θα πρέπει να εκτελούνται σε περιπτώσεις όπου οι αρχικές έρευνες, αλλά και η τοπική σχετική εμπειρία δεν είναι αρκετή για να υποστηρίξει και να δικαιολογήσει επαρκώς την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου ενεματώσεων. Οι δοκιμές θα πρέπει να παρέχουν πληροφορίες για την απόσταση των γεωτρήσεων, την εφαρμοζόμενη πίεση ενεμάτωσης, αλλά και τον τύπο και την αναγκαία ποσότητα του ενέματος.

Οι αποφάσεις περί του τρόπου εκτέλεσης των δοκιμαστικών ενεματώσεων θα πρέπει να λαμβάνονται σε στενή συνεργασία με τον μελετητή του τελικού προγράμματος ενεματώσεων. Τα τελικά κριτήρια που αφορούν τις ιδιότητες του προτεινόμενου ενέματος θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την αποκτηθείσα εμπειρία κατά την εκτέλεση των επί τόπου δοκιμών θα γίνονται σχετικές καταγραφές, οι οποίες θα θεωρούνται και ουσιαστικό επιμετρητικό στοιχείο για την πιστοποίηση των εν λόγω εργασιών.

Ενδείξεις περί των επικρατουσών συνθηκών στην περιοχή εφαρμογής των ενεματώσεων είναι δυνατόν να αποκτηθεί μέσω κατάλληλων εργαστηριακών δοκιμών διήθησης δοκιμαστικών ενεμάτων δια μέσω αναμοχλευμένων δειγμάτων των γεωϋλικών της εν λόγω περιοχής. Οι μετρήσεις διαπερατότητας πριν και μετά την ενεμάτωση των προαναφερθέντων δειγμάτων είναι δυνατόν να παρέχουν ενδεικτικές πληροφορίες, οι οποίες θα διευκολύνουν τις απαραίτητες αποφάσεις σχετικά με τη συχνότητα των σημείων ενεμάτωσης, τις επιθυμητές ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου μίγματος και τον απαιτούμενο όγκο του ενέματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΣΕΩΝ

#### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται η διαδικασία και ο απαραίτητος εξοπλισμός, με βάση τα οποία πραγματοποιούνται οι ενεματώσεις του εδάφους.

Για την εκτέλεση των ενεματώσεων γεωϋλικών είναι απαραίτητος ο παρακάτω εξοπλισμός: α) εξοπλισμός διάτρησης και έμπηξης, β) εξοπλισμός ανάμειξης και ανάδευσης, γ) εξοπλισμός άντλησης, δ) σωληνώσεις εισπίεσης, ε) παρεμβύσματα, στ) εξοπλισμός καταγραφών και ελέγχου των ενεμάτων.

Ειδικότερα επισημαίνεται ότι ο εξοπλισμός διαχείρισης των ενεμάτων πρέπει να αντέχει με ασφάλεια τη μέγιστη αναμενόμενη πίεση ενεμάτωσης που πρόκειται να ασκηθεί. Η εκτέλεση των ενεματώσεων και η απαραίτητη συντήρηση του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια των εργασιών ενεματώσεων πρέπει να γίνεται από έμπειρο και εξειδικευμένο προσωπικό.

#### 4.2 Ενέσεις εμποτισμού

##### 4.2.1 Εξοπλισμός διάτρησης

Η διάνοιξη των οπών των ενεματώσεων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με: α) περιστροφική διάτρηση, β) κρουστική διάτρηση, γ) διατρητικά εξαρτήματα όπως τρυπάνια, αρπάγες κλπ.

Τα τρυπάνια κρούσης λειτουργούν με αέρα ή με υδραυλικές σφύρες και χρησιμοποιούνται για διάτρηση σε βράχο. Αποτελούνται από μία κοίλη ράβδο χάλυβα που είναι εφοδιασμένη με ένα σταθερό ή αφαιρέσιμο κομμάτι για το ένα άκρο και ένα κορμό από το άλλο άκρο. Το τρυπάνι κρούσης δεν παλινδρομεί, αλλά προωθείται με κρούση σφύρας στο πίσω άκρο του. Γενικά, η διάτρηση με κρούση χρησιμοποιείται κυρίως για ρηχές γεωτρήσεις, για τις οποίες θεωρείται ως η πιο οικονομική μέθοδος. Ωστόσο, το πλεονέκτημα αυτό μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος της γεώτρησης. Η περιστροφική διάτρηση είναι η διαδικασία κατά την οποία γίνεται προώθηση στην οπή της γεώτρησης ενός περιστρεφόμενου τρυπανιού, το στέλεχος του οποίου είναι ένας κοίλος σωλήνας. Η ταχύτητα περιστροφής κυμαίνεται από περίπου 200-300 έως 3000

στροφές ανά λεπτό ή και περισσότερο. Η πίεση προώθησης εφαρμόζεται υδραυλικά ή μηχανικά. Μέσω του σωλήνα γεώτρησης προωθείται νερό το οποίο αφενός χρησιμοποιείται για την ψύξη του τρυπανιού και αφετέρου για να απομακρύνει τα αποκόμματα από την τρύπα.

Οι εγκαταστάσεις των γεωτρυπάνων ποικίλλουν στο μέγεθος από τις μικρές, ελαφριές μηχανές που είναι ικανές για τη διάνοιξη τρυπών μόνο μερικά εκατοντάδες πόδια σε βάθος, μέχρι στις μεγάλες εγκαταστάσεις γεώτρησης που μπορούν να κάνουν γεωτρήσεις σε μίλια βάθος. Οι μικρές εγκαταστάσεις γεώτρησης είναι συνήθως ικανοποιητικές για τη διάτρηση τρυπών ενέματος και είναι επιθυμητές από τη σκοπιά της φορητότητας ( Σχήμα 4.1)

Ως κοπτικά άκρα των γεωτρυπάνων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι, ανάλογα με το υπό διάτρηση έδαφος. Συνηθέστερα είναι τα κοπτικά άκρα με κομμάτια διαμαντιών ή τα τριγωνικά άκρα με μεταλλικά δόντια. Για μαλακά εδάφη και προσχώσεις χρησιμοποιούνται άκρα με συνεχή ελικοειδή ράβδωση (Auger), κατασκευασμένα από σκληρό χάλυβα ή βολφράμιο-καρβίδιο. Ορισμένοι χαρακτηριστικοί τύποι φαίνονται στο Σχήμα 4.2.



**Σχήμα 4.1** Φορητά γεωτρήματα περιστροφικού τύπου



**Σχήμα 4.2** Τύποι κοπτικών άκρων γεωτρήσεων

Η επιτυχής διάνοιξη οπών σε ασταθή γεωυλικά προϋποθέτει τη στήριξη των τοιχωμάτων τους με εναλλακτική χρήση : α) στηριζόντων διατρητικών υγρών (π.χ. μπετονίτη, νερού, αφρών κλπ.), β) προσωρινής σωλήνωσης, γ) τεχνικών προοδευτικής στήριξης των τοιχωμάτων των οπών κατά τη διάνοιξη.

Επισημαίνεται ότι οι διατρήσεις κάτω από την επιφάνεια του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα πρέπει να γίνονται με διατήρηση αντίθετης σταθερής υπερπίεσης ύδατος ή άλλου στηρίζοντος διατρητικού υγρού.

Σε κάθε περίπτωση η επιλογή των τεχνικών διάτρησης των οπών ενεματώσεων πρέπει να γίνεται με κριτήριο την μη παρεμπόδιση της μετέπειτα εκτέλεσης ενεματώσεων (ειδικά όσον αφορά τις πιθανές μεταβολές της αρχικής διαπερατότητας των γεωυλικών στο σημείο της ενεμάτωσης).

Κατάλληλες τοπικές ρυθμίσεις στον προσανατολισμό και στη διάταξη των οπών ενεμάτωσης πρέπει να γίνονται όπου κρίνονται αναγκαίες. Η διάνοιξη νέων οπών είναι απαραίτητη σε αντικατάσταση όσων έχουν φραχθεί πρόωρα και όσων εμφανίζουν ανεπίτρεπτες γεωμετρικές αποκλίσεις από τις προβλεπόμενες θέσεις τους.

Οι οπές ενεματώσεων βράχου πρέπει να «πλένονται», αμέσως μετά τη διάνοιξή τους, με σκοπό την απομάκρυνση συντριμμάτων και άλλων χαλαρών υλικών, αλλά και την περαιτέρω χαλάρωση των υπαρχουσών ρωγμών και διακλάσεων, εφόσον η εν λόγω βραχόμαζα δεν είναι δυνατόν να επηρεαστεί δυσμενώς από την προαναφερθείσα διαδικασία.

#### *4.2.2 Εξοπλισμός ανάμειξης και ανάδευσης*

##### Παρασκευή του ενέματος

Η αποθήκευση των συστατικών υλικών των ενεμάτων πρέπει να γίνεται κατά τρόπο ώστε αυτά να προστατεύονται ικανοποιητικά από τις καιρικές συνθήκες (ειδικά από τη θερμοκρασία και την υγρασία), αλλά και από πιθανές μολύνσεις. Κατά τον ίδιο τρόπο και η αποθήκευση των προετοιμασμένων ενεμάτων στους ειδικούς χώρους αποθήκευσής των, (δεξαμενές) πρέπει να εξασφαλίζει ότι τόσο οι ρεολογικές όσο και οι υπόλοιπες ιδιότητές τους δεν πρόκειται να διαφοροποιηθούν σημαντικά.

Οι μετρήσεις των δόσεων των επιμέρους συστατικών υλικών των ενεμάτων πρέπει να εκτελούνται με τη βοήθεια ρυθμισμένων μετρητικών συσκευών, σε πλήρη συμφωνία με τις προδιαγεγραμμένες σχετικές ανοχές.

Η επιλογή των κατάλληλων αναμεικτήρων βασίζεται κυρίως στην απαίτηση ότι το τελικό μείγμα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ομοιογενές. Για την αδιάκοπη παράδοση ενεμάτων με στερεά σωματίδια σε αιώρηση, απαιτείται μια δεξαμενή συγκράτησης, η οποία είναι τοποθετημένη μεταξύ των δεξαμενών ανάμειξης και του αντλητικού συγκροτήματος. Το μείγμα εντός της δεξαμενής συγκράτησης πρέπει να αναδεύεται συνεχώς για την αποφυγή διαχωρισμού ή/και πρόωρης πήξης. Ενέματα με ελάχιστο χρόνο πήξης πρέπει να αναμειγνύονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο σημείο της εισπίεσης των εντός των γεωυλικών.

Ένας τυπικός εργοταξιακός εξοπλισμός ανάμειξης και ανάδευσης φαίνεται στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.3** Εξοπλισμός ανάμειξης - ανάδευσης

#### Πρώθηση του ενέματος

Τα συστήματα άντλησης και εισπίεσης των ενεμάτων πρέπει να επιλέγονται σύμφωνα με την ακολουθούμενη τεχνική εισπίεσης. Ειδικότερα για την επιλογή των αντλιών εισπίεσης πρέπει να εξετάζονται τα παρακάτω: α) ο προσαρμοζόμενος ρυθμός παράδοσης του ενέματος, β) η ρύθμιση της

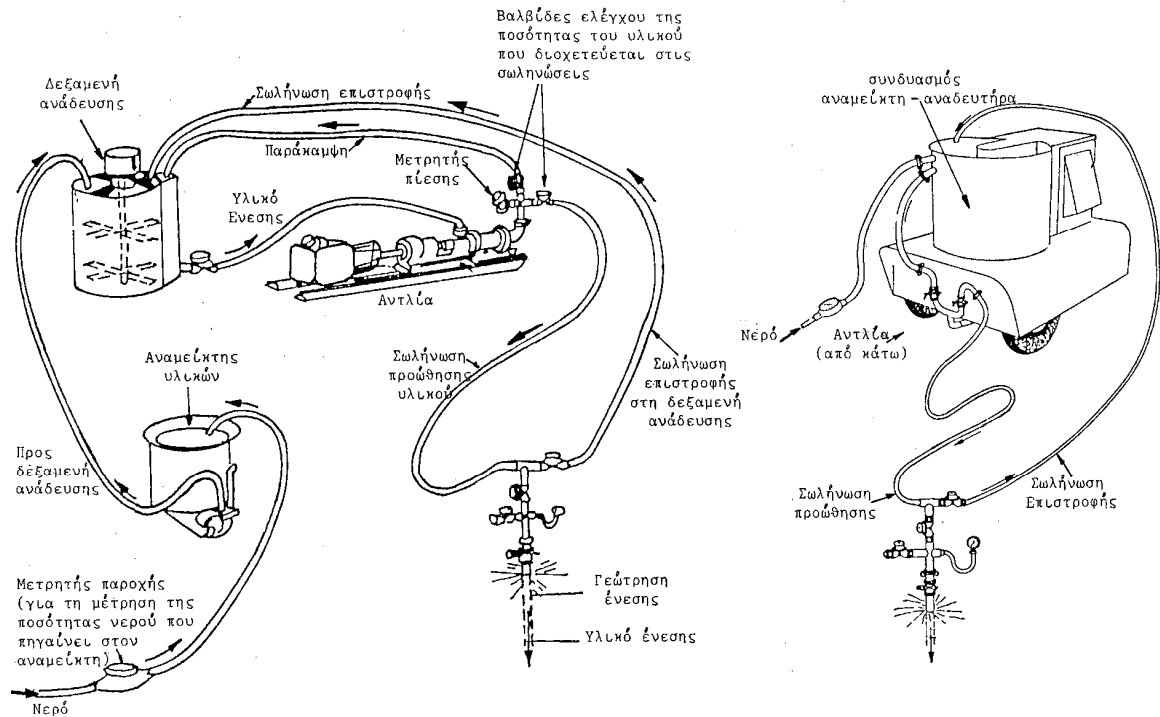
ταχύτητας εισπίεσης του ενέματος, γ) η ευκολία καθαρισμού και συντήρησης των εν λόγω αντλιών, δ) οι διάμετροι των βαλβίδων σύμφωνα με τις απαιτήσεις ιξώδους του εισπνεζόμενου ενέματος.

Η πίεση τοποθέτησης των ενεμάτων εντός των γεωυλικών πρέπει να μετράται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο σημείο έγχυσης.

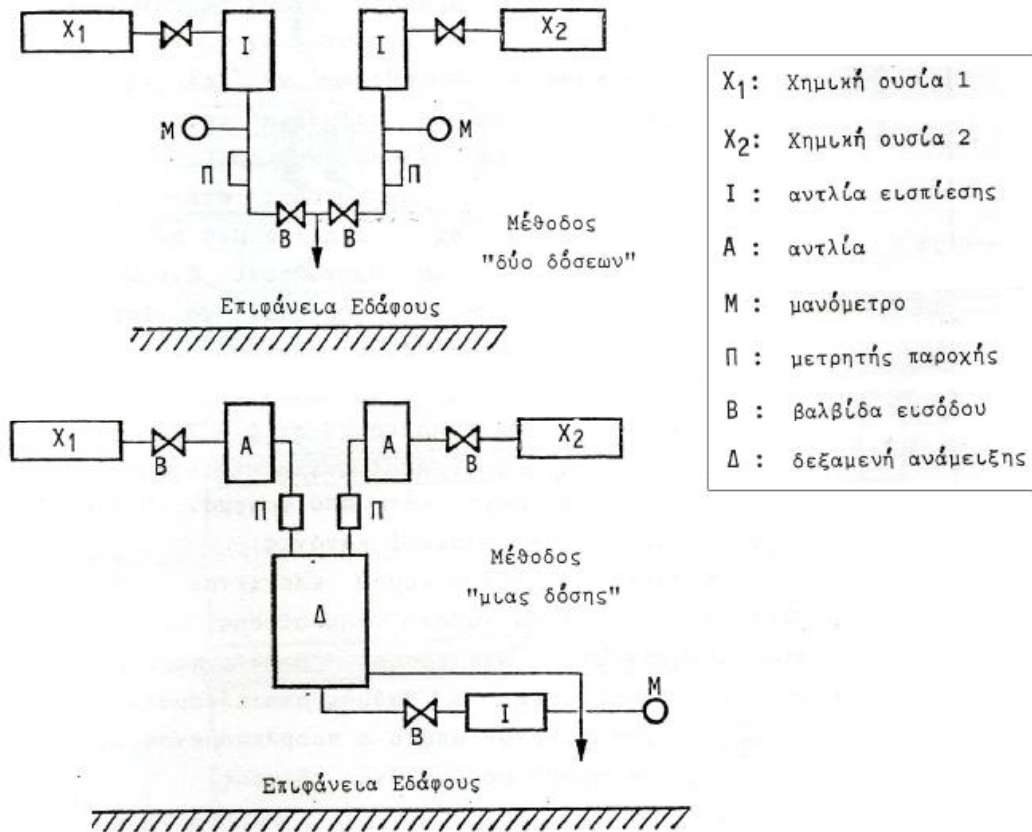
Επισημαίνεται ότι τα χρησιμοποιούμενα συστήματα εισπίεσης των ενεμάτων πρέπει να εξομαλύνουν πιθανές μεταβολές των επιβαλλόμενων πιέσεων, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο πρόκλησης ανεπιθύμητων και μη αντιληπτών υδραυλικών θραύσεων των γεωυλικών.

Οι σωληνώσεις παροχέτευσης των ενεμάτων πρέπει να αντέχουν τη μέγιστη αναμενόμενη πίεση εκ της άντλησης με έναν επαρκή συντελεστή ασφαλείας. Το εσωτερικό των σωλήνων εισπίεσης πρέπει να καθορίζεται στο τέλος της κάθε φάσης έγχυσης των ενεμάτων.

Η ανάδευση των αιωρημάτων είναι αναγκαία μέχρι την εισπίεση τους εντός των γεωυλικών με σκοπό την αποφυγή ιζηματοποίησής των. Επιπλέον, και τα διαλύματα που τείνουν να διαχωρίζονται πρέπει να αναδεύονται μέχρι την εισπίεση τους εντός των γεωυλικών. Ολόκληρη η διάταξη του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την παρασκευή έως την εισπίεση του ενέματος στην οπή της γεώτρησης απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4. Μια παραλλαγή της παρακάτω διάταξης, με διπλές δεξαμενές ανάδευσης χρησιμοποιείται στην περίπτωση χημικών ενεμάτων δύο συστατικών, όπως φαίνεται στο σκαρίφημα του Σχήματος 4.5.



**Σχήμα 4.4** Τυπική διάταξη εξοπλισμού ανάμειξης – ανάδευσης και προώθησης του ενέματος



**Σχήμα 4.5** Διάταξη εξοπλισμού ανάμειξης – ανάδευσης – προώθησης χημικών ενεμάτων

#### 4.2.3 Εξοπλισμός και διαδικασία εισπίεσης

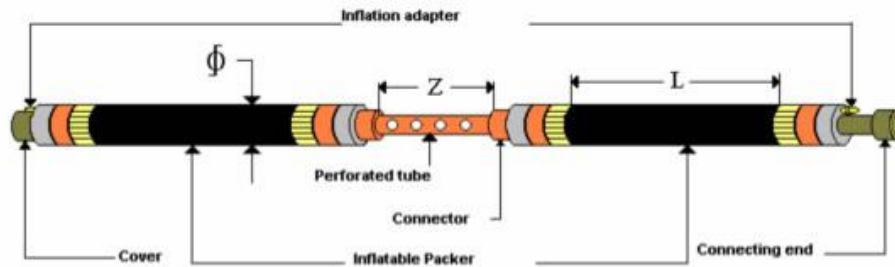
Η μέθοδος εισπίεσης των ενεμάτων καθορίζεται με βάση την κατάσταση του υπό ενεμάτωση γεωυλικού, τις απαιτήσεις των εργασιών ενεμάτωσης, αλλά και τον τύπο του χρησιμοποιούμενου ενέματος. Οι βασικές μέθοδοι τοποθέτησης των ενεμάτων είναι οι παρακάτω :

1. Εισπίεση εντός διανοιχθεισών οπών σε ευσταθή γεωυλικά με ανυποστήρικτα τοιχώματα.
2. Εισπίεση μέσω σωλήνων, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί προηγουμένως σε προσωρινά σωληνωμένες οπές, οι οποίες έχουν διανοιχθεί σε ασταθή γεωυλικά.
3. Εισπίεση μέσω κατάλληλης διάταξης του τρυπανιού διάνοιξης των οπών. Η εν λόγω φάση θεωρείται γενικώς ως φάση προ-ενεμάτωσης και είναι δυνατόν να ακολουθείται από τις μεθόδους 1 ή 2.
4. Εισπίεση διαμέσου σωλήνωσης που ανακτάται κατά τα ανιόντα βήματα.

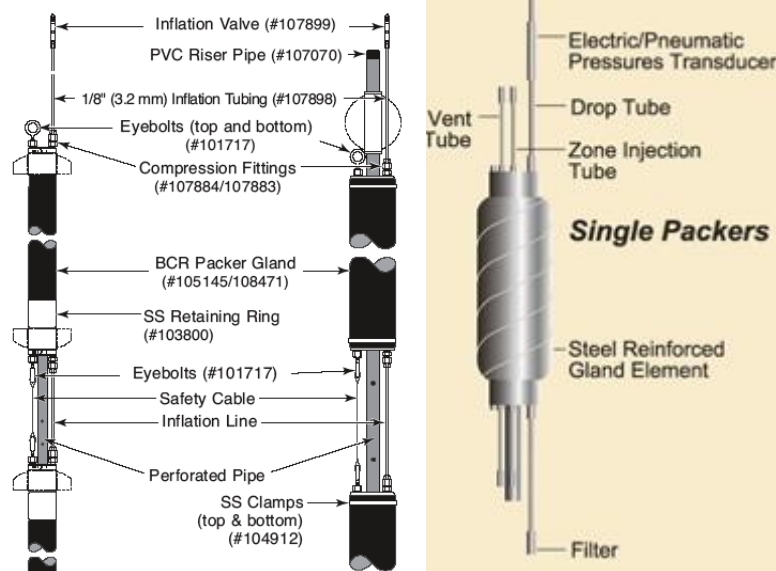
Για την έγχυση των ενεμάτων χρησιμοποιούνται συνήθως διάτρητοι σωλήνες περιβλήματος Tubes-a-Manchette (TaM). Έχουν το πλεονέκτημα ότι κάθε σημείο εγχύσεων μπορεί να επαναεπισκευθεί, ενώ επιτρέπουν καλύτερο έλεγχο των όγκων και των πιέσεων των ενέσεων.

Η έγχυση του ενέματος περιορίζεται σε συγκεκριμένες ζώνες με τη χρήση παρεμβυσμάτων (packers). Με τον τρόπο αυτό η ενεμάτωση πραγματοποιείται κατά προεπιλεγμένα στάδια. Τα παρεμβύσματα που χρησιμοποιούνται είναι διαφόρων τύπων, με κυριότερα αυτά του **εκτάσιμος** τύπος, τα οποία διογκώνονται και φράζουν την οπή της γεώτρησης με μηχανικό τρόπο ή με εφαρμογή πίεσης στο εσωτερικό του. Τα μηχανικά παρεμβύσματα (Σχήμα 4.6) είναι κατάλληλα για ομαλές και λείες οπές σε βραχώδεις σχηματισμούς, ενώ τα παρεμβύσματα πεπιεσμένου αέρα (Σχήμα 4.7) χρησιμοποιούνται ακόμα και σε ακανόνιστου σχήματος οπές, λόγω της ακρίβειας και της προσαρμοστικότητας του.



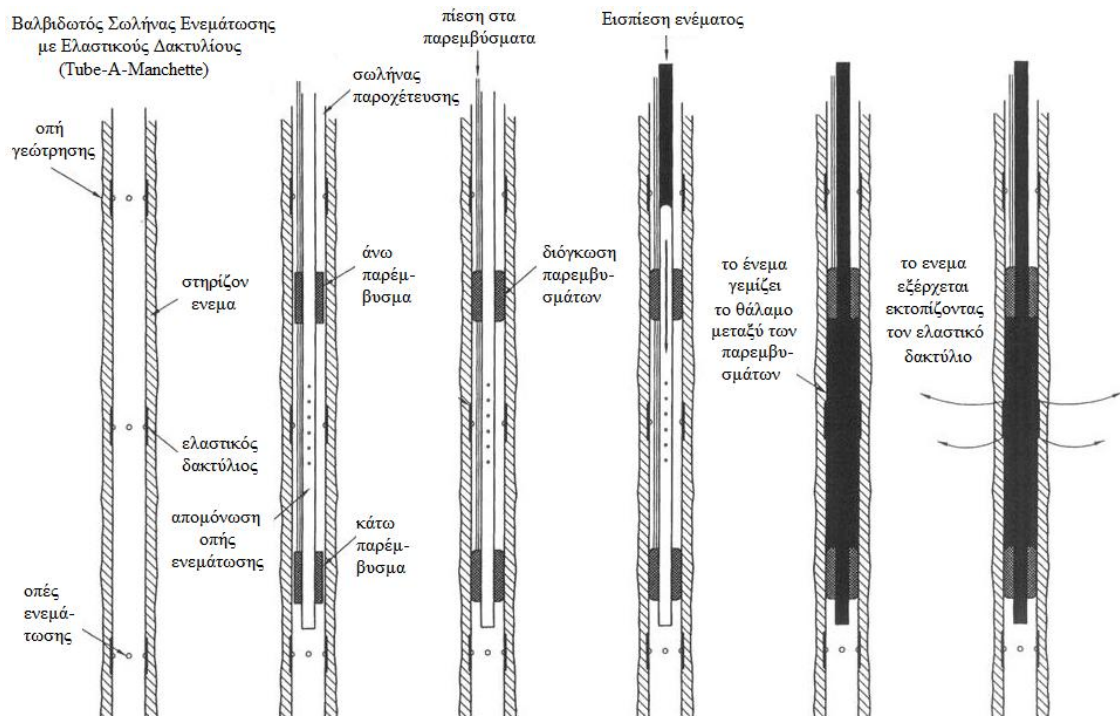
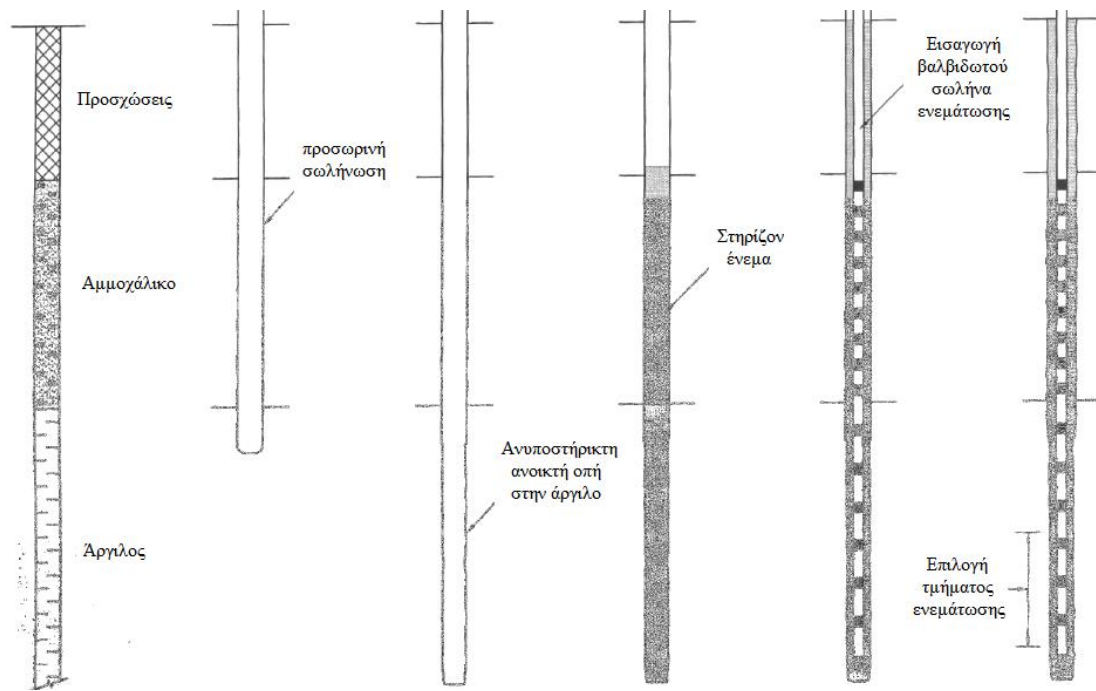


**Σχήμα 4.6** Παρέμβυσμα μηχανικού τύπου

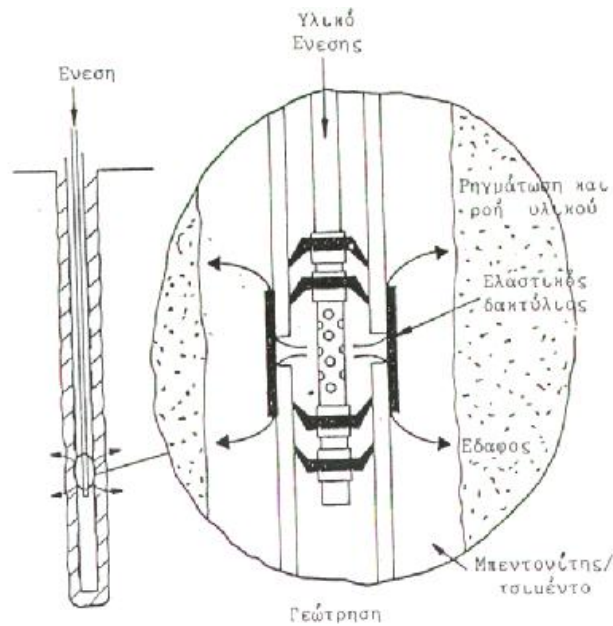


**Σχήμα 4.7** Παρέμβυσμα πεπιεσμένου αέρα

Μια τυποποιημένη διαδικασία, με χρήση τέτοιου σωλήνα ενεμάτωσης, παρουσιάζεται στο παράδειγμα του Σχήματος 4.8. Η οπή της γεώτρησης, αν δεν μπορεί να σταθεί από μόνη της ανοικτή, αντιστηρίζεται προσωρινά με σωλήνωση και στη συνέχεια με ένεμα στήριξης από μπετονιτικό αιώρημα ή από μείγμα μπετονίτη – τσιμέντου, το οποίο εκχύνεται στην οπή με ροή βαρύτητας μέσω χοάνης και σωληνώσεων (σύστημα tremie).



**Σχήμα 4.8** Διαδικασία ενεμάτωσης με χρήση σωλήνα TaM



**Σχήμα 4.9** Λεπτομέρεια του μηχανισμού εισπίεσης

Οι τρόποι εκτέλεσης των ενεματώσεων γεωυλικών συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1. Η έννοια του βήματος ορίζεται ως το προκαθορισμένο μήκος εισπίεσης του ενέματος, του οποίου τα δύο όρια προσδιορίζονται είτε με χρήση δύο παρεμβυσμάτων σε συγκεκριμένες (κάθε φορά) θέσεις, είτε με τη χρήση ενός παρεμβύσματος προχωρώντας συνεχώς από τον πυθμένα της οπής προς το στόμιό της.

**Πίνακας 4.1** Τρόποι εκτέλεσης ενεματώσεων

	ΒΡΑΧΟΣ			ΕΔΑΦΟΣ		
	Σταθερός	Ασταθής				
	Ανοιχτή οπή	Βαλβιδωτός σωλήνας	Διατρητικό Στέλεχος	Βαλβιδωτός σωλήνας	Στέλεχος ή σωλήνωση	
Μονό βήμα	✓		✓	✓		✓
Πολλαπλά βήματα		✓		✓		
Ανιόντα βήματα	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Κατιόντα βήματα		✓	✓	✓		✓

Οι ενεματώσεις εδαφικών υλικών μπορούν να επιτευχθούν με τη βοήθεια σωληνώσεων, στηριζόντων υγρών και βαλβιδωτών σωλήνων. Οι βαλβιδωτοί σωλήνες, των οποίων οι βαλβίδες «σφραγίζονται» εντός του εδάφους με τη χρήση στηρίζοντος υγρού (π.χ. μπετονιτικό αιώρημα), επιτρέπουν την επαναλαμβανόμενη εισπίεση ενέματος, εξαιτίας της μικρής αντοχής της δημιουργούμενης στρώσης φίλτρου στη διεπιφάνεια μεταξύ αυτών των σωλήνων και των τοιχωμάτων των οπών.

Κατά τη διάρκεια ενεματώσεων σε εδαφικές συνθήκες, πρέπει να γίνεται εισπίεση νερού μέσω των παρακείμενων βαλβιδωτών σωλήνων για να αποφεύγεται η διαρροή του ενέματος. Παρεμβύσματα χρησιμοποιούνται για την απομόνωση του κάθε βήματος ενεματώσεων. Τονίζεται ότι τα παρεμβύσματα μπορεί να είναι παθητικά, μηχανικά, πνευματικά και πρέπει να έχουν αρκετό μήκος για τον περιορισμό του κινδύνου παράκαμψης του ενέματος διαμέσου του υπό ενεμάτωση γεωλικού. Επιπλέον, τα παρεμβύσματα πρέπει να εξασφαλίζουν απόλυτο «σφράγισμα» μεταξύ των τοιχωμάτων της οπής και του σωλήνα εισπίεσης κατά την εφαρμογή της μέγιστης πίεσης ενεματώσεων. Μεγάλα ανοίγματα (κενά, έγκοιλα, κτλ.) είναι δυνατόν να πληρωθούν με ενέματα δια βαρύτητας, είτε άμεσα, είτε μέσω ενός σωλήνα έγχυσης, εκτεινόμενου έως το πέρας των εν λόγω ανοιγμάτων.

Κατά την εκτέλεση ενέσεων εμποτισμού στο έδαφος, ένας προκαθορισμένος όγκος του ενέματος εγχέεται σε σχετικά χαμηλές πιέσεις, σε διάφορους ορίζοντες καθ' ύψος της οπής γεώτρησης. Το χαμηλού ιξώδους υγρό ένεμα που εγχέεται στο έδαφος, παραγκωνίζει το νερό των πόρων του εδάφους. Η ροή του ενέματος θα πρέπει να συνεχίζεται μέχρι την πήξη του ενέματος, σχηματίζοντας έναν ομοιόμορφο βολβό (ιδανικές συνθήκες). Βέβαια, λόγω της ετερογένειας και της ανισοτροπίας, συχνά σχηματίζονται ασύμμετροι βολβοί. Για την άντληση του νερού των πόρων που εκτοπίζεται, οι υπόλοιπες οπές γεωτρήσεων, πέριξ της οπής ενεμάτωσης, λειτουργούν ως γεωτρήσεις άντλησης. Η διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί μερικές φορές στο ίδιο σημείο όταν η κατανομή του ενέματος δεν είναι ομοιόμορφη, ώστε όλα τα κενά σταδιακά να κλείσουν, με βάση της επιτόπου παρατηρήσεις.

Το μέγιστο μήκος βήματος ενεματώσεων σε βράχο δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10 m. Ωστόσο, σε συνθήκες έντονα κερματισμένης και διαταραγμένης βραχώμαζας, το προαναφερθέν μήκος πρέπει να ρυθμίζεται

καταλλήλως. Το μέγιστο μήκος βήματος ενεματώσεων σε εδαφικές συνθήκες δεν πρέπει να ξεπερνά το 1 m.

Κατά τη διάρκεια ενεματώσεων σε συνθήκες υπογείου ροής πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα έτσι ώστε να παρεμποδίζονται φαινόμενα σημαντικής αραίωσης ή ολικής απώλειας του ενέματος. Τα μέτρα αυτά τα οποία εξαρτώνται από : α) το υπό ενεμάτωση γεωυλικό, β) το σκοπό της ενεμάτωσης και γ) την παροχή της υπόγειας ροής είναι τα εξής :

- Η χρήση ενέματος με πολύ μικρό χρόνο πήξης (όπως ρητίνες που αντιδρούν με το νερό, ή τσιμεντενέματα με πυριτικό νάτριο).
- Η χρήση ενέματος μεγάλου ιξώδους.
- Η χρήση προσθετικών για τον περιορισμό της αραίωσης του ενέματος.

Συνήθως οι παράμετροι εισπίεσης των ενεμάτων (π.χ. πίεση, όγκος και παροχή) πρέπει να ρυθμίζονται κατά την εκτέλεση των ενεματώσεων για την αποφυγή ανεπιθύμητων μετακινήσεων και παραμορφώσεων του υπό ενεμάτωση γεωυλικού, εκτός εάν αυτό αποτελεί επιδίωξη της όλης διαδικασίας. Επισημαίνεται ότι ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε περιοχές γειτνίασης με ευπαθείς κατασκευές.

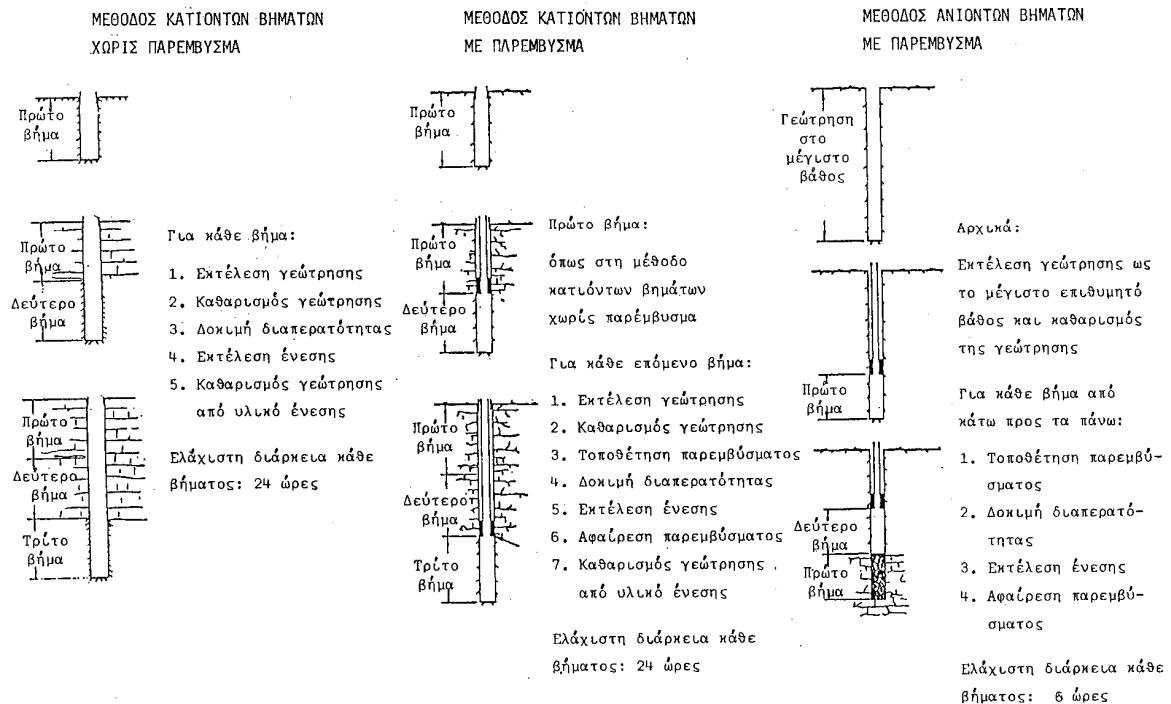
Η παροχή του χρησιμοποιούμενου ενέματος κατά την εκτέλεση ενεματώσεων στεγανοποίησεως πολλαπλών βημάτων εξαρτάται από το ιξώδες του και τα μήκη των βημάτων.

#### *4.2.4 Αλληλουχία ενεματώσεων*

Ο γενικός σχεδιασμός των ενεματώσεων είναι μια συνεχής διαδικασία, καθ'όλη τη διάρκεια των οποίων απαιτείται επί τόπου παρακολούθηση. Πιθανές αποφάσεις που σχετίζονται με αλλαγές στη μέθοδο ενεματώσεων ή στις παραμέτρους των εκτελούμενων ενεματώσεων, όπως και με τη συνέχιση ή τον τερματισμό των ενεματώσεων, πρέπει να λαμβάνονται από κοινού με την επιβλέπουσα αρχή, η οποία θα έχει και την τελική έγκριση όλων των προαναφερομένων.

Οι ενεματώσεις σε κατιόντα βήματα χρησιμοποιούνται συνήθως για τη βελτίωση ασταθούς βραχώμαζας. Εφόσον εκτελούνται ενεματώσεις σε κατιόντα βήματα μέσω διαφορετικών οπών, το ανώτερο στάδιο σε όλες τις οπές διανοίγεται και ενεματώνεται πριν διατρηθεί και ενεματωθεί το επόμενο στάδιο σε όλες τις γειτονικές οπές. Οι ενεματώσεις σε ανιόντα βήματα

χρησιμοποιούνται μόνο σε ανοικτές οπές σε σταθερό βράχο ή εφόσον ο στόχος είναι η υλοποίηση ενεματώσεων συμπύκνωσης.



**Σχήμα 4.10** Ενεμάτωση με ανιόντα και κατιόντα βήματα

Ενεματώσεις πολλαπλών σταδίων με χρήση βαλβιδωτών σωλήνων χρησιμοποιούνται συνήθως σε εδάφη και μερικές φορές σε ασταθείς βραχώμαζες. Η εκτέλεση ενεματώσεων με τη μέθοδο σταδιακού διαχωρισμού της απόστασης μεταξύ των οπών εισπίεσης συνοψίζεται ως εξής :

1. Αρχικά, διανοίγονται και ενεματώνονται οι πρωτογενείς οπές.
2. Στη συνέχεια, διανοίγονται ενδιάμεσως των πρωτογενών οπών, οι δευτερογενείς οπές, δια μέσου των οποίων εκτελούνται εργασίες ενεμάτωσης.
3. Η πύκνωση του δικτύου των προαναφερθεισών οπών ενεμάτωσης περιλαμβάνει τις διανοίξεις τριτογενών ή και τεταρτογενών οπών, μέσα από τις οποίες εκτελούνται εκ νέου εργασίες ενεμάτωσης. Η μέθοδος αυτή είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί :

- για την εξασφάλιση ομοιόμορφης ενεμάτωσης μιας ζώνης και
- για τον καθορισμό, με βάση την αποκτηθείσα εμπειρία, ζωνών, όπου για την επιτυχή ενεμάτωσή τους απαιτούνται πολύ κοντινά τοποθετημένες οπές.

Η διάταξη των πρωτογενών οπών εισπίεσης πρέπει να αποφασίζεται με βάση την εμπειρία ή τα αξιολογημένα αποτελέσματα δοκιμών ενεματώσεων. Σε περιπτώσεις εφαρμογής της προαναφερθείσης μεθόδου του σταδιακού διαχωρισμού της απόστασης των οπών εισπίεσης, η επιλεγμένη ως πρωτογενής οπή αποτελεί και διερευνητική οπή ενέματος (εκτός των περιοχών όπου έχουν προηγηθεί δοκιμές ενεματώσεων), με σκοπό :

- την καλύτερη περιγραφή των γεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών
- την τελική επιλογή του βάθους της οπής ενέματος και για τις υπόλοιπες πρωτογενείς οπές.

Για τον περιορισμό της πλευρικής επέκτασης του ενέματος, εκτός των ορίων της προκαθορισμένης περιοχής ενεμάτωσης, οι εισπίεσεις πρέπει να ξεκινούν στην περίμετρο της υπό εξυγίανση ζώνης και να προχωρούν προοδευτικά προς το εσωτερικό της. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι αυτή η διαδικασία δεν πρέπει να χρησιμοποιείται εφόσον υπάρχει κίνδυνος εγκλωβισμού του υπογείου νερού ή αν ο στόχος των σχετικών εργασιών είναι η εξαγωγή του νερού από τη ζώνη ενεμάτωσης.

#### *4.2.5 Απαιτήσεις καταγραφών, μετρήσεων και ποιοτικών ελέγχων*

Δείγματα των ενσωματούμενων υλικών ενός ενέματος, αλλά και του καθαυτού ενέματος πρέπει να λαμβάνονται συστηματικά και να ελέγχονται καταλλήλως για να επιβεβαιώνεται η συμμόρφωσή τους με τις απαιτήσεις της μελέτης. Τυποποιημένες δοκιμές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για να είναι δυνατή η σύγκριση των χαρακτηριστικών των διαφόρων ενσωματούμενων υλικών που προέρχονται από διαφορετικούς προμηθευτές.

Τα χαρακτηριστικά των ενεμάτων θα πρέπει να ελέγχονται εργαστηριακά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C. Ωστόσο, εάν οι θερμοκρασιακές συνθήκες της περιοχής εφαρμογής των ενεμάτων διαφέρουν σημαντικά από τις προαναφερθείσες συνθήκες του εργαστηρίου, θα πρέπει να γίνονται και επιτόπου δοκιμές, κατά τη διάρκεια των οποίων θα καταγράφονται οι όποιες μεταβολές στη θερμοκρασία.

## Καταγραφές

Όσον αφορά στην καταγραφή στοιχείων για την ενεμάτωση, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ειδικά συστήματα συνδεδεμένα με ηλεκτρονικό υπολογιστή για :

- την παρακολούθηση των διατρήσεων των οπών ενεμάτωσης, η οποία περιλαμβάνει τις μετρήσεις, τους ελέγχους και την ερμηνεία των παραμέτρων διάτρησης.
- τις μετρήσεις και τους ελέγχους των παραμέτρων ενεμάτωσης για τους διάφορους τύπους ενεμάτων, που εισπιέζονται σε κάθε φάση των εργασιών.

Ειδικότερα κατά τη διάρκεια των διατρήσεων των οπών ενεμάτωσης είναι δυνατόν να καταγράφονται αυτομάτως οι ακόλουθοι παράμετροι :

- Ο ρυθμός διείδυσης
- Η πίεση και οι παροχές των υγρών
- Η ανακλώμενη ενέργεια (σε περίπτωση κρουστικών διατρήσεων)
- Η ταχύτητα περιστροφής
- Η εφαρμοζόμενη ροπή στρέψεως
- Η ασκούμενη δύναμη
- Το μήκος της διάτρησης.

Η αξιολόγηση των παραπάνω καταγραφών παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σε σχέση με πιθανές εναλλαγές των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών.

Το σύνολο των καταγραφών με ηλεκτρονικό υπολογιστή θα πρέπει να εκτυπώνεται και σε ικανό αριθμό αντιγράφων, τα οποία θα φυλάσσονται σε ασφαλές μέρος των γραφείων του εργοταξίου, για έλεγχο σε οποιαδήποτε στιγμή. Επισημαίνεται ότι, δειγματοληπτικοί έλεγχοι των παραπάνω καταγραφών θα γίνονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του έργου.

Τονίζεται ότι στο εργοτάξιο θα πρέπει να συντάσσονται τα παρακάτω έγγραφα :

1. Ημερήσια καταγραφή των παρατηρήσεων που αφορούν τη διάτρηση και τις ενεματώσεις
2. Μηνιαία καταγραφή που θα δείχνει την ημερήσια πρόοδο και την κατανάλωση ενέματος



3. Τελική έκθεση αναφοράς που θα περιέχει όλες τις απαραίτητες τεχνικές και ποσοτικές λεπτομέρειες και θα υπογράφεται από τον υπεύθυνο μηχανικό εργοταξίου ή εκπρόσωπό του.
4. Έκθεση με την ολοκλήρωση των εργασιών, στην οποία θα επιβεβαιώνεται ενυπόγραφα από τον Ανάδοχο και την Υπηρεσία η επίτευξη των κριτηρίων αποδοχής των εργασιών, όπως αυτά έχουν προκαθοριστεί από τη μελέτη.  
Όλα τα προαναφερθέντα έγγραφα θεωρούνται ουσιώδη επιμετρικά στοιχεία κατά την πιστοποίηση των εργασιών ενεμάτωσης.

#### Ποιοτικοί έλεγχοι των ενεμάτων

Για τον καθορισμό του βαθμού επιτυχίας της εκτέλεσης των ενεματώσεων, θα πρέπει να εκτελούνται το συντομότερο δυνατό κατάλληλες δοκιμές ελέγχου, έτσι ώστε να παρέχεται ο κατάλληλος χρόνος αντίδρασης σε περίπτωση που διαπιστωθούν τυχόν ανωμαλίες.

Οι δοκιμές ελέγχου των ενεματώσεων εξαρτώνται από τον τύπο των ενεματώσεων και το σκοπό που αυτές εξυπηρετούν. Οι εν λόγω δοκιμές μπορεί να περιλαμβάνουν δοκιμές διαπερατότητας, επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές καθορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών των ενεματούμενων γεωϋλικών, δοκιμαστικές εκσκαφές κτλ. Για τον έλεγχο επίτευξης των στόχων των εργασιών ενεμάτωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα που αναγράφονται κατά την εκτέλεση των διατρήσεων.

### **4.3 Ενέσεις συμπύκνωσης**

#### *4.3.1 Υλικό ενέματος*

Στις ενέσεις συμπύκνωσης χρησιμοποιείται χονδρότερο υλικό με μεγαλύτερο ιξώδες από ότι στα ενέματα εμποτισμού. Συνήθως χρησιμοποιείται μείγμα τσιμέντου - νερού όπου το έδαφος περιέχει κλάσμα ιλύος για να προσδώσει πλαστικότητα στο μείγμα και αρκετά μεγάλο κλάσμα άμμου για να προσδώσει εσωτερική τριβή. Το υλικό της ένεσης δεν εμποτίζει το έδαφος αλλά παραμένει μία ομογενής μάζα της οποίας ο όγκος αυξάνεται. ελεγχόμενος από τον κατασκευαστή έτσι ώστε να προκαλέσει συμπύκνωση χαλαρών εδαφών και/ή “ανύψωση” κατασκευών.

Το υλικό ενέσεων συμπύκνωσης είναι συνήθως μείγμα ιλυώδους άμμου, τσιμέντου και νερού με κάθιση από 25 mm ως 50 mm. Μερικές φορές προστίθενται ιπτάμενη τέφρα, χαλίκια, μπεντονίτης και ουσίες για τη μείωση της απαιτούμενης ποσότητας νερού. Η κοκκομετρική σύνθεση της άμμου είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας στην επιτυχία ενός προγράμματος ενέσεων συμπύκνωσης. Χονδρόκοκκη άμμος προκαλεί διαχωρισμό στερεών-υγρών υπό υψηλές πιέσεις και αποφράξεις στις σωληνώσεις του συστήματος ένεσης. Λεπτόκοκκη άμμος μειώνει τη μακροβιότητα του μείγματος και δυσχεραίνει το χειρισμό του, ενώ αποφεύγεται η ύπαρξη έστω και ελαχίστων ποσοστών αργίλου. Το σύνηθες μείγμα περιέχει περίπου 12% τσιμέντο και παρουσιάζει αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της τάξεως των 30 ως 40 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 4.3.2 Εξοπλισμός - σωλήνωση

Η σύσταση και τα χαρακτηριστικά του υλικού ένεσης δεν επιτρέπουν τη χρήση των αντλιών και του λοιπού μηχανισμού που χρησιμοποιείται για ενέσεις εμποτισμού. Οι συσκευές ανάμειξης και προώθησης του υλικού μοιάζουν περισσότερο με τις χρησιμοποιούμενες για σκυρόδεμα. Η αντλία εισπίεσης (γενικά χρησιμοποιούνται εμβολοφόρες αντλίες) πρέπει να λειτουργεί σε πιέσεις άνω των 40 kg/cm<sup>2</sup> και ίσως άνω των 70 kg/cm<sup>2</sup> και να διοχετεύει υλικό με παροχή από 0 ως 0,06m<sup>3</sup>/λεπτό. Οι σωληνώσεις προσαγωγής του υλικού στη γεώτρηση είναι χαλύβδινες με διάμετρο 38 mm ως 50 mm. Ο σωλήνας της γεώτρησης είναι μεταλλικός με διάμετρο 50 mm ως 100 mm και ασφαλίζεται ώστε να μην επιτρέπει διαρροή του υλικού ένεσης κατά μήκος της εξωτερικής επιφάνειάς του και να μην μετακινείται κάτω από τις υψηλές πιέσεις ένεσης. Την ίδια αντοχή σε υψηλές πιέσεις οφείλουν να έχουν και τα υπόλοιπα εξαρτήματα της συνδεσμολογίας.

Κάθε πρόγραμμα ενέσεων συμπύκνωσης εκτελείται με βάση προσχεδιασμένο κάρναβο γεωτρήσεων ένεσης. Οι αποστάσεις μεταξύ των γεωτρήσεων μειώνονται καθώς το έργο περνά από μια φάση στην επόμενη. Η τελική μικρότερη απόσταση μεταξύ δέσεων ένεσης κυμαίνεται μεταξύ 2 m και 4 m. Τρίτη φάση εκτελείται συνήθως όταν απαιτείται σχετική πυκνότητα εδάφους μεγαλύτερη του 75%.

Αρχική εκτίμηση του απαιτούμενου όγκου υλικού ένεσης γίνεται στη βάση της επιθυμητής μεταβολής της πυκνότητας (δείκτη κενών, πορώδους) του

βελτιούμενου, εδαφικού υλικού. Για παράδειγμα, αυτό επιτυγχάνεται αν είναι γνωστές. Οι τιμές της υπάρχουσας και της επιθυμητής σχετικής πυκνότητας. Οι απαιτούμενες-ποσότητες υλικού ένεσης μπορεί να φθάσουν το 20% του συνολικού όγκου του, υπό βελτίωση εδάφους. Η απαιτούμενη ποσότητα υλικού κατανέμεται περίπου ισόποσα μεταξύ των διαφόρων φάσεων εκτέλεσης του έργου.

Κάθε ένεση διακόπτεται όταν ικανοποιούνται τα κριτήρια που θέτει ο μελετητής του έργου. Τυπικά κριτήρια είναι: (α) η διοχέτευση της προβλεπόμενης ανά ένεση ποσότητας υλικού, (β) η πίεση της αντλίας όταν φτάνει σε οριακό επίπεδο από πλευράς ασφαλείας, (γ) η ανύψωση της επιφάνειας του εδάφους ή οποία υπερβαίνει το όριο (13 mm ως 75 mm).

#### 4.4 Ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης

Το 1980 η επιτροπή Γεωτεχνικής Μηχανικής του Συνδέσμου Πολιτικών Μηχανικών Η.Π.Α. διατύπωσε ως εξής τον ορισμό της μεθόδου ενέσεων με πίδακα (jet grouting): μέθοδος που χρησιμοποιεί ειδική γεωτρητική κεφαλή εφοδιασμένη με ακροφύσια που εκτοξεύουν νερό κατακόρυφα και οριζόντια και προκαλούν διάβρωση-εκσκαφή-κατακερματισμό του εδάφους. Από τα οριζόντια ακροφύσια διοχετεύεται ακολούθως υλικό ένεσης που αναμειγνύεται με τους κόκκους του εδάφους, καθώς η γεωτρητική κεφαλή κινείται προς την επιφάνεια του εδάφους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός όγκου υλικού με υψηλή αντοχή και χαμηλή διαπερατότητα.



**Σχήμα 4.11** Στέλεχος ενεμάτωσης με ακροφύσια υψηλής πίεσης

Η κατασκευή εδαφοπασσάλων με τη μέθοδο της κατευθυνόμενης υπό πίεση δέσμης ενέματος προσδίδει βελτιωμένα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμορφωσιμότητας στις εδαφικές ενότητες εντός των οποίων κατασκευάζονται και συνεπώς, ο σχεδιασμός τους θα πρέπει να βασίζεται απαραίτητως στα διερευνηθέντα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Οι αναγκαίες γεωτεχνικές έρευνες θα πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τις συστάσεις του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 1997-1:2004.

Επισημαίνεται ότι ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις ακόλουθες γεωτεχνικές συνθήκες:

- 1) Μέσης συνεκτικότητας ή σφιχτές αργιλικές στρώσεις ή φακοειδείς ενστρώσεις.
- 2) Υψηλό ποσοστό οργανικών ουσιών.
- 3) Διογκούμενα εδάφη.
- 4) Φυσικά συγκολλημένες εδαφικές στρώσεις ή φακοειδείς ενστρώσεις.
- 5) Συστηματική στάθμη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.
- 6) Παρουσία αρτεσιανού ή επικρεμάμενου υδροφόρου ορίζοντα.
- 7) Υψηλές υδραυλικές κλίσεις σε περιπτώσεις υπόγειας ροής.
- 8) Σχετική πυκνότητα κοκκωδών στρώσεων.
- 9) Έγκοιλα μεγάλων διαστάσεων ή επικρατούσες συνθήκες μεγάλης διαπερατότητας.
- 10) Χημικά απόβλητα.

#### 4.4.1 Μέθοδοι κατασκευής

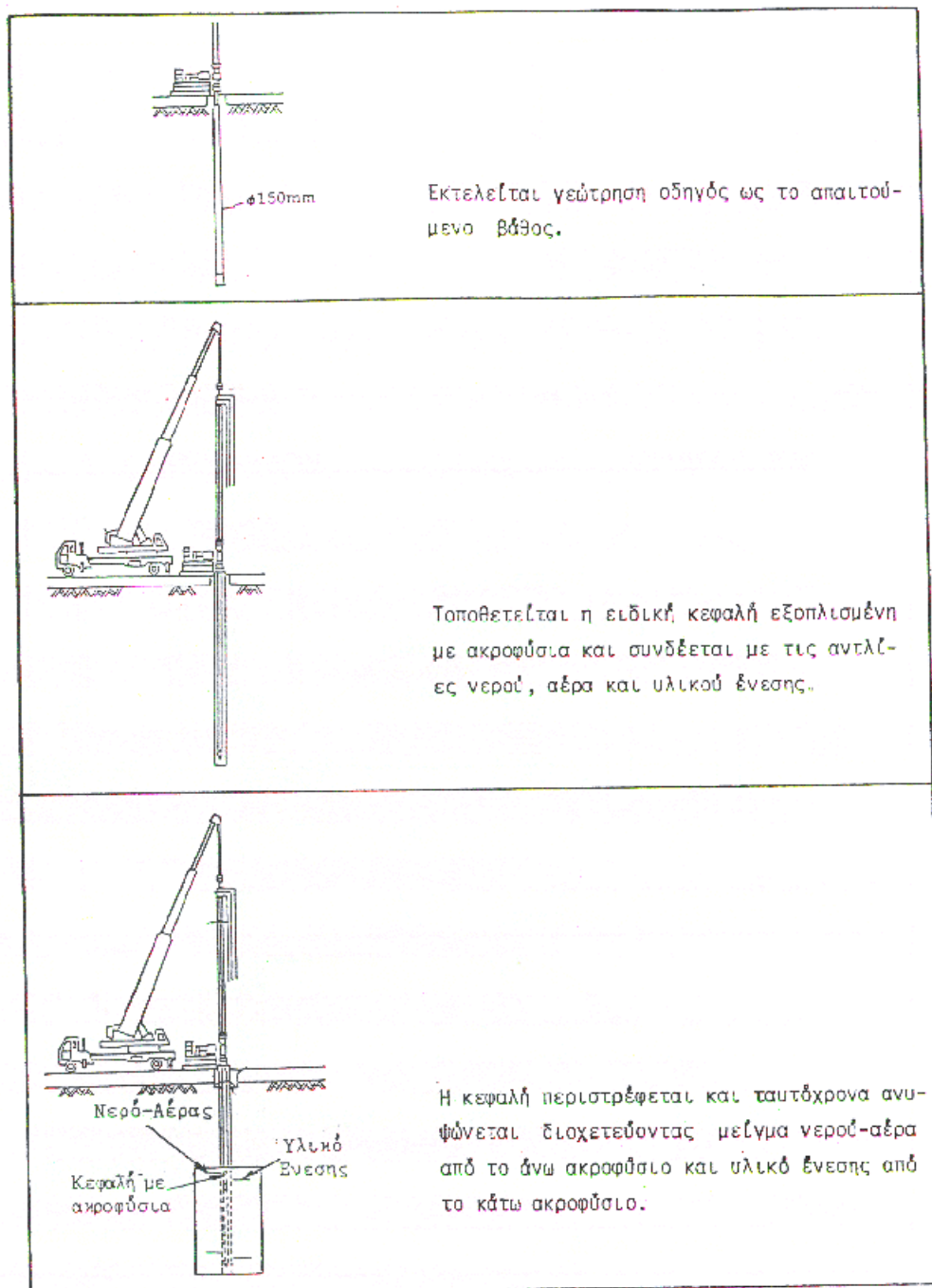
Η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: (α) διάβρωση-κατακερματισμός του εδάφους και ταυτόχρονα ανάμειξή του με το υλικό ένεσης εκτελείται σε γεώτρηση της ίδιας διαμέτρου με τη γεωτρητική κεφαλή και τις ράβδους ή σωληνώσεις της γεώτρησης και "παράγει" ενισχυμένο υλικό σε απόσταση ως 0,5 m από τη γεώτρηση, (β) διάβρωση-κατακερματισμός του εδάφους, απομάκρυνση μέρους του διαβρωμένου όγκου, και ανάμειξη του υπολοίπου εδαφικού όγκου με το υλικό ένεσης εκτελείται σε γεωτρήσεις μεγάλης διαμέτρου και "παράγει" ενισχυμένο υλικό σε απόσταση ως 1,5 m από τη γεώτρηση.

Με βάση τη γεωμετρία, το παραγόμενο ενισχυμένο έδαφος έχει μορφή κυλινδρική (πάσσαλος, φρεατοπάσσαλος, βάθρο) ή επίπεδη (διάφραγμα,

στοιχείο αντιστήριξης). Η κατασκευή εδαφοπασσάλων απαιτεί εξειδικευμένη γνώση και εμπειρία, δεδομένου ότι η εφαρμοζόμενη υψηλή πίεση ενέματος μετατρέπεται στην έξοδο του ακροφυσίου σε κινητική ενέργεια με υψηλές ταχύτητες, με σκοπό την καταστροφή της δομής του περιβάλλοντος γεωυλικού και όχι την εφαρμογή υψηλής πίεσης σε αυτό.

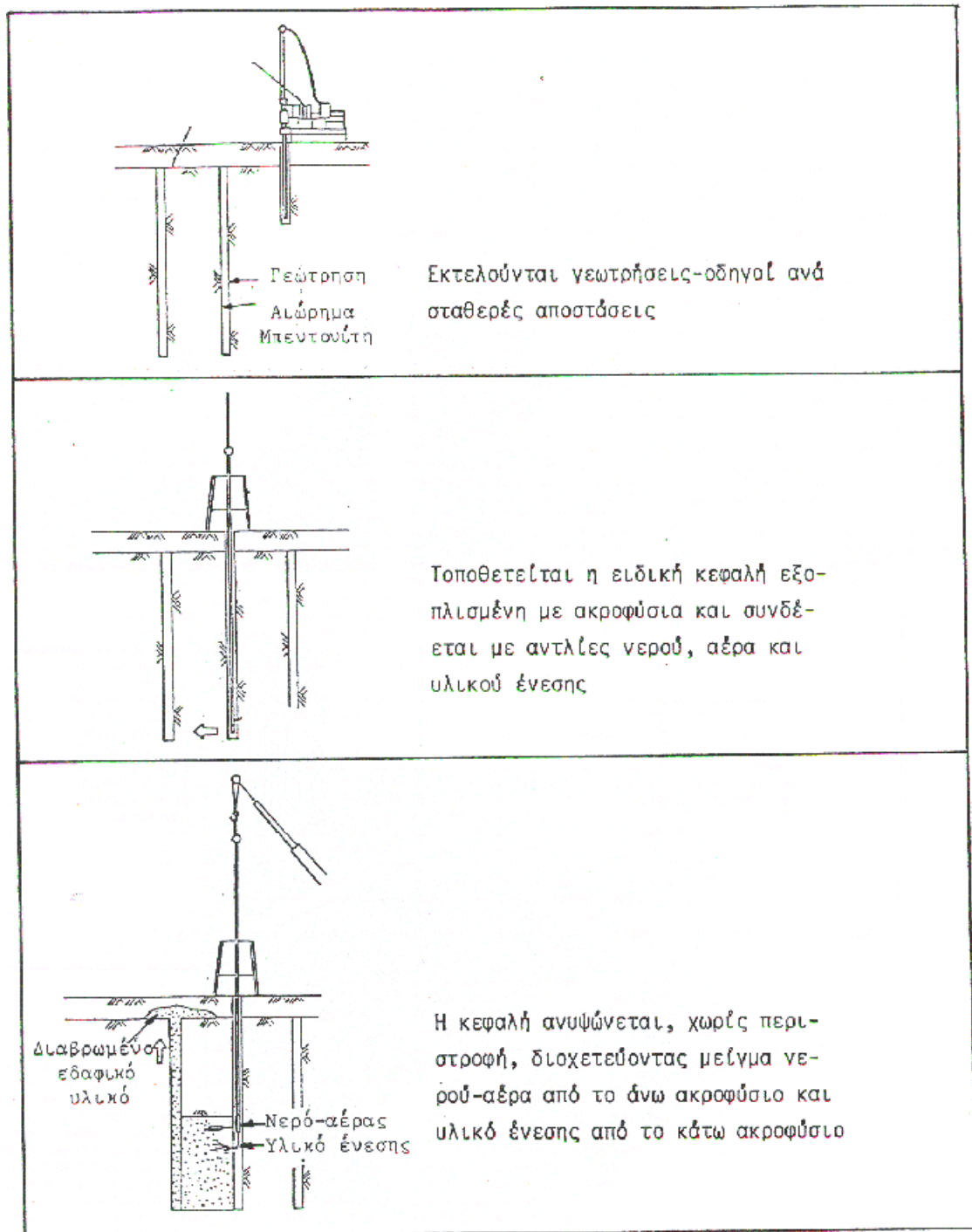
Οι φάσεις κατασκευής των εδαφοπασσάλων (Σχήμα 4.11) περιλαμβάνουν:

- 1) Τη διάτρηση οπής έως το επιθυμητό βάθος κατασκευής των.
- 2) Την παραγωγή τσιμεντενέματος.
- 3) Την εισπίεση τσιμεντενέματος από τα στελέχη με ταυτόχρονη ανάσυρση και περιστροφή τους υπό συνθήκες προκαθορισμένης γωνιακής ταχύτητας και ταχύτητας ανάσυρσης, καθώς και με προκαθορισμένες πιέσεις και παροχές ενέματος, νερού, αέρα.



**Σχήμα 4.11** Διαδικασία κατασκευής εδαφοπασσάλων

Ειδικότερα, κατά την κατασκευή επιπέδων φατνωμάτων (Σχήμα 4.12) οι φάσεις είναι οι ίδιες, όπως και για την κατασκευή των εδαφοκολώνων, με τη διαφοροποίηση ότι κατά τη διαδικασία της εισπίεσης του ενέματος γίνεται ανάσυρση χωρίς περιστροφή των στελεχών σε περιορισμένο εύρος γωνιών.



**Σχήμα 4.12** Διαδικασία κατασκευής φατνωμάτων

Επισημαίνεται ότι εναλλακτικές τεχνικές κατασκευής των εδαφοπασσάλων, όπως η προ-εισπίεση, είναι δυνατόν να εφαρμοστούν εφόσον κριθεί αναγκαίο εξαιτίας των επικρατούντων γεωτεχνικών συνθηκών.

Πριν από την έναρξη των εργασιών θα πρέπει να υποβάλλεται η μεθοδολογία κατασκευής των εδαφοπασσάλων, η οποία θα περιέχει κατ' ελάχιστον τα παρακάτω στοιχεία:

- 1) Αναγνώριση και σκοπός των εργασιών κατασκευής εδαφοπασσάλων.
- 2) Περιγραφή των χαρακτηριστικών του γεωυλικού.
- 3) Σύστημα που θα εφαρμοστεί. Η επιλογή του συστήματος κατασκευής των εδαφοπασσάλων εξαρτάται από τις γεωτεχνικές συνθήκες, την απαιτούμενη αντοχή του εδαφοπασσάλου και το μέγεθος της επιθυμητής μέσης διαμέτρου του.
- 4) Παράμετροι πίεσης, παροχής του ενέματος, ταχύτητα ανάσυρσης και περιστροφής των στελεχών.
- 5) Μέτρα προφύλαξης για την αποφυγή μη αποδεκτών καθιζήσεων ή ανυψώσεων, ειδικότερα σε περιπτώσεις παρουσίας γειτονικών κτιρίων.
- 6) Σχηματική εγκατάσταση του εξοπλισμού και σχέδιο διαχείρισης των άχρηστων υλικών που παράγονται κατά τη διαδικασία κατασκευής.
- 7) Διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου.
- 8) Μέτρα απαραίτητα για την εξασφάλιση της κατακορυφότητας της οπής.
- 9) Διαδικασίες, οι οποίες πρέπει να ακολουθούνται στις διακοπές των εργασιών κατασκευής των εδαφοπασσάλων.
- 10) Κατασκευαστικά σχέδια και τεχνικές εκθέσεις.

#### 4.4.2. Εξοπλισμός

Για την εκτέλεση των εργασιών κατασκευής εδαφοπασσάλων είναι απαραίτητος ο παρακάτω εξοπλισμός:

- 1) Σιλό τσιμέντου συνδεδεμένο μέσω κοχλία με αυτόματη διάταξη ζύγισης των ποσοτήτων τσιμέντου.
- 2) Συγκρότημα παραγωγής ενέματος με δυνατότητα παραγωγής τουλάχιστον  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ , που περιλαμβάνει αναμικτήρα βίαιας ανάμιξης και αναδευτήρα.

Το τσιμέντο θα μεταφέρεται από το σιλό σε κατάλληλα διαμορφωμένο ζυγιστήριο ικανότητας από 250 kg έως 1200kg. Η τροφοδοσία σε νερό θα γίνεται αυτόματα μέσω αντλίας και κατάλληλο υδρομετρητή.

Η ανάμειξη ύδατος τσιμέντου θα γίνεται βίαια μέσα σε κατάλληλο αναμικτήρα χωρητικότητας τουλάχιστον 350 l και το ένεμα θα συντηρείται μέχρι τη διοχέτευσή του στην αντλία υψηλής πίεσης σε αναδευτήρα



χωρητικότητας τουλάχιστον  $1\text{m}^3$ . η δυναμικότητα του συγκροτήματος παραγωγής ενέματος δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από  $8\text{ m}^3/\text{h}$ .

Η διάτρηση της οπής μέχρι το τελικό επιθυμητό βάθος θα γίνεται με μια από τις συνήθεις μεθόδους περιστροφικής διάνοιξης οπής. Η διάμετρος της οπής θα είναι τέτοια ώστε το παραμένον κενό μεταξύ διατρητικής στήλης και οπής να επιτρέπει την ευχερή απομάκρυνση των άχρηστων υλικών.

Η απόκλιση του σημείου αρχής της οπής από την θεωρητικώς καθορισμένη θέση θα πρέπει να είναι μικρότερη των 50mm, εκτός εάν η μελέτη έχει καθοριστεί διαφορετικά.

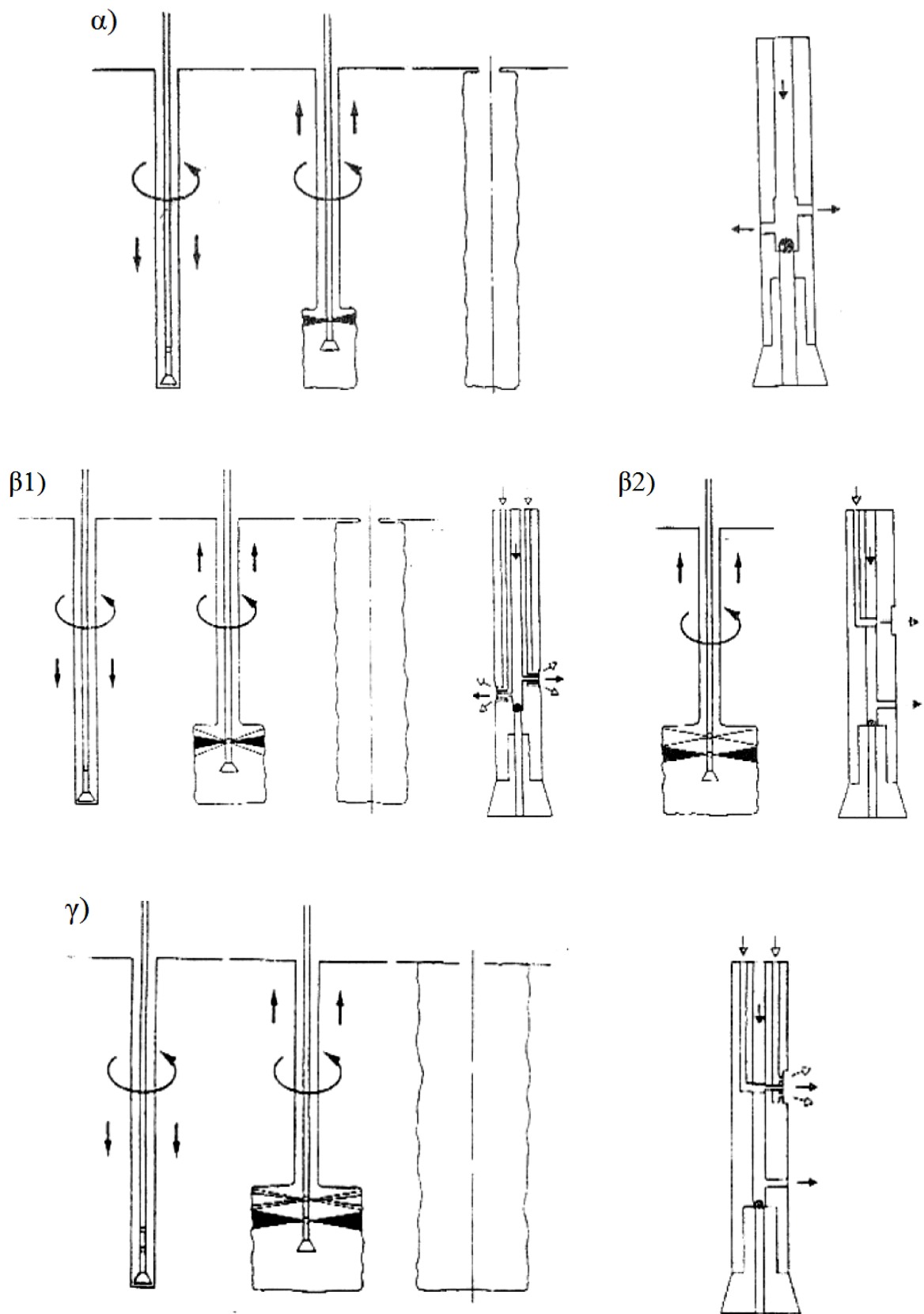
Η απόκλιση της διάτρησης από τον θεωρητικό άξονα δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 2% για βάθη έως 20m. Επισημαίνεται ότι για μεγαλύτερα βάθη θα πρέπει να καθοριστούν μεγαλύτερες ανοχές.

Σε περίπτωση που κατά τη διάτρηση διαπιστωθούν ιδιαίτερα προβλήματα καταπτώσεων ή παρεμπόδισμού της ελεύθερης ροής των επιστρεφόμενων υλικών, θα πρέπει να ληφθούν ειδικά μέτρα.

Στην περίπτωση του μονού συστήματος, μόλις τελειώσει η διαδικασία διάτρησης ενεργοποιείται κατάλληλη βαλβίδα στην κεφαλή του κοπτικού άκρου και η παροχή τσιμεντενέματος διέρχεται πλέον μόνο από τα ακροφύσια με υψηλή πίεση. Αντίστοιχα, εκτοξεύεται νερό ή/και αέρας από τα αντίστοιχα ακροφύσια για τις περιπτώσεις διπλού ή τριπλού συστήματος ( Σχήμα 4.13).

Η εξαγωγή της διατρητικής στήλης γίνεται με τη βοήθεια ενός αυτόματου μηχανισμού. Ο συνδυασμός βήματος και χρόνου σε συνδυασμό με την παροχή συντελούν ώστε να προσδοθεί στο έδαφος η κατάλληλη ποσότητα τσιμέντου με την κατάλληλη ενέργεια ώστε να σχηματιστεί εδαφοπάσσαλος με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Για λόγους αποφυγής υδραυλικής θραύσης, η διαδικασία εισπίεσης δεν θα πρέπει να εκτελείται παρά μόνο εφόσον εξασφαλίζεται η ύπαρξη εδαφικού καλύμματος ικανού ελάχιστου πάχους μεταξύ του άνω ακροφυσίου και της επιφάνειας του εδάφους, δηλαδή 0.5 m για την περίπτωση κατασκευής κατακόρυφων εδαφοπασσάλων και 2.0 m για την περίπτωση κατασκευής οριζόντιων εδαφοπασσάλων.



**Σχήμα 4.13** Ακροφύσια υψηλής πίεσης α) μονού, β) διπλού και γ) τριπλού συστήματος

Εάν για οποιοδήποτε λόγο διακοπεί η διαδικασία εισπίεσης ενέματος, τότε κατά την επανέναρξη της εργασίας αυτής, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να εξασφαλιστεί η συνέχεια του εδαφοπασσάλου.

Οι σωλήνες για τη μεταφορά του ενέματος θα έχουν ελάχιστη διάμετρο  $\frac{3}{4}$ ", θα είναι οπλισμένοι και θα χαρακτηρίζονται από συντελεστή ασφαλείας σε θραύση από 2.5 και άνω.

Θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για την απομάκρυνση των υλικών που εξέρχονται από την οπή, καθώς επίσης να γίνεται οπτικός έλεγχος και δειγματοληψία των υλικών αυτών για την εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας.

Θα πρέπει να ελέγχεται η συνεχής ελεύθερη ροή προς τα άνω. Εάν για οποιοδήποτε λόγο διαφοροποιηθεί η συμπεριφορά των εξερχόμενων υλικών θα πρέπει να επαναπροσδιοριστεί η διαδικασία της μεθόδου.

Σε περίπτωση απρόβλεπτης μείωσης της ποσότητας των εξερχόμενων υλικών θα πρέπει άμεσα να διερευνάται το αίτιό της και να επιλύεται το πρόβλημα, διότι μπορεί να οφείλεται σε φράξιμο της οπής.

Ο οπλισμός του εδαφοπασσάλου μπορεί να τοποθετηθεί στο νωπό τσιμεντένεμα κατά τη διάρκεια της εργασίας ή αμέσως μετά την ολοκλήρωσή του. Εναλλακτικά ο οπλισμός είναι δυνατόν να τοποθετηθεί εκ των υστέρων μέσα σε νέα οπή στο σώμα του εδαφοπασσάλου και αφού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη αντοχή.

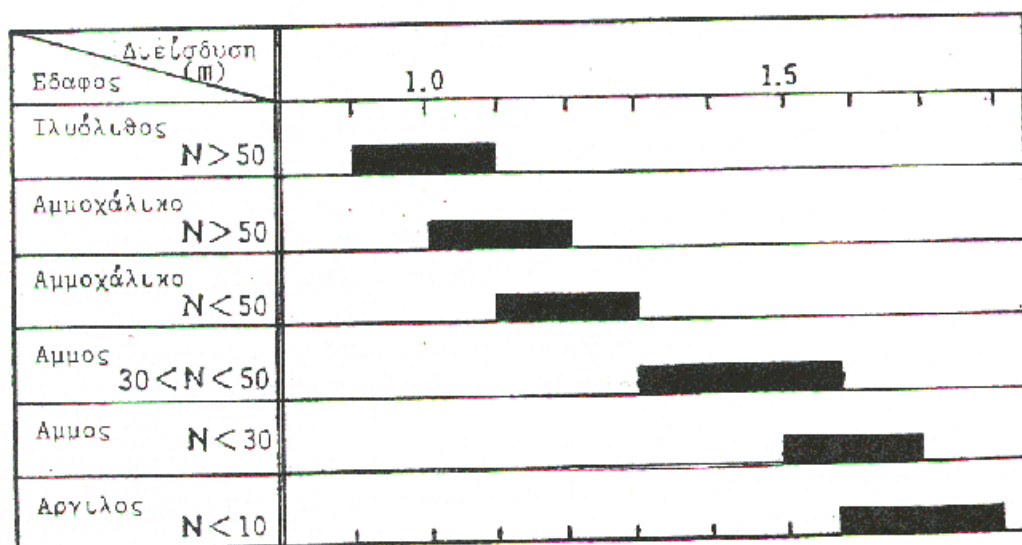
#### *4.4.3. Στοιχεία σχεδιασμού*

Οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού είναι το υλικό ένεσης, η πίεση και η ταχύτητα των ρευστών (νερό-αέρας και υλικό ένεσης) στα ακροφύσια, και ο ρυθμός περιστροφής και κατακόρυφης κίνησης της ειδικής κεφαλής που φέρει τα ακροφύσια. Μέχρι σήμερα δεν έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία "αυστηρά" κριτήρια σχεδιασμού. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι πρόκειται για νέα, μικρή σε ηλικία, μέθοδο. Έτσι οι ειδικευμένες εταιρείες που αναλαμβάνουν το σχεδιασμό και την εκτέλεση των έργων χρησιμοποιούν δικούς τους πρακτικούς κανόνες και βασίζονται στην εμπειρία τους για τη "ρύθμιση" και "προσαρμογή" της μεθόδου ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο.

Συνήθως χρησιμοποιούνται αιωρήματα τσιμέντου, και ειδικότερα τσιμέντων ταχείας πήξεως. Η αναλογία νερού προς τσιμέντο κυμαίνεται

συνήθως μεταξύ του 1:1 και 2:1. Η αντοχή σε θλίψη κυβικών δοκιμίων του υλικού ένεσης μπορεί να κυμαίνεται από 5 kg/cm<sup>2</sup> ως 150 kg/cm<sup>2</sup> ανάλογα με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου έργου. Ο συντελεστής διαπερατότητας του υλικού ένεσης (αφού πήξει και σκληρυνθεί) κυμαίνεται από 10<sup>-6</sup> ως 10<sup>-9</sup> cm/sec. Μερικές φορές στο υλικό ένεσης προστίθεται ιπτάμενη τέφρα σε αναλογία 1:1 ως 1:10 με το τσιμέντο (Λόγος τσιμέντου: τέφρα κατά βάρος). Όταν απαιτείται η κατασκευή στήλης ή διαφράγματος μικρής διαπερατότητας, προστίθεται στο υλικό ένεσης μπεντονίτης.

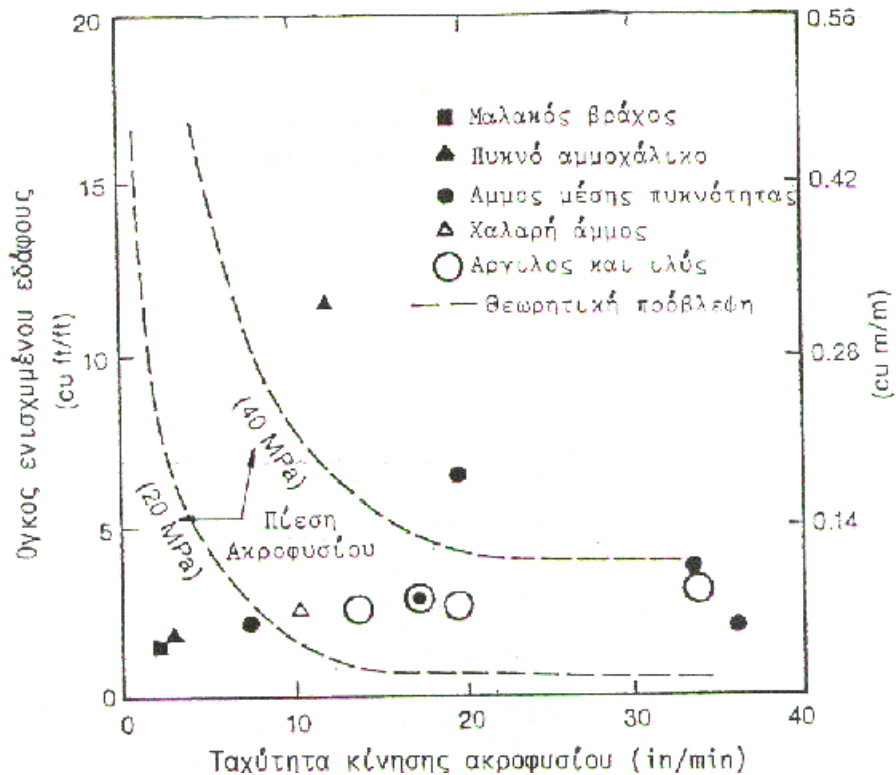
Η διάμετρος του προκύπτοντος εδαφοπάσσαλου εξαρτάται από την κοπτική ικανότητα της φλέβας υψηλής πίεσης, που με τη σειρά του εξαρτάται από τον τύπο του ακροφυσίου. Οι συσκευές του διπλού ή τριπλού συστήματος επιτυγχάνουν μεγαλύτερες αποστάσεις διάβρωσης-ενίσχυσης εδάφους. Η πίεση που απαιτείται εξαρτάται από το είδος του εδάφους και την πυκνότητά του και κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 200 και 700 kg/cm<sup>2</sup>. Η επίδραση του τύπου του εδάφους και της αντοχής του, στο βάθος διάβρωσης φαίνεται στο Σχήμα 4.14



**Σχήμα 4.14** Επίδραση της αντοχής και του τύπου του εδάφους στο μήκος διείσδυσης του πίδακα υψηλής πίεσης

Ο όγκος και η ποιότητα του ενισχυμένου εδάφους εξαρτώνται επίσης από την ταχύτητα κίνησης των ακροφυσίων και από την εξασκούμενη πίεση (εφ' όσον οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές). Στο Σχήμα 4.15

παριστάνεται γραφικά η επίδραση της ταχύτητας κατακόρυφης κίνησης του ακροφυσίου και της πίεσης του ακροφυσίου στο μέγεθος (όγκο) του ενισχυμένου εδάφους. Όπως φαίνεται ο ίδιος όγκος ενισχυμένου εδάφους δημιουργείται για διάφορους συνδυασμούς πίεσης και ταχύτητας κατακόρυφης κίνησης.



**Σχήμα 4.15** Σχέση μεταξύ όγκου ενισχυμένου εδάφους, ταχύτητας κίνησης ακροφυσίου και πίεσης

#### 4.4.4 Ποιοτικοί έλεγχοι των κατασκευασμένων πασσάλων

Η αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας κατασκευής του εδαφοπασσάλου, δηλαδή η επιθυμητή μέση διάμετρος, η πυκνότητα, οι απαιτούμενες ιδιότητες αντοχής και παραμορφωσιμότητας καθώς και η διαπερατότητα αυτού θα πρέπει να ελέγχεται.

Επειδή είναι πρακτικώς αδύνατον σε ένα στατιστικά σημαντικό αριθμό εδαφοπασσάλων να ελεγχθούν άμεσα οι παραπάνω ιδιότητες, επισημαίνεται ότι ο ποιοτικός έλεγχος είναι δυνατόν να συνίσταται κατ' ελάχιστον στην

καταγραφή όλων των παραμέτρων της διαδικασίας κατασκευής των, καθώς και στον έλεγχο των ιδιοτήτων των εξερχόμενων υλικών.

Είναι γενικά αποδεκτό, ότι για παρόμοιες γεωτεχνικές συνθήκες οι ίδιες επιβαλλόμενες τιμές των παραμέτρων έχουν ως τελικό αποτέλεσμα την κατασκευή εδαφοπασσάλου με τις ίδιες διαστάσεις και μηχανικές ιδιότητες. Επομένως, όπου υπάρχει συγκρίσιμη εμπειρία και πειραματικά δεδομένα, σχετικά με τις γεωτεχνικές συνθήκες και το εφαρμοζόμενο σύστημα κατασκευής εδαφοπασσάλου, είναι δυνατόν να μην απαιτείται δοκιμαστικό πεδίο και απλώς να απαιτείται συνεχής καταγραφή των τιμών των παραμέτρων.

Όπου δεν υπάρχει αντίστοιχη συγκρίσιμη εμπειρία ως προς την αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας κατασκευής του εδαφοπασσάλου, σε συνδυασμό με τις απαιτούμενες γεωτεχνικές συνθήκες, θα πρέπει πριν από τη συστηματική έναρξη των εργασιών να εκτελείται ένα προκαταρκτικό δοκιμαστικό πεδίο. Σκοπός του δοκιμαστικού πεδίου είναι να γίνει η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων για όλες τις περιπτώσεις διαφορετικών εδαφικών στρώσεων και να εξακριβωθεί ένα τα αποτελέσματα επαληθεύουν τις απαιτήσεις της μελέτης.

Μετά την κατασκευή των δοκιμαστικών εδαφοπασσάλων και όπου είναι δυνατόν γίνεται εκσκαφή του χώρου με ιδιαίτερη προσοχή. Πραγματοποιείται οπτικός έλεγχος και μετρήσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αποκαλυπτόμενων εδαφοπασσάλων και λαμβάνονται δείγματα για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής των. Σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η εκσκαφή και ο οπτικός έλεγχος της γεωμετρίας των εδαφοπασσάλων, ο έλεγχος θα γίνεται έμμεσα με τη βοήθεια δειγματοληπτικών γεωτρήσεων ή άλλων δοκιμών.

Το βάθος των δοκιμαστικών πασσάλων θα καλύπτει τις χαρακτηριστικές γεωτεχνικές στρώσεις και εάν είναι δυνατόν θα είναι ανάλογο με το προβλεπόμενο από τη μελέτη.

### Καταγραφή Παραμέτρων

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής του εδαφοπασσάλου θα καταγράφονται οι παρακάτω παράμετροι:

1) Η σύνθεση του ενέματος θα ελέγχεται τουλάχιστον δύο φορές κατά τη διαδικασία κατασκευής ενός εδαφοπασσάλου. Ο έλεγχος θα γίνεται με τη

ζύγιση ενός όγκου 1 lt μέσα σε κατάλληλο ογκομετρικό σωλήνα και μέσω ζυγού ακριβείας 10 gr. Το ειδικό βάρος που θα προσδιορίζεται με αυτόν τον τρόπο θα πρέπει να συμφωνεί με το θεωρητικό που αντιστοιχεί στη σύνθεση του ενέματος με ακρίβεια του 2%.

- 2) Πίεση και παροχή των ρευστών που χρησιμοποιούνται (τσιμεντέματος, νερού και αέρα).
- 3) Ταχύτητα ανύψωσης και ταχύτητα περιστροφής της διατρητικής στήλης.
- 4) Περιοδικός έλεγχος της πυκνότητας των εξερχόμενων υλικών.

#### Δοκιμές Κατασκευασμένων Στοιχείων

Εάν απαιτείται από τη μελέτη του έργου για τον έλεγχο ήδη κατασκευασμένων εδαφοπασσάλων είναι δυνατόν να εκτελούνται οι παρακάτω δοκιμές:

- 1) Δειγματοληπτικές γεωτρήσεις με σκοπό την εκτέλεση δοκιμών αντοχής-παραμορφωσιμότητας και την εξακρίβωση της γεωμετρίας του εδαφοπασσάλου.
- 2) Δοκιμές διαπερατότητας για την εξακρίβωση της επιτευχθείσης στεγάνωσης με αλληλοτεμνόμενους εδαφοπασσάλους.
- 3) Κατακόρυφες δοκιμαστικές φορτίσεις εδαφοπασσάλων.
- 4) Γεωφυσικές δοκιμές Cross-hole με σκοπό τον έλεγχο της συνέχειας ενός πετάσματος αλληλοτεμνόμενων εδαφοπασσάλων.
- 5) Δοκιμές CPT μέσα στο σώμα ενός νωπού κατασκευασμένου εδαφοπασσάλου πριν αναπτύξει αντοχές με σκοπό τον έλεγχο της γεωμετρίας.

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΙΣΧΥΟΥΣΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΚΕΙΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΝΕΜΑΤΩΣΗΣ**

EN 12715:2000	Execution of special geotechnical work – Grouting - Εκτέλεση ειδικών γεωτεχνικών έργων – Ενέματα
EN 196-1:2005	Methods of testing cement – Part 1: Determination of Strength – Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου – Μέρος 1: Προσδιορισμός αντοχών
EN 196-2005	Methods of testing cement – Part 2: Chemical analysis of cement - Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου – Μέρος 2: Χημική ανάλυση τσιμέντου
EN196-3:2005	Methods of testing cement – Part 3: Determination of setting times and soundness - Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου - Μέρος 3: Προσδιορισμός χρόνου πήξης και σταθερότητας όγκου
ENV 196-4:1993	Methods of testing cement – Part 4: Quantitative determination of constituents - Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου - Μέρος 4: Ποσοτικός προσδιορισμός συστατικών
EN 196-5:2005	Methods of testing cement – Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement - Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου – Μέρος 5: Δοκιμή ποζολανικότητας για ποζολανικά τσιμέντα
EN 196-8:2003	Methods of testing cement – Part 8: Heat of hydration – Solution method – Μεθοδοι δοκιμών τσιμέντου – Μέρος 8 Θερμότητα ενυδάτωσης – Μέθοδος διαλύσεως



EN 196-9:2003	Methods of testing cement – Part 9: Heat of hydration – Semi-adiabatic method - Μεθοδοι δοκιμών τσιμέντου – Μέρος 9: Θερμότητα ενυδάτωσης – Ημιαδιαβατική μέθοδο
EN 197-1:2000	Cement – Part 1: Composition, specifications and Conformity criteria for common cements – Τσιμέντο - Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα
EN 197-2:2000	Cement – Part 2: Conformity evaluation – Τσιμέντο – Μέρος 2: Αξιολόγηση συμμόρφωσης
EN 451-1:2003	Method of testing fly ash – Part 1: Determination of free calcium oxide content – Μέθοδος δοκιμής ιπτάμενης τέφρας – Μέρος 1: Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε ελεύθερο οξείδιο του ασβεστίου
EN 480-1:1997	Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods - Part 1: Reference concrete and reference mortar for testing – Προσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέρος 1: Σκυρόδεμα και κονίαμα αναφοράς για την εκτέλεση δοκιμών
EN 480-2:1996	Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods - Part 2: Determination of setting time – Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέρος 2: Προσδιορισμός χρόνου πήξης
prEN 480-3	Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods - Part 3: Determination of Shrinkkage and expansion – Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέρος 3: Προσδιορισμός συρρίκνωσης και διόγκωσης

- EN 480-4:1996 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods  
- Part 4: Determination of bleeding of concrete - Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέθοδοι δοκιμής – Μέρος 4: Προσδιορισμός της υδαρότητας του σκυροδέματος
- EN 480-5:1996 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods  
- Part 5: Determination of capillary absorption - Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέθοδοι δοκιμής – Μέρος 5: Προσδιορισμός της τριχωειδούς απορρόφησης
- EN 480-6:1996 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods  
- Part 6: Infrared analysis - Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέθοδοι δοκιμής – Μέρος 6: Ανάλυση με υπέρυθρη ακτινοβολία
- prEN 480-7 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods  
- Part 7: Determination of the density of liquid admixtures
- EN 480-8:1996 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods  
- Part 8: Determination of the conventional dry material content – Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέθοδοι δοκιμής – Μέρος 8: Προσδιορισμός του συμβατικού ξηρού υπολείμματος
- prEN 480-9 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods  
- Part 9: Determination of the pH value – Πρόσθετα Σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέθοδοι Δοκιμής - Μέρος 9: Προσδιορισμός του δείκτη pH
- EN 480-10:1996 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods

- Part 10: Determination of water soluble chloride content – Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέρος 10: Προσδιορισμός του υδατοδιαλυτού ποσοστού χλωριόντων

- EN 480-11:1998 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods  
- Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete - Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέρος 11: Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των κενών μέσα στο σκληρυμένο σκυρόδεμα
- EN 480-12:1997 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods  
- Part 12: Determination of the alkali content of admixtures - Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέρος 12: Προσδιορισμός περιεκτικότητας αλκαλίων
- EN 934-3:2003 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods -  
Part 3: Admixtures for masonry mortar – Definitions, requirements, conformity, marking and labelling - Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέρος 3: Πρόσθετα για κονιάματα τοιχοποιίας – Ορισμοί, απαιτήσεις συμμόρφωσης, σήμανση και επισήμανση
- EN 934-4:2001 Admixtures for concrete, mortar and grout –Test methods -  
Part 4: Admixtures for grout for prestressing tendons – Definitions, requirements, conformity, marking and labelling - Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων – Μέρος 4: Πρόσθετα ενεμάτων για προεντεταμένους τένοντες – Ορισμοί, απαιτήσεις συμμόρφωσης, σήμανση και επισήμανση

- EN 934-6:2001 Admixtures for concrete, mortar and grout – Part 6:  
Sampling, conformity control and evaluation conformity –  
Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων –  
Μέρος 6: Δειγματοληψία, έλεγχος συμμόρφωσης και  
εκτίμηση της συμμόρφωσης
- EN 1997-1:2004 Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules  
- Ευρωκώδικας 7: Γεωτεχνικός σχεδιασμός – Μέρος 1:  
Γενικοί κανόνες
- EN 12716:2001 Execution of special geotechnical works – Jet grouting –  
Κατασκευές ειδικών γεωτεχνικών έργων – Ενέματα  
τσιμέντου
- EN 1008:2002 Mixing water for concrete – Specification for sampling,  
testing and assessing the suitability of water, including  
water recovered from processes in the concrete industry,  
as mixing water for concrete – Νερό ανάμειξης  
σκυροδέματος – Προδιαγραφή για δειγματοληψία, έλεγχο  
και αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού
- EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 : Design of concrete structures – Part 1:  
General rules and rules for buildings – Ευρωκώδικας 2 :  
Σχεδιασμός δομημάτων από σκυρόδεμα – Μέρος 1-1:  
Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Αθανασόπουλος Γ.Α. Σημειώσεις μαθήματος «Μαθήματα Θεμελιώσεων»,  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Ατματζίδης Δ., Αθανασόπουλος Γ., Σημειώσεις μαθήματος «Βελτιώσεις -  
*Ενισχύσεις Εδαφών*», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Μπουκουβάλας Γ. «ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ» Διδακτικές σημειώσεις  
– διαλέξεις, Τμήμα Πολ. Μηχανικών Ε.Μ.Π., 2008 – 2009.
- ΠΕΤΕΠ 11 – 03 – 04 – 00, «Εδαφοπάσσαλοι με ενεμάτωση υψηλής πίεσης»,  
Προσωρινές Εθνικές Προδιαγραφές, ΙΟΚ – ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006
- ΠΕΤΕΠ 11 – 03 – 05 – 00, «Ενεματώσεις εδάφους», Προσωρινές Εθνικές  
Προδιαγραφές, ΙΟΚ – ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006
- D2.4.4.1. SoA report “Ground injections” GEOCISA – NECISO, Technology  
Innovation in Underground Construction, 2005
- EM 1110-2-3506 Engineer manual, “GROUTING TECHNOLOGY” , US Army  
Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, 1984