



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Διπλωματική Εργασία

**Διατμητική αντοχή ασυνεχειών βράχου ενεμένων με μίγματα
εποξειδικής ρητίνης και μπετονίτη**

Φοιτητής: Αγγελίδης Βασίλειος

Σίνδος

Μάρτιος 2023

Διατμητική αντοχή ασυνεχειών βράχου ενεμένων με μίγματα εποξειδικής ρητίνης και μπετονίτη

Φοιτητής: Αγγελίδης Βασίλειος

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος της Σχολής Μηχανικών του ΔΙΠΑΕ στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Τεχνικών Έργων»

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 11 / 3 / 2023

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Δρ. Τσικρίκης Αναστάσιος, Επιβλέπων

Δρ. Αναγνωστόπουλος Κωνσταντίνος, Καθηγητής

Δρ. Κωνσταντινίδης Δημήτριος, Καθηγητής

Copyright © Αγγελίδης Βασίλειος, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Διατμητική αντοχή ασυνεχειών βράχου ενεμένων με μίγματα εποξειδικής ρητίνης και μπετονίτη.

Απαγορεύεται η αντιγραφή αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση η αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος (ΔΙ.ΠΑ.Ε.)

Σίνδος

Μάρτιος 2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα ΜΔΕ, με τίτλο «Διατμητική αντοχή ασυνεχειών βράχου ενεμένων με μίγματα εποξειδικής ρητίνης και μπετονίτη», εκπονήθηκε, ως μέρος του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Τεχνικών Έργων» του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος.

Το θέμα της συγκεκριμένης ΜΔΕ αποτέλεσε μια πρόταση-προτροπή των καθηγητών Δρ. Αναγνωστόπουλου Κωνσταντίνου και Δρ. Τσικρίκη Αναστάσιου. Η χρόνια ενασχόληση του Δρ. Τσικρίκη, με θέματα μηχανικής συμπεριφοράς βραχωδών μαζών σε συνδυασμό με την γνώσεις και την χρόνια ενασχόληση του Δρ. Αναγνωστόπουλου με την τεχνολογία των ενεμάτων-χημικών ενέσεων αποτέλεσαν εγγύηση για την ορθή ανάπτυξη του θέματος της ΜΔΕ. Βέβαια προκειμένου η ΜΔΕ να οδηγηθεί σε ένα συγκριτικό αποτέλεσμα ήταν απαραίτητη η πραγματοποίηση εργαστηριακών μετρήσεων και πειραμάτων. Κάτι τέτοιο θα ήταν ανέφικτο χωρίς την πολύτιμη συνεισφορά των παραπάνω καθηγητών του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος. Για διάστημα πέραν των δυο μηνών (Νοέμβριος 2022 έως Φεβρουάριος 2023) παρουσίας στο εργαστήριο σκυροδέματος του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος στην Σίνδο οι Δρ. Τσικρίκης και Αναγνωστόπουλος αποτέλεσαν αρωγούς τόσο στις εργασίες προετοιμασίας όσο και στα πειράματα που ακολούθησαν. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον καθηγητή μέλος 3-μελούς επιτροπής αλλά και πρόεδρο του τμήματος κ. Κωνσταντινίδη Δημήτριο για την συμβολή του στο τελικό αποτέλεσμα.

Τέλος θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά και το τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, για την ευγενή παραχώρηση του εργαστηριακού χώρου και εξοπλισμού, χωρίς τα οποία θα ήταν αδύνατη η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας .

Με εκτίμηση,
Αγγελίδης Βασίλειος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία «Διατμητική αντοχή ασυνεχειών βράχου ενεμένων με μίγματα εποξειδικής ρητίνης και μπετονίτη» στοχεύει στην παροχή γνώσεων, που απαιτούνται στον τομέα της ενίσχυσης βραχωδών υλικών. Ο συνήθης επιδιωκόμενος τεχνικός σκοπός της προσθήκης ενέματος σε μία βραχώμαζα είναι η μείωση της υδροπερατότητας ή/και η βελτίωση της μηχανικής της συμπεριφοράς. Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης επί του θέματος, τα οποία δίνονται στα επόμενα κεφάλαια, οι στόχοι αυτής της μελέτης είναι να ποσοτικοποιηθούν πειραματικά οι μεταβολές στην διατμητική αντοχή της βραχώδους μάζας- ασυνεχειών με τις διάφορες αναλογίες ανάμιξης νερού-ρητίνης για την παρασκευή του ενέματος αλλά και με το χρόνο σκλήρυνσης του, για την αξιολόγηση των συνεισφορών τους αλλά και για την συνολική συμπεριφορά τους. Η ανάπτυξη σχέσεων αντοχής τόσο για το ένεμα όσο και για την βραχώδη μάζα κάτω από συνθήκες φόρτωσης, και τέλος η χρήση των ιδιοτήτων των συστατικών στη διαμόρφωση του προτύπου για την πρόβλεψη της απόκρισης της ενεμένης βραχώμαζας. Απαρτίζεται από την πειραματική έρευνα στις φυσικές και δυναμικές ιδιότητες χημικά ενεμένης βραχώμαζας με υδατοδιαλυτή εποξειδική ρητίνη και τις θεωρητικές πληροφορίες των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή της ρητίνης και του μπετονίτη. Κύριος σκοπός θα μπορούσαμε να πούμε λοιπόν ότι είναι η λεπτομερής διερεύνηση του μηχανισμού θραύσεως κατά την απώλεια της συνάφειας μεταξύ ενέματος και τοιχώματος ασυνεχειών. Το περιεχόμενο χωρίζεται σε 4 κεφάλαια που το καθένα έχει την δική του ιδιαιτερότητα.

Το 1^ο Κεφάλαιο «Εισαγωγή» παρουσιάζει θεωρητικές πληροφορίες για την μηχανική των πετρωμάτων. Μια εισαγωγή στις ιδιότητές των ασυνεχειών και της βραχώμαζας και η σχέση τους με την τεχνική των ενέσεων.

Το 2^ο Κεφάλαιο «Βιβλιογραφική Ανασκόπηση» αναφέρει όλες τις θεωρητικές πληροφορίες για την κατηγορία των ρητινών, και ιδιαιτέρως της εποξειδικής ρητίνης, που περιλαμβάνει τη χημεία των ρητινών, τα γενικά τους χαρακτηριστικά.

Το 3^ο Κεφάλαιο «Μέθοδοι και υλικά» αποτελείται από την πειραματική διαδικασία. Γίνεται αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων, την μέθοδο που ακολουθήθηκε για να πραγματοποιηθούν τα πειράματα αυτά καθώς και πληροφορίες για το μπετονίτη που χρησιμοποιήθηκε σε δύο από τους τρεις κύκλους παραγωγής δοκιμών.

Το 4^ο Κεφάλαιο «Αποτελέσματα και συζήτηση» παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών, στις οποίες καταπονήθηκαν τα δοκίμια. Περιλαμβάνονται αναλυτικοί πίνακες και διαγράμματα από κάθε δοκιμή. Αναλύεται επίσης η πειραματική διαδικασία και τα

αποτελέσματα της, μέσω πινάκων και διαγραμμάτων αλλά και συμπεράσματα βάση αυτών των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Λέξεις Κλειδιά: βραχόμαζα, ασυνέχεια, χημικό ένεμα, εποξειδική ρητίνη, μπετονίτης, διατμηστική αντοχή.

SUMMARY

This paper "Shear strength of rock discontinuities injected with epoxy resin and concrete mixtures" aims to provide knowledge required in the field of rock reinforcement. The usual intended technical purpose of adding grout to a rock mass is to reduce its water permeability and/or improve its mechanical behavior. Taking into account the conclusions of the literature review on the subject, which are given in the following chapters, the objectives of this study are to experimentally quantify the changes in the shear strength of the rock mass - discontinuities with different water-resin mixing ratios for grout preparation and with the curing time, in order to evaluate their contributions and their overall behavior. To develop strength relationships for both the grout and the rock mass under loading conditions, and finally to use the properties of the components in the model formulation to predict the response of the grouted rock mass. It is derived from the experimental investigation on the physical and dynamic properties of chemically injected rock mass with water-soluble epoxy resin and the theoretical information of the individual materials used, namely the resin and betonite. The main purpose could therefore be said to be the detailed investigation of the fracture mechanism during loss of aggregate cohesion between grout and wall discontinuities. The content is divided into 4 chapters, each with its own specificity.

Chapter 1 "Introduction" presents theoretical information on rock mechanics. An introduction to the properties of unconformities and rock masses and their cleavage by the injection technique.

Chapter 2 "Literature Review" states all the theoretical information on the class of resins, and particularly epoxy resin, including the chemistry of resins, their general characteristics.

Chapter 3 "Methods and Materials" consists of the experimental procedure. The materials used to perform the experiments, the method followed to carry out these experiments and information on the concrete used in two of the three test specimen production cycles is given.

Chapter 4 "Results and Discussion" presents the results of the tests in which the specimens were stressed. Detailed tables and charts from each test are included. The experimental procedure and its results are also analysed through tables and diagrams and conclusions based on these results are also drawn.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 Γενικά-Ορισμοί	15
1.2 Τεχνική των χημικών ενέσεων	18
1.3 Σκοπός έρευνας.....	19
1.4 Διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών	20
1.4.1 Γενικό μοντέλο συμπεριφοράς	20
1.4.2 Συνιστώσα βασικής τριβής (Φb).....	22
1.4.3 Συνιστώσα διαστολής.....	23
1.4.4 Επίδραση ορθών τάσεων	24
1.4.5 Λοιποί επιδρώντες παράγοντες στην μετρούμενη διατμητική αντοχή.....	27
1.4.6 Κριτήριο των Barton – Bandis	28
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	31
2.1 Τεχνολογία ενέσεων.....	31
2.1.1 Γεώτρηση και σειρά εργασιών	32
2.1.2 Εξοπλισμός για διενέργεια ενέσεων	45
2.1.3. Σύνθεση τσιμεντενεμάτων	47
2.1.3.1. Συστατικά τσιμεντενεμάτων	47
2.1.3.1.1. Τσιμέντο Portland.....	47
2.1.3.1.2. Αργιλικά υλικά.....	48
2.1.3.1.3. Νερό.....	50
2.1.3.1.4. Άμμος και άλλα αδρανή υλικά	51
2.1.3.1.5. Υδρύαλος	51
2.1.3.1.6. Ρευστοποιητές.....	52
2.1.3.2. Τύποι ενεμάτων	52
2.1.3.2.1. Μίγματα για την έγχυση ρωγμών ή ασυνεχειών	53
2.1.3.2.2. Ενέσεις σε πλατιά κενά και σπηλιές	59
2.1.3.2.3. Μίγματα ενεμάτων για κοκκώδη υλικά	59
2.1.3.2.4. Μίγματα ενεμάτων για κενά και ρωγμές σε κατασκευές σκυροδέματος	61
2.1.4. Η πίεση κατά την εκτέλεση ενέσεων.....	62
2.2 Χημικά Ενέματα.....	68
2.2.1 Γενικά.....	68
2.2.2. Ιστορία.....	69
2.2.3 Προβλήματα Πεδίου	74

2.2.4 Ιδιότητες ενέματος	78
2.2.5 Ιδανικό Χημικό Ένεμα.....	98
2.3 Χημικά υλικά ενέματος	99
2.3.1 Τύποι χημικών ενέσεων	99
2.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την διείσδυση	99
2.3.3 Συστήματα πυριτικού νατρίου	100
2.3.4 Ακρυλικά ενέματα	112
2.3.5 Ουρεθάνες.....	113
2.3.6 Λιγνίνες.....	114
2.3.7 Ρητίνες.....	115
2.3.8 Άλλα ενέματα	118
2.4 Εξοπλισμός και μέθοδοι χημικών ενέσεων.....	118
2.4.1 Εξοπλισμός ανάμιξης κονιαμάτων	118
2.4.2 Εξοπλισμός άντλησης.....	121
2.4.3 Συστήματα άντλησης.....	124
2.4.4. Μέθοδοι Έγχυσης.....	127
2.5 Σχεδιασμός	128
2.5.1 Ρυθμιστικές απαιτήσεις	128
2.5.2 Προκαταρκτικός σχεδιασμός	129
2.5.3 Εργαστηριακές δοκιμές	132
2.5.4 Επιχειρήσεις πεδίου	140
2.5.5 Διαθεσιμότητα ενέματος	143
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ.....	143
3.1 Εισαγωγή	143
3.2 Γενικά.....	143
3.3 Μέσα Ατομικής Προστασίας	144
3.4 Εργαλεία δειγματοληψίας και παρασκευής δοκιμών	148
3.5 Υλικά και παρασκευή των δοκιμών	151
3.5.1 Υδατοδιαλυτή εποξειδική ρητίνη.....	153
3.5.2 Μπετονίτης.....	156
3.5.2.1 Εισαγωγή	156
3.5.2.2 Παραγωγή και εξαγωγές μπετονίτη.....	158
3.5.2.3 Γενικά χαρακτηριστικά μπετονίτη.....	158
3.5.2.4 Ιδιότητες και χρήσεις μπετονίτη και μοντμοριλλονίτη.....	159
3.6 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας	160

3.7 Δοκιμή άμεσης διάτμησης ασυνεχειών (Muralha et al. - ISRM, 2014).....	163
3.7.1 Προετοιμασία διάταξης δοκιμίου	164
3.7.2 Διεξαγωγή δοκιμής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών	165
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	168
4.1 Εισαγωγή	168
4.2 Αποτελέσματα εποξειδικής ρητίνης με διάρκεια σκλήρυνσης 90 ημερών	168
4.3 Αποτελέσματα εποξειδικής ρητίνης με προσθήκη μπετονίτη (5% w/w) με διάρκεια σκλήρυνσης 7 ημερών.....	182
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΤΗΣΗ.....	194
4.1. Αντικείμενο της έρευνας	194
4.2 Ανασκόπηση πρότερων ερευνών.....	194
4.3. Συμπεράσματα από τις πειραματικές δοκιμές	195
4.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	195
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	196

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ - ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΠΙΝΑΚΩΝ

Εικόνα 1.1.1 Άποψη τυπικής ασυνεχούς βραχομάζας	16
Σχήμα 1.1.2 Μηχανική συμπεριφορά βραχωδών υλικών ανάλογα με τον υπό φόρτιση όγκο	17
Εικόνα 1.2.1 Βελτίωση βραχώδους ψαμμιτικού υλικού με πλήρωση των ανοικτών διακλάσεων με ένεμα	18
Σχήμα 1.4.1.1 Αναπαράσταση σταδίων διάτμησης μιας ασυνέχειας υπό δύο επίπεδα ορθών τάσεων σ_n (Barton, 1971).....	21
Σχήμα 1.4.3.1 Εξιδανικευμένη αναπαράσταση του φαινομένου της διαστολής και της περιβάλλουσας μέγιστης διατμητικής αντοχής σύμφωνα με τον Patton, 1966	24
Σχήμα 1.4.4.1 Διακύμανση των διατμητικών αντοχών ($\Phi_{ολ}$ ($10^\circ - 70^\circ$)) στις σχετικά χαμηλές ορθές τάσεις ($\sigma_n' = 0.01 - 5.00 \text{ MPa}$) και σε υψηλές τάσεις ($\sigma_n=1-100\text{MPa}$, $T=0.85 \sigma_n$) κατά τον Byerlee (1978).....	26
Σχήμα 1.4.4.3 (α) Σταθερή διατμητική δυσκαμψία	27
(β) Η διατμητική αντοχή εμφανίζεται σε σταθερή διατμητική παραμόρφωση (Barton, 1971)	27
Σχήμα 1.4.6.1 Προσδιορισμός του δείκτη JRC (Barton, 1977).....	30

Σχήμα 2.1.1. Εξέλιξη της γεώτρησης με (Α) περιστροφικό και (Β) κρουστικό εξοπλισμό : 1. άργιλος με θραυστό ασβεστόλιθο, 2. ασβεστόλιθος μάργας, 3. μαλακός ασβεστόλιθος μάργας, 4. μεσαίας σκληρότητας ασβεστόλιθος, 5. σκληρός ασβεστόλιθος μάργας, 6. σκληρός ασβεστόλιθος, 7. μαλακός ασβεστόλιθος.....	34
Σχήμα 2.1.2. Οπή γεώτρησης με κατακόρυφο σωλήνα και παρέμβυσμα για εκτέλεση ένεσης, 1. σωλήνας παροχής ενέματος, 2. μανόμετρο, 3. βαλβίδες, 4. μηχανή σύστρεψης, 5. παρέμβυσμα, 6. τμήμα έγχυσης, 7. σωλήνας επιστροφής.....	35
Σχήμα 2.1.3. Γεώτρηση και εκτέλεση ενέσεων σε τομές από την κορυφή προς τον πυθμένα	36
Σχήμα 2.1.A: Διαδικασία και επεξήγηση ένεσης	37
Σχήμα 2.1.4. Εκτέλεση ενέσεων σε τομές από τον πυθμένα προς τα πάνω.	39
Σχήμα 2.1.5. Εκτέλεση ενέσεων σε ζώνες από πάνω προς τα κάτω, ζώνες I-III	41
Σχήμα 2.1.6. Πυκνότητα εκτέλεσης ενέσεων α) σε μια απλή και σε μια διπλή σειρά κουρτίνας, β) σε μια τριπλή σειρά κουρτίνας.	41
Πίνακας 2.1.1. Ειδική κατανάλωση εγχόμενου ενέματος (Deere,1976).....	43
Σχήμα 2.1.7. Απόκλιση των οπών από τον κατακόρυφο άξονα, σχέδιο ελέγχου έγχυσης Meifedoun, 1) κρουστική γεώτρηση, 2) περιστροφική γεώτρηση.	44
Σχήμα 2.1.8. Επίδραση της μεθόδου ανάμιξης στην καθίζηση του αιωρήματος τσιμέντου, 1) υψηλών στοφών αναμίκτης, 2) εργαστηριακός αναμίκτης, 3) V όγκος του ιζήματος, 4) ν ταχύτητα καθίζησης.	48
Σχήμα 2.1.8. Καθίζηση ενεμάτων διαφόρων αναλογιών με προσθήκη και χωρίς προσθήκη μπετονίτη	50
Πίνακας 2.1.2. Προτεινόμενη διαβάθμιση της άμμου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για ενέσεις.....	51
Πίνακας 1.3. Πεδίο εφαρμογής των διαφόρων αιωρημάτων και διαλυμάτων ανάλογα με την διαπερατότητα και την κατάσταση του εδάφους.	52
Πίνακας 1.4 Ανασκόπηση των χαρακτηριστικών του εδάφους, συστατικών ενέματος και τεχνικών έγχυσης	53
Σχήμα 1.9. Μερική επίχωση ρωγμών που υπέστησαν έγχυση με αιωρήματα αναλογίας N/T = 5/1, σχέδια από παρατηρήσεις που έγιναν με ένα περισκόπιο γεώτρησης. α) φράγμα Blowering β) φράγμα Copperdole. (Houlsby, 1982).	56
Πίνακας 1.5. Αιωρήματα ενέματος από τσιμέντο για διάφορες κατηγορίες.....	58
Πίνακας 1.6. Αρχική πυκνότητα των αιωρημάτων ενέματος	59
Σχήμα 1.9. Αναμικτήρας υψηλού στροβιλισμού	61

Εικόνα 1.1. Δημιουργία σκελετού αποτελούμενου από φλέβες ενέματος και εδάφους λόγω της εισπίεσης ενέματος εντός του εδαφικού σχηματισμού.....	62
Εικόνα 1.2. Απεικόνιση εφαρμογής της μεθόδου ενεμάτωσης υπό πίεση.....	63
Σχήμα 1.10. Υπολογισμός της πίεσης έγχυσης κατά την διάρκεια εκτέλεσης ενέσεων, α) πάνω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα β) κάτω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.	64
Πίνακας 1.7. Ειδικό βάρος αιωρημάτων τσιμέντου διάφορων αναλογιών	64
Σχήμα 1.11. Διάγραμμα του ιξώδους, N υγρό Newton, B υγρό Bigham.	65
Σχήμα 1.12. Έγχυση ενέματος σε κεκλιμένη ρωγμή πλάτους 2α από οπή γεώτρησης διαμέτρου 2r ₀ . α) τομή. β) οπτική γωνία.	65
Σχήμα 1.13. Τιμές της απόστασης R(φ) σύμφωνα με την εξίσωση 2.6 και σύμφωνα με μοντέλο ρωγμών, Wittke (1968).	66
Σχήμα 1.14. Σχεδιαγράμματα της α) απόστασης έγχυσης σε μια οριζόντια τομή, β) κατανομή της πίεσης κατά μήκος της ρωγμής.	67
Σχήμα 1.15. Διείσδυση του ενέματος σε ρωγμή πλάτους 2 mm, απόσταση R, πίεση έγχυσης p/γs, παροχή Q.	67
Σχήμα 1.16. Πίεση έγχυσης κατά μήκος ρωγμής πλάτους 2 mm, σε σχέση με το χρόνο.....	68
Σχήμα 2.1 Φράγμα για τη μέτρηση της διαρροής κατάντη του φράγματος ισχύος	75
Σχήμα 2.2 Σταθεροποίηση της άμμου για την αποφυγή μετακίνησης των θεμελίων. (Raymond Concrete Pile Division, NY.)	76
Σχήμα 2.3 Ενίσχυση της άμμου για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας. (Raymond Concrete Pile Division, NY.).....	77
Σχήμα 2.4 Σταθεροποίηση και ενίσχυση της άμμου. (Raymond Concrete Pile Division, NY.)	78
Σχήμα 2.5 Ιξώδες διαφόρων χημικών ενέσεων. Οι βαριές γραμμές υποδεικνύουν τις συγκεντρώσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως για εργασίες πεδίου.	83
Σχήμα 2.6 (α) Διεισδυτικότητα διαφόρων ενέσεων.	84
(β) Αποτελεσματικό εύρος μέτρων ελέγχου των υπόγειων υδάτων.....	84
(γ) Ενδεικτικό εύρος επεξεργασιών ενέματος.	84
(δ) Διεισδυτικότητα ενέματος.....	84
(ε) Ενεσιμότητα των εδαφών με διάφορα ενέματα διαλύματος	84
Σχήμα 2.7 (α) Γραμμές αστοχίας για ενέματα και μη ενέματα σε κοκκώδη εδάφη.	89
(β) Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών με στραγγισμένο νερό για πυριτικά ενεματωμένες χονδροειδείς και μέσες άμμους.....	89

(γ) Τυπική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων από αδιαμόρφωτα συμπιεσμένα σε χημικά αρμολογημένη άμμο.....	89
(δ) Δεδομένα συμπίεσης συναρτήσει του χρόνου για δοκιμή ερπυσμού σε χημικά τσιμεντοποιημένη άμμο, υπό σταθερό φορτίο.....	89
(ε) Χρόνος αστοχίας συναρτήσει του ποσοστού του φορτίου αστοχίας σε συμπίεση χωρίς συμπίεση. Το (b) υποδεικνύει δοκιμές θλίψης χωρίς συμπίεση και το (.) υποδεικνύει τριαξονικές δοκιμές με $S_3 \frac{1}{4} 25\%$ του S_1	89
Σχήμα 2.8 Αύξηση του ιξώδους κατά τη διάρκεια του χρόνου που προηγείται της ζελατινοποίησης.....	96
Σχήμα 3.1 Κατάταξη των κυριότερων ιδιοτήτων του ενέματος.....	101
Σχήμα 3.2 Κατάταξη χημικών ενέσεων ανά εφαρμογή.....	102
Σχήμα 3.3 Επίδραση της αραίωσης του πυριτικού ενέματος στην αντοχή σε θλίψη της στερεοποιημένης άμμου (κατά Polivka, Witte και Gnaedinger 1957).....	107
Σχήμα 3.4. Χρόνος πηκτώματος σε σχέση με τη θερμοκρασία, σύστημα πυριτικού χλωριούχου αμιδίου (προσαρμοσμένο από Raymond International, Inc. 1957).....	108
Σχήμα 3.5 Χρόνος πηκτώματος σε σχέση με τη συγκέντρωση του επιταχυντή, σύστημα πυριτικού-αλουμινικού-αμιδίου (προσαρμοσμένο από Raymond International, Inc. 1957).....	109
Σχήμα 3.6 Αντοχές σε ανεμπόδιση θλίψη διαφόρων υλικών επεξεργασμένων με πυριτικά ενέματα.....	111
Σχήμα 4.1 Δεξαμενή ανάμιξης με μηχανική ανάμιξη.....	119
Σχήμα 4.2 Διάταξη διπλής δεξαμενής ανάμιξης.....	120
Εικόνα 4.4 Βιδωτή αντλία θετικής εκτόπισης.....	122
Εικόνα 3-5 Αντλία Simplex.....	123
Σχήμα 4.6 Σύστημα αντλίας μεταβλητού όγκου ή σύστημα αναλογίας.....	125
Σχήμα 4.7 Διάταξη αντλίας μεταβλητού όγκου.....	126
Σχήμα 4.8 Σύστημα τροφοδοσίας με βαρύτητα δύο δεξαμενών.....	126
Εικόνα 3-9 Σύστημα τροφοδοσίας με βαρύτητα δύο δεξαμενών (παραλλαγή).....	126
Εικόνα 4.10 Σύστημα παρτίδων.....	127
Πίνακας 5.1 Προσεγγιστικές ιδιότητες του εδάφους.....	131
Σχήμα 5.2 Σύγκριση μεθόδων σταθεροποίησης εδαφών και σχετική ικανότητα διείδυσης.....	134
Σχήμα 5.3 Ιξώδες διαφόρων κονιαμάτων.....	135

Σχήμα 5.4 Σύγκριση θλιπτικών αντοχών χημικών ενέσεων που εγχέονται σε μέσης λεπτότητας, υγρή σύμμεικτη άμμο, εγχυμένη και σκληρυμένη υγρή (προσαρμοσμένο από Raymond International, Inc. 1957).....	136
Σχήμα 5.5 Σταθεροποιημένος όγκος σε τσιμεντοποιημένο μέσο σε σχέση με τον όγκο του ενέματος (προσαρμοσμένο από Raymond International, Inc. 1957).....	138
Σχήμα 5.6 Διείσδυση σε σχέση με τον όγκο του ενέματος και το ποσοστό κενών (προσαρμοσμένο από Raymond International, Inc. 1957)	138
Εικόνα 3.3.1 Ιατρική μάσκα N95	144
Εικόνα 3.3.2 Χρήση ιατρικών γαντιών κατά την πειραματική διεργασία	145
Εικόνα 3.3.3 Σήμανση για υποχρεωτική συμπεριφορά, απαγόρευση, κίνδυνο και προειδοποίηση στους τοίχους του εργαστηρίου	145
Εικόνα 3.3.4 Προειδοποιητική πινακίδα κινδύνου	146
Εικόνα 3.3.5 Πινακίδα απαγόρευσης αναρτημένη στο μηχάνημα άμεσης διάτμησης ασυνεχειών των δοκιμίων.....	146
Εικόνα 3.3.6 Πινακίδα προειδοποίησης κινδύνου ηλεκτροπληξίας.....	147
Εικόνα 3.3.7 Κουτί πρώτων βοηθειών πλήρως εξοπλισμένο με ιατροφαρμακευτικό υλικό	148
Εικόνα 3.4.1 Συσκευή πυρηνοληψίας.....	149
Εικόνα 3.4.4 Συσκευή λείανσης των επιφανειών των δοκιμίων	150
Εικόνα 3.5.1 Μάρμαρο Κοζάνης	152
Εικόνα 3.5.2 Προσθήκη νερού με την χρήση ογκομετρικού κυλίνδρου.....	152
Εικόνα 3.5.3 ζυγαριά ακριβείας 0,1 gr	152
Εικόνα 3.5.4 Μπλέντερ για την ανάμιξη υλικών για την παραγωγή του ενέματος	153
Εικόνα 3.5.1.1 Εποξειδική ρητίνη EPOXYPRIMER-500	153
Εικόνα 3.5.1.2 Σκληρυντής EPOXYPRIMER-500	154
Εικόνα 3.5.2.1.1 Μπετονίτης σε μορφή πετρώματος και σκόνης	157
Εικόνα 3.5.2.1.2 Κρυσταλλική δομή μοντμοριλλονίτη	157
Πίνακας 3.5.2.3.1 Χημική ανάλυση του ζενίθ του μπετονίτη	159
Σχήμα 3.5.2.3.2 Συσσωρευτική κατανομή μεγέθους σωματιδίων	159
Εικόνα 3.6.1 Σταδιακή ρίψη νερού στο δοχείο του αναδευτήρα.....	161
Εικόνες 3.6.2 και 3.6.3 Σταδιακή ρίψη εποξειδικής ρητίνης στο δοχείο του αναδευτήρα .	162
Εικόνα 3.6.4 Ανάδευση των συστατικών στον αναδευτήρα πολλών στροφών	162
Εικόνα 3.6.6 Παρασκευή των δοκιμίων	163
Εικόνα 3.7.1.1 Μήτρες τοποθέτησης δοκιμίων άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.....	164

Εικόνα 3.7.2.1 Πειραματική διάταξη της συσκευής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών πετρωμάτων και των παρελκόμενων.....	167
Εικόνες 4.2.1 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa	169
Εικόνες 4.2.2 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 400 kPa	170
Εικόνες 4.2.3 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 600 kPa	170
Εικόνες 4.2.4 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa	171
Εικόνες 4.2.5 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa	172
Εικόνες 4.2.6 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 400 kPa	172
Εικόνες 4.2.7 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 600 kPa	173
Εικόνες 4.2.8 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa	173
Εικόνες 4.2.9 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa	174
Εικόνες 4.2.10 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 400 kPa	175
Εικόνες 4.2.11 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 600 kPa	175
Εικόνες 4.2.12 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa	176
Εικόνες 4.2.13 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa	177
Εικόνες 4.2.14 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 400 kPa	177
Εικόνες 4.2.15 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 600 kPa	178
Εικόνες 4.2.16 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa	178
Εικόνες 4.2.17 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa	179
Εικόνες 4.2.18 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 400 kPa	180
Εικόνες 4.2.19 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 600 kPa	180
Ορθή τάση 800kPa	181
Εικόνες 4.2.20 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa	181
Πίνακας 4.2.21 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ορθής – διατμητικής τάσης δοκιμών εποξειδικής ρητίνης 90 ημερών	181
.....	182
Εικόνες 4.3.1 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa	184
Εικόνες 4.3.2 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 500 kPa	185
Εικόνες 4.3.3 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa	185
Εικόνες 4.3.4 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa	188
Εικόνες 4.3.5 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 500 kPa	189
Εικόνες 4.3.6 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa	189
Εικόνες 4.3.7 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa	192
Εικόνες 4.3.8 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 500 kPa	192

Εικόνες 4.3.9 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa	193
Πίνακας 4.2.10 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ορθής – διατμητικής τάσης δοκιμίων εποξειδικής ρητίνης με προσθήκη μπετονίτη (5%w/w) 7 ημερών.....	193
Εικόνα 4.4.3.1 Γενική μορφή διατμητικής συμπεριφοράς ασυνεχειών πληρωμένων με ένεμα	195

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά-Ορισμοί

Τα βραχώδη υλικά διαφέρουν από τα εδαφικά και τεχνητά υλικά στο ότι εμφανίζουν δομική ασυνεχότητα μακροσκοπικής κλίμακας. Η μακροσκοπική δομική ασυνεχότητα δημιουργείται από φυσικές ασυνέχειες που διατέμνουν τους βραχώδεις σχηματισμούς. Οι ασυνέχειες είναι επιφάνειες μηχανικής θραύσης που δημιουργήθηκαν από τεκτονικές ή άλλες φορτίσεις των (αρχικά) άρρηκτων γεωλογικών σχηματισμών (πετρωμάτων). Σχετικοί όροι περιγράφουν τις ασυνέχειες σαν διακλάσεις, επίπεδα στρώσεων, επίπεδα σχιστότητας, ρήγματα, κλπ. ανάλογα με τις συνθήκες γένεσης και εξέλιξης τους. Οι φυσικές ασυνέχειες εμφανίζουν αναγνωρίσιμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά στο χώρο και επαναλαμβάνονται με επιλεκτικούς προσανατολισμούς ως διακριτά συστήματα ασυνεχειών δημιουργώντας στο χώρο ένα σύμπλεγμα βραχωδών τεμαχίων. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σημαντική διαφοροποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς των βραχωδών υλικών ανάλογα με τον υπό φόρτιση όγκο. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, θα χρησιμοποιούνται εφεξής οι ακόλουθοι όροι με τις αντίστοιχες εννοιολογίες:

- ✓ Βραχώδεις υλικό: Άρρηκτο (ή ανέπαφο) υλικό υπό την έννοια της απουσίας μακροσκοπικών δομικών ασυνεχειών, ισότροπης ή ανισότροπης συμπεριφοράς, γραμμικής ή μη-γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς.
- ✓ Ασυνέχειες: Φυσικά επίπεδα διάρρηξης των βραχωδών υλικών μακροσκοπικής κλίμακας, μηδενικής εφελκυστικής αντοχής, κατά μήκος των οποίων δεν έχει λάβει χώρα προγενέστερη διατμητική μετατόπιση. Οι ασυνέχειες παρουσιάζουν χωρική διάταξη κατά συστήματα, στα οποία αντιστοιχούν ασυνέχειες επιλεκτικού προσανατολισμού.
- ✓ Βραχόμαζα: Μάζα βραχώδους υλικού διατεμνόμενη από πολυάριθμες δομικές ασυνέχειες, διατεταγμένες ανά συστήματα κατά μία, δύο ή περισσότερες διευθύνσεις. Στην παρούσα φυσική κατάσταση η βραχόμαζα εξομοιώνεται με το ανάλογο ενός μωσαϊκού τεμαχίων άρρηκτου υλικού σε επαφή κατά μήκος των ασυνεχειών που τη διατρέχουν.

Οι περισσότερες βραχώδεις μάζες (Εικόνα 1.1.1) αποτελούν μη-συνεκτικά συμπλέγματα τεμαχίων βράχου σε επαφή κατά μήκος των πλευρικών επιφανειών τους. Τα τεμάχια βράχου διατηρούνται σε συναρμογή δια μέσου δυνάμεων τριβής που ενεργοποιούνται υπό τη δράση των εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων. Οι ασυνέχειες αποτελούν επιφάνειες μηχανικής

θραύσης του αρχικά άρρηκτου βραχώδους υλικού. Επομένως αποτελούν αδύναμους «αρμούς» στο εσωτερικό της μάζας, κατά μήκος των οποίων λαμβάνουν χώρα οι κύριες μετακινήσεις εξ αιτίας επιβαλλόμενων μεταβολών των τάσεων. Επίσης παρέχουν «αγωγούς» κίνησης του υπόγειου νερού. Επομένως, επηρεάζουν την παραμορφωσιμότητα, την αντοχή και την υδραυλική αγωγιμότητα της βραχομάζας.

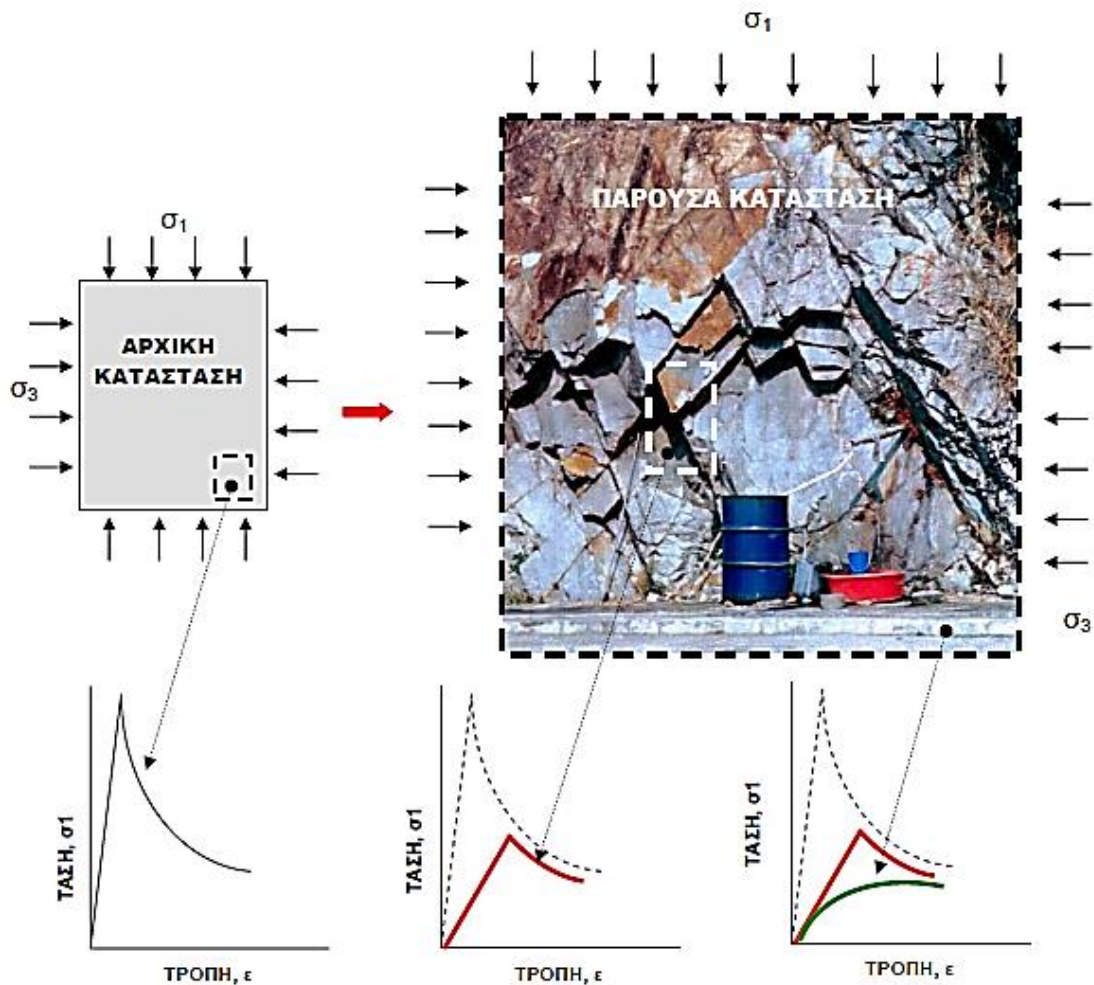


Εικόνα 1.1.1 Αποψη τυπικής ασυνεχούς βραχομάζας

Σε κλίμακα άρρηκτου υλικού η μηχανική συμπεριφορά είναι ουσιαστικά ανάλογη εκείνης ενός συνεχούς, ισότροπου μέσου. Σε μεγαλύτερη κλίμακα η μηχανική συμπεριφορά επηρεάζεται ή καθορίζεται από τις διατέμνουσες ασυνέχειες, οι οποίες διευκολύνουν τον αποχωρισμό των άρρηκτων τεμαχίων δια μέσου μηχανισμών ολίσθησης, εφελκυστικής αποκόλλησης ή περιστροφής (Σχήμα 1.1.2).

Η γεωμετρία των ασυνεχειών της βραχομάζας σε σχέση με τις ελεύθερες επιφάνειες επιφανειακών ή υπόγειων εκσκαφών καθορίζουν τους δυνητικούς μηχανισμούς αστάθειας. Οι μηχανισμοί εκδηλώνονται με σχετικές μετακινήσεις των τεμαχίων της βραχομάζας, δια μέσου μηχανισμών εφελκυστικής αποκόλλησης διατμητικής ή περιστροφικής ολίσθησης. Εφόσον η εφελκυστική αντοχή των ασυνεχειών είναι πρακτικά μηδενική και το επικρατούν αυτεντατικό καθεστώς σε μια βραχομάζα είναι θλιπτικού χαρακτήρα, η κύρια συνιστώσα αντοχής είναι η διατμητική. Η διατμητική αντοχή μίας ασυνέχειας εξαρτάται από τον τύπο της, την ανεπιπεδότητα των τοιχωμάτων της, το βάθος αποσάθρωσης και την παρουσία και τύπο του υλικού πλήρωσης. Επομένως, η αντίσταση σε ολίσθηση (διάτμηση) των ασυνεχειών

εξαρτάται από τους συνυπάρχοντες φυσικούς παράγοντες στην άμεση φυσική επαφή των τοιχωμάτων (διεπιφάνεια).

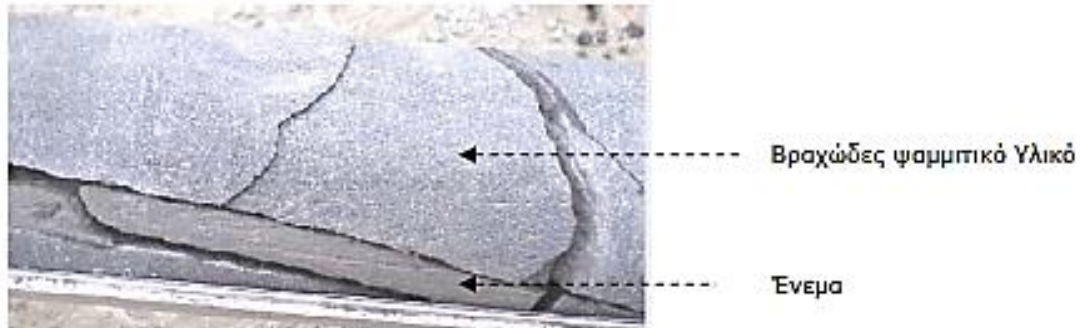


Σχήμα 1.1.2 Μηχανική συμπεριφορά βραχωδών υλικών ανάλογα με τον υπό φόρτιση όγκο

Η μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών και της βραχομάζας ως συνόλου μπορεί να βελτιωθεί με τη χρησιμοποίηση ενισχυτικών στοιχείων (αγκυρίων παθητικού ή ενεργητικού τύπου) ή με την «επούλωση» των μακροδομικών ατελειών (ασυνεχειών) που συνήθως περιγράφεται ως τεχνική των ενέσεων. Η εφαρμογή ενέσεων είναι συνήθης πρακτική για τη βελτίωση των υδραυλικών κυρίως (στεγάνωση) αλλά και των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας. Με την τεχνική αυτή επιδιώκεται η πλήρωση των ασυνεχειών της βραχομάζας με ένεμα, με σκοπό την απόφραξη των ασυνεχειών ως αγωγών διακίνησης του υπόγειου νερού ή την αύξηση της διατμητικής αντοχής διαμέσου τεχνικής προσαύξησης της αντίστασης αποχωρισμού των τοιχωμάτων των ασυνεχειών. Αντικείμενο της παρούσας έρευνας είναι η επίδραση της προσθήκης ενέματος (τεχνική των ενέσεων) στην μηχανική συμπεριφορά και ιδιαίτερως στην διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών βραχομάζας.

1.2 Τεχνική των χημικών ενέσεων

Με την εκτέλεση ενέσεων επιτυγχάνεται διείσδυση υπό πίεση κατάλληλων υλικών σε επιλεγμένες θέσεις του υπεδάφους, μέσω ειδικά κατασκευασμένων διατρημάτων, με σκοπό την πλήρωση των πόρων, μικρορωγμών, διακλάσεων ή άλλων κενών σε εδαφικά ή βραχώδη υλικά. Το αποτέλεσμα είναι η επίτευξη στεγανότητας και επομένως περιορισμός των ωθήσεων άνωσης και άλλων μετακινήσεων που μπορεί να επηρεάσουν την ευστάθεια τεχνικών κατασκευών. Εισπίεση ενέματος αποτελεί συνήθη μέθοδο βελτίωσης των θεμελιώσεων φραγμάτων και μείωσης της διαπερατότητας της βραχώμαζας. Η εισαγωγή υπό πίεση μη φυσικού ενθεματικού υλικού είναι δυνατόν να έχει θετική ή αρνητική επίδραση στη διατμητική συμπεριφορά. Επομένως η αναβάθμιση της συνδέεται με βελτίωση των συντελεστών της διάτμησης (εμπλοκή τοιχωμάτων ασυνεχειών, αντίσταση τριβής, μείωση του εύρους των τοιχωμάτων της ασυνέχειας - απόσταση). Η τεχνική συνίσταται στην εκτέλεση διατρημάτων σε επιλεγμένες θέσεις και στην διείσδυση υπό πίεση κατάλληλων υλικών. Ένεμα καλείται κάθε ρευστό που εισπίζεται μέσα σε ένα γεωλογικό σχηματισμό, με σκοπό είτε τη βελτίωση της αντοχής αυτού (Εικόνα 1.2.1), είτε τη μείωση της υδροπερατότητας του είτε το συνδυασμό και των δύο.



Εικόνα 1.2.1 Βελτίωση βραχώδους ψαμμιτικού υλικού με πλήρωση των ανοικτών διακλάσεων με ένεμα

Η εισπίεση αιωρήματος κοινού τσιμέντου με νερό είναι από τις πλέον συνήθεις πρακτικές λόγω του χαμηλού κόστους. Επίσης, χρησιμοποιούνται άργιλος, άργιλος με τσιμέντο, άσφαλτος, ρητίνες, τέφρα και διάφορα άλλα χημικά υλικά. Η τεχνική των ενέσεων είναι πολύ χρήσιμη στις θεμελιώσεις και στα υπόγεια έργα πριν ή και μετά την κατασκευή. Πριν την κατασκευή, οι ενέσεις βοηθούν στον έλεγχο των νερών κατά την εκτέλεση γεωτρήσεων, δειγματοληψιών, κ.λ.π., αυξάνουν την επιτρεπόμενη τάση εδάφους κ.λ.π. Κατά την κατασκευή, οι ενέσεις επιτρέπουν τον έλεγχο της ροής του υπόγειου νερού, αυξάνουν την

αντοχή κοκκωδών εδαφών και κερματισμένων βράχων, αποτρέπουν την συμπύκνωση άμμων κάτω από γειτονικές κατασκευές κατά τη διείδυση πασσάλων κ.λ.π. Μετά την κατασκευή, οι πιθανές εφαρμογές αφορούν υποθεμελιώσεις με ριζοπασσάλους, μείωση των δονήσεων δαπέδου από τη λειτουργία βαρέων μηχανημάτων και αποτροπή διαρροών νερού. Αν και η τεχνική εισπίεσης ενέματος χρησιμοποιείται επί δεκαετίες δεν υπάρχει σαφής τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων και κώδικες πρακτικής μέχρι σήμερα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πρώτη προσπάθεια ενεμάτωσης έγινε το 1802, ακολούθησαν εφαρμογές σε αρκετά υπόγεια έργα και η μεγάλη ανάπτυξη και βελτίωση των τεχνικών ενεμάτωσης άρχισε το πρώτο μισό του 20ου αιώνα. Βασικά ερωτήματα σχετικά με τις ενέσεις και την τεχνική αυτών αφορούν τόσο το στάδιο κατασκευής τους (επιλογή τύπου ενέματος, τρόπος εισπίεσης, επιβεβαίωση επιτυχίας), όσο και το στάδιο μελέτης (θέματα βελτίωσης ιδιοτήτων των βραχωδών σχηματισμών, επίτευξη συνάφειας η οποία εξαρτάται από τον τύπο ενέματος, το πέτρωμα, το πάχος ενέματος κλπ.). Ιδιαίτερος στο στάδιο μελέτης των αποτελεσμάτων των ενέσεων, του οποίου μέρος αποτελεί και η παρούσα μεταπτυχιακή έρευνα, υπάρχουν αρκετά αναπάντητα ερωτήματα όσον αφορά την αντοχή πριν και μετά την απώλεια πρόσφυσης – συνάφειας. Χαρακτηριστικό αναπάντητο ερώτημα είναι η αντοχή αδύναμου πετρώματος μετά την ενεμάτωση και την απώλεια συνάφειας, η οποία μπορεί να οδηγήσει τελικώς σε υψηλότερες ή και χαμηλότερες τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών του πετρώματος αυτού.

1.3 Σκοπός έρευνας

Ο συνήθης επιδιωκόμενος τεχνικός σκοπός της προσθήκης ενέματος σε μία βραχώμαζα είναι η μείωση της υδροπερατότητας ή/και η βελτίωση της μηχανικής της συμπεριφοράς. Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης επί του θέματος, τα οποία δίνονται στα επόμενα κεφάλαια, ως κύριο αντικείμενο έρευνας διαμορφώθηκε η διερεύνηση της διατμητικής συμπεριφοράς ασυνεχειών με ένεμα, δηλαδή ο κύριος σκοπός ήταν η λεπτομερής διερεύνηση του μηχανισμού θραύσεως κατά την απώλεια της συνάφειας μεταξύ ενέματος και τοιχώματος ασυνεχειών. Η συνολική διερεύνηση της ερευνητικής εργασίας αποτυπώνεται παρακάτω:

- (1) Πειραματική μελέτη της διατμητικής συμπεριφοράς ασυνεχειών βραχώμαζας κατόπιν ενέσεων
- (2) Διερεύνηση διατμητικής συμπεριφοράς και παραμορφωσιμότητας μοναδιαίων ασυνεχειών
- (3) Φυσικά πειράματα
- (4) Πειραματική διαδικασία

(5) Συμπεριφορά ασυνεχειών με ένεμα

1.4 Διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών

1.4.1 Γενικό μοντέλο συμπεριφοράς

Όταν δύο μακροσκοπικά λείες, επαπτόμενες επιφάνειες βράχου υποβληθούν σε διάτμηση, ενεργοποιείται το φαινόμενο της τριβής. Αν τ είναι η διατμητική τάση, που αντιστοιχεί σε ορθή τάση σ_n κατά την οριακή ισορροπία, τότε ο συντελεστής στατικής τριβής (μ) ορίζεται από την σχέση:

$$\mu = \tau / \sigma_n = \tan \Phi_b \quad \text{ή}$$

$$\tau = \sigma_n \times \tan \Phi_b$$

Κατά την διάτμηση μιας ανεπίπεδης ασυνέχειας, μια μικρή αρχική μετατόπιση (u) επαρκεί για την δημιουργία νέων επαφών μεταξύ μικρού αριθμού επιφανειακών ανωμαλιών. Το μέγεθος των επαφών και η κλίση τους εξαρτώνται από την γεωμετρία των επιφανειών, (τραχύτητα – ανεπιπεδότητα) που "ενεργοποιούνται" κατά την διάτμηση και το μέγεθος των ορθών τάσεων.

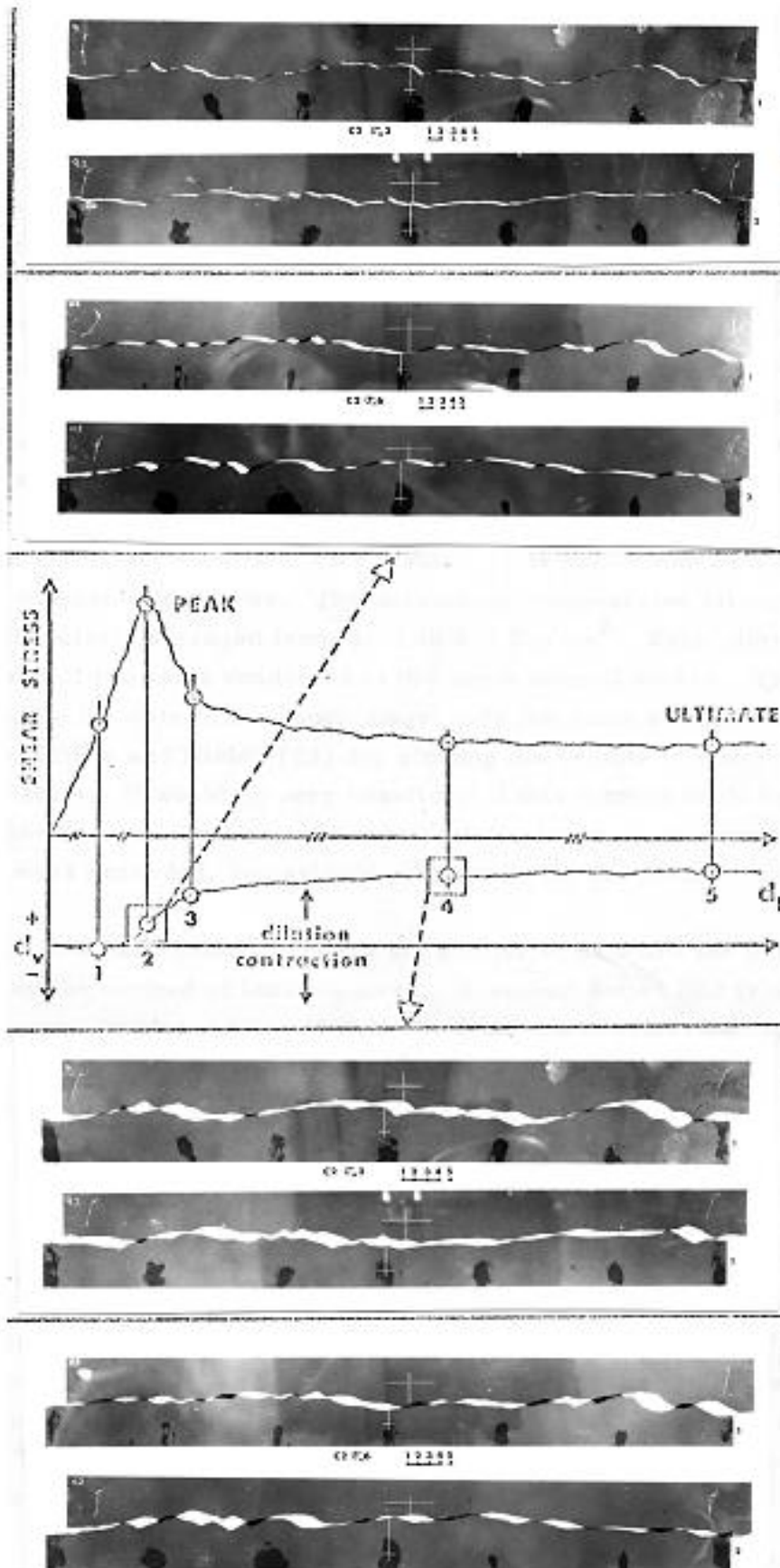
Στο Σχήμα 1.4.1.1 εικονίζονται τα διάφορα χαρακτηριστικά στάδια διάτμησης μιας ανεπίπεδης ασυνέχειας. Η καμπύλη τάσης (τ) - παραμόρφωσης (u) δείχνει ταχεία άνοδο των τάσεων στο επίπεδο της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_{peak}), που αντιστοιχεί σε χαρακτηριστικό σημείο παραμόρφωσης (u_{peak}). Με συνέχιση της οριζόντιας μετατόπισης, η τάση τ μειώνεται σταδιακά μέχρι κάποια ελάχιστη τιμή που αντιστοιχεί στο στάδιο της παραμένουσας αντοχής (τ_{res}).

Η καμπύλη (β) στο Σχήμα 1.4.1.1 περιγράφει την διαστολή κατά την διάτμηση. Διαπιστώνεται ότι μετά από ένα σύντομο στάδιο μηδενικής διαστολής ή και συστολής, εκδηλώνεται ταχεία άνοδος του ρυθμού κατακόρυφης παραμόρφωσης (v) με αυξανόμενη μετατόπιση (u). Ο μέγιστος ρυθμός (dv/du) συνήθως συμπίπτει με την ενεργοποίηση της μέγιστης αντοχής (τ_{peak}). Κατά την εξέλιξη της διάτμησης, ο ρυθμός διαστολής επιβραδύνεται και ουσιαστικά μηδενίζεται, όταν η ασυνέχεια περιέρχεται στο στάδιο παραμένουσας αντοχής.

Η σχέση μεταξύ μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_{peak}) και σ_n μπορεί να αποδοθεί από τη γωνία "ολικής τριβής", ($\Phi_{ολ}$):

$$\tau_{peak} = \sigma_n \tan (\Phi_{ολ})$$

Η διαφορά μεταξύ τ_{peak} και τ_{res} ουσιαστικά εκφράζει την συμβολή της ανεπιπεδότητας στην διατμητική αντοχή. Το μέγεθος της συμβολής εξαρτάται τόσο από τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των επιφανειών, όσο και από το μέγεθος των ορθών τάσεων (σ_n) κατά την διάτμηση. Ο συσχετισμός μεταξύ τ_{peak} και σ_n είναι κατά κανόνα μη-γραμμικός.



Σχήμα 1.4.1.1 Αναπαράσταση σταδίων διάτμησης μιας ασυνέχειας υπό δύο επίπεδα ορθών τάσεων σ_n (Barton, 1971)

Η γωνία “ολικής τριβής” ($\Phi_{ολ}$), εκφράζει τη συνισταμένη αντιδράσεων έναντι σχετικής μετατόπισης δύο ανεπίπεδων επιφανειών που αρχικά ($\tau=0$) ευρίσκονται σε συναρμογή. Θα πρέπει να γίνει κατανοητό, ότι η $\Phi_{ολ}$ δεν αποτελεί εγγενή ιδιότητα (δείκτη “αντοχής”) μιας ασυνέχειας, όπως ορίζεται η γωνία βασικής τριβής (Φ_b). Η $\Phi_{ολ}$ ορίζεται ως γωνιακή συνιστώσα αντίστασης σε ολίσθηση και εκφράζεται ως άθροισμα :

$$\Phi_{ολ} = \Phi_b^\circ + d_n^\circ + S_A^\circ$$

όπου

Φ_b° = συνιστώσα διατμητικής αντοχής λείας και επίπεδης επιφάνειας (συνάρτηση του τύπου βραχώδους υλικού).

d_n° = “γωνιακή” συνιστώσα (διαστολής) που οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας.

S_A° = “γωνιακή” συνιστώσα που οφείλεται σε χαρακτηριστικά αντοχής των μικροανωμαλιών (συνάρτηση του βραχώδους υλικού στα τοιχώματα).

1.4.2 Συνιστώσα βασικής τριβής (Φ_b)

Η γωνία βασικής τριβής (Φ_b) είναι μία σταθερά, που εκπροσωπεί την ελάχιστη αντίσταση τριβής μεταξύ δύο λείων και επίπεδων επιφανειών υγιούς βραχώδους υλικού. Η τιμή της Φ_b συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 22ο και 37ο, εξαρτώμενη από την ορυκτολογική σύσταση, το μέγεθος των κόκκων και τις συνθήκες υγρασίας (Horne & Deere, 1962, Coulson 1971). Η τιμή της Φ_b είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος των ορθών τάσεων και την κλίμακα. Η Φ_b μπορεί να μετρηθεί με δοκιμές άμεσης διάτμησης σε επίπεδες, αλλά όχι τεχνητά λειασμένες επιφάνειες. Μία απλούστατη, αλλά αξιόπιστη, μέθοδος είναι η δοκιμή κεκλιμένης τράπεζας σε πυρήνες βράχου (Barton & Choubey, 1977).

Εφόσον το βραχώδες υλικό στα τοιχώματα μιας ασυνέχειας είναι αναλλοίωτο, η γωνία βασικής τριβής Φ_b αντιπροσωπεύει τη γωνία ελάχιστης ή παραμένουσας αντοχής Φ_r . Εάν οι επιφάνειες των ασυνεχειών παρουσιάζουν φαινόμενα εξαλλοίωσης, τότε $\Phi_b \neq \Phi_{res}$ και η τελευταία πρέπει να προσδιορισθεί ανεξάρτητα. Σύμφωνα με τις προτεινόμενες Μεθόδους μέτρησης της διατμητικής αντοχής κατά ISRM (1974), η παραμένουσα διατμητική αντοχή Φ_r έχει προσεγγισθεί, όταν τέσσερις διαδοχικές αναγνώσεις διατμητικής τάσης σε οριζόντια μετατόπιση 10mm, δεν διαφέρουν πέραν του $\pm 5\%$. Υπάρχουν αρκετά προβλήματα στις μετρήσεις της Φ_r , λόγω πρακτικών περιορισμών στις δοκιμές διάτμησης. Οι Kirsmanovic et al. (1967) και οι Krahn & Morgenstern (1979) πρότειναν τον όρο ελάχιστη αντοχή (“ultimate” αντί “residual”), σαν την μικρότερη τιμή τριβής που μπορεί να μετρηθεί με εργαστηριακές τεχνικές, όπου $\Phi_{ult} > \Phi_r$ και εξαρτάται από το ποσοστό ενεργοποίησης της ανεπιπεδότητας

στο αντίστοιχο στάδιο διάτμησης. Επομένως, δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερά όπως η Φ_r . Με βάση την τελευταία παραδοχή, ο Hencher (1987) προτείνει διόρθωση των μετρούμενων τ_{peak} για διάφορες τιμές σ , σύμφωνα με τις αντίστοιχες τιμές της γωνίας μέγιστης διαστολής $d_n^\circ(peak) = \tan^{-1}(dv/du)$:

$$\sigma_i = (\sigma \cdot \cos \cdot d_n + \tau \cdot \sin \cdot d_n) \cdot \cos d_n$$

$$\tau_i = (\tau \cdot \cos \cdot d_n + \sigma \cdot \sin \cdot d_n) \cdot \cos d_n$$

$$\Phi_{res} = \arctan(\tau_i / \sigma_i)$$

όπου d_n , η γωνία διαστολής.

Οι Barton & Choubey (1977) προσπαθώντας να ποσοτικοποιήσουν την επιρροή της επιφανειακής εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων ασυνεχειών στη τιμή Φ_r , κατέληξαν στην σχέση:

$$\Phi_r = (\Phi_b - 20) + 20 (r/R)$$

όπου :

Φ_b = η βασική γωνία τριβής

R = αριθμός κρουσιμέτρησης με σφύρα Schmidt σε ξηρές, αναλλοίωτες επιφάνειες.

r = αριθμός κρουσιμέτρησης με σφύρα Schmidt σε υγρές, φυσικές επιφάνειες.

1.4.3 Συνιστώσα διαστολής

Όπως περιεγράφηκε, το φαινόμενο διαστολής κατά την διάτμηση ανεπίπεδων επιφανειών εκδηλώνεται σαν μια συνιστώσα κατακόρυφης παραμόρφωσης (dv) που αντιστοιχεί σε βήμα διάτμησης (du):

$$dv = du \cdot \tan d_n^\circ$$

όπου

d_n° είναι η κλίση του συνιστάμενου διανύσματος μετατόπισης. Στην ουσία, ταυτίζεται με την μέση κλίση των ανωμαλιών της επιφάνειας που ενεργοποιούνται κατά την διάτμηση.

Το πρόβλημα στην πράξη εντοπίζεται στην επιλογή της ορθής τιμής d_n° , συνεκτιμώντας τόσο την επιρροή των ορθών τάσεων, όσο και του μήκους της ασυνέχειας. Η συμβολή της ελεύθερης διαστολής, στη διατμητική αντίσταση μπορεί να αποτιμηθεί θεωρώντας ότι η συμβολή της ανεπιπεδότητας στην αντίσταση τριβής ισοδυναμεί με προς τα άνω ολίσθηση σε κεκλιμένο επίπεδο (Σχήμα 1.4.3.1).

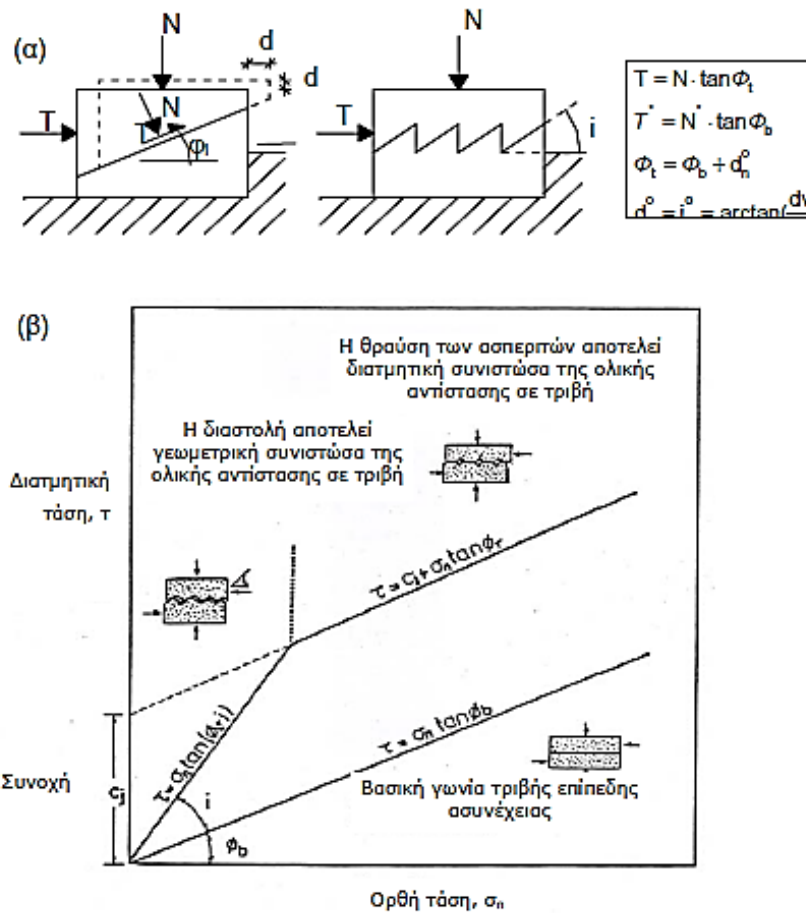
Τότε από την ανάλυση των δυνάμεων προκύπτει ότι:

$$\tan \Phi_t = \tan(\Phi_b + i) \quad (I)$$

$$\text{οπότε } \tau_{peak} = \sigma_n \tan(\Phi_b + i) \quad (II)$$

Αν μια ασυνέχεια διέθετε την κανονικότητα της ιδανικής γεωμετρίας του Σχήματος 1.4.3.1(β), τότε η εξίσωση (II) θα αποτελούσε επαρκή προσέγγιση της συμπεριφοράς. Ο Patton (1966)

προσδιόρισε πειραματικά μια διγραμμική περιβάλλουσα (Σχήμα 1.4.3.1β), η οποία δείχνει, ότι πέραν κάποιου οριακού μεγέθους ορθών τάσεων (σ_n), ευνοείται από άποψη ενέργειας η θραύση, αντί της προς τα άνω ολίσθησης. Όταν πρόκειται για φυσικές επιφάνειες, η μετάπτωση από απλή ολίσθηση σε θραύση με ταυτόχρονη ολίσθηση είναι προοδευτική, εκφραζόμενη με συχνή καμπυλότητα της περιβάλλουσας μέγιστης αντοχής. Η παραπάνω περιγραφή του φαινομένου της διαστολής αφορά συνθήκες ελεύθερης ορθής παραμόρφωσης. Εάν υποτεθεί ότι η δυνατότητα διαστολής περιοριζόταν, τότε θα επέρχονταν σημαντικές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά της ασυνέχειας.



Σχήμα 1.4.3.1 Εξιδανικευμένη αναπαράσταση του φαινομένου της διαστολής και της περιβάλλουσας μέγιστης διατμητικής αντοχής σύμφωνα με τον Patton, 1966

1.4.4 Επίδραση ορθών τάσεων

Η μεγάλη διακύμανση των τιμών $\Phi_{ολ}$ ($10^\circ - 70^\circ$) στις σχετικά χαμηλές ορθές τάσεις ($\sigma_n' = 0.01 - 5.00 \text{ MPa}$) και η αρκετά περιορισμένη στις υψηλές (Σχήμα 1.4.4.1) π.χ. για $\sigma_n = 1 - 100 \text{ MPa}$, $\tau = 0.85 \sigma_n$ κατά τον Byerlee, 1978), είναι τυπικά χαρακτηριστικά της διατμητικής συμπεριφοράς των ασυνεχειών. Η παραπάνω διαπίστωση βασίζεται στη συγκέντρωση και

αξιολόγηση μεγάλου αριθμού εργαστηριακών δοκιμών διάτμησης από τους Byerlee (1978) & Barton (1973). Τα δεδομένα προήλθαν από διάφορους τύπους φυσικών ασυνεχειών πυριγενών, μεταμορφωμένων και ιζηματογενών πετρωμάτων.

Η κύρια αιτιολόγηση των παραπάνω διακυμάνσεων στηρίζεται στην συνιστώσα ανεπιπεδότητας της διατμητικής αντοχής και στο διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής της σε διάφορα επίπεδα τάσεων. Αύξηση της ορθής τάσης μειώνει αναλογικά το μέτρο της d_n° και αυξάνει το μέτρο της S_A° , καθώς θραύεται προοδευτικά υψηλότερο ποσοστό μορφολογικών ανωμαλιών. Στο Σχήμα 1.4.4.2 παρουσιάζεται διαγραμματικά η εξέλιξη των "γωνιακών" συνιστωσών της ολικής αντίστασης σε ολίσθηση με αύξηση της ορθής τάσης. Σε χαμηλά επίπεδα τάσεων, συμβαίνει ενεργοποίηση του συνόλου του αναγλύφου των επιφανειών και η σχετική μετατόπιση των τοιχωμάτων της ασυνέχειας γίνεται κατά μήκος κεκλιμένων επαφών, που είναι δυνατόν τοπικά να έχουν μεγάλη κλίση. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η εμφάνιση υψηλών τιμών γωνίας ολικής τριβής $\Phi_{ολ}$ και διαστολής d_n° .

Ο Barton το 1971 απέδειξε ότι :

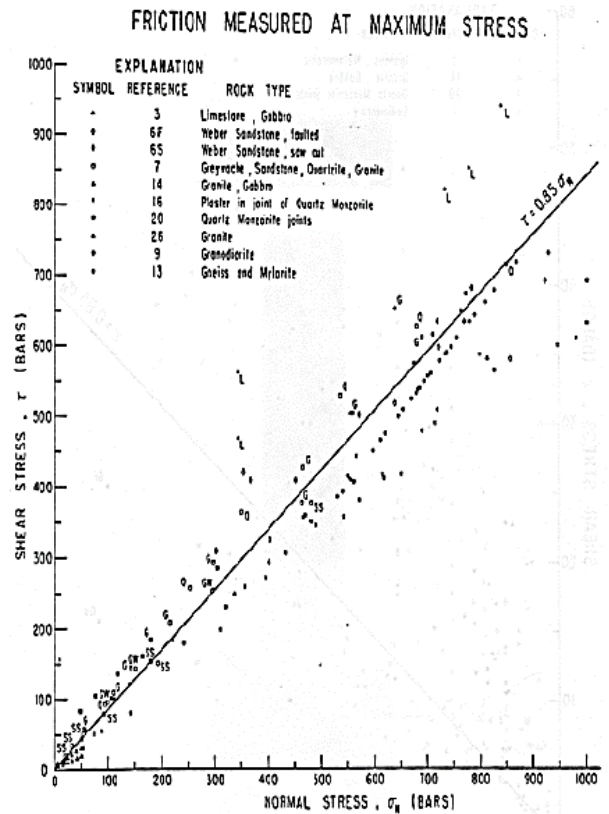
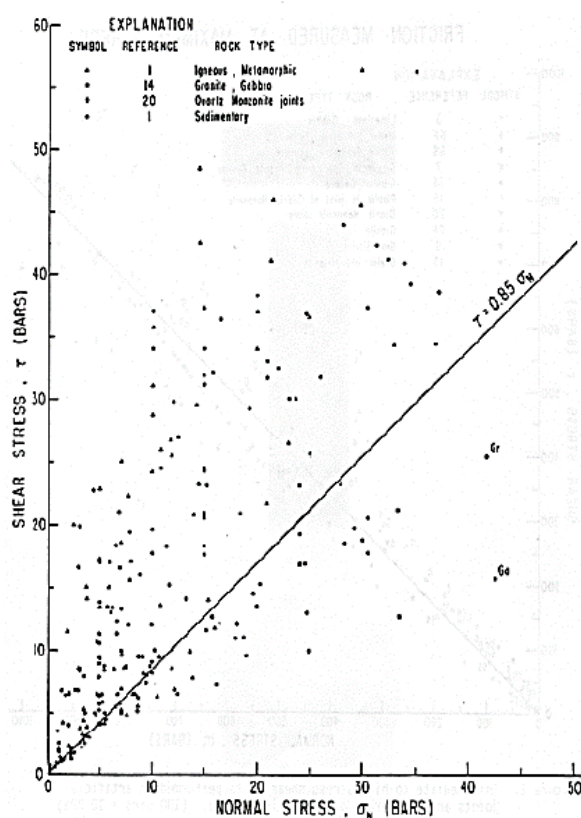
$$d_n^\circ = 10 \log_{10} (\sigma_c / \sigma_n)$$

όπου:

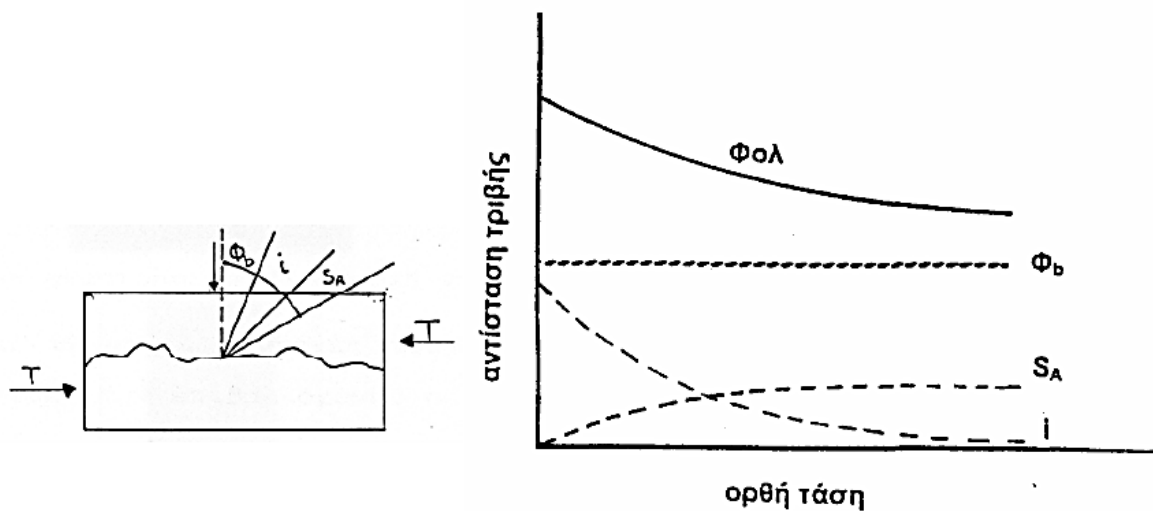
d_n° = γωνία διαστολής κατά τη μέγιστη διατμητική τάση,

σ_c = μοναξονική αντοχή του υλικού των τοιχωμάτων και

σ_n = ορθή τάση.



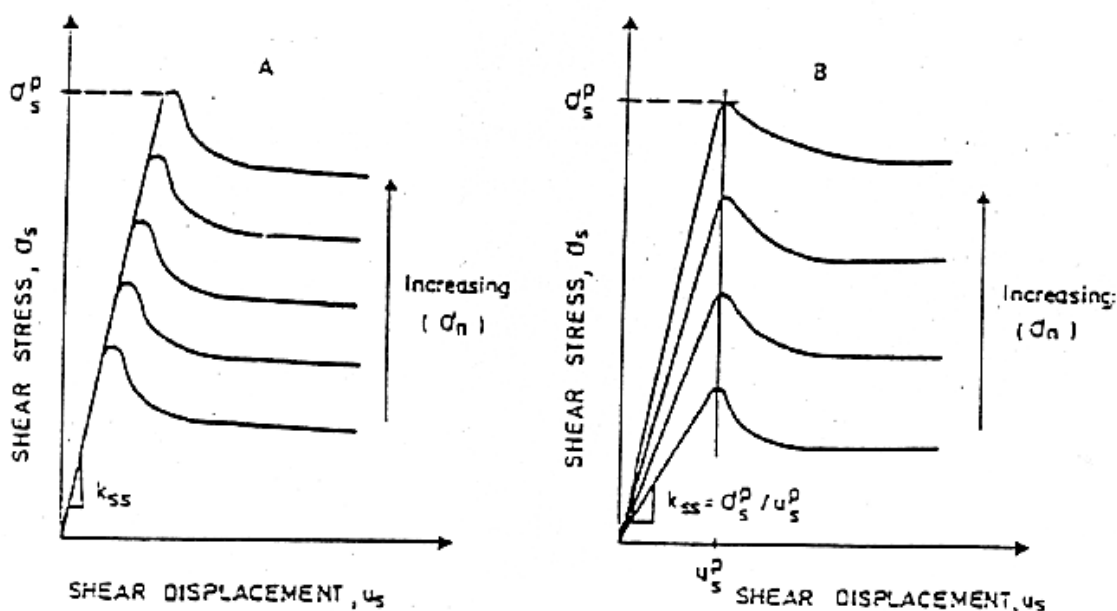
Σχήμα 1.4.4.1 Διακύμανση των διατμητικών αντοχών ($\Phi_{ολ}$ ($10^\circ - 70^\circ$)) στις σχετικά χαμηλές ορθές τάσεις ($\sigma_n' = 0.01 - 5.00 \text{ MPa}$) και σε υψηλές τάσεις ($\sigma_n = 1-100 \text{ MPa}$, $T = 0.85 \sigma_n$) κατά τον Byerlee (1978)



Σχήμα 1.4.4.2 Εξέλιξη των "γωνιακών" συνιστωσών τριβής κατά τη διάτμηση με αύξηση της ορθής τάσης (Barton, 1973)

Διατμητική δυσκαμψία

Για συγκεκριμένο τύπο ασυνέχειας η συνεπαγόμενη αύξηση της διατμητικής αντοχής με αύξηση της ορθής τάσης, είναι πιθανόν να ακολουθήσει τον ένα από τους δύο τύπους συμπεριφοράς στο Σχήμα 1.4.4.3 ή κάποιον ενδιάμεσο.



Σχήμα 1.4.4.3 (α) Σταθερή διατμητική δυσκαμψία

(β) Η διατμητική αντοχή εμφανίζεται σε σταθερή διατμητική παραμόρφωση (Barton, 1971)

1.4.5 Λοιποί επιδρώντες παράγοντες στην μετρούμενη διατμητική αντοχή

(α) Ρυθμός διάτμησης, ερπυσμός

Ο ρυθμός διάτμησης δεν φαίνεται, κατ' αρχή, να επηρεάζει αισθητά την διατμητική αντοχή. Η ISRM (1974) έχει προτείνει την περιοχή 0,1 - 1,0mm/sec. Αναφορικά με τις επιδράσεις μακρόχρονης φόρτισης, ο Dieterich (1972), παρατήρησε αύξηση του συντελεστή στατικής τριβής μεταξύ αδρών, επίπεδων επιφανειών διάφορων τύπων βράχου σε αναλογία με τον λογάριθμο του χρόνου επαφής. Γενικά, τα αποτελέσματα αυτά σχετίζονται με την παρουσία μυλωνιτικού υλικού ή λείανσης και την χρονική διάρκεια της στατικής επαφής και όχι με τον ρυθμό διάτμησης. Η επίδραση μακρόχρονων φορτίσεων στην συμπεριφορά "ερπυσμού" (creep) μελετήθηκε από τους Bieniawski (1970), Schneider (1977), Amadei & Curran (1980) Schwartz & Kolluru (1982), κ.αλ. Γενική παρατήρηση είναι ότι οι ερπυστικές παραμορφώσεις εξαρτώνται από τον λόγο της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης προς την μέγιστη διατμητική αντοχή της ασυνέχειας. Μια κρίσιμη τιμή του λόγου αυτού, που εξαρτάται από την ορθή

τάση, το είδος των επιφανειών, κλπ., προσδιορίζει την μετάβαση από ερπυσμό του συμπαγούς βράχου σε ερπυσμό των ασυνεχειών.

(β) Υγρασία και θερμοκρασία

Οι γωνίες βασικής τριβής (Φ_b) εμφανίζονται, γενικά, μειωμένες για τις υγρές επιφάνειες, πάντοτε σε άμεση συνάρτηση με την ορυκτολογική σύσταση του μητρικού βράχου. Υγιή πετρώματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε χαλαζία, αστρίους, κλπ. (πυριγενή πετρώματα) επηρεάζονται λιγότερο από τα λεπτόκοκκα ιζηματογενή και άλλα που έχουν υψηλό ποσοστό φυλλόμορφων ορυκτών. Στην πράξη, ο βαθμός επιρροής μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με κρουσιμετρήσεις της σφύρας Schmidt σε υγρές επιφάνειες. Γενικά, αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος φαίνεται να αυξάνει την αντίσταση τριβής και να ενθαρρύνει την συμπεριφορά "επαφή - ολίσθηση" (stick - slip). Ο παράγοντας της θερμοκρασίας είναι σημαντικός σε ειδικά τεχνικά προβλήματα, όπως η αποθήκευση πυρηνικών αποβλήτων και η ενεργοποίηση σεισμικών ρηγμάτων. Έχει παρατηρηθεί ότι η διατμητική τάση κατά την ομαλή ολίσθηση επηρεάζεται περισσότερο από τον ρυθμό επιβολής, όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή (Brace & Stecky, 1973).

1.4.6 Κριτήριο των Barton – Bandis

Ο Barton (1971, 1973), προσδιόρισε την παρακάτω σχέση μεταξύ της συνιστώσας ανεπιπεδότητας (i), της ορθής τάσης (σ_n) και της θλιπτικής αντοχής του βράχου (σ_c):

$$i = JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)$$

όπου : JRC = δείκτης τραχύτητας επιφάνειας (joint roughness coefficient)

JCS = δείκτης θλιπτικής αντοχής του υλικού τοιχωμάτων (joint compressive strength), ίσος με σ_c όταν η επιφάνεια είναι αναλλοίωτη

Εισάγωντας στην παραπάνω σχέση την $\tau_{peak} = \sigma_n \tan(\Phi_b + i)$ προκύπτει:

$$\tau(\max) = \sigma_n \cdot \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] + \Phi_b \quad (III)$$

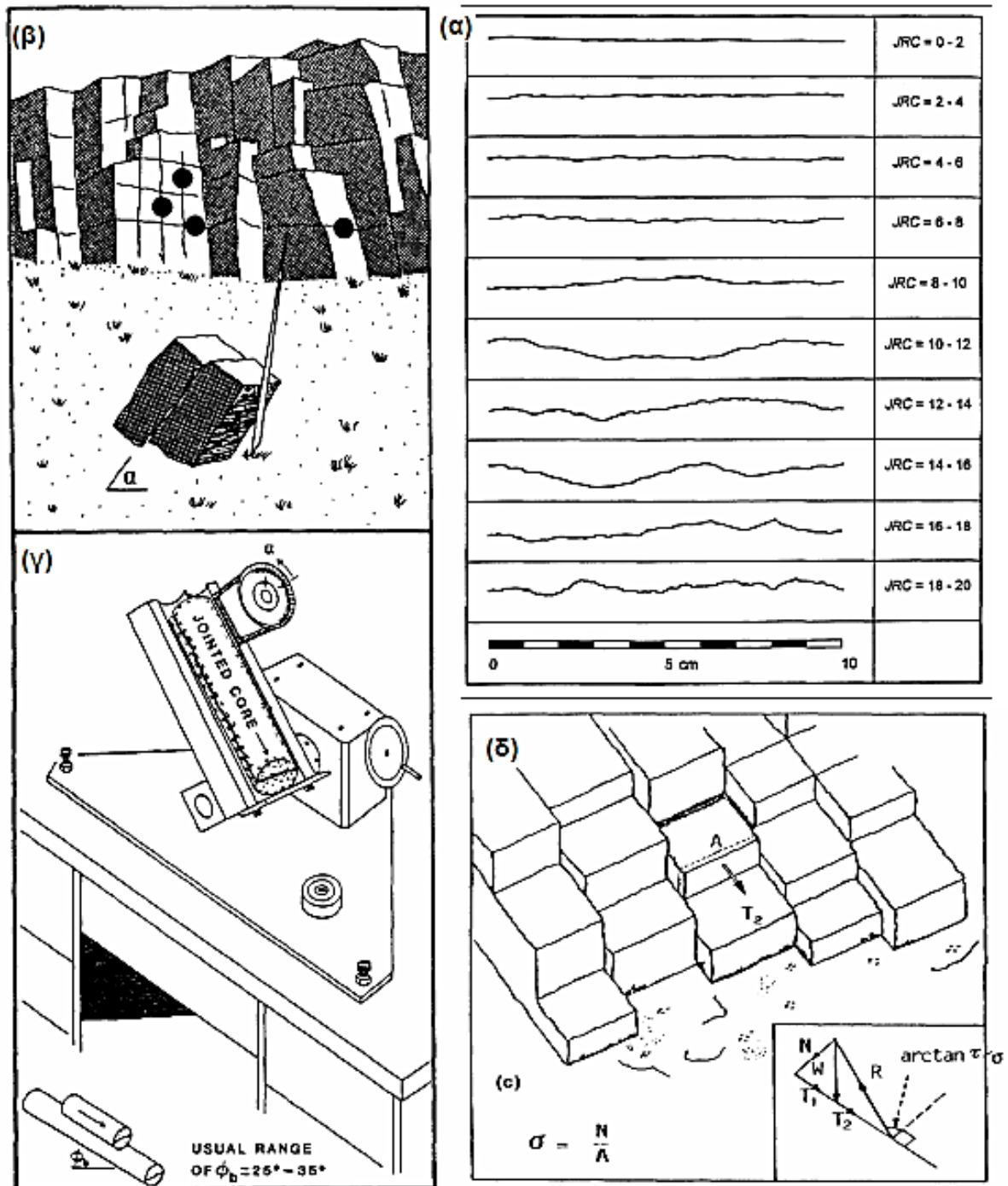
με όρια εφαρμογής $100 > JCS/\sigma_n \geq 1$.

Όταν $JCS/\sigma_n \geq 100$, προτάθηκε χρήση της $\tau(\max) = \sigma_n \cdot \tan 70^\circ$, ενώ όταν $JCS/\sigma_n < 1$, χρησιμοποιείται η τριαξονική αντοχή ($\sigma_1 - \sigma_3$) αντί αυτή του JCS (Barton, 1976).

Ο συντελεστής τραχύτητας (JRC) είναι μια φυσική σταθερά που εκφράζει προσεγγιστικά τον λόγο μήκους (L) προς μέγιστο ύψος (α) του αναγλύφου της ασυνέχειας. Η τιμή του κυμαίνεται από 0 για λείες και επίπεδες μέχρι 20 για τραχείες και ανεπίπεδες επιφάνειες (Σχήμα 1.4.6.1α). Η αρχική τιμή του JRC δεν επηρεάζεται από τις επιβαλλόμενες ορθές τάσεις, αλλά μειούται εκθετικά με αυξανόμενο μήκος ασυνέχειας (Bandis et al, 1981):

$$JRC_n \cong JRC_o (L_n/L_o)^{-0.02 \cdot JRC_o}$$

όπου οι δείκτες "ο" και "n" εκφράζουν κλίμακες εργαστηρίου και πεδίου αντίστοιχα. Η τιμή του JRC μπορεί να προσδιορισθεί από τις συνήθεις δοκιμές διάτμησης και επιλύοντας την εξίσωση (III), ή από απλές δοκιμές έλξης ή κεκλιμένης τράπεζας (Σχήμα 1.4.6.1β,γ και δ).



Σχήμα 1.4.6.1 Προσδιορισμός του δείκτη JRC (Barton, 1977)

Ο δείκτης JCS μπορεί να μετρηθεί άμεσα επί των επιφανειών με το κρουσίμετρο Schmidt, σύμφωνα με τις υποδείξεις των Barton & Choubey (1977). Διορθώσεις της μετρούμενης τιμής για τις επιρροές της κλίμακας έχουν προταθεί με χρήση της σχέσης (Bandis et al 1981):

$$JCS_n \cong JCS_o (L_n/L_o)^{-0.03 \cdot JRC_o}$$

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Τεχνολογία ενέσεων

Οι ενέσεις είναι μια μέθοδος που αποσκοπεί στην βελτίωση του εδάφους, δηλαδή την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους θεμελίωσης, έτσι που η λύση επιφανειακής θεμελίωσης να είναι εφικτή ή τουλάχιστον η πιθανή επιλογή βαθιάς θεμελίωσης να είναι πιο οικονομική. Με την εκτέλεση ενέσεων επιτυγχάνεται διείσδυση υπό πίεση μέσω διατρημάτων σε επιλεγμένες περιοχές του ενέματος. Σκοπός είναι η πλήρωση πόρων, μικρορωγμών, διακλάσεων ή άλλων ατελειών σε εδαφικά ή βραχώδη υλικά. Επιτυγχάνεται στεγανότητα άρα και περιορισμός των ωθήσεων άνωσης και άλλων μετακινήσεων καθώς και αύξηση των αντοχών έτσι που έχουμε πλέον καλύτερη ευστάθεια και βελτίωση γενικά μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους ή των βραχωδών υλικών.

Η διαδικασία των ενέσεων δεν μπορεί να τυποποιηθεί αυστηρά λόγω της ανομοιογενούς φύσης και της μεταβλητότητας των εδαφών. Στις ενέσεις εκτός από αιώρημα τσιμέντου με νερό μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άργιλος, άργιλος και τσιμέντο, άσφαλτος, ρητίνες, τέφρα και άλλα χημικά υλικά. Η εκτέλεση των ενέσεων αποτελείται από μία ακολουθία διαφόρων ενεργειών :

- i. διάτρηση μιας οπής κατάλληλης διαμέτρου σε προκαθορισμένο βάθος
- ii. προετοιμασία, αναλογίες, ζύγισμα και ανάμιξη του επιλεγμένου αιωρήματος ενέματος
- iii. έγχυση του προετοιμασμένου αιωρήματος στο καθορισμένο τμήμα της οπής, μέσω της οποίας γεμίζονται οι ρωγμές.

Υπάρχει μια ποικιλία διαδικασιών στις ενέσεις, που μπορούν να εφαρμοστούν για να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό οικονομικοτεχνικό αποτέλεσμα, οι οποίες εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες του πετρώματος, συνθήκες που συνήθως ποικίλουν μέσα σε μια μεγάλη περιοχή. Η επιτυχία μιας εργασίας ενέσεων επιβάλλει την προσεκτική αξιολόγηση των εδαφοτεχνικών και γεωλογικών πληροφοριών της περιοχής στην οποία πρόκειται να γίνουν οι εργασίες ενεμάτων. Οι πρακτικές αποφάσεις μπορούν να βασιστούν σε κάποιους γενικούς κανόνες (μικροτεκτονική δομή του βράχου, έκταση και συχνότητα κατακερματισμένων ζωνών, ύπαρξη κοιλοτήτων κ.τ.λ.), αλλά

και κάποια διαίσθηση βασισμένη σε προηγούμενη εμπειρία είναι πολύ βασική. Οι ενέσεις είναι ως κάποιο βαθμό μια τέχνη, για την καλύτερη εκπλήρωση των οποίων μια στενή συνεργασία ανάμεσα στους μηχανικούς σχεδίασης και τους εργολάβους μηχανικούς είναι απαραίτητη. Και οι δύο θα πρέπει να είναι καλά εξοικειωμένοι με τα μέσα και τις μεθόδους των ενέσεων, να έχουν μελετήσει τα χαρακτηριστικά του τοπικού πετρώματος, τα οποία σε σχέση με τα αποτελέσματα των επί τόπου ερευνών δίνουν προφανή στοιχεία για το σχεδιασμό και την εκτέλεση των ενέσεων. Είναι δυνατό να τυποποιηθούν διάφορες φάσεις των ενέσεων, έτσι ώστε οι δραστηριότητες να κατευθύνονται λογικά στον επιδιωκόμενο σκοπό, μείωση της διαπερατότητας, αυξημένη αντοχή και μειωμένη παραμορφωσιμότητα της ενεμένης περιοχής.

Το αποτέλεσμα που μπορεί να επιτευχθεί εκτελώντας ένεση φυσικά έχει κάποιο όριο, διότι πόροι και ρωγμές στενότερες από κάποιο οριακό μέγεθος δεν μπορούν να διαπεραστούν από το εγχέομενο μίγμα. Το κατώτερο όριο της διαπερατότητας που μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια των ενέσεων σε ρηγματωμένο πέτρωμα είναι περίπου ίσο με $K=10^{-6}$ cm/sec. Μια ένδειξη αν κάτω από φυσιολογικές συνθήκες οι ενέσεις είναι απαραίτητες ή εφικτές, είναι η διαπερατότητα του πετρώματος, η οποία σχετίζεται με τη δυνατότητα διείσδυσης του εγχέομενου ενέματος στους πόρους ή στις ρωγμές. Η τεχνική των ενέσεων μπορεί να μαθευτεί άριστα μόνο μέσω της εμπειρίας, των προσεκτικών παρατηρήσεων και εκτιμήσεων της κατάστασης του πετρώματος κατά την διάρκεια έγχυσης. Για την διενέργεια των ενέσεων καταστρώνεται ένα σχέδιο διατρήσεων που αφορά την μέση απόσταση, το βάθος, την κλίση των διατρημάτων και άλλα αναγκαία στοιχεία, όμως μια αυστηρή συμμόρφωση με ένα τυπικά αποδεκτό σχέδιο ενέσεων συνήθως προκαλεί σπατάλη υλικού ή μια μη ασφαλή κατασκευή, και θα πρέπει να γίνεται μια συνεχής επί τόπου εκτίμηση και λήψη αποφάσεων για καλύτερη αντιμετώπιση.

2.1.1 Γεώτρηση και σειρά εργασιών

Η πρώτη εργασία που λαμβάνει χώρα κατά την διάρκεια ενέσεων είναι η διάτρηση οπών έγχυσης σε διαστήματα, που έχουν οριστεί από το σχέδιο διατρήσεων. Στη συνέχεια αυτά τα διαστήματα μεταβάλλονται σύμφωνα με τα αποτελέσματα που

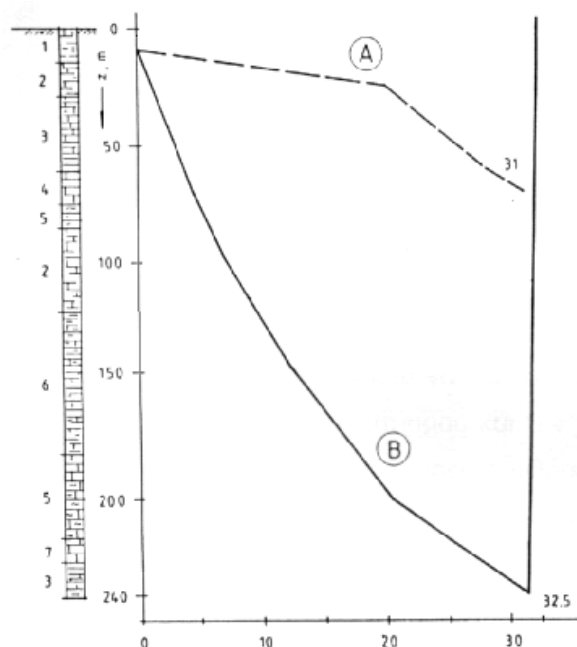
λαμβάνονται από τις ενέσεις ελέγχου, με τα αποτελέσματα προηγούμενου σταδίου ενέσεων, που γίνονται στην τοποθεσία.

Περιστροφικοί ή περιστροφικοί κρουστικοί εξοπλισμοί γεώτρησης χρησιμοποιούνται για την διάτρηση των οπών. Για έκπλυση των οπών χρησιμοποιείται νερό, αν και μερικές φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέρας (Mongilardi and Tornaghi, 1986).

Αναλυτικότερα, για τους περιστροφικούς κρουστικούς, ο εξοπλισμός θα πρέπει είτε να έχει δυνατότητα ηλεκτροκίνησης κατά την λειτουργία του για την διάτρηση των οπών ή στην περίπτωση που είναι πετρελαιοκίνητος, να υπάρχει υποδομή στον κινητήρα για χρήση σε υπόγεια έργα. Καθώς άλλου τύπου κινητήρες δεν επιτρέπονται για χρήση στον διατρητικό εξοπλισμό. Ο διατρητικός εξοπλισμός θα πρέπει να διαθέτει κατάλληλο σύστημα περιορισμού και ελαχιστοποίησης της σκόνης, όπως ψεκασμός νερού, κονιοσυλλέκτες, χημικά συστήματα ελέγχου της σκόνης ή άλλα. Επίσης η διάτρηση των οπών θα γίνεται με την χρήση κοπτικού άκρου κατάλληλης διαμέτρου, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή διάμετρος διατρήματος, χωρίς την εκτέλεση υπερδιάτρησης ή ανάγκης εκ των υστέρων διεύρυνσης των οπών, εκτός εάν συντρέχουν ειδικοί λόγοι. Τα προϊόντα διάτρησης θα απομακρύνονται συνεχώς κατά την διάρκεια της εργασίας με χρήση νερού. Δεν επιτρέπεται η χρήση <<αλοιφής στελεχών>>, γράσου ή άλλων λιπαντικών εντός των οπών κατά την διάτρηση και όπου απαιτείται διάτρηση οπών μέσα σε χαλαρά υλικά ή μέσα σε έντονα κερματισμένο βράχο, θα χρησιμοποιούνται μεταλλικές σωληνώσεις για την αντιστήριξη των τοιχωμάτων των οπών. Οι σωληνώσεις θα αφαιρούνται μετά την ολοκλήρωση των προβλεπόμενων εργασιών στην οπή. Σε περίπτωση ανεπιτυχούς διάτρησης εξ αιτίας κατάπτωσης ή έμφραξης, το διάτρημα θα αποκαθίσταται με επαναδιάτρηση ή ένεση για τη σταθεροποίηση των τοιχωμάτων του. Μετά το τέλος της διάτρησης, οι οπές θα εκπλένονται επαρκώς, έως πλήρους απομάκρυνσης των υπολειμμάτων διάτρησης των οπών.

Συνήθως κάποιες από τις αρχικές οπές, που πρόκειται να ενεθούν, ανοίγονται με περιστροφικούς εξοπλισμούς ώστε να παρθούν κάποια δείγματα που να δίνουν πρόσθετα δεδομένα για τη σύνθεση και την κατάσταση του υπεδάφους. Η περιστροφική γεώτρηση είναι 2 έως 5 φορές πιο ακριβή από την κρουστική γεώτρηση. Το κόστος μπορεί να μειωθεί και η ταχύτητα γεώτρησης μπορεί να

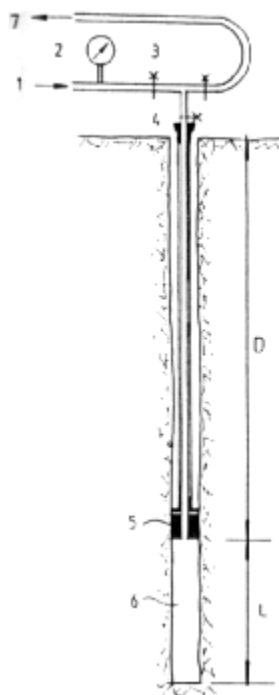
αυξηθεί χρησιμοποιώντας τρυπάνια χωρίς αδαμαντοκορώνα προκαλώντας την θραύση του υλικού, το οποίο μεταφέρεται στην επιφάνεια από το αναβλύζων νερό. Σε ενέσεις χρησιμοποιούνται κυρίως περιστροφικοί κρουστικοί εξοπλισμοί με τους οποίους επιτυγχάνονται βάθη γεώτρησης έως 180 m και ταχύτητα διάτρησης 20 m/h (Ewert,1984). Περιστροφικοί εξοπλισμοί χρησιμοποιούνται σε περίπτωση που το υπόστρωμα είναι σε μεγάλο βαθμό αποσαθρωμένο, ή καλύπτεται από χαλαρά εδαφικά υλικά, οπότε η χρήση κρουστικών εξοπλισμών είναι αδύνατη. Στο σχ.1.1 η ταχύτητα διάτρησης που επιτυγχάνεται σε ένα σχέδιο ελέγχου ενέσεων στο Λίβανο (Fingerhut, 1971), με ένα περιστροφικό κρουστικό εξοπλισμό, συγκρίνεται με την ταχύτητα διάτρησης που λαμβάνεται στην ίδια τοποθεσία με ένα περιστροφικό εξοπλισμό.



Σχήμα 2.1.1. Εξέλιξη της γεώτρησης με (A) περιστροφικό και (B) κρουστικό εξοπλισμό : 1. άργιλος με θραυστό ασβεστόλιθο, 2. ασβεστόλιθος μάργας, 3. μαλακός ασβεστόλιθος μάργας, 4. μεσαίας σκληρότητας ασβεστόλιθος, 5. σκληρός ασβεστόλιθος μάργας, 6. σκληρός ασβεστόλιθος, 7. μαλακός ασβεστόλιθος

Το ένεμα εγχέεται σε ένα τμήμα της οπής με μήκος L, με τη βοήθεια ενός σωλήνα στο κατώτερο μέρος του οποίου στερεώνεται ένα παρέμβυσμα, όπως φαίνεται στο σχ.1.2.

Το μήκος (L) του τμήματος της οπής, όπου γίνεται έγχυση, επιλέγεται σε αντιστοιχία με την διαπερατότητα του σχηματισμού και την χωρητικότητα άντλησης. Αν η διαπερατότητα είναι μικρή, το L μπορεί να φθάσει τα 10 m σε ομοιογενές πέτρωμα, ενώ σε υψηλά θραυσμένο και διαπερατό πέτρωμα μπορεί να είναι και 1 m. Συνήθως επιλέγεται L=5 m. Η διάμετρος των οπών έγχυσης δεν έχει καμία ουσιώδη επίδραση στην αποτελεσματικότητα των ενέσεων.



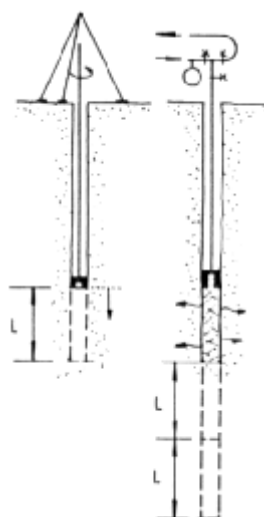
Σχήμα 2.1.2. Οπή γεώτρησης με κατακόρυφο σωλήνα και παρέμβυσμα για εκτέλεση ένεσης, 1. σωλήνας παροχής ενέματος, 2. μανόμετρο, 3. βαλβίδες, 4. μηχανή σύστρεψης, 5. παρέμβυσμα, 6. τμήμα έγχυσης, 7. σωλήνας επιστροφής.

Επιλέγεται, επομένως, η μικρότερη δυνατή και καταλληλότερη για το μέγιστο βάθος διάμετρος οπής. Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς η διάμετρος των οπών πρέπει να κυμαίνεται από 46-56 mm. Σε περίπτωση, όμως, χαλαρών εδαφικών στρώσεων η ελάχιστη διάμετρος της οπής είναι 101 mm και η ελάχιστη διάμετρος στο προβλεπόμενο τελικό βάθος της οπής είναι 76 mm.

Η εκτέλεση της γεώτρησης και ένεσης πραγματοποιείται με μία από τις παρακάτω μεθόδους :

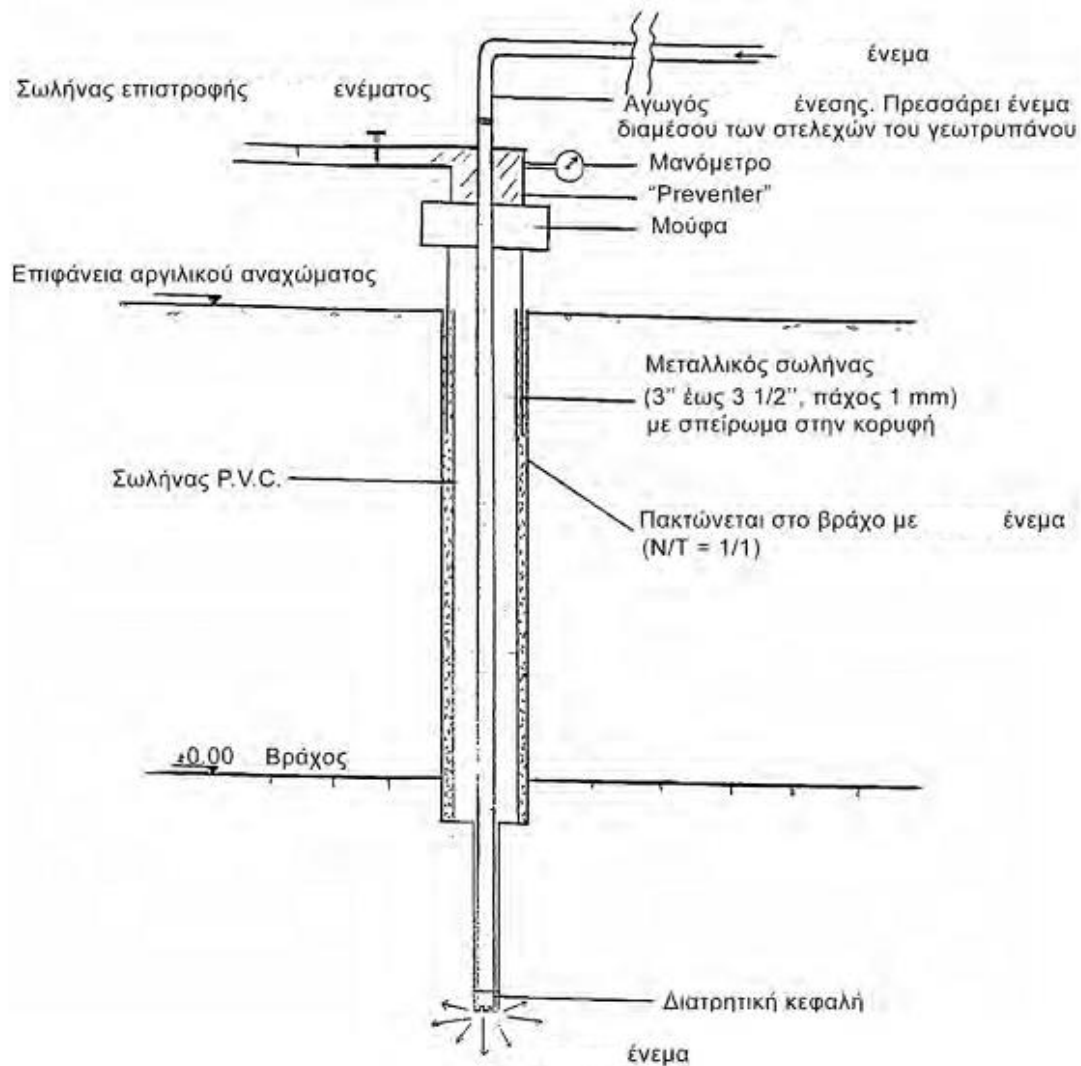
- i. Μέθοδος κατά κατιόντα βήματα
- ii. Μέθοδος κατά ανιόντα βήματα

Με βάση τη μέθοδο κατά κατιόντα βήματα (Nonveiller, 1970) εκτελείται διάτρηση της οπής σε περιορισμένο βάθος, στη συνέχεια γίνεται δοκιμή εισπίεσης και εκτέλεση ένεσης (σχ.1.3). Κατόπιν αφήνεται να παρέλθει ο απαραίτητος χρόνος για την αρχική πήξη του ενέματος στον περιβάλλοντα χώρο, γίνεται διάτρηση της οπής σε μεγαλύτερο βάθος, ένεση κ.ο.κ. Η διαδοχή διάτρησης και ένεσης της οπής σε διάφορα βάθη θα συνεχισθεί μέχρι το απαιτούμενο τελικό βάθος της οπής να έχει πλήρως διατρηθεί και ενεθεί. Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη, όταν τα πάνω στρώματα της θεμελίωσης είναι κατακερματισμένα με πιθανό κίνδυνο τα τοιχώματα της γεώτρησης να καταρρεύσουν και να μπλοκάρουν τον εξοπλισμό ή όταν κατά τη διάρκεια δοκιμών εισπίεσης, παρατηρείται διαρροή νερού στην επιφάνεια (Nicholson, 1963).



Σχήμα 2.1.3. Γεώτρηση και εκτέλεση ενέσεων σε τομές από την κορυφή προς τον πυθμένα.

Συγκεκριμένα παρουσιάζεται σχήμα που παρουσιάζει τα επιμέρους τμήματα της διαδικασίας ένεσης και παρακάτω η επεξήγηση αυτών.



Σχήμα 2.1.Α: Διαδικασία και επεξήγηση ένεσης

Κατά την μέθοδο αυτή τα αρχικά στάδια προετοιμασίας της ένεσης είναι:

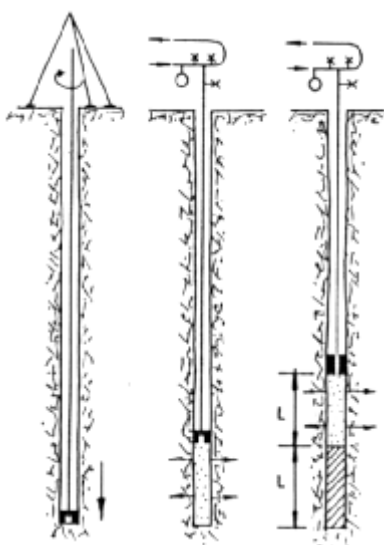
- προσεκτική διάτρηση του κατασκευασθέντος αργιλικού αναχώματος εν ξηρώ, έτσι ώστε να μην διαταραχθούν οι αργιλικές στρώσεις του κατασκευασθέντος τμήματος του αναχώματος
- τοποθέτηση σωλήνα PVC, ο οποίος εισχωρεί μέσα στον βράχο
- έκχυση πυκνού ενέματος μεταξύ σωλήνα PVC και οπής με ελεύθερη ροή μέσα από σωληνίσκο και πάκτωση του σωλήνα PVC εντός του βράχου
- τοποθέτηση ειδικού μεταλλικού τεμαχίου με στρόφιγγα (preventer) στην κεφαλή της οπής και πάκτωση αυτού με ένεμα, έτσι ώστε να επιτρέπεται, μετά το άνοιγμα της στρόφιγγας, η έξοδος (επιστροφή) των προϊόντων της

διάτρησης, ενώ κατά την εφαρμογή του ενέματος και μετά το κλείσιμο της στρόφιγγας εμποδίζεται η έξοδος του ενέματος.

Στη συνέχεια, μετά την σταθεροποίηση του σωλήνα PVC, εκτελείται η ένεση κατά στάδια. Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η οπή σε όλη τη διάρκεια της διάτρησης και της ένεσης βρίσκεται υπό πίεση ύδατος ή ενέματος και ως εκ τούτου η οπή παραμένει ευσταθής και δεν συμβαίνουν ανεπιθύμητες καταπτώσεις λίθων που προκαλούν έμφραξη της οπής. Επίσης, δεν απαιτείται η εφαρμογή ελαστικού παρεμβύσματος (racker), το οποίο δεν "πιάνει" σε χαλαρά τοιχώματα οπής, αποσαθρωμένο βράχο κλπ. Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μη δυνατότητα εφαρμογής μεγάλων πιέσεων, γιατί η οπή της ένεσης βρίσκεται σε όλο το βάθος της υπό την ίδια πίεση. Για αντιστάθμιση του μειονεκτήματος αυτού, γίνεται πύκνωση της κουρτίνας ενέσεων με την εκτέλεση και τριτευσουσών ενέσεων, ακόμη και αν αυτό δεν δικαιολογείται από τις απορροφήσεις ενέματος.

Η μέθοδος κατά ανιόντα βήματα (σχ.1.4) στηρίζεται στη διάτρηση της οπής μέχρι το τελικό βάθος. Η ένεση της οπής αρχίζει κατά ανιόντα τμήματα από τον πυθμένα και μέχρι την κεφαλή της οπής, τοποθετώντας στεγανωτικό παρέμβυσμα σε ενδιάμεσες θέσεις, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους 3-5 m. Σε κάθε τμήμα εκτελείται δοκιμή εισπίεσης είτε κατά τη διάρκεια της διάτρησης, δηλαδή πριν ολοκληρωθεί η διάτρηση μέχρι το τελικό βάθος της οπής, είτε μετά το τέλος της διάτρησης της οπής στο τελικό της βάθος, χρησιμοποιώντας δύο παρεμβύσματα τοποθετημένα στα δύο άκρα του τμήματος (Polatty, 1982).

Μετά την περάτωση της ένεσης σε κάθε τμήμα, το παρέμβυσμα διατηρείται στη θέση του εφόσον αναπτύσσεται ανάστροφη πίεση ή για όσο διάστημα απαιτηθεί, ώστε το ένεμα να πάρει την αρχική του πήξη στις ασυνέχειες της περιβάλλουσας μάζας του υπεδάφους που διείσδυσε, πριν αρχίσει η ένεση στο επόμενο τμήμα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται, εφόσον ο σχηματισμός του υπεδάφους είναι συμπαγής.



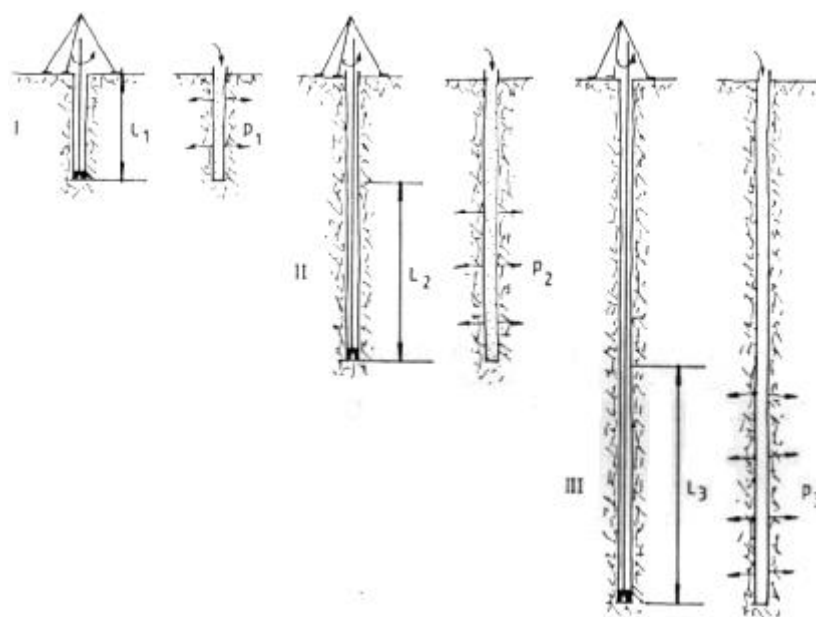
Σχήμα 2.1.4. Εκτέλεση ενέσεων σε τομές από τον πυθμένα προς τα πάνω.

Η πορεία των εργασιών με την μέθοδο κατά ανιόντα τμήματα είναι γρηγορότερη από τη μέθοδο κατά κατιόντα τμήματα. Ο μόνος κίνδυνος στην παραπάνω περίπτωση προέρχεται από το ένεμα που παρακάμπτει το παρέμβυσμα και γεμίζει το αμέσως προηγούμενο τμήμα οπής. Για την αποφυγή ενός τέτοιου κινδύνου, τοποθετείται μια μάνικα για τον καθαρισμό του παρεμβύσματος από το διαφυγές προς τα πάνω ένεμα. Σε μερικές περιπτώσεις ο συνδυασμός και των δύο μεθόδων αξιολογείται ως ο καταλληλότερος (Flores et al., 1985). Η οπή ανοίγεται μέχρι ενός βάθους, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να καταρρεύσουν τα τοιχώματα. Επόμενη ενέργεια είναι ένεση με τη μέθοδο ανιόντων βημάτων, ξανά γεώτρηση μέχρι το επόμενο βάθος και ένεση. Μ' αυτόν τον τρόπο ο αριθμός μετακινήσεων του εξοπλισμού και των διατάξεων μειώνεται.

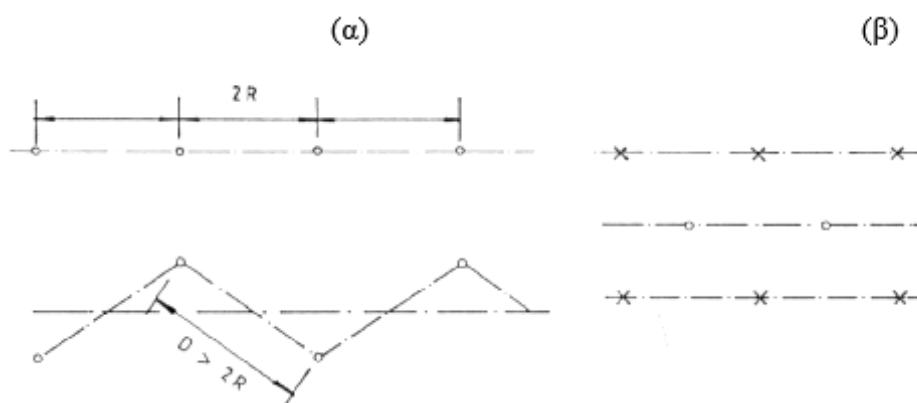
Σε ορισμένες περιπτώσεις (κυρίως στις Η.Π.Α.) εφαρμόζεται η μέθοδος της εκτέλεσης ενέσεων σε ζώνες (Klosterman, 1982). Η οπή, αρχικά, ανοίγεται μέχρι ενός μέτριου βάθους, όπως φαίνεται στο σχ.1.5. Μετά ένας σωλήνας στερεώνεται με κονίαμα τσιμέντου στην κεφαλή της οπής. Στην συνέχεια η οπή ανοίγεται με τρυπάνι έως το βάθος της πρώτης ζώνης έγχυσης. Ο σωλήνας παροχής ενέματος συνδέεται στον σωλήνα και η ζώνη ενύεται κάτω από μέτρια πίεση, με αποτέλεσμα οι διαρροές στην επιφάνεια να αποτρέπονται. Εφόσον το ένεμα πήξει, η οπή διατρέιται ξανά ως το

βάθος της επόμενης ζώνης, ο σωλήνας συνδέεται με το σωλήνα παροχής ενέματος και ολόκληρο το βάθος ενύεται, αλλά με υψηλότερη πίεση, έτσι ώστε η πιο πάνω ζώνη να υποστεί ξανά ένεση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το τελικό βάθος της ένεσης. Συνήθως το βάθος της ένεσης διαιρείται σε τρεις ζώνες. Θεωρείται ότι εκτελώντας ένεση στην κάτω ζώνη, και κατά συνέπεια στην ήδη ενεμένη πάνω ζώνη, με υψηλότερη πίεση, βελτιώνονται τα αποτελέσματα της ένεσης. Αυτό είναι αμφίβολο σε πολλές περιπτώσεις, διότι η σύνθεση του ενέματος και η διαδικασία έγχυσης πρέπει να επιλεγούν ώστε να ανταποκρίνεται στα χαρακτηριστικά της ζώνης, που πρόκειται να ενεθεί. Η επιλογή αυτή μπορεί να μην είναι η κατάλληλη για τη ζώνη, που έχει ήδη υποστεί ένεση και φανερώνει χαμηλή διαπερατότητα.

Ο αριθμός των σειρών των οπών, που πρόκειται να διατρηθούν και να ενεθούν, εξαρτάται από το απαιτούμενο πάχος της εγχέομενης ζώνης και από την αρχική διαπερατότητα του σχηματισμού. Γενικός κανόνας καθορισμού του αριθμού αυτού δεν υπάρχει. Εάν μόνο δύο σειρές οπών ενύονται, όπως φαίνεται στο σχ.1.6, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με αυτό που επιτυγχάνεται αυξάνοντας το διάστημα ανάμεσα στις οπές. Όταν τρεις σειρές οπών πρόκειται να ενεθούν, ενύονται πρώτα οι εξωτερικές σειρές με χαμηλότερα κριτήρια κορεσμού και ύστερα ενύονται οι εσωτερικές σειρές, οι οποίες μπορούν να υποστούν ένεση σε υψηλότερη πίεση και κριτήρια κορεσμού, χωρίς υπερβολική σπατάλη ενέματος (Pavlin, 1978).



Σχήμα 2.1.5. Εκτέλεση ενέσεων σε ζώνες από πάνω προς τα κάτω, ζώνες I-III



Σχήμα 2.1.6. Πυκνότητα εκτέλεσης ενέσεων α) σε μια απλή και σε μια διπλή σειρά κουρτίνας, β) σε μια τριπλή σειρά κουρτίνας.

Εμπειρικά δεδομένα έχουν δείξει, ότι ο τρόπος σειράς που ακολουθείται στην εκτέλεση ενέσεων σε διαφορετικές οπές επηρεάζει περισσότερο απ' οτιδήποτε άλλο το τελικό αποτέλεσμα. Η μέθοδος που κατά κανόνα χρησιμοποιείται σήμερα είναι αυτή του «χωριζόμενου διαστήματος». Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή το πρώτο σύνολο οπών, οι λεγόμενες πρωτεύουσες, διατηρούνται και ενύονται σε τέτοια απόσταση μεταξύ τους, που ξεπερνά τη μέση απόσταση που μπορεί να καλύψει το εγχεόμενο ένεμα. Το επόμενο σύνολο οπών, οι ονομαζόμενες δευτερεύουσες οπές, διατρώνονται και ενύονται στη μέση του διαστήματος ανάμεσα στις πρωτεύουσες. Η ακολουθία επαναλαμβάνεται ξανά με τις τριτεύουσες στη μέση του διαστήματος ανάμεσα στις δευτερεύουσες, και ούτω καθεξής, μέχρις ότου η διαπερατότητα του εδαφικού σχηματισμού αποκτήσει ικανοποιητική τιμή. Η βασική απόσταση ανάμεσα στις πρωτεύουσες οπές καθορίζεται από προηγούμενα εμπειρικά δεδομένα σε παρόμοιες συνθήκες εδάφους, ή βασίζεται στα αποτελέσματα ενός ή περισσότερων σχεδίων ελέγχου εκτέλεσης ενέσεων. Η απόσταση θα πρέπει να επιλεγεί, έτσι ώστε το απαιτούμενο αποτέλεσμα να επιτευχθεί μετά την έγχυση και των τριτεύουσών οπών, των οποίων η μεταξύ τους απόσταση κυμαίνεται από 1,5 έως 3 μέτρα. Το συνολικό διάστημα εξαρτάται από το είδος των ρωγμών, τη σύνθεση του ενέματος, την πίεση έγχυσης, τα ειδικά κριτήρια κορεσμού και την αρχική διαπερατότητα του σχηματισμού.

Τεταρτεύουσες οπές θα πρέπει σποραδικά να απαιτούνται, δεδομένου ότι η απόσταση των πρωτευουσών οπών έχει σωστά επιλεγεί. Στην συγκεκριμένη διαδικασία το σύνολο των οπών υψηλότερης τάξης θα πρέπει να ενύονται, αφού πρώτα όλες οι οπές χαμηλότερης τάξης έχουν ενεθεί. Οι οπές υψηλότερης τάξης μπορούν να διατηρηθούν και να υποστούν ένεση, προτού οι οπές χαμηλότερης τάξης φθάσουν το τελικό βάθος, αλλά οι δεύτερες θα πρέπει να ενεθούν σε τουλάχιστον δύο τμήματα βαθύτερα από τις πρώτες (Houlsby, 1981).

Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων της έγχυσης, που επιτεύχθηκαν στο τελευταίο σύνολο των οπών, μπορεί να βασιστεί είτε σε μετρήσεις της διαπερατότητας του εδάφους, πριν και μετά την έγχυση, είτε στην συγκεκριμένη κατανάλωση ενέματος. Η πρώτη λύση απαιτεί μετρήσεις της διαπερατότητας σε νέες οπές ελέγχου ανάμεσα από το σύνολο των ενεμένων οπών. Πρόκειται, λοιπόν, για μια διαδικασία χρονοβόρα και ακριβή.

Η δεύτερη λύση βασίζεται σε κάποια πρακτική εμπειρία και στην κατάταξη της συγκεκριμένης κατανάλωσης ενέματος, όπως προτάθηκε από τον Deere (1976) και φαίνεται στον πίνακα 1.1. Η κατανάλωση ενέματος κυμαίνεται από πολύ υψηλή σε πολύ χαμηλή. Στο τελευταίο σύνολο οπών θα πρέπει να είναι χαμηλή έως πολύ χαμηλή. Το πλεονέκτημα αυτής της λύσης στηρίζεται στο γεγονός ότι η απόφαση να ενεθεί ή όχι το επόμενο, υψηλότερης τάξης, σύνολο οπών μπορεί να ληφθεί μόλις είναι διαθέσιμα τα αποτελέσματα της έγχυσης του προηγούμενου συνόλου, χωρίς κανένα επιπρόσθετο έλεγχο (Houlsby, 1985).

Σύμφωνα με την πρακτική εμπειρία για να γεμίσει 1 μέτρο βάθους μιας οπής διαμέτρου 70 mm ή 46 mm, απαιτούνται το λιγότερο 10 kg/m και 5 kg/m ενέματος αντίστοιχα. Αν η απορρόφηση ενέματος είναι μικρότερη τότε θεωρείται άσκοπη η συνέχιση της διαδικασίας ενέσεων

Χαρακτηρισμός	Κατανάλωση εγχεόμενου ενέματος (kg/m)
πολύ υψηλή	> 400
υψηλή	200 - 400
μέτρια υψηλή	100 - 200
μέτρια	50 - 100
μέτρια χαμηλή	25 - 50
χαμηλή	12.5 - 25
πολύ χαμηλή	< 12.5

Πίνακας 2.1.1. Ειδική κατανάλωση εγχεόμενου ενέματος (Deere,1976).

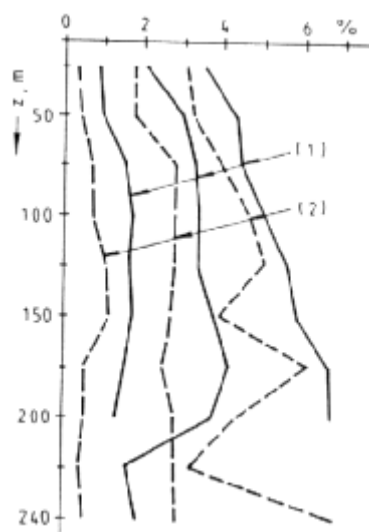
Όταν το τρυπάνι γεώτρησης χτυπήσει μια κεκλιμένη ασυνέχεια, ο άξονας της οπής μπορεί να αποκλίνει από τον κάθετο άξονα και ο πυθμένας της οπής να μην ικανοποιεί την απαιτούμενη θέση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διάστημα ανάμεσα στις οπές να μεταβάλλεται περισσότερο όσο μεγαλώνει το βάθος των οπών. Χρειάζεται μεγάλη προσοχή για την πρόληψη τέτοιων ανούσιων παρεκκλίσεων των οπών, γιατί μπορούν να φανούν ιδιαίτερα καθοριστικές στην επιφάνεια έκτασης του ενέματος.

Γι' αυτό πολλές φορές δίνεται μεγάλη σημασία στον αυστηρό έλεγχο της καθετότητας των οπών με καθορισμένα τα όρια της παρέκκλισης. Στις Η.Π.Α. οπές βαθύτερες από 20 μέτρα αποφεύγονται. Στην περίπτωση βαθύτερων οπών εκσκάπτονται στοές, από τις οποίες ανοίγονται ξανά οπές βάθους 20 μέτρων. Στην πράξη η έκταση του εγχεόμενου ενέματος αυξάνεται με το βάθος, λόγω της αύξησης της εφαρμοζόμενης πίεσης και την πτώση της υδραυλικής κλίσης, εξαιτίας της ύπαρξης περισσότερο συμπαγών σχηματισμών απ' ότι στην επιφάνεια του εδάφους (Harris, 1982). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ακριβής θέση της οπής στον πυθμένα, μετά από ένα όριο βάθους, να μην είναι πολύ σημαντική για το συνολικό αποτέλεσμα των ενέσεων. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις παρατηρήσεις, που έγιναν πάνω σε τεχνικά έργα ενέσεων (Houlsby, 1988).

Το βάθος των δευτερευουσών οπών είναι γενικά μικρότερο από το βάθος των πρωτευουσών, όπως και το βάθος των τριτευουσών οπών είναι μικρότερο από το βάθος των δευτερευουσών. Οι αιτίες της ανεξέλεγκτης απόκλισης οπής είναι κυρίως:

- ❖ κεκλιμένος ή όχι καλά στερεωμένος εξοπλισμός γεώτρησης.
- ❖ χρήση εύκαμπτων ράβδων γεώτρησης.
- ❖ πολύ πλατύ ελεύθερο διάκενο ανάμεσα στα τοιχώματα της οπής και των ράβδων γεώτρησης(π.χ. 33 mm ράβδος σε μια οπή 56 mm).
- ❖ εκτέλεση ενέσεων διαμέσου ετερογενών σχηματισμών με πλατιές ρωγμές.

Η απόκλιση οπής μπορεί να μειωθεί πάρα πολύ, με κατάλληλη επιλογή του εξοπλισμού γεώτρησης και με προσεκτική εκτέλεση της γεώτρησης. Η εμπειρία πάνω σε ένα πολύ προσεκτικά εκτελεσμένο σχέδιο ελέγχου ενέσεων στο Λίβανο που δίνεται στο σχ.1.7 είναι διδακτική.



Σχήμα 2.1.7. Απόκλιση των οπών από τον κατακόρυφο άξονα, σχέδιο ελέγχου έγχυσης Meifedoun, 1) κρουστική γεώτρηση, 2) περιστροφική γεώτρηση.

Οι οπές είχαν βάθος 240 μέτρων. Περιστροφικοί και κρουστικοί εξοπλισμοί χρησιμοποιήθηκαν για την γεώτρηση, ενώ ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στον έλεγχο της απόκλισης κατά τη διάρκεια της γεώτρησης. Στο σχ.1.7 διαπιστώνεται ότι η απόκλιση ήταν μικρότερη με περιστροφική παρά με κρουστική γεώτρηση. Η ελάχιστη απόκλιση ήταν περίπου 1 % του βάθους με περιστροφική και 2 % του βάθους με κρουστική γεώτρηση. Η μέγιστη απόκλιση ήταν 6.5 % του βάθους και στις δύο περιπτώσεις. Ο μέσος όρος ήταν 2.8 % με περιστροφική και 4.1 % του βάθους με κρουστική.

2.1.2 Εξοπλισμός για διενέργεια ενέσεων

Οι ενέσεις εκτελούνται από μια σειρά κεντρικών σταθμών που περιλαμβάνουν αποθήκες για υλικά ενέσεων, συγκρότημα παραγωγής, αναμικτήρες ενέματος, αναδευτήρες και αντλίες ενέματος.

Κάθε συγκρότημα ενέσεων είναι κατάλληλου τύπου για την τροφοδοσία, ανάμιξη, ανάδευση και άντληση του ενέματος, σύμφωνα με την έγκριση του μηχανικού.

Εκτός αν δοθεί διαφορετική έγκριση, η ελάχιστη δυναμικότητα του κάθε συγκροτήματος ενέσεων συνήθως είναι τριακόσια λίτρα ανά λεπτό (300 l/min), για παροχή ενέματος σε συνεχή ροή, με πίεση μέχρι δώδεκα ατμόσφαιρες (12 atm) στο κολάρο της οπής ενέσεων.

Οι αναμικτήρες ενέματος είναι αναμικτήρες τύπου υψηλής ταχύτητας και λειτουργούν με ταχύτητα μεγαλύτερη από τριακόσιες στροφές ανά λεπτό (300 r/min). Δεν επιτρέπεται η χρήση αναμικτήρων, όπου η ανάμιξη γίνεται με εκτοξευτήρες πεπιεσμένου αέρα στη δεξαμενή ανάμιξης. Κάθε αναμικτήρας έχει δύο δεξαμενές ανάμιξης περίπου ίσης χωρητικότητας. Οι δεξαμενές είναι στραμμένες προς τα πίσω για διευκόλυνση της τροφοδοσίας του τσιμέντου. Τα χειριστήρια είναι κατά τέτοιο τρόπο διατεταγμένα, ώστε οι δεξαμενές ανάμιξης να μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα ή ταυτόχρονα και το σύστημα τροφοδοσίας νερού να είναι εγκατεστημένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να μετριέται η παροχή του νερού προς κάθε δεξαμενή. Οι μετρητές νερού έχουν ενδείξεις σε λίτρα.

Ο αναμικτήρας είναι διατεταγμένος κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να εκκενώνει το ένεμα μέσα σε κατάλληλη λεκάνη μηχανικής ανάδευσης. Κατάλληλο κόσκινο μηχανικά δονούμενο είναι τοποθετημένο στη λεκάνη ανάδευσης για να κοσκινίζει το ένεμα που εισέρχεται στη λεκάνη ανάδευσης από τον αναμικτήρα και από το σωλήνα επιστροφής του ενέματος. Τα στηρίγματα του κόσκινου δεν πρέπει να εμποδίζουν ούτε να φράζουν τα ανοίγματα του κόσκινου.

Πρέπει να προβλέπεται κατάλληλη παροχή νερού στην είσοδο της αντλίας ενέματος για να διευκολύνει την απόπλυση του συστήματος και την έκπλυση των οπών ενέσεων. Όλες οι βαλβίδες που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της ροής του ενέματος είναι τύπου «λιπαινόμενου πώματος».

Μετρητές με προφυλακτήρες τύπου διαφράγματος, εγκαθίστανται σε όλες τις

θυρίδες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της πίεσης του ενέματος στον κεντρικό αγωγό παροχής ενέματος. Σε καμιά περίπτωση δεν είναι τοποθετημένοι οι αναδευτήρες σε απόσταση μεγαλύτερη από εκατό μέτρα (100 m) από την οπή στην οποία εκτελείται ένεση. Πρέπει επίσης να προβλεφθεί παροχή αέρα από τον αναμικτήρα στον αναδευτήρα, εάν η απόσταση είναι τόσο μεγάλη ώστε η πίεση που αναπτύσσεται από τον αναμικτήρα να μην επαρκεί να μετακινήσει το ένεμα από τον αναμικτήρα στον αναδευτήρα.

Τα παρεμβύσματα αποτελούνται από σωλήνες πεπιεσμένου αέρα ή διαστελλόμενους δακτυλίους από ελαστικό, δέρμα ή άλλο κατάλληλο υλικό, που συνδέονται στο άκρο του σωλήνα τροφοδοσίας του ενέματος. Τα στεγανωτικά παρεμβύσματα είναι έτσι μελετημένα ώστε να μπορούν να διαστέλλονται για να σφραγίζουν τις οπές στα καθορισμένα υψόμετρα, και όταν διαστέλλονται, να είναι ικανά να αντέξουν χωρίς διαρροή, για χρονικό διάστημα δέκα λεπτών (10 min), και πίεση νερού ίση με τη μέγιστη πίεση ένεσης που θα χρησιμοποιηθεί.

Ο εξοπλισμός ενέσεων πρέπει να συντηρείται πάντοτε κατά τρόπο που να ικανοποιεί το μηχανικό και να είναι ικανός για συνεχή και αποτελεσματική λειτουργία κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε εργασίας ενέσεων.

Η διάταξη του εξοπλισμού ενέσεων είναι τέτοια ώστε να παρέχει συνεχή κυκλοφορία του ενέματος σε όλο το σύστημα και να επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της πίεσης με τη λειτουργία μιας βαλβίδας στη σωλήνωση επιστροφής του ενέματος, ανεξάρτητα από το πόσο μικρή είναι η απορρόφηση ενέματος. Επίσης απαιτούνται μετρητές πίεσης και κατάλληλες βαλβίδες στην αντλία, στο σημείο ελέγχου της πίεσης και της ροής και στο κολάρο κάθε οπής, ώστε να εξασφαλίζεται ο απαιτούμενος έλεγχος, η παράκαμψη της ροής και το κλείσιμο. Η ρύπανση του εξοπλισμού και των σωληνώσεων αποφεύγεται με τη συνεχή κυκλοφορία του ενέματος και με την περιοδική απόπλυση του συστήματος με νερό. Η απόπλυση γίνεται με τη βαλβίδα παροχής του ενέματος κλειστή, τη βαλβίδα παροχής του νερού ανοιχτή και τη λειτουργία της αντλίας στη μεγαλύτερη ταχύτητα .

Ο κατασκευαστής πρέπει να προβλέπει την έγκαιρη απομάκρυνση των αποβλήτων και των νερών απόπλυσης, που απομακρύνουν όλο το άχρηστο ένεμα που δημιουργείται από τις εργασίες του.

2.1.3. Σύνθεση τσιμεντενεμάτων

2.1.3.1. Συστατικά τσιμεντενεμάτων

2.1.3.1.1. Τσιμέντο Portland

Το κύριο συστατικό για την προετοιμασία των αιωρημάτων ενέματος είναι το τσιμέντο Portland. Το συγκεκριμένο είδος τσιμέντου χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε πουζολάνες, ανθεκτικότητα σε θετικές επιδράσεις και υψηλή αντοχή. Η χημική του σύνθεση καθορίζεται από την περιεκτικότητα σε SiO_2 , MgO , $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, αδρανή πρόσθετα, τέφρα και πουζολανικό υλικό.

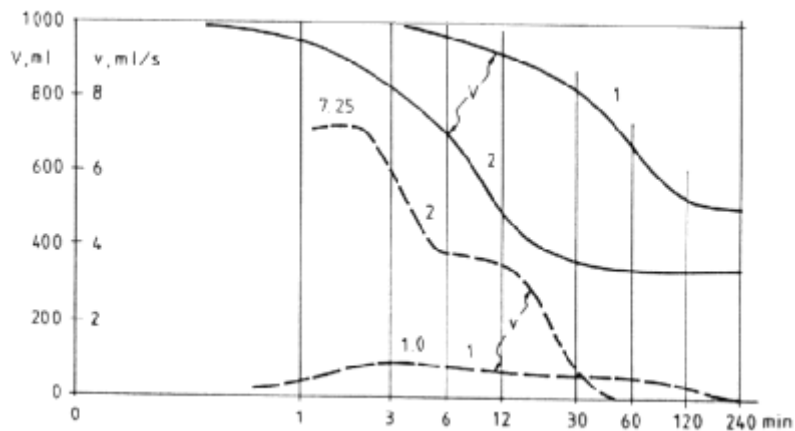
Οι ιδιότητες του συγκεκριμένου τσιμέντου είναι οι εξής :

- ❖ Η λεπτότητα άλεσης καθορίζεται από την περιεκτικότητα σε κόκκους με $d > 0.09$ mm και της ειδικής επιφάνειας cm^2/g (Blaine).
- ❖ Η μονάδα μάζας gr/cm^3 .
- ❖ Ο χρόνος πήξης.
- ❖ Ο όγκος και η γραμμική παραμόρφωση μετά το πέρας της πήξης.
- ❖ Η αντοχή που αναπτύσσεται μετά από 3, 7 και 28 ημέρες.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιλογή του τσιμέντου, που θα χρησιμοποιηθεί σε ενέσεις, είναι η όσο το δυνατόν υψηλότερη λεπτότητά του, στην περίπτωση που κοκκώδες έδαφος ή ρηγματωμένο πέτρωμα με στενές ρωγμές πρόκειται να υποστεί ένεση (Burgin, 1979).

Το εμπορικά διαθέσιμο τσιμέντο Portland είναι κατά κανόνα λεπτό, κοκκώδες (τιμή Blaine περίπου $3400 \text{ cm}^2/\text{gr}$) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενέσεις χωρίς κανένα περιορισμό.

Όταν χρησιμοποιούνται αναμικτήρες υψηλών στροφών για την προετοιμασία των αιωρημάτων, η λεπτότητα του τσιμέντου πρέπει επίσης να είναι υψηλή, έτσι που να μειώνεται η καθίζηση του μίγματος (Mayer, 1963). Η έρευνα έχει δείξει ότι τσιμέντο που περιέχει λιγότερο από 10 % κόκκους με διάμετρο μεγαλύτερη από 0.09 mm και ειδική επιφάνεια $2700 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ή περισσότερο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έγχυση σε λεπτό ρηγματωμένο έδαφος ή βράχο, του οποίου η διαπερατότητα είναι μεγαλύτερη από 1 LU (σχ.1.8).



Σχήμα 2.1.8. Επίδραση της μεθόδου ανάμιξης στην καθίζηση του αιωρήματος τσιμέντου, 1) υψηλών στοφών αναμίκτης, 2) εργαστηριακός αναμίκτης, 3) V όγκος του ιζήματος, 4) v ταχύτητα καθίζησης.

Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται τσιμέντο τύπου II 45 με ειδική επιφάνεια (Blaine) άνω των 4500 cm²/gr.

2.1.3.1.2. Αργιλικά υλικά

Η άργιλος προστίθεται ως μία λεπτόκοκκη παιπάλη, η οποία αντικαθιστά μέρος του τσιμέντου για λόγους οικονομίας. Παράλληλα βελτιώνει την σταθερότητα και το ιξώδες του αιωρήματος. Οι κόκκοι της άργιλου έχουν διάμετρο μικρότερη από 2 μm. Η δομή των κόκκων είναι επίπεδα κρυσταλλικά μόρια, αποτελούμενα από μία ή περισσότερες ομάδες αργιλοπυριτικών με ιόντα μαγνησίου ή σιδήρου στην θέση κάποιων ή όλων των ιόντων αργιλίου στο κρυσταλλικό πλέγμα, το οποίο περιέχει, επίσης, κάποια αλκαλικά ιόντα.

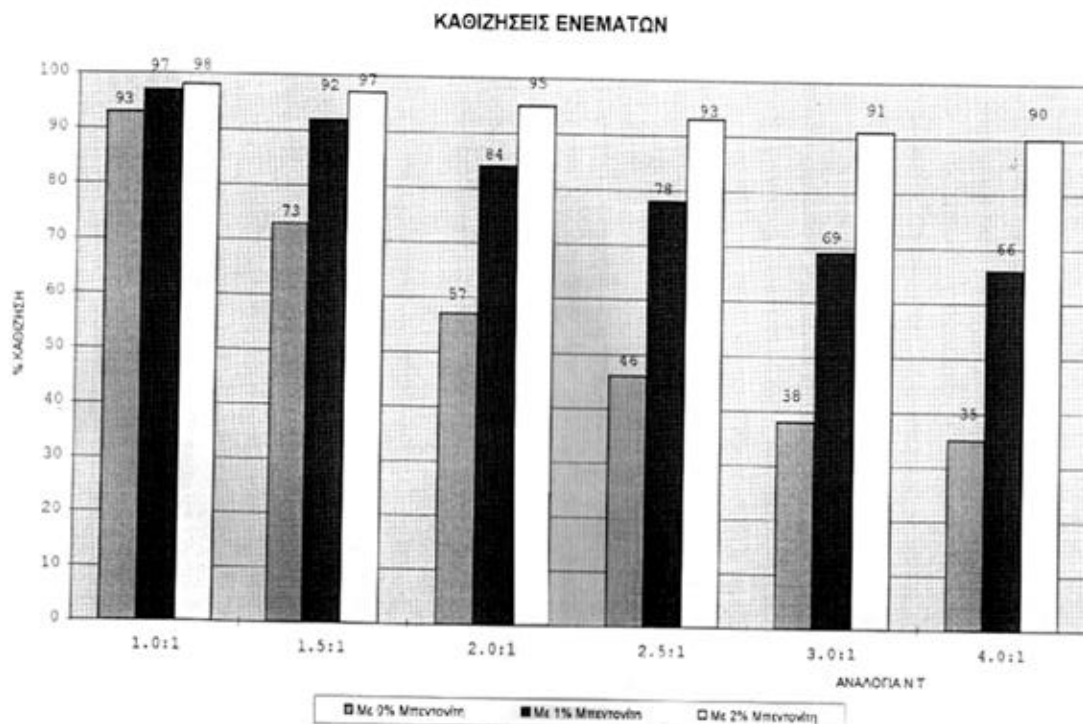
Τα δομικά στοιχεία των ορυκτών άργιλου είναι:

- Τετράεδρα πυριτίου συναρμολογημένα σε ένα εξαγωνικό πλέγμα, στο οποίο τρία ή τέσσερα άτομα οξυγόνου συγκεντρώνονται γύρω από ένα άτομο πυριτίου.
- Οκτάεδρα αργιλίου ή μαγνησίου με ένα κοινό άτομο οξυγόνου ή ομάδα υδροξυλίου γύρω από τα άτομα αργιλίου ή μαγνησίου.

Οι άργιλοι καολινίτη και μοντμοριλλονίτη χρησιμοποιούνται κυρίως για ενέσεις (Verfel, 1983). Ο καολινίτης περιέχει δύο τετράεδρα πυριτίου και οκτάεδρο αργιλίου ή μαγνησίου με

κοινά άτομα οξυγόνου ή ομάδες υδροξυλίου στο επίπεδο των κορυφών τους. Τα ορυκτά καολινίτη αποτελούνται από σταθερά επίπεδα συνδεδεμένα με δυνάμεις Van der Waals και με αρκετά ισχυρούς δεσμούς υδρογόνου, ώστε να αποτρέπουν μεγάλη διόγκωση κατά την παρουσία νερού. Οι κρύσταλλοί τους είναι εξαγωνικού σχήματος με διάσταση 0.1- 4 μm . Η ειδική επιφάνεια είναι 10-20 m^2/gr και η μονάδα μάζας γύρω στα 2.6-2.68 gr/cm^3 . Η ικανότητα ανταλλαγής ιόντων είναι 3-15 meq/100gr. Ο καολινίτης χρησιμοποιείται ευρύτατα σαν αδρανής παιπάλη σε αιωρήματα τσιμέντου/αργίλου (Klein and Polivka, 1958). Ο μοντμοριλλονίτης αποτελείται από τρία τμήματα. Δύο τετράεδρα πυριτίου και ένα οκτάεδρο αργιλίου ή μαγνησίου με κοινά άτομα οξυγόνου και ομάδες υδροξυλίου στις κορυφές των τετραέδρων πυριτίου. Οι δεσμοί σ' αυτά τα επίπεδα προκύπτουν από δυνάμεις Van der Waals, και από κατιόντα τα οποία μπορεί να είναι παρόντα για να εξισορροπήσουν έλλειμμα φορτίου στη δομή. Αυτοί είναι ασθενείς δεσμοί και εύκολα διασπώνται μέσω της απορρόφησης μορίων νερού, με αποτέλεσμα υψηλό δυναμικό διόγκωσης. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για τις ενέσεις. Τα τεμάχια του μοντμοριλλονίτη έχουν διάσταση 1-2 μm , το πάχος τους κυμαίνεται από 10^{-2} μm - $2 \cdot 10^{-2}$ μm , και η ειδική επιφάνεια είναι 50-120 m^2/g , όταν είναι ξηρή, ενώ με τη διασπορά σε νερό διογκώνεται και φτάνει τα 700-840 m^2/g . Η μονάδα μάζας είναι 2.35-2.7 gr/cm^3 και η ικανότητα ανταλλαγής ιόντων 80-105 meq/100gr. Ο μοντμοριλλονίτης χρησιμοποιείται για την παρασκευή σταθερών αιωρημάτων τσιμέντου, θιξοτροπικών αιωρημάτων, για πλαστικοποίηση πυκνών κονιαμάτων, που χρησιμοποιούνται

για ενέσεις σε μεγάλες ρωγμές και κοιλότητες και για την προετοιμασία γεωτρήσεων σε λάσπη (Nonveiller, 1964).



Σχήμα 2.1.8. Καθίζηση ενεμάτων διαφόρων αναλογιών με προσθήκη και χωρίς προσθήκη μπεντονίτη

Ο μπεντονίτης είναι άργιλος μοντμοριλλονίτη, ο οποίος περιέχει μικρές ποσότητες από κόκκους αδρανών ορυκτών (χαλαζία, ασβεσίτη, άστριου κλπ). Σε φυσικά κοιτάσματα βρίσκεται σαν μπεντονίτης ασβεσίτης, ο οποίος περιέχει ιόντα ασβεστίου προσροφημένα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Σε περίπτωση που ιόντα Ca αντικατασταθούν με ιόντα Na, τα όρια του Atterberg αυξάνουν 50-400 % (Deere, 1985). Ενεργοποιημένος με Na, είναι διαθέσιμος στην αγορά σε χάρτινους σάκους των 50 κιλών. Το όριο υδαρότητας του μπεντονίτη πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 350 για ένα μέσο όρο τριών δοκιμών. Χρησιμοποιείται για να μειώσει την καθίζηση και να σταθεροποιήσει τον όγκο των ενεμάτων, λόγω της μεγάλης προσροφητικότητάς του σε νερό.

2.1.3.1.3. Νερό

Το χρησιμοποιούμενο στα ενέματα νερό πρέπει να είναι φρέσκο, καθαρό και απαλλαγμένο από οξέα, αλκάλια και απαράδεκτες ποσότητες αλάτων, ιλύος, οργανικών υλών και άλλων ακαθαρσιών. Το νερό δεν πρέπει να περιέχει υλικά που μπορεί να επιδράσουν αρνητικά στην αποτελεσματικότητα των εργασιών των ενέσεων ή στη συμπεριφορά του ενέματος.

2.1.3.1.4. Άμμος και άλλα αδρανή υλικά

Η άμμος προστίθεται για να σταθεροποιήσει αιωρήματα ενέματος, όταν ένα σύστημα μεγάλων ρωγμών πρέπει να υποστεί έγχυση. Η κοκκομετρική διαβάθμιση και το μέγιστο μέγεθος κόκκων επιλέγονται έτσι, ώστε να ταιριάζουν με το μέγεθος των ρωγμών και να προσαρμόζονται στις διαθέσιμες αντλίες ενέσεων, στο είδος των εργασιών και τα εξαρτήματα (Polatty, 1961). Η περιοχή του μέγιστου και ελάχιστου μεγέθους κόκκων θα πρέπει να εναρμονίζεται αυστηρά με την υπάρχουσα κατάσταση. Μια προτεινόμενη διαβάθμιση της άμμου που χρησιμοποιείται για ενέσεις από τα προγράμματα του U.S.B.R. δίνεται στον πίνακα 1.2.

Πίνακας 2.1.2. Προτεινόμενη διαβάθμιση της άμμου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για ενέσεις

Μέγεθος κόσκινου	Συγκρατούμενο ποσοστό %
8	0
16	0 – 5
30	15 – 40
50	50 – 80
100	70 – 90
200	95 – 100

Όταν μεγάλες ρωγμές πρέπει να υποστούν έγχυση, διάφορα είδη αδρανών μπορούν να προστεθούν σε σταθερά ή ακόμη και σε θιξοτροπικά αιωρήματα τσιμέντου. Αυτά μπορεί να είναι πριονίδια, ρινίσματα ξύλου, ράβδοι σελοφάν, πολυβινύλιο, πολυεστέρα. Μικρά κομμάτια τεχνητού σπόγγου, προστιθέμενα στο ένεμα είχαν επιτυχία στο κλείσιμο πλατιών ρωγμών, χωρητικότητας πάνω από 2 m³ (Hlebar et al., 1980).

2.1.3.1.5. Υδρύαλος

Σε περιοχές που υπάρχει υπόγεια ροή, απαιτείται ταχεία πήξη του ενέματος. Γι' αυτό το λόγο προστίθεται υδρύαλος (Na₂SiO₃) υπό μορφή διαλύματος σε νερό σε σχέση νερό / υδρύαλος = 1.11.

2.1.3.1.6. Ρευστοποιητές

Σε πυκνά μίγματα ενεμάτων η προσθήκη ρευστοποιητών είναι απαραίτητη, όπως θα δούμε στην συνέχεια. Η επίδρασή τους στην καλή διασπορά των κόκκων του τσιμέντου στο νερό, επιφέρει θεαματική βελτίωση της ρευστότητας του ενέματος. Η δοσολογία τους εξαρτάται από την σύνθεση του ενέματος, από το είδος του τσιμέντου που χρησιμοποιείται, από τις συνθήκες του εδάφους και τη χρήση άλλων προσθετικών και κυμαίνεται μέσα σε αυστηρές προδιαγραφές.

2.1.3.2. Τύποι ενεμάτων

Η επιλογή των κατάλληλων συστατικών ενέματος για ένα συγκεκριμένο τεχνικό έργο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του εδάφους, καθώς επίσης και από τον σκοπό για τον οποίο γίνονται οι ενέσεις. Από τους πίνακες 1.3 και 1.4 μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

Πίνακας 1.3. Πεδίο εφαρμογής των διαφόρων αιωρημάτων και διαλυμάτων ανάλογα με την διαπερατότητα και την κατάσταση του εδάφους.

Τύπος μίγματος	Περιγραφή	Περιοχή χρήσης	Έλεγχος έγχυσης (Cambefort, 1977)
αιωρήματα τσιμέντου	ασταθή σταθερά	ρηγματωμένο πέτρωμα $K > 5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$	έως κορεσμό, καθορισμένη πίεση και χρόνος
τσιμέντο-μπετονίτης αιωρήματα μπετονίτη	σταθερά	χάλικες και άμμος $K = 10^{-3} \text{ cm/s}$	έως κορεσμό, καθορισμένη πίεση και χρόνος
χημικά διαλύματα	πυκνά αραιωμένα	$K < 10^{-3} \text{ cm/s}$ $K. > 10^{-3} \text{ cm/s}$	καθορισμένος εγχεόμενος όγκος

- ❖ Αιωρήματα τσιμέντου είναι τα καταλληλότερα για έγχυση, με σκοπό τη μείωση της διαπερατότητας και της παραμορφωσιμότητας ρηγματωμένων σχηματισμών πετρώματος.
- ❖ Αιωρήματα τσιμέντου – αργίλου με άμμο και κάποια ποσότητα μπετονίτη ή άλλων αδρανών είναι κατάλληλα για να μειώσουν την διαπερατότητα του ρηγματωμένου πετρώματος.

- ❖ Κονιάμα με τσιμέντο και αδρανή είναι κατάλληλο για έγχυση και πλήρωση πλατιών ρωγμών και μικρών σπηλιών.
- ❖ Αιωρήματα τσιμέντου - μπεντονίτη και μπεντονίτη είναι κατάλληλα για έγχυση και πλήρωση πολύ πορωδών υλικών, όπως χαλίκια και χονδρόκοκκες άμμους.
- ❖ Χημικά διαλύματα και ρητίνες είναι κατάλληλα για έγχυση και πλήρωση αμμωδών στρωμάτων ή όταν έχει προηγηθεί έγχυση αιωρημάτων τσιμέντου – μπεντονίτη.
- ❖ Αφρολέξ και συνδυασμοί αφρολέξ, πυκνού κονιάματος με άλλα αδρανή είναι κατάλληλα για να σταματήσουν τη ροή του νερού διαμέσου πλατιών ή βαθιών ρωγμών.

2.1.3.2.1. Μίγματα για την έγχυση ρωγμών ή ασυνεχειών

Για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα γινόταν χρήση μόνο τσιμέντου Portland για την εκτέλεση ενέσεων, το οποίο εγχεόταν σε ασταθή αιωρήματα. Η γενικότερη άποψη, που επικρατούσε, ήταν, ότι τα αιωρήματα έπρεπε να είναι αραιωμένα και ασταθή για να γεμίζουν καλύτερα τις ρωγμές, μια άποψη που υποστηρίζεται ακόμα και σήμερα από ειδικούς ενέσεων. Περισσότερο φως σ' αυτό το ζήτημα ρίχτηκε από τον Houlsby (1982) με διάφορες έρευνες που δημοσίευσε. Απέδειξε, ότι οι ρωγμές που ενύονται με αραιά ασταθή καθαρά αιωρήματα τσιμέντου δεν γεμίζουν ολοκληρωτικά με ένεμα, ενώ παράλληλα διατηρούνται κάποια κανάλια γεμισμένα με καθαρό νερό. Διαμέσου αυτών των καναλιών, το πλεόνασμα νερού παρασύρεται κατά την διάρκεια της έγχυσης, με αποτέλεσμα, η επίχωση στις ρωγμές να είναι πορώδης και διαπερατή. Στον πολτό τσιμέντου που σκληρύνθηκε με το υπόλοιπο του νερού, παραμένει αρκετός ελεύθερος άσβεστος, ο οποίος με την πάροδο του χρόνου διαβρώνεται από το νερό που διαπερνά την πορώδη επίχωση στις ρωγμές. Ένα σχέδιο τομών δύο ρωγμών που υπέστησαν έγχυση με ένα αραιωμένο αιώρημα τσιμέντου, από παρατηρήσεις, που έγιναν με το περισκόπιο γεώτρησης. Το αιώρημα είχε αναλογία νερό / τσιμέντο = 5/1. Το πρώτο σχέδιο είναι από το φράγμα Blowering Dam και πάρθηκε το 1972, τέσσερα χρόνια μετά την αποπεράτωση της κουρτίνας ενέματος, μέρη της οποίας είχαν διαβρωθεί τελείως εκείνη την περίοδο. Το δεύτερο σχέδιο είναι από το Copperdole Falls Dam, όπου παρατηρήθηκε, επίσης, έντονη κατάσταση διάβρωσης.

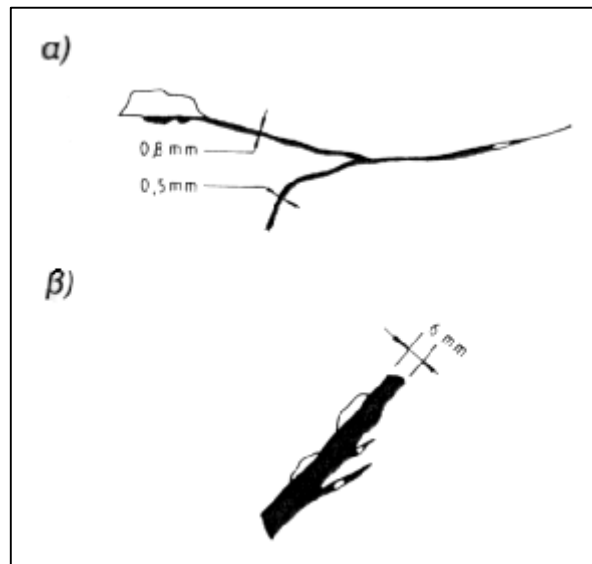
Πίνακας 1.4 Ανασκόπηση των χαρακτηριστικών του εδάφους, συστατικών ενέματος και τεχνικών έγχυσης

Σκοπός των ενέσεων	Χαρακτηριστικά του εδάφους	Συστατικά ενέματος	Τεχνικές έγχυσης
Μείωση της διαπερατότητας του εδάφους και του ρηγματωμένου πετρώματος	Πορώδη μέσα με μικρά συνδεδεμένα κενά, μικρού ή μέσου πορώδους όπως ψαμμίτης, λεπτή άμμος, αμμώδης χάλικες	Χημικά διαλύματα, ρητίνες, ασφαλτικά γαλακτώματα, αιωρήματα μπεντονίτη και κολλοειδή τσιμέντου.	Ελεγχόμενης ποσότητας έγχυση σε 30-50 cm μήκους τομές, έγχυση περιβλήματος με διπλό "packer".
	Έδαφος με μεγάλα συνδεδεμένα κενά, υψηλής διαπερατότητας, όπως ομοιόμορφη μεσόκοκκη άμμος, χάλικες.	Πυκνό τσιμέντο, αιωρήματα αργίλου και μπεντονίτη.	Ελεγχόμενης ποσότητας έγχυση, σε 30-50 cm μήκους τομές, έγχυση περιβλήματος, επανέγχυση όταν απαιτείται
	Λεπτές συνδεδεμένες ρωγμές, μέσης ή χαμηλής διαπερατότητας.	Πυκνό τσιμέντο, αιωρήματα αργίλου και μπεντονίτη	Downstage ή upstage εκτέλεση ενέσεων σε 5-10 m μήκους τομές με καθορισμένα κριτήρια κορεσμού.
	Πέτρωμα που περιέχει πολλές στενές συνδεδεμένες ρωγμές.	Σταθεροποιημένα αιωρήματα τσιμέντου - μπεντονίτη, χημικά διαλύματα.	Downstage εκτέλεση ενέσεων σε ικανές να καταρρεύσουν οπές, αλλιώς upstage, σε τομές μήκους 5 μέτρων ή μικρότερες.
	Υψηλά θραυσμένο πέτρωμα, υψηλής διαπερατότητας.	Πυκνό τσιμέντο και αιωρήματα αργίλου με κάποια λεπτή ή μεσόκοκκη άμμο, προσθήκη μπεντονίτη για θιξοτροπία.	Downstage εκτέλεση ενέσεων, 5 μέτρων μήκους τομές ή λιγότερο, διακοπές για πήξιμο αν η κατανάλωση μεγαλώσει ή αν υπάρχουν διαρροές στην επιφάνεια.

	Υψηλά θραυσμένο πέτρωμα που περιέχει πλατιές, ανοιχτές ρωγμές ή καρστικοποιημένα κανάλια.	Πυκνά αιωρήματα τσιμέντου -αργίλου με μπεντονίτη για θιξοτροπία, αν χρειάζεται υπερβολική ακολουθούμενη από κορεσμό με πλαστικοποιημένο κονίαμα τσιμέντου.	Χωριστή έγχυση σε υπερβολικά διαπερατές ζώνες, διακοπές της έγχυσης για πήξιμο, έγχυση πυκνού κονιάματος με χρήση ειδικών αντλιών.
	Έντονα καρστικοποιημένο πέτρωμα με πολλές ανοιχτές ρώγμες.	Πυκνό πλαστικοποιημένο κονίαμα τσιμέντου, πυκνά θιξοτροπικά αιωρήματα για τελικό κορεσμό, αφρολέξ.	Χωριστή έγχυση σπηλιών ή ανοικτών πλατιών ρωγμών, κορεμός των τομών με πυκνό θιξοτροπικό ένεμα.
	Θραυστό πέτρωμα, διαρροές εγχυόμενου ενέματος στην επιφάνεια.	Πυκνά θιξοτροπικά αιωρήματα με πρόσθεση λεπτής άμμου, προσθετικά για γρήγορο πήξιμο.	Διακοπτόμενη έγχυση, σφράγισμα των διαρροών στην επιφάνεια.
	Διαρροές εγχυόμενου ενέματος σε εφαιπτόμενες ανοιχτές οπές, ροή νερού σε ρωγμές που διαβρώνει το εγχυόμενο μίγμα.	Πυκνά, και θιξοτροπικά αιωρήματα, ρήψη χαλικιών, στην συνέχεια έγχυση με θιξοτροπικά αιωρήματα, αφρολέξ ακολουθούμενο από αιωρήματα τσιμέντου.	Ταυτόχρονη έγχυση και των δύο οπών, η οποία ακολουθεί τα χαρακτηριστικά εδάφους, μεγάλες οπές για υψηλής χωρητικότητας άντλη-ση.
Μείωση της παραμορφωσιμότητας του πετρώματος ή εδάφους και αύξηση της αντοχής της ενυόμενης περιοχής των θεμελιώσεων	Μικρά συνδεδεμένα κενά, τριχοειδείς ρωγμές, μικρή διαπερατότητα.	Χημικά ενέματα ή ρητίνες	Καθορισμένη ποσότητα εγχυόμενου διαλύματος, μικρές τομές, ενέσεις περιβλήματος σε έδαφος.
	Μικρά συνδεδεμένα κενά, μέση ή υψηλή διαπερατότητα.	Κολλοειδή αιωρήματα τσιμέντου, συνδυασμένα με ρητίνες.	Καθορισμένη ποσότητα έγχυσης, κοντές τομές, ενέσεις περιβλήματος σε έδαφος.

γύρω από σήραγγες, των υπόγειων κενών, σπηλιών.	Πλατιοί κενοί αρμοί ή ρωγμές, υψηλή διαπερατότητα.	Πυκνά σταθεροποιημένα αιωρήματα τσιμέντου, λεπτή άμμος προστίθεται όταν χρειάζεται.	Έγχυση σε μικρές τομές μέχρι να κορεσθούν.
	Στενοί ή πλατιοί αρμοί και ρωγμές, γεμισμένοι με άμμο και άργιλλο.	Αιωρήματα τσιμέντου ή κονίαμα που να ταιριάζουν στον χαρακτήρα των αρμών και ρωγμών.	Καθαρισμός με νερό και αέρα των ρωγμών από τριγύρω οπές ακολουθούμενος από έγχυση έως τον κορεσμό ολόκληρης της καθορισμένης ομάδας.

Η γενική παραδοχή είναι ότι το εγχεόμενο αιώρημα δεν πρέπει να είναι αραιότερο από 3N/1T και σε πολλές περιπτώσεις από 2N/1T. Επίσης πυκνότερα αιωρήματα καθορίζονται και χρησιμοποιούνται επιτυχώς. Ο Lombardi (1985) πρότεινε να ενύονται ακόμα και στενές ρωγμές, με αιωρήματα που έχουν αναλογία 0.6N/1T. Μία τέτοια πρόταση υποστηρίζεται και από το γεγονός ότι η κυκλοφορία του αιωρήματος στις ρωγμές δεν επηρεάζεται από το ιζώδες του, αλλά από το μέγιστο μέγεθος των κόκκων του τσιμέντου. Σε προηγούμενη παράγραφο έχει διευκρινιστεί ότι αυτό το πρόβλημα (μέγιστο μέγεθος των τεμαχίων του τσιμέντου) μπορεί να αντιμετωπισθεί επιτυχώς με εντατική ανάμιξη του μίγματος σε αναμικτήρες υψηλού στροβιλισμού.



Σχήμα 1.9. Μερική επίχωση ρωγμών που υπέστησαν έγχυση με αιωρήματα αναλογίας N/T = 5/1, σχέδια από παρατηρήσεις που έγιναν με ένα περισκόπιο γεώτρησης. α) φράγμα Blowering β) φράγμα Copperdole. (Houlsby, 1982).

Ένα άλλο θέμα για συζήτηση ανάμεσα σε ειδικούς ενέσεων, είναι η χρήση σταθερών ή ασταθών αιωρημάτων. Ο Cambefort (1977) ισχυρίζεται, ότι το τσιμέντο σε ένα ασταθές αιώρημα κατακάθεται κατά την διάρκεια της έγχυσης και γεμίζει εύκολα ακόμα και πλατιές ρωγμές. Ενώ ένα σταθερό αιώρημα, το οποίο έχει γεμίσει μια ρωγμή, θα συρρικνωθεί λίγο μετά την ολοκλήρωση της έγχυσης, με αποτέλεσμα να χρειάζεται επανάληψη της διεργασίας με έγχυση ενός ασταθούς αιωρήματος, έτσι που να κορεσθούν πλήρως οι ρωγμές. Οι παρατηρήσεις του Cambefort πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη, διότι όπως είδαμε στην παράγραφο 1.3.1.2 ακόμα και πυκνά μίγματα νερού/τσιμέντου εμφάνισαν, σε εργαστηριακές μελέτες, μεγάλες καθιζήσεις. Στην πράξη βέβαια ο όγκος του ενέματος που εγχέεται σταθεροποιείται από την κλίση της πίεσης έγχυσης, την δύναμη διήθησης και την προσθήκη μπεντονίτη ως αντικαθιζητικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την περιορισμένη μεταβολή του όγκου του μίγματος κατά την διάρκεια της πήξης του. Ο παράγοντας καθίζηση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να μελετάται όταν σχεδιάζεται ένα μίγμα τσιμεντοπολτού. Στον πίνακα 1.5 φαίνεται με βάση τις εμπειρίες στην εκτέλεση ενέσεων η επιλογή ανάμεσα στα αιωρήματα ενέματος από τσιμέντο, όπως την προτείνει ο E.Nonveiller (1989).

Τα ακόλουθα σχόλια μπορούν να προστεθούν:

- ❖ Άμμος προστίθεται σαν η φθηνότερη παιπάλη όταν οι ρωγμές είναι γενικά πλατύτερες από 1 mm, διότι αυξάνει την αντοχή του εγχεόμενου ενέματος και δίνει όγκο.
- ❖ Ο μπεντονίτης περιέχει τα μικρότερα στερεά στοιχεία τα οποία εύκολα εισχωρούν σε πολύ λεπτά κενά και ρωγμές και προστιθέμενα σε μικρές αναλογίες δεν μειώνουν την αντοχή του εγχεόμενου ενέματος. Μεγαλύτερες αναλογίες μπεντονίτη προκαλούν θιξοτροπία.
- ❖ Η άργιλος χρησιμοποιείται σαν παιπάλη, διότι μειώνει την διαπερατότητα του εγχεόμενου μίγματος και βελτιώνει την σταθερότητα της επίχωσης, ειδικά αν το υπόγειο νερό είναι ικανό να διαβρώσει το τσιμέντο Portland.

Για τη σωστή πορεία των εργασιών πρέπει να επιλέγεται η αρχική πυκνότητα των αιωρημάτων ενέσεων, όπως αυτή προτάθηκε από τον Houlsby (1982), εξαρτώμενη από το μέσο πλάτος των ρωγμών (πίνακα 1.6).

Όταν εκτελούμε ενέσεις σε πολύ διαπερατούς σχηματισμούς είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούμε μίγματα με χαμηλότερο υδρομετρικό συντελεστή από $N/T = 1/1$.

Πίνακας 1.5. Αιωρήματα ενέματος από τσιμέντο για διάφορες κατηγορίες.

Τύπος και διαπερατότητα των πέτρινων σχηματισμών	Σύνθεση και ιδιότητες των αιωρημάτων
<u>Κουρτίνα ενέσεων</u>	
πολύ υψηλή διαπερατότητα, πλατιές ρωγμές, $N < 50$ LU	τσιμέντο - άργιλος, μπεντονίτης και άμμος, αναλογίες έως 0.25 C : 0.75 CL : 6B nS : (1+b+n)W και πυκνότερα
$N > 50$ LU	τα ίδια όπως παραπάνω, αύξηση της αναλογίας μπεντονίτη εις βάρος αυτής της αργίλου και άμμου για να φθάσουμε στη θιξοτροπία
υψηλή διαπερατότητα, στενές ρωγμές, $N > 30$ LU	αναλογίες τσιμέντου - αργίλου - μπεντονίτη περίπου 0.40 (10.40-b) C : 0.60 CL : 6B : 3W
χαμηλή διαπερατότητα, στενές ρωγμές, $10 < N < 30$ LU	αιωρήματα τσιμέντου - μπεντονίτη (1-b) C : 6B : 3W
πολύ λεπτές ρωγμές, $N < 10$ LU	ενεργοποιημένα και κυκλωτισμένα αιωρήματα τσιμέντου - μπεντονίτη, μικροτσιμέντο
διαπερασμένες από νερό πλατιές ρωγμές, ανοιχτά διαστήματα, σπηλιές	πλαστικά, τσιμέντο - άμμος, κονίαμα μπεντονίτης, παιπάλη, αφρολέξ
<u>Ενέσεις στερεοποιήσεως</u>	
πλατιές ρωγμές	κονίαμα τσιμέντου με μπεντονίτη για ομοιογενοποίηση

στενές ρωγμές	σταθερά αιωρήματα τσιμέντου με προσθετικά
---------------	---

Πίνακας 1.6. Αρχική πυκνότητα των αιωρημάτων ενέματος

Μέσος όρος πλάτους ρωγμών (mm)	Αναλογία N/T
< 1	3 : 1
≈1	2 : 1
> 1	1 : 1

2.1.3.2.2. Ενέσεις σε πλατιά κενά και σπηλιές

Πριν αποφασιστεί η εκτέλεση ενέσεων, πρέπει πρώτα να γίνουν λεπτομερείς σπηλαιολογικές ή γεωλογικές έρευνες. Επίσης σημαντικό βαθμό στην εφαρμογή της μεθόδου ενέσεων έχει η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα ή όχι. Μεγάλες ξηρές ρωγμές και σπηλιές γεμίζονται καλύτερα μέσω ενός αριθμού οπών μεγάλης διαμέτρου. Μικρότερες ρωγμές ή σπηλιές μπορούν να καλυφθούν με ένεμα εγχέομενο μέσα από ελικοειδείς αντλίες. Προσοχή απαιτείται σχετικά με το εγχέομενο ένεμα, έτσι ώστε να μην περνάει διαμέσου του νερού, με κίνδυνο να ξεπλυθεί. Πρέπει να μεταφέρεται στον πυθμένα μέσα από σωλήνες, οι οποίοι βαθμιαία σηκώνονται προς την κορυφή καθώς το ρήγμα ή η σπηλιά αρχίζει να γεμίζει με ένεμα (μέθοδος tremie).

2.1.3.2.3. Μίγματα ενεμάτων για κοκκώδη υλικά

Στα κοκκώδη υλικά υπάρχει ένα δίκτυο συνδεδεμένων κενών διαστημάτων διαφορετικών μεγεθών ανάμεσα από τους κόκκους του υλικού. Το μέγεθος και η διαβάθμιση των κενών μπορεί να συσχετισθούν με την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού. Ο Shepard (1984) περιέγραψε μια μέθοδο για τη μέτρηση της περίπλοκης δομής των κενών. Ένα δείγμα χάλικα με διάμετρο χαλικιών 9.5-25 mm, με $D_{15}=11$ mm δονείται σε ένα κυλινδρικό δοχείο. Στη συνέχεια χύνεται λιωμένο κερί, γεμίζοντας ολοκληρωτικά τα κενά. Το δοχείο

απομακρύνεται, όταν κρυώσει το κερί και το δείγμα κόβεται σε πολλά κομμάτια. Ο χάλικας αποσπάται με αποτέλεσμα να παραμένει ένα δίκτυο κεριού που αναπαριστά τη διαμόρφωση των κενών. Από τη μελέτη του κέρινου σκελετού εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για μήκος πάνω από $10 \cdot D_{15}$, οι μέγιστες και ελάχιστες τομές των συνδεόμενων κενών διαστημάτων επαναλαμβάνονται πολλές φορές, ενώ δεν υπάρχουν κυρίως μεγάλα ή μικρά διαστήματα.
- Οι ελάχιστες και οι μέγιστες διαστάσεις των κενών διαστημάτων κυμαίνονται ανάμεσα σε $0.1 \cdot D_{15}$ έως $0.18 \cdot D_{15}$.
- Η ισοδύναμη μέση διάσταση των κενών διαστημάτων υπολογίζεται να βρίσκεται ανάμεσα σε $0.25 \cdot D_{15}$ και $0.35 \cdot D_{15}$, ενώ η μέγιστη διάσταση είναι παντού μικρότερη από $0.6 \cdot D_{15}$.

Αν και αυτά τα αποτελέσματα πάρθηκαν από ένα μάλλον μικρό αριθμό δειγμάτων, είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί, πως αυτά είναι σύμφωνα με την πρακτική εμπειρία που θέλει το μέγιστο μέγεθος των τεμαχιδίων ενός αιωρήματος, που πρόκειται να εγχυθεί, να είναι μικρότερο από το $1/3$ του μέσου μεγέθους των κενών (Bell, 1982).

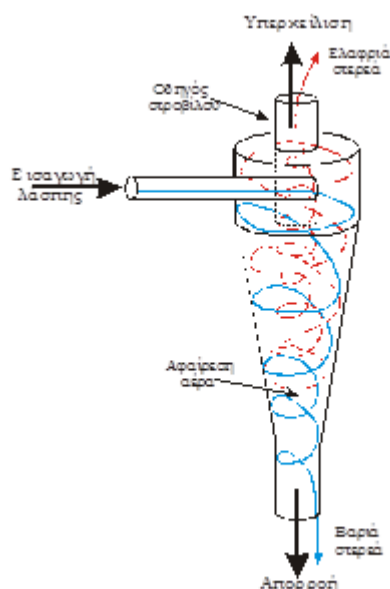
Όλες αυτές οι παρατηρήσεις δίνουν ένα γενικό προσανατολισμό για την επιλογή των αιωρημάτων τσιμέντου και αργίλου για την έγχυση αλλουβιακών εδαφών μιας δοσμένης καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Αιωρήματα με μέγιστη διάμετρο κόκκων $D_5=0.1 \cdot D_{15}$ είναι ικανά για να εισχωρήσουν σε κενά ενός συμπαγούς εδάφους.

Κορεσμός των κενών σε περιορισμένη έκταση συμβαίνει, όταν $D_5=0.2 \cdot D_{15}$. Ο Cambefort (1977) ισχυρίστηκε, ότι ο συντελεστής διαπερατότητας K είναι ένα επαρκές κριτήριο για την εκτίμηση της εκτέλεσης ενέσεων σε εδάφη.

Ο σκοπός της εκτέλεσης ενέσεων, που είναι η μείωση της διαπερατότητας, αύξηση της αντοχής και μείωση της παραμορφωσιμότητας είναι ένα άλλο κριτήριο για την επιλογή του μίγματος ενέματος. Για τη μείωση της διαπερατότητας του εδάφους δεν είναι απαραίτητη η ανάπτυξη υψηλής αντοχής στο ένεμα. Γι' αυτό το λόγο αιωρήματα τσιμέντου - αργίλου - μπεντονίτη με μικρή αναλογία τσιμέντου χρησιμοποιούνται (Clarke, 1988). Σε ενέσεις στερεοποιήσεως, είναι απαραίτητο το εγχέομενο μίγμα να αναπτύξει υψηλή αντοχή σε σύντομο χρονικό διάστημα, γι' αυτό γίνεται χρήση αιωρήματος με μεγάλη αναλογία σε τσιμέντο και πολύ μικρότερη σε μπεντονίτη (Deere, 1982).

Αιωρήματα με πολύ λεπτόκοκκα συστατικά (τσιμέντο, άργιλος) χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση ενέσεων σε κοκκώδη εδάφη. Το τσιμέντο πρέπει να έχει λεπτότητα (Blaine) μεγαλύτερη από $4500 \text{ cm}^2/\text{gr}$ και το D_{85} της αργίλου να είναι μικρότερο από 0.03 mm . Είναι

βασικό να χρησιμοποιούνται αναμκτήρες υψηλού στροβιλισμού για την προετοιμασία των αιωρημάτων και ένας υδροκυκλώνας στην έξοδο του αναμκτήρα, για τον διαχωρισμό των χονδρόκοκκων τεμαχίων.



Σχήμα 1.9. Αναμκτήρας υψηλού στροβιλισμού

Η αρχική διαπερατότητα των κοκκωδών υλικών μπορεί να μειωθεί κατά μία τάξη μεγέθους, όταν εγχέονται αιωρήματα. Όταν εγχέονται χημικά διαλύματα ή ρητίνες μπορεί να μειωθεί μέχρι και δύο τάξεις μεγέθους. Γι' αυτό το λόγο, εφαρμόζεται η μέθοδος έγχυσης περιβλήματος. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο για πρώτη φάση εγχέονται αιωρήματα τσιμέντου – αργίλου, χαμηλού κόστους, για να γεμίσουν τα μεγαλύτερα κενά ενώ σε δεύτερη φάση εγχέονται χημικά διαλύματα για να γεμίσουν τα μικρότερα κενά και να καλύψουν πλήρως τα μεγαλύτερα (Krizek, 1985).

2.1.3.2.4. Μίγματα ενεμάτων για κενά και ρωγμές σε κατασκευές σκυροδέματος

Μεταξύ τμημάτων κατασκευών σκυροδέματος και βραχόμαζας υπάρχουν μεγάλα κενά ή ρωγμές, των οποίων το πλάτος κυμαίνεται από μερικά mm έως cm. Για την πλήρωση αυτών των κενών εκτελούμε ενέσεις επαφής. Γίνεται χρήση σταθεροποιημένων αιωρημάτων τσιμέντου, με την προϋπόθεση, όμως, πως το τσιμέντο που χρησιμοποιείται είναι λεπτόκοκκο, για να μπορεί να διεισδύει σε λεπτές ρωγμές. Η προσθήκη ενεργοποιημένου μπεντονίτη κρίνεται ως απαραίτητη, εφόσον εμποδίζει το εγχεόμενο ένεμα να συρρικνωθεί μετά το πήξιμο. Το ένεμα είναι χαμηλού υδρομετρικού συντελεστή και περιέχει μεγάλη

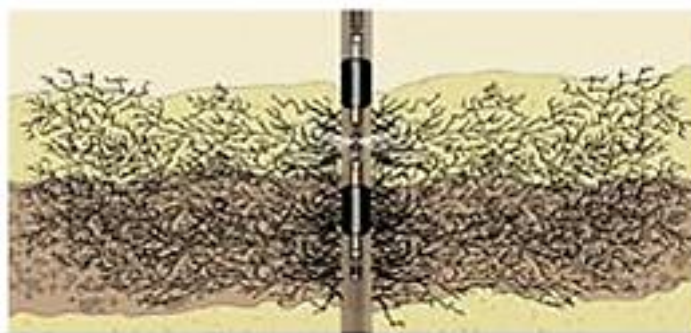
ποσότητα άμμου για την πλήρωση των κενών. Όταν υπάρχουν πολύ λεπτές ρωγμές τότε πρέπει να χρησιμοποιούνται χημικά μίγματα, κυρίως ρητίνης, για επανέγχυση (Karol, 1982).

2.1.4. Η πίεση κατά την εκτέλεση ενέσεων

Πάνω στην πίεση βασίζονται πολλοί παράγοντες ενέσεων καθώς ανάλογα με την χρήση της αλλάζουν και οι μέθοδοι ενεμάτωσης που εφαρμόζονται. Δύο τέτοια παραδείγματα είναι :

1. Μέθοδος εδαφικής διάρρηξης

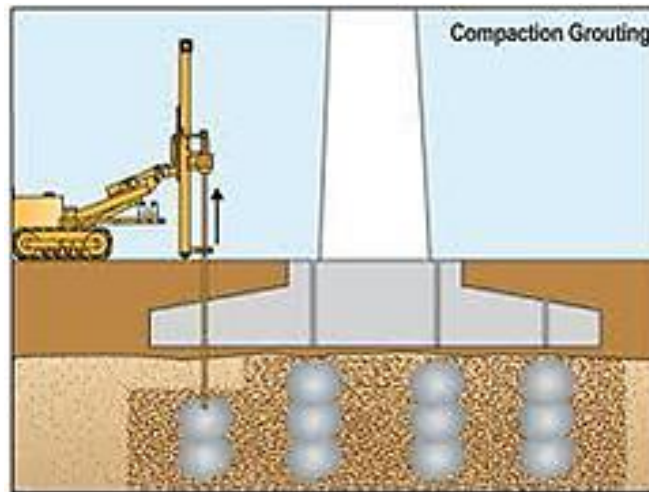
Η μέθοδος εδαφικής διάρρηξης βασίζεται στην δημιουργία και διάδοση ρωγμών εντός του εδαφικού σχηματισμού, μέσω της σταδιακής εισπίεσης ενέματος χαμηλού ιξώδους. Στόχος της μεθόδου είναι η δημιουργία ενός σκελετού αποτελούμενου από φλέβες ενέματος και εδάφους, ο οποίος καθώς θα συνεχίζεται η εισπίεση ενέματος θα πιέζει το υπερκείμενο έδαφος, επιτυγχάνοντας την ανύψωση του.



Εικόνα 1.1. Δημιουργία σκελετού αποτελούμενου από φλέβες ενέματος και εδάφους λόγω της εισπίεσης ενέματος εντός του εδαφικού σχηματισμού.

2. Μέθοδος ενεμάτωσης από πίεση

Η μέθοδος βασίζεται στην εισπίεση ενέματος υψηλού ιξώδους και χαμηλής κάθισης εντός του εδαφικού σκελετού, ούτως ώστε να μην είναι δυνατή η διείσδυση του ενέματος στα κενά του σχηματισμού κατά την εισπίεση, αλλά να σχηματίζεται μια ομοιογενής μάζα ενέματος, η οποία κατά την εξέλιξη της διαδικασίας ενεμάτωσης θα ασκεί πίεση στο περιβάλλον έδαφος, προκαλώντας ελεγχόμενες μετακινήσεις



Εικόνα 1.2. Απεικόνιση εφαρμογής της μεθόδου ενεμάτωσης υπό πίεση

Καθοριστική σημασία για την αποτελεσματικότητα των ενέσεων αποκτά η πίεση έγχυσης του ενέματος, καθώς επίσης και η μέγιστη τιμή, που μπορεί να πάρει. Εάν η πίεση κορεσμού είναι πολύ χαμηλή, το εγχέομενο ένεμα διεισδύει μόνο σε ένα μικρό όγκο υλικού γύρω από την οπή. Για να γεμίσουμε, επομένως, όλο τον όγκο του πετρώματος πρέπει να αυξήσουμε τον αριθμό ενέσεων, πράγμα που είναι ασύμφορο οικονομικά και χρονοβόρο. Αντίθετα εάν η πίεση κορεσμού είναι πολύ υψηλή, υπάρχει κίνδυνος να ανοιχθούν πλατύτερες ρωγμές και να δημιουργηθούν καινούργιες λόγω υδραυλικής ανύψωσης. Τα κενά που δημιουργούνται απορροφούν στη συνέχεια ένεμα, προκαλώντας περιττή σπατάλη και μεγαλύτερη χρονική διάρκεια των εργασιών. Βλέπουμε, επομένως, ότι η καταλληλότερη τιμή της πίεσης έγχυσης επιλέγεται με βάση τις συνθήκες του εδάφους ή πετρώματος (διαπερατότητα, φύση των ρωγμών, αντοχή) και το σκοπό της εκτέλεσης της ένεσης (αύξηση αντοχής, στεγανοποίηση, μείωση παραμορφωσιμότητας).

Η πίεση έγχυσης p , καταγράφεται σε ένα μανόμετρο, το οποίο βρίσκεται στον κατακόρυφο σωλήνα έγχυσης στην κορυφή της συνδεσμολογίας του παρεμβύσματος. Η πίεση p αυξάνεται στην περιοχή έγχυσης λόγω του βάρους του αιωρήματος μέσα στον σωλήνα παροχής, όπως φαίνεται στο σχ.1.10 και ισούται με:

$$p_i = p + (h_i + L/2) \cdot \gamma_s \quad (2.1)$$

όταν έχουμε εκτέλεση ενέσεων πάνω από την στάθμη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Όταν έχουμε εκτέλεση ενέσεων κάτω από τη στάθμη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα η ανωτέρω εξίσωση παίρνει την εξής μορφή :

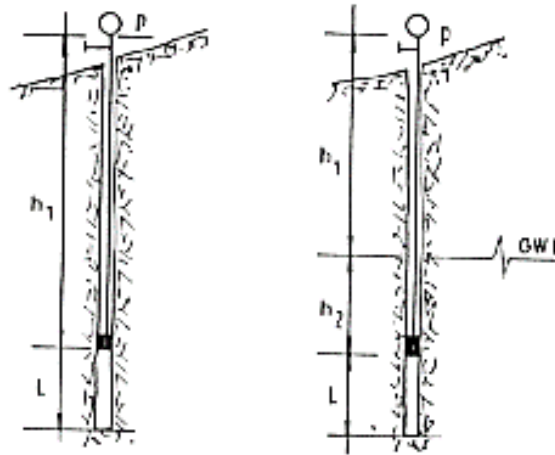
$$\rho_i = \rho + h_1 \cdot \gamma_s + (h_2 + L/2) \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \quad (2.2)$$

όπου :

$$\gamma_s = (B_w + B_c) / (B_w / \gamma_w + B_c / \gamma_c) \quad (2.3)$$

B_w : Βάρος νερού, B_c : Βάρος τσιμέντου

γ_w : Ειδικό βάρος νερού, γ_c : Ειδικό βάρος τσιμέντου



Σχήμα 1.10. Υπολογισμός της πίεσης έγχυσης κατά την διάρκεια εκτέλεσης ενέσεων, α) πάνω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα β) κάτω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

Στον πίνακα 1.7 παρουσιάζεται το ειδικό βάρος αιωρημάτων διάφορων αναλογιών.

Πίνακας 1.7. Ειδικό βάρος αιωρημάτων τσιμέντου διάφορων αναλογιών

Αναλογία N/T	γ_s (t/m ³)	$\gamma_s - \gamma_w$ (t/m ³)
5 : 1	1.09	0.09
4 : 1	1.12	0.12
3 : 1	1.17	0.17
2 : 1	1.26	0.26
1 : 1	1.46	0.46
1 : 2	1.75	0.75

Η αντίσταση στη ροή του αιωρήματος, που εγχέεται στις ρωγμές, διέπεται από την εξίσωση του Bingham :

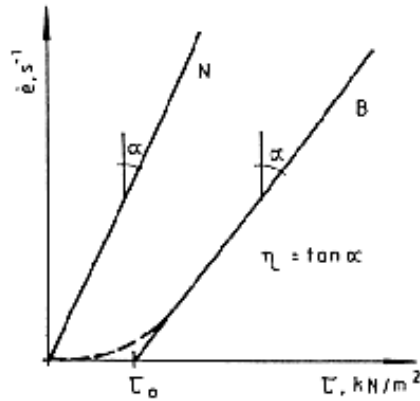
$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot dv/dz \quad (2.4)$$

όπου:

τ_0 είναι η τάση εκκίνησης,

η ο συντελεστής ιξώδους και

dv/dz είναι η κλίση της ταχύτητας (σχ.1.11).



Σχήμα 1.11. Διάγραμμα του ιξώδους, N υγρό Newton, B υγρό Bingham.

Με βάση τις ανωτέρω σχέσεις υπολογίζονται η απόσταση R, που μπορεί να φτάσει το ένεμα εγχεόμενο σε μία ρωγή πλάτους $2a$. Ο Wittke (1968) υπολογίζει την απόσταση R με την εξίσωση :

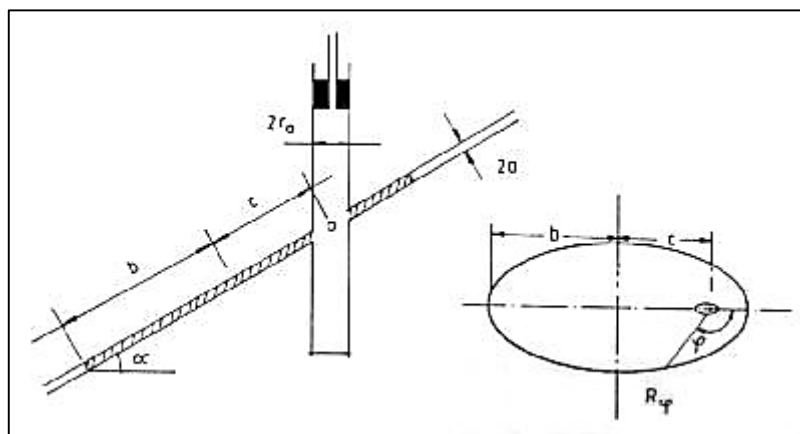
$$R(\phi) = (r_0 + \alpha \cdot \rho_i / \tau_0) + (\alpha / \tau_0) \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \phi \quad (2.5)$$

όπου :

$2a$ η διάμετρος της ρωγής

$2r_0$ η διάμετρος της οπής έγχυσης

α° η κλίση της ρωγής



Σχήμα 1.12. Έγχυση ενέματος σε κεκλιμένη ρωγή πλάτους $2a$ από οπή γεώτρησης διαμέτρου $2r_0$. α) τομή. β) οπτική γωνία.

Η εξίσωση 2.5 είναι εξίσωση μιας έλλειψης με την οπή στην μεγαλύτερη διάσταση, όπως φαίνεται στο σχ.1.12.

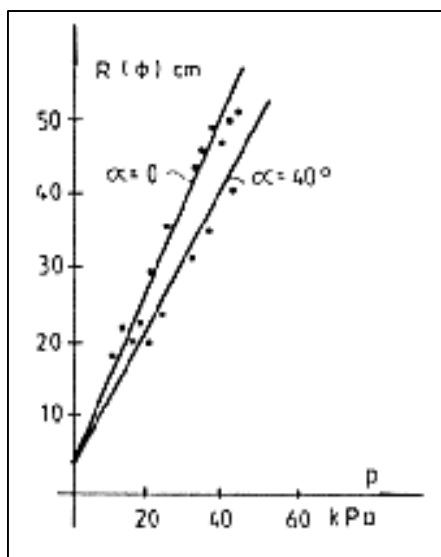
Για μια οριζόντια ρωγμή η εξίσωση 2.5 παίρνει την μορφή :

$$R = r_0 + \alpha \cdot r_i / \tau_0 \quad (2.6)$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται, ότι όσο μικρότερη είναι η τάση εκκίνησης τ_0 και όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση έγχυσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που μπορεί να καλύψει το ένεμα μέσα στη ρωγμή.

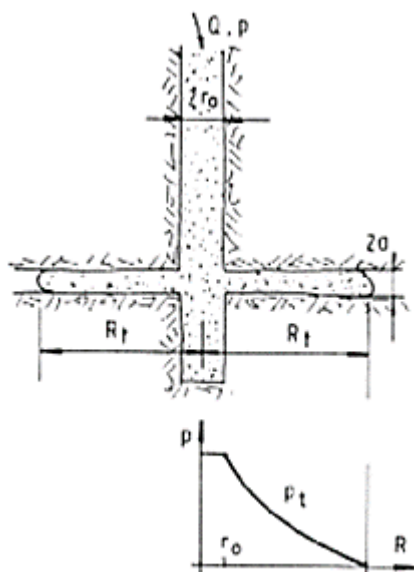
Ο Wittke (1968) επαλήθευσε αυτές τις εξισώσεις με μοντέλα ρωγμών και τα αποτελέσματά του φαίνονται στο σχ.1.13.

Αυτή η θεωρητική προσέγγιση αποτελεί απλά έναν οδηγό, εφόσον οι συνθήκες στην ύπαιθρο είναι πολύ περίπλοκες. Δείχνει, όμως, ότι δύο παράμετροι, η πίεση p_i και η τιμή threshold τ_0 επηρεάζουν την διεισδυτικότητα του εγχεόμενου ενέματος.



Σχήμα 1.13. Τιμές της απόστασης $R(\varphi)$ σύμφωνα με την εξίσωση 2.6 και σύμφωνα με μοντέλο ρωγμών, Wittke (1968).

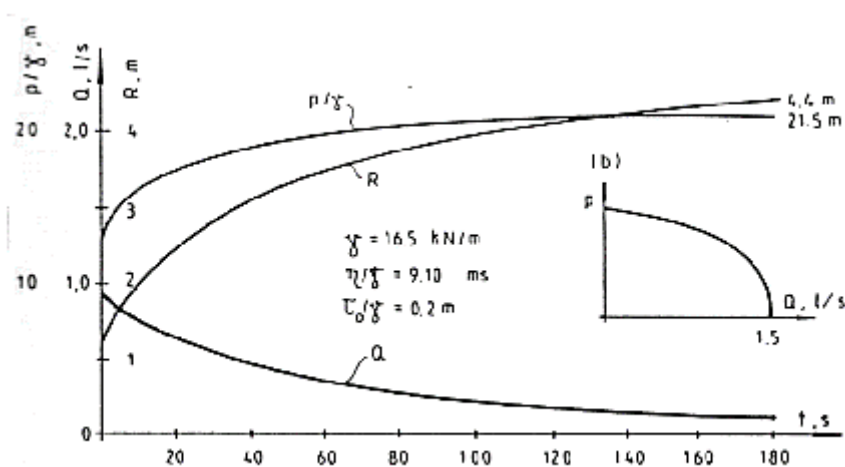
Ο Lombardi (1985) αποκόμισε παρόμοια θεωρητικά αποτελέσματα. Στο σχ.1.14 φαίνεται η κατανομή της πίεσης κατά μήκος μιας ρωγμής.



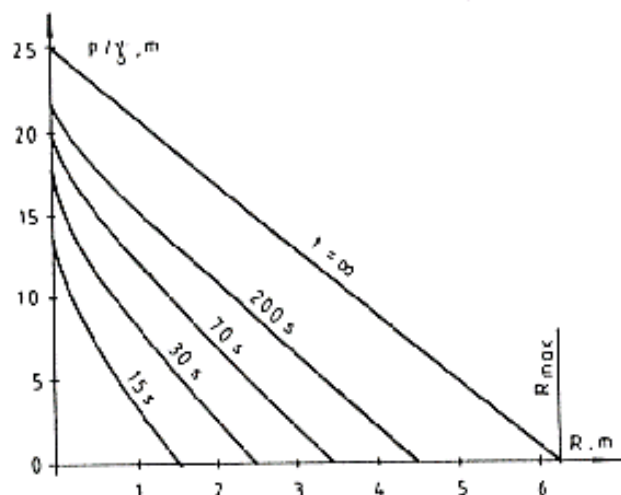
Σχήμα 1.14. Σχεδιαγράμματα της α) απόστασης έγχυσης σε μια οριζόντια τομή, β) κατανομή της πίεσης κατά μήκος της ρωγμής.

Στα σχ.1.15 και 1.16 παρουσιάζονται μετρήσεις του Lombardi για την απόσταση R, την αύξηση πίεσης p_i και την παροχή Q, σε σχέση με τον χρόνο.

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ότι η πίεση έγχυσης και η ρευστότητα του ενέματος παίζουν μεγάλο ρόλο στην απόσταση R, που μπορεί να καλύψει το ένεμα μέσα στην ρωγή. Όταν γίνεται χρήση ενεμάτων με χαμηλό υδρομετρικό συντελεστή, για να αυξηθεί η ρευστότητα και κατά συνέπεια η δυνατότητά τους για μεγαλύτερη διείσδυση στις ρωγμές, προσθέτουμε στο μίγμα ρευστοποιητές, όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 1.15. Διείσδυση του ενέματος σε ρωγή πλάτους 2 mm, απόσταση R, πίεση έγχυσης p/γ_s , παροχή Q.



Σχήμα 1.16. Πίεση έγχυσης κατά μήκος ρωγμής πλάτους 2 mm, σε σχέση με το χρόνο.

2.2 Χημικά Ενέματα

2.2.1 Γενικά

Η έκδοση του λεξικού του Webster του 1964 ορίζει το κονίαμα ως "πλαστικό δομικό υλικό (ως μείγμα τσιμέντου, ασβέστη ή γύψου με άμμο και νερό) που σκληραίνει και χρησιμοποιείται στην τοιχοποιία ή στο σοβάτισμα". Η ίδια έκδοση αναφέρει το ένεμα ως "λεπτό κονίαμα".

Η έκδοση του 1974 επεκτείνει τον ορισμό του ενέματος σε ένα "λεπτό κονίαμα που χρησιμοποιείται για την πλήρωση χώρων (όπως οι αρμοί στην τοιχοποιία) επίσης, οποιοδήποτε από διάφορα άλλα υλικά (όπως ένα μείγμα τσιμέντου και νερού ή χημικές ουσίες που στερεοποιούνται) που χρησιμοποιούνται για παρόμοιο σκοπό".

Ωστόσο, ο αρμόδιος για τη σφράγιση ορίζει αυτό που κάνει ως την πρακτική της πλήρωσης των ρωγμών, των πόρων και των κενών σε φυσικά ή συνθετικά υλικά, προκειμένου να μεταβληθούν οι φυσικές ιδιότητες της επεξεργασμένης μάζας. Ένα ένεμα μπορεί στη συνέχεια να οριστεί απλά ως ένα υλικό που χρησιμοποιείται για την αρμολόγηση. Η επιτροπή τσιμεντενέσεων, τμήμα γεωτεχνικής μηχανικής της Αμερικανικής Εταιρείας Πολιτικών Μηχανικών, στο "Γλωσσάριο όρων που σχετίζονται με τσιμεντενέσεις", ορίζει τα ενέματα ως εξής: "στις ενέσεις εδάφους και πετρωμάτων, ένα υλικό που εγχέεται σε έναν εδαφικό ή βραχώδη σχηματισμό για να αλλάξει τα φυσικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού". Το χημικό ένεμα αναγνωρίζεται ως οποιοδήποτε υλικό ενέματος που χαρακτηρίζεται από το ότι είναι καθαρό διάλυμα και δεν υπάρχουν σωματίδια σε αιώρηση".

Η φράση-κλειδί στον ορισμό είναι "προκειμένου να μεταβληθούν οι φυσικές ιδιότητες". Αυτός είναι ο σκοπός της αρμολόγησης, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αρμολόγηση πρέπει να έχουν αυτή τη δυνατότητα.

Ο ορισμός είναι στην πραγματικότητα πολύ ευρύς. Οι επιθυμητές μεταβολές του σχηματισμού σχετίζονται πάντα με την αντοχή και τη διαπερατότητα. Σχεδόν κάθε στερεό έχει την ικανότητα να φράξει τα κενά του σχηματισμού υπό ορισμένες συνθήκες. Υλικά όπως πίτουρο, φλοιός βρώμης, άχυρο και πριονίδι έχουν χρησιμοποιηθεί ως ενέματα (κυρίως από συνεργεία γεωτρήσεων που προσπαθούν να φράξουν μια ζώνη σε μια οπή και να ανακτήσουν την κυκλοφορία του νερού της γεώτρησης). Τα πιο συνηθισμένα υλικά περιλαμβάνουν άμμο, άργιλο και τσιμέντο. Όλα τα ειδικά υλικά που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής είναι στερεά που δεν διαλύονται στο νερό. Όταν χρησιμοποιούνται ως υλικά αρμολόγησης, αναμιγνύονται με νερό για να σχηματίσουν εναιώρημα. Το νερό λειτουργεί ως το κινούμενο όχημα που μεταφέρει τα στερεά σωματίδια μέσα στο σχηματισμό μέχρι τα στερεά να πέσουν από το εναιώρημα. Όλα αυτά τα υλικά εμπίπτουν στην κατηγορία των αιωρούμενων στερεών ή σωματιδιακά ενέματα, που συχνά αναφέρονται ως ενέματα αιώρησης.

Η άλλη ευρεία κατηγορία κονιαμάτων περιλαμβάνει εκείνα που αποτελούνται από στερεά που είναι διαλυτά στο νερό και αντιμετωπίζονται ως διαλύματα, καθώς και άλλα υλικά που μπορεί να είναι φυσικά υγρά. Τα υλικά αυτά, τα οποία από μόνα τους δεν περιέχουν αιωρούμενα στερεά σωματίδια, ονομάζονται χημικά ενέματα. (Στην πράξη, στα χημικά ενέματα προστίθενται συχνά αιωρούμενα στερεά για να τροποποιήσουν τις ιδιότητες του διαλύματος, αλλά τα υλικά αυτά θεωρούνται πρόσθετα και η εργασία εξακολουθεί να θεωρείται χημική ένεση). Παρόλο που τα χημικά ενέματα αναφέρονται συχνά με όρους περιεκτικότητας σε στερεά, αυτό εννοείται γενικά ως το ποσοστό των στερεών στο διάλυμα. Η κύρια λειτουργική διαφορά μεταξύ των σωματιδιακών ενέσεων και των χημικών ενέσεων είναι ότι η διεισδυτικότητα των πρώτων είναι συνάρτηση του μεγέθους των σωματιδίων, ενώ των δεύτερων είναι συνάρτηση του ιξώδους του διαλύματος.

2.2.2. Ιστορία

Η χημική ένεση είναι μια σχετικά πρόσφατη τεχνολογία, η σύγχρονη εποχή της οποίας ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1950. Μόλις την τελευταία δεκαετία τα υλικά και οι τεχνικές έχουν αποκτήσει καθολική αποδοχή στον κατασκευαστικό κλάδο. Ακόμα και έτσι, υπάρχουν πολλοί εν ενεργεία μηχανικοί κατασκευών που διατηρούν αμφιβολίες σχετικά με την επιλογή και τη χρήση των χημικών ενέσεων. Μόλις το 1984, μια δημοσίευση της

ομοσπονδιακής κυβέρνησης των ΗΠΑ περιείχε τις ακόλουθες δηλώσεις: (1) "Υπάρχει σημαντική βιβλιογραφία σχετικά με το θέμα των χημικών ενέσεων, αλλά είναι ποικίλη, ανοργάνωτη και συχνά ξεπερασμένη". (2) "Κατά την επιλογή ενός χημικού ενέματος, είναι δύσκολο, κατά την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, να ανακαλύψει κανείς οτιδήποτε που να δηλώνει ποιο ένεμα είναι πιθανώς το καλύτερο για μια δεδομένη εφαρμογή ή πώς να προχωρήσει στη λήψη μιας τέτοιας απόφασης".

Σε αντίθεση με αυτές τις κάπως αρνητικές δηλώσεις, η ίδια δημοσίευση τέσσερις σελίδες αργότερα παραθέτει έναν αριθμό κυβερνητικών δημοσιεύσεων που περιέχουν εξαιρετικές λεπτομέρειες για τα υλικά και τις διαδικασίες αρμολόγησης.

Το πρώτο χημικό ένεμα πιστώνεται σε έναν Ευρωπαίο, τον Jeziorsky, στον οποίο χορηγήθηκε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1886 με βάση την έγχυση συμπυκνωμένου πυριτικού νατρίου σε μια οπή και ενός πηκτικού σε μια άλλη (κοντινή) οπή. Το 1909, οι Lemaire και Dumont κατοχύρωσαν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας μια διαδικασία μίας βολή που αποτελείται από ένα μείγμα αραιών διαλυμάτων πυριτικού άλατος και οξέος. Λίγο αργότερα, ο A. Francois χρησιμοποίησε ένα μείγμα διαλυμάτων πυριτικού νατρίου και θειικού αργιλίου που συγκεντρώθηκαν στην οπή έγχυσης.

Ο Francois διαπίστωσε ότι η χρήση πυριτικών κονιαμάτων διευκόλυε την επακόλουθη άντληση κονιάματος. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το πυριτικό άλας λειτουργούσε ως λιπαντικό. Η χρήση πυριτικού νατρίου ως "λιπαντικού" διατηρήθηκε σε μικρή κλίμακα μέχρι πριν από αρκετές δεκαετίες. Στην πραγματικότητα, είναι πιο πιθανό ότι είτε η πίεση του σχηματισμού έκανε μεγαλύτερα κενά να πληρωθούν από το κονίαμα είτε το πυριτικό κονίαμα πήζει στα μικρότερα κενά, εμποδίζοντας αυτά τα κενά να φιλτράρουν το νερό από το κονίαμα.

Ένας Ολλανδός μηχανικός, ο H. J. Joosten, πιστώνεται με την πρώτη επίδειξη της αξιοπιστίας της διαδικασίας χημικών ενέσεων το 1925. Ο Joosten χρησιμοποίησε πυκνό πυριτικό νάτριο που εγχύθηκε σε μία οπή και ισχυρό διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου που εγχύθηκε υπό υψηλή πίεση σε παρακείμενη οπή. Αυτή η διαδικασία, γνωστή με το όνομα του ανθρώπου που αρχικά απέδειξε την αξία της, χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα, αν και σε πολύ περιορισμένη κλίμακα, τόσο με όσο και χωρίς τροποποίηση. Στην πραγματικότητα, από την πρώτη χρήση στα τέλη του 1800 έως τις αρχές της δεκαετίας του 1950, το πυριτικό νάτριο ήταν συνώνυμο της χημικής αρμολόγησης και όλα τα χημικά ενέματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος είχαν ως βάση το πυριτικό νάτριο.

Άλλα πυριτικά σκευάσματα αναπτύχθηκαν σύντομα μετά την αρχική εργασία του Joosten. Μεταξύ 1930 και 1940, πραγματοποιήθηκαν επιτυχώς εργασίες με τη χρήση διττανθρακικού νατρίου, αργιλικού νατρίου, υδροχλωρικού οξέος και θειικού χαλκού ως αντιδραστηρίων.

Μια νέα εποχή στη χημική αρμολόγηση ξεκίνησε στις Ηνωμένες Πολιτείες περίπου στα μέσα του αιώνα. Από την εισαγωγή της, η έρευνα με στόχο τη μείωση της διαδικασίας Joosten σε ένα αξιόπιστο σύστημα έγχυσης με μία μόνο βολή ήταν σε εξέλιξη. Η επανάσταση ήρθε ως αποτέλεσμα των εξελίξεων στη χημεία των πολυμερών και κορυφώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 με την κυκλοφορία στην αγορά του AM-9 (εμπορικό σήμα, American Cyanamid Company), ενός μείγματος οργανικών μονομερών που πολυμερίζονταν επί τόπου μετά από οποιοδήποτε επιλεγμένο χρονικό διάστημα. Η ταχεία ανάπτυξη νέων αγορών για τα χημικά ενέματα πήρε μεγάλη ώθηση από την απόφαση της Cyanamid για την εμπορία, η οποία περιελάμβανε τη δημιουργία ενός ερευνητικού κέντρου (που αρχικά ονομάστηκε Soils Engineering Research Center και αργότερα Engineering Chemicals Research Center, με έδρα το Princeton του New Jersey. Από το 1956 έως το 1967, το κέντρο αυτό δημοσίευσε πάνω από 1000 σελίδες τεχνικών εκθέσεων που αφορούσαν χημικά ενέματα και τιμμεντενέσεις για την ανάπτυξη τεχνικών και τεχνολογίας ενέσεων.

Περίπου την ίδια εποχή, προτάθηκαν και αναπτύχθηκαν για χρήση στο πεδίο τα ενέματα χρωμίου-λιγνίτη (λιγνοσουλφονικά διαλύματα καταλυόμενα με χρωμικά άλατα).

Στην Ευρώπη άρχισαν να χρησιμοποιούνται η φαινόλη και οι ρεζορσίνες φορμαλδεΐδες, που αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1940. Κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών, αναπτύχθηκαν και κυκλοφόρησαν στην αγορά ενέματα με βάση την ουρεοφορμαλδεΐδη που έδιναν υψηλή αντοχή, όπως το Herculox της Halliburton και το Cyanaloc της Cyanamid (περίπου το 1956). Το 1957, η Soletanche στη Γαλλία ανέπτυξε ένα τιμμεντοκονίαμα πυριτικού άλατος με μία μόνο βολή χρησιμοποιώντας οξικό αιθυλεστέρα ως αντιδραστήριο. Άλλοι εστέρες άρχισαν να χρησιμοποιούνται τα επόμενα χρόνια.

Γύρω στο 1960, η Diamond Alkali Company εισήλθε στην αγορά με ένα κονίαμα με βάση το πυριτικό άλας, με την εμπορική ονομασία SIROC, το οποίο προσέφερε υψηλή αντοχή ή χαμηλό ιξώδες, το καθένα σε συνδυασμό με έλεγχο του χρόνου πήκτωματος. Περίπου την ίδια εποχή εισήλθε στην αγορά και η Terra Firma, ένα αποξηραμένο προκαταλυμένο λιγνοσουλφονικό άλας.

Αρκετά χρόνια αργότερα η Rayonier Incorporated έφερε στην αγορά το Terranier, ένα ενέματα μίας δόσης που αποτελούνταν από πολυφαινολικά πολυμερή χαμηλού μοριακού βάρους (περίπου το 1963). Στη συνέχεια, η Borden Inc. διέθεσε στην αγορά το Geoseal, ένα προπολυμερές ρητίνης (δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κατοχυρώθηκε το 1968).

Στην Ασία σημειώθηκαν επίσης εξελίξεις στη τεχνολογία χημικών ενέσεων. Στην Ιαπωνία, ένα ένεμα ακρυλαμιδίου κυκλοφόρησε στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1960 ως Nitto SS, και το σύστημα TACSS, μια πολυουρεθάνη που χρησιμοποιεί υπόγεια ύδατα ως αντιδραστήριο, κυκλοφόρησε στην αγορά αρκετά χρόνια αργότερα. Στην Ευρώπη, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960, έγιναν βελτιώσεις στα πυριτικά συστήματα και στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970 εμφανίστηκαν ενέματα με βάση το ακρυλαμίδιο. Το Rocagil AL (Rhone-Poulenc Inc., Γαλλία) είναι μείγμα ακρυλικού μονομερούς και υδατικής ρητίνης διασποράς, ενώ το Rocagil BT είναι κυρίως μεθυλοακρυλαμίδιο.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η αγορά μοιραζόταν κυρίως μεταξύ των AM-9 και SIROC μέχρι το 1978, με την SIROC να κατέχει τη μερίδα του λέοντος. Τα ιδιόκτητα υλικά αρμολόγησης είχαν και εξακολουθούν να έχουν ένα μικρό μέρος της αγοράς. Στην Ιαπωνία, τα ενέματα ακρυλαμιδίου απαγορεύτηκαν το 1974 (πέντε αναφερθείσες περιπτώσεις δηλητηρίασης του νερού συνδέθηκαν με τη χρήση ακρυλαμιδίου σε ένα έργο αποχέτευσης) και αρκετούς μήνες αργότερα η απαγόρευση επεκτάθηκε ώστε να συμπεριλάβει όλα τα χημικά υλικά αρμολόγησης εκτός από τα ενέματα με βάση το πυριτικό άλας που δεν περιέχουν τοξικά πρόσθετα. Τα γεγονότα αυτά επρόκειτο να επηρεάσουν έντονα την πρακτική των αρμολογήσεων στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 η ανησυχία για την περιβαλλοντική ρύπανση αυξανόταν ραγδαία. Το 1976 μια ομοσπονδιακή υπηρεσία (πιθανώς επηρεασμένη από τα γεγονότα στην Ιαπωνία) χρηματοδότησε μια μελέτη για τα ενέματα με βάση το ακρυλαμίδιο που χρησιμοποιούνταν στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το ακρυλαμίδιο είναι ένα νευροτοξικό υλικό και το πρώτο σχέδιο της έκθεσης (το οποίο δεν δημοσιεύθηκε ποτέ) συνιστούσε να καταργηθούν τα ενέματα ακρυλαμιδίου.

Σε μεταγενέστερες αναθεωρήσεις, η έκθεση συνέστησε να τεθεί ως προϋπόθεση για τη χρήση του ακρυλαμιδίου η τακτική ιατρική παρακολούθηση του προσωπικού που το χρησιμοποιεί. Ταυτόχρονα με τη μελέτη ακρυλαμιδίου, εκθέσεις που εκδόθηκαν από άλλες ομοσπονδιακές υπηρεσίες πρότειναν ότι το DMAPN (ο επιταχυντής ακρυλαμιδίου) μπορεί να είναι καρκινογόνα.

Η εφαρμογή των συστάσεων που διατυπώθηκαν σε αυτές τις εκθέσεις κατέστη περιττή, διότι στις αρχές του 1978, ο εγχώριος κατασκευαστής ενέματος ακρυλαμιδίου απέσυρε το AM-9 από την αγορά και κατέστησε τα συστατικά του μη διαθέσιμα σε οποιονδήποτε θα ήθελε να τα χρησιμοποιήσει για ενέματα.

Η απώλεια του AM-9 ως κατασκευαστικού εργαλείου ήταν λυπηρή, αλλά όχι καταστροφική. Η οργή μεταξύ των αρμολογητών θα είχε καταλαγιάσει γρήγορα, εκτός από έναν παράγοντα. Με την πάροδο των ετών από την εισαγωγή του, μια πολύ εξειδικευμένη και εξελιγμένη βιομηχανία στεγανοποίησης αποχετεύσεων είχε αναπτυχθεί γύρω από τη χρήση του AM-9. Οι εμπλεκόμενοι σε αυτή τη βιομηχανία άρχισαν αμέσως να αναζητούν έναν αντικαταστάτη του AM-9. Αυτή η αναζήτηση έφερε γρήγορα ένα ιαπωνικό ισοδύναμο του AM-9 στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτό το προϊόν, αρχικά γνωστό ως Nitto SS, έγινε διαθέσιμο στις αρχές του 1979 ως AV-100. Τα ευρωπαϊκά προϊόντα ήταν διαθέσιμα για σύντομο χρονικό διάστημα μόνο δοκιμαστικά. Δεν διατέθηκαν στο εμπόριο.

Η αναζήτηση νέων και λιγότερο επικίνδυνων υλικών χρειάστηκε περισσότερο χρόνο για να ολοκληρωθεί. Στα μέσα του 1979, το Terragel έγινε διαθέσιμο στο εμπόριο. Το προϊόν αυτό ήταν ένα συμπυκνωμένο διάλυμα μεθυλοακρυλαμίδιου. Αποσύρθηκε από την αγορά σε σύντομο χρονικό διάστημα λόγω προβλημάτων σταθερότητας αποθήκευσης. Το 1980 κυκλοφόρησε στην αγορά το CR-250, ένα προϊόν ουρεθάνης, ειδικά για εφαρμογές σφράγισης υπονόμων. Έκτοτε εμφανίστηκαν βελτιωμένες και τροποποιημένες εκδόσεις. Ταυτόχρονα, το Injectite 80, ένα προπολυμερές ακρυλαμίδιου (σχετικά μη τοξικό), έγινε επίσης διαθέσιμο για εφαρμογές σφράγισης υπονόμων. Το προϊόν αυτό δεν έχει διατεθεί επιθετικά στην αγορά. Αργότερα το ίδιο έτος, το AC-400, ένα σχετικά μη τοξικό μείγμα ακρυλικών διατέθηκε στην αγορά ως γενική αντικατάσταση των ακρυλαμιδίων. Οι ιδιότητές του είναι παρόμοιες με εκείνες των ενέσεων ακρυλαμίδιου και το AC-400 ανακτά την αγορά που κατείχαν προηγουμένως τα ακρυλαμίδια. Ένα άλλο ακρυλικό ένεμα εμφανίστηκε στην αγορά το 1985.

Επί του παρόντος, οι περισσότερες χημικές ενέσεις κατασκευών στις Ηνωμένες Πολιτείες γίνονται με πυριτικά άλατα. Αυτό δεν συμβαίνει επειδή δεν υπάρχουν άλλα υλικά. Αντιθέτως, στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται φαινοπλάστες, αμινοπλάστες, χρωμολιγνίνες και ακρυλαμίδια. Τα προϊόντα αυτά είναι γνωστά στους Αμερικανούς αρμολογητές. Ωστόσο, στις Ηνωμένες Πολιτείες, η Terra Firma και η Terranier (χρωμολιγνίνη και φαινοπλαστ) έπεσαν στο περιθώριο πριν από μερικά χρόνια, κυρίως λόγω των τοξικών ιδιοτήτων του διχρωμικού καταλύτη. Τα Herculox και Cyanaloc (αμινοπλάστες) είχαν αρχικά περιορισμένη εφαρμογή επειδή απαιτούν ένα όξινο περιβάλλον. Επιπλέον, το συστατικό φορμαλδεΐδη μπορεί να προκαλέσει χρόνια αναπνευστικά προβλήματα. Το Geoseal περιέχει επίσης φορμαλδεΐδη. Το εισαγόμενο ακρυλαμίδιο κυριαρχούσε στη βιομηχανία στεγανοποίησης αποχετεύσεων μέχρι την εμφάνιση των ακρυλικών ενέσεων. Και τα δύο χρησιμοποιούνται σήμερα, με τα ακρυλαμίδια να εξακολουθούν να κατέχουν τη μερίδα του λέοντος.

Αν και η ανησυχία για τη ρύπανση του περιβάλλοντος και τους κινδύνους για την υγεία του προσωπικού υπήρξε σημαντικός παράγοντας για την περιορισμένη χρήση ειδικών χημικών ενέσεων (εκτός από το πυριτικό νάτριο, όλες οι χημικές ενέσεις είναι σε κάποιο βαθμό τοξικές, επικίνδυνες ή και τα δύο), δεν υπήρξε ποτέ απαγόρευση της χρήσης ενέσεων με βάση το ακρυλαμίδιο στις Ηνωμένες Πολιτείες. Στην πραγματικότητα, η χρήση του ακρυλαμιδίου έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία.

2.2.3 Προβλήματα Πεδίου

Η χημική ένεση είναι μία από τις πολλές μεθόδους ελέγχου των υπόγειων υδάτων που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές. Η επιλογή μιας μεθόδου για κάθε ειδική εργασία σχετίζεται σχεδόν πάντα με τα οικονομικά. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην οικονομική επιλογή περιλαμβάνουν το μέγεθος της εργασίας, την τοποθεσία της εργασίας, το χρονοδιάγραμμα εργασιών και τις δυνατότητες και την εμπειρία του εργολάβου. Τα προβλήματα που περιγράφονται παρακάτω (τα οποία σε αυτές τις ειδικές περιπτώσεις επιλύθηκαν με χημικές ενέσεις) δεν θα πρέπει να θεωρηθεί γενικά ότι υποχωρούν μόνο στις τεχνικές ενέσεων ή μόνο στα ειδικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις εργασίες.

Ο σκοπός του ενέματος, όπως αναφέρεται στον ορισμό του ενέματος, είναι η αλλαγή των χαρακτηριστικών του επεξεργασμένου σχηματισμού. Οι αλλαγές αυτές είναι είτε μείωση της διαπερατότητας, είτε αύξηση της αντοχής, είτε και τα δύο. Η αρμολόγηση των κενών σε έναν ισχυρά τσιμεντοποιημένο ψαμμίτη μπορεί να έχει μικρή επίδραση στην αντοχή του σχηματισμού. Η αρμολόγηση των κενών σε άμμο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της αντοχής. Ο βαθμός της απαιτούμενης αύξησης της αντοχής μπορεί να καθορίσει τον τύπο του ενέματος που χρησιμοποιείται. Εάν απαιτείται μόνο επαρκής αύξηση της αντοχής για να μην αλλάξουν οι κόκκοι της άμμου τη σχετική τους θέση (μια διαδικασία που συχνά αποκαλείται "σταθεροποίηση"), μπορεί να επαρκεί ένα λιγότερο ακριβό, σχετικά ασθενές ένεμα. Εάν απαιτείται αύξηση της αντοχής για την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας έδρασης, αστοχίας πρανών ή κατάρρευσης, γενικά υπαγορεύεται ένα πολύ ισχυρό ένεμα.

Αντίθετα, η διακοπή νερού δεν είναι γενικά επαρκής, εκτός εάν είναι πλήρης ή σχεδόν πλήρης. Η επιλογή των κονιαμάτων για τον έλεγχο της διαρροής επιλέγεται με βάση το μέγεθος των κενών του σχηματισμού και την αποτελεσματική διεισδυτικότητα του κονιάματος. Η απαίτηση διακοπής της υδροληψίας και η αύξηση της αντοχής μπορεί να είναι αλληλένδετες. Η ευστάθεια ενός μετώπου εκσκαφής ή ενός πρανούς σε λεπτόκοκκο κοκκώδες υλικό μειώνεται από την εισροή νερού μέσω του μετώπου. Συνεπώς, για να

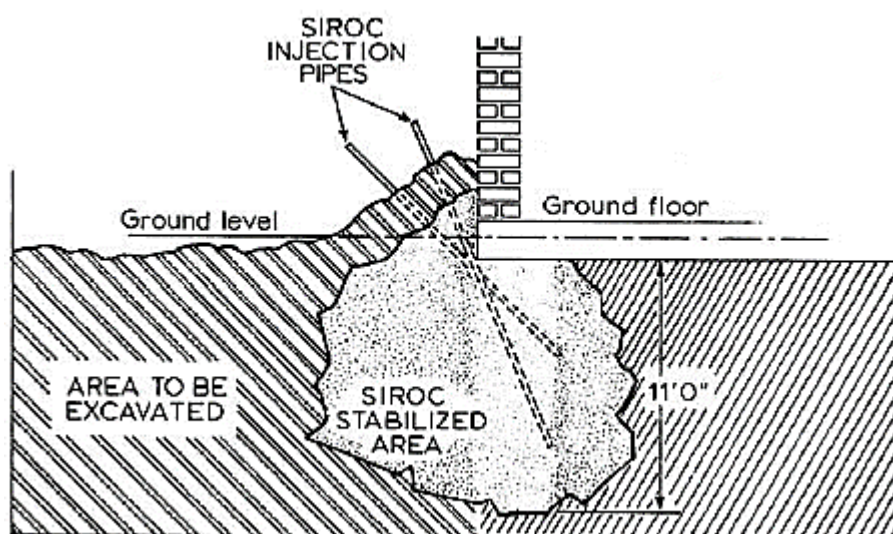
αυξηθεί η αντοχή πρέπει να γίνει διακοπή του νερού. Η επιλογή ενέματος για τέτοιες περιπτώσεις βασίζεται επίσης στη διεισδυτικότητα.

Σε πολλές κατασκευαστικές εργασίες που μαστίζονται από διαρροές, δεν υπάρχουν βοηθητικά προβλήματα νερού και ο σκοπός των ενέσεων είναι αποκλειστικά η μείωση ή η διακοπή της ροής του νερού. Τυπικές περιπτώσεις περιλαμβάνουν σήραγγες και φρεάτια μέσα από ψαμμίτη ή στερεό βράχο, διαρροές μέσα ή γύρω από χωμάτινα και τσιμεντένια φράγματα και εισροή νερού σε υπόγειες κατασκευές κάθε είδους. Το Σχήμα 2.1 δείχνει μια μικρή περιοχή κατά μήκος μιας όχθης ποταμού περίπου ένα μίλι κατάντη ενός φράγματος παραγωγής ενέργειας κοντά στο Albany της Νέας Υόρκης. Η πηγή του νερού στην επάνω αριστερή γωνία της εικόνας είναι ένα κανάλι που οδηγεί πίσω στον ταμιευτήρα. Αν και η απώλεια νερού είναι αμελητέα, η συνεχιζόμενη ροή μπορεί να διευρύνει το κανάλι διαρροής και τελικά να οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα. Το μικρό φράγμα που απεικονίζεται κατασκευάστηκε για να παρέχει ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας των εργασιών χημικών ενέσεων. Οι διαδικασίες ήταν να εντοπιστεί το κανάλι όσο το δυνατόν πιο πίσω από την έξοδό του, με τη χρήση βαμμένου νερού που αντλείται στο έδαφος, και στη συνέχεια να τσιμεντοποιηθεί το κανάλι για να καταστεί αδιαπέραστο. Ένα ενέματα ακρυλαμιδίου ήταν που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το έργο.



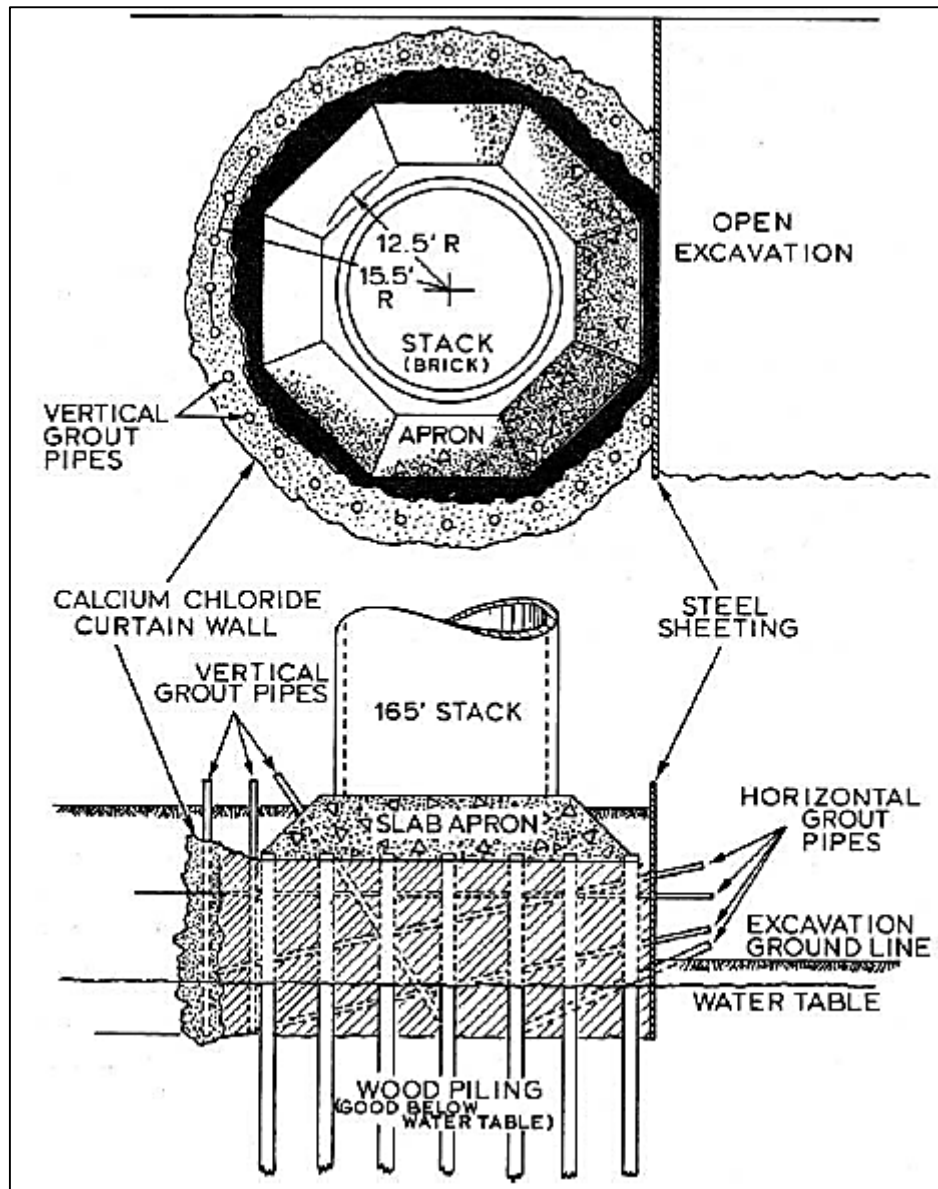
Σχήμα 2.1 Φράγμα για τη μέτρηση της διαρροής κατάντη του φράγματος ισχύος

Ο κύριος σκοπός μιας εργασίας χημικής ένεσης μπορεί να είναι η διατήρηση του εδάφους στη θέση του. Στο Κλίβελαντ του Οχάιο, σχεδιάστηκε μια νέα δομή μεταξύ δύο υφιστάμενων κτιρίων. Η εκσκαφή για τη νέα δομή θα ήταν 11 πόδια κάτω από τα θεμέλια ενός από τα παρακείμενα κτίρια σε χαλαρή, ξηρή άμμο. Τα θεμέλια για την υπάρχουσα κατασκευή υποστηρίζονταν επαρκώς εφόσον το έδαφος κάτω από τα θεμέλια δεν απομακρυνόταν. Επομένως, ήταν απαραίτητο να προβλεφθεί κάποιο μέσο για τη συγκράτηση της άμμου στη θέση της, ώστε να αποφευχθεί η καθίζηση της κατασκευής. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη σταθεροποίηση του εδάφους και τη μη μετακίνησή του κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Η εργασία αυτή έγινε με κονίαμα πυριτικής βάσης.



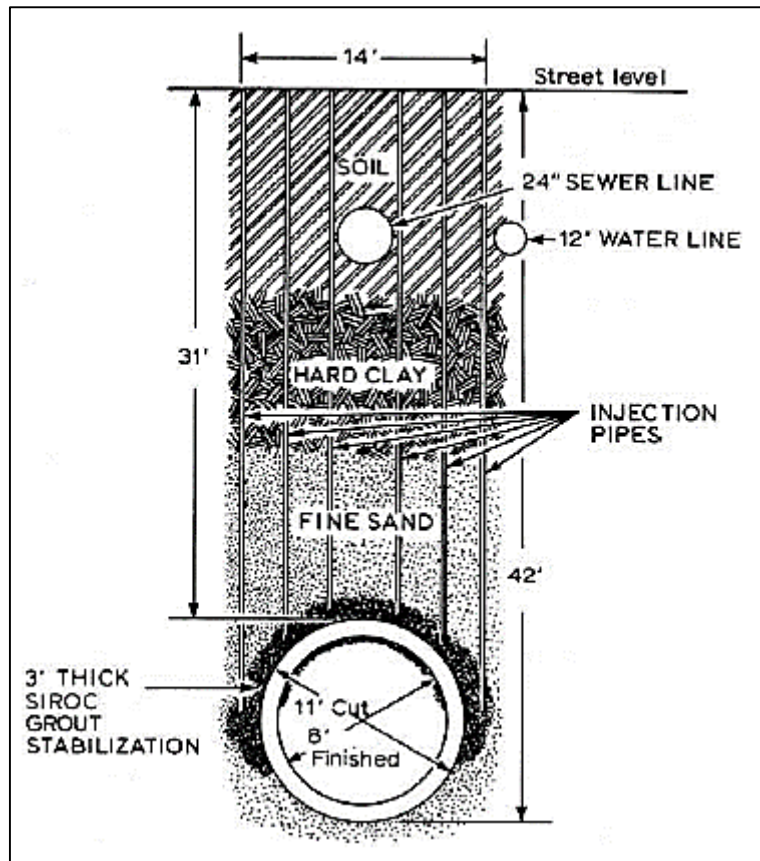
Σχήμα 2.2 Σταθεροποίηση της άμμου για την αποφυγή μετακίνησης των θεμελίων. (Raymond Concrete Pile Division, NY.)

Σε ορισμένες περιπτώσεις, το πρόβλημα είναι απλώς η αύξηση της αντοχής του σχηματισμού. Στη Μινεάπολη της Μινεσότα, οι ξύλινοι πάσσαλοι κάτω από μια τούβλινη καμινάδα ύψους 165 ποδιών είχαν φθαρεί πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και η δομική υποστήριξη της πλάκας θεμελίωσης εξαφανιζόταν. Ήταν απαραίτητο να ενισχυθεί το έδαφος θεμελίωσης σε σημείο που να μπορεί να μεταφέρει το δομικό φορτίο από την πλάκα θεμελίωσης στο υγιές τμήμα των πασσάλων κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι διαδικασίες χημικών ενέσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τη στερεοποίηση και την ενίσχυση του εδάφους κάτω από την καμινάδα. Σε αυτό το έργο χρησιμοποιήθηκε κονίαμα με βάση το πυριτικό άλας, με την εξωτερική κουρτίνα χλωριούχου ασβεστίου να λειτουργεί ως ανασταλτικός παράγοντας για τη διαφυγή του ενέματος που τοποθετείται στο εσωτερικό της κουρτίνας.



Σχήμα 2.3 Ενίσχυση της άμμου για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας. (Raymond Concrete Pile Division, NY.)

Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις στις οποίες η αρμολόγηση εξυπηρετεί πολλαπλούς σκοπούς. Η σήραγγα αποχέτευσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 ξεκίνησε σε άργιλο και η κατασκευή προχωρούσε ομαλά, μέχρι που συναντήθηκε ένα απροσδόκητο στρώμα ξηρής άμμου. Η άμμος έπρεπε να σταθεροποιηθεί για να μην εισχωρήσει στη σήραγγα, αλλά χρειαζόταν επίσης επαρκή διατμητική αντοχή για να λειτουργήσει ως στήριγμα για τα υπερκείμενα, μέχρι να τοποθετηθούν χαλύβδινα στηρίγματα και υποστυλώματα. Αν η άμμος περιείχε νερό, το ένεμα θα έπρεπε επίσης να λειτουργεί ως φράγμα διαρροής.



Σχήμα 2.4 Σταθεροποίηση και ενίσχυση της άμμου. (Raymond Concrete Pile Division, NY.)

2.2.4 Ιδιότητες ενέματος

Για πολλά χρόνια μετά την απόδειξη της διαδικασίας Joosten στο πεδίο, ο όρος "χημικό ένεμα" ήταν συνώνυμος με τη διαδικασία Joosten και το πυριτικό νάτριο. Ωστόσο, το πυριτικό νάτριο αποτελεί τη βάση για πολλές συνθέσεις χημικών ενέσεων εκτός από την έγχυση πυριτικού-χλωριούχου με δύο δόσεις. Κατά παρόμοιο τρόπο με τον τρόπο με τον οποίο οι τεχνικές ενέσεων δεν μπορούσαν να εφαρμοστούν οικονομικά αποτελεσματικά στις χημικές ενέσεις, οι τεχνικές χρήσης πυριτικών αλάτων υψηλού ιξώδους δεν μεταφέρθηκαν καλά στα υλικά χαμηλού ιξώδους που κυκλοφορούν στην αγορά.

Τον τελευταίο μισό αιώνα από την εισαγωγή των ακρυλαμιδίων έχει σημειωθεί ένας πολλαπλασιασμός υλικών που δεν σχετίζονται καθόλου με τα πυριτικά άλατα. Τα υλικά αυτά καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων και δίνουν στον αρμολογητή την ευκαιρία να ταιριάζει ένα ένεμα με τις ειδικές απαιτήσεις της εργασίας, καθώς και να αντιμετωπίζει προβλήματα που δεν μπορούσαν να επιλυθούν με πυριτικά υψηλού ιξώδους.

Οι ειδικές ιδιότητες των χημικών ενέσεων του εμπορίου είναι καλά τεκμηριωμένες από τους διάφορους κατασκευαστές και την τεχνική βιβλιογραφία. Εμπορικό χημικό ένεμα θεωρείται

εκείνο που έχει χρησιμοποιηθεί σε πραγματικά έργα και το οποίο μπορεί να αγοραστεί στην ελεύθερη αγορά (ή του οποίου τα συστατικά μπορούν να αγοραστούν στην ελεύθερη αγορά). Τα ιδιόκτητα υλικά, ιδίως εκείνα των οποίων τα συστατικά και οι ιδιότητες δεν αποκαλύπτονται δημόσια, δεν θεωρούνται εμπορικά ενέματα και δεν εξετάζονται. Αυτό δεν σημαίνει ότι τα υλικά αυτά είναι κατά οποιονδήποτε τρόπο κατώτερα. Ορισμένα, στην πραγματικότητα, είναι πολύ παρόμοια και εξίσου αποτελεσματικά με τα γνωστά προϊόντα που χρησιμοποιούνται ευρέως.

Οι επαγγελματίες χρησιμοποιούν συχνά πρόσθετα για να τροποποιήσουν ένα κονίαμα για μια συγκεκριμένη χρήση. Η αλλαγή στις ιδιότητες είναι συνήθως μικρή. Ωστόσο, υπάρχουν τόσα πολλά πιθανά πρόσθετα που δεν είναι εφικτό να καταγραφούν όλες οι αλλαγές στις ιδιότητες για όλα τα ενέματα. Ομοίως, υπάρχουν τόσες πολλές μικρές διαφορές, για παράδειγμα, στην αναλογία νατρίου προς πυριτικό άλας, που θα δώσουν επαρκή ενέματα, που δεν είναι εφικτό να καταγραφούν όλες οι πιθανές μεταβολές. Έτσι, στις λεπτομερείς περιγραφές των ιδιοτήτων των ενέσεων, τα δεδομένα αυτά θα πρέπει να θεωρούνται ως μέσος όρος για ελάχιστα τροποποιημένα υλικά. Με την ίδια λογική, η αναφορά σε μια ειδική ιδιότητα, για παράδειγμα, σε ένα ενέματα ακρυλαμιδίου, μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει για όλα τα παρόμοια ακρυλαμίδια.

Οι μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων ενέσεων που αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την επιλογή ενός ενέματος για μια συγκεκριμένη εργασία περιλαμβάνουν τη μονιμότητα, τη δεισδυτικότητα και την αντοχή. Ομοίως, οι χημικές ιδιότητες περιλαμβάνουν τη μονιμότητα, τον έλεγχο του χρόνου πήξης, την ευαισθησία και την τοξικότητα και οι οικονομικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τη διαθεσιμότητα και το κόστος.

Η μονιμότητα είναι ένας όρος που μπορεί να έχει πολλές ερμηνείες όταν εφαρμόζεται στα χημικά ενέματα, δεδομένου ότι σχετίζεται με ειδικές εφαρμογές. Ο προσδιορισμός του "μόνιμου" με ένα αριθμητικό χρονικό πλαίσιο (όπως 50 χρόνια), μπορεί να αποκλείσει αδικαιολόγητα τη χρήση των ειδικών ενέσεων για σκοπούς στους οποίους είναι απολύτως κατάλληλες. Σε πολλά κατασκευαστικά έργα (για παράδειγμα, παροχή στήριξης βάθρων κοντά σε μεταγενέστερη εκσκαφή ή έλεγχος διαρροών κατά την κατασκευή σηράγγων και φρεατίων), το ένεμα χρειάζεται να λειτουργεί μόνο κατά την περίοδο κατασκευής. Σε πολλές άλλες περιπτώσεις, είναι περισσότερο από πιθανό ότι το ένεμα δεν χρειάζεται να λειτουργήσει πέραν της διάρκειας ζωής της κατασκευής ή του έργου.

Ο καθολικός και ο πλέον αποδεκτός τρόπος για τον προσδιορισμό της μονιμότητας του ενέματος, δεδομένου ότι πολλά έργα σχεδιάζονται για 50ετή διάρκεια ζωής, ο προσδιορισμός ότι τα ενέματα πρέπει να έχουν 50ετή διάρκεια ζωής αποτελεί κοινή

πρακτική. Για την ικανοποίηση της απαίτησης χρησιμοποιούνται αρχαία επιδόσεων σε προηγούμενα έργα. Μια τέτοια προδιαγραφή προφανώς αποκλείει τη χρήση νέων υλικών. Καθώς συσσωρεύονται τα δεδομένα πεδίου και τα αρχαία εργασιών, αυτά μπορεί να υποδείξουν την επιθυμητή εφαρμογή μικρών τροποποιήσεων στα ενέματα και τους καταλύτες. Επίσης, βέβαια, ενδέχεται να αναπτυχθούν νέα συστήματα καταλυτών και πρόσθετα που βελτιώνουν τις ιδιότητες των ενέσεων ή την ευκολία εφαρμογής. Αυτά τα τελικά προϊόντα πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά για να αποφεύγεται η πλάνη της αυθαίρετης ταξινόμησης ως νέα προϊόντα, και έτσι να διαχωρίζονται από ιστορίες απόδοσης και μονιμότητας που μπορεί να είναι απολύτως εφαρμόσιμες.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ασφαλής διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων έχει καταστεί ένα ολόένα και πιο σοβαρό πρόβλημα. Σοβαρότερο είναι η επεξεργασία αυτών των αποβλήτων που δεν έχουν διατεθεί με ασφάλεια. Όταν επικίνδυνα απόβλητα έχουν θαφτεί υπόγεια, οι επιλογές απομόνωσής τους από τη μόλυνση των υπόγειων υδάτων περιλαμβάνουν χημικά φράγματα ενέματος. Έτσι, η ικανότητα των ενέσεων να αντιστέκονται στην αλλοίωση από την ακτινοβολία έχει γίνει μια σημαντική ιδιότητα των ενέσεων. Δεδομένου ότι ο χρόνος ημιζωής ορισμένων από τα ραδιενεργά απόβλητα μπορεί να εκτείνεται σε αιώνες, τα ενέματα που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό τέτοιων αποβλήτων πρέπει να έχουν αντίστοιχη μονιμότητα. Εκτός από τα πυριτικά άλατα που υπάρχουν εδώ και έναν αιώνα περίπου, κανένα από τα άλλα χημικά ενέματα δεν υπάρχει για περισσότερο από μισό αιώνα. Οι επιταχυνόμενες εργαστηριακές δοκιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσπάθεια παρέκτασης των γνωστών επιδόσεων. Υπάρχει ακόμη μεγάλο ενδιαφέρον στη χημική βιομηχανία για την ανάπτυξη νέων ενέσεων, ιδίως εάν αυτές μπορούν να παραχθούν από υποπροϊόντα που διαφορετικά θα σπαταλούνταν. Σε ένα πρόσφατο σεμινάριο για τη συζήτηση πιθανών νέων υλικών, οι συμμετέχοντες μιλούσαν σοβαρά για την ανάγκη προϊόντων με 1000ετή διάρκεια ζωής, για εφαρμογές κοντά σε ραδιενεργά απόβλητα. Ας ελπίσουμε ότι η τεχνολογική πρόοδος θα εξελίξει πολύ καλύτερες λύσεις και για τα δύο άκρα του προβλήματος πολύ πριν από τα 1000 χρόνια.

Όλα τα ενέματα που περιέχουν νερό που δεν είναι χημικά συνδεδεμένο με τα μόρια του ενέματος υπόκεινται σε μηχανική φθορά εάν υποβληθούν σε εναλλασσόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης ή/και υγρού-ξηρού. Ο ρυθμός με τον οποίο συμβαίνει αυτή η φθορά ποικίλλει ανάλογα με την ποσότητα του διαθέσιμου ελεύθερου νερού στο ενέματα καθώς και με το βαθμό ξήρανσης ή κατάψυξης. Εργαστηριακές δοκιμές σε μικρά δείγματα άμμου που αρμολογήθηκαν με υψηλή περιεκτικότητα σε ελεύθερο νερό έδειξαν ότι σημαντική φθορά άρχισε μόνο μετά την ολοκλήρωση τεσσάρων έως έξι πλήρων κύκλων. Οι συνθήκες

δοκιμής ήταν πιθανώς πιο αυστηρές από ό,τι θα ήταν οι συνθήκες πεδίου, δεδομένου ότι η ολική ξήρανση σπάνια συμβαίνει κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα και η κατάψυξη στις εύκρατες ζώνες σπάνια εκτείνεται περισσότερο από 5 έως 10 πόδια κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η μηχανική φθορά των κονιαμάτων μπορεί να εμφανιστεί υπό ορισμένες συνθήκες.

Η χημική υποβάθμιση των ενέσεων μπορεί να συμβεί εάν οι ενέσεις αντιδρούν με το έδαφος ή τα υπόγεια ύδατα σχηματίζοντας διαλυτά προϊόντα αντίδρασης, εάν το ίδιο το ένεμα είναι διαλυτό στα υπόγεια ύδατα ή εάν τα προϊόντα αντίδρασης που σχηματίζουν το ένεμα είναι εγγενώς ασταθή. Γενικά, υλικά με οποιοδήποτε από αυτά τα δυσμενή χαρακτηριστικά δεν θα προτεινόταν ή δεν θα χρησιμοποιούνταν ως ενέματα. Ωστόσο, ενδέχεται να υπάρχουν τοποθεσίες στις οποίες υπάρχουν ασυνήθιστες συγκεντρώσεις ισχυρών αντιδρώντων στα υπόγεια ύδατα και μπορεί να έχουν επιβλαβείς επιδράσεις σε ενέματα που κατά τα άλλα θεωρούνται μόνιμα. Με εξαίρεση το κονίαμα πυριτικού νατρίου που ζελατινοποιείται με διττανθρακικό (όπως διττανθρακικό νάτριο), όλα τα χημικά κονιάματα που συζητούνται στη συνέχεια θεωρούνται γενικά μόνιμα υλικά.

Η συγκριτική ικανότητα των κονιαμάτων να διεισδύουν σε έναν σχηματισμό είναι κυρίως συνάρτηση του σχετικού ιξώδους τους. Αν και υπάρχει αλήθεια στον ισχυρισμό ότι τα λιπαντικά υγρά διέρχονται μέσα από σωλήνες με λιγότερες απώλειες τριβής από τα μη λιπαντικά υγρά, η διαφορά είναι μικρή και δεν μπορεί να αντισταθμίσει σημαντικές διαφορές ιξώδους. Γενικά, το ιξώδες και μόνο πρέπει να χρησιμοποιείται ως οδηγός για τη σχετική διεισδυτικότητα των χημικών ενέσεων.

Στην διαφημιστική, ακόμη και στην τεχνική βιβλιογραφία υπάρχουν ανωμαλίες στα δεδομένα που αντιπροσωπεύουν το ιξώδες των διαλυμάτων ενέματος. Δεδομένου ότι το ιξώδες του ενέματος είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες ρύθμισης της κίνησης του ενέματος που εγχέεται σε έναν πορώδη σχηματισμό, είναι επιθυμητό να ορίζονται οι όροι με σαφήνεια.

Το ιξώδες μιας ουσίας ορίζεται ως εξής: "Η επαπτομενική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας σε ένα από τα δύο οριζόντια επίπεδα που απέχουν μεταξύ τους μοναδιαία απόσταση, εκ των οποίων το ένα είναι σταθερό, ενώ το άλλο κινείται με μοναδιαία ταχύτητα, ενώ ο χώρος είναι γεμάτος με την ουσία". Το ιξώδες εκφράζεται σε dyne-δευτερόλεπτα ανά τετραγωνικό εκατοστό ή poises. Το centipoise (cP) ισούται με 0,01 poise (P).

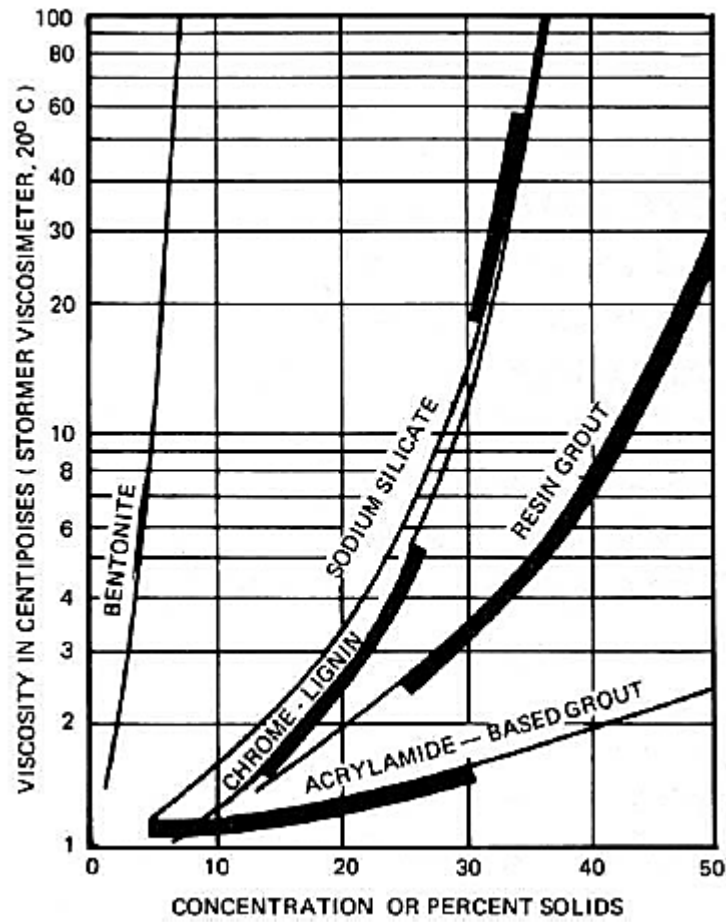
Όταν σε ένα στερεό σώμα ασκείται διατμητική δύναμη, το στερεό σώμα (προσομοιάζοντας με την εφαρμογή της δύναμης) παραμορφώνεται και αναπτύσσονται εσωτερικές τάσεις έως ότου επιτευχθεί μια κατάσταση στατικής ισορροπίας. Εντός του ορίου ελαστικότητας μιας

ουσίας, αυτές οι εσωτερικές τάσεις είναι ανάλογες με τις προκαλούμενες διατμητικές τάσεις (παραμόρφωση). Η ικανότητα ενός υλικού να επιτυγχάνει στατική ισορροπία, αντί να παραμορφώνεται συνεχώς, οφείλεται σε μια ιδιότητα που ονομάζεται διατμητική αντοχή.

Τα ρευστά δεν διαθέτουν διατμητική αντοχή ως τέτοια. Τα υγρά προσφέρουν αντίσταση στην παραμόρφωση, λόγω της εσωτερικής μοριακής τριβής. Ωστόσο, υπό την επίδραση μιας διατμητικής δύναμης, η παραμόρφωση θα συνεχιστεί απεριόριστα. Η ιδιότητα που ονομάζεται ιξώδες είναι στην πραγματικότητα ένα μέτρο της εσωτερικής τριβής που κινητοποιείται έναντι των δυνάμεων διάτμησης.

Το ιξώδες των υγρών γενικά δεν μετρείται άμεσα. Αντ' αυτού, μετράται μια παράμετρος που εξαρτάται από το ιξώδες και χρησιμοποιείται μια προκαθορισμένη σχέση για να προκύψει μια πραγματική τιμή. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά εμπορικά ιξωδοσιόμετρα διαθέσιμα, τα οποία χρησιμοποιούν αρχές όπως η ροή μέσω ενός οργάνου ή η αντίσταση που προσφέρεται σε μια γνωστή ροπή. Σε γενικές γραμμές, τα ιξωδοσιόμετρα καλύπτουν μόνο ένα περιορισμένο εύρος τιμών. Πριν από τη χρήση ενός για τη μέτρηση του ιξώδους των χημικών ενέσεων, είναι απαραίτητο να διαπιστωθεί ότι το όργανο λειτουργεί σωστά στο απαιτούμενο εύρος. Για τη μέτρηση ενός υγρού του οποίου το ιξώδες πλησιάζει αυτό του νερού, απαιτείται ιξωδοσίμετρο που μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια σε 1 έως 5 cP. Οποιοδήποτε όργανο μπορεί εύκολα να ελεγχθεί σε αυτό το εύρος χρησιμοποιώντας το για τη μέτρηση του ιξώδους του νερού σε θερμοκρασία δωματίου. Εάν το όργανο δεν δίνει επανειλημμένες μετρήσεις του 1,0 με ακρίβεια λίγων εκατοστών, δεν πρέπει να βασίζεται σε αυτό. Οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό του ιξώδους του ενέματος έχουν μελετηθεί και τυποποιηθεί. Βλέπε ASTM O-4016.

Το ιξώδες τεσσάρων διαφορετικών κονιαμάτων, όπως μετρήθηκαν με ιξωδομέτρο Stormer, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Τα ιξώδη, φυσικά, ποικίλλουν ανάλογα με το ποσοστό των (διαλυμένων) στερεών και το διάγραμμα παρουσιάζεται με αυτόν τον τρόπο. Τα ωφέλιμα ιξώδη των διαφόρων υλικών εξαρτώνται από την ελάχιστη επιθυμητή συγκέντρωση στερεών. Έτσι, ενώ είναι προφανώς δυνατό να εργαστεί κανείς με διάλυμα πυριτικού νατρίου 20% στη διαδικασία Joosten (ιξώδες μεταξύ 3 και 4 cP), δεν θα σχηματιστεί πηκτή σε τόσο χαμηλή συγκέντρωση και θα ήταν παραπλανητικό να ισχυριστεί κανείς ότι το ιξώδες είναι 4 cP. Κατά παρόμοιο τρόπο, άλλες συνθέσεις πυριτικών αλάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν είτε χαμηλό ιξώδες είτε υψηλή αντοχή, και είναι παραπλανητικό να αναφέρονται αυτές οι τιμές ταυτόχρονα σαν να πρόκειται για τις ιδιότητες του ίδιου υγρού.



Σχήμα 2.5 Ιξώδες διαφόρων χημικών ενέσεων. Οι βαριές γραμμές υποδεικνύουν τις συγκεντρώσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως για εργασίες πεδίου.

Η διαπερατότητα διαφόρων χημικών ενέσεων παρουσιάζεται σε σχέση με το μέγεθος των κόκκων του εδάφους στα Σχήματα 2.6α και β. Όσον αφορά τη διαπερατότητα, ένα συντηρητικό κριτήριο είναι ότι ενέσεις με ιξώδες μικρότερο από 2 cP, όπως τα υλικά με βάση το ακρυλαμίδιο, μπορούν συνήθως να αντληθούν χωρίς πρόβλημα σε εδάφη με διαπερατότητα μόλις 10-4 cm/s. Στα 5 cP, ενέματα όπως οι χρωμολιγνίνες και οι φαινοπλάστες μπορεί να περιορίζονται σε εδάφη με διαπερατότητες υψηλότερες από 10-3 cm/s. Στα 10 cP, τα σκευάσματα με βάση το πυριτικό άλας μπορεί να μην διεισδύουν σε εδάφη κάτω από 10-2 cm/s. Όλα τα ενέματα μπορεί να δυσκολεύονται να διεισδύσουν σε εδάφη όταν το κλάσμα ιλύος υπερβαίνει το 20% του συνόλου. (Αυτό βασίζεται στην υπόθεση ότι το έδαφος δεν θραύεται από την πίεση της τσιμεντοκονίας). Είναι επίσης σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι η διαπερατότητα ενός χαλαρά συμπυκνωμένου κοκκώδους υλικού μπορεί να είναι μία ή περισσότερες τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από εκείνη του ίδιου εδάφους σε πυκνή κατάσταση. Οι εκτιμήσεις αυτές οδήγησαν σε προτεινόμενες νέες μεθόδους

παρουσίασης των δεδομένων σχετικά με τη διαπερατότητα των ενέσεων. Στο Σχήμα 10.6 (γ, δ και ε) παρουσιάζονται τρεις από αυτές τις νέες προσεγγίσεις:

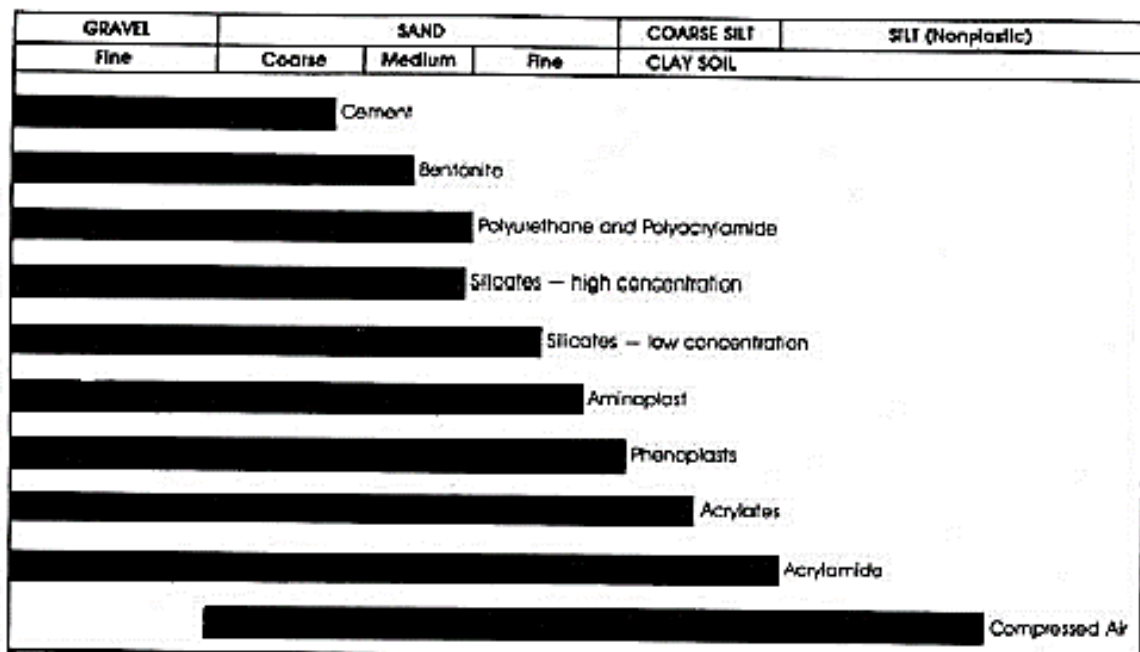
Σχήμα 2.6 (α) Διεσδυτικότητα διαφόρων ενέσεων.

(β) Αποτελεσματικό εύρος μέτρων ελέγχου των υπόγειων υδάτων.

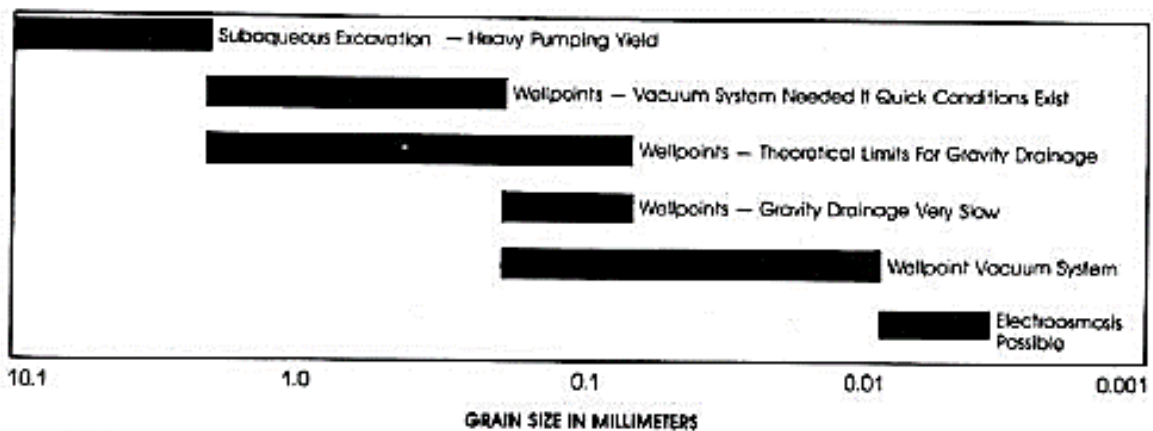
(γ) Ενδεικτικό εύρος επεξεργασιών ενέματος.

(δ) Διεσδυτικότητα ενέματος.

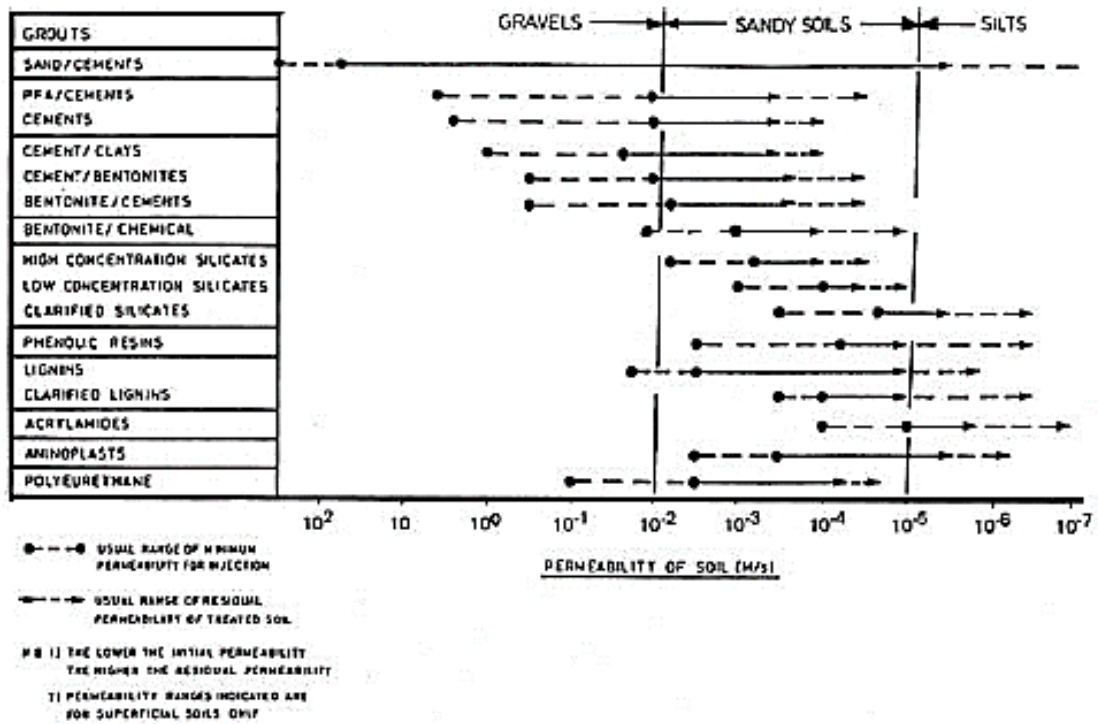
(ε) Ενεσιμότητα των εδαφών με διάφορα ενέματα διαλύματος



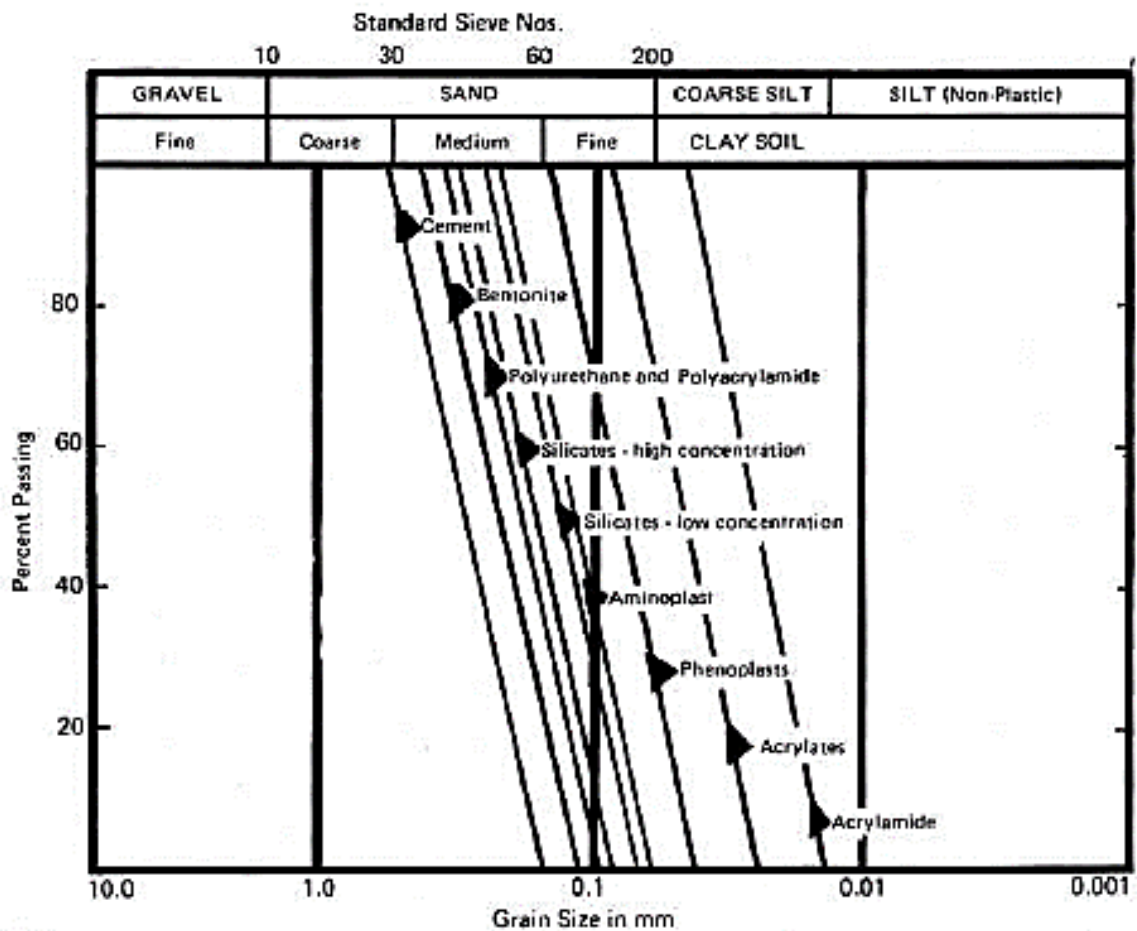
(a)



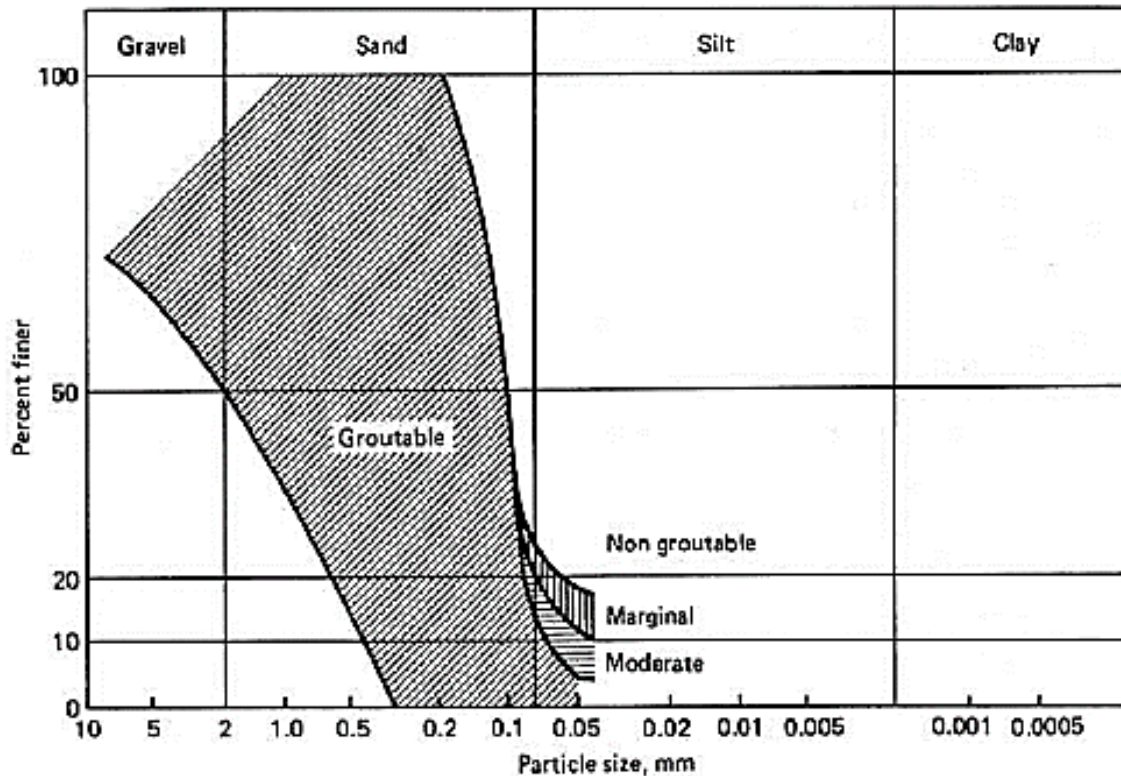
(b)



(c)



(d)



(e)

Τα χημικά ενέματα (εκτός από τα εποξικά και τους πολυεστέρες) έχουν μικρή αντοχή σε σύγκριση με το τσιμέντο και η πραγματική αντοχή μιας στερεάς μάζας χημικού ενέματος έχει μόνο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον. Ωστόσο, η αντοχή του εδαφικού σχηματισμού που έχει σταθεροποιηθεί με χημικά ενέματα έχει πολύ πρακτικό ενδιαφέρον. Τα ενέματα που εκτοπίζουν πλήρως το υγρό στους πόρους του εδάφους σχηματίζουν ένα συνεχές αλλά ανοικτό και ανομοιόμορφο πλέγμα που δεσμεύει τους κόκκους μαζί.

Με τον τρόπο αυτό, το ένεμα αυξάνει την αντίσταση στη σχετική κίνηση μεταξύ των κόκκων του εδάφους και έτσι προσθέτει διατμητική αντοχή στη μάζα του εδάφους. Τα ενέματα που σχηματίζουν φακούς και φακούς μέσα σε μια εδαφική μάζα προσθέτουν επίσης διατμητική αντοχή, ανάλογα εν μέρει με το βαθμό στον οποίο οι φακοί και οι φακοί αλληλοεμπλέκονται. Μέχρι πρόσφατα δεν υπήρχαν τυποποιημένες μέθοδοι δοκιμής και αναφοράς της αντοχής των σταθεροποιημένων άμμων και η βιβλιογραφία είναι γεμάτη από δεδομένα που μπορούν εύκολα να παρερμηνευθούν. (Από το 1979, ωστόσο, η ASTM εργάζεται πάνω σε πρότυπα που σχετίζονται με την αρμολόγηση. Έχουν πλέον δημοσιευθεί αρκετά, συμπεριλαμβανομένου του D-4219, το οποίο ασχολείται με τη δοκιμή μη συμπιεσμένης συμπύεσης δειγμάτων ενέσιμου εδάφους. Τα δεδομένα αντοχής που δημοσιεύθηκαν μετά το 1983 θα πρέπει να είναι πιο αξιόπιστα).

Η αρμολόγηση με χημικές ουσίες γίνεται συχνά κυρίως για την προσθήκη αντοχής σε έναν σχηματισμό. Άλλες σημαντικές εφαρμογές των χημικών ενέσεων είναι η πρόληψη των αναμενόμενων προβλημάτων υπόγειων υδάτων ή η ανακούφιση των υφιστάμενων. Οι περισσότερες εφαρμογές, ανεξαρτήτως σκοπού, έχουν ως αποτέλεσμα την τοποθέτηση ενέματος κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και η αποξήρανση της ενέσιμης μάζας δεν θα συμβεί ποτέ. Έτσι, ο πιο σημαντικός παράγοντας αντοχής είναι η υγρή αντοχή του σταθεροποιημένου εδάφους που σχηματίζεται και παραμένει βυθισμένο σε κορεσμένο σχηματισμό.

Αντίθετα, ένα μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας που αφιερώνεται στα δεδομένα αντοχής αναφέρει ξηρή αντοχή: αντοχή των σταθεροποιημένων εδαφών στα οποία μέρος ή το σύνολο των περιεχόμενων που το νερό έχει απομακρυνθεί με ξήρανση στον αέρα ή σε φούρνο. Όταν το νερό που συγκρατεί ένα ενέσιμο υλικό χάνεται μέσω της ξήρανσης, η μήτρα του ενέσιμου υλικού συρρικνώνεται. Η συρρίκνωση του ενέματος μεταξύ των εδαφικών κόκκων δημιουργεί δυνάμεις ανάλογες με τις τριχοειδείς εφελκυστικές δυνάμεις, αλλά συχνά πολύ ισχυρότερες. Αυτό αυξάνει την αντίσταση στη σχετική κίνηση μεταξύ των κόκκων και προσθέτει διατμητική αντοχή στη μάζα του εδάφους. Έτσι, τα αποξηραμένα εδάφη με ενέματα παρουσιάζουν αντοχές ίσες ή υψηλότερες από τις υγρές αντοχές, συχνά υψηλότερες έως και 10 φορές. Οι ξηρές τιμές αντοχής δεν έχουν νόημα για ενέματα που τοποθετούνται και παραμένουν κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και όλες οι, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά, αναφέρονται σε υγρές αντοχές.

Η αντοχή ενός πλήρως διαπερατού κονιάματος εξαρτάται από το ειδικό κονίαμα που χρησιμοποιείται, αλλά και από άλλους παράγοντες. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι η πυκνότητα, το μέσο μέγεθος των κόκκων και η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του εδάφους. Γενικά, η αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας και με τη μείωση του πραγματικού μεγέθους κόκκων. Τα καλά διαβαθμισμένα εδάφη δίνουν υψηλότερες αντοχές από τα στενά διαβαθμισμένα εδάφη με το ίδιο πραγματικό μέγεθος κόκκων. Λόγω αυτών των μεταβλητών, η γενική συζήτηση για την αναμενόμενη αντοχή των ενέσιμων εδαφών θα πρέπει να παρουσιάζει εύρος τιμών και όχι έναν συγκεκριμένο αριθμό.

Η διατμητική αντοχή των εδαφών αποτελείται από δύο συνιστώσες: (1) τη μηχανική αντίσταση των μεμονωμένων εδαφικών σωματιδίων στην ολίσθηση και την κύλιση μεταξύ τους (ονομάζεται αντίσταση τριβής και μετράται με τη γωνία εσωτερικής τριβής) και (2) την αντίσταση των μεμονωμένων σωματιδίων στη σχετική κίνηση λόγω της έλξης μεταξύ των σωματιδίων (ονομάζεται συνοχή). Οι καθαρές άργιλοι δεν έχουν σχεδόν καθόλου αντίσταση τριβής και η γωνία τριβής είναι μηδενική. Τα σωματίδια άργιλου, ωστόσο, είναι πολύ μικρά

και η έλξη μεταξύ των σωματιδίων είναι μεγάλη σε σύγκριση με το μέγεθος των σωματιδίων. Οι άργιλοι μπορούν να αναπτύξουν αξιοσημείωτη συνοχή. Από την άλλη πλευρά, τα σωματίδια των κοκκωδών εδαφών είναι τόσο μεγάλα σε σύγκριση με τις μοριακές ελκτικές δυνάμεις, ώστε για πρακτικούς σκοπούς τα εδάφη αυτά έχουν μηδενική συνοχή. Ωστόσο, τα σωματίδια των κοκκωδών εδαφών αλληλοσυνδέονται και αναπτύσσουν σημαντική αντίσταση τριβής, με γωνίες τριβής της τάξης του 35°. Πολλά φυσικά εδάφη είναι μείγματα από χονδρόκοκκα σωματίδια και παρουσιάζουν τόσο τριβή όσο και συνοχή.

Τα εδάφη που έχουν αξιοσημείωτη συνοχή είναι γενικά πολύ αδιαπέραστα για να δεχτούν ενέματα. Έτσι, η αρμολόγηση γίνεται κυρίως σε εδάφη με μηδενική συνοχή και το αποτέλεσμα της πλήρωσης των κενών με γέλη ισοδυναμεί με την προσθήκη μιας συνεκτικής συνιστώσας στη διατμητική αντοχή του εδάφους. Εάν τα ενέματα λόγω της λιπαντικότητάς τους διευκολύνουν επίσης την κίνηση των εδαφικών κόκκων μεταξύ τους, θα υπάρξει επίσης μείωση της γωνίας τριβής του εδάφους.

Αποτελεί κοινή πρακτική να προσδιορίζεται η διατμητική αντοχή ενός εδάφους σε άξονες συντεταγμένων, όπου το γ αντιπροσωπεύει τις διατμητικές δυνάμεις. Οι αντοχές των κοκκωδών υλικών ορίζεται από την ευθεία κεκλιμένη γραμμή που διέρχεται από την αρχή και σχηματίζει γωνία f (γωνία τριβής) με τον άξονα x , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7α. Η γραμμή αυτή ονομάζεται γραμμή αστοχίας και όλες οι τάσεις που πέφτουν κάτω από αυτή τη γραμμή δεν προκαλούν διατμητική αστοχία. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η διατμητική αντοχή ενός εδάφους αυξάνεται όσο αυξάνεται η κανονική τάση.

Η διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 2.7α απεικονίζει τη μεταβολή της αντοχής λόγω τενέσεων - προσθήκη δυνάμεων συνοχής και πιθανή μείωση της γωνίας τριβής. Εάν συγκριθούν οι διατμητικές αντοχές σε σημεία όπως το Α και το Β, διαπιστώνεται ότι σε μικρά φορτία η επίδραση της τσιμεντοκονίας είναι να δώσει σημαντική αύξηση της αντοχής, αλλά ότι σε μεγάλα φορτία η αύξηση λόγω τσιμεντοκονίας είναι ασήμαντη. (Στην πραγματικότητα, εάν η τσιμεντοποίηση μειώνει τη γωνία τριβής, είναι πιθανό ότι σε υψηλές ορθές τάσεις η διατμητική αντοχή του εδάφους θα μειωθεί από την τσιμεντοποίηση). Κάθε ειδική εργασία πρέπει να αναλύεται ξεχωριστά για να διαπιστωθεί εάν οι ενέσεις μπορούν πράγματι να προσφέρουν σημαντική αύξηση της αντοχής.

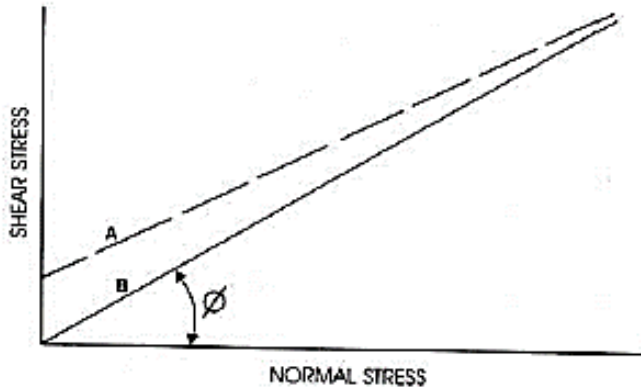
Σχήμα 2.7 (α) Γραμμές αστοχίας για ενέματα και μη ενέματα σε κοκκώδη εδάφη.

(β) Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών με στραγγισμένο νερό για πυριτικά ενεματωμένες χονδροειδείς και μέσες άμμους

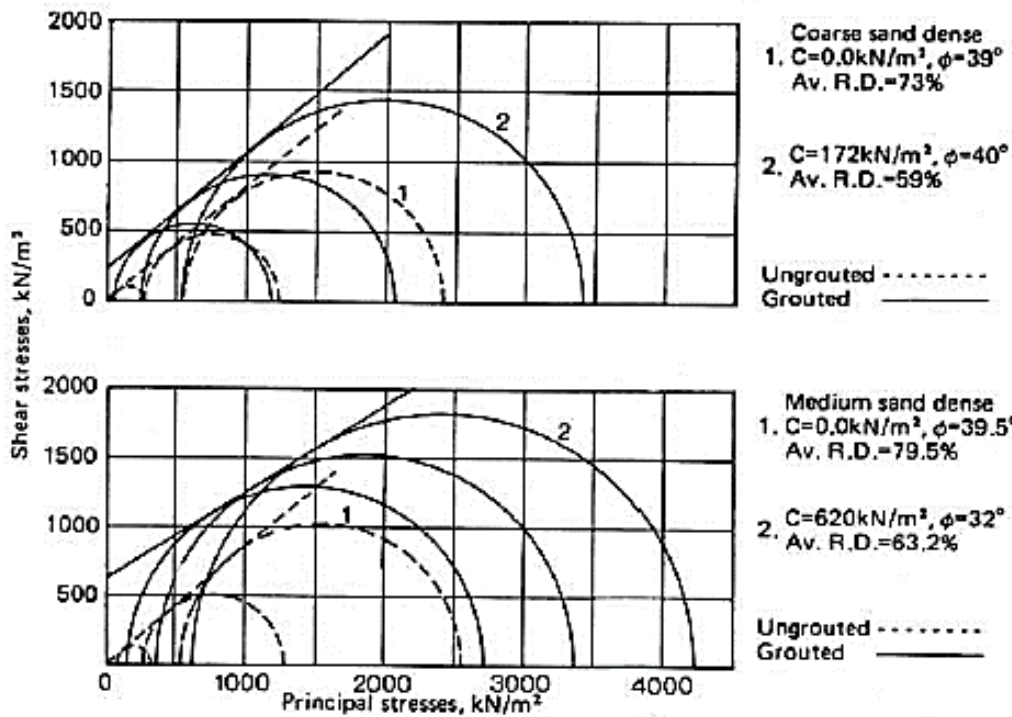
(γ) Τυπική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων από αδιαμόρφωτα συμπιεσμένα σε χημικά αρμολογημένη άμμο.

(δ) Δεδομένα συμπίεσης συναρτήσει του χρόνου για δοκιμή ερπυσμού σε χημικά τσιμεντοποιημένη άμμο, υπό σταθερό φορτίο.

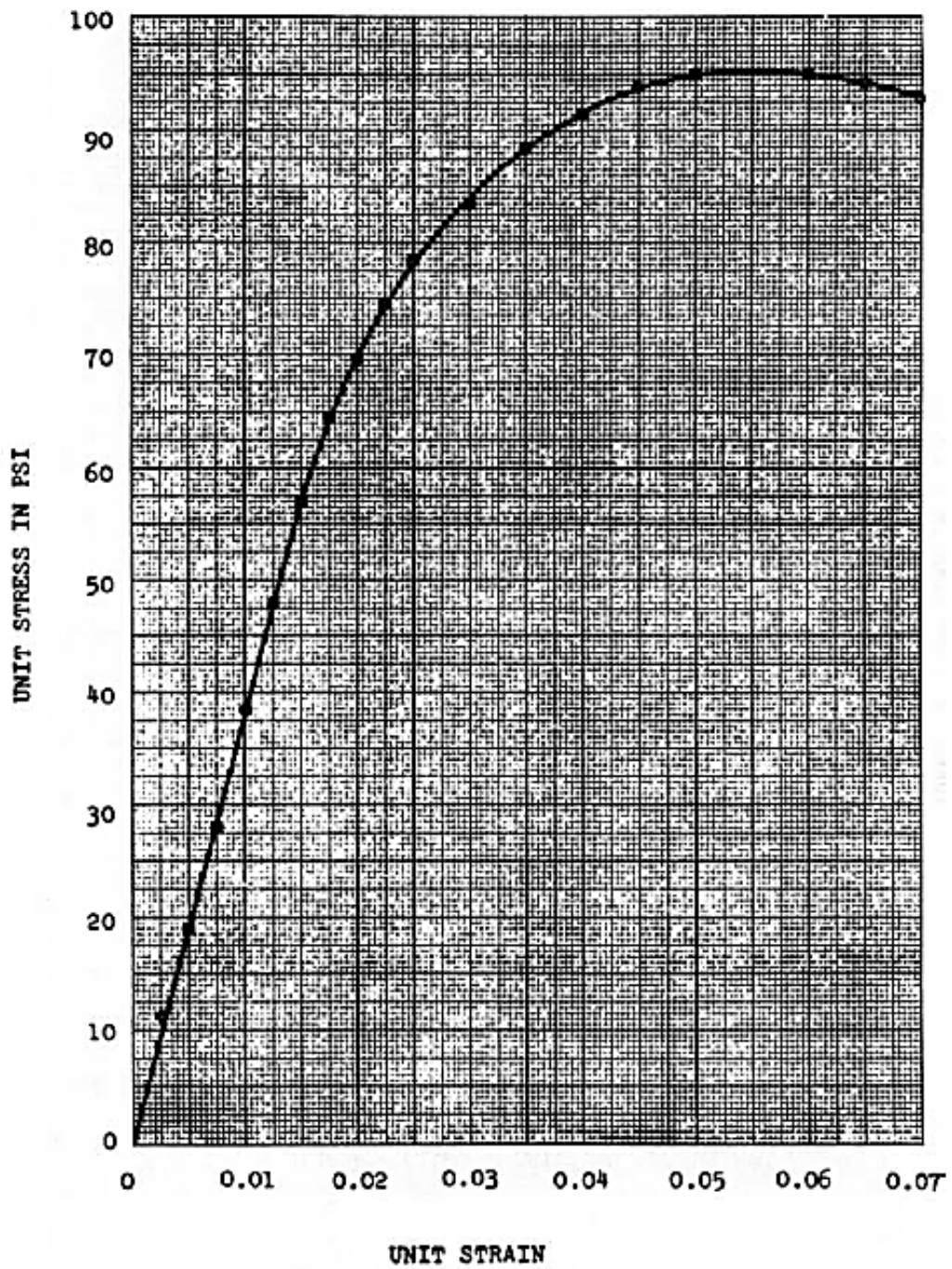
(ε) Χρόνος αστοχίας συναρτήσει του ποσοστού του φορτίου αστοχίας σε συμπίεση χωρίς συμπίεση. Το (b) υποδεικνύει δοκιμές θλίψης χωρίς συμπίεση και το (.) υποδεικνύει τριαξονικές δοκιμές με $S3 \frac{1}{4} 25\%$ του $S1$.



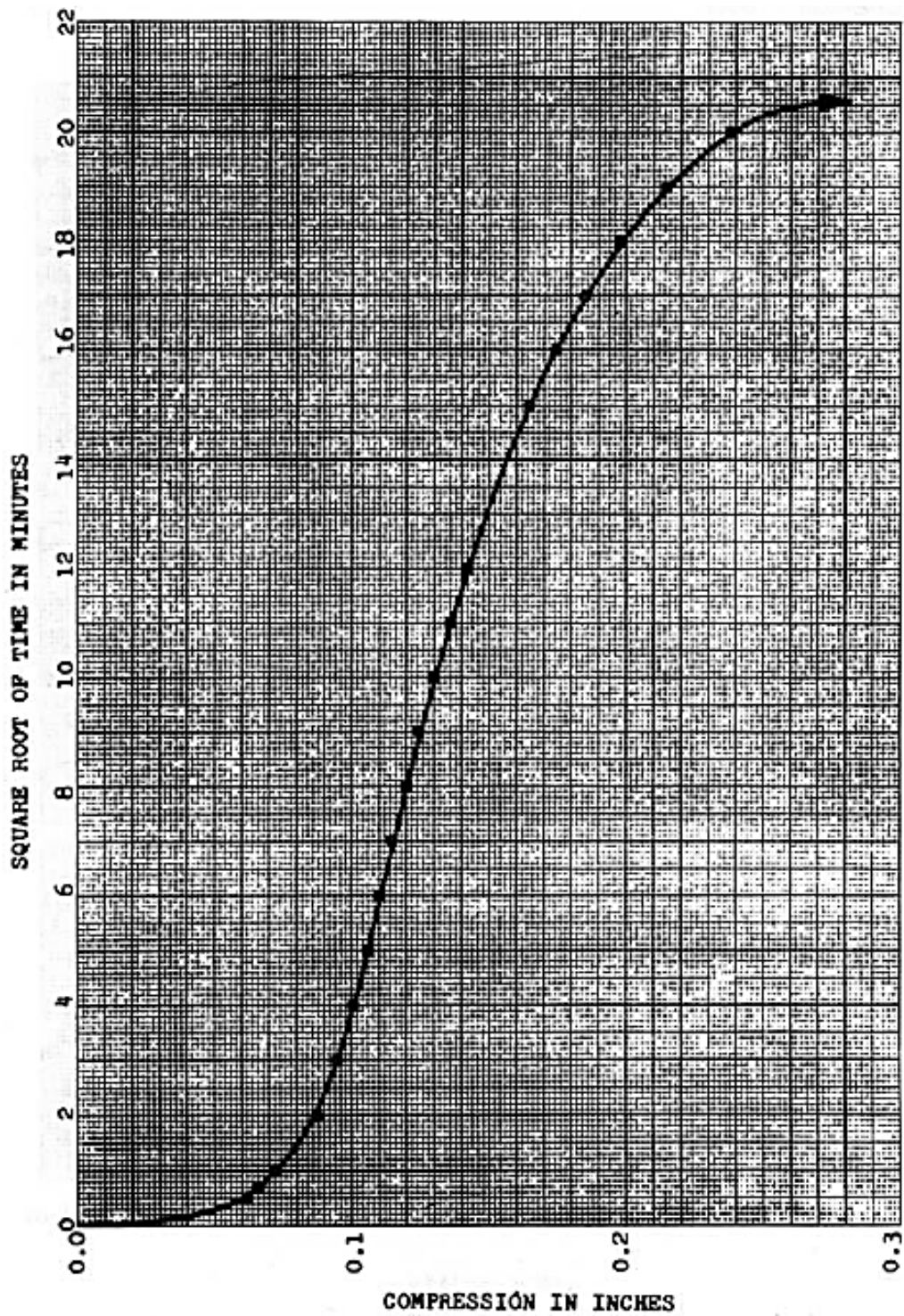
(a)



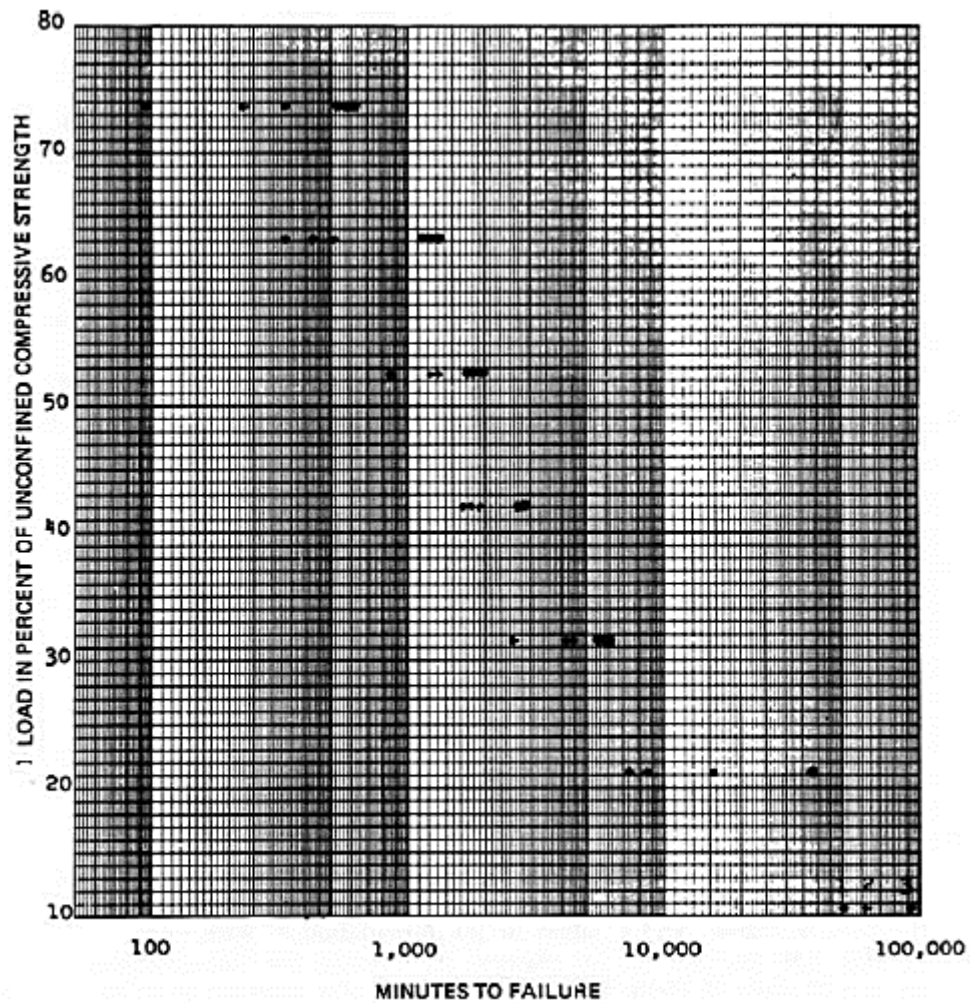
(b)



(c)



(d)



(e)

Το εξιδανικευμένο σκίτσο στο Σχήμα 2.7α. θα απαιτούσε τραυματικές δοκιμές προκειμένου να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι τιμές της συνοχής και της γωνίας τριβής. Στο Σχήμα 2.7β παρουσιάζονται πραγματικά δεδομένα δοκιμών που απεικονίζουν μια περίπτωση στην οποία η τσιμεντοποίηση μείωσε τη γωνία τριβής (f).

Σχεδόν όλες οι τιμές αντοχής που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για ενέματα είναι τα αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσης χωρίς συμπίεση (δείγματα που φορτίζονται σε θλίψη κατά μήκος ενός μόνο άξονα). Ωστόσο, ορισμένες από αυτές τις δοκιμές αφορούν δείγματα σε σχήμα κύβου και πολλές άλλες σε δείγματα των οποίων το ύψος (μακρύς άξονας) είναι μικρότερο από το διπλάσιο της ελάχιστης διάστασης διατομής. Όλες αυτές οι δοκιμές δίνουν υψηλότερες από τις πραγματικές τιμές αντοχής, επειδή δεν υπάρχει αρκετό ύψος για να αναπτυχθεί επίπεδο αστοχίας χωρίς να τέμνονται τα μπλοκ φόρτισης. Είναι επίσης πιθανό ότι πολλές δοκιμές εκτελούνται με ταχύτατους ρυθμούς παραμόρφωσης για τον

προσδιορισμό της πραγματικής στατικής αντοχής. Οι δοκιμές αυτές δίνουν επίσης αποτελέσματα υψηλότερα από τις πραγματικές τιμές αντοχής. Πιο ομοιόμορφα δεδομένα δοκιμών μπορούν τώρα να ληφθούν ακολουθώντας τα πρόσφατα πρότυπα ASTM.

Οι δοκιμές μη συμπιεσμένης συμπίεσης μετρούν την αντοχή του δοκιμίου σε μηδενικές πλευρικές πιέσεις. Για τα εδάφη *in situ*, αυτό συμβαίνει μόνο πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Οι περισσότερες εργασίες ενέματος τοποθετούν το ένεμα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και ακόμη και σε μικρά βάθη αναπτύσσονται σημαντικές πλευρικές πιέσεις. Επομένως, η τριαξονική δοκιμή αποτελεί καλύτερη αναπαραγωγή στο εργαστήριο των πραγματικών συνθηκών πίεσης στο πεδίο. Όποτε είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την πραγματική αντοχή ενός ειδικού σχηματισμού ενέματος, οι τριαξονικές δοκιμές αποτελούν καλύτερη επιλογή της διαδικασίας δοκιμής. Η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης εξακολουθεί να είναι πολύ χρήσιμη για συγκριτικούς σκοπούς, για παράδειγμα, για τον έλεγχο των επιδράσεων των προσθέτων σε ένα ένεμα ή για τη σύγκριση διαφορετικών ενεμάτων.

Παρόλο που δεν έχουν διεξαχθεί επαρκείς δοκιμές σε όλα τα ενέματα, εκτός αν υπάρχουν αντίθετα στοιχεία, θα πρέπει να υποθεθεί ότι τα χημικά ενέματα στα εδάφη υπόκεινται σε ερπυσμό. Δοκιμές μη ελεγχόμενης συμπίεσης υπό τάση σε ενέματα με βάση το ακρυλαμίδιο, ενέματα με βάση το πυριτικό υλικό και ενέματα με βάση τη λιγνίνη έχουν δείξει ότι παρατεταμένα φορτία πολύ κάτω από την αντοχή σε θλίψη χωρίς συμπίεση μπορούν να προκαλέσουν ερπυσμό, οδηγώντας σε αστοχία σε ώρες, ημέρες ή ακόμη και μήνες, ανάλογα με τον λόγο του εφαρμοζόμενου φορτίου προς την αντοχή σε θλίψη χωρίς συμπίεση.

Οι δοκιμές μη συμπιεσμένης συμπίεσης σταθεροποιημένων εδαφών δίνουν δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικής συνοχής λόγω του ενέματος (η τομή του κατακόρυφου άξονα στο Σχήμα 2.7α). Οι βραχυχρόνιες δοκιμές, είτε ελεγχόμενες με τάσεις είτε ελεγχόμενες με παραμορφώσεις, δίνουν δεδομένα που παρουσιάζονται τυπικά στο Σχήμα 2.7γ. Τέτοια αποτελέσματα δοκιμών δεν επανεκφράζουν την επίδραση του ερπυσμού. Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό της αντοχής σε ερπυσμό συνίστανται στην εφαρμογή σταθερού φορτίου στο σταθεροποιημένο έδαφος και στην καταγραφή της παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου. Τυπικά δεδομένα της δοκιμής παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7δ, το οποίο δείχνει ότι η αστοχία επήλθε μετά από 6 ώρες φόρτισης. Σε φορτία που πλησιάζουν τις τελικές τιμές που λαμβάνονται από δοκιμές μικρής διάρκειας, τα εδάφη αστοχούν μάλλον γρήγορα λόγω ερπυσμού. Καθώς η φόρτιση μειώνεται, τα δείγματα χρειάζονται όλο και περισσότερο χρόνο για να αστοχήσουν. Σε κάποια τιμή των εφαρμοζόμενων φορτίων, δεν θα συμβεί αστοχία. Τα δεδομένα για να καλύψουν την τιμή μη αστοχίας απαιτούν μεγάλη προσπάθεια για να συγκεντρωθούν και

έχουν δημοσιευτεί μόνο για ακρυλαμιδικά και πυριτικά ενέματα. Στο Σχήμα 2.7ε παρουσιάζονται τα δεδομένα αυτά τόσο για δοκιμές μη συμπιεσμένης θλίψης όσο και για δοκιμές τριαξονικού ερπυσμού.

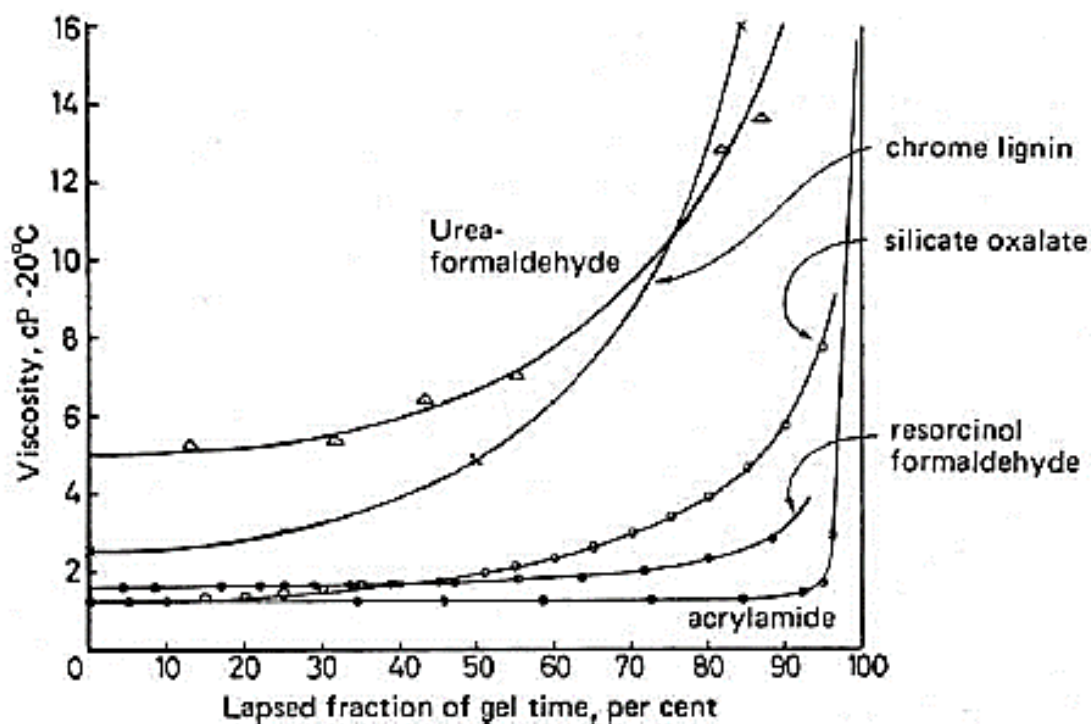
Είναι δυνατόν να οριοθετηθεί ένα όριο αντοχής σε ερπυσμό κάτω από το οποίο δεν θα εμφανιστεί αστοχία ανεξάρτητα από τη διάρκεια της φόρτισης. Περιορισμένα δεδομένα υποδεικνύουν ότι το όριο αντοχής είναι περίπου το 25% της μη συμβατικής θλιπτικής αντοχής για τα υλικά που δοκιμάστηκαν όταν εφαρμόζονται σε συνθήκες πεδίου όπου οι σταθεροποιημένες εδαφικές μάζες δεν υποστηρίζονται στη μία πλευρά, όπως σε ανοικτές τομές, σήραγγες και φρεάτια. Για συνθήκες όπου υπάρχει πλευρική στήριξη της ενέσιμης μάζας, οι τριαξονικές δοκιμές είναι καταλληλότερες. Περιορισμένα δεδομένα υποδεικνύουν ότι, χρησιμοποιώντας πλευρικές πιέσεις "σε κατάσταση ηρεμίας", το τριαξονικό όριο αντοχής σε ερπυσμό πλησιάζει το ήμισυ της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής. Τα δεδομένα αυτά, αν και προσεγγιστικά και χρήζουν περαιτέρω μελέτης, υποδεικνύουν τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας που πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν η αντοχή του ενέσιμου εδάφους αποτελεί παράγοντα σχεδιασμού.

Η δυνατότητα αλλαγής και ελέγχου του χρόνου πήξης ενός ενέματος μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή ολοκλήρωση των έργων συγκόλλησης. Με εξαίρεση τη διαδικασία Joosten, υπάρχει πάντα μια χρονική υστέρηση από την ανάμιξη των χημικών συστατικών μέχρι το σχηματισμό γέλης. Εάν όλοι οι άλλοι παράγοντες παραμένουν σταθεροί, αυτή η χρονική υστέρηση (που αναφέρεται ως χρόνος πηκτής ή περίοδος επαγωγής) είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του ενεργοποιητή, του αναστολέα και του καταλύτη στο σκεύασμα. Με τα περισσότερα ενέματα, ο χρόνος πηκτής μπορεί να αλλάξει μεταβάλλοντας τη συγκέντρωση ενός ή περισσότερων από αυτά τα τρία συστατικά. Εάν μπορεί να επιτευχθεί ένα ευρύ φάσμα χρόνων πηκτώματος και να επαναληφθεί με ακρίβεια, ο έλεγχος του χρόνου πηκτώματος ονομάζεται καλός ή εξαιρετικός. Εάν είναι δυνατό να προσδιοριστεί μόνο ένα στενό εύρος χρόνου πηκτώματος και η επαναληψιμότητα είναι δύσκολη, ο έλεγχος του χρόνου πηκτώματος χαρακτηρίζεται ικανοποιητικός ή κακός.

Ορισμένα χημικά ενέματα, μετά την κατάλυση, διατηρούν σταθερό ιξώδες και μετά την ολοκλήρωση της περιόδου επαγωγής μετατρέπονται από υγρό σε στερεό σχεδόν ακαριαία. Άλλα ενέματα διατηρούν σταθερό ιξώδες για πολύ λιγότερο από τη συνολική περίοδο επαγωγής. Άλλα πάλι αυξάνουν το ιξώδες τους από τη στιγμή της κατάλυσης έως το σχηματισμό πηκτής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Για τις δύο τελευταίες κατηγορίες, μπορεί να μην είναι δυνατή η άντληση ενέματος σε ένα σχηματισμό κατά τη διάρκεια της συνολικής περιόδου επαγωγής. Είναι επίσης δύσκολο να κριθεί πότε συμβαίνει η ζελατινοποίηση και

να μετρηθούν με ακρίβεια οι επιδράσεις εξωτερικών μεταβλητών στο χρόνο ζελατινοποίησης.

Σχήμα 2.8 Αύξηση του ιξώδους κατά τη διάρκεια του χρόνου που προηγείται της ζελατινοποίησης



Για κάθε δεδομένη σύνθεση ενέματος, ο χρόνος πήξης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Οι χημικές αντιδράσεις επιβραδύνονται καθώς πέφτει η θερμοκρασία και για πολλά υλικά το αποτέλεσμα είναι να διπλασιάζεται περίπου ο χρόνος πήξης για κάθε πτώση της θερμοκρασίας κατά 108 F. Εκτός από τις επιδράσεις της θερμοκρασίας, όταν ένα ενέσιμο υλικό χρησιμοποιείται στο πεδίο, πολλοί άλλοι παράγοντες μπορεί να επηρεάσουν το χρόνο πήξης. Πρωταρχικός από αυτούς είναι η αραίωση με υπόγεια ύδατα, η οποία (εκτός από τη μεταβολή της θερμοκρασίας του διαλύματος) θα αραιώσει τη συγκέντρωση του ενεργοποιητή, του αναστολέα και του καταλύτη. Φυσικά, η υπερβολική αραίωση μπορεί να φέρει το ίδιο το ενέματα κάτω από μια συγκέντρωση όπου θα σχηματιστεί γέλη. Τα υπόγεια ύδατα μπορεί επίσης να μεταφέρουν διαλυμένα άλατα τα οποία επηρεάζουν το χρόνο πήξης είτε με χημική δραστηριότητα είτε με αλλαγή του pH. Οι χρόνοι ζελατινοποίησης μπορεί επίσης να επηρεαστούν από την επαφή με αδιάλυτα στερεά, όπως τα υλικά που

χρησιμοποιούνται στις αντλίες, τις βαλβίδες και τις σωληνώσεις. Ο βαθμός στον οποίο ένα ένεμα είναι ευαίσθητο σε αυτούς τους παράγοντες ονομάζεται ευαισθησία του. Τα υλικά που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα προκαλούν γενικά δυσκολία στο χειρισμό τους στο πεδίο.

Οι κίνδυνοι για την υγεία και την εργασία ελέγχονται όλο και περισσότερο την τελευταία δεκαετία, με αποτέλεσμα να έχουν απαγορευτεί σε αρκετές περιπτώσεις τα συστατικά των ενέσεων από ομοσπονδιακές υπηρεσίες. Μεταξύ των προϊόντων που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν και εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται, περιλαμβάνονται προϊόντα που έχουν χαρακτηριστεί ως νευροτοξικά, καρκινογόνα, τοξικά, διαβρωτικά, ιδιαίτερα ερεθιστικά κ.λπ. Αν και υπήρξαν αρκετά περιστατικά ανθρώπων που επηρεάστηκαν δυσμενώς από την έκθεση σε ενέματα, η μελέτη κάθε περίπτωσης που αφορούσε έργα για τα οποία έχουν περιέλθει στοιχεία στην αντίληψη του συγγραφέα δείχνει ότι τα προβλήματα θα μπορούσαν εύκολα να είχαν αποφευχθεί με τη χρήση της κοινής λογικής και την τήρηση των συστάσεων του κατασκευαστή για το χειρισμό.

Σχεδόν όλα τα αναφερόμενα περιστατικά προβλημάτων υγείας που σχετίζονται με το ενέματα αφορούσαν άτομα που χειρίζονται τα υλικά και όχι το ευρύ κοινό. Οι προσπάθειες για τον περιορισμό των προβλημάτων τοξικότητας έγιναν σε μεγάλο βαθμό από τους διανομείς των προϊόντων και απευθύνονταν σε μεγάλο βαθμό στους χρήστες. Οι κατασκευαστές, από την άλλη πλευρά, ανταποκρίθηκαν είτε αποσύροντας προϊόντα από την αγορά είτε αναπτύσσοντας λιγότερο τοξικά υποκατάστατα. Πολλές από τις κατασκευαστικές αποφάσεις υπαγορεύονται από πραγματικές ή αναμενόμενες ανησυχίες περί ευθύνης, οι οποίες μπορεί να έχουν μικρή σχέση με τους πραγματικούς κινδύνους των υλικών που χειρίζονται σωστά.

Οι επικίνδυνες χημικές ουσίες συνήθως δοκιμάζονται από τους κατασκευαστές σύμφωνα με τυποποιημένες διαδικασίες και συχνά περιγράφονται από μια τιμή LD50 . Πρόκειται για τη δοσολογία, εκφρασμένη σε χιλιοστόγραμμα ανά χιλιόγραμμο σωματικού βάρους ανά ημέρα, στην οποία πεθαίνει το 50% των πειραματόζων. Οι ομοσπονδιακοί οργανισμοί βαθμολογούν τα προϊόντα ως εξής:

- ❖ Πολύ τοξικό LD50 $\frac{1}{4}$ 5 έως 50
- ❖ Μέτρια τοξικό LD50 $\frac{1}{4}$ 50 έως 500
- ❖ Πολύ ελαφρώς τοξικό LD50 $\frac{1}{4}$ 500 έως 5000

Όταν οι τιμές LD50 είναι γνωστές, θα παρατίθενται σε επόμενες ενότητες καθώς συζητούνται διάφορα ενέματα. Όλα τα χημικά ενέματα πρέπει να χειρίζονται με προσοχή στο πεδίο, με ασφάλεια και καθαριότητα ίση ή καλύτερη από τις συστάσεις του κατασκευαστή.

Το κόστος είναι φυσικά ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την επιλογή της μεθόδου κατασκευής που είναι η καταλληλότερη για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Όταν οι χημικές ενέσεις συγκρίνονται με άλλες μεθόδους, όπως η διάνοιξη φρεατίων ή η διάνοιξη τάφρων με πολτό, οι πιθανότητες είναι ότι οι συγκρίσεις κόστους θα είναι ρεαλιστικές. Ωστόσο, όταν συγκρίνονται δύο διαφορετικά ενέματα, συχνά γίνεται το λάθος να συγκρίνεται το κόστος των πρώτων υλών και όχι το κόστος κατά την τοποθέτηση. Τα χημικά ενέματα διατίθενται στο εμπόριο σε τιμές που κυμαίνονται από 50 σεντς έως 40 ευρώ ανά λίτρο. Ωστόσο, οι τιμές των τσιμεντοκονιαμάτων είναι πολύ χαμηλές, η ευκολία τοποθέτησης και η αποτελεσματικότητα αυτών των υλικών ποικίλλουν και το κόστος τοποθέτησης αποτελεί σχεδόν πάντα σημαντικό μέρος του κόστους τοποθέτησης. Έτσι, ενώ το κόστος των πρώτων υλών μπορεί να ποικίλλει σε αναλογία 80 προς 1, το κόστος τοποθέτησης κυμαίνεται γενικά από 5 προς 1 έως περίπου ίσο. Η επιλογή του καταλληλότερου υλικού για μια συγκεκριμένη εργασία θα ξεπεράσει γενικά το ενδεχόμενο χαμηλότερο κόστος υλικού άλλων προϊόντων.

2.2.5 Ιδανικό Χημικό Ένεμα

Εάν οι στόχοι της έρευνας για την ανάπτυξη ενός νέου χημικού ενέματος θα έπρεπε να απარიθμηθούν, θα ανέφεραν ότι τα βασικά υλικά πρέπει να είναι τα εξής:

- ✓ Σκόνη ευδιάλυτη στο νερό (έτσι εξαλείφεται το κόστος μεταφοράς ενός διαλύτη και το νερό είναι ο λιγότερο ακριβός διαλύτης).
- ✓ Φθηνά και προέρχονται από χημικές ουσίες σε άφθονη προμήθεια
- ✓ Σταθερό σε όλες τις αναμενόμενες συνθήκες αποθήκευσης
- ✓ Μη τοξικό
- ✓ Μη διαβρωτικό
- ✓ Μη εκρηκτικά

και το διάλυμα ενέματος πρέπει να είναι:

- ✓ Διάλυμα χαμηλού ιξώδους, κατά προτίμηση νερό
- ✓ Σταθερό σε όλες τις συνήθεις θερμοκρασίες
- ✓ Μη τοξικό, μη διαβρωτικό, μη εκρηκτικό
- ✓ Καταλύεται με κοινές, μη δραστικές χημικές ουσίες,
- ✓ Αναισθησία στα άλατα που συνήθως βρίσκονται στα υπόγεια ύδατα
- ✓ Με σταθερό pH στη θετική πλευρά (ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τσιμέντο)
- ✓ Εύκολος έλεγχος για διαφορετικούς χρόνους πηκτώματος

- ✓ Να αντέχει σε αισθητή αραίωση με υπόγεια ύδατα και το τελικό προϊόν να είναι:
- ✓ Μόνιμη γέλη
- ✓ Δεν επηρεάζεται από χημικές ουσίες που συνήθως βρίσκονται στα υπόγεια ύδατα
- ✓ Μη τοξικό, μη διαβρωτικό, μη εκρηκτικό
- ✓ Υψηλή αντοχή

Φυσικά, δεν υπάρχει τέτοιο υλικό. Ωστόσο, κάθε κριτήριο που αναφέρεται μπορεί να βρεθεί σε ένα ή περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα υλικά. Είναι σημαντικό, επομένως, να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του ενέματος που είναι κρίσιμες για ένα συγκεκριμένο έργο, προκειμένου να υπάρχει μια στέρεη βάση για την επιλογή ενός ενέματος.

2.3 Χημικά υλικά ενέματος

2.3.1 Τύποι χημικών ενέσεων

Διατίθενται διάφορα είδη χημικών τσιμεντοκονιαμάτων και κάθε είδος έχει χαρακτηριστικά που το καθιστούν κατάλληλο για διάφορες χρήσεις. Τα πιο συνηθισμένα είναι το πυριτικό νάτριο, το ακρυλικό, η λιγνίνη, η ουρεθάνη και τα τσιμεντοκονιάματα ρητίνης. Μια γενική κατάταξη των τσιμεντοκονιαμάτων και των ιδιοτήτων τους παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1. Τυπικές εφαρμογές των χημικών ενέσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

2.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την διείσδυση

Η διείσδυση του ενέματος σε οποιοδήποτε μέσο είναι συνάρτηση του ενέματος, του μέσου που εγχέεται και των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την έγχυση του ενέματος. Συνήθως, τα ενέματα που πήζουν γρήγορα έχουν περιορισμένο εύρος επεξεργασίας και απαιτούν στενή απόσταση μεταξύ των οπών έγχυσης και γρήγορο ρυθμό έγχυσης. Τα ενέματα χαμηλής διατμητικής αντοχής είναι συχνά χρήσιμα για την επέκταση του εύρους επεξεργασίας σε χρόνους πέραν της αρχικής ζελατινοποίησης. Οι γρήγοροι χρόνοι πήξης είναι χρήσιμοι όταν αντιμετωπίζονται διάφορα στρώματα με διαφορετικές διαπερατότητες και σε περιπτώσεις όπου η ροή των υπόγειων υδάτων μπορεί να μετατοπίσει το ένεμα κατά την έγχυση (Bowen 1981). Όταν η πήξη συμβαίνει πριν από τη διακοπή της άντλησης, το ενέσιμο ένεμα που εγχύθηκε τελευταίο μετακινείται συνήθως προς το εξωτερικό της ενέσιμης μάζας και γεμίζουν τόσο μεγάλα όσο και μικρά ανοίγματα. Οι μέθοδοι έγχυσης έχουν επίσης σημασία. Τυπικά, τα ενέματα που κινούνται συνεχώς θα πήζουν λιγότερο γρήγορα και η διείσδυση από

τη συνεχή έγχυση θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη του ίδιου όγκου ενέματος που χρησιμοποιείται σε τμηματική έγχυση.

2.3.3 Συστήματα πυριτικού νατρίου

Τα κονιάματα πυριτικού νατρίου είναι τα πιο δημοφιλή κονιάματα λόγω της ασφάλειας και της περιβαλλοντικής συμβατότητάς τους. Τα κονιάματα πυριτικά νατρίου έχουν αναπτυχθεί σε μια ποικιλία διαφορετικών συστημάτων ενέματος. Σχεδόν όλα τα συστήματα βασίζονται στην αντίδραση ενός διαλύματος πυριτικού άλατος προς σχηματισμό ενός κολλοειδούς το οποίο πολυμερίζεται περαιτέρω προς σχηματισμό μιας γέλης που δεσμεύει τα σωματίδια του εδάφους ή του ιζήματος μεταξύ τους και γεμίζει τα κενά.

Αντιδρώντα. Τα διαλύματα πυριτικού νατρίου είναι αλκαλικά. Καθώς αυτό το αλκαλικό διάλυμα εξουδετερώνεται, το κολλοειδές διοξείδιο του πυριτίου συσσωρεύεται και σχηματίζει πηκτή, εάν το πυριτικό νάτριο είναι παρόν σε συγκεντρώσεις άνω του 1 ή 2 τοις εκατό (κατ' όγκο). Αναγνωρίζονται τρεις τύποι αλκαλικών πυριτικών ενέσεων με βάση τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται με πυριτικά διαλύματα (Yonekura and Kaga 1992):

- ❖ Όξινο αντιδραστήριο (φωσφορικό οξύ, θειικό υδρογονανθρακικό νάτριο, φωσφορικό νάτριο, διάλυμα διοξειδίου του άνθρακα).
- ❖ Άλατα αλκαλικών γαιών και αλουμινίου (χλωριούχο ασβέστιο, θειικό μαγνήσιο, χλωριούχο μαγνήσιο, θειικό αργίλιο).
- ❖ Οργανικές ενώσεις (γλυοξάλη, οξικός εστέρας, φορμαμίδιο ανθρακικού αιθυλενίου).

Το πυριτικό νάτριο και ένα διάλυμα αντιδρώντος μπορούν να εγχυθούν ως ξεχωριστά διαλύματα ή το πυριτικό νάτριο μπορεί να αναμιχθεί εκ των προτέρων με το αντιδρών για να σχηματιστεί ένα ενιαίο διάλυμα που εγχέεται.

Διαδικασίες. Το πυριτικό νάτριο και ένα διάλυμα αντιδρώντος μπορούν να εγχυθούν ως ξεχωριστά διαλύματα ή το πυριτικό νάτριο μπορεί να αναμιχθεί εκ των προτέρων με το αντιδρών για να σχηματιστεί ένα ενιαίο διάλυμα που εγχύεται

Διαδικασία δύο λύσεων. Η διαδικασία δύο λύσεων αναφέρεται μερικές φορές ως τεχνική δύο βολών του Joosten (Bowen 1981, Karol 1990). Σε αυτή την προσέγγιση, το διάλυμα πυριτικού νατρίου εγχέεται στο υλικό που πρόκειται να αρμολογηθεί. Το αντιδρών διάλυμα, συνήθως διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου, προστίθεται ως δεύτερο βήμα. Η προσέγγιση με δύο διαλύματα αναφέρεται ότι παράγει το μεγαλύτερο κέρδος αντοχής σε ενέσιμα εδάφη, αλλά θεωρείται ότι είναι η πιο δαπανηρή τεχνική που χρησιμοποιείται.

- ✓ Η τεχνική δύο συστατικών μπορεί να σχηματιστεί πολύ γρήγορα σε γέλη. Αυτή η σχεδόν ακαριαία σκλήρυνση μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη για τη διακοπή της ροής

του νερού. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα είναι η μόνιμη φύση του σκληρυμένου ενέματος. Ο Bowen (1981) αναφέρει δοκιμές που έγιναν σε θεμέλια 20 ετών με ενέματα που δεν έδειξαν καμία εμφανή φθορά.

- ✓ Η ταχεία σκλήρυνση που συμβαίνει στην τεχνική δύο συστατικών περιορίζει τον όγκο του εδάφους ή του ιζήματος που μπορεί να επεξεργαστεί από ένα μόνο σημείο έγχυσης. Συνήθως δεν είναι δυνατόν να ελεγχθεί η ανάμιξη του πυριτικού και του αντιδρώντος στο υπέδαφος. Όταν χρησιμοποιείται το σύστημα δύο συστατικών πρέπει να αναμένονται κάποια μη αντιδρώντα συστατικά ενέματος.

Διαδικασία μίας λύσης. Η διαδικασία ενός διαλύματος περιλαμβάνει την έγχυση ενός μείγματος πυριτικού νατρίου και ενός αντιδρώντος (ή αντιδρώντων) που θα προκαλέσει το πυριτικό νάτριο να σχηματίσει γέλη. Τα ξεχωριστά διαλύματα παρασκευάζονται και αναμιγνύονται καλά. Η διαδικασία ενός διαλύματος εξαρτάται από την καθυστέρηση στην έναρξη της ζελατινοποίησης. Αυτή η διαδικασία προσφέρει τα πλεονεκτήματα του πιο ομοιόμορφου σχηματισμού πηκτής, του βελτιωμένου ελέγχου στην κατανομή της πηκτής κατά την έγχυση και του ισχυρού, σύμφωνα με πληροφορίες, ενέματος.

Κατάταξη των κυριότερων ιδιοτήτων του ενέματος

Τύπος	Ακίνητα					
	Διείσδυση σε ενεματωμένους	Ανθεκτικό	Ευκολία εφαρμογής	Πιθανή τοξικότητα	Ανεφλεξιμότητα των υλικών	Σχετικό κόστος
Κονιάματα με βάση το τσιμέντο Portland	¹	H	M	L	N	L
Πυριτικά άλατα	H	M	H	L	N	L
Ακρυλικά	H	M	H	M	L	H
Λιγνίνες	H	M	H	H	L	H
Ουρεθάνες	M	H	M	H	H	H
Ρητίνες	L	H	M	H	M	H

¹ N = μη εύφλεκτο- L = χαμηλό- M = μέτριο- H = υψηλό.

Σχήμα 3.1 Κατάταξη των κυριότερων ιδιοτήτων του ενέματος

Κατάταξη των χημικών ενέσεων ανά εφαρμογή

Εφαρμογή	Τύπος				
	Πυριτικό νάτριο	Ακρικός	Αργών	Ουρεϊνική	Ρητίνες
Προσθήκη δύναμης	C ¹	C	C	R	R
Μείωση της ροής του νερού	C	C	C	U	R
Επισκευή σκυροδέματος	U	U	U	C	C
Επισκευή υλονόμων	U	U	U	C	C
Μεταφορά και στήριξη φορτίου	U	U	U	C	U
Εγκατάσταση αγκυρίων	R	R	R	U	C

¹ C = χρησιμοποιείται συνήθως- U = χρησιμοποιείται- R = χρησιμοποιείται σπάνια.

Σχήμα 3.2 Κατάταξη χημικών ενέσεων ανά εφαρμογή

Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία ενός διαλύματος εξουδετερώνουν την αλκαλικότητα του πυριτικού νατρίου με τρόπο παρόμοιο με το σύστημα δύο διαλυμάτων, αλλά τα αντιδραστήρια αραιώνονται και χρησιμοποιούνται υλικά που αντιδρούν αργά (όπως οργανικά αντιδραστήρια). Το διττανθρακικό νάτριο και το φορμαμίδιο είναι κοινά αντιδρώντα. Μια συνήθης σύνθεση περιλαμβάνει την ανάμειξη φορμαμιδίου, αργλικού νατρίου και πυριτικού νατρίου. Το φορμαμίδιο προκαλεί ζελατινοποίηση και το αργλικό νάτριο επιταχύνει το σχηματισμό πηκτής μετά την έναρξη της ζελατινοποίησης. Η συγκέντρωση του πυριτικού διαλύματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αρμολόγηση μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 70 τοις εκατό κατ' όγκο, ανάλογα με το υλικό που αρμολογείται και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Σε συστήματα που χρησιμοποιούν ένα αμίδιο ως αντιδρών, η συγκέντρωση του αμιδίου μπορεί να κυμαίνεται από λιγότερο από 1 έως περισσότερο από 20 τοις εκατό κατ' όγκο. Γενικά, ωστόσο, η συγκέντρωση αμιδίου κυμαίνεται μεταξύ 2 και 10 τοις εκατό. Το αμίδιο είναι το κύριο αντιδραστήριο που παράγει πηκτή στη διαδικασία ενός διαλύματος. Η συγκέντρωση των επιταχυντών καθορίζεται από τον επιθυμητό χρόνο πηκτής. Το ιξώδες ενός πυριτικού ενέματος εξαρτάται από το ποσοστό πυριτικού στο ενέματα- μια υψηλή συγκέντρωση πυριτικού είναι επομένως πιο ιξώδης από μια χαμηλή συγκέντρωση πυριτικού και έχει λιγότερες πιθανότητες να εισέλθει σε μικρά κενά. Το ιξώδες ενός συγκεκριμένου πυριτικού άλατος ενός διαλύματος είναι σχετικά χαμηλό σε συγκεντρώσεις 60 τοις εκατό ή λιγότερο. Το ιξώδες σε σχέση με τη συγκέντρωση παρουσιάζεται σε πίνακα παρακάτω.

Συγκέντρωση Πυριτικού Νατρίου (%)	Ιξώδες (σε σύγκριση με νερό)
10	2.5
20	3.2 303.5-4.5 404.0-6.0
505	.2-12 608.0-20
70	92

Αντοχή και διαπερατότητα. Τα ενέματα πυριτικού νατρίου έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποκοπή της ροής του νερού που διέρχεται μέσα από ανθεκτικά θεμέλια και για τη σταθεροποίηση ή την ενίσχυση θεμελίων που αποτελούνται από κοκκώδη υλικά και θραυσμένα πετρώματα. Τα κοκκώδη υλικά που έχουν κορεστεί με πυριτικό ένεμα αναπτύσσουν αρκετά χαμηλή διαπερατότητα, εάν δεν επιτραπεί στη γέλη να στεγνώσει και να συρρικνωθεί. Παρόλο που μπορεί να συμβεί συρρίκνωση, συνήθως επιτυγχάνεται χαμηλός βαθμός διαπερατότητας. Η επεξεργασία με ένεμα πυριτικού νατρίου θα βελτιώσει την αντοχή και τη φέρουσα ικανότητα οποιουδήποτε ενέσιμου κοκκώδους υλικού χονδρότερου από το κόσκινο των 75 μm. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή είναι το μέγεθος των κόκκων, το μέγεθος των σωματιδίων, κατανομή, το σχήμα των σωματιδίων, την απορρόφηση, την ικανότητα του ενέματος να προσκολλάται στις επιφάνειες των σωματιδίων, την περιεκτικότητα σε υγρασία, το περιβάλλον σκλήρυνσης και τη μέθοδο φόρτωσης.

Ανθεκτικότητα. Τα ενέματα που περιέχουν 35 τοις εκατό ή περισσότερο πυριτικό άλας κατ' όγκο είναι ανθεκτικά στην υποβάθμιση από το πάγωμα και την απόψυξη και από τη διαβροχή και την ξήρανση. Τα ενέματα που περιέχουν λιγότερο από 30 τοις εκατό πυριτικό άλας κατ' όγκο πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο όταν το ενέσιμο υλικό βρίσκεται σε συνεχή επαφή με το νερό ή για προσωρινή σταθεροποίηση.

Πυριτικά συστήματα. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα πυριτικού κονιάματος περιέχει πυριτικό νάτριο ως υλικό που σχηματίζει πηκτή, φορμαμίδιο ως αντιδρών και χλωριούχο ασβέστιο, αργλικό νάτριο ή διττανθρακικό νάτριο σε μικρές ποσότητες ως επιταχυντή. Οι επιταχυντές χρησιμοποιούνται μεμονωμένα σε ειδικές περιπτώσεις και όχι μαζί, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του χρόνου πήξης και για να προσδώσουν αντοχή και μονιμότητα στη γέλη. Η επίδραση του επιταχυντή είναι σημαντική σε θερμοκρασίες κάτω

των 37 °C και αυξάνει τη σημασία της όσο μειώνεται η θερμοκρασία. Υπερβολικές ποσότητες επιταχυντών μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητη κροκίδωση ή δημιουργία τοπικής ζελατινοποίησης, διακυμάνσεις τόσο στο χρόνο ζελατινοποίησης όσο και στο χρόνο πήξης που θα τείνουν να φράξουν τον εξοπλισμό έγχυσης ή να περιορίσουν τη διείδυση, με αποτέλεσμα να μην είναι καλά αρμολογημένη η περιοχή. Ο επιταχυντής διαλύεται συνήθως σε νερό στην επιθυμητή συγκέντρωση πριν από την προσθήκη άλλων αντιδραστηρίων και ο επακόλουθος συνδυασμός αυτού του μείγματος με το διάλυμα πυριτικού άλατος σχηματίζει το υγρό ένεμα. Το αντιδρών και ο επιταχυντής ξεκινούν την αντίδραση ταυτόχρονα ωστόσο, οι ξεχωριστοί ρυθμοί αντίδρασής τους είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Σε θερμοκρασίες κάτω των 34 °C, ο ρυθμός αντίδρασης του επιταχυντή είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό αντίδρασης του αντιδρώντος. Το αντίστροφο ισχύει πάνω από τους 37 °C. Γενικά, όταν επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, δεν απαιτείται επιταχυντής.

Σύστημα πυριτίου-χλωριούχου αμιδίου. Ένα σύστημα πυριτικού-χλωριδίου-αμιδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρχει ανάγκη για αύξηση της φέρουσας ικανότητας ενός υλικού θεμελίωσης. Το σύστημα αυτό έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τη στερεοποίηση υλικών κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Είναι ένα μόνιμο ένεμα εάν δεν αφηθεί να στεγνώσει, και με συγκέντρωση πυριτικού άλατος 35 % ή περισσότερο κατ' όγκο, το ένεμα παρουσιάζει υψηλή αντοχή στην κατάψυξη και την απόψυξη.

Σύστημα πυριτικού-αλουμινικού-αμιδίου. Ένα σύστημα πυριτικού-αλουμινικού-αμιδίου έχει χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της αντοχής και την αποκοπή του νερού. Η συμπεριφορά του είναι παρόμοια με το σύστημα πυριτικού-χλωριούχου-αμιδίου, αλλά είναι καλύτερο για τη διακοπή της διαρροής ή της ροής του νερού. Το κόστος είναι ελαφρώς μεγαλύτερο και το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όξινα εδάφη.

Σύστημα πυριτικού-διττανθρακικού-αμιδίου. Ένα σύστημα πυριτικού-διττανθρακικού-αμιδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ημι-μόνιμες ενέσεις και για διάφορες επιφανειακές εφαρμογές όταν η απαίτηση σταθεροποίησης είναι για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα.

Πυριτικό άλας ενός ασθενούς οξέος (σύστημα Malmberg). Το σύστημα Malmberg βασίζεται στην παραγωγή γέλης πυριτικού οξέος με την ανάμειξη διαλύματος πυριτικού νατρίου με διάλυμα άλατος ασθενούς οξέος. Το σύστημα αυτό διαφέρει από άλλα παρόμοια συστήματα δύο διαλυμάτων, δεδομένου ότι βασίζονται σε ένα ίζημα και διαφέρει από τα συστήματα όξινης αντίδρασης διατηρώντας ένα αλκαλικό pH. Το σύστημα αυτό έχει καθυστερημένο σχηματισμό γέλης πυριτικού οξέος.

Τα αντιδρώντα που χρησιμοποιούνται σε αυτό το σύστημα περιλαμβάνουν οξέα, αλκάλια ή αμμωνιακά άλατα ασθενών οξέων, όπως θειικό, βορικό, ανθρακικό και οξαλικό οξύ. Τα

συγκεκριμένα άλατα περιλαμβάνουν το δισουλφικό νάτριο, το τετραβορικό νάτριο, το διττανθρακικό νάτριο, το υδρογονοοξαλικό κάλιο, το τετραοξαλικό κάλιο και το αργλικό νάτριο. Αυτά τα άλατα θα αποδώσουν διαφορές στην απόδοση. Για βέλτιστο αποτέλεσμα, το άλας πρέπει να επιλέγεται με βάση όλους τους παράγοντες εφαρμογής. Όλα αυτά τα άλατα θα αποδώσουν επαρκώς για πολλές εφαρμογές ενίσχυσης ή διακοπής νερού.

Η αναλογία του πυριτικού νατρίου προς τον συνολικό όγκο του ενέματος μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 75 τοις εκατό κατ' όγκο, ενώ οι περισσότερες εργασίες πραγματοποιούνται στο εύρος 20 έως 50 τοις εκατό. Το υγρό πυριτικό νάτριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αραιωμένο βασικό διάλυμα ή να αναμιχθεί με νερό κατά τη διάρκεια της αντίδρασης με το βασικό διάλυμα οξέος-αλατιού. Υπάρχει ποικιλία προϊόντων πυριτικού νατρίου στην αγορά και είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται η σωστή συγκέντρωση.

Αυτό το σύστημα έχει μια μικρή διαβρωτική επίδραση στα ελαφρά μέταλλα, όπως το αλουμίνιο- ωστόσο, η επίδραση δεν είναι αρκετά ισχυρή ώστε να δικαιολογεί οτιδήποτε άλλο εκτός από τον συνήθη εξοπλισμό ανάμιξης και άντλησης.

Για γρήγορους χρόνους πηκτωματοποίησης, είναι επιθυμητό ένα σύστημα αναλογίας με δύο αντλίες, όπως συμβαίνει με ορισμένα άλλα συστήματα, ωστόσο, για αργούς χρόνους πηκτωματοποίησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάμιξη σε παρτίδες. Η ανάμιξη με φυσαλίδες πεπιεσμένου αέρα ή η βίαιη ανάμιξη που εισάγει αέρα δεν πρέπει να χρησιμοποιείται λόγω της αντίδρασης μεταξύ των διαλυμάτων και του διοξειδίου του άνθρακα.

Ο χρόνος πηκτώματος μπορεί να ελεγχθεί με αυτό το σύστημα, όπως και με άλλα συστήματα, μεταβάλλοντας τις συγκεντρώσεις του διαλύματος. Η αύξηση της συγκέντρωσης πυριτικού νατρίου καθυστερεί το χρόνο πηκτώματος, η αύξηση της συγκέντρωσης οξέος-αλατιού μειώνει το χρόνο πηκτώματος, η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το χρόνο πηκτώματος και αντίστροφα. Οι χρόνοι ζελατινοποίησης επηρεάζονται επίσης από τη χημεία του υπό επεξεργασία σχηματισμού. Τα όξινα εδάφη ή τα εδάφη που περιέχουν γύψο συχνά επιταχύνουν το χρόνο πήξης, ενώ τα αλκαλικά εδάφη μπορεί να μειώσουν ή ακόμη και να αποτρέψουν την πήξη.

Οι άμμοι που έχουν σταθεροποιηθεί με το σύστημα Malmberg έχουν δείξει διαπερατότητα της τάξης των 10-8 cm/sec, και όταν αφήνονται να στεγνώσουν, η διαπερατότητα συχνά αυξάνεται σε 10-5 cm/sec, ενώ το δείγμα εξακολουθεί να έχει καλά χαρακτηριστικά αντοχής. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα αυτό είναι χρήσιμο για τη διακοπή νερού κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα ή όπου υπάρχει επαρκής υγρασία για τη συνεχή αντικατάσταση του

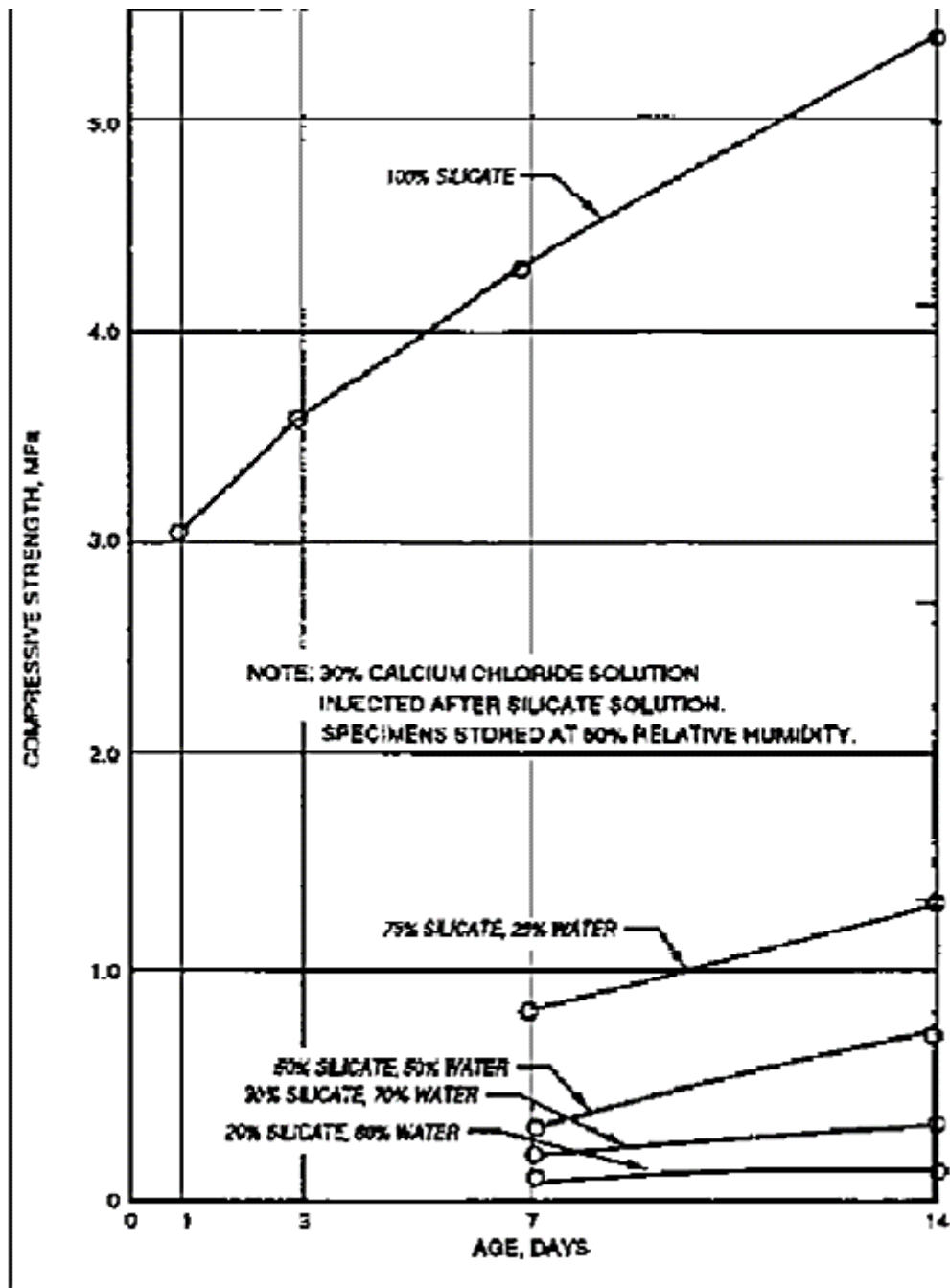
νερού που χάνεται λόγω εξάτμισης. Το σύστημα αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για τη διακοπή νερού σε βράχο ή άλλες ανοικτές σχισμές λόγω του μεγάλου βαθμού συνύφανσης. Αυτό το σύστημα είναι μόνιμο πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, εάν υπάρχει κάποιο μη αντιδρών πυριτικό νάτριο, και στις περισσότερες εφαρμογές κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Περιορισμένη πείρα στο πεδίο έδειξε ότι το σύστημα αυτό λειτουργεί ικανοποιητικά σε συνθήκες όπως οι εφαρμογές σε λεπτές επιφάνειες στην έρημο της Νεβάδα. Λεπτή άμμος με ποσοστό έως 10 τοις εκατό που περνάει από κόσκινο 75 μm μπορεί να διαπεραστεί από ενέματα που περιέχουν έως και 50 τοις εκατό, κατ' όγκο, πυριτικό νάτριο, εάν χρησιμοποιείται επιφανειοδραστικό. Σε ένα έργο, ένα κονίαμα με πυριτικό νάτριο 25 τοις εκατό, κατ' όγκο, εγχύθηκε με επιτυχία σε άμμο με 22 τοις εκατό να περνάει από κόσκινο 75 μm .

Η λιπαντικότητα και το ιξώδες είναι δύο σημαντικοί παράγοντες για τα χαρακτηριστικά διείσδυσης αυτού του συστήματος. Για παράδειγμα, όταν αναμιγνύεται με το κατάλληλο επιφανειοδραστικό, αναφέρεται ότι ένα κονίαμα συστήματος Malmberg 10 cP διεισδύει σε υλικά που δεν διεισδύει ένα σύστημα 3 cP. Για ένα ένεμα με δεδομένη λιπαρότητα, το λιγότερο ιξώδες θα διεισδύσει καλύτερα από το πιο ιξώδες.

Ένα διάλυμα πυριτικού άλατος 30 τοις εκατό έχει κατώτερο πρακτικό όριο διεισδυτικότητας για υλικό που διέρχεται από κόσκινο 106 μm , ενώ όχι περισσότερο από 50 τοις εκατό διέρχεται από κόσκινο 150 μm ή όχι περισσότερο από 10 τοις εκατό διέρχεται από κόσκινο 75 μm . Ο χρόνος ζελατινοποίησης μπορεί να ελεγχθεί από λεπτά έως ώρες σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από παγετό έως 21 °C. Η σταθερότητα του ενέματος είναι εξαιρετική κάτω από τη γραμμή παγετού και τον υδροφόρο ορίζοντα, και φτωχή όταν υποβάλλεται σε κύκλους διαβροχής και ξήρανσης ή κατάψυξης και απόψυξης. Η διείσδυση του ενέματος επηρεάζεται από τους ακόλουθους παράγοντες: βάθος υπερκείμενου εδάφους, επιτρεπόμενη πίεση, λόγος κενών και διαπερατότητα του υλικού που ενέχεται, κατανομή των μεγεθών των σωματιδίων, κ.λπ. Το πιο ρευστό πυριτικό ένεμα (δηλ. το πυριτικό ένεμα με τη χαμηλότερη συγκέντρωση πυριτικού άλατος) έχει την ικανότητα να διεισδύει σε υλικά πιο χονδροειδή από 75- μm κόσκινο. Ένα από τα πιο παχύρρευστα (δηλ. με συγκέντρωση πυριτικού άλατος 70 %) πυριτικά ενέματα που χρησιμοποιούνται συνήθως θα διαπερνά υλικά που είναι πιο χονδροειδή από το κόσκινο 300 μm ή όχι περισσότερο από 25 % που περνάει το κόσκινο 106 μm ή όχι περισσότερο από 25 % που περνάει το κόσκινο 75 μm .

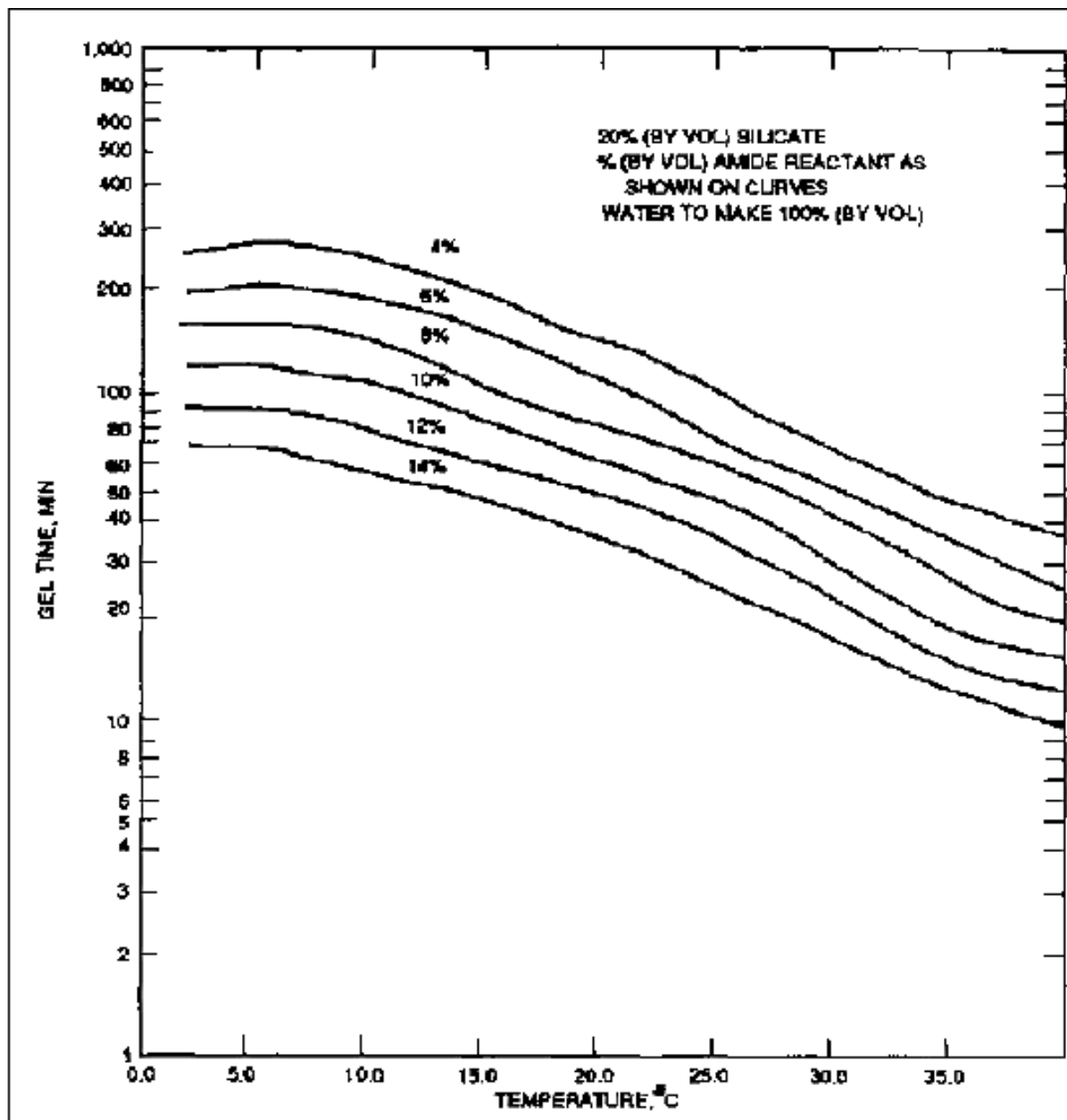
Φυσικές ιδιότητες και παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο πηκτώματος. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται ο ρυθμός ανάπτυξης αντοχής για διάφορες συγκεντρώσεις ενέματος πυριτικού νατρίου που εγχύθηκε σε άμμο άγνωστης διαβάθμισης, στην οποία

χρησιμοποιήθηκε ως αντιδραστήριο διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου 30 %. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε δοκίμια που παρασκευάστηκαν σε εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκε σύστημα δύο διαλυμάτων.

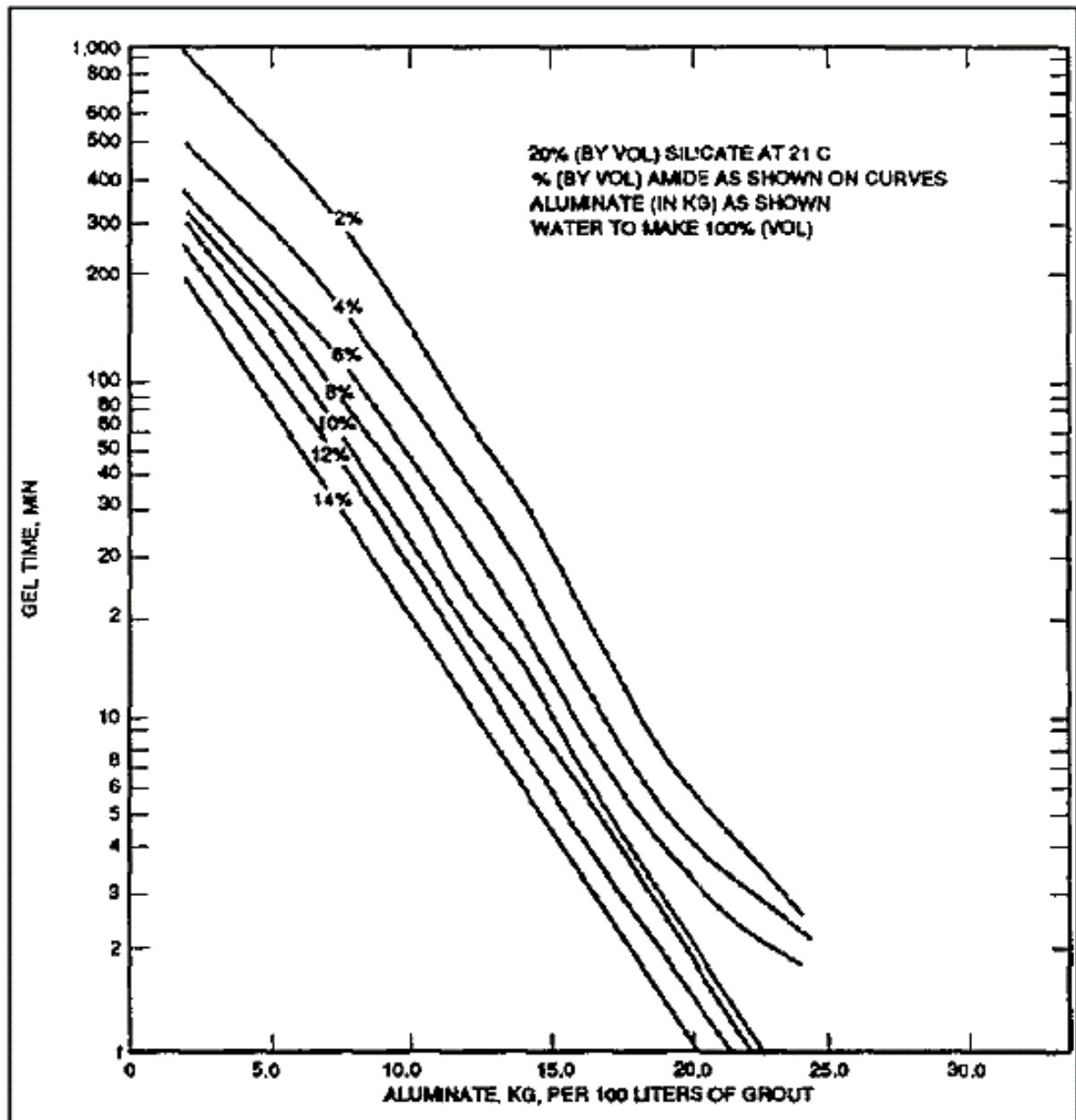


Σχήμα 3.3 Επίδραση της αραίωσης του πυριτικού ενέματος στην αντοχή σε θλίψη της στερεοποιημένης άμμου (κατά Polivka, Witte και Gnaedinger 1957)

Το Σχήμα 3.4 είναι ένα διάγραμμα του χρόνου πηκτώματος σε σχέση με τη θερμοκρασία για συγκέντρωση πυριτικού άλατος 20 % στο σύστημα πυριτικού χλωριούχου αμινοξέος και το Σχήμα 3.5 είναι ένα διάγραμμα του χρόνου πηκτώματος σε σχέση με τη συγκέντρωση επιταχυντή για συγκέντρωση πυριτικού άλατος 20 % στο σύστημα πυριτικού αργλικού αμινοξέος. Και τα δύο σχήματα 3.4 και 3.5 αφορούν μία συγκέντρωση πυριτικού άλατος.



Σχήμα 3.4. Χρόνος πηκτώματος σε σχέση με τη θερμοκρασία, σύστημα πυριτικού χλωριούχου αμιδίου (προσαρμοσμένο από Raymond International, Inc. 1957)



Σχήμα 3.5 Χρόνος πήκτώματος σε σχέση με τη συγκέντρωση του επιταχυντή, σύστημα πυριτικού-αλουμινικού-αμιδίου (προσαρμοσμένο από Raymond International, Inc. 1957)

Οι ακόλουθοι παράγοντες επηρεάζουν τους χρόνους πήξης του πυριτικού ενέματος ενός διαλύματος:

- ❖ Η αύξηση της συγκέντρωσης του πυριτικού άλατος αυξάνει το χρόνο πήκτώματος, εάν οι συγκεντρώσεις των άλλων συστατικών παραμένουν σταθερές.

- ❖ Η αύξηση της συγκέντρωσης του αντιδρώντος μειώνει το χρόνο πήκτωματος.
- ❖ Η αύξηση της συγκέντρωσης του επιταχυντή, εντός των ορίων, μειώνει το χρόνο πήκτωματος.
- ❖ Οι χρόνοι ζελατινοποίησης μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Μέχρι 48 °C, δεν απαιτούνται ειδικές προφυλάξεις.
- ❖ Το pH του υλικού που πρόκειται να αρμολογηθεί έχει μικρή επίδραση, εκτός εάν υπάρχουν μεγάλες ποσότητες οξέων. Όταν υπάρχει οξύ, πρέπει να χρησιμοποιείται πυριτικό ένεμα που περιέχει αργλικό.
- ❖ Η παρουσία διαλυτών αλάτων, όπως χλωριούχα, θειικά και φωσφορικά άλατα, στο μέσο που πρόκειται να αρμολογηθεί έχει επιταχυντική επίδραση στο χρόνο πήξης ανάλογα με τη συγκέντρωσή τους.
- ❖ Οι ακαθαρσίες ή τα διαλυμένα άλατα σε ορισμένα νερά μπορεί να επηρεάσουν το χρόνο πήκτωματος, ως εκ τούτου, ο χρόνος πήκτωματος πρέπει να προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας νερό από την πηγή που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στο τελικό προϊόν.
- ❖ Το άμεσο ηλιακό φως δεν έχει καμία επίδραση στο χρόνο πήκτωματος
- ❖ Η κατάψυξη έχει μικρή επίδραση στα συστατικά του πυριτικού ενέματος ωστόσο, η κατάψυξη πρέπει να αποφεύγεται κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης.
- ❖ Ορισμένα υλικά πλήρωσης, όπως οι μπεντονίτες και οι άργιλοι, έχουν μικρή επίδραση στο χρόνο πήκτωματος. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιούνται μέτριες έως υψηλές συγκεντρώσεις πληρωτικών υλικών, η θερμοκρασία θα μεταβάλλεται, γεγονός που θα μεταβάλλει το χρόνο πήκτωματος. Εάν χρησιμοποιούνται αντιδραστικά υλικά (όπως το τσιμέντο portland, θα πρέπει να ελέγχεται η επίδρασή τους στο χρόνο πήκτωματος και στο τελικό προϊόν

Το πυριτικό νάτριο δεν διαβρώνει τα μέταλλα. Αντιδραστήρια όπως τα αμίδια και τα υδατικά τους διαλύματα προσβάλλουν το χαλκό και τον ορείχαλκο, αλλά δεν είναι διαβρωτικά για το αλουμίνιο και τον ανοξείδωτο χάλυβα. Τα διαλύματα χλωριόντων δεν είναι διαβρωτικά για το σίδηρο και το χάλυβα με την έννοια που είναι τα οξέα, ωστόσο, αν ο χάλυβας σε διάλυμα χλωριόντων εκτεθεί στον αέρα, θα εμφανιστεί σκουριά στη συμβολή του υγρού με τον αέρα.

Το διττανθρακικό είναι μη διαβρωτικό

Γενικά, η αντοχή και η φέρουσα ικανότητα οποιουδήποτε κοκκώδους υλικού χονδρότερου από κόσκινο 75 μm μπορεί να βελτιωθεί όταν επεξεργαστεί με πυριτικό ένεμα. Το Σχήμα 3.6 δίνει κάποιες γενικές οδηγίες σχετικά με τις αντοχές σε ανεμπόδιση θλίψη που μπορούν να αναμένονται από υλικά που έχουν αρμολογηθεί με πυριτικό νάτριο.

Αντοχές σε ανεμπόδιστη θλίψη διαφόρων υλικών επεξεργασμένων με πυριτικό ενέματα	
Υλικό	Αντοχή σε θλίψη, kPa, του υλικού μετά την αρμολόγηση
Πολύ χαλαρό κοκκώδες υλικό κορεσμένο με πυριτικό ενέματα, που σκληραίνει ξηρά	4,000-7,000
Πολύ χαλαρά κοκκώδη υλικά κορεσμένα με μια σιλικονούχα τσιμεντοκονίαμα cate, σκληρυμένο σε 80-100% σχετική υγρασία	2,800-3,500 700-2,800
Πολύ χαλαρά κοκκώδη υλικά εμποτισμένα με πυριτικό ενέματα, που σκληραίνουν κάτω από το νερό.	700-2,800
Μέσες συνθήκες πεδίου με μία ένεση (ατελής κορεσμός)	200-4,000
Συμπαγή, μεσαίου κόκκου κοκκώδη υλικά κορεσμένα με ένα πυριτικό ένεμα, υγρό υπέδαφος	

Σχήμα 3.6 Αντοχές σε ανεμπόδιστη θλίψη διαφόρων υλικών επεξεργασμένων με πυριτικά ενέματα

Η αντοχή ενός ενεματωμένου κοκκώδους υλικού είναι κυρίως συνάρτηση της συγκέντρωσης ενέματος και της σχετικής πυκνότητας του σχηματισμού. Σε ενεματωμένο χαλαρό υλικό, η αντοχή διέπεται από το πήκτωμα και τροποποιείται ελάχιστα από το ίδιο το υλικό. Η γωνία εσωτερικής τριβής μπορεί να αυξηθεί από εκείνη της μη σταθεροποιημένης κατάστασης. Για πυκνό, συμπυκνωμένο ενέσιμο υλικό, η αντοχή διέπεται κυρίως από το υλικό.

Οι δοκιμές δείχνουν ότι τα τσιμεντοκονιάματα με 40 % και ισχυρότερο πυριτικό υλικό έχουν υψηλή αντοχή και είναι μόνιμα, με εξαίρεση τα κονιάματα που περιέχουν διττανθρακικά άλατα. Οι δοκιμές και οι παρατηρήσεις έδειξαν ότι τα πυριτικά ενέματα είναι μόνιμα σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης, διαστατικά σταθερά στη θερμοκρασία και ανθεκτικά στην οξύτητα, την αλκαλικότητα, την αλατότητα, τα βακτήρια και τους μύκητες. Τα κοκκώδη υλικά

ή τα πετρώματα που είναι πλήρως κορεσμένα με κονίαμα είναι ουσιαστικά αδιαπέραστα εάν δεν επιτραπεί στην γέλη να στεγνώσει και να συρρικνωθεί.

Συμβατότητα τσιμέντου Πόρτλαντ με πυριτικό νάτριο. Το τσιμέντο Πόρτλαντ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πληρωτικό σε πυριτικά ενέματα, αλλά δρα ως επιταχυντής. Έχουν παρατηρηθεί εξαιρετικά σύντομοι χρόνοι ζελατινοποίησης όταν χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο πόρτλαντ, γεγονός που καθιστά το σύστημα αυτό πολύ χρήσιμο για την αποκοπή νερού που ρέει ή νερού υπό πίεση. Έχουν αναφερθεί ισχυρές ιδιότητες συγκόλλησης με τα επιτόπου υλικά όταν τα πυριτικά συνδυάστηκαν με τσιμέντο πόρτλαντ. Αυτό το σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί σε ενέσεις κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και παράγει ένα υψηλής αντοχής, μόνιμο ένεμα εάν δεν αφεθεί να στεγνώσει. Έχουν αναφερθεί χρόνοι ζελατινοποίησης ή πήξης από 10 έως περίπου 600 δευτερόλεπτα με αντοχές που φτάνουν τα 7.000 kPa, με αυτούς τους σύντομους χρόνους ζελατινοποίησης να επιτυγχάνονται με την αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου. Τα λεπτοαλεσμένα τσιμέντα πόρτλαντ είναι συνήθως πιο χρήσιμα με πυριτικά νατρίου.

Το κονίαμα πυριτικού νατρίου μπορεί να εγχυθεί ευκολότερα από ένα κονίαμα πυριτικού πυριτίου-πορτλαντίου-τσιμέντου, το οποίο, με τη σειρά του, μπορεί να εγχυθεί ευκολότερα από τα μείγματα πορτλαντίου-τσιμέντου. Το κονίαμα με πυριτικό άλας-τσιμέντο μπορεί να εγχυθεί ευκολότερα από ό,τι τα μείγματα με τσιμέντο, προφανώς επειδή τα σωματίδια τσιμέντου λιπαίνονται από το πυριτικό άλας.

2.3.4 Ακρυλικά ενέματα

Οι ακρυλικές ενώσεις εισήχθησαν ως λιγότερο τοξικές εναλλακτικές λύσεις των τοξικών ενώσεων ακρυλαμιδίου που δεν διατίθενται πλέον ως ενέματα. Τα ακρυλικά ενέματα είναι μια γέλη που σχηματίζεται από τον πολυμερισμό ακρυλικών ενώσεων. Η αντίδραση πηκτωματοποίησης καταλύεται με την προσθήκη τριαιθανολαμίνης και υπερθειικού αμμωνίου ή νατρίου σε ένα ακρυλικό μέταλλο (συνήθως ακρυλικό μαγνήσιο). Το μεθυλενο-ακρυλαμίδιο χρησιμοποιείται ως παράγοντας διασταυρούμενης σύνδεσης. Το σιδηροκυανιούχο κάλιο χρησιμοποιείται ως αναστολέας εάν απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι πήξης.

Κύριες χρήσεις. Οι ακρυλικές ενώσεις έχουν αντικαταστήσει το ακρυλαμίδιο ως το συνηθισμένο ενέσιμο υλικό για τον σχηματισμό υδατοφραγμάτων γύρω από συστήματα αποχέτευσης. Το ακρυλικό υλικό δεν χρησιμοποιείται συνήθως σε περιοχές όπου υπόκειται σε διαβροχή και ξήρανση ή σε ψύξη και απόψυξη.

Αντοχή και διαπερατότητα. Τα ακρυλικά σχηματίζουν συνήθως μαλακά πηκτώματα. Τυποποιημένα δείγματα άμμου που έχουν αρμολογηθεί με ακρυλικά μπορούν να αποκτήσουν αντοχές έως και 1,5 MPa. Τα ακρυλικά ενέματα μπορούν να παρασκευαστούν με ιξώδες τόσο χαμηλό όσο 1 cP. Το χαμηλό ιξώδες και η ικανότητα ανάπτυξης μεγάλων χρόνων πηκτώματος (έως 120 λεπτά) καθιστούν τα ακρυλικά ενέματα χρήσιμα σε λεπτόκοκκα ιζήματα.

Τροποποιημένα ακρυλικά ενέματα. Έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένα ακρυλικά ενέματα με τη χρήση ακρυλικού ενέματος σε μια τεχνική έγχυσης δύο τμημάτων με κάθε ενέσιμο διάλυμα ένα μονομερές (πυριτικό ή ακρυλικό, για παράδειγμα) και τον καταλύτη για το άλλο μονομερές. Αυτός ο τύπος ενέματος ειδικής εφαρμογής περιορίζεται στη χρήση σε θερμοκρασίες μεταξύ 5 και 30 °C.

2.3.5 Ουρεθάνες

Τα ενέματα ουρεθάνης διατίθενται σε διάφορες μορφές, αλλά όλα εξαρτώνται από αντιδράσεις που περιλαμβάνουν τη διασύνδεση των ισοκυανικών αλάτων για τη δημιουργία ενός ελαστικού πολυμερούς. Τα ενέματα πολυουρεθάνης ενός συστατικού είναι προπολυμερή που σχηματίζονται με μερική αντίδραση του ισοκυανικού με μια ένωση διασύνδεσης που παράγει ένα προπολυμερές με μη αντιδρώντες ισοκυανικές ομάδες. Τα ενέματα ενός μέρους αντιδρούν με νερό για να ολοκληρωθεί ο πολυμερισμός. Τα ενέματα τυπικά πηκτώνονται ή αφρίζουν ανάλογα με τη διαθέσιμη ποσότητα νερού. Το ιξώδες κυμαίνεται από 50 έως 100 cP. Τα ενέματα δύο συστατικών χρησιμοποιούν μια άμεση αντίδραση μεταξύ ενός ισοκυανικού υγρού και μιας πολυόλης και παράγουν σκληρό ή εύκαμπτο αφρό ανάλογα με τη σύνθεση. Το ιξώδες κυμαίνεται από 100 έως 1.000 cP. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εφαρμογή των ουρεθανών περιλαμβάνουν τα εξής:

Τοξικότητα. Οι ισοκυανικές ενώσεις είναι συνήθως τοξικές σε διάφορους βαθμούς ανάλογα με την ακριβή σύνθεση. Οι διαλύτες που χρησιμοποιούνται για την αραιώση και τον έλεγχο του ιξώδους των προπολυμερών ουρεθάνης είναι επίσης πιθανοί ρυπαντές των υπόγειων υδάτων. Υπάρχουν πρόσθετα προβλήματα ασφάλειας που σχετίζονται με τα προϊόντα καύσης που παράγονται εάν τα ενέματα εκτεθούν σε φλόγα. Ορισμένα ενέματα είναι εξαιρετικά εύφλεκτα πριν και μετά την πήξη.

Προσαρμοστικότητα. Τα ενέματα ουρεθάνης παρέχουν πολύ ευέλικτα υλικά. Μπορούν να εγχυθούν απευθείας σε ρέον νερό ως υδατοφράκτης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη στεγανοποίηση ανοιγμάτων τόσο μικρών όσο 0,01 mm. Οι άκαμπτοι αφροί έχουν βρει εφαρμογές στη διανομή φορτίων σε υπόγειες κατασκευές.

2.3.6 Λιγνίνες

Όταν συνδυάζεται με ένα οξειδωτικό όπως το διχρωμικό νάτριο, η λιγνίνη, ένα υποπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής χαρτιού με θειώδη, σχηματίζει ένα αδιάλυτο πήκτωμα μετά από σύντομο χρονικό διάστημα. Το ιξώδες των διαφόρων διαλυμάτων λιγνίνης μπορεί να επιτευχθεί σε ένα εύρος που καθιστά τις λιγνίνες ικανές να εγχυθούν σε κενά που σχηματίζονται από λεπτή άμμο και ενδεχομένως χονδροειδή ιλύ. Οι λιγνίνες δεν είναι γενικά αποδεκτές εάν χρησιμοποιούνται ενώσεις χρωμίου λόγω της τοξικότητας του χρωμίου.

Τύποι ενέσεων με βάση τη λιγνίνη. Τα ενέματα με βάση τη λιγνίνη εγχέονται ως σύστημα ενός διαλύματος και ενός συστατικού, με το αντιδρών ή τα αντιδρώντα να έχουν αναμιχθεί εκ των προτέρων στο υλικό με βάση τη λιγνίνη. Οι χρόνοι γέλης με το προκαταλυμένο σύστημα λιγνοσουλφονικού άλατος ρυθμίζονται εύκολα με την αλλαγή της ποσότητας του νερού. Αυτό το προκαταλυμένο λιγνοσουλφονικό αναφέρεται ότι είναι μια αποξηραμένη μορφή χρωμολιγνίνης.

Στο εμπόριο διατίθενται επίσης συστήματα λιγνοσουλφονικών δύο συστατικών. Τα αντιδρώντα αυτού του συστήματος αναμιγνύονται χωριστά όπως και με ένα σύστημα αναλογίας και το συνολικό χημικό ένεμα δεν σχηματίζεται παρά μόνο αμέσως πριν από την έγχυση. Τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι ο στενότερος έλεγχος του χρόνου πήξης και ένα ευρύτερο φάσμα χρόνων πήξης σε συνδυασμό με την εξάλειψη του κινδύνου πρόωρης πήξης.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα ενέματα λιγνίνης διαλύονται γρήγορα στο νερό, αν και συνιστάται μηχανική ανάδευση. Η γέλη λιγνίνης σε κανονικές συγκεντρώσεις ενέματος είναι μη αναστρέψιμη, έχει ελαφρώς ελαστική σύσταση και χαμηλή διαπερατότητα στο νερό. Οι βραχυπρόθεσμες παρατηρήσεις (λιγότερο από 2 χρόνια) δείχνουν ότι για υλικά με ενέματα που προστατεύονται από την ξήρανση ή το πάγωμα, τα ενέματα δεν αλλοιώνονται.

Χρήσεις. Το ενέματα λιγνίνης προορίζονται κυρίως για χρήση σε λεπτόκοκκο υλικό για τη μείωση της ροής του νερού στο εσωτερικό του υλικού ή για την αύξηση της φέρουσας ικανότητάς του. Αυτά τα ενέματα έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τη σφράγιση λεπτών ρωγμών σε θραυσμένα πετρώματα ή σκυρόδεμα. Η χρήση τους σε εδάφη που περιέχουν αξιόλογη ποσότητα υλικού λεπτότερου από το κόσκινο των 75 μm είναι γενικά μη ικανοποιητική και δεν συνιστάται, επειδή το τόσο λεπτό υλικό δεν επιτρέπει ικανοποιητική διείσδυση. Ωστόσο, τα ενέματα λιγνίνης χαμηλού ιξώδους που εγχέονται σε μέτρια υψηλές πιέσεις μπορεί να είναι αποτελεσματικά σε λεπτόκοκκα υλικά.

Αντιδρώντα. Διάφορα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται με ενέματα με βάση τη λιγνίνη περιλαμβάνουν διχρωμικό νάτριο, διχρωμικό κάλιο, χλωριούχο σίδηρο, θειικό οξύ, θειικό αργίλιο (στυπτηρία), χλωριούχο αργίλιο, υπερθειικό αμμώνιο και θειικό χαλκό. Τα διχρωμικά άλατα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτερα και προφανώς είναι τα πιο ικανοποιητικά, αλλά τώρα θεωρούνται δυνητικός ρυπαντής του νερού των ενέσεων.

Το υπερθειικό αμμώνιο έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως αντιδραστήριο στο σύστημα lignin-grout, αλλά η τελική αντοχή είναι περίπου 40 τοις εκατό εκείνης ενός παρόμοιου μίγματος ενέματος στο οποίο χρησιμοποιείται διχρωμικό νάτριο ως αντιδραστήριο.

2.3.7 Ρητίνες

Τα κονιάματα ρητίνης αποτελούνται ουσιαστικά από διαλύματα χημικών ουσιών που σχηματίζουν ρητίνη και συνδυάζονται για να σχηματίσουν μια σκληρή ρητίνη μετά την προσθήκη καταλύτη ή σκληρυντή. Ορισμένα τσιμεντοκονιάματα ρητίνης έχουν βάση το νερό ή είναι διαλύματα με νερό. Η έγχυση γίνεται με τη διαδικασία ενός διαλύματος. Οι κύριες ρητίνες που χρησιμοποιούνται ως ενέματα είναι οι εποξειδικές και οι πολυεστερικές ρητίνες. Οι όροι εποξειδικές και πολυεστερικές ρητίνες αφορούν πολυάριθμες ενώσεις ρητίνης που έχουν κάποια ομοιότητα αλλά διαφορετικές ιδιότητες. Διατίθενται διάφοροι τύποι και οι ιδιότητες κάθε τύπου μπορούν να μεταβληθούν με την αλλαγή των συστατικών. Οι ρητίνες μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να έχουν χαμηλό ιξώδες, ωστόσο, τα ιξώδη είναι γενικά υψηλότερα από εκείνα άλλων χημικών ενέσεων. Οι ρητίνες εκλύουν γενικά μεγάλη ποσότητα θερμότητας κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης. Διατηρούν το αρχικό τους ιξώδες καθ' όλη τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους της ρευστής ζωής τους και περνούν από ένα στάδιο πηκτής λίγο πριν από την πλήρη σκλήρυνση. Ο χρόνος από την ανάμιξη μέχρι το στάδιο της γέλης και το στάδιο της σκλήρυνσης μπορεί να ρυθμιστεί με τη μεταβολή της ποσότητας του αντιδραστηρίου σκλήρυνσης, με την προσθήκη ή την αφαίρεση υλικού πλήρωσης και με τον έλεγχο της θερμοκρασίας, ιδίως της αρχικής θερμοκρασίας.

Εποξειδικές ουσίες. Τα εποξειδικά ενέματα παρέχονται γενικά σε δύο συστατικά. Κάθε συστατικό είναι μια οργανική χημική ουσία. Συνήθως, τα δύο συστατικά είναι μια βάση ρητίνης και ένας καταλύτης ή σκληρυντής μερικές φορές σε ένα από τα συστατικά ενσωματώνεται ένας ελαστικοποιητής για να αυξηθεί η ικανότητα του σκληρυμένου ενέματος να προσαρμόζεται στην κίνηση. Οι αντοχές εφελκυσμού κυμαίνονται γενικά σε επίπεδα άνω των 28 MPa τόσο στο γεμισμένο όσο και στο μη γεμισμένο σύστημα. Το γεμισμένο σύστημα είναι αυτό στο οποίο έχει προστεθεί ένα άλλο συστατικό, γενικά υλικό όπως η άμμος. Ένα μη γεμισμένο σύστημα αναφέρεται στο αρχικό μείγμα συστατικών. Η

επιμήκυνση μπορεί να είναι έως και 15 τοις εκατό. Η αντοχή σε κάμψη τόσο στα γεμισμένα όσο και στα μη γεμισμένα συστήματα υπερβαίνει γενικά τα 40 MPa, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αναφέρθηκαν σημαντικά υψηλότερες αντοχές στα γεμισμένα συστήματα. Αντοχές θλίψης μεγαλύτερες από 70 MPa είναι εφικτές και μπορεί να φθάσουν τα 270 MPa σε ένα γεμισμένο σύστημα. Η προσρόφηση νερού είναι περίπου 0,2 τοις εκατό ή λιγότερο και η συρρίκνωση, κατ' όγκο, είναι 0,01 τοις εκατό ή λιγότερο.

Οι εποξειδικές ρητίνες, γενικά, παρουσιάζουν επίσης τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: ικανότητα σκλήρυνσης χωρίς την εφαρμογή εξωτερικής θερμότητας, αποδοχή διαφόρων θιξοτροπικών ή πυκνωτικών μέσων, όπως ειδικές πυριτικές ύλες, μπεντονίτης, μαρμαρυγία και κοντές ίνες, όπως αμίαντος ή τεμαχισμένες ίνες γυαλιού, και δυνατότητα χρήσης σε συνδυασμό με διάφορα πληρωτικά για την απόδοση των επιθυμητών ιδιοτήτων τόσο σε σκληρυμένη όσο και σε μη σκληρυμένη κατάσταση.

Παραδείγματα εποξειδικών πληρωτικών υλικών είναι το πυριτικό αργίλιο, το θειικό βάριο, το ανθρακικό ασβέστιο, το θειικό ασβέστιο και ο άργιλος καολίνης, τα οποία δρουν ως διογκωτικά, ο γραφίτης, ο οποίος βοηθά στη λίπανση του μείγματος, και ο μόλυβδος για τη θωράκιση από την ακτινοβολία. Αυτά τα πληρωτικά προστίθενται γενικά για να μειωθεί η περιεκτικότητα σε ρητίνη και στις περισσότερες περιπτώσεις να μειωθεί το κόστος. Τα πληρωτικά υλικά μειώνουν την εξέλιξη της θερμότητας, μειώνουν τη συρρίκνωση σκλήρυνσης, μειώνουν τον θερμικό συντελεστή διαστολής και αυξάνουν το ιξώδες. Η αντοχή σε εφελκυσμό, η επιμήκυνση και η αντοχή σε θλίψη επηρεάζονται αρνητικά από την προσθήκη κοκκωδών πληρωτικών.

Σε γενικές γραμμές, οι εποξειδικές ρητίνες είναι ευκολότερες στη χρήση από τους πολυεστέρες, παρουσιάζουν μικρότερη συρρίκνωση, αναπτύσσουν στενότερο δεσμό και είναι πιο σκληρές και ισχυρότερες από τους πολυεστέρες. Οι εποξειδικές ρητίνες είναι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες ως εκ τούτου, αφού σκληρυνθούν, δεν υγροποιούνται ξανά ακόμη και όταν θερμανθούν, αν και μπορεί να μαλακώσουν.

Τα ενέματα εποξειδικής ρητίνης έχουν χρησιμοποιηθεί για την αρμολόγηση ρηγματωμένου σκυροδέματος για την εκτέλεση δομικών επισκευών πιο πρόσφατα, για την αρμολόγηση ρηγματωμένου βράχου για να του προσδώσουν αντοχή και για την κοχλίωση βράχων.

Άλλες ρητίνες. Υδατικά διαλύματα χημικών ουσιών που σχηματίζουν ρητίνη. Ένα εμπορικά διαθέσιμο ρητινώδες υλικό αρμολόγησης διερευνήθηκε για πιθανή χρήση σε αρμολόγηση σε ψαμμίτη για τη μείωση της ροής του νερού. Το διάλυμα ρητίνης έχει ιξώδες 13 φορές μεγαλύτερο από αυτό του νερού και είναι σκληροπηκτικό. Δύο υδατικά διαλύματα χημικών ουσιών που σχηματίζουν ρητίνη σε συνδυασμό με επιταχυντές και επιβραδυντές

χρησιμοποιούνται σε αυτόν τον αρμό. Τα δύο υλικά σχηματισμού ρητίνης στερεοποιούνται κατά την προσθήκη του καταλύτη για να σχηματιστεί ένα σκληρό πλαστικό. Έρευνες έχουν δείξει ότι ο χρόνος πήξης αυτού του ενέματος μπορεί να επιταχυνθεί από χημικές ουσίες στον ψαμμίτη. Δοκιμές πίεσης ροής νερού πριν και μετά την τσιμεντοποίηση έδειξαν ότι επήλθε μείωση της ροής μέσω δοκιμών.

Ρητίνη με βάση το νερό. Στο εμπόριο διατίθεται ένα υλικό αρμολόγησης με ρητίνη με βάση το νερό που έχει αρχικό ιξώδες περίπου 10 cP. Αυτό το ένεμα έχει συγγένεια με πυριτικές επιφάνειες και αποκτά σκληρή πήξη. Δοκιμές σε καθαρή, μέτριας λεπτότητας άμμο που αρμολογήθηκε με αυτή τη ρητίνη έδειξαν θλιπτικές αντοχές περίπου 8 MPa. Αυτό το ένεμα χρησιμοποιείται για την αρμολόγηση κοκκωδών υλικών, πιθανώς για τη μείωση της ροής του νερού. Αμμώδη εδάφη που περιέχουν έως και 15 τοις εκατό στην περιοχή της χονδροειδούς ιλύος (0,04 mm) μπορούν να επεξεργαστούν με αυτό το υλικό. Σε ασβεστολιθικά υλικά, αυτό το ένεμα δεν θα πήξει σωστά. Το ζελατινοποιημένο ένεμα δεν επηρεάζεται από χημικές ουσίες που υπάρχουν γενικά στο υπόγειο νερό. Η καθαρή ζελατίνα έχει αντοχή σε θλίψη 5,5 MPa σε 3 ώρες, έχει χαμηλή διαπερατότητα σε νερό, πετρέλαιο ή αέριο και είναι σταθερό σε συνθήκες μη αφυδάτωσης ωστόσο, όταν το νερό χάνεται, επέρχεται συρρίκνωση με συνοδευτική απώλεια αντοχής. Οι μεσαίου μεγέθους άμμοι (0,5 έως 0,1 mm) που εγγχόνται με αυτό το υλικό έχουν αντοχή σε θλίψη στην περιοχή των 10,3 MPa. Σε εργαστηριακές μελέτες, οι άμμοι που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με αυτό το υλικό δεν παρουσίασαν καμία αλλοίωση σε υγρές συνθήκες στο τέλος του 1 έτους.

Συμπυκνωμένη ρητίνη. Οι συμπυκνωμένες ρητίνες κυκλοφορούν στο εμπόριο και προορίζονται για χρήση όπου είναι απαραίτητη η αντοχή και η στεγανοποίηση. Αυτές οι ρητίνες χρησιμοποιούνται σε άμμο, χαλίκι και σε θραυσμένα και σχιστολιθικά πετρώματα. Κατά πάσα πιθανότητα, θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε θραυσμένο σκυρόδεμα. Εργαστηριακές δοκιμές με 50 και 80 τοις εκατό συγκέντρωση (50:50 και 80:20, κατ' όγκο, ρητίνη προς νερό) ρητίνης έδειξαν ότι μπορούν να αρμολογηθούν ρωγμές μεγέθους 0,05 mm. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν με την έγχυση ενέματος μεταξύ δύο μεταλλικών τεμαχίων που χωρίζονταν με παρεμβύσματα κατάλληλου μεγέθους. Απαιτήθηκαν περίπου 7 MPa για την έγχυση και των δύο συγκεντρώσεων στην απόσταση των 0,05 mm. Δοκιμές σε αποστάσεις μικρότερες από 0,05 mm δεν πραγματοποιήθηκαν. Το ιξώδες της συμπυκνωμένης ρητίνης κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 cP για τις συνήθεις συγκεντρώσεις που χρησιμοποιούνται και τις θερμοκρασίες που συναντώνται στο πεδίο. Το βασικό υλικό είναι υγρό αραιωμένο με νερό και αντιδρά με διάλυμα δισουλφικού νατρίου. Οι χρόνοι ζελατινοποίησης είναι ελεγχόμενοι και με κανονικές συγκεντρώσεις (50:50, κατ'

όγκο, ρητίνη προς νερό) επιτυγχάνουν σταθερή στερεοποίηση εντός 24 ωρών. Οι αντοχές της σταθεροποιημένης άμμου μετά τη σκλήρυνση έχουν φθάσει τα 3 έως 35 MPa. Η αντοχή είναι συνάρτηση της ποσότητας του νερού ανάμιξης που χρησιμοποιείται και μειώνεται με την αύξηση του νερού. Εάν η αντοχή δεν είναι σημαντικός παράγοντας, το υλικό βάσης μπορεί να αραιώνεται με έως και διπλάσιο όγκο νερού για προσωρινό έλεγχο του νερού. Εάν χρησιμοποιηθεί με αυτόν τον τρόπο, το ιξώδες θα είναι χαμηλότερο και οι χρόνοι γέλης μεγαλύτεροι. Τα εδάφη και οι βραχώδεις μάζες μπορούν να επιτύχουν διαπερατότητες της τάξης του 1×10^{-7} cm/sec. Ο χρόνος ζελατινοποίησης ποικίλλει ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του διαλύματος και της συγκέντρωσης του αντιδρώντος. Πρέπει να χρησιμοποιείται ανοξειδωτος χάλυβας σε όλη την πλευρά του αντιδρώντος, εάν χρησιμοποιείται το σύστημα προ μερισμού της άντλησης.

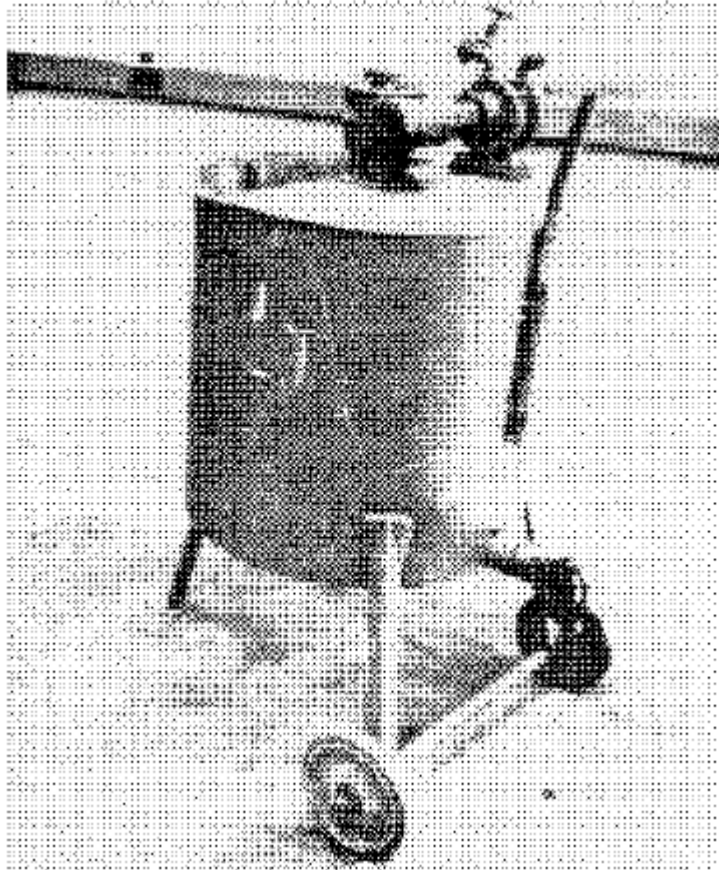
2.3.8 Άλλα ενέματα

Οι πέντε ομάδες χημικών κονιαμάτων που συζητήθηκαν προηγουμένως δεν είναι οι μόνες χημικές κονίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ορισμένα από τα άλλα χημικά ενέματα περιλαμβάνουν ένα γαλάκτωμα οργανικών ιόντων με χρήση ντίζελ ως φορέα, ένα σύστημα ρεζορκινόλης-φορμαλδεΐδης, ένα σύστημα εποξειδικής ασφάλτου, ένα σύστημα ουρίας-φορμαλδεΐδης και ένα σύστημα πολυφαινολικών πολυμερών. Τα περισσότερα από αυτά τα ενέματα δεν χρησιμοποιούνται πλέον λόγω τοξικότητας. Έχουν επίσης αναπτυχθεί διάφορα ενέματα ειδικών εφαρμογών για δομικές επισκευές και για την τοποθέτηση αγκυρίων. Σε αυτά περιλαμβάνονται θερμοσκληρυνόμενα ενέματα όπως το λιωμένο θείο και ο λιωμένος μόλυβδος. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί ειδικά εποξειδικά και ακρυλικά ενέματα ως κιτ αγκύρωσης κοχλιών και επιδιόρθωσης σκυροδέματος.

2.4 Εξοπλισμός και μέθοδοι χημικών ενέσεων

2.4.1 Εξοπλισμός ανάμιξης κονιαμάτων

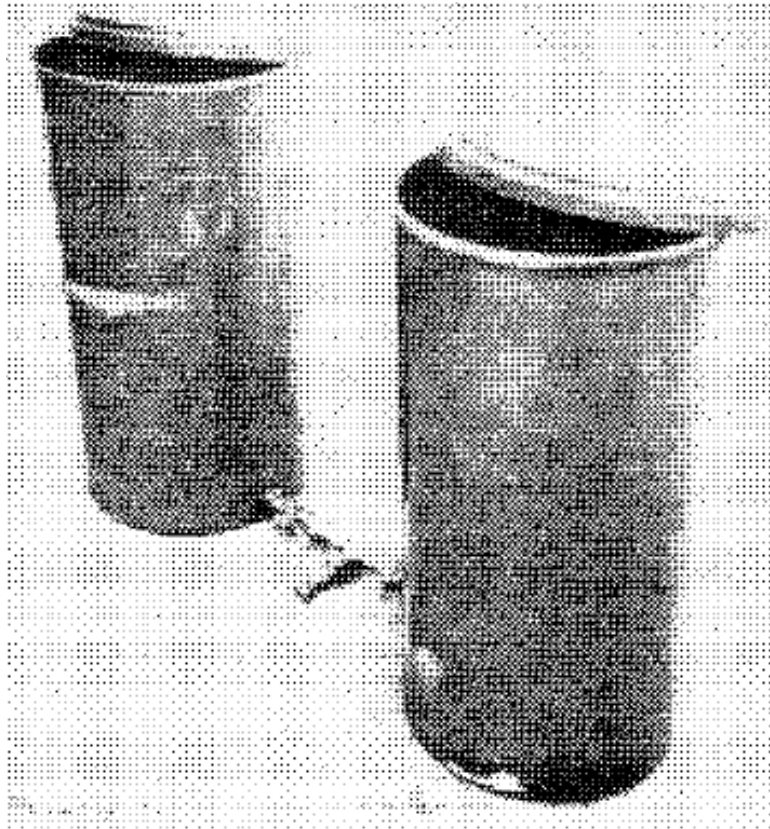
Δεξαμενές ανάμιξης και ανάμειξης. Οι δεξαμενές ανάμιξης και ανάμειξης (Σχήμα 4.1) για εργασίες χημικής κονίας πρέπει να κατασκευάζονται από υλικά που δεν αντιδρούν με το συγκεκριμένο χημικό ένεμα ή με τα διαλύματα των επιμέρους συστατικών. Οι δεξαμενές μπορούν να είναι από αλουμίνιο, ασάλι χωρίς λεκέδες, πλαστικό ή με πλαστική επιστρωση ανάλογα με την περίπτωση. Γενικά, η χωρητικότητα των δεξαμενών δεν χρειάζεται να είναι μεγάλη. Ο αριθμός και η διαμόρφωση των δεξαμενών εξαρτώνται από το χρησιμοποιούμενο σύστημα ανάμιξης και έγχυσης.



Σχήμα 4.1 Δεξαμενή ανάμιξης με μηχανική ανάμιξη

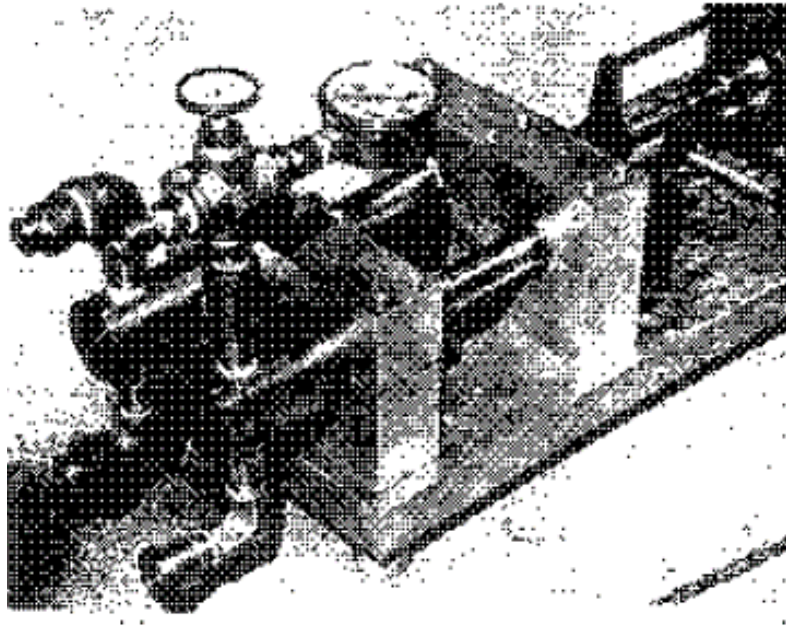
Σύστημα παρτίδων. Το απλούστερο σύστημα ανάμιξης ενέματος είναι το σύστημα παρτίδων που χρησιμοποιείται συνήθως στη συμβατική τσιμεντοποίηση με τσιμέντο. Στο σύστημα παρτίδας, όλα τα συστατικά, συμπεριλαμβανομένου του καταλύτη, αναμιγνύονται μαζί την ίδια στιγμή, γενικά σε μία μόνο δεξαμενή. Ενώ η μέθοδος αυτή επιτρέπει την απλότητα, το μειονέκτημα είναι ότι ο χρόνος άντλησης περιορίζεται στο χρόνο πήκτωματος- αν το ενέματα πήξει πριν ολοκληρωθεί η άντληση, οι αντλίες, οι σωλήνες και τα κανάλια ροής μπορεί να φράξουν.

Σύστημα δύο δεξαμενών. Μια πιο συμφέρουσα μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση δύο δεξαμενών, όπου η μία δεξαμενή περιέχει τον καταλύτη και η άλλη δεξαμενή περιέχει όλα τα άλλα συστατικά (Σχήμα 4.2). Σε αυτή τη μέθοδο, τα υλικά και από τις δύο δεξαμενές διοχετεύονται σε μια κοινή αντλία όπου ξεκινά η κατάλυση. Στη συνέχεια, το ένεμα διοχετεύεται μέσω ενός εύκαμπτου σωλήνα στο σημείο έγχυσης. Ο χρόνος άντλησης είναι ανεξάρτητος από το χρόνο πήκτης, ο οποίος δεν μπορεί να ξεκινήσει πριν αναμειχθούν όλα τα συστατικά.



Σχήμα 4.2 Διάταξη διπλής δεξαμενής ανάμιξης

Μέθοδος ίσου όγκου. Μια παραλλαγή της διαδικασίας των δύο δεξαμενών είναι η μέθοδος ίσου όγκου (Σχήμα 4.3). Στη μέθοδο αυτή, πανομοιότυπες αντλίες συνδέονται σε κάθε δεξαμενή και λειτουργούν από μια κοινή μονάδα κίνησης. Τα συστατικά σε κάθε δεξαμενή αναμιγνύονται σε διπλάσια συγκέντρωση από τη συγκέντρωση σχεδιασμού. Το σύστημα ίσου όγκου προσφέρει το πλεονέκτημα ότι δεν μπορούν να συμβούν λάθη στη ρύθμιση των δοσομετρικών αντλιών και ότι η συγκέντρωση των δύο συστατικών ενέματος μπορεί να προσαρμοστεί από τον κατασκευαστή.

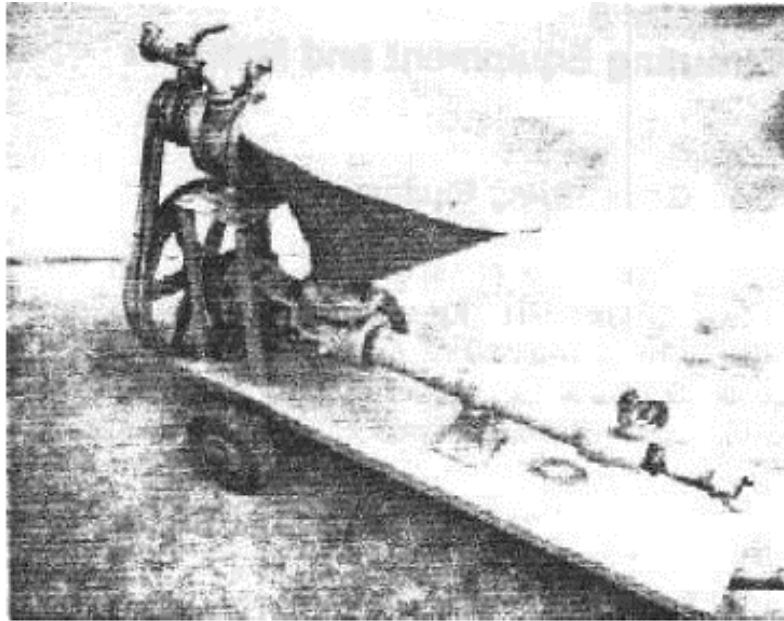


Σχήμα 4.3 Σύστημα ίσου όγκου

2.4.2 Εξοπλισμός άντλησης

Οι αντλίες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά για χημική τσιμεντενέσεις περιλαμβάνουν αντλίες θετικής εκτόπισης και εμβολοφόρες αντλίες.

Αντλίες θετικής εκτόπισης. Πιθανότατα η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη αντλία θετικής εκτόπισης είναι ο κοχλίας, στον οποίο ένας ρότορας από ανοξείδωτο χάλυβα περιστρέφεται μέσα σε έναν εύκαμπτο σάτη ανθεκτικό στη διάβρωση ή σε χημικά, σχηματίζοντας κενά που μεταφέρουν το υλικό προς το άκρο εκροής της αντλίας με σταθερό ρυθμό (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4 Βιδωτή αντλία θετικής εκτόπισης

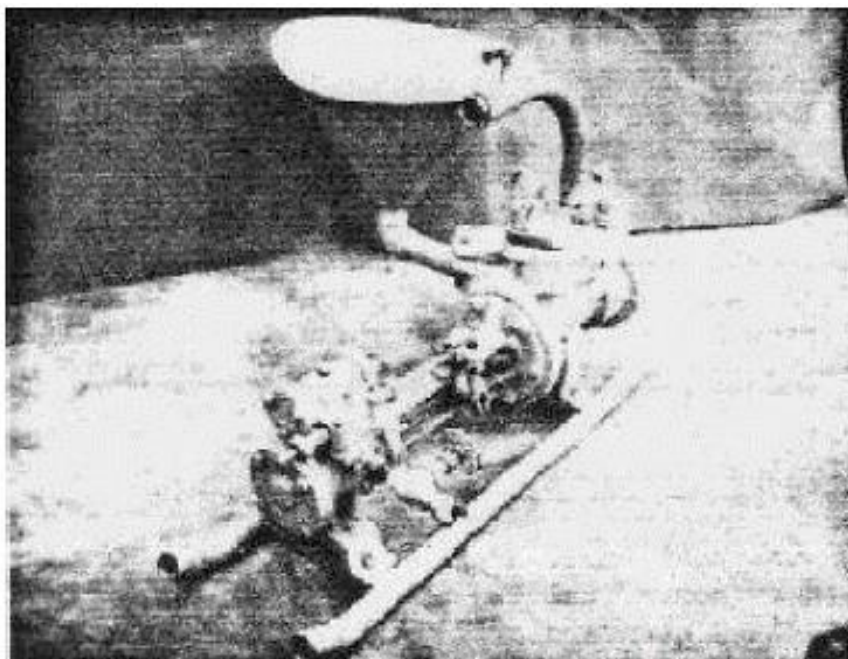
Μια διάταξη άντλησης που μπορεί να προσαρμοστεί σε χημικά ενέματα (και η οποία μπορεί να λειτουργήσει από έναν άνθρωπο) αποτελείται από διπλές αντλίες θετικής εκτόπισης τοποθετημένες σε ένα ενιαίο πλαίσιο. Οι αντλίες λειτουργούν από μία ενιαία μονάδα ισχύος-ωστόσο, η σχέση μετάδοσης της μίας αντλίας μπορεί να μεταβάλλεται, ενώ η άλλη αντλία έχει αμετάβλητη σχέση μετάδοσης. Η διάταξη αυτή επιτρέπει στο χειριστή να κάνει μια γρήγορη αλλαγή στην αναλογία του αντιδρώντος και στο χρόνο πηκτώματος αλλάζοντας τη σχέση μετάδοσης της αντλίας. Η αντλία με τη μεταβλητή σχέση μετάδοσης χρησιμοποιείται γενικά για την άντληση του συστατικού του ενέματος που ξεκινά την αντίδραση.

Οι αντλίες θετικής εκτόπισης παράγουν μικρότερο παλμό και έτσι είναι σε θέση να διατηρούν μια πιο ομοιόμορφη πίεση, ειδικά σε χαμηλές πιέσεις, από ό,τι οι εμβολοφόρες αντλίες.

Εμβολοφόρες αντλίες. Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται εμβολοφόρες αντλίες, υπάρχουν ορισμένα πλεονεκτήματα συγκεκριμένων ποικιλιών που πρέπει να αναγνωριστούν. Καλύτερος έλεγχος του όγκου και της πίεσης στις χαμηλότερες περιοχές μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αντλιών απλού τύπου. Η αντλία simplex (Σχήμα 3-5) λειτουργεί με το ένα έμβολο που ενεργοποιεί τέσσερις βαλβίδες υγρού και παράγει ροή που πάλλεται περισσότερο από ό,τι το διπλό. Το duplex λειτουργεί με δύο έμβολα και οκτώ βαλβίδες υγρού. Λόγω του μικρότερου μεγέθους τους, τα simplex είναι πιο κατάλληλα για χρήση σε σήραγγες και φρεάτια όπου ο χώρος αποτελεί πρόβλημα. Οι εμβολοφόρες αντλίες μπορούν συνήθως να αναπτύσσουν υψηλότερες πιέσεις από τις αντλίες θετικής εκτόπισης, όπως οι αντλίες προοδευτικής κοιλότητας. Οι εμβολοφόρες αντλίες μπορεί να απαιτούν περισσότερη λίπανση και προσοχή στη φθορά λόγω της επαφής μετάλλου με μέταλλο και των στενών

ανοχών που ενσωματώνονται σε αυτές τις μονάδες. Οι εμβολοφόρες αντλίες που αναπτύχθηκαν για σημειακά και άλλα υγρά υψηλού ιξώδους έχουν προσαρμοστεί για ενέματα. Αυτά τα σχέδια είναι συχνά χρήσιμα λόγω της ευκολίας αποσυναρμολόγησής τους για καθαρισμό.

Δεν υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά τον τύπο, το μέγεθος ή το στυλ της αντλίας που θα χρησιμοποιηθεί σε εργασίες χημικών ενέσεων ωστόσο, κατά την επιλογή της αντλίας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ορισμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Σε αυτά περιλαμβάνονται ο ρυθμός άντλησης, η χωρητικότητα ή το μέγεθος, η μάζα, οι μέγιστες και ελάχιστες απαιτήσεις πίεσης, οι περιορισμοί, η κινητικότητα, η συντήρηση και η διαθεσιμότητα ανταλλακτικών επισκευής και η αντοχή στην προσβολή από τα συστατικά των χημικών ενέσεων. Η ευκολία συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης κατά τη λειτουργία είναι πολύ σημαντική. Η χημική δράση σε ορισμένα χημικά ενέματα μπορεί να επιταχυνθεί ή ενδεχομένως να επιβραδυνθεί από την αντίδραση ορισμένων διαλυμάτων ενέματος με μέρη της αντλίας. Η πιθανότητα χημικής αντίδρασης μεταξύ του ενέματος και των μετάλλων και άλλων υλικών των αντλιών και η επίδρασή της στο ένεμα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή οποιασδήποτε συγκεκριμένης αντλίας. Λόγω των διαφορών στα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στις εμβολοφόρες αντλίες, είναι συνετό να συμβουλευέστε τον προμηθευτή της αντλίας όταν σχεδιάζεται μια εργασία ενέματος.



Εικόνα 3-5 Αντλία Simplex

Συχνά οι βαλβίδες και τα εξαρτήματα διαβρώνονται πιο εύκολα από τα έμβολα και τους κυλίνδρους. Οι λεπτομέρειες στην κατασκευή της αντλίας είναι σημαντικές.

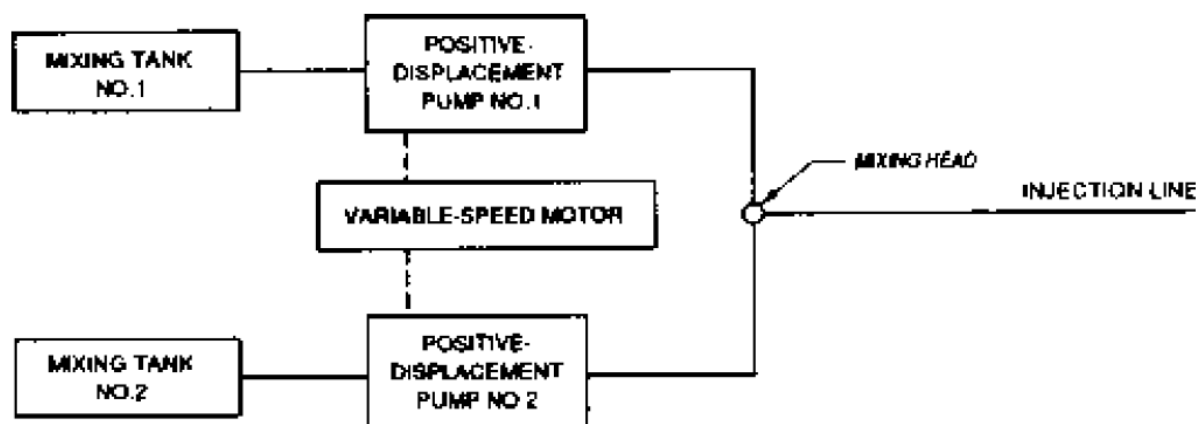
Πιέσεις έως και 70 MPa και υψηλότερες και όγκοι άντλησης που κυμαίνονται από κλάσματα του 1 λίτρου έως εκατοντάδες λίτρα ανά λεπτό μπορούν να επιτευχθούν με αντλίες που διατίθενται στο εμπόριο. Οι αντλίες μπορούν να λειτουργήσουν με αέρα, βενζίνη ή ηλεκτρισμό. Οι αναστρέψιμοι κινητήρες αέρα είναι χρήσιμοι για την απόφραξη βουλωμένων γραμμών, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται πληρωτικά υλικά στο ένεμα. Οι κινητήρες αέρα είναι επίσης ανθεκτικοί, είναι απλοί στη λειτουργία και έχουν χαμηλή σιλουέτα. Οι κινητήρες αέρα θα πρέπει να εξετάζονται για χρήση σε φρεάτια και σήραγγες από άποψη ασφάλειας. Γενικά, είναι μικρότεροι από τους βενζινοκινητήρες ή τους ηλεκτροκινητήρες που μπορούν να αποδώσουν ίση υποδύναμη.

Βοηθητικός εξοπλισμός. Ως επί το πλείστον, ο βοηθητικός εξοπλισμός για τις εργασίες χημικών ενέσεων, όπως οι σωλήνες, οι βαλβίδες, τα εξαρτήματα, οι σωληνώσεις, οι βαλβίδες εκτόνωσης, οι συλλέκτες και οι τυπικές ράβδοι γεωτρήσεων μπορεί να είναι ο ίδιος με εκείνον για τις εργασίες ενέσεων. Πιθανές εξαιρέσεις περιλαμβάνουν συνδέσεις μεταξύ αντλιών, δεξαμενών ανάμιξης και ανάμιξης και γραμμών ή σωληνών έγχυσης. Αυτές οι συνδέσεις θα πρέπει να είναι τύπου ταχείας απελευθέρωσης λόγω του γρήγορου χρόνου πήξης που μπορεί να επιτευχθεί με ορισμένα χημικά ενέματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να καταστεί αναγκαία η αποσύνδεση και αποσυναρμολόγηση του εξοπλισμού για τον καθαρισμό. Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η αντλία και ο βοηθητικός εξοπλισμός μπορεί να έχει επίδραση στο χρόνο ζελατινοποίησης.

2.4.3 Συστήματα άντλησης

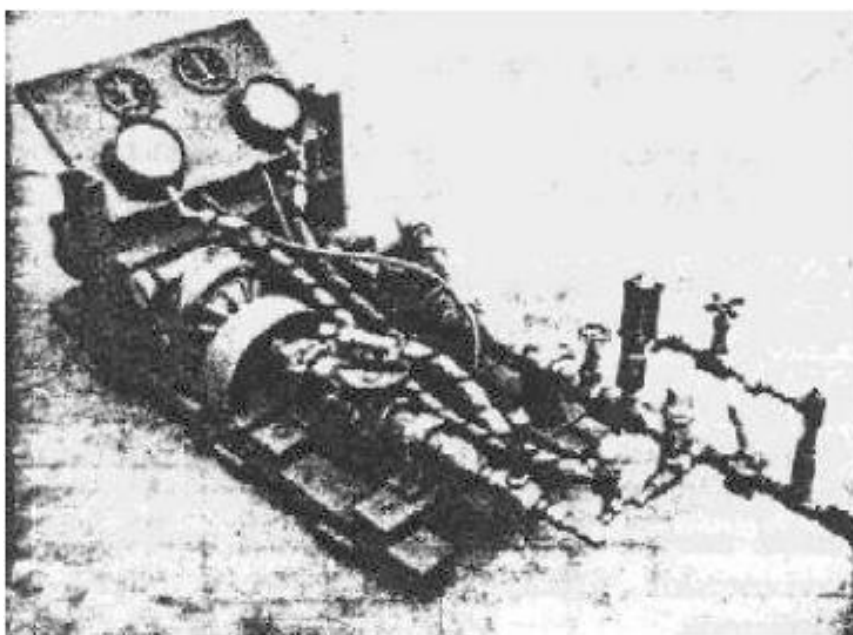
Τα συστήματα άντλησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ικανοποιητική έγχυση χημικού ενέματος παρατίθενται παρακάτω:

Σύστημα αντλίας μεταβλητού όγκου ή σύστημα αναλογίας. Το σύστημα αυτό (Σχήμα 4.6) χρησιμοποιείται για τη μεταβολή των χρόνων πηκτώματος, των ρυθμών άντλησης και των πιέσεων άντλησης και επιτρέπει σε έναν άνθρωπο να ελέγχει όλους αυτούς τους παράγοντες γρήγορα με μηχανικά μέσα. Η ανάγκη για ρύθμιση της σύνθεσης ή της συγκέντρωσης του διαλύματος εξαλείφεται κατά τη διάρκεια μιας εφαρμογής.



Σχήμα 4.6 Σύστημα αντλίας μεταβλητού όγκου ή σύστημα αναλογίας

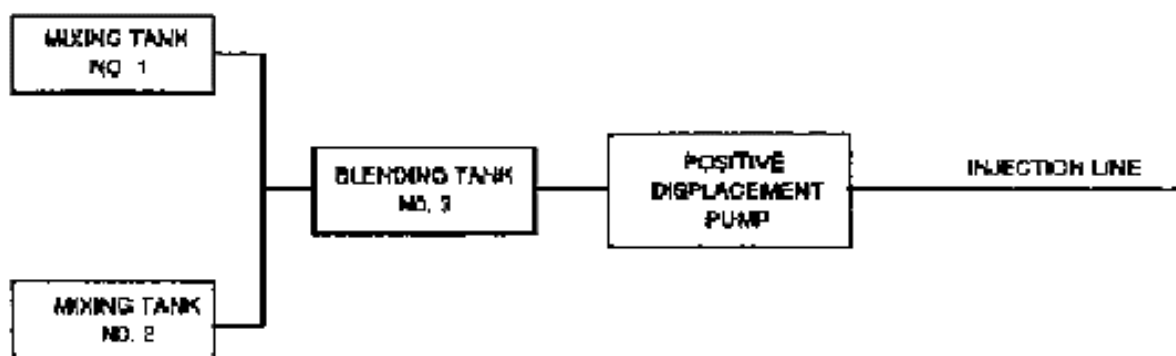
Με τη χρήση δύο κινητήρων μεταβλητού όγκου (Σχήμα 4.7), ο χρόνος πηκτώματος μπορεί να μεταβληθεί χωρίς να μεταβληθεί σημαντικά η βασική χημική συγκέντρωση του τελικού μείγματος και ο συνολικός όγκος που αντλείται μπορεί να μεταβληθεί χωρίς να μεταβληθεί ο χρόνος πηκτώματος. Μπορεί να είναι επιθυμητή η προσθήκη μιας τρίτης αντλίας ή μιας τρίτης αντλίας και δεξαμενής σε ένα σύστημα μέτρησης. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται μια πρώιμη έκδοση αυτού του τύπου μονάδας.



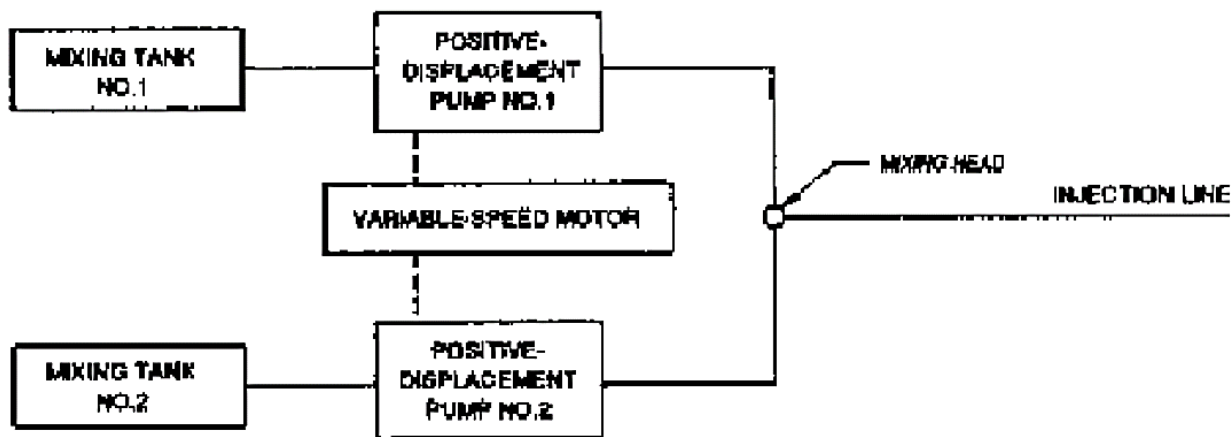
Σχήμα 4.7 Διάταξη αντλίας μεταβλητού όγκου

Σύστημα τροφοδοσίας με βαρύτητα δύο δεξαμενών. Αυτό το σύστημα (Σχήμα 4.8) επιτρέπει κανονικά μόνο έναν προκαθορισμένο χρόνο πήκτωματος. Οποιαδήποτε προσπάθεια αλλαγής του χρόνου πήκτωματος απαιτεί την προσθήκη προσεκτικά ζυγισμένων ποσοτήτων καταλυτών και επιταχυντών στις κατάλληλες δεξαμενές.

Οι δεξαμενές ανάμιξης πρέπει να έχουν το ίδιο μέγεθος και όγκο και η επιφάνεια των διαλυμάτων πρέπει να βρίσκεται στο ίδιο ύψος στις αντίστοιχες δεξαμενές. Από τις δύο δεξαμενές ανάμιξης αντλούνται ίσοι όγκοι διαλυμάτων στη δεξαμενή ανάμιξης, όπου αναμειγνύονται και τροφοδοτούνται στην αντλία. Το σύστημα αυτό μπορεί να τροποποιηθεί με τη χρήση δύο αντλιών ίσης δυναμικότητας που κινούνται από τον ίδιο κινητήρα (Σχήμα 4.9).



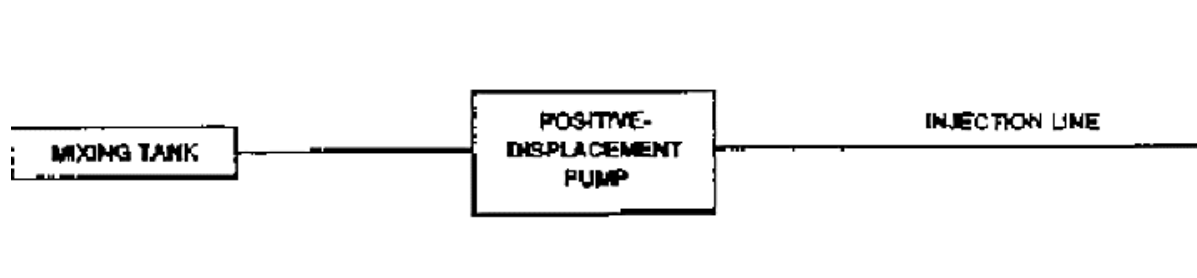
Σχήμα 4.8 Σύστημα τροφοδοσίας με βαρύτητα δύο δεξαμενών



Εικόνα 3-9 Σύστημα τροφοδοσίας με βαρύτητα δύο δεξαμενών (παραλλαγή)

Αυτό θα εξαλείψει τη χρήση δεξαμενής ανάμιξης. Με αυτό το σύστημα είναι δυνατοί σύντομοι χρόνοι πηκτώματος. Το μειονέκτημα του συστήματος είναι ότι απαιτείται εμπειρία για την επίτευξη ακριβών αλλαγών στο χρόνο πηκτώματος κατά τη διανομή από προαναμεμειγμένα διαλύματα.

Σύστημα παρτίδων. Σε αυτό το σύστημα, όλα τα υλικά αναμιγνύονται σε μία δεξαμενή (Εικόνα 4.10). Αυτό το σύστημα έχει τρεις βασικούς περιορισμούς:



Εικόνα 4.10 Σύστημα παρτίδων

- ✓ Ολόκληρη η παρτίδα πρέπει να τοποθετείται κατά τη διάρκεια του καθορισμένου χρόνου πηκτώματος- ωστόσο, επειδή οι ρυθμοί άντλησης συχνά μειώνονται καθώς συνεχίζεται η έγχυση, αυτό δεν είναι πάντα εφικτό και ο κίνδυνος πηκτώματος στον εξοπλισμό είναι πάντα παρών.
- ✓ Παρουσιάζεται δυσκολία στη διαφοροποίηση των χρόνων πηκτής κατά την άντληση.
- ✓ Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ σύντομοι χρόνοι πηκτώματος, εκτός εάν χρησιμοποιούνται μόνο μικρές παρτίδες.

Σύστημα τροφοδοσίας με βαρύτητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να είναι επιθυμητό να αντλήσετε ή να χύσετε το ένεμα στην επιθυμητή θέση και να αφήσετε το ένεμα να αναζητήσει το δικό του επίπεδο. Ο πιο οικονομικός τρόπος για να γίνει αυτό θα ήταν η εκροή απευθείας από τις μονάδες ανάμιξης ωστόσο, απαιτείται αντλία εάν η περιοχή που πρόκειται να αρμολογηθεί απέχει κάποια απόσταση από τη διάταξη ανάμιξης και η διάταξη ανάμιξης δεν μπορεί να μετακινηθεί.

2.4.4. Μέθοδοι Έγχυσης

Γενικά. Ο απώτερος στόχος της αρμολόγησης είναι η τοποθέτηση μιας συγκεκριμένης ποσότητας ενέματος σε κάποια προκαθορισμένη θέση. Η τοποθέτηση ενέματος στη γεώτρηση μπορεί να επιτευχθεί με διάφορα μέσα. Η απλούστερη περίπτωση ενέσεων είναι η άντληση ή η έγχυση του ενέματος απευθείας στην επιφάνεια ή σε μια ανοικτή οπή ή

ρωγμή. Η απλούστερη μέθοδος κατάδυσης με χρήση πίεσης για την τοποθέτηση περιλαμβάνει τη χρήση ενός πακτωτήρα για να αποτραπεί η επιστροφή του ενέματος στην οπή κατά την άντλησή του.

Packers. Η επιλεκτική ένεση κάτω από την οπή, για χρήση σε μια ικανή οπή, μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση δύο συσκευών συσκευασίας, μία πάνω και μία κάτω από την περιοχή που πρόκειται να υποστεί επεξεργασία, και στη συνέχεια την έγχυση του ενέματος. Μια άλλη μέθοδος επιλεκτικής τοποθέτησης ενέματος είναι η χρήση "σωλήνων με μανσέτες". Η μέθοδος αυτή συνεπάγεται τη χρήση ενός σωλήνα με λείο εσωτερικό που είναι διάτρητος ανά διαστήματα και σφραγίζεται μέσα στην οπή ενέματος. Οι οπές καλύπτονται από ελαστικά μανίκια, "manchettes", τα οποία λειτουργούν ως μονόδρομες βαλβίδες. Η επιλεκτική τοποθέτηση του ενέματος επιτυγχάνεται με μια διάταξη διπλού πακεταρίσματος που καλύπτει τις οπές.

Άλλες μέθοδοι. Άλλες μέθοδοι περιλαμβάνουν την οδήγηση ενός αυλακωτού ή διάτρητου σωλήνα σε έναν σχηματισμό, την τσιμεντοποίηση ή την οδήγηση ενός σωλήνα ανοικτού άκρου σε ένα επιθυμητό υψόμετρο και, στη συνέχεια, την τσιμεντοποίηση. Ο σωλήνας μπορεί να διατηρείται ανοικτός με προσωρινή απόφραξη του ανοικτού άκρου με πριτσίνια ή κοχλίες κατά τη διάρκεια της διάνοιξης.

Όταν επιτευχθεί η επιθυμητή ανύψωση, ο σωλήνας ανυψώνεται αρκετές ίντσες για να μπορέσει το πριτσίνι ή ο κοχλίας να ελευθερωθεί από το ανοικτό άκρο όταν ασκείται πίεση με ενέσεις. Ο σωλήνας μπορεί επίσης να αποσυνδεθεί με την τοποθέτηση μιας μικρότερης ράβδου μέσα στο σωλήνα έγχυσης μέχρι το συνολικό βάθος της οπής και λίγο παραπέρα. Η ράβδος αποσύρεται από τον σωλήνα και γίνεται έγχυση ενέματος. Μια άλλη μέθοδος, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη διαδικασία δύο διαλυμάτων, είναι να οδηγηθεί ένας διάτρητος σωλήνας σε ορισμένη απόσταση και να εγχυθεί το διάλυμα ενέματος. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί το συνολικό βάθος- στη συνέχεια, εγχέονται διαλύματα ενέματος των υπόλοιπων χημικών ουσιών για να ολοκληρωθούν οι αντιδράσεις σκλήρυνσης του ενέματος καθώς ο σωλήνας εξάγεται.

2.5 Σχεδιασμός

2.5.1 Ρυθμιστικές απαιτήσεις

Τα τελευταία 10 χρόνια, ένας αριθμός χημικών ενέσεων έχει αποσυρθεί από την αγορά λόγω προβλημάτων τοξικότητας. Για παράδειγμα, η χρήση ακρυλαμιδίων και παρόμοιων υλικών απαγορεύτηκε στην Ιαπωνία πριν από αρκετά χρόνια, αφού αναφέρθηκαν αρκετές

περιπτώσεις μόλυνσης φρεατίων πόσιμου νερού. Συνεπώς, πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις όταν υπάρχει η πιθανότητα να έρθουν σε επαφή χημικά ενέματα με πηγάδια ή υπόγεια ύδατα ή όταν η παρουσία ενός χημικού ενέματος θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα σε κάποιο μεταγενέστερο χρόνο. Ακόμη και φαινομενικά αβλαβή υλικά μπορεί να έχουν επιβλαβή αποτελέσματα, όπως να επηρεάσουν το pH των υπόγειων υδάτων. Είναι σημαντικό πριν από την έναρξη των εργασιών να εξακριβωθούν όλες οι πιθανές βλαβερές συνέπειες των χημικών ενέσεων. Επιπλέον, πρέπει να εξετάζονται διεξοδικά όλοι οι ισχύοντες νόμοι, κανονισμοί και περιορισμοί. Δεν πρέπει να εξετάζονται μόνο οι ομοσπονδιακοί νόμοι αλλά και οι νόμοι των πολιτειών, των πόλεων και άλλων κυβερνητικών φορέων.

2.5.2 Προκαταρκτικός σχεδιασμός

Ο σχεδιασμός ενός προγράμματος χημικών ενέσεων αποτελείται από διαδικασίες παρόμοιες με εκείνες για οποιαδήποτε άλλη εργασία ενέσεων. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει τον καθορισμό του σκοπού της ένεσης, την περιγραφή της εργασίας, τον προσδιορισμό των συνθηκών πεδίου, τη διενέργεια των απαραίτητων δειγματοληψιών και δοκιμών πεδίου, τη διενέργεια εργαστηριακού προγράμματος για την αποκάλυψη των χαρακτηριστικών του υλικού, και τον προσδιορισμό της καταλληλότητας των διαφόρων χημικών ενέσεων για την ικανοποιητική ολοκλήρωση της εργασίας. Αφού ολοκληρωθούν αυτά τα στοιχεία, μπορεί να καθοριστεί το προσωπικό, οι διαδικασίες πεδίου και ο απαιτούμενος εξοπλισμός.

Πληροφορίες για το ιστορικό. Για να προσδιοριστεί η σκοπιμότητα της χημικής ενέσεως απαιτούνται ορισμένες πληροφορίες. Αυτές περιλαμβάνουν:

- ❖ Περιγραφή του προβλήματος που αντιμετωπίζεται. Αυτό περιλαμβάνει ποσοτική εκτίμηση του βαθμού αντοχής που απαιτείται ή της ανάγκης μείωσης της ροής του νερού.
- ❖ Αποτελέσματα γεωτρήσεων και δειγματοληψιών στην περιοχή που πρόκειται να υποστεί επεξεργασία, οριοθέτηση από την άποψη των γεωλογικών στρωμάτων και του πάχους τους, καθώς και της έκτασης σε σχέση με τις επιφανειακές θέσεις και τη μεταβαλλόμενη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, ώστε να περιλαμβάνεται ο προσδιορισμός των υψομέτρων και των κλίσεων των υπόγειων υδάτων. Η γεώτρηση και η δειγματοληψία πραγματοποιούνται για να προσδιοριστεί η θέση και η φύση των ζωνών που ενδέχεται να απαιτούν πρόσθετη ένεση και για να καταστεί δυνατή μια προκαταρκτική εκτίμηση του τύπου ή των τύπων και των ποσοτήτων ενέσεων που απαιτούνται. Οι επιθυμητές πληροφορίες προσδιορίζονται με εργαστηριακές ή

επιτόπιες δοκιμές σε δείγματα που κρίνονται αντιπροσωπευτικά της ζώνης από την οποία ελήφθησαν.

- ❖ Δεδομένα σχετικά με τα χαρακτηριστικά του μέσου που πρόκειται να αρμολογηθεί, όπως το μέγεθος των σωματιδίων και η διαπερατότητα (Πίνακας 5.1).
- ❖ Χημική σύνθεση των υπόγειων υδάτων και του μέσου που πρόκειται να αρμολογηθεί.
- ❖ Προσδιορισμός της διαπερατότητας του εδάφους ή του πετρώματος επί τόπου. Θα πρέπει να είναι γνωστή η γενική γεωλογία της περιοχής, ειδικότερα, σε τεκτονισμένα πετρώματα, το μέγεθος, η διαμόρφωση και η θέση των ανοιγμάτων, οι επιστρώσεις στην επιφάνεια των ανοιγμάτων (που μπορεί να επηρεάσουν τη συγκόλληση), η ποσότητα του ελεύθερου νερού ή της υγρασίας που υπάρχει (που μπορεί επίσης να επηρεάσει τη συγκόλληση) και η αντοχή του μέσου που πρόκειται να αρμολογηθεί (που μπορεί να επηρεάσει τις χρησιμοποιούμενες πιέσεις αρμολόγησης).
- ❖ Πληροφορίες σχετικά με την αντοχή που μπορεί να αναπτυχθεί στην αρμολόγηση θραυσμένου πετρώματος ή σκυροδέματος για να διαπιστωθεί αν η χημική αρμολόγηση θα είναι μια ικανοποιητική προσέγγιση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να απαιτηθούν δοκιμές για να αποδειχθεί ότι μπορεί να αναπτυχθεί επαρκής αντοχή ώστε να δικαιολογείται η χρήση των ακριβότερων χημικών ενέσεων αντί του τσιμεντοκονιάματος. Τα ανοίγματα στο θραυσμένο μέσο πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλα και, ως επί το πλείστον, καλά συνδεδεμένα ώστε να επιτρέπουν την έγχυση του ενέματος. Η επιλογή ενός συγκεκριμένου συστήματος χημικής τσιμεντοκονίας απαιτεί συνήθως εργαστηριακές δοκιμές.
- ❖ Αξιολόγηση της τσιμεντοειδούς έναντι της χημικής αρμολόγησης (πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθενός για την περιοχή).

Παράγοντες που επηρεάζουν τις εργασίες αρμολόγησης. Ορισμένοι παράγοντες επηρεάζουν τις εργασίες ενέσεων και τα δεδομένα σχετικά με τους παράγοντες αυτούς θα πρέπει να λαμβάνονται ως εξής:

- ❖ Φυσικά χαρακτηριστικά του μέσου που πρόκειται να αρμολογηθεί.
- ❖ Θερμοκρασία, τόσο του περιβάλλοντος όσο και της περιοχής που πρόκειται να αρμολογηθεί.
- ❖ Φυσικές και χημικές ιδιότητες των διαλυμάτων ενέματος.
- ❖ Συμβατότητα των ιδιοτήτων των χημικών ενέσεων με το φυσικό, χημικό, βιολογικό και ρυθμιστικό περιβάλλον της περιοχής.
- ❖ Μέγεθος και απόσταση οπών ενέματος.

- ❖ Μέθοδοι διάτρησης και καθαρισμού.
- ❖ Μέθοδοι εφαρμογής ενέματος.

Προσεγγιστικές ιδιότητες του εδάφους

Εδάφη ¹	Μέγεθος κόκκων, mm, περίπου	Διαπερατότητα cm/sec	Αναλο για κενού ²	Πορώδες ³
Χαλίκι και χοντρή άμμος	0,5 και άνω	10 ⁻¹ και άνω	0.6-0.8	0.375-0.45
Μέτρια και λεπτή άμμος	0,1 έως 0,5	10 ⁻¹ έως 10 ⁻³	0.6-0.8	0.375-0.45
Πολύ λεπτή άμμος και χοντρή ιλύς	0,05 έως 0,1	10 ⁻³ έως 10 ⁻⁵	0.6-0.9	0.375-0.5
Χονδρή και λεπτή ιλύς	0,05 και λιγότερο	10 ⁻⁵ έως 10 ⁻⁷	0,6 επάνω	0,375 επάνω

¹ Πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με άλλα μέσα δίνονται στην παράγραφο 4-3α.

² Ο όγκος των κενών μιας εδαφικής μάζας διαφρούμενος με τον όγκο των στερεών.

³ Ο όγκος των κενών δια του συνολικού όγκου.

Πίνακας 5.1 Προσεγγιστικές ιδιότητες του εδάφους

Η χημεία του προς αρμολόγηση μέσου, του μίγματος και των υπόγειων υδάτων επηρεάζει πιθανώς τη χημική αρμολόγηση περισσότερο από οποιονδήποτε άλλο παράγοντα. Θα πρέπει να γίνονται χημικές και φυσικές αναλύσεις του υλικού που πρόκειται να αρμολογηθεί και του νερού του μίγματος και των υπόγειων υδάτων πριν από την αρμολόγηση στο πεδίο. Οι δοκιμές του νερού του μίγματος θα υποδεικνύουν την καταλληλότητά του για το συγκεκριμένο σύστημα που χρησιμοποιείται (π.χ. επίδραση στο χρόνο πήξης, την αντοχή κ.λπ.) οι δοκιμές του υπόγειου νερού θα υποδείξουν την επίδρασή του στα ενέματα μετά την έγχυση. Τα περισσότερα χημικά ενέματα μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις, εάν είναι γνωστή η σύνθεση και οι κατά προσέγγιση ποσότητες των χημικών ουσιών στο μέσο και στο νερό.

Μεταξύ των ιδιοτήτων των χημικών διαλυμάτων ενέματος που επηρεάζουν ουσιαστικά την έγχυση είναι το αρχικό ιξώδες και το ιξώδες καθ' όλη τη διάρκεια της έγχυσης- ωστόσο, η απόδοση, και όχι το ιξώδες, θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως το τελικό κριτήριο για την επιλογή ενός ενέματος έναντι του άλλου.

Η μέθοδος διάτρησης είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την έγχυση ενέματος. Η γεώτρηση με κυκλοφορία νερού στην οπή θα απομακρύνει τα κοπίδια από την οπή και θα διατηρήσει τα τοιχώματα της οπής καθαρά από τα κοπίδια που διαφορετικά θα δημιουργούσαν αποφράξεις κατά τη διάρκεια των ενέσεων. Οι καθαρές οπές διάτρησης είναι απαραίτητες σε πετρώματα με ενέματα.

Πρόσθετες πληροφορίες. Οι πληροφορίες που μπορεί να είναι χρήσιμες για το σχεδιασμό και την εκτέλεση εργασιών χημικών ενέσεων περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- ✓ Στα ξηρά κοκκώδη υλικά, οι βαρυτικές και οι κεφαλικές δυνάμεις δρουν για να διασκορπίσουν το ενέσιμο ένεμα και η έκταση αυτής της διασποράς μπορεί να είναι επαρκής για να καταστήσει το πήκτωμα αναποτελεσματικό. Απαιτούνται εκσκαφές σε περιοχές δοκιμών.
- ✓ Τα κοκκώδη υλικά κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα μπορούν πιθανώς να σταθεροποιηθούν πιο αποτελεσματικά από μια ξηρή μάζα.
- ✓ Η μείωση της διαπερατότητας του βραχώδους εδάφους μετά τη σταθεροποίηση εξαρτάται από την αντίσταση του ζελατινοποιημένου ενέματος στην εξώθηση από τους πόρους της μάζας. Εάν η διαπερατότητα σε μια κοκκώδη μάζα είναι αξιοσημείωτη, η γέλη δεν μπορεί να εξωθείται από τους πόρους σε πιέσεις μικρότερες από τις πιέσεις άντλησης που απαιτούνται για την τοποθέτηση των διαλυμάτων- η πίεση άντλησης πρέπει πάντα να υπερβαίνει το στατικό ύψος νερού στο σημείο τοποθέτησης.
- ✓ Τα υπόγεια ύδατα θα εκτοπίσουν το κονίαμα προς την κατεύθυνση της ροής. Σε ομοιόμορφους σχηματισμούς λεπτόκοκκων υλικών, ο ρυθμός ροής του υπόγειου νερού είναι γενικά τόσο μικρός ώστε οι επιπτώσεις του θα είναι αμελητέες για τις περισσότερες τιμές έγχυσης. Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σύντομοι χρόνοι πήκτωματος, για παράδειγμα, σε μέσης και χονδρόκοκκης μορφής άμμους όπου υπάρχει ή πιθανολογείται ότι υπάρχει αξιόλογη ροή υπόγειων υδάτων. Όπου ο ρυθμός ροής του υπόγειου νερού είναι αισθητός, θα πρέπει να χρησιμοποιείται όσο το δυνατόν μικρότερος χρόνος πήκτης με όσο το δυνατόν υψηλότερο ρυθμό άντλησης που να συνάδει με τους περιορισμούς πίεσης. Οι πιθανότητες επιτυχημένης εργασίας μειώνονται εάν ο ρυθμός ροής των υπόγειων υδάτων υπερβαίνει τον ρυθμό με τον οποίο μπορεί να τοποθετηθεί το ένεμα.

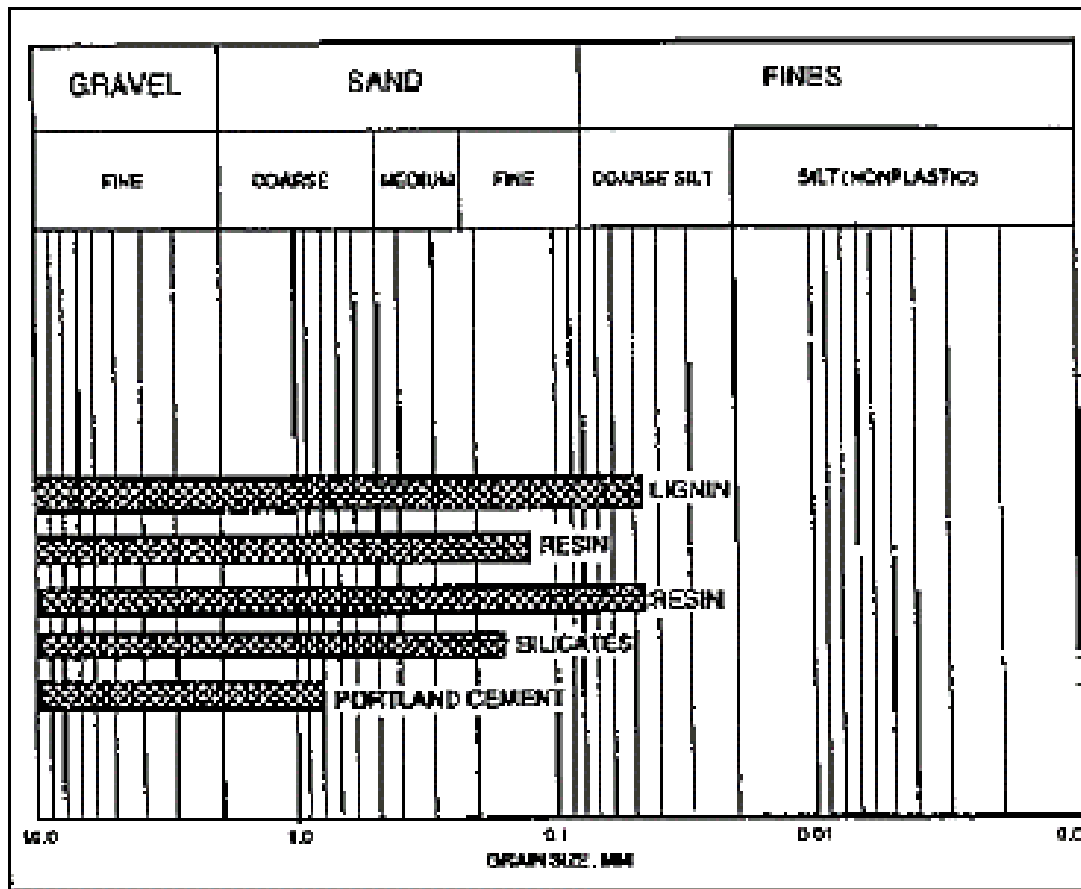
2.5.3 Εργαστηριακές δοκιμές

Οι εργαστηριακές δοκιμές θα πρέπει να διεξάγονται πριν από την έναρξη οποιασδήποτε εργασίας πεδίου, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών μικρής κλίμακας στο πεδίο. Αυτό θα εξαλείψει τις καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση της εργασίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να είναι σκόπιμο να διεξαχθούν ορισμένες δοκιμές που δεν υπαγορεύονται απαραίτητα από το άμεσο πρόβλημα, σε περίπτωση που προκύψουν ασυνήθιστες καταστάσεις. Οι εργαστηριακές δοκιμές περιλαμβάνουν εκείνες για την αντοχή σε θλίψη, τη διαπερατότητα και το χρόνο πήξης.

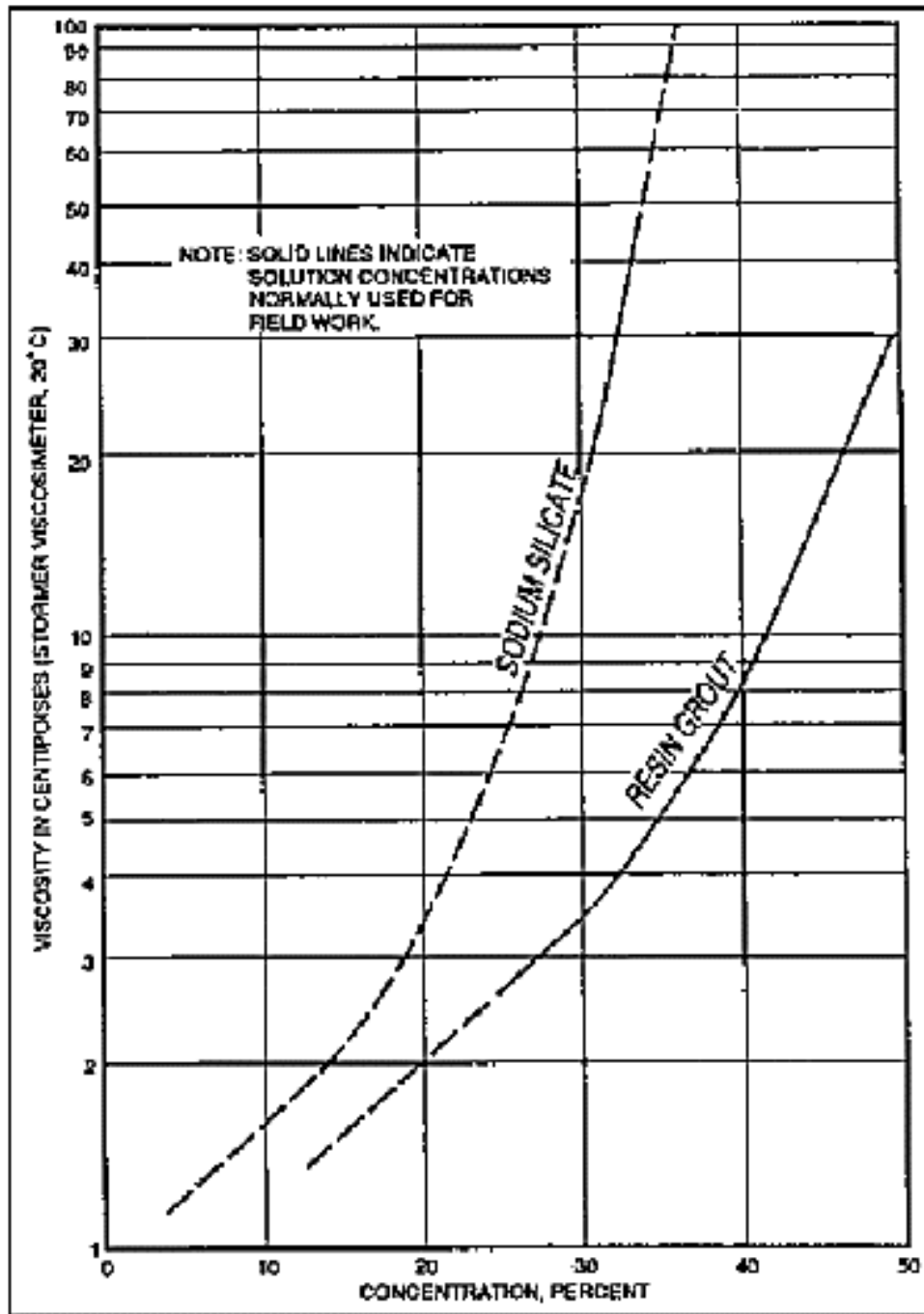
Επιλογή χημικού ενέματος. Κατά την επιλογή ενός χημικού ενέματος, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα χημικά ενέματα είναι γενικά ακριβότερα από τα ενέματα τσιμέντου- ωστόσο, ορισμένα από αυτά θα αναπτύξουν μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό, καλύτερη συγκόλληση και υψηλότερη αντοχή σε θλίψη, ανάλογα με το μέσο που αρμολογείται. Τα χημικά ενέματα έχουν γενικά την ικανότητα να διεισδύουν σε μικρότερα ανοίγματα από τα τσιμεντοειδή ενέματα ωστόσο, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή λόγω του κόστους. Θα πρέπει να εξετάζεται το ενδεχόμενο να εκτελείται η αρμολόγηση με συνδυασμό εναλλασσόμενων ή ταυτόχρονων τσιμεντοειδών και χημικών αρμολογήσεων, αν είναι δυνατόν, για λόγους οικονομίας. Επίσης, από την άποψη της οικονομίας, θα πρέπει να χρησιμοποιείται τσιμεντοειδή ενέματα αντί για χημικά ενέματα, όπου είναι δυνατόν.

Οι φυσικές ιδιότητες του μέσου που πρόκειται να αρμολογηθεί πρέπει, σε ορισμένες περιπτώσεις, να είναι γνωστές και να ταιριάζουν όσο το δυνατόν καλύτερα. Για παράδειγμα, ορισμένα χημικά ενέματα συγκολλούνται ελάχιστα σε υγρές ή βρεγμένες επιφάνειες. Ο δεσμός σε υγρές ή υγρές επιφάνειες δεν θα είναι πιθανώς μεγαλύτερος από τον δεσμό μέσω της ενέσιμης μάζας και πιθανώς θα είναι ασθενέστερος λόγω της αραίωσης του χημικού ενέματος στη διεπιφάνεια ή της ασυμβατότητας του ενέματος με την υγρασία.

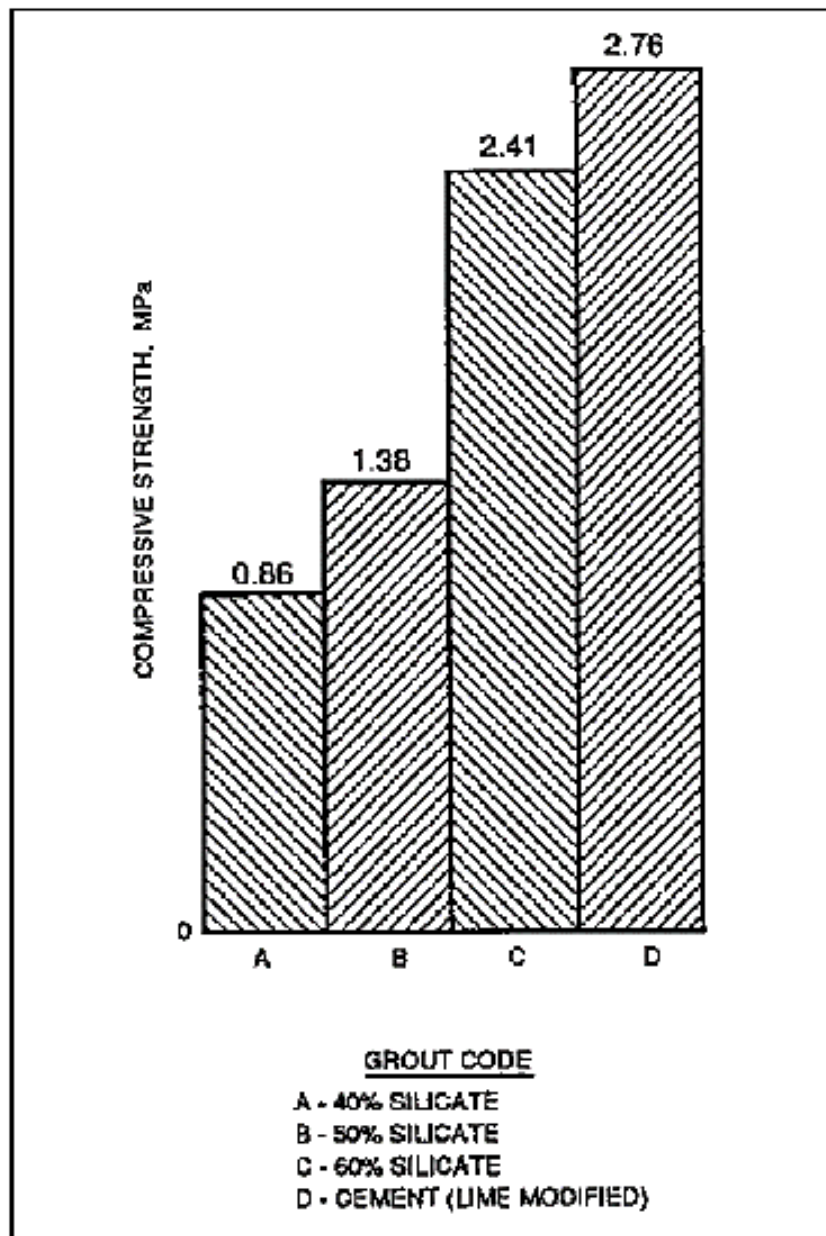
Ρωγμές σε σκυρόδεμα με άνοιγμα μόλις 0,05 mm έχουν αρμολογηθεί με χημικά ενέματα, ενώ τα ενέματα με τσιμέντο portland συνήθως περιορίζονται στη χρήση σε ανοίγματα 1,5 mm ή μεγαλύτερα. Ρωγμές τόσο μικρές όσο 0,7 mm έχουν επίσης αναφερθεί ότι έχουν αρμολογηθεί με ένα καθαρό τσιμεντοκονίαμα πορτλάνης-τσιμέντου. Έχει αναφερθεί ότι το κατώτατο όριο διεισδυτικότητας για το καθαρό τσιμεντοκονίαμα λιθάνθρακα δεν είναι λεπτότερο από το κόσκινο των 600 μm. Τα σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4 παρουσιάζουν συγκρίσεις των τύπων ενέματος όσον αφορά τα χαρακτηριστικά διείσδυσης, ένα ιξώδες-ποσοστό συγκέντρωσης σχέση, σύγκριση των αντοχών σε θλίψη και των φυσικών ιδιοτήτων των χημικών ενέσεων, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2 Σύγκριση μεθόδων σταθεροποίησης εδαφών και σχετική ικανότητα διείσδυσης



Σχήμα 5.3 Ιξώδες διαφόρων κονιαμάτων



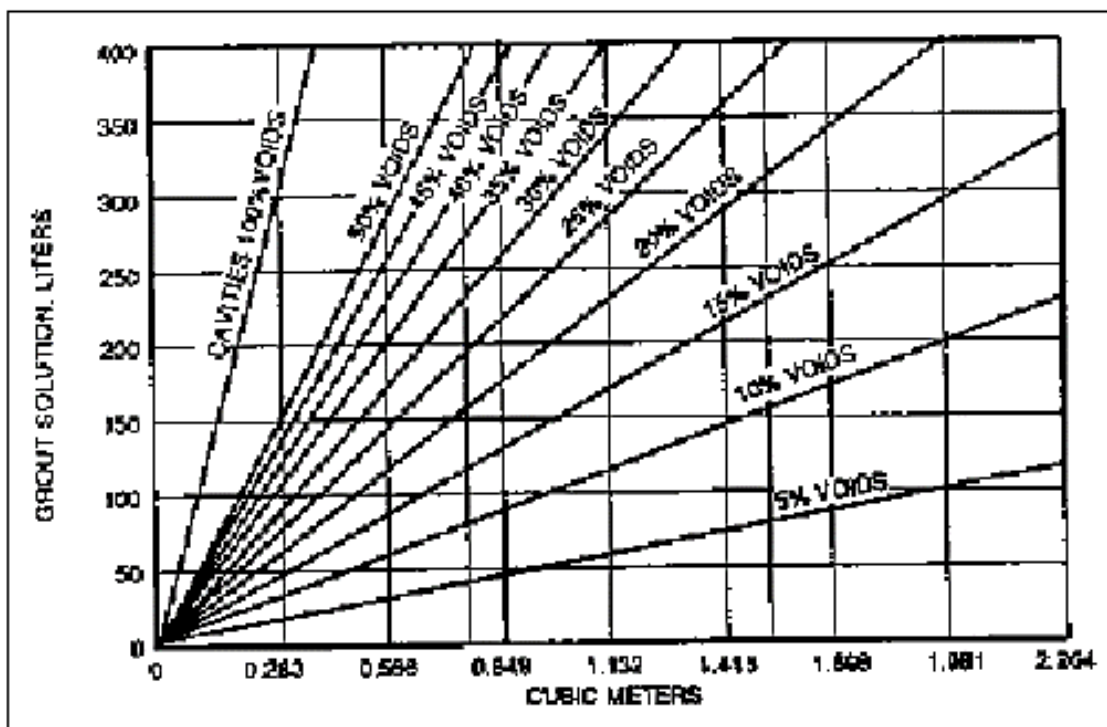
Σχήμα 5.4 Σύγκριση θλιπτικών αντοχών χημικών ενέσεων που εγχέονται σε μέσης λεπτότητας, υγρή σύμμεικτη άμμο, εγχυμένη και σκληρυμένη υγρή (προσαρμοσμένο από Raymond International, Inc. 1957).

Μοτίβα αρμολόγησης. Συνήθως, χρησιμοποιούνται διάφοροι σωλήνες ή θέσεις έγχυσης για την έγχυση χημικού ενέματος. Το σχέδιο ενέματος καθορίζει τόσο τη θέση των σωλήνων όσο και τη σειρά με την οποία τοποθετείται το ένεμα. Τα γενικά κριτήρια υπαγορεύουν ότι η σειρά των εγχύσεων πρέπει να γίνεται έτσι ώστε η περιοχή που αρχικά ενέθηκε να περιορίζει

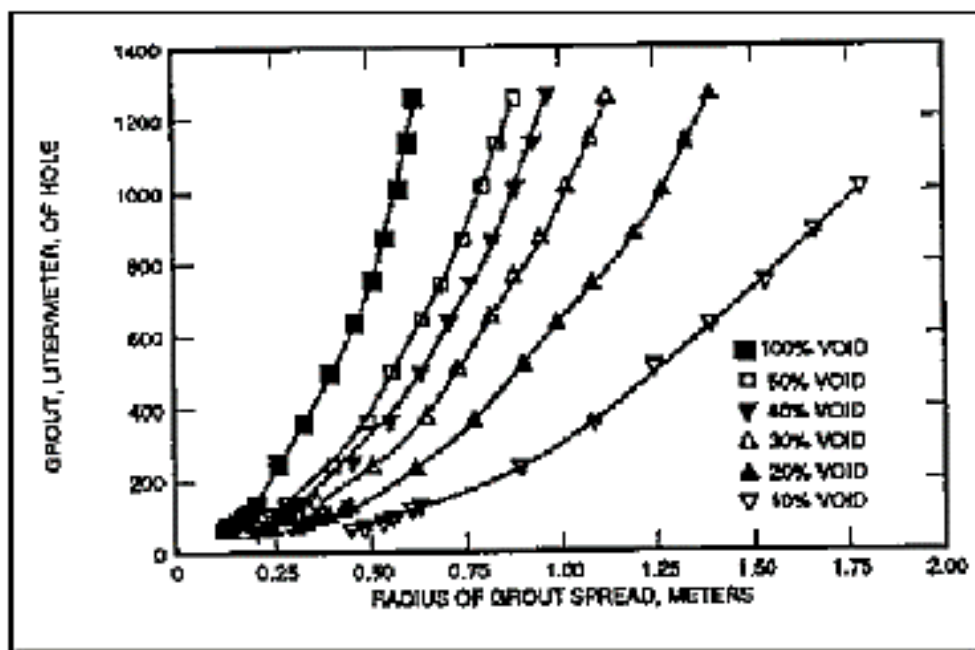
τις περιοχές που θα υποβληθούν σε επεξεργασία με τις επόμενες επεξεργασίες, γενικά απαιτούνται τουλάχιστον δύο κύκλοι οπών για πλήρη επικάλυψη σε κυκλικά μοτίβα που εξαρτώνται από την απόσταση των οπών και το υλικό που ενέχεται, και γενικά απαιτούνται τρεις σειρές οπών για πλήρη επικάλυψη σε γραμμικά μοτίβα όπως οι τοίχοι αποκοπής.

Κατά την έγχυση κοκκωδών υλικών, οι θέσεις έγχυσης πρέπει να βασίζονται στη μέση διάμετρο μιας σταθεροποιημένης στήλης, η οποία υπολογίζεται από τον όγκο προς άντληση και τον λόγο κενών (Σχήματα 5.5 και 5.6). Ως απόσταση πλέγματος θα πρέπει να χρησιμοποιείται μια απόσταση ελαφρώς μικρότερη από τη μέση διάμετρο. Αυτή η διάταξη αποστάσεων θα πρέπει να στεγανοποιεί ικανοποιητικά ακόμη και τα διαπερατά στρώματα. Οι πιέσεις έγχυσης για την τελική έγχυση θα πρέπει να αναμένονται υψηλότερες από εκείνες που απαιτήθηκαν για προηγούμενες εργασίες.

Όταν οι στρωματοποιημένες αποθέσεις ενεματώνονται, απαιτούνται γενικά τουλάχιστον τρεις σειρές εγχύσεων, έτσι ώστε τα περιοριστικά αποτελέσματα των παρακείμενων σταθεροποιημένων μαζών να αναγκάζουν τις επόμενες εγχύσεις σε λιγότερο διαπερατές περιοχές. Θα πρέπει επίσης να χρησιμοποιούνται σύντομοι χρόνοι ζελατινοποίησης. Με τους σύντομους χρόνους ζελατινοποίησης, η ζελατινοποίηση λαμβάνει χώρα κάτω από τον πυθμένα του σωλήνα, γεγονός που εξαλείφει την πιθανότητα άντλησης όλου του διαλύματος από μία έγχυση σε μία στρώση, επειδή ο χρόνος ζελατινοποίησης και η θέση του πυθμένα του σωλήνα είναι γνωστά. Οι χρόνοι πήξης πρέπει να προσαρμόζονται για την αλλαγή των υψομέτρων του σωλήνα.



Σχήμα 5.5 Σταθεροποιημένος όγκος σε τσιμεντοποιημένο μέσο σε σχέση με τον όγκο του ενέματος (προσαρμοσμένο από Raymond International, Inc. 1957)



Σχήμα 5.6 Διείσδυση σε σχέση με τον όγκο του ενέματος και το ποσοστό κενών (προσαρμοσμένο από Raymond International, Inc. 1957)

Παράγοντες που επηρεάζουν τις μεθόδους έγχυσης. Το υλικό που πρόκειται να αρμολογηθεί επηρεάζει τη μέθοδο έγχυσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Τα πακετάκια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά σε σχηματισμούς που δεν είναι ικανοί και που δεν θα διατηρήσουν μια ανοικτή οπή. Σε αυτή την περίπτωση, ο ίδιος ο σχηματισμός λειτουργεί ως στεγανοποιητικό μέσο, αποτρέπουν την επιστροφή του ενέματος κατά μήκος της διαδρομής του σωλήνα εκτόξευσης. Ωστόσο, εάν απαιτείται ένας πακτωτήρας σε μια ασταθή ανοικτή οπή, η θέση στην οποία είναι επιθυμητός ο πακτωτήρας μπορεί να ενεματοποιηθεί για να σχηματιστεί ένα ταχέως στερεούμενο πώμα κονιάματος, το πώμα να έχει διάμετρο για να φιλοξενήσει τον πακτωτήρα και ο πακτωτήρας να τοποθετηθεί στη συνέχεια στη γεώτρηση σε αυτή τη θέση. Όπου οι σχηματισμοί διατηρούν ανοικτή οπή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις πακεταριστών.

Εκτίμηση ποσοτήτων. Κατά την εκτίμηση των χημικών ποσοτήτων και του κόστους για μια εργασία αρμολόγησης, οι φυσικές διαστάσεις του όγκου του μέσου που πρόκειται να αρμολογηθεί και το πορώδες ή ο λόγος κενών του μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του όγκου του ενέματος που απαιτείται για μια εφαρμογή. Οι υπολογισμοί είναι πολύ πιθανό να είναι ανακριβείς λόγω της χρήσης λανθασμένων λόγων κενών. Κατά τον καθορισμό των τιμών του λόγου κενών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα σημεία:

- ❖ Οι κοκκώδεις, μη συνεκτικές αποθέσεις θα έχουν, ανάλογα με τη σχετική πυκνότητα, λόγο κενών γενικά μεταξύ 0,6 και 0,9.
- ❖ Οι συνεκτικές αποθέσεις δεν δέχονται γενικά ενέματα.
- ❖ Οι αργίλους οργανικής φύσης ενδέχεται να μην δέχονται ενέματα.
- ❖ Σε ορισμένα κοιτάσματα, μόνο τα πιο χονδροειδή στρώματα ή οι λακκούβες μπορούν να δεχτούν ενέματα.
- ❖ Σε σχιστολιθικούς σχηματισμούς, μόνο τα μεγαλύτερα κανάλια μπορούν να δεχτούν ενέματα. Ο πραγματικός κλασματικός όγκος των κενών θα πρέπει να προσαρμόζεται στο ποσοστό των κενών που δέχονται ενέματα για τον υπολογισμό των όγκων ενέματος (Σχήματα 5.5 και 5.6). Οι όγκοι ενέματος για μια συγκεκριμένη εργασία θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνουν ένα ενδεχόμενο για τα απόβλητα και την αραιώση.

Κατά την αρμολόγηση μέσω οπής όπου ο σωλήνας ενέματος πρόκειται να ανυψωθεί ή να χαμηλώσει ανά διαστήματα, θα πρέπει να υπολογίζεται ο όγκος ενέματος ανά καθορισμένο μήκος, ώστε η πληροφορία αυτή, σε συνδυασμό με τον λόγο κενών, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μεγέθους της ενέσιμης μάζας. Το ιξώδες του ενέματος επηρεάζει το χρονικό ρυθμό εξάπλωσης από μία οπή.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι ποσότητες ενέματος που απαιτούνται για την πλήρωση διαφόρων περιεκτικοτήτων κενών και βασίζονται στη συνολική πλήρωση. Ωστόσο, αυτή η ιδανική κατάσταση ολικής πλήρωσης σπάνια επιτυγχάνεται και, ως παράδειγμα, έχει καθοριστεί ότι 330 έως 440 L/m³ είναι μια κατά προσέγγιση ποσότητα για την έγχυση σε ασύνδετα κοκκώδη υλικά με περίπου 35 % κενά, όπως η μεσαία έως λεπτή άμμος.

Το Σχήμα 5.6 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των ποσοτήτων ενέματος για ενέσεις σε κατακόρυφες οπές.

Κόστος. Το κόστος για την παρασκευή ενός συγκεκριμένου όγκου διαλύματος χημικού ενέματος ποικίλλει ανάλογα με τα διάφορα χημικά ενέματα και τη συγκέντρωση των συστατικών που χρησιμοποιούνται. Τρεις παράγοντες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό μιας εκτίμησης κόστους για την αγορά περιλαμβάνουν έναν συνολικό γνωστό

όγκο, έναν γνωστό λόγο ενέσιμων κενών και μια συγκεκριμένη συγκέντρωση χημικών ουσιών.

Τα σχήματα 5.5 και 5.6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση όχι μόνο του όγκου αλλά και του κόστους.

Οικονομικές εκτιμήσεις. Οι οικονομικές εκτιμήσεις στις χημικές ενέσεις περιλαμβάνουν το αρχικό κόστος των υλικών, την τοποθεσία του εργοταξίου, τις ποσότητες ενέματος που θα χρησιμοποιηθούν, τον τύπο των υλικών (υγρό ή σκόνη) που θα αποσταλούν και τον όγκο που θα τοποθετηθεί. Γενικά, όσο περισσότερα ενέματα χρησιμοποιούνται, τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή μονάδας. Η εργασία, τα γενικά έξοδα και η ενοικίαση εξοπλισμού είναι άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν, καθώς και το κόστος διάνοιξης των οπών με ενέματα.

Σε περίπτωση που παραμείνει μια ανοικτή οπή μετά τη χημική ένεση, η οπή θα μπορούσε να επιχωματωθεί με μίγμα τσιμεντοκονιάματος portland-τσιμέντου, το οποίο, στις περισσότερες περιπτώσεις, θα μείωνε κάπως το συνολικό κόστος. Το τσιμέντο Πόρτλαντ και η άμμος είναι συνήθως διαθέσιμα στα περισσότερα εργοτάξια.

2.5.4 Επιχειρήσεις πεδίου

Διαδικασίες πεδίου. Μια σημαντική πτυχή του σχεδιασμού πεδίου είναι η επιλογή συγκεκριμένων τεχνικών για χρήση. Μια τεχνική για την αποκοπή της επιφανειακής οπισθοροής σε εργασίες ρηχής τοποθέτησης χρησιμοποιεί σύντομο χρόνο γέλης σε συνδυασμό με ελεγχόμενους κύκλους άντλησης με ενεργοποίηση και απενεργοποίηση. Δυστυχώς, οι σύντομοι χρόνοι πήκτώματος μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε σχηματισμό πηκτώματος σε περιοχές που θα σφράγιζαν την υπό επεξεργασία μάζα από περαιτέρω επεξεργασία. Όταν παρατηρείται για πρώτη φορά επιφανειακή παλινδρόμηση, οι αντλίες διατηρούνται σε λειτουργία έως ότου βεβαιωθεί ότι το υλικό που παράγεται είναι πραγματικό χημικό ενέματα. Οι χρωστικές ουσίες μπορούν να βοηθήσουν στη διάκριση του χημικού ενέματος από το νερό ή κάποιο άλλο διάλυμα.

Τα ενέματα που εκρέουν στην επιφάνεια ελέγχονται ως προς το χρόνο πήκτώματος και ο χρόνος πήκτώματος ενός νέου διαλύματος βραχυκυκλώνεται. Στη συνέχεια, οι αντλίες κλείνουν για χρονικό διάστημα ίσο με το μισό του χρόνου ζελατινοποίησης. Όταν οι αντλίες τίθενται και πάλι σε λειτουργία, εάν επαναληφθεί η παλινδρόμηση, οι αντλίες συνεχίζουν να λειτουργούν μέχρι να αντληθεί επαρκής ποσότητα χημικού για να καθαρίσει ο σωλήνας ή η οπή, και στη συνέχεια οι αντλίες κλείνουν για χρονικό διάστημα ίσο με τα τρία τέταρτα του παρόντος χρόνου πήξης. Όταν ξαναρχίσει η άντληση, εάν αρχίσει και πάλι η διαρροή, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, αλλά οι αντλίες ξεκινούν εκ νέου με μικρότερο ρυθμό. Για να

χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος χωρίς να βουλώσει η οπή, πρέπει να είναι γνωστός ο πραγματικός χρόνος πήξης.

Έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία χρόνοι γέλης μικρότεροι από το χρόνο έλξης του σωλήνα. Αυτό είναι επωφελές σε στρωματοποιημένα κοιτάσματα, όπου οι περιορισμοί της πίεσης άντλησης το επιτρέπουν, καθώς και όπου υπάρχει νερό που ακολουθεί. Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν μικρότεροι χρόνοι ζελατινοποίησης για να αποτραπεί η παράσυρση του ενέματος από τα υπόγεια ύδατα και να σφραγιστούν οι πιο διαπερατές περιοχές, εξαναγκάζοντας έτσι το ένεμα να εισχωρήσει στο λεπτότερο υλικό.

Η αποτελεσματικότητα της έγχυσης σε στρωματοποιημένα κοιτάσματα θα μειωνόταν φυσικά με την αύξηση του χρόνου ηηκτώματος σε αυτή την περίπτωση.

Τα επιθυμητά αποτελέσματα ενός προγράμματος αρμολόγησης στο πεδίο επιτυγχάνονται ευκολότερα εάν μπορεί να προβλεφθεί το μέγεθος και το σχήμα μιας αρμολογημένης μάζας. Η ετερογενής στρωμάτωση και τα ρέοντα υπόγεια ύδατα τροποποιούν το τελικό αποτέλεσμα.

Το ένεμα που εγχέεται από ένα σημείο μέσα σε μια μάζα ομοιόμορφης διαπερατότητας, όπως σε μια μάζα άμμου, αναμένεται να ρέει από το σημείο έγχυσης σχηματίζοντας μια σφαίρα. Αυτό ισχύει κανονικά εάν η πίεση έγχυσης ενέματος είναι μεγαλύτερη από το στατικό ύψος και εάν ο όγκος είναι μικρός ώστε οι υδροστατικές πιέσεις στην κορυφή και στον πυθμένα της μάζας να μην διαφέρουν σημαντικά. Ο ρυθμός με τον οποίο τοποθετείται το ένεμα, ο ρυθμός ροής του υπόγειου νερού και ο χρόνος πήξης καθορίζουν τη μετατόπιση και την τελική διαμόρφωση της μάζας ενέματος.

Το ενέσιμο ένεμα θα αναζητήσει τις ευκολότερες διαδρομές ροής. Οι μόνοι παράγοντες που μπορούν να εισαχθούν για την τροποποίηση αυτής της κατάστασης είναι ο έλεγχος του χρόνου πήξης και, σε ορισμένες περιπτώσεις, η αλλαγή του ιξώδους. Ο ακριβής έλεγχος του χρόνου πήξης είναι επίσης σημαντικός σε στρωματοποιημένες αποθέσεις. Εάν η διαπερατότητα μεταξύ της οριζόντιας και της κατακόρυφης κατεύθυνσης διαφέρει είτε λόγω της τοποθέτησης είτε λόγω της στρωμάτωσης, όπως συμβαίνει συχνά, μπορεί να επιτευχθεί καλύτερος έλεγχος εάν το ένεμα διαμορφωθεί έτσι ώστε να πήξει τη στιγμή που ο επιθυμητός όγκος έχει τοποθετηθεί εκεί όπου μπορεί να ρέει νερό. Με χρόνους πήξης μικρότερους από τους χρόνους άντλησης, το ένεμα που αντλείται τελευταίο βρίσκεται πιο μακριά από το σημείο έγχυσης λόγω του ότι εξαναγκάζεται να περάσει μέσα από ένεμα που έχει προηγουμένως πήξει. Εάν η θέση αυτού του σημείου είναι γνωστή και εάν το ένεμα πήξει σε αυτό το σημείο, τότε η θέση της μάζας του ενέματος είναι γνωστή.

Αφού επιλεγεί ένα ή περισσότερα ενέματα, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί δοκιμή μικρής κλίμακας στο πεδίο ως τελικό βήμα για να αποφασιστεί ποιο ενέματα θα χρησιμοποιηθούν.

Φυσικές ιδιότητες. Γενικά, κοκκώδη υλικά ή βραχομάζες με συνολική διαπερατότητα 1×10^{-7} cm/sec ή λιγότερο δεν μπορούν να αρμολογηθούν οικονομικά. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι άργιλοι, οι πολύ λεπτές ιλύες και τα χονδρότερα υλικά που περιέχουν αρκετά λεπτόκοκκα υλικά ώστε να καθίστανται σχετικά αδιαπέραστα. Σχηματισμοί με διαπερατότητα από 1×10^{-5} έως 1×10^{-7} cm/sec μπορούν να αρμολογηθούν, γενικά με δυσκολία, ιδίως όταν ο σχηματισμός είναι ρηχός και μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιορισμένες πιέσεις άντλησης. Τα μη συνεκτικά εδάφη σε αυτό το εύρος διαπερατότητας κατατάσσονται γενικά στις ιλύες. Χονδρότερα υλικά με υψηλότερη διαπερατότητα μπορούν γενικά να αρμολογηθούν χωρίς δυσκολία. Η επιτυχής ενεματοτοποίηση υλικών με χαμηλή διαπερατότητα εξαρτάται κυρίως από το κονίαμα που επιλέγεται.

Αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες. Η χημική αρμολόγηση μπορεί είτε να βλάψει είτε να βελτιώσει τις αρχικές ιδιότητες του αρμολογούμενου υλικού. Η χημική αρμολόγηση κοκκωδών υλικών μπορεί να εξυπηρετεί διπλό σκοπό: βελτίωση των υφιστάμενων ιδιοτήτων και μεταβολή των υφιστάμενων ιδιοτήτων για τη δημιουργία ενός νέου υλικού. Στην τελευταία περίπτωση, οι χημικές ουσίες του ενέματος αντιδρούν με το ενέσιμο υλικό για να σχηματίσουν ένα νέο υλικό. Το νέο υλικό μπορεί να είναι ή να μην είναι βελτιωμένο. Οι δυσμενείς επιδράσεις των χημικών ενέσεων στα υλικά μπορεί ενδεχομένως να περιλαμβάνουν αύξηση της διαπερατότητας ή μείωση της αντοχής. Η κυκλική ξήρανση και διαβροχή ή η πλήρης ξήρανση μπορεί να είναι επιζήμια για μια περιοχή με ενέματα λόγω της διάσπασης του χημικού ενέματος με πηκτώματα που προκαλείται από τους κύκλους.

Αραιώση. Σε γενικές γραμμές, η αραιώση με υπόγεια ύδατα είναι επιζήμια μόνο όταν η αραιώση είναι τέτοια ώστε να μειώσει μια ποσότητα ενέματος κάτω από τη συγκέντρωση στην οποία θα πήξει. Αυτό συμβαίνει όταν υπάρχει ή δημιουργείται αναταραχή ή όταν ένας μικρός όγκος ενέματος εγγέεται σε μεγάλο όγκο ρέοντος νερού και σε μικρότερο βαθμό στατικού νερού. Οι συνθήκες αυτές ελέγχονται μερικές φορές με τη χρήση ανιχνευτών χρωστικών ουσιών για τον προσδιορισμό της έκτασης της αραιώσης και την αποτελεσματικότητα των αντιμέτρων. Σε γενικές γραμμές, τα χημικά ενέματα με βάση το νερό αραιώνονται σε διάφορους βαθμούς ανάλογα με τις συνθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Διείσδυση. Τα ενέματα που έχουν ιξώδες 2 cP διεισδύουν με το μισό ρυθμό του νερού (1 cP) σε ίση πίεση ή απαιτούν διπλάσια πίεση για να επιτύχουν ρυθμούς ίσους με αυτούς του νερού. Συνεπώς, οι διαφορές ιξώδους είναι σημαντικές στην περιοχή που πλησιάζει το ιξώδες

του νερού. Υπό άλλες συνθήκες, ο ρυθμός με τον οποίο τα χημικά ενέματα μπορούν να αντληθούν σε έναν σχηματισμό θα μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το ιξώδες του ενέματος και άμεσα με την πίεση άντλησης.

2.5.5 Διαθεσιμότητα ενέματος

Οι χημικές ενέσεις είναι ένας ταχέως μεταβαλλόμενος τομέας λόγω τεχνολογικών και κανονιστικών εξελίξεων. Νέα προϊόντα εισάγονται στην αγορά και παλαιότερα προϊόντα αποσύρονται. Προκειμένου να προσδιοριστεί τί προσφέρεται σήμερα από τους προμηθευτές, είναι απαραίτητο να συμβουλευτείτε εμπορικούς και βιομηχανικούς καταλόγους και τρέχοντα περιοδικά και τεχνικά περιοδικά. Οι καλύτερες πηγές τρεχόντων δεδομένων είναι οι κατασκευαστές, οι προμηθευτές και οι πιο πρόσφατοι πελάτες τους.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

3.1 Εισαγωγή

Η πειραματική εργασία που περιγράφεται στο παρόν και στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρεται στον σχεδιασμό, εκτέλεση και ανάλυση των αποτελεσμάτων σειράς δοκιμών άμεσης διάτμησης υπό σταθερή ορθή τάση.

Το πρόγραμμα πειραματικών δοκιμών περιέλαβε δοκιμές άμεσης διάτμησης στην κλασική συσκευή άμεσης διάτμησης σε δοκίμια ασυνεχειών που διαμορφώθηκαν σε λείες επιφάνειες και εφελκυστικές διάρρηξης φυσικού πετρώματος (μαρμάρου). Τα μεγέθη των δοκιμών θα παρατεθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν οι διαφορετικές αναλογίες ρητίνης-νερού που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του ενέματος καθώς και η ορθή τάση στην οποία υποβλήθηκαν τα δοκίμια αυτά.

Οι δοκιμές έγιναν για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική έρευνα και συγκεκριμένα της συνοχής (c) και της γωνίας εσωτερικής τριβής (Φ).

3.2 Γενικά

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το εργαστήριο σκυροδέματος του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του ΔΙ.ΠΑ.Ε. στην Αλεξάνδρεια Πανεπιστημιούπολη. Για την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν

υλικά και όργανα εντός του εργαστηρίου, ακολουθώντας τις οδηγίες του επιβλέποντα καθηγητή και τηρώντας πάντα όλα τα απαραίτητα μέτρα ατομικής προστασίας.

3.3 Μέσα Ατομικής Προστασίας

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν τα απαιτούμενα Μέτρα Ατομικής Προστασίας (ΜΑΠ). Λόγω της έντονης οσμής που εκλύεται από την εποξειδική ρητίνη και από τον σκληρυντή, οι ερευνητές πρέπει να φοράνε ιατρικές μάσκες N95 ή FFP, που καλύπτουν τη μύτη και το στόμα (Εικόνα 3.3.1). Για την αποφυγή της επαφής του δέρματος με υλικά όπως εποξειδική ρητίνη, σκληρυντής, απαραίτητη είναι η χρήση ιατρικών γαντιών (εικόνα 3.3.2).

Μάσκα N95

Η αναπνευστική συσκευή προσώπου με φίλτρο N95, συνήθως συντομογραφία N95,[1] είναι μια αναπνευστική συσκευή προσώπου με φίλτρο σωματιδίων που πληροί την ταξινόμηση N95 του Εθνικού Ινστιτούτου Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας των ΗΠΑ (NIOSH) για το φιλτράρισμα του αέρα, που σημαίνει ότι φιλτράρει τουλάχιστον το 95% των αιωρούμενων σωματιδίων. Ο τύπος N95 είναι η πιο συνηθισμένη αναπνευστική συσκευή προσώπου με φίλτρο σωματιδίων



Εικόνα 3.3.1 Ιατρική μάσκα N95

Ιατρικά γάντια

Τα ιατρικά γάντια είναι γάντια μίας χρήσης που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια ιατρικών εξετάσεων και διαδικασιών για την αποφυγή διασταυρούμενης μόλυνσης μεταξύ των φροντιστών και των ασθενών. Τα ιατρικά γάντια κατασκευάζονται από διάφορα πολυμερή, όπως λατέξ, καουτσούκ νιτριλίου, πολυβινυλοχλωρίδιο και νεοπρένιο. Τα γάντια διατίθενται

αλεύκαστα ή σε σκόνη με άμυλο καλαμποκιού για τη λίπανση των γαντιών, καθιστώντας ευκολότερη την τοποθέτησή τους στα χέρια. Εκτός από την ιατρική, τα ιατρικά γάντια χρησιμοποιούνται ευρέως σε χημικά και βιοχημικά εργαστήρια. Τα ιατρικά γάντια προσφέρουν βασική προστασία από διαβρωτικές ουσίες και επιφανειακή μόλυνση.



Εικόνα 3.3.2 Χρήση ιατρικών γαντιών κατά την πειραματική διεργασία

Προειδοποιητική σήμανση

Στο χώρο που πραγματοποιήθηκε η έρευνα, συγκεκριμένα στο εργαστήριο σκυροδέματος του ΔΙ.ΠΑ.Ε., υπήρχε η απαιτούμενη σήμανση για την ασφάλεια και υγιεινή των ερευνητών. Συγκεκριμένα υπήρχαν προειδοποιητικές πινακίδες στα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν και στους τοίχους του εργαστηρίου, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5, 3.2.6.



Εικόνα 3.3.3 Σήμανση για υποχρεωτική συμπεριφορά, απαγόρευση, κίνδυνο και προειδοποίηση στους τοίχους του εργαστηρίου.



Εικόνα 3.3.4 Προειδοποιητική πινακίδα κινδύνου



Εικόνα 3.3.5 Πινακίδα απαγόρευσης αναρτημένη στο μηχάνημα άμεσης διάτμησης ασυνεχειών των δοκιμών.



Εικόνα 3.3.6 Πινακίδα προειδοποίησης κινδύνου ηλεκτροπληξίας.

Κουτί πρώτων βοηθειών

Ο χώρος του εργαστηρίου είναι εξοπλισμένος με κουτί πρώτων βοηθειών (βλέπε Εικόνα 3.2.7). Στο κουτί υπάρχει το ελάχιστο απαιτούμενο ιατροφαρμακευτικό υλικό:

- ✓ Σκεύασμα για κάψιμο/έγκαυμα (σε σωληνάρια ή πακέτα)
- ✓ Εισπνεύσιμη αμμωνία
- ✓ Σπασμολυτικό (πόννοι μαλακών μυών κλπ.)
- ✓ Επίδεσμοι γάζας των 0,10 x 2,50 m
- ✓ Τριγωνικός επίδεσμος (κρεμάθρα)
- ✓ Λευκοπλάστ ρολό
- ✓ Ψαλίδι
- ✓ Τσιμπίδα
- ✓ Ύφασμα λεπτό καθαρισμού (cleansing tissue, βαμβάκι)
- ✓ Αντισηπτικό διάλυμα (προτίμηση Μερκουροχρώμ)
- ✓ Υγρό σαπούνι σε πλαστική συμπιέσιμη φιάλη
- ✓ Ελαστικός επίδεσμος
- ✓ Αντισταμινική αλοιφή (έντομα, αλλεργίες κλπ.)
- ✓ Αποστειρωμένες γάζες, κουτιά των 5cm , 10cm και 15cm



Εικόνα 3.3.7 Κουτί πρώτων βοηθειών πλήρως εξοπλισμένο με ιατροφαρμακευτικό υλικό

3.4 Εργαλεία δειγματοληψίας και παρασκευής δοκιμών

Το εργαστήριο διαθέτει εξοπλισμό για την κατάλληλη διαμόρφωση των δοκιμών βράχου, που θα χρησιμοποιηθούν για τις δοκιμές. Για την λήψη πυρήνων του πετρώματος το εργαστήριο διαθέτει συσκευή πυρηνοληψίας ή αλλιώς καρότων. Η συσκευή περιλαμβάνει ηλεκτρικό μοτέρ δυναμικότητας 1850 W με δύο ταχύτητες λειτουργίας, 1140 και 2090 στροφές/λεπτό, τρυπάνι εσωτερικής διαμέτρου 5 mm και πραγματοποιεί υγρή διάτρηση.



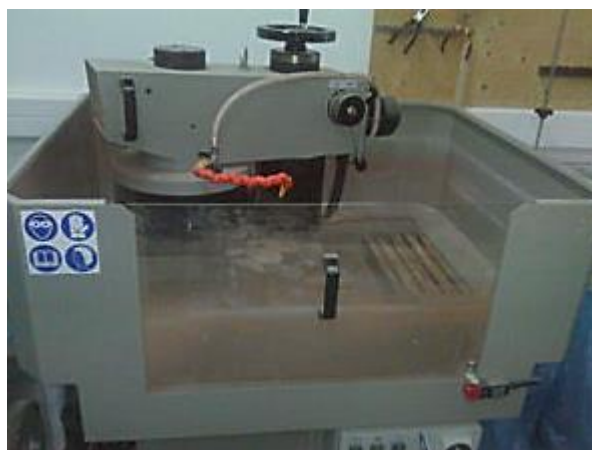
Εικόνα 3.4.1 Συσκευή πυρηνοληψίας

Μετά την πυρηνοληψία του δοκιμίου, αυτό πρέπει να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να αποκτήσει το επιθυμητό ύψος. Συνήθως διαμορφώνεται έτσι ώστε ο λόγος ύψους προς διάμετρο να είναι περίπου 1 ($D/H=1$). Για τον σκοπό αυτό το εργαστήριο διαθέτει ηλεκτρικό κόφτη υγρής κοπής, ο οποίος περιλαμβάνει χαλύβδινο δίσκο κοπής διαμέτρου 450 mm, ειδικές διατάξεις συγκράτησης για την κοπή κυλινδρικών ή άμορφων τεμαχίων, χειροκίνητο φορέα, πετάλι κατακόρυφης κίνησης και αντλία νερού αυτοκαθαριζόμενη με φίλτρο ανακύκλωσης νερού.



Εικόνα 3.4.3 Συσσκευή Κοπής δοκιμίων

Για την λείανση των επιφανειών των δοκιμίων ώστε να γίνουν παράλληλες το εργαστήριο διαθέτει μηχανή λείανσης. Η κεφαλή λείανσης κινείται ακτινικά και προς τις δύο διευθύνσεις είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα, και μπορεί να εξοπλιστεί και με λειαντικά εξαρτήματα διαμαντιών. Περιλαμβάνει διάταξη συγκράτησης κυλινδρικών και πρισματικών δοκιμίων, κύκλωμα ψύξης με ηλεκτρική αντλία νερού, δεξαμενή νερού και φίλτρο καθαρισμού.



Εικόνα 3.4.4 Συσσκευή λείανσης των επιφανειών των δοκιμίων

3.5 Υλικά και παρασκευή των δοκιμών

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε πέντε φάσεις:

- Κοπή και λείανση του μαρμάρου για την χρήση του ως πολλαπλά δοκίμια
- Παρασκευή ρητίνης (με την προσθήκη μπετονίτη) και δοκιμών
- Σκλήρυνση των δοκιμών για 7 ημέρες (με προσθήκη μπετονίτη), 60 ημέρες (με προσθήκη μπετονίτη) και 90 ημέρες (χωρίς προσθήκη μπετονίτη)
- Καταπόνηση των δοκιμών σε δοκιμή άμεσης διάτμησης ασυνεχειών
- Καταγραφή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Για την διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα είδη υλικών για τα οποία ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή.

Τα κύρια υλικά, που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμών είναι τα παρακάτω:

Μάρμαρο Κοζάνης

Τα अपαράμιλλα χαρακτηριστικά του Μαρμάρου Κοζάνης το κατατάσσουν ανάμεσα στα καλύτερα μάρμαρα παγκοσμίως. Είναι ένα καθαρά ασβεστολιθικό μάρμαρο χωρίς προσμίξεις ξένων σωμάτων. Επίσης φημίζεται για την ιδιαίτερα χαμηλή απορροφητικότητα του, τη σκληρότητα και γενικότερα για την ποιότητά του. Ορισμένες από τις μηχανικές ιδιότητές του παρατίθενται παρακάτω:

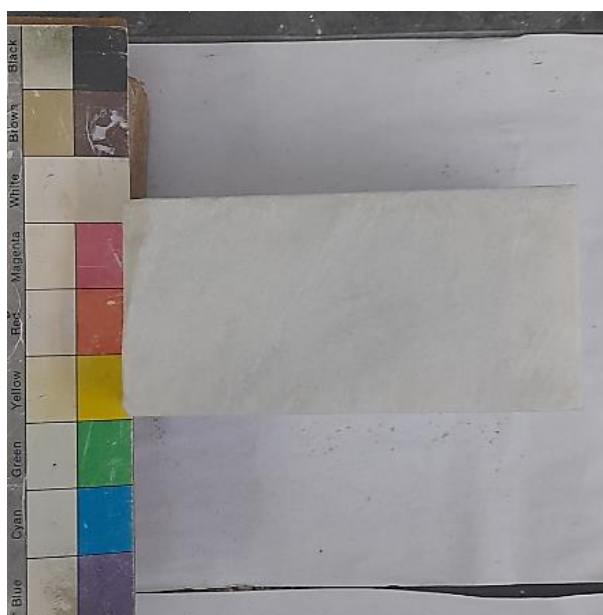
Φαινόμενο Ειδικό Βάρος: 2,718 kg/m²

Συντελεστής Απορροφητικότητας: 0,12 wt%

Αντοχή σε θλίψη: 1.184 kg/cm²

Αντοχή σε εφελκυσμό απο Κάμψη: 227 kg/cm²

Αντοχή σε φθορά απο Τριβή: 5.92 mm



Εικόνα 3.5.1 Μάρμαρο Κοζάνης

Νερό

Πόσιμο νερό από το δίκτυο ύδρευσης του Δι.ΠΑ.Ε. Για την ρίψη νερού στο μείγμα χρησιμοποιήθηκε ογκομετρικός κύλινδρος μεταφοράς νερού. (Εικόνα 3.5.2)



Εικόνα 3.5.2 Προσθήκη νερού με την χρήση ογκομετρικού κυλίνδρου

Ζυγαριά ακριβείας 0,1 gr

Για την μέτρηση των δοσολογιών για την παρασκευή του ενέματος, χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακή ζυγαριά ακριβείας 0,1 gr



Εικόνα 3.5.3 ζυγαριά ακριβείας 0,1 gr

Μπλέντερ

Για την ανάμιξη των υλικών για την παραγωγή του ενέματος χρησιμοποιήθηκε μπλέντερ για με γυάλινη κανάτα με χωρητικότητα 1.5lt και ισχύς 750W.



Εικόνα 3.5.4 Μπλέντερ για την ανάμιξη υλικών για την παραγωγή του ενέματος

3.5.1 Υδατοδιαλυτή εποξειδική ρητίνη

Η Υδατοδιαλυτή εποξειδική ρητίνη αποτελείται από:

- Την εποξειδική ρητίνη (Συστατικό Α) (Εικόνα 3.5.1.1)
- Τον σκληρυντή (Συστατικό Β) (Εικόνα 3.5.1.2)



Εικόνα 3.5.1.1 Εποξειδική ρητίνη EPOXYPRIMER-500



Εικόνα 3.5.1.2 Σκληρυντής EPOXYPRIMER-500

Η εποξειδική ρητίνη είναι εμπορικό προϊόν, το οποίο μπορεί να βρεθεί με την επωνυμία EPOXYPRIMER-500 και διανέμεται από την ελληνική εταιρεία ISOMAT A.E. Το EPOXYPRIMER-500 είναι ένα εποξειδικό, υδατοδιαλυτό σύστημα 2 συστατικών. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στις τριβές και υψηλή σκληρότητα. Μπορεί να εφαρμοστεί σε στεγνά έως και ελαφρώς υγρά υποστρώματα, χωρίς όμως λιμνάζοντα νερά. Κατατάσσεται ως SR-B2,0, σύμφωνα με το πρότυπο EN 13813.

Το EPOXYPRIMER-500 χρησιμοποιείται ως αστάρι του ISOFLEX-PU 500 και άλλων πολυουρεθανικών συστημάτων, όταν πρόκειται να εφαρμοστούν πάνω σε μη απορροφητικά υποστρώματα ή σε παλιές στεγανωτικές στρώσεις. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και ως αστάρι, καθώς και για την παρασκευή υλικού στοκαρίσματος με την προσθήκη χαλαζιακής άμμου, σε τσιμεντοειδούς βάσης υποστρώματα, όπως σκυρόδεμα, τσιμεντοκονίες κλπ., που πρόκειται να επιστρωθούν με εποξειδικές ρητίνες του συστήματος DUROFLOOR.

Το χαμηλό ιξώδες του γαλακτώματος εποξειδικής ρητίνης σε συνδυασμό με τα μικρού μεγέθους διασκορπισμένα σωματίδια ρητίνης (25-100 nm) στο νερό, επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση του υλικού για σκοπούς έγχυσης-ένεσης.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εποξειδικής ρητίνης παρουσιάζονται παρακάτω:

<u>Χημική βάση:</u>	εποξειδική ρητίνη 2 συστατικών
<u>Απόχρωση:</u>	υποκίτρινο
<u>Ιξώδες συστατικού Α:</u>	900 mPa.s
<u>Ιξώδες συστατικού Β:</u>	4400 mPa.s
<u>Ιξώδες (Α+Β):</u>	8000 mPa.s
<u>Πυκνότητα συστατικού Α:</u>	1,1 kg/l
<u>Πυκνότητα συστατικού Β:</u>	1,0 kg/l
<u>Πυκνότητα (Α+Β):</u>	1,02 kg/l
<u>Αναλογία ανάμιξης (Α:Β):</u>	25:75 κατά βάρος
<u>Χρόνος ζωής στο δοχείο:</u>	περίπου 60 min στους +20°C
<u>Ελάχιστη θερμοκρασία σκλήρυνσης:</u>	+8°C
<u>Βατότητα:</u>	μετά από 18 h στους +23°C
<u>Δέχεται επικάλυψη:</u>	μετά από 24 h στους +23°C
<u>Τελικές αντοχές:</u>	μετά από 7 ημέρες στους +23°C
<u>Αντοχή σε πρόσφυση:</u>	> 3 N/mm ² (θραύση του σκυροδέματος)
<u>Καθαρισμός των εργαλείων:</u>	Τα εργαλεία πρέπει να καθαρίζονται επιμελώς με νερό, αμέσως μετά τη χρήση τους.

Ανάμιξη του EPOXYPRIMER-500

Τα συστατικά Α (ρητίνη) και Β (σκληρυντής) είναι συσκευασμένα σε δοχεία με προκαθορισμένη αναλογία ανάμιξης. Το συστατικό Β προστίθεται πλήρως μέσα στο συστατικό Α. Η ανάμιξη των δύο συστατικών θα πρέπει να γίνεται πολύ καλά μέχρι πλήρους ομογενοποίησης, για περίπου 2-3 λεπτά με δράπανο χαμηλών στροφών (300 στρ./λεπτό). Είναι σημαντικό η ανάδευση να γίνεται και στα τοιχώματα και στον πυθμένα του δοχείου, προκειμένου ο σκληρυντής να κατανεμηθεί ομοιόμορφα. Στη συνέχεια, προστίθεται 10-30% κατά βάρος νερό, για την επίτευξη της επιθυμητής εργασιμότητας.

Συσκευασία

Το EPOXYPRIMER-500 διατίθεται σε συσκευασίες (A+B) των 1, 4 και 20 kg. Τα συστατικά A και B βρίσκονται σε καθορισμένες αναλογίες ανάμιξης κατά βάρος.

Χρόνος ζωής – Αποθήκευση

Ο χρόνος ζωής του προϊόντος με βάση τις προδιαγραφές του κατασκευαστή ανέρχεται στους 12 μήνες από την ημερομηνία παραγωγής, αποθηκευμένο στην αρχική, σφραγισμένη συσκευασία σε θερμοκρασίες μεταξύ +5°C και 35°C. Συνιστάται η προστασία του από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και τον παγετό.

Παρατηρήσεις

Ο χρόνος κατεργασίας των εποξειδικών συστημάτων επηρεάζεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ιδανική θερμοκρασία εφαρμογής είναι μεταξύ +15°C και +25°C, ώστε το προϊόν να έχει τη βέλτιστη εργασιμότητα και χρόνο ωρίμανσης. Σε χαμηλές θερμοκρασίες (<+15°C), παρατηρείται καθυστέρηση στην πήξη, ενώ σε υψηλότερες (>+30°C), η πήξη γίνεται πιο γρήγορα. Συνιστάται τους χειμερινούς μήνες μία ήπια προθέρμανση των υλικών, ενώ αντίστοιχα τους καλοκαιρινούς η αποθήκευσή τους σε δροσερό χώρο πριν τη χρήση.

Στην περίπτωση που ανάμεσα στις διαδοχικές στρώσεις παρεμβάλλεται ένας μεγαλύτερος, από τον προβλεπόμενο, χρόνος αναμονής ή πρόκειται να επιστρωθούν εκ νέου ήδη χρησιμοποιούμενες επιφάνειες μετά από μακρά περίοδο, η παλιά επιφάνεια πρέπει να καθαριστεί καλά και να τριφτεί καθολικά. Μετά εφαρμόζεται η καινούρια επίστρωση. Το EPOXYPRIMER-500, μετά την πλήρη σκλήρυνσή του, είναι ακίνδυνο για την υγεία. Πριν τη χρησιμοποίηση του υλικού, είναι απαραίτητο να συμβουλευόμαστε τις οδηγίες ασφαλούς χρήσης, που αναγράφονται στην ετικέτα του προϊόντος.

Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (ΠΟΕ)

Σύμφωνα με την Οδηγία 2004/42/ΕΚ (Παράρτημα II, πίνακας Α), η μέγιστη επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε ΠΟΕ για την υποκατηγορία προϊόντος Ι, τύπος Υ είναι 140 g/l (2010) για έτοιμο προς χρήση προϊόν. Το έτοιμο προς χρήση προϊόν EPOXYPRIMER-500 έχει μέγιστη περιεκτικότητα 140 g/l ΠΟΕ.

3.5.2 Μπετονίτης

3.5.2.1 Εισαγωγή

Ο μπετονίτης χρησιμοποιήθηκε στους κύκλους παρασκευής δοκιμών με χρόνο σκλήρυνσης 7 ημερών. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο κοινός ασβεστούχος μπετονίτης.

Ο μπετονίτης είναι το πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από το αργλικό ορυκτό μοντμοριλλονίτη, $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$, (σε ποσοστό μεγαλύτερο από 80%), και σχηματίζεται από την εξαλλοίωση όξινων ηφαιστειακών πετρωμάτων. Όταν η περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη είναι μικρότερη (60-80%), το υλικό χαρακτηρίζεται ως “μπετονιτική άργιλος”. Πήρε το όνομά του από την τοποθεσία Fort Benton της πολιτείας Yoming των Η.Π.Α., όπου πρωτοανακαλύφθηκε και άρχισε να εξορύσσεται.



Εικόνα 3.5.2.1.1 Μπετονίτης σε μορφή πετρώματος και σκόνης



Εικόνα 3.5.2.1.2 Κρυσταλλική δομή μοντμοριλλονίτη

Ο μοντμοριλλονίτης ανήκει στα αργλικά ορυκτά, δομής 2:1, αποτελείται δηλαδή από δύο φύλλα τετραέδρων πυριτίου που εμπεριέχουν ένα φύλλο οκταέδρων αργιλίου, σιδήρου και μαγνησίου. Στο διαστρωματικό χώρο, μπορούν να προσροφηθούν κατιόντα και μεγαλομόρια νερού, για αυτό ο μοντμοριλλονίτης έχει την ιδιότητα της διόγκωσης.

3.5.2.2 Παραγωγή και εξαγωγές μπετονίτη

Η Ελλάδα είναι η δεύτερη χώρα μετά τις Η.Π.Α. στην παραγωγή μπετονίτη η οποία το 2011 ήταν 1,25 εκατ. τόνοι. Η εξόρυξη γίνεται κυρίως στη Μήλο από την εταιρία S&B Βιομηχανικά Ορυκτά και σε μικρότερες ποσότητες στην Κίμωλο από την εταιρία ΜΠΕΝΤΟΜΑΪΝ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΙΣ ΚΙΜΩΛΟΥ. Στις μέρες μας, η εταιρία S&B Βιομηχανικά Ορυκτά κατέχει την πρώτη θέση στην παραγωγή μπετονίτη στην Ευρώπη και είναι η μεγαλύτερη εξαγωγική εταιρία μπετονίτη στον κόσμο. Σχεδόν όλος ο μπετονίτης (98%) εξάγεται στην Ε.Ε., στη Β. Αμερική (ΗΠΑ, Καναδά) και στην Κοινοπολιτεία Ανεξαρτήτων Κρατών (κράτη της πρώην Σοβιετική Ένωσης), Μαρόκο, κ.α. Η Ελληνική παραγωγή κατεργασμένου Μπετονίτη τα τελευταία χρόνια αγγίζει τούς 750.000 τόνους. Η ποιότητα του Ελληνικού Μπετονίτη θεωρείται μια από τις καλύτερες παγκοσμίως. Η τιμή του μπετονίτη εξαρτάται από το βαθμό επεξεργασίας, το μέγεθος των κόκκων και τη συσκευασία.

Τα βασικότερα κοιτάσματα είναι της Μήλου (Κώμια, Τρογαλάς) και της Κιμώλου. Ο μπετονίτης της Μήλου περιέχει κυρίως Ca-μοντμοριλλονίτη (σε ποσοστό πάνω από 80%), χαλαζία, αστρίους, καολινίτη και αναλλοίωτο ηφαιστειακό γυαλί. Επίσης αποθέσεις μπετονίτη υπάρχουν στη Λέσβο, τη Χίο και τον Έβρο (Μέστη, Συκορράχη). Τα ενδεικτικά αποθέματα μπετονίτη είναι 100 εκατ. Τόνοι.

3.5.2.3 Γενικά χαρακτηριστικά μπετονίτη

Zenith-N.

Ένας μπετονίτης ενεργοποιημένος με Na από την ελληνική νήσο Μήλο, που παρέχει η S & B Βιομηχανικά Ορυκτά Α.Ε.

Προτεινόμενη αναλογία: 6,42 g (μπετονίτης) / 100 g (νερό).

$$WL = 450$$

$$WP = 45$$

Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων 85 meq / 100 g (ενεργοποιημένη με Na)

Ο μπετονίτης αποτελείται κυρίως από μοντμοριλλονίτη (N90%) και ασήμαντο ασβεστολιθικό, δολομίτη και μπετόν.

Η χημική ανάλυση δίνεται στον Πίνακα 3.5.2.3.1.

Η ανάλυση μεγέθους σωματιδίων της σκόνης μπετονίτη δίνεται στο Σχήμα 3.5.2.3.2.

Ειδική επιφάνεια: 65,6 m² / g

Table 1
Chemical analysis of Zenith bentonite

Component	Quantity (%)	Component	Quantity (%)
Na ₂ O	2.01	Fe ₂ O ₃	5.07
MgO	4.02	Al ₂ O ₃	20.25
K ₂ O	0.65	SiO ₂	59.31
CaO	5.92	P ₂ O ₅	0.00
TiO ₂	0.68	LOI ^a	1.83
MnO	0.08		
Sum			99.83

^a Loss of ignition.

Πίνακας 3.5.2.3.1 Χημική ανάλυση του ζενίθ του μπετονίτη

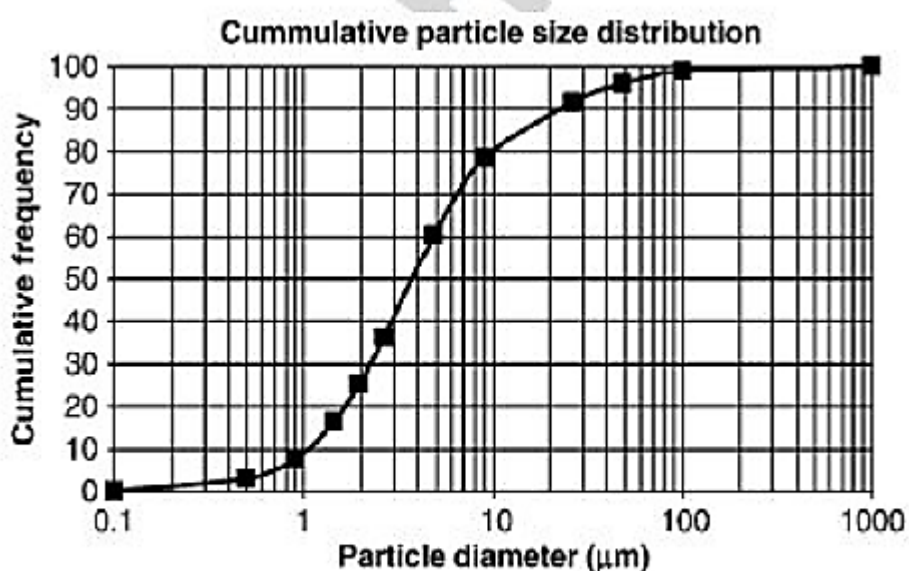


Fig. 1. Cumulative particle size distribution for Zenith bentonite.

Σχήμα 3.5.2.3.2 Συσσωρευτική κατανομή μεγέθους σωματιδίων

3.5.2.4 Ιδιότητες και χρήσεις μπετονίτη και μοντμοριλλονίτη

Ο μοντμοριλλονίτης χαρακτηρίζεται από μεγάλη προσροφητική ικανότητα, υψηλή πλαστικότητα, δυνατότητα ιοντοανταλλαγής, δράσης ως συνδετικό υλικό, θιξοτροπία σε ιζώδη αιωρήματα, δυνατότητα να δρα σαν συνδετικό υλικό. Μπορεί να απορροφήσει μεγάλο ποσοστό νερού (περίπου το 75% του όγκου του). Χρησιμοποιείται σε γεωτρήσεις πετρελαίου

(πολφός, λειαντικό, στεγανοποιητικό), σε υδρογεωτρήσεις (στεγανοποιητικό, καθαριστικό τοιχωμάτων), στη σφαιροποίηση σιδηρομεταλλεύματος, σε άμμους χυτηρίων, στην ταφή ραδιενεργών αποβλήτων (δεύσμευση των ραδιενεργών κατιόντων), στην κατασκευή φραγμάτων (συνθετικό τοιμεντενέσεων), σε διαυγαστικές και αποχρωστικές γαίες, σε κεραμικά, στη χαρτοποιία, στη βιομηχανία καλλυντικών, σε απολυμαντικά, σε λιπάσματα και φυτοφάρμακα, στη διάθεση στερεών αποβλήτων.

Επιπλέον χρησιμοποιείται σε:

- ✓ Στις γεωτρήσεις (ως λειαντικό των γεωτρήσεων και στεγανοποιητικό των τοιχωμάτων της γεώτρησης)
- ✓ Στη βιομηχανία (στη διάγνωση βρώσιμων ελαίων)
- ✓ Στη παραγωγή σιδήρου (ως συνδετικό υλικό στη σφαιροποίηση των σιδηρομεταλλευμάτων)
- ✓ Στην άμμο υγιεινής (ως προσροφητικό υλικό)
- ✓ Στην κεραμική
- ✓ Στην αγγειοπλαστική
- ✓ Στην κατασκευή δομικών και μονωτικών υλικών

3.6 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Για την παρασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε μάρμαρο (Κοζάνης), το οποίο κόπηκε και διαμορφώθηκε με την χρήση των μηχανημάτων που αναφέραμε στα παραπάνω κεφάλαια στο εργαστήριο σκυροδέματος του ΔΙ.ΠΑ.Ε. Αφού τα απαραίτητα υλικά είχαν συγκεντρωθεί, ακολούθησε η διαδικασία της ζύγισης, όπου μετρήθηκε η ακριβής ποσότητα εποξειδικής ρητίνης, σκληρυντή, νερού αλλά και μπετονίτη στο δεύτερο και τρίτο κύκλο παρασκευής. Μετά την ζύγιση των παραπάνω υλικών, περάσαμε στην τοποθέτηση τους στο δοχείο του αναδευτήρα πολλών στροφών για την διαδικασία ανάδευσης. Η διαδικασία αυτή διαρκούσε κατά μέσο 10 λεπτά της ώρας, με σκοπό την διάλυση της εποξειδικής ρητίνης στο νερό και τη δημιουργία ενός ομογενοποιημένου μείγματος. Ο τρόπος και οι δοσολογίες ανάμιξης παρουσιάζονται παρακάτω:

EpoxyResin/Water = 1/1.5

→ 160gr EpoxyResin + 53.4gr σκληρυντής + 320gr H₂O (+16gr Betonite)

EpoxyResin/Water = 1/1

→ 240gr EpoxyResin + 80gr σκληρυντής + 320gr H₂O (+16gr Betonite)

EpoxyResin/Water = 1.5/1

→ 180gr EpoxyResin + 60gr σκληρυντής + 160gr H₂O (+8gr Betonite)

EpoxyResin/Water = 2/1

→ 240gr EpoxyResin + 80gr σκληρυντής + 160gr H₂O (+8gr Betonite)

EpoxyResin/Water = 3/1

→ 360gr EpoxyResin + 120gr σκληρυντής + 160gr H₂O (+8gr Betonite)



Εικόνα 3.6.1 Σταδιακή ρίψη νερού στο δοχείο του αναδευτήρα



Εικόνες 3.6.2 και 3.6.3 Σταδιακή ρίψη εποδειδικής ρητίνης στο δοχείο του αναδευτήρα



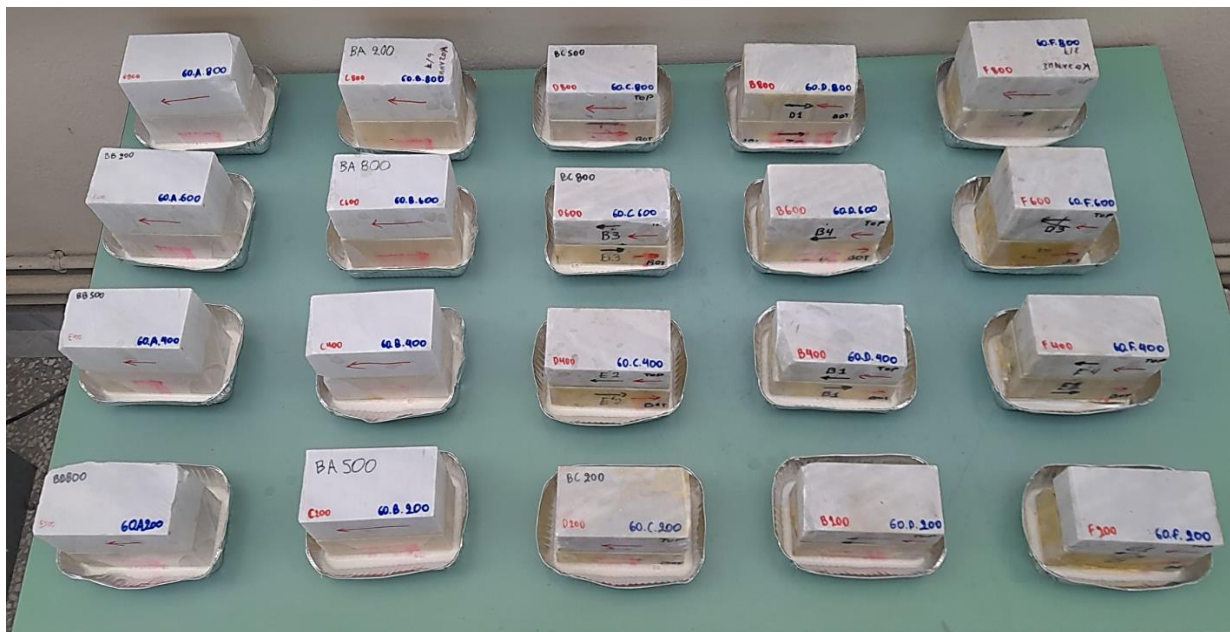
Εικόνα 3.6.4 Ανάδευση των συστατικών στον αναδευτήρα πολλών στροφών

Το τελικό ομογενοποιημένο μείγμα που προκύπτει μετά την ανάμιξη απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα 3.6.5



Εικόνα 3.6.5 Μείγμα μετά την ανάμιξη των υλικών

Τέλος το μείγμα αυτό εγχέεται στην ασυνέχεια, δηλαδή στην διεπιφάνεια δυο δοκιμίων όπως φαίνεται στην εικόνα 3.6.6



Εικόνα 3.6.6 Παρασκευή των δοκιμίων

Τα δοκίμια αυτά μετά την πάροδο των αντίστοιχων χρόνων σκλήρυνσης 7 και 90 ημερών υποβάλλονται στην δοκιμή άμεσης διάτμησης στο αντίστοιχο εργαστηριακό μηχάνημα. Ο τρόπος καθώς και οι πληροφορίες για το μηχάνημα παρουσιάζονται στο παρακάτω κεφάλαιο.

3.7 Δοκιμή άμεσης διάτμησης ασυνεχειών (Muralha et al. - ISRM, 2014)

Η δοκιμή της άμεσης διάτμησης ασυνεχειών πραγματοποιείται για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής της ενδιαφερόμενης για το έργο ασυνέχειας. Λόγω της δυσκολίας της δοκιμής διάτμησης σε κλίμακα πεδίου πραγματοποιούνται δοκιμές εργαστηρίου. Υπάρχουν δυο κατηγορίες δοκιμών, η σταθερού φορτίου (Constant Normal Load - CNL) και η σταθερής δυσκαμψίας (Constant Normal Stiffness - CNS). Η πρώτη περιγράφει την ολίσθηση των ασυνεχειών που πραγματοποιούνται κοντά στην επιφάνεια και είναι ελεύθερες να διασταλούν. π.χ μελέτη ευστάθεια πρανούς, ενώ η δεύτερη κατηγορία προσομοιάζει την κατάσταση που η ορθή τάση μεταβάλλεται κατά την διάτμηση λόγω του περιορισμού της διαστολής της ασυνέχειας π.χ Υπόγειες εκσκαφές. Στην παρούσα έρευνα όλες οι δοκιμές άμεσης διάτμησης

πραγματοποιήθηκαν με σταθερό φορτίο (CNL). Ο κανονισμός που περιγράφει την δοκιμή είναι της ISRM (Muralha et al. 2014) και της ASTM D5607.

3.7.1 Προετοιμασία διάταξης δοκιμίου

Σύμφωνα με τον κανονισμό της ISRM (2014) τα δοκίμια πρέπει να είναι κανονικού σχήματος (ορθογωνικού ή ελλειπτικού). Το μήκος της ασυνέχειας κατά το οποίο πραγματοποιείται η διάτμηση θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσιο από το ύψος της μέγιστης προεξοχής. Το πλάτος του δοκιμίου (κάθεται στην διεύθυνση διάτμησης) πρέπει να είναι τουλάχιστον 48mm αντιστοιχώντας σε πυρήνες δειγματοληψίας NQ. Επιπλέον, η μέγιστη διακύμανση του πλάτους δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 75% του μέγιστου πλάτους.

Πριν την τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή διάτμησης, το δοκίμιο τοποθετείται σε ειδικές μήτρες, άνω και κάτω τμήματος αντίστοιχα, με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσαρμογή του κατά τη διατμητική μετατόπιση. Στο πρώτο στάδιο η τάση που πραγματοποιείται με μόνη ορθή δύναμη το ίδιο βάρος του δοκιμίου, χρησιμοποιούνται μήτρες από ελαφρύ υλικό plexiglass, ενώ για τα επόμενα στάδια ορθών τάσεων χρησιμοποιούνται χαλύβδινες.



Εικόνα 3.7.1.1 Μήτρες τοποθέτησης δοκιμίων άμεσης διάτμησης ασυνχειών.



Εικόνα 3.7.1.2 Τοποθέτηση των δοκιμίων στις μήτρες

Τέλος, πριν και μετά από κάθε δοκιμή άμεσης διάτμησης φωτογραφίζεται το δοκίμιο και αναγράφεται η τάση στην οποία πρόκειται να υποβληθεί ή στην οποία υποβλήθηκε.

3.7.2 Διεξαγωγή δοκιμής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών

Σύμφωνα με τον κανονισμό οι δοκιμές άμεσης διάτμησης των ασυνεχειών υπό σταθερό ορθό φορτίο (CNL) μπορούν να διεξαχθούν με τους παρακάτω τρόπους:

α) Μέθοδος απλού σταδίου

β) Μέθοδος πολλαπλών σταδίων με ή χωρίς επανατοποθέτηση της ασυνέχειας στην αρχική της θέση για κάθε στάδιο διάτμησης.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή έρευνα όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο του απλού σταδίου.

Η διάταξη για την διεξαγωγή της δοκιμής άμεσης διάτμησης παρουσιάζεται στην

Εικόνα 3.7.2.1. Συγκεκριμένα απαρτίζεται από:

- ✓ Σειρά δυναμοδακτυλίων. Ανάλογα την διατμητική δύναμη που θα απαιτηθεί τοποθετείτε δυναμοδακτύλιος 2,10 ή 30 kN.
- ✓ 4 μηκυσιομέτρα. Τα δυο από αυτά τοποθετούνται κατακόρυφα στις δύο άκρες του πάνω δοκίμιου ώστε να καταστεί δυνατή η στιγμιαία μέτρηση της διαστολής. Ένα μηκυσιομέτρο τοποθετείται στο κάτω δοκίμιο και παράλληλα με την φορά της διατμητικής μετατόπισης, ώστε να υπάρξει καταγραφή αυτής. Το τελευταίο μηκυσιομέτρο είναι τοποθετημένο στον εκάστοτε δυναμοδακτύλιο ώστε να

καταγράφει την στιγμιαία παραμόρφωση του που με την αντίστοιχη σταθερά του δυναμοδακτυλίου εκφράζεται σε μονάδες δύναμης (kN).

- ✓ Επεξεργαστής MPX300 για την ηλεκτρονική και αυτοματοποιημένη καταγραφή των δεδομένων των μηχανομετρών και ηλεκτρονικός υπολογιστής που συνδέεται ο επεξεργαστής.
- ✓ Έμβολο πρέσας TRISCAN 100 σε οριζόντια θέση. Μέσω του εμβόλου που έρχεται σε επαφή με το μεταλλικό πλαίσιο που είναι τοποθετημένο το δοκίμιο, εφαρμόζεται η μεταβαλλόμενη διατμητική δύναμη ώστε το δοκίμιο να μετατοπίζεται με σταθερό επιλεγόμενο ρυθμό.
- ✓ Έμβολο ορθής τάσης και σύνδεση μια από τις δυο αντλίες σταθερής πίεσης,
 - α) Controls 0-3,5 MPa
 - β) ELE 0-70 MPa. Μέσω του εμβόλου εφαρμόζεται η εκάστοτε επιθυμητή ορθή τάση στο πάνω μέρος του δοκιμίου με την χρήση πρόσθετων μεταλλικών εξαρτημάτων για να καλυφθεί το απαιτούμενο ύψος.
- ✓ Διάταξη πλαισίου ορθής τάσης με χρήση πρότυπων βαρών. Η χρήση του πραγματοποιείται αντί του εμβόλου ορθής τάσης μόνο για χαμηλές ορθές τάσης <100kPa.



Εικόνα 3.7.2.1 Πειραματική διάταξη της συσκευής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών πετρωμάτων και των παρελκόμενων.

Τα βήματα για την δοκιμή της άμεσης διάτμησης είναι:

- 1) Τοποθέτηση και το κεντράρισμα του δοκιμίου με τα απαραίτητα μεταλλικά πλαίσια (μόνο στην πρώτη δοκιμή με νεκρό-ελάχιστο ορθό φορτίο τοποθετείται πλαίσιο μικρού βάρους από Plexiglass) ως προς το επίπεδο διάτμησης και ως προς την επιβολή της ορθής τάσης.
- 2) Τοποθέτηση μεταλλικών δοκών παράλληλα του άξονα διατμήσεως για τη την εξασφάλιση της οριζόντιας διεύθυνσης και εξάλειψης φαινομένων στροφής του δοκιμίου.
- 3) Τοποθέτηση των μηκυσιομέτρων για την καταγραφή της διαστολής, της διατμητικής μετατόπισης και της διατμητική δύναμης.
- 4) Τοποθέτηση πλαισίου εφαρμογής ορθής τάσης με πρότυπα βάρη για χαμηλές ορθές τάσεις (<100kPa) ή εφαρμογή ορθής τάσης μέσω των αντλιών σταθερής πίεσης για μεγαλύτερες ορθές τάσεις (>100kPa).
- 5) Εγκατάσταση επιθυμητού δυναμοδακτυλίου (2,10,30 kN)

- 6) Έναρξη καταγραφής μετρήσεων μέσω του λογισμικού Winhost με συχνότητα καταγραφής 2 δευτερολέπτων
- 7) Έναρξη διατμητικού φορτίου μέσω της πρέσας TRISCAN 100.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

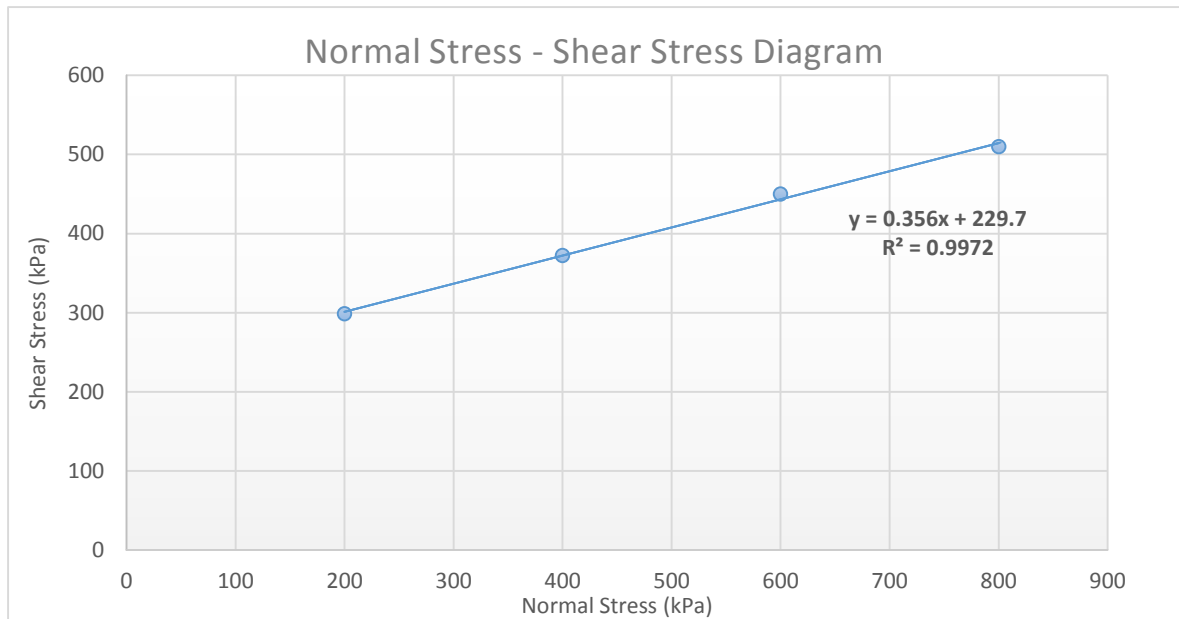
4.1 Εισαγωγή

Τα αποτελέσματα της πειραματικής εργασίας, που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται σε δοκιμές σε επιφάνειες τεχνητών ασυνεχειών που διαμορφώθηκαν σε φυσικό πέτρωμα, πληρωμένες με εποξειδική ρητίνη με διάρκεια σκλήρυνσης 90 ημερών καθώς και μείγμα εποξειδικής ρητίνης – μπετονίτη με διάρκεια σκλήρυνσης 7 ημερών . Οι δοκιμές εκτελέστηκαν στην τυπική συσκευή άμεσης διάτμησης πετρωμάτων υπό συνθήκες σταθερής ορθής τάσης. Ως φυσικό πέτρωμα χρησιμοποιήθηκε τύπος μαρμάρου. Η αναλογία του μπετονίτη που χρησιμοποιήθηκε είναι 5% w/w (κατά βάρος) του μείγματος. Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε τα δεδομένα των πειραματικών εργασιών για να προσδιορίσουμε την επιρροή της εποξειδικής ρητίνης και του μπετονίτη στην συνοχή και την γωνία τριβής των πετρωμάτων αυτών. Οι ορθές τάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στα δοκίμια με μείγμα εποξειδικής ρητίνης – νερού είναι 200kPa, 400kPa, 600kPa και 800kPa αντίστοιχα ενώ για τα δοκίμια με μείγμα εποξειδικής ρητίνης – μπετονίτη υποβλήθηκαν σε ορθές τάσεις 200kPa, 500kPa και 800kPa αντίστοιχα.

4.2 Αποτελέσματα εποξειδικής ρητίνης με διάρκεια σκλήρυνσης 90 ημερών

Αναλογία εποξειδικής ρητίνης – νερού: 1/1.5 (ER/W= 1/1.5)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ER/W	σ (kPa)	τ (kPa)
E'	1/1.5	200	299
		400	372
		600	450
		800	510



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει:

Συνοχή: $c=229.7\text{kPa}$ ή 0.2297MPa

Γωνία τριβής: $\phi=19.60^\circ$

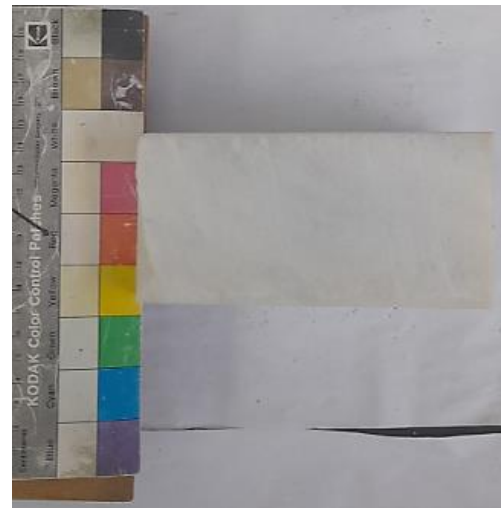
Παρακάτω παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό τις ορθές τάσεις:

Ορθή τάση 200kPa



Εικόνες 4.2.1 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200kPa

Ορθή τάση 400kPa



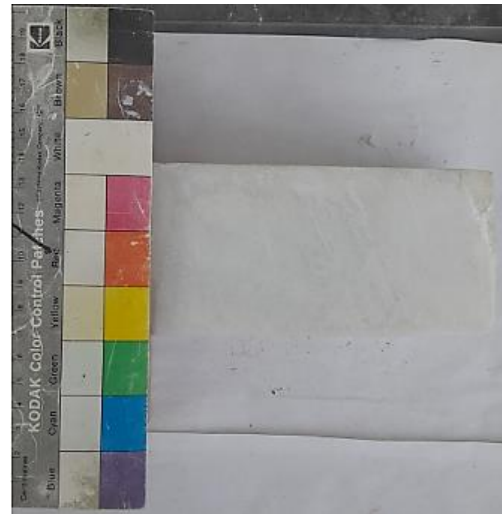
Εικόνες 4.2.2 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 400 kPa

Ορθή τάση 600kPa



Εικόνες 4.2.3 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 600 kPa

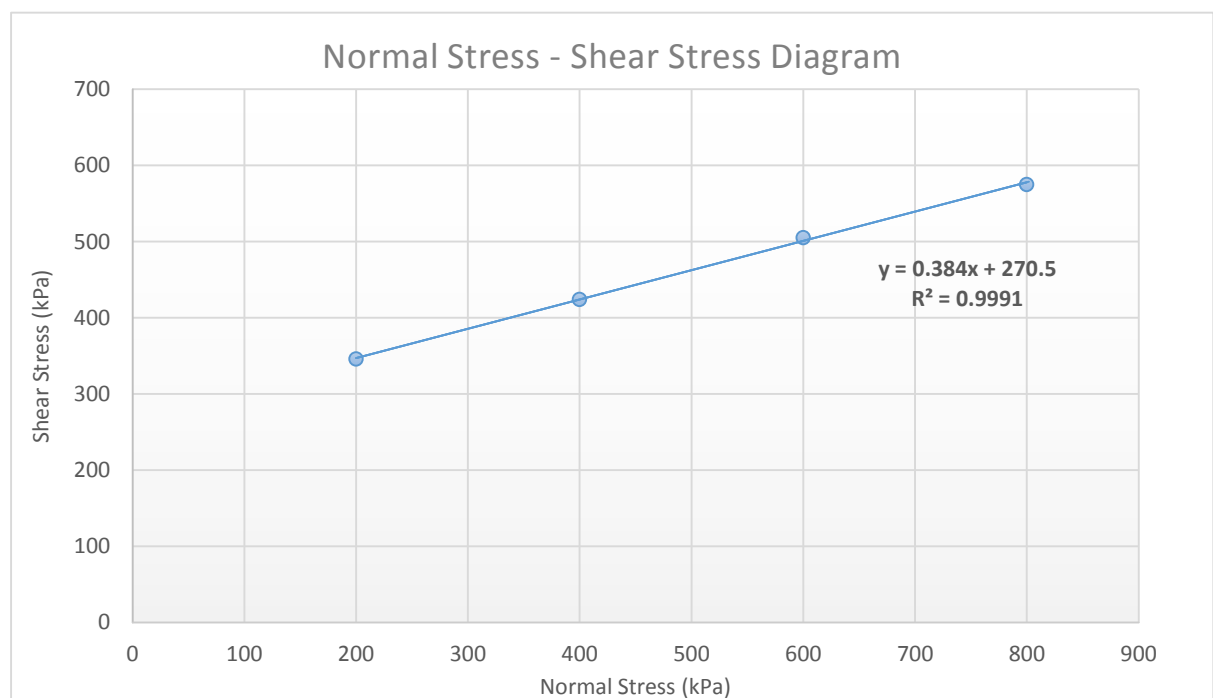
Ορθή τάση 800kPa



Εικόνες 4.2.4 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa

Αναλογία εποξειδικής ρητίνης – νερού: 1/1 (ER/W= 1/1)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	E.R./W	σ (kPa)	τ (kPa)
D'	1/1	200	346
		400	424
		600	505
		800	575



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει:

Συνοχή: $c=270.5 \text{ kPa}$ ή 0.2705 MPa

Γωνία τριβής: $\phi=21.01^\circ$

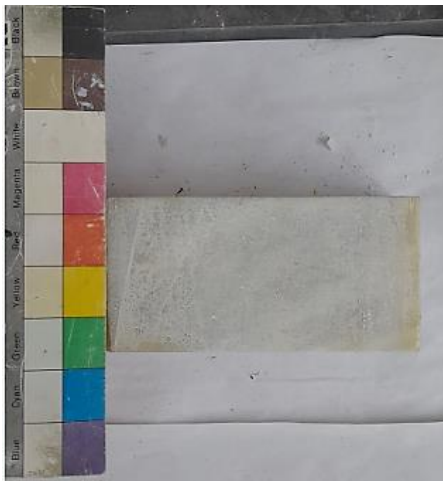
Παρακάτω παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό τις ορθές τάσεις:

Ορθή τάση 200 kPa



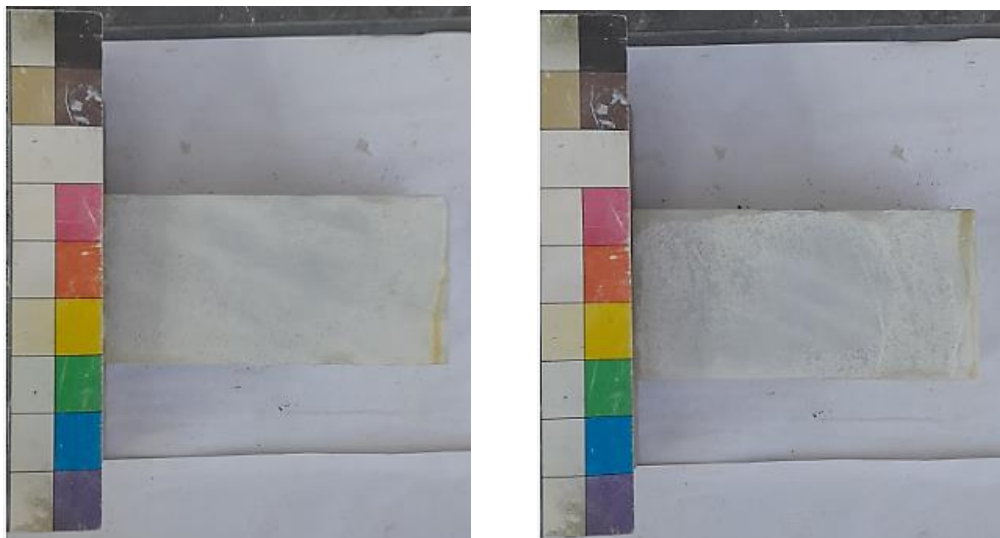
Εικόνες 4.2.5 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa

Ορθή τάση 400 kPa



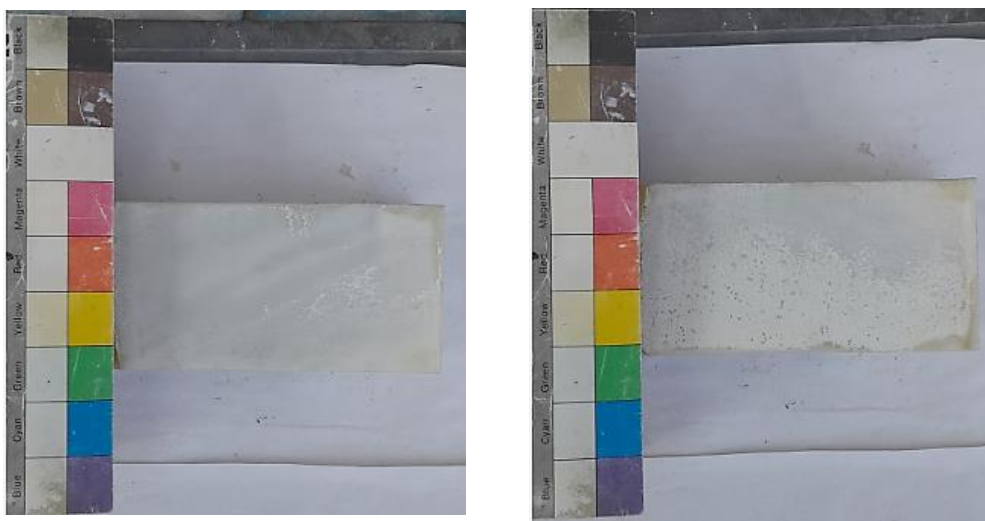
Εικόνες 4.2.6 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 400 kPa

Ορθή τάση 600kPa



Εικόνες 4.2.7 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 600 kPa

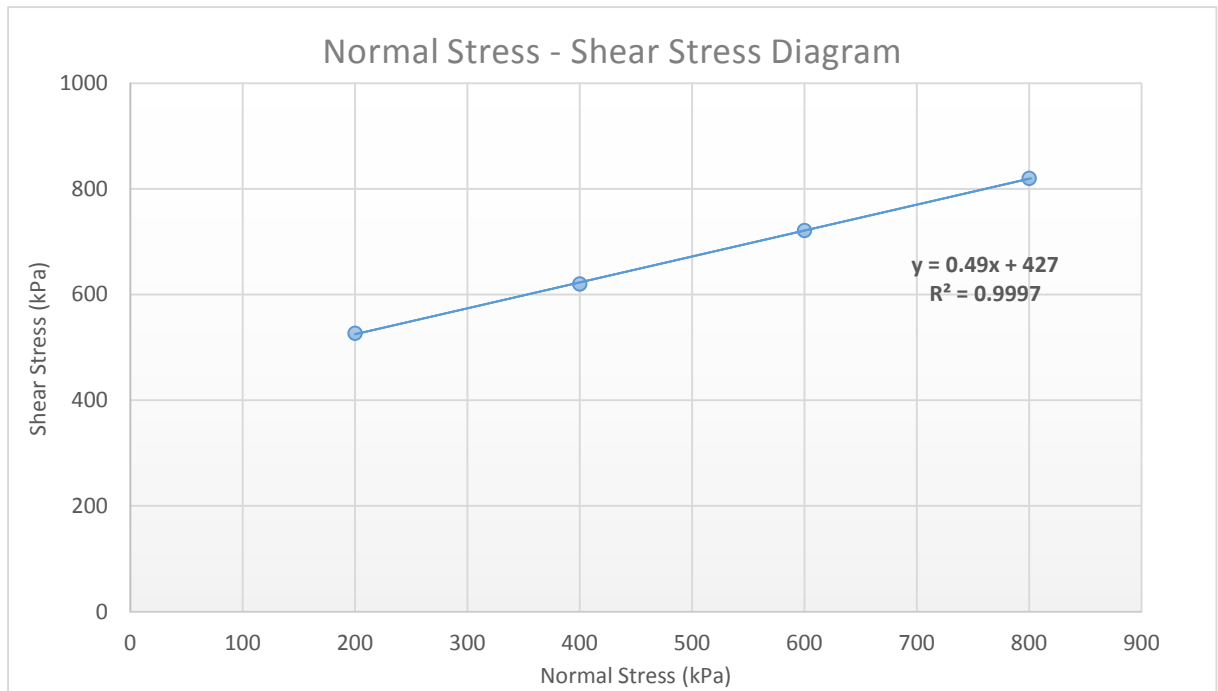
Ορθή τάση 800kPa



Εικόνες 4.2.8 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa

Αναλογία εποξειδικής ρητίνης – νερού: 1.5/1 (ER/W= 1.5/1)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	E.R./W	σ (kPa)	τ (kPa)
C'	1.5/1	200	527
		400	620
		600	721
		800	820



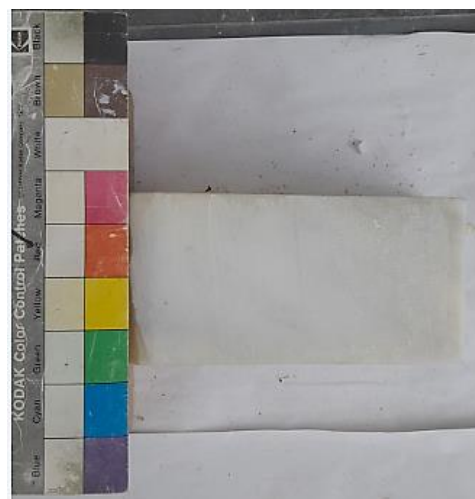
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει:

Συνοχή: $c=427$ kPa ή 0.427 MPa

Γωνία τριβής: $\phi=26.10^\circ$

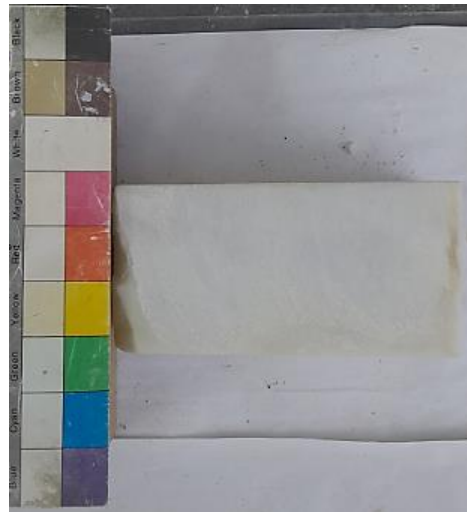
Παρακάτω παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό τις ορθές τάσεις:

Ορθή τάση 200 kPa



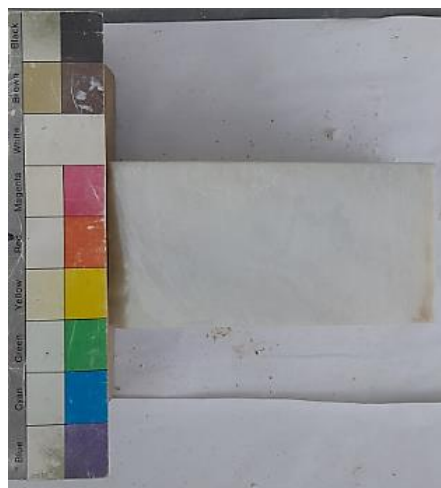
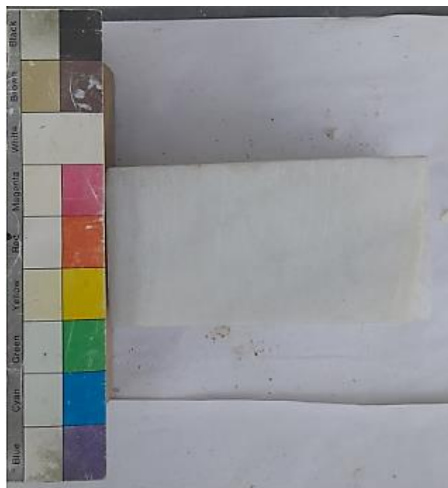
Εικόνες 4.2.9 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa

Ορθή τάση 400kPa



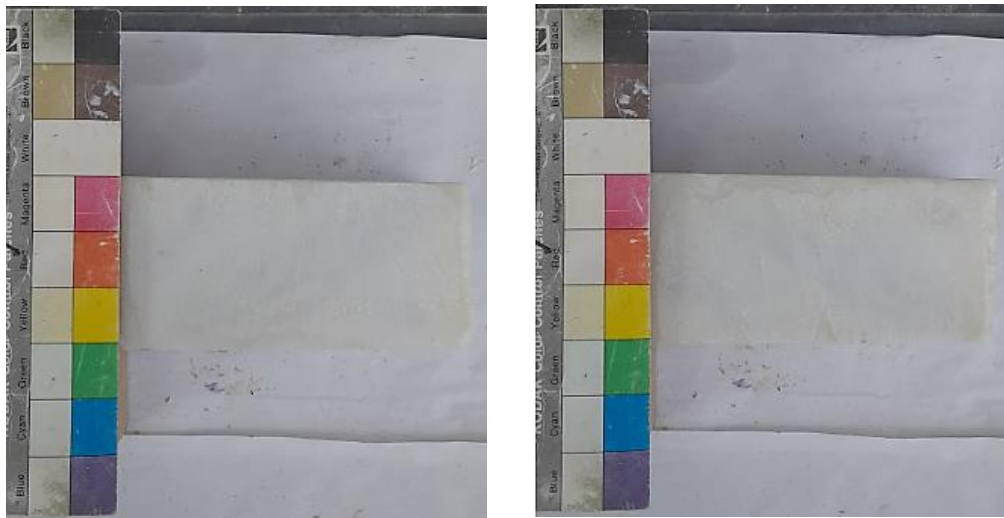
Εικόνες 4.2.10 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 400 kPa

Ορθή τάση 600kPa



Εικόνες 4.2.11 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 600 kPa

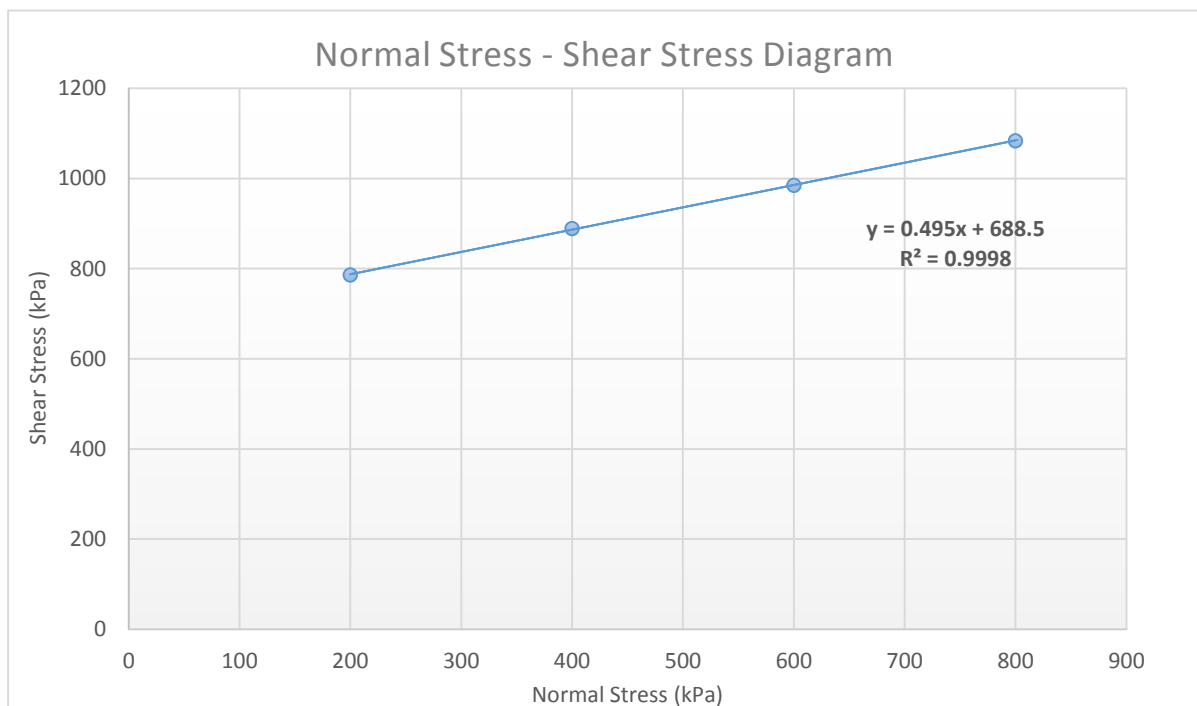
Ορθή τάση 800kPa



Εικόνες 4.2.12 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa

Αναλογία εποξειδικής ρητίνης – νερού: 2/1 (ER/W= 2/1)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	E.R./W	σ (kPa)	τ (kPa)
B'	2/1	200	786
		400	889
		600	985
		800	1084



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει:

Συνοχή: $c=688.5 \text{ kPa}$ ή 0.6885 MPa

Γωνία τριβής: $\phi=26.34^\circ$

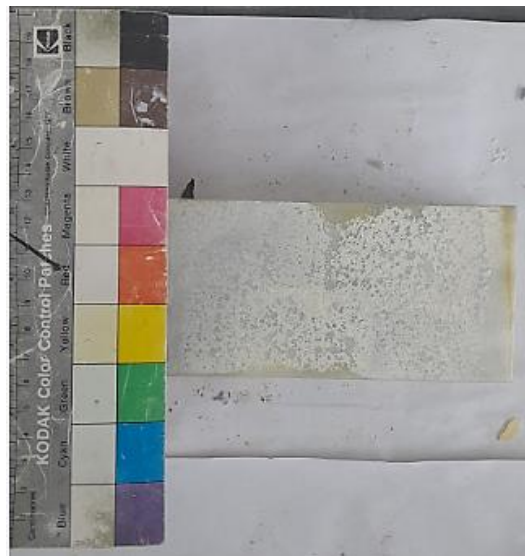
Παρακάτω παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό τις ορθές τάσεις:

Ορθή τάση 200 kPa



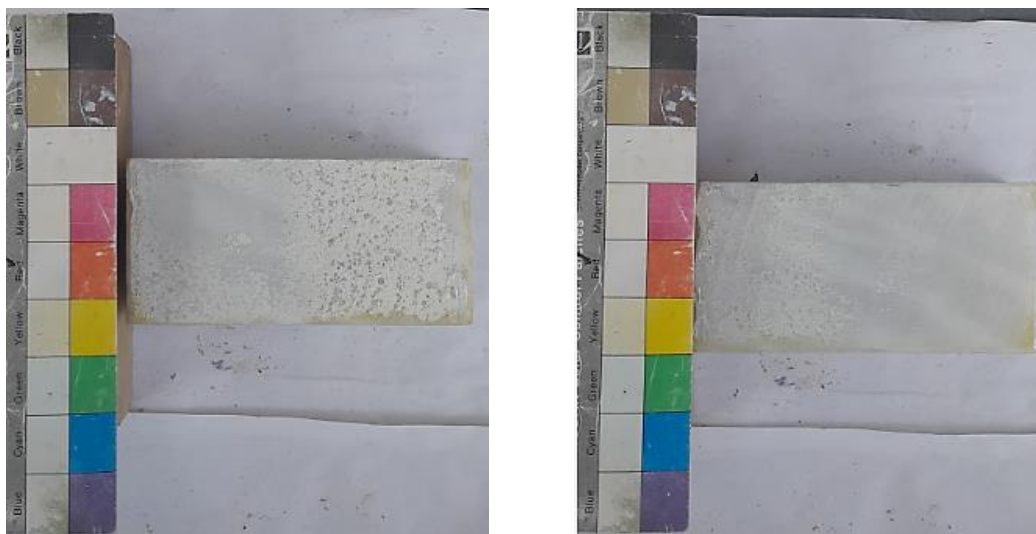
Εικόνες 4.2.13 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa

Ορθή τάση 400 kPa



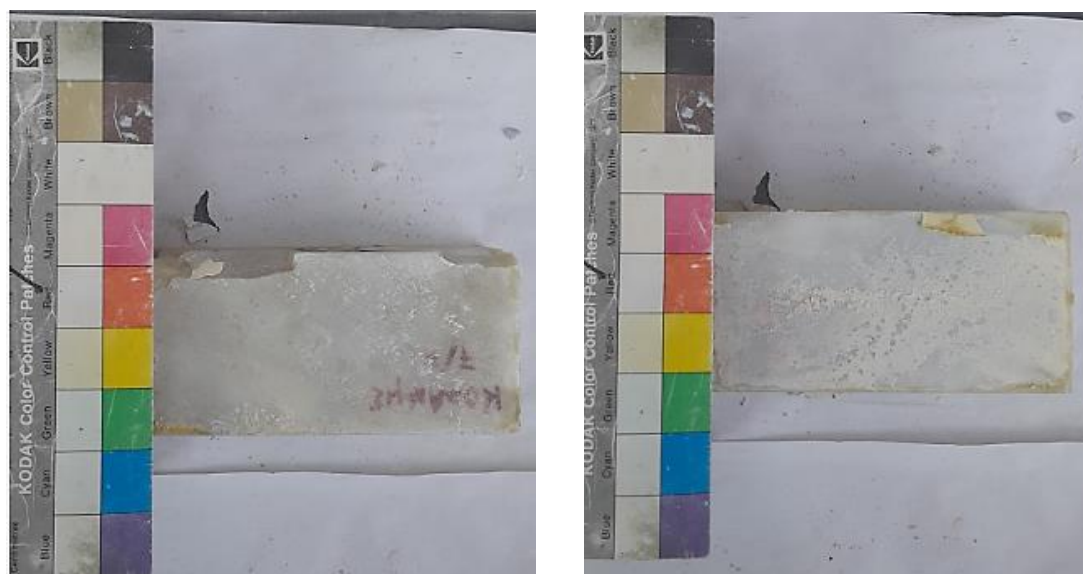
Εικόνες 4.2.14 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 400 kPa

Ορθή τάση 600kPa



Εικόνες 4.2.15 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 600 kPa

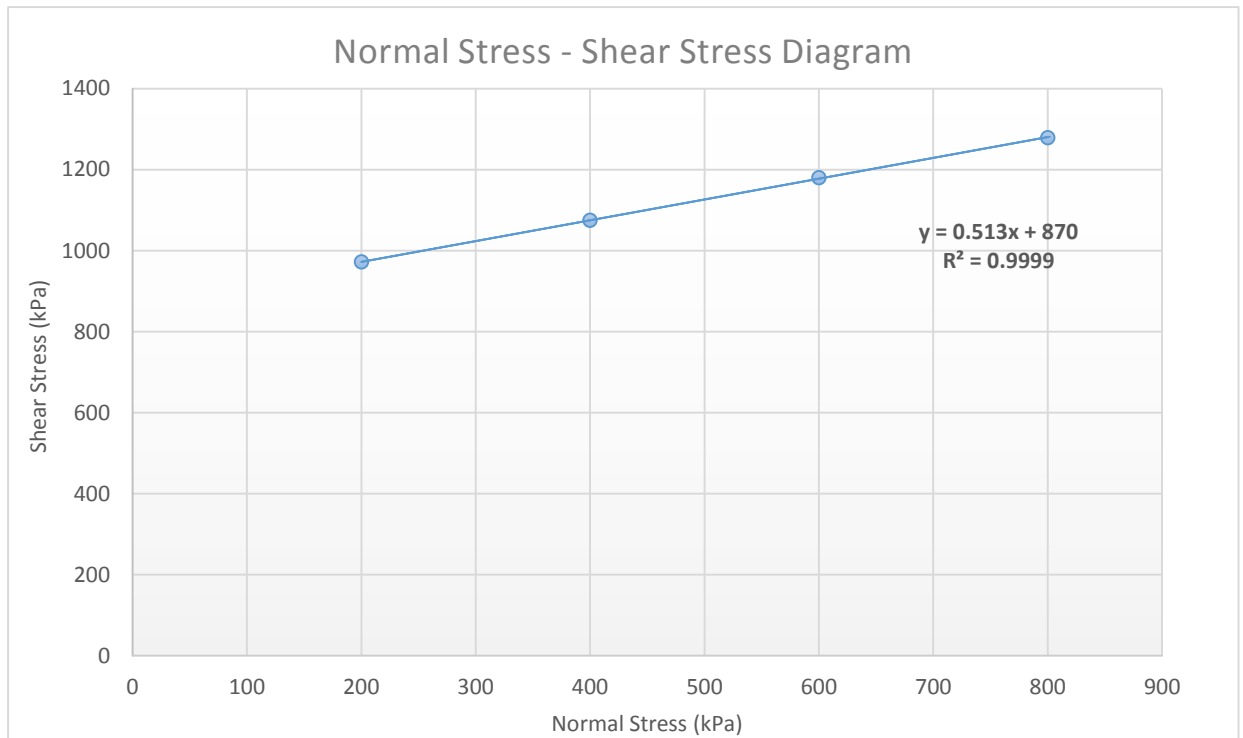
Ορθή τάση 800kPa



Εικόνες 4.2.16 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa

Αναλογία εποξειδικής ρητίνης – νερού: 2/1 (ER/W= 2/1)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	E.R./W	σ (kPa)	τ (kPa)
F'	3/1	200	972
		400	1075
		600	1180
		800	1279



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει:

Συνοχή: $c=870$ kPa ή 0.870 MPa

Γωνία τριβής: $\phi=27.16^\circ$

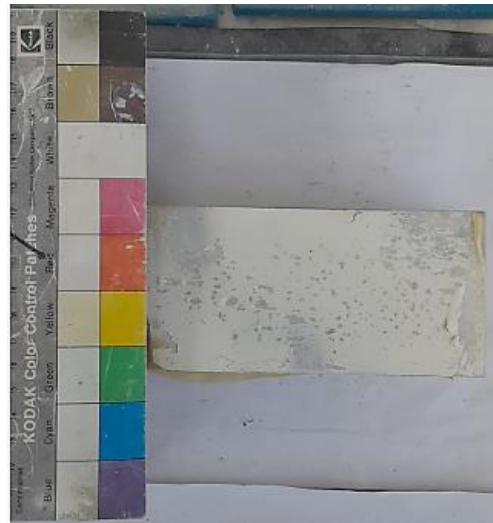
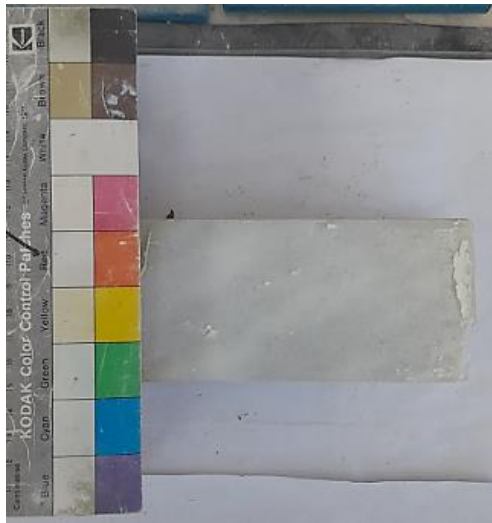
Παρακάτω παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό τις ορθές τάσεις:

Ορθή τάση 200 kPa



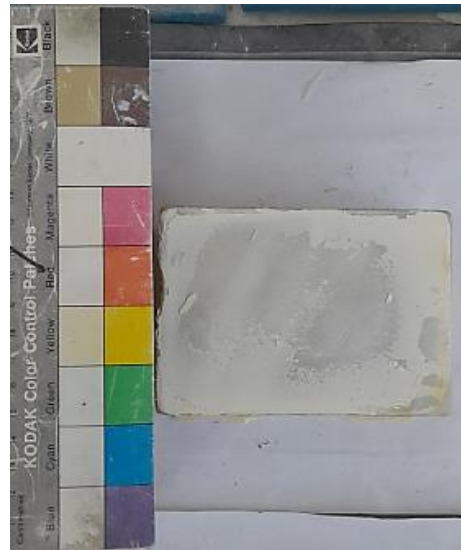
Εικόνες 4.2.17 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa

Ορθή τάση 400kPa



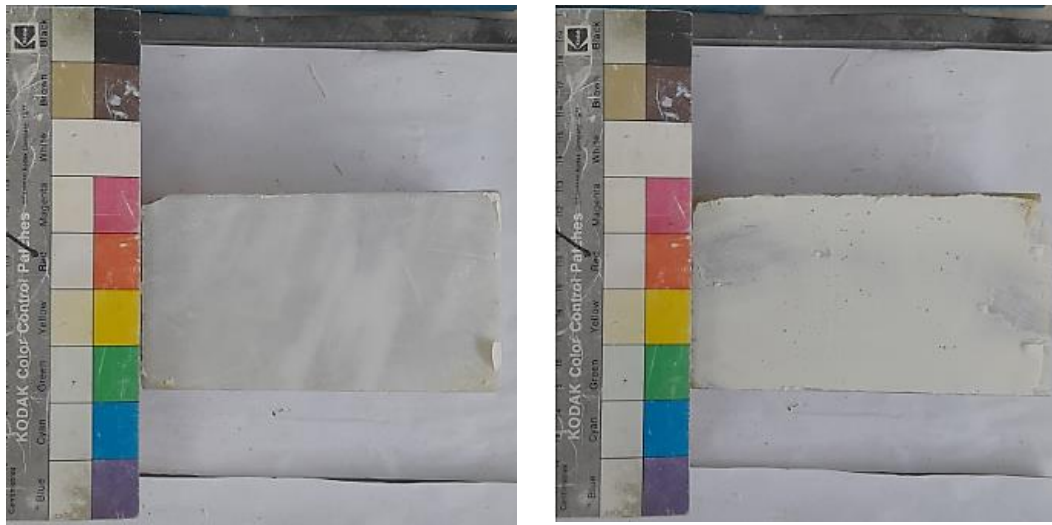
Εικόνες 4.2.18 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 400 kPa

Ορθή τάση 600kPa



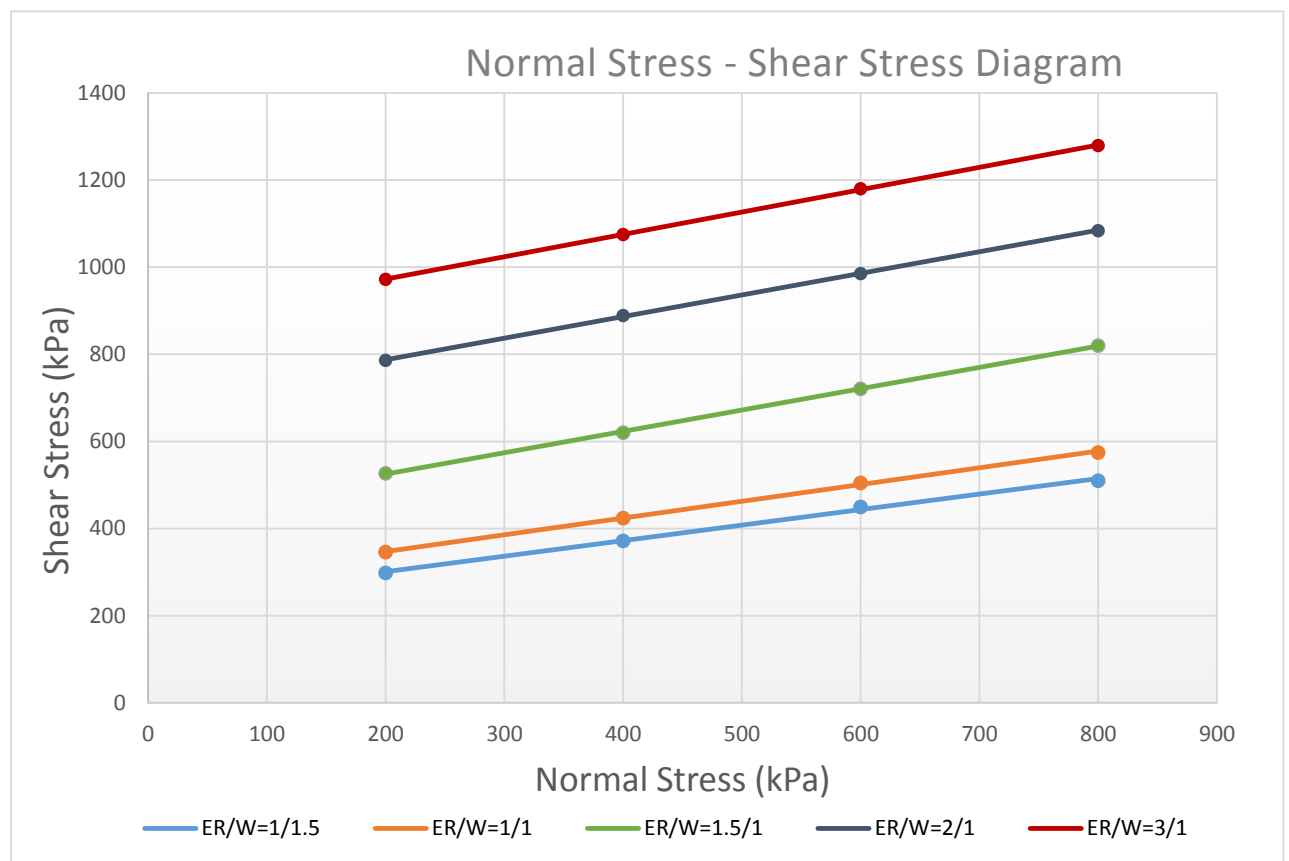
Εικόνες 4.2.19 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 600 kPa

Ορθή τάση 800kPa



Εικόνες 4.2.20 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa

Παρακάτω παρατίθεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα με όλα παραπάνω δεδομένα σε ένα πίνακα:



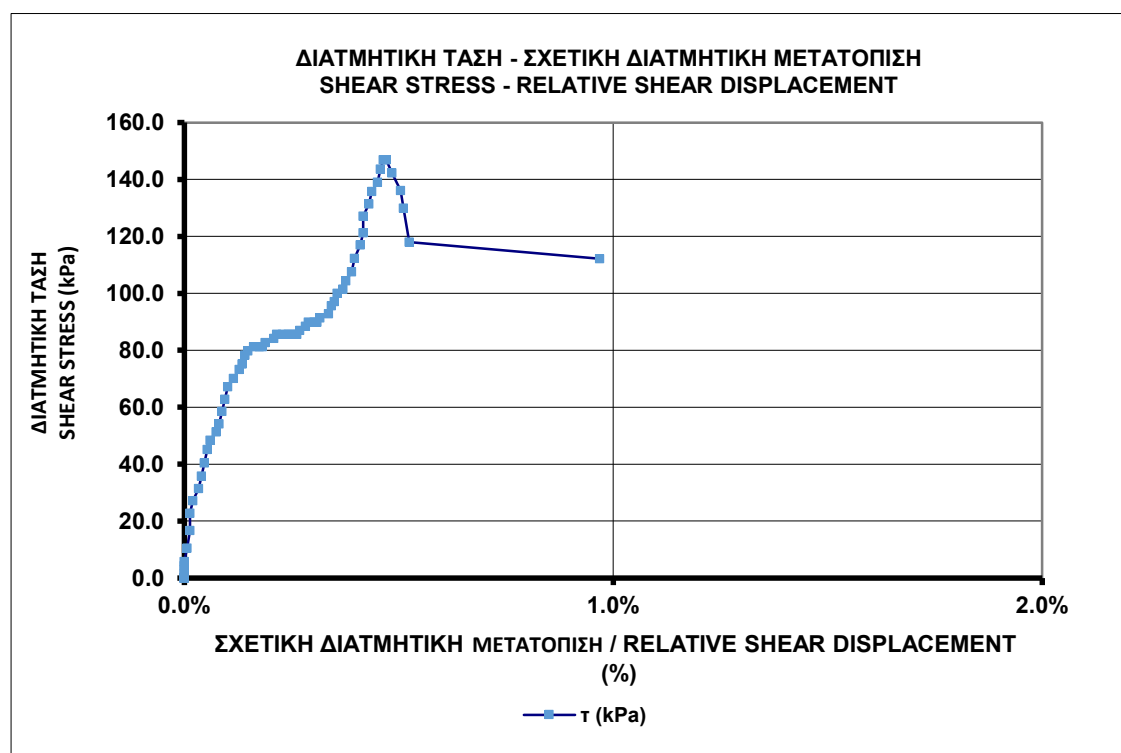
Πίνακας 4.2.21 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ορθής – διατμητικής τάσης δοκιμών εποξειδικής ρητίνης 90 ημερών

4.3 Αποτελέσματα εποξειδικής ρητίνης με προσθήκη μπετονίτη (5% w/w) με διάρκεια σκλήρυνσης 7 ημερών

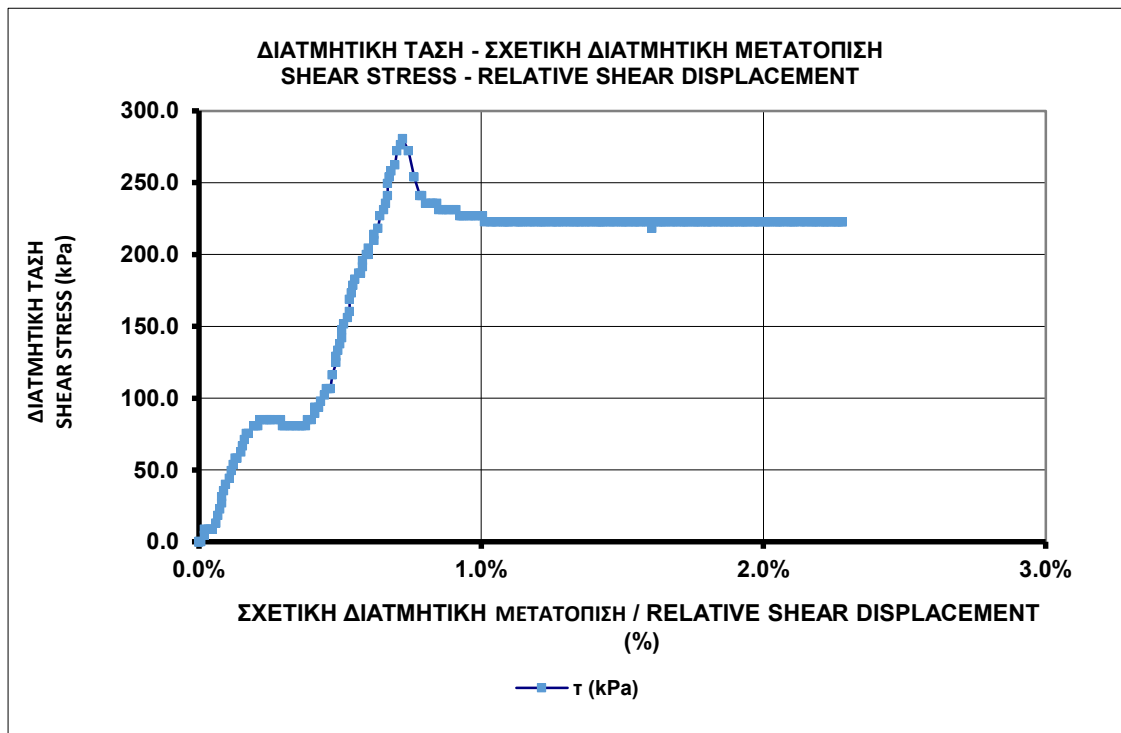
Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες και τα διαγράμματα διατμητικής τάσης - σχετικής διατμητικής μετατόπισης, καθώς και ορθών – διατμητικών τάσεων ξεχωριστά για το κάθε δοκίμιο:

Αναλογία εποξειδικής ρητίνης – νερού: 1/1.5 (ER/W= 1/1.5)

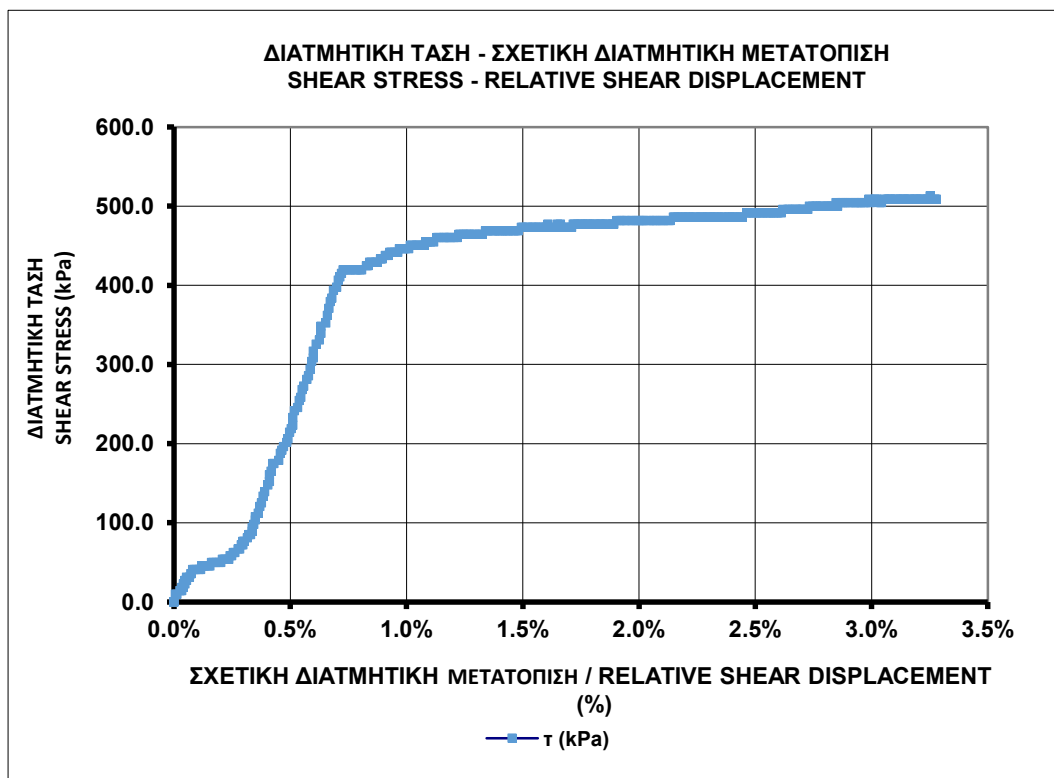
Για ορθή τάση 200 kPa έχουμε:



Για ορθή τάση 500 kPa έχουμε:

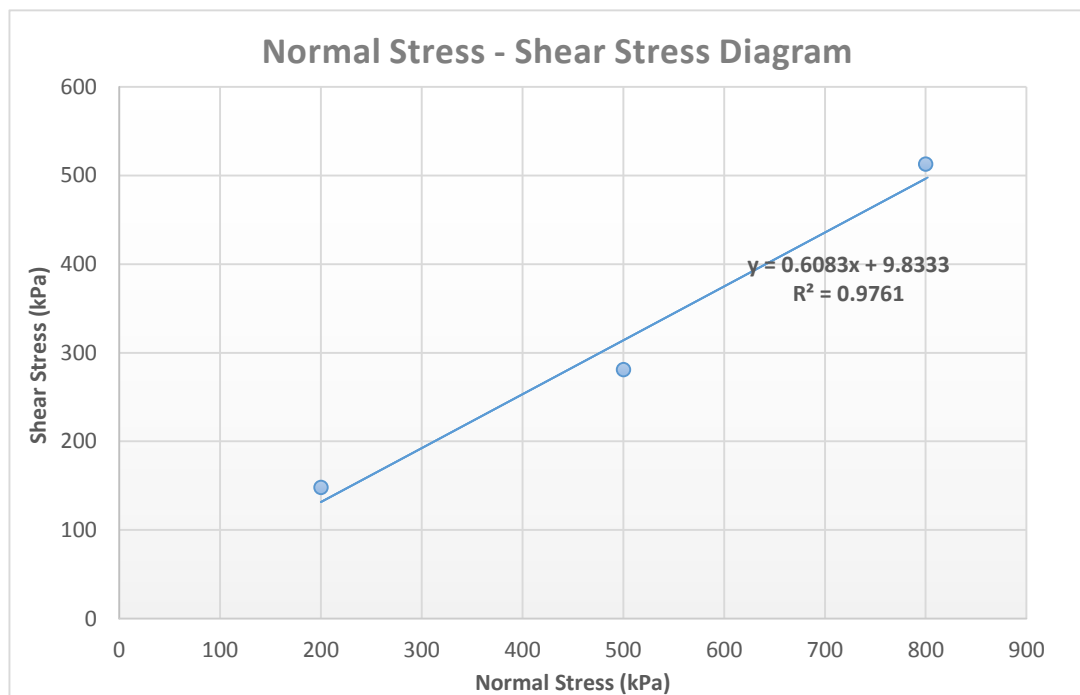


Για ορθή τάση 800 kPa έχουμε:



Στη συνέχεια παρατίθενται ο πίνακας και το διάγραμμα ορθών – διατμητικών τάσεων

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	E.R./W	σ (kPa)	τ (kPa)
BC	1/1.5	200	148
		500	281
		800	513



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει:

Συνοχή: $c=10$ kPa ή 0.1MPa

Γωνία τριβής: $\phi=31.38^\circ$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό τις ορθές τάσεις:

Για ορθή τάση 200 kPa:



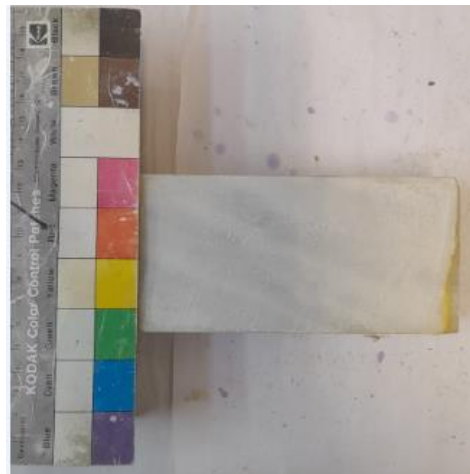
Εικόνες 4.3.1 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa

Για ορθή τάση 500 kPa:



Εικόνες 4.3.2 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 500 kPa

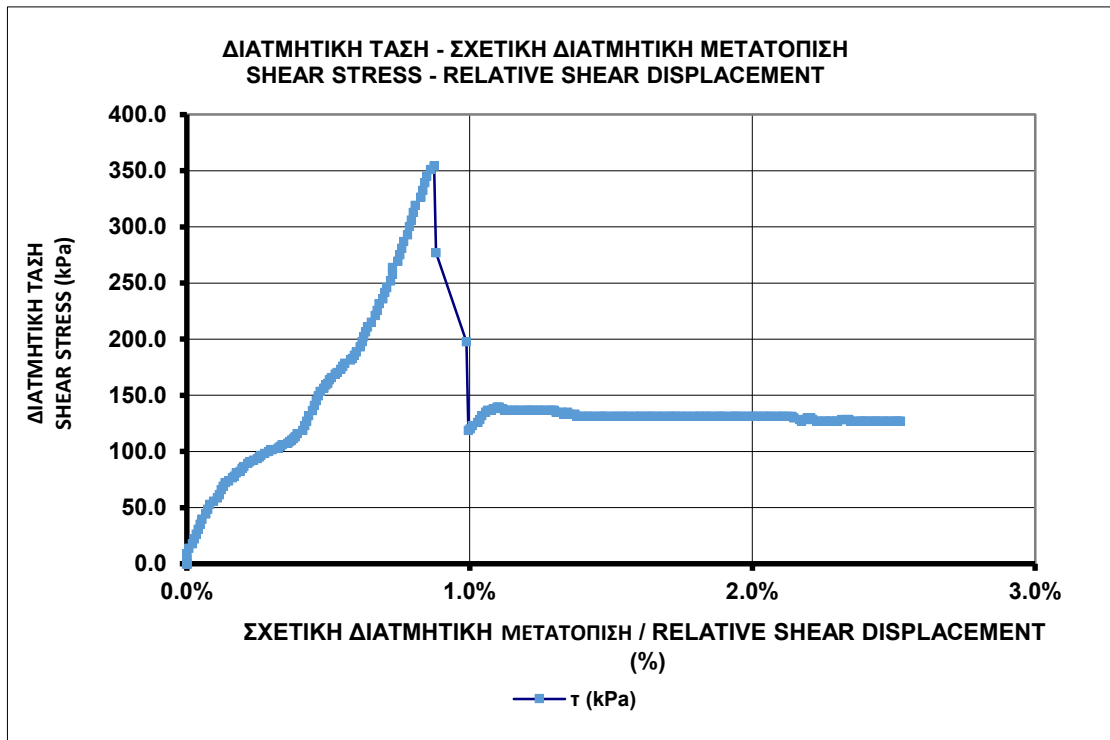
Για ορθή τάση 800 kPa:



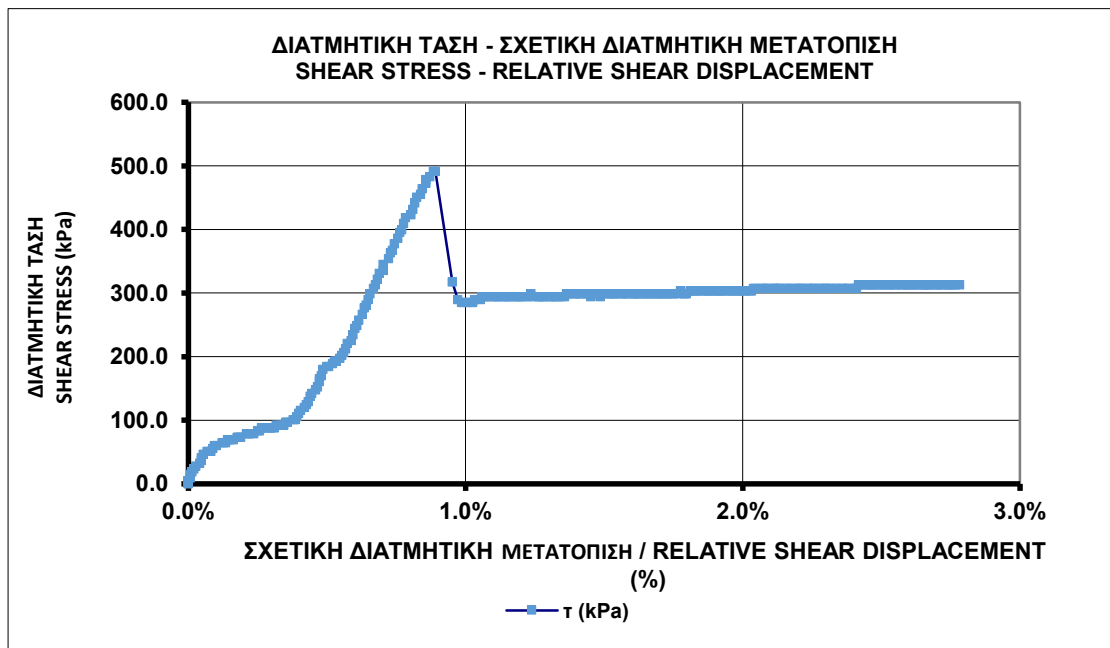
Εικόνες 4.3.3 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa

Αναλογία εποξειδικής ρητίνης – νερού: 1.5/1 (ER/W= 1.5/1)

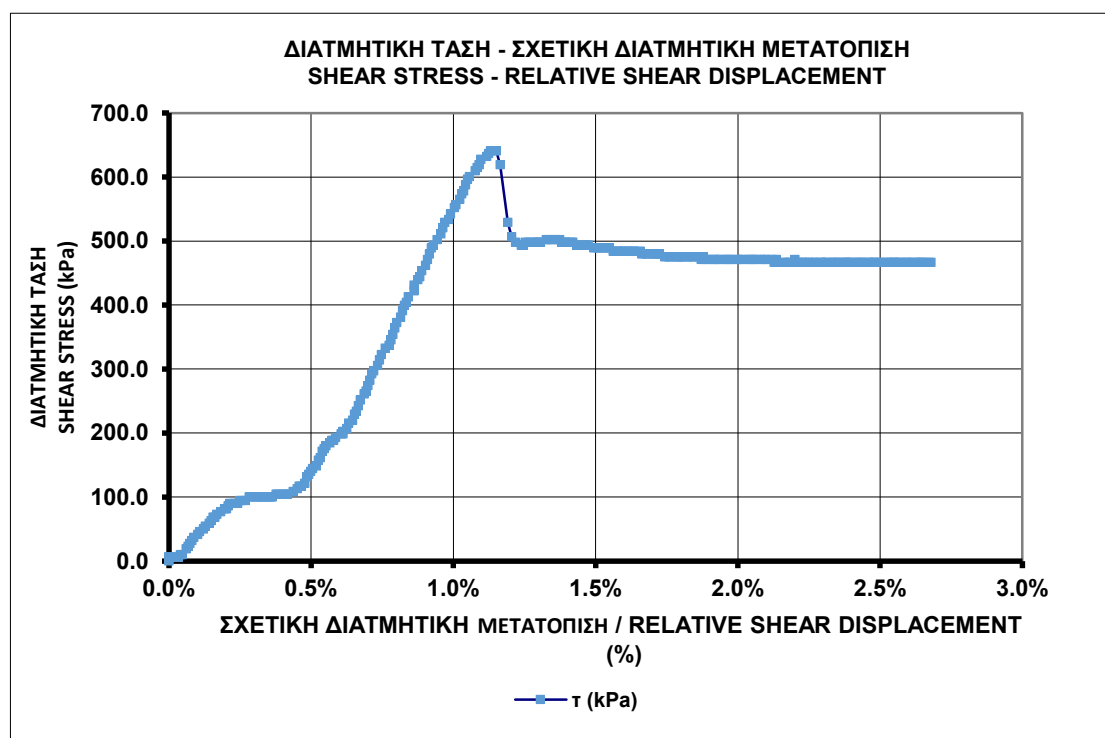
Για ορθή τάση 200 kPa έχουμε:



Για ορθή τάση 500 kPa έχουμε:

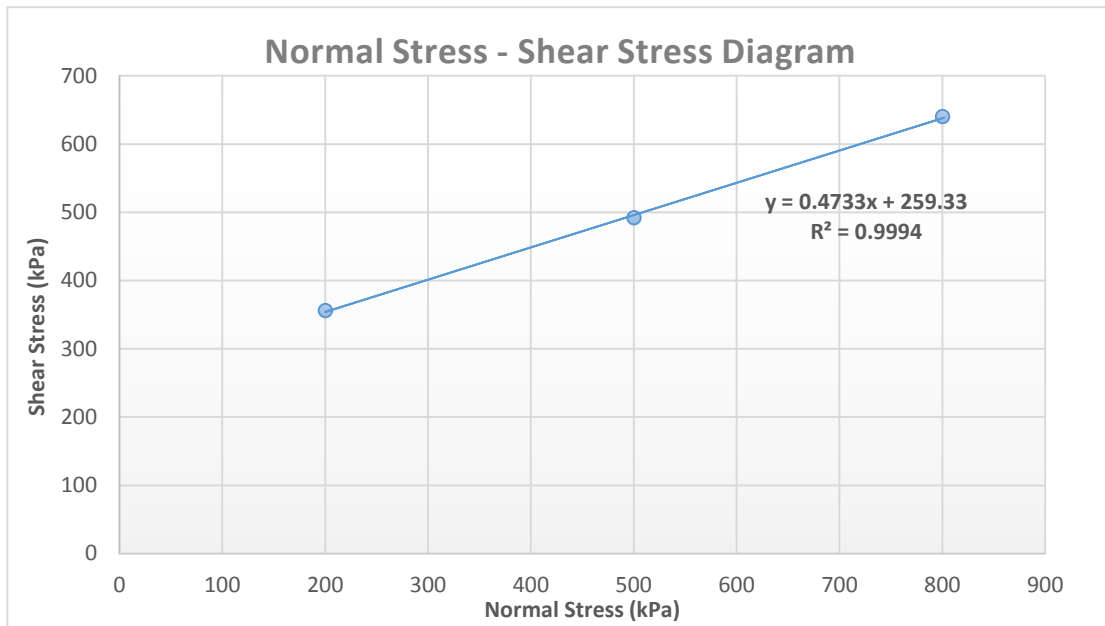


Για ορθή τάση 800 kPa έχουμε:



Στη συνέχεια παρατίθενται ο πίνακας και το διάγραμμα ορθών – διατμητικών τάσεων

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	E.R./W	σ (kPa)	τ (kPa)
BB	1.5/1	200	356
		500	492
		800	640



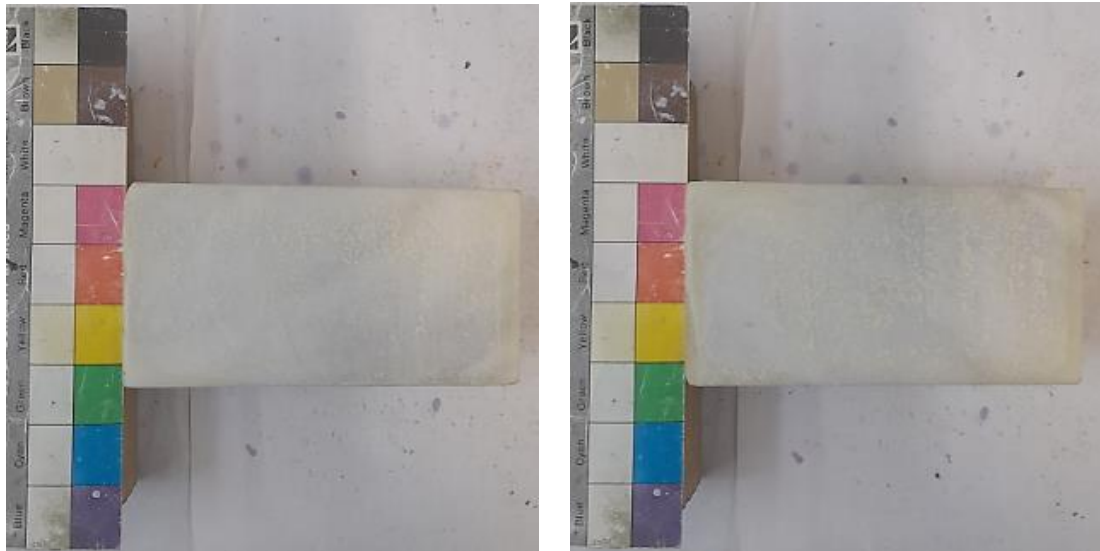
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει:

Συνοχή: $c=259$ kPa ή 0.259 MPa

Γωνία τριβής: $\phi=25.33^\circ$

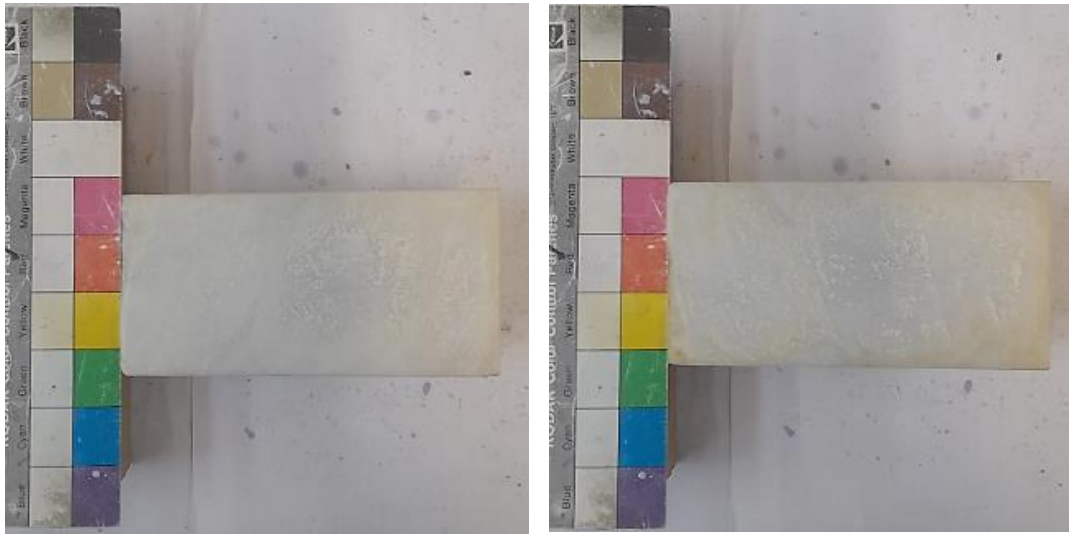
Παρακάτω παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό τις ορθές τάσεις:

Για ορθή τάση 200 kPa:



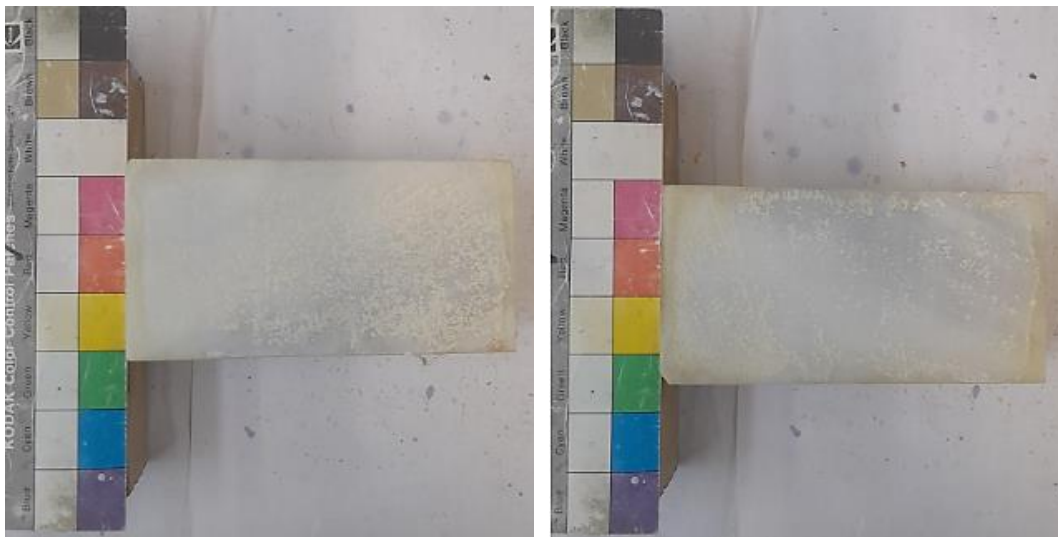
Εικόνες 4.3.4 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa

Για ορθή τάση 500 kPa:



Εικόνες 4.3.5 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 500 kPa

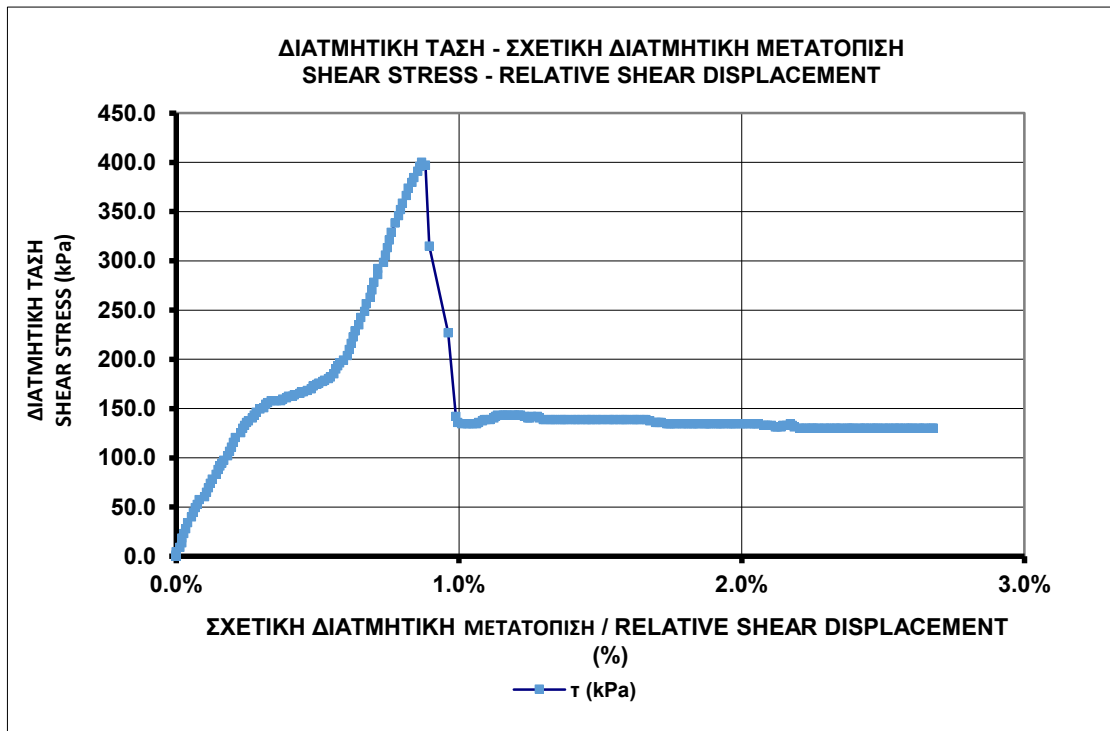
Για ορθή τάση 800 kPa:



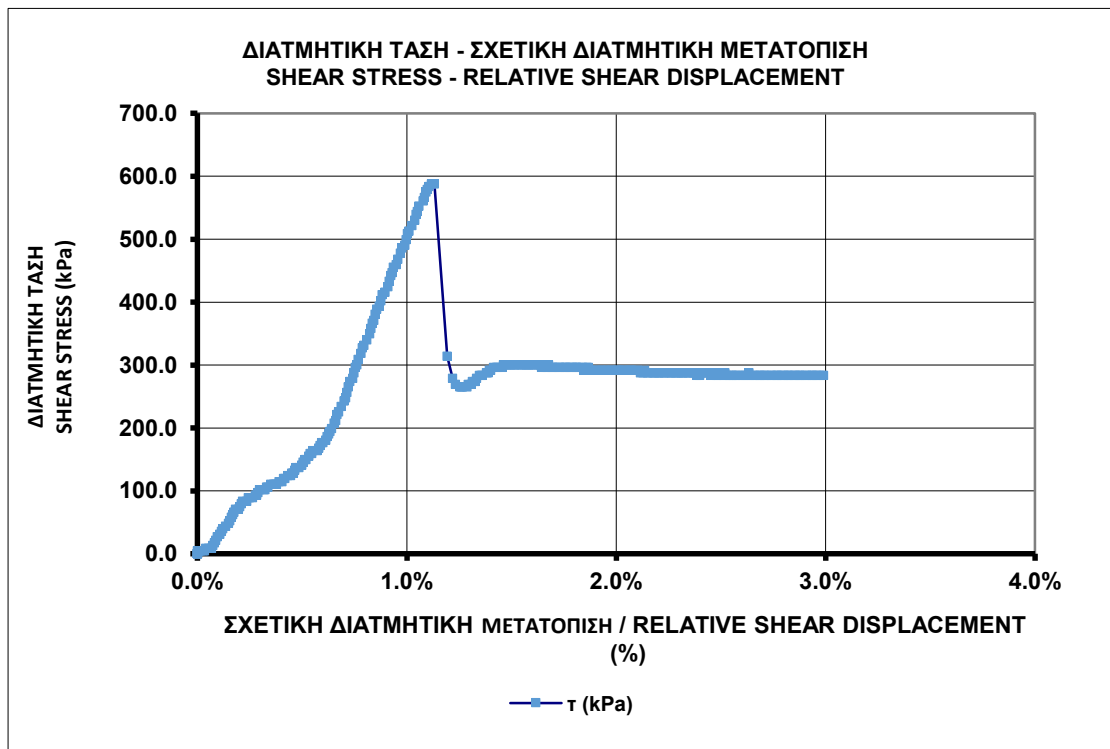
Εικόνες 4.3.6 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa

Αναλογία εποξειδικής ρητίνης – νερού: 3/1 (ER/W= 3/1)

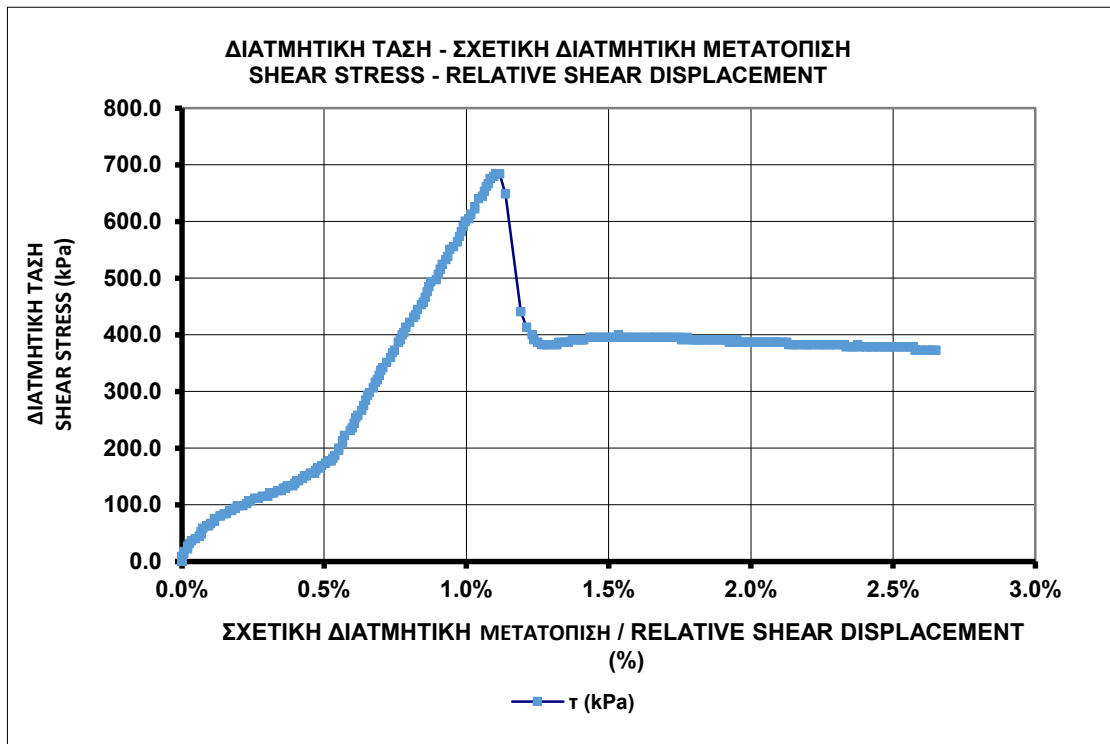
Για ορθή τάση 200 kPa έχουμε:



Για ορθή τάση 500 kPa έχουμε:

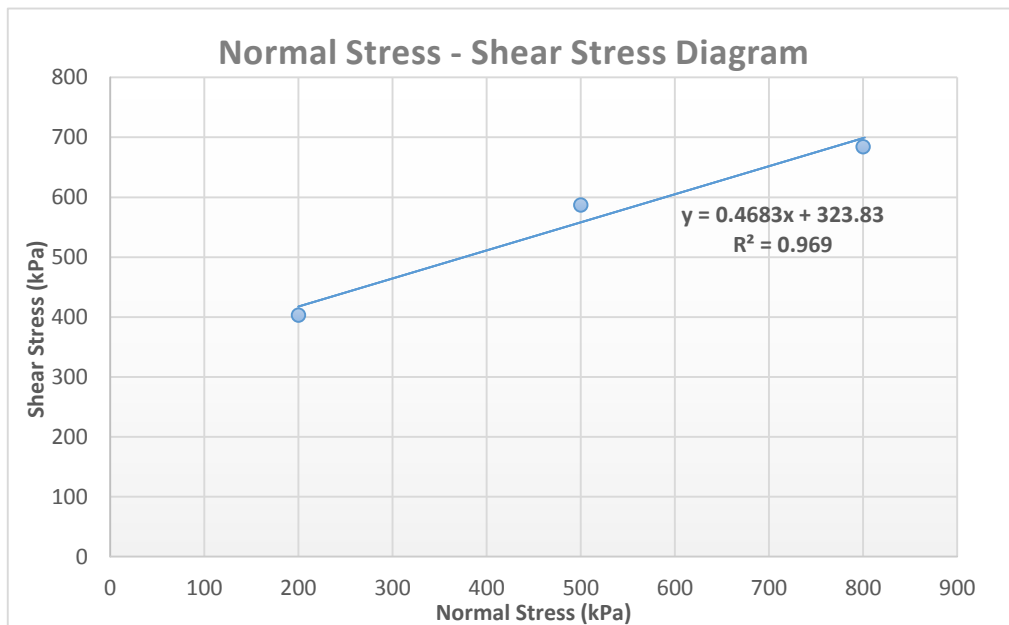


Για ορθή τάση 800 kPa έχουμε:



Στη συνέχεια παρατίθενται ο πίνακας και το διάγραμμα ορθών – διατμητικών τάσεων

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	E.R./W	σ (kPa)	τ (kPa)
BA	3/1	200	403
		500	587
		800	684



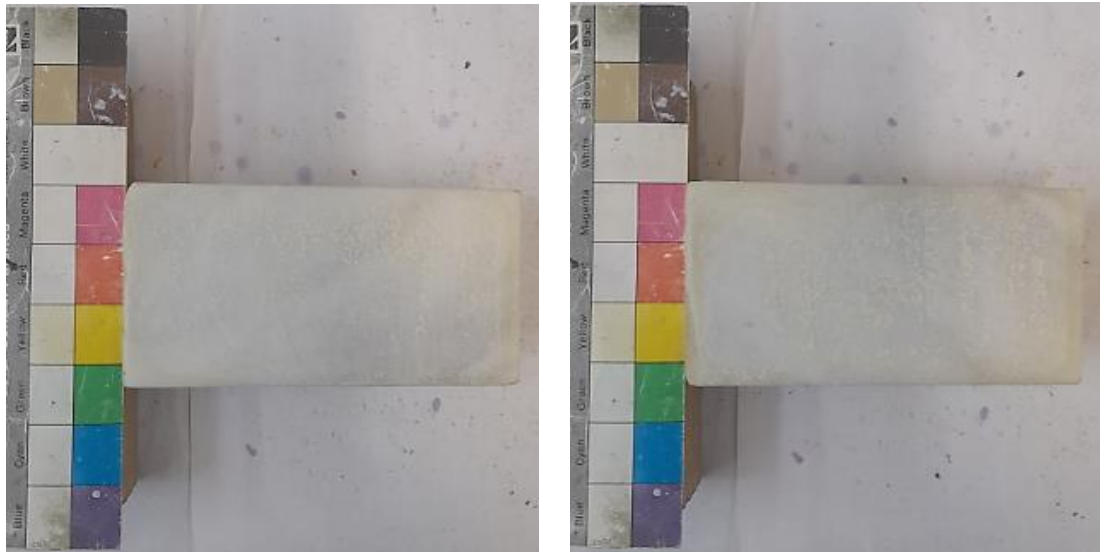
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει:

Συνοχή: $c=324 \text{ kPa}$ ή 0.324 MPa

Γωνία τριβής: $\phi=25.17^\circ$

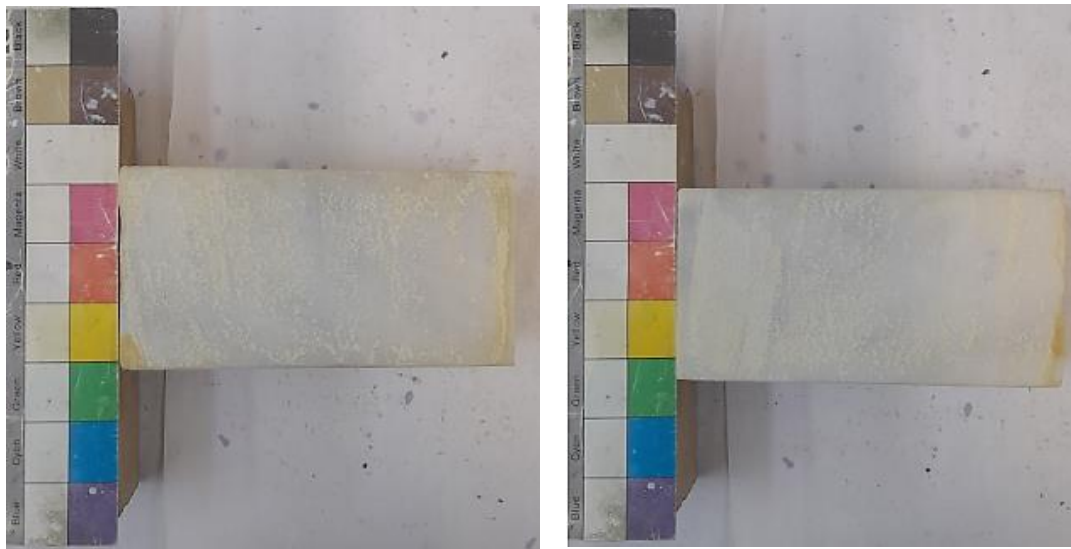
Παρακάτω παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό τις ορθές τάσεις:

Για ορθή τάση 200 kPa :



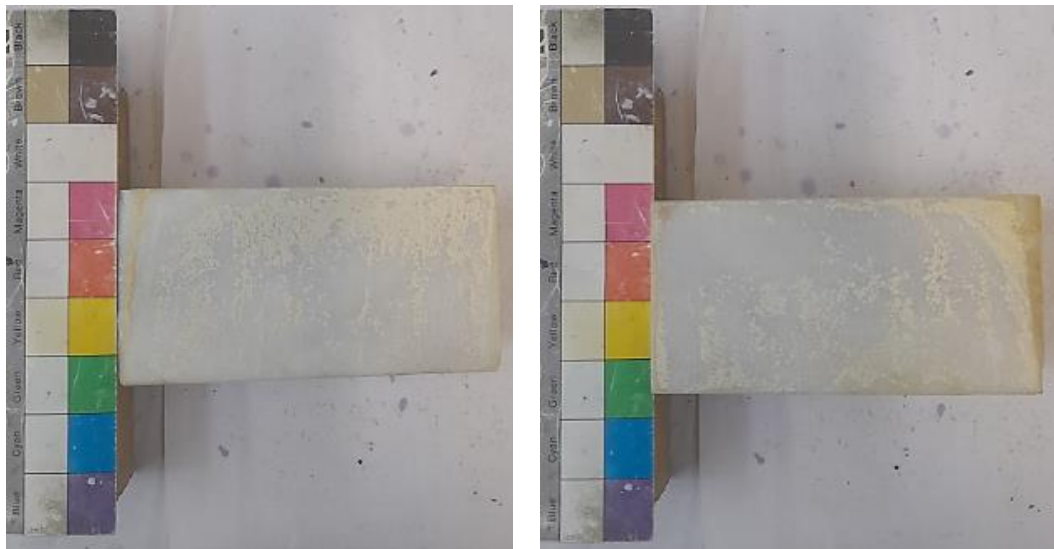
Εικόνες 4.3.7 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 200 kPa

Για ορθή τάση 500 kPa :



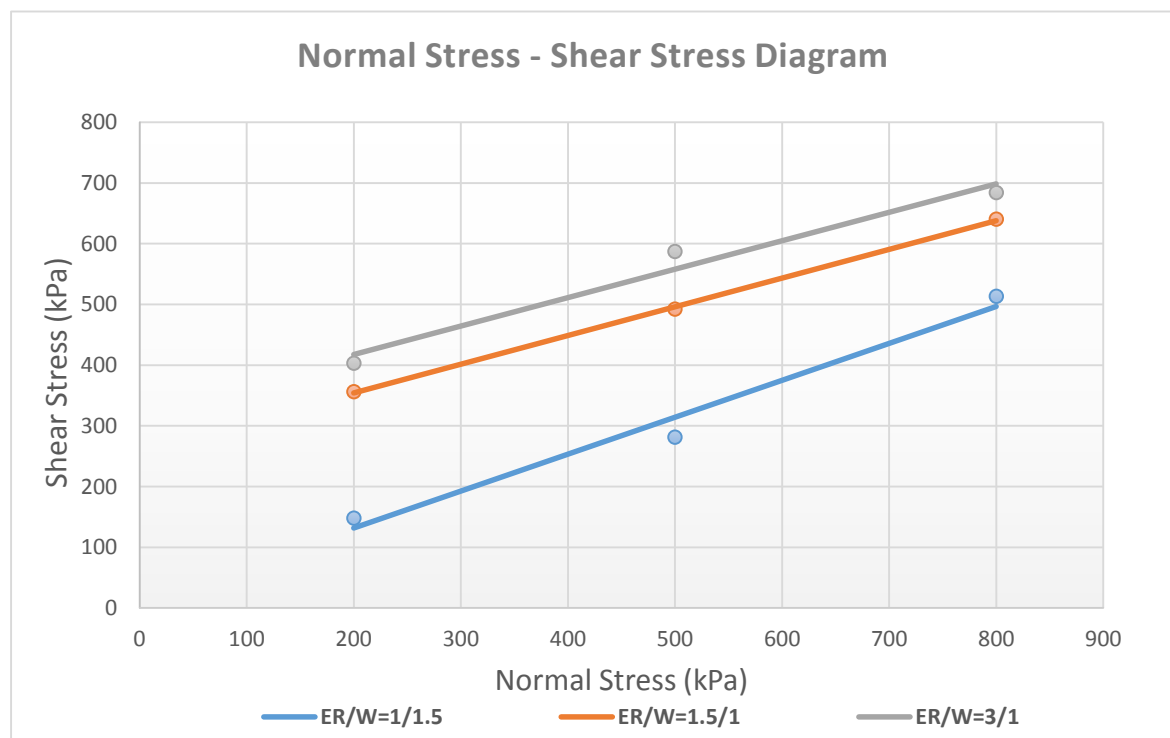
Εικόνες 4.3.8 Δοκίμια μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 500 kPa

Για ορθή τάση 800 kPa:



Εικόνες 4.3.9 Δοκίμα μετά την δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό ορθή τάση 800 kPa

Παρακάτω παρατίθεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα με όλα παραπάνω δεδομένα σε ένα πίνακα:



Πίνακας 4.2.10 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ορθής – διατμητικής τάσης δοκιμών εποξειδικής ρητίνης με προσθήκη μπετονίτη (5%w/w) 7 ημερών

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΤΗΣΗ

4.1. Αντικείμενο της έρευνας

Αντικείμενο της παρούσας έρευνας υπήρξε η επίδραση της προσθήκης ενέματος (δια της τεχνικής των ενέσεων) στη μηχανική συμπεριφορά και ιδιαίτερος στη διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών βραχομάζας. Με την τεχνική των ενέσεων επιδιώκεται η πλήρωση των ασυνεχειών της βραχομάζας με ένεμα, με σκοπό την απόφραξη των ασυνεχειών ως αγωγών διακίνησης του υπόγειου νερού ή/και την αύξηση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών.

4.2 Ανασκόπηση πρότερων ερευνών

Τα πειραματικά στοιχεία και παρατηρήσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως προς τη μηχανική συμπεριφορά ασυνεχειών με ένεμα διαφοροποιούνται για τις ασυνέχειες σε πετρώματα υψηλής και χαμηλής αντοχής. Η παρουσία ενέματος σε ασυνέχειες πετρωμάτων υψηλής αντοχής επηρεάζει αρνητικά τη διατμητική τους αντοχή και δυσκαμψία. Η αρνητική επίδραση επιτείνεται με την αύξηση του πάχους ενέματος, όπως δεικνύει η εκθετική μείωση της διατμητικής αντοχής με αύξηση του πάχους ενέματος που παρατηρήθηκε σε πειραματική μελέτη. Η γωνία τριβής του μητρικού υλικού και η συνοχή του ενέματος επηρεάζουν την μέγιστη αντοχή. Η διατμητική αστοχία του δοκιμίου αναφέρεται να πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια του βράχου-ενέματος. Γενικότερα, η παρουσία ενέματος δεν έχει θετική επίδραση στις ασυνέχειες πετρωμάτων υψηλής αντοχής εκτός όταν τα επίπεδα ορθών τάσεων πολύ χαμηλά και η προσκόλληση ενέματος-βράχου (τάση συνάφειας) συμμετέχει ενεργά στη διατμητική συμπεριφορά. Η διατμητική αντοχή, η διατμητική και η ορθή δυσκαμψία φυσικών ασυνεχειών πετρωμάτων χαμηλής αντοχής αυξάνονται με την παρουσία ενέματος. Η θετική αυτή επίδραση είναι ποσοστιαία μεγαλύτερη σε επίπεδες επιφάνειες ασυνεχειών παρά σε ανεπίπεδες. Στα ίδια συμπεράσματα, δηλαδή αύξησης των μηχανικών χαρακτηριστικών βραχομάζας με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες κατόπιν ενέσεων κατέληξαν και ερευνητές, οι οποίοι έκαναν επιτόπου γεωφυσικές μετρήσεις.

Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής έρευνας, ως αντικείμενα άμεσου ενδιαφέροντος της παρούσας έρευνας, αποτέλεσαν τα ακόλουθα:

- Η επίδραση του ενέματος στη διατμητική συμπεριφορά των ασυνεχειών σε σχέση με τα φυσικά χαρακτηριστικά τους και τις ορθές τάσεις.
- Η επίδραση των ιδιοτήτων (αντοχής) του ενέματος.
- Η επίδραση της προσθήκης μπετονίτη στις ιδιότητες του ενέματος.

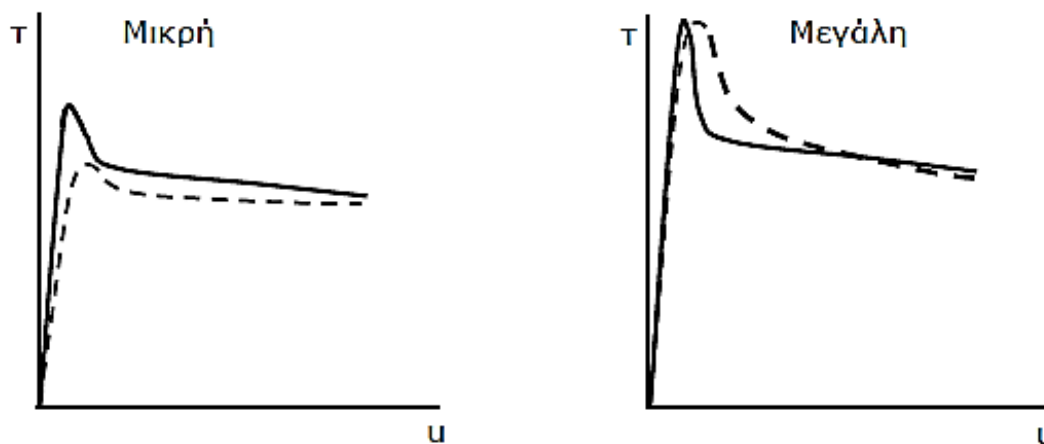
- Η επίδραση του νέου ενέματος (μπετονίτη – ρητίνης) στη διατμητική συμπεριφορά των ασυνχειών.

4.3. Συμπεράσματα από τις πειραματικές δοκιμές

Από το σύνολο των πειραματικών δοκιμών διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- ✓ Η παρουσία ενέματος προκαλεί βελτίωση της μέγιστης διατμητικής αντοχής, δηλαδή παρουσιάζεται αύξηση της συνοχής και της γωνίας τριβής.
- ✓ Η προσθήκη μπετονίτη στο μείγμα ενέματος προκαλεί ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της συνοχής και ιδιαιτέρως της γωνίας τριβής, δηλαδή παρουσιάζεται μια ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση της μέγιστης διατμητικής αντοχής σε σχέση με το μείγμα ενέματος χωρίς την προσθήκη μπετονίτη.
- ✓ Η παρουσία ενέματος δεν επηρεάζει αξιολογικά την ελάχιστη διατμητική αντοχή.

Με βάση τα παραπάνω, ως γενική μορφή διατμητικής συμπεριφοράς ασυνχειών πληρωμένων με ένεμα προτείνεται η εικονιζόμενη στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.4.3.1 Γενική μορφή διατμητικής συμπεριφοράς ασυνχειών πληρωμένων με ένεμα

4.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Ως αντικείμενα μελλοντικής έρευνας προτείνονται τα ακόλουθα:

- Εξέταση της διατμητικής συμπεριφοράς ασυνχειών πληρωμένων με ένεμα ρητίνης-μπετονίτη μετά από χρόνο σκλήρυνσης 90 ημερών.
- Επέκταση της πειραματικής διερεύνησης σε φυσικά υλικά για την εκτίμηση των φυσικών μεταβλητών των ασυνχειών, των κατασκευαστικών

μεταβλητών όπως η αντοχή του ενέματος και η τάση συνάφειας μεταξύ τοιχώματος και του ενέματος και της εντατικής κατάστασης στη διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών σε φυσικό πέτρωμα με ένεμα.

- Εξέταση της επίδρασης των ιδιοτήτων του ενέματος στη διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών μέσω περισσότερων πειραματικών και αριθμητικών αναλύσεων.
- Διερεύνηση της επιρροής των συνοριακών συνθηκών της δοκιμής άμεσης διάτμησης στη διατμητική συμπεριφορά ασυνεχειών με ένεμα.
- Συγκρίσεις της συνδυασμένης εργαστηριακής πειραματικής διερεύνησης και της αριθμητικής ανάλυσης με ουσιαστικά τεκμηριωμένες παρατηρήσεις από συμπεριφορά έργων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Anagnostopoulos, Costas A. "Effect of different superplasticisers on the physical and mechanical properties of cement grouts." *Construction and Building Materials* 50 (2014): 162-168.

Anagnostopoulos, Costas A., Giorgos Sapidis, and Efthimios Papastergiadis. "Fundamental properties of epoxy resin-modified cement grouts." *Construction and Building Materials* 125 (2016): 184-195.

Anagnostopoulos, Costas A. "Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts." *Tunnelling and Underground Space Technology* 20.6 (2005): 525-533.

Anagnostopoulos, Costas A. "Cement–clay grouts modified with acrylic resin or methyl methacrylate ester: Physical and mechanical properties." *Construction and Building Materials* 21.2 (2007): 252-257.

Anagnostopoulos, C. A., et al. "Physical and mechanical properties of chemically grouted sand." *Tunnelling and underground space technology* 26.6 (2011): 718-724.

Anagnostopoulos, Costas A., Melina Dimitriadi, and Dimitrios Konstantinidis. "Static and cyclic behaviour of epoxy resin and bentonite-grouted sands." *Transportation Geotechnics* 33 (2022): 100725.

Anagnostopoulos, C. A., and G. Sapidis. "Mechanical behaviour of epoxy resin-grouted sand under monotonic or cyclic loading." *Geotechnique Letters* 7.4 (2017): 298-303.

- Anagnostopoulos, Costas A., and Melina Dimitriadi. "Study on High Performance Polymer-Modified Cement Grouts." *CivilEng 2.1* (2021): 134-157.
- Bandis, S.C. (1980), "Experimental studies on scale effects on shear strength and deformation of rock joints", Ph.D. Thesis, Univ. of Leeds: 385 p.
- Bandis, S.C. (1990), "Mechanical properties of rock joints", Int. Symp. on Rock Joints, Loen, Norway, Rotterdam: A.A Balkema, pp.125-140.
- Bandis S.C., Lumsden A.C. and Barton N.R., (1983), "Fundamentals of rock joint deformation", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol 20, No.6, pp. 249-268.
- Bandis, S.C., Lumsden, A.C. and N. Barton (1981), "Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geom.Absts., vol 18, pp1-21
- Bandis, S.C., A. Makurat and G. Vik (1985), "Predicted and measured hydraulic conductivity of rock joints", Int. Symp. Fundamentals of rock joints, Bjorkliden, pp 269-280
- Barton N., Bandis S. and Bakhtar K. (1985), "Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 22, No.3, pp. 121-140.
- Barton, N. (1973), "A review of a new shear strength criterion for rock joints". Engineering Geology, Vol 7, pp. 287-332
- Barton N. (1976). A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Norwegian Geotechnical Institute.
- Barton, N. (1976). "The shear strength of rock and rock joints". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geom. Absts., 13: 255-279
- Barton, N. and S.Bandis (1982), "Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock". Proc. 23rd U.S. Symp. on Rock Mech., Berkeley, Cal.739-760
- Barton, N. and V.Choubey 1977: The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, 10, No. 1/2: 154
- Dome P. & Jefferis S. (1971). "Structural Grouts". Chapman & Hall, London.
- Goodman, R. E. (1976). "Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rock", St. Paul: West Publishing Company. 472p.
- Goodman, R.E. (1974). "The mechanical properties of joints". Proc. 3rd Int. Congr. ISRM, Denver, Colorado, Vol. 1, Part A, pp.127-140
- Goodman, R.E. (1980). "Introduction to rock mechanics", J. Willey and Sons: 478p.

- Hansen, T.S., Nomeland, T. & Roald, S., (2002). How to make rock injections result predictable and successful the first time around. First draft of the paper to be presented in a journal.
- Clarke 1982 Clarke, W. J. 1982. "Performance Characteristics of Acrylate Polymer Grout," *Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, New Orleans, 482-497.
- Committee on Grouting 1980 Committee on Grouting. 1980. "Preliminary Glossary of Terms Related to Grouting," American Society of Civil Engineers, *J. Geotech. Eng. Div.* 106 (GT7), 803-815.
- Krizek, et al. 1992 Krizek, R. J., Michel, D. F., Helal, M., and Borden, R. H. 1992. "Engineering Properties of Acrylate Polymer Grout," *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, American Society of Civil Engineers, *Geotechnical Special Publication* 30(1), 712-724.
- Mori, Tamura, and Fuki 1990 Mori, A., Tamura, M., and Fuki, Y. 1990. "Fracturing Pressure of Soil Ground by Viscous Materials," *Soils and Foundations* 30, 129-136.
- Mori, et al. 1992 Mori, A., Tamura, M., Shibata, H., and Hayashi, H. 1992. "Some Factors Related to Injected Shape in Grouting," *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetic*, American Society of Civil Engineers, *Geotechnical Special Publication* 30(1), 313-324.
- Polivka, Witte, and Gnaedinger 1957 Polivka, M., Witte, L. P., and Gnaedinger, J. P. 1957. "Field Experiences with Chemical Grouting," American Society of Civil Engineers, *Soil Mechanics and Foundations Division Journal* 83 (SM2), Paper 1204, 1-31.
- Raymond International, Inc. 1957 Raymond International, Inc. 1957. *Siroc Grout Technical Manual*. Concrete Pile Division, New York.
- Schimada, Ide, and Iwasa 1992 Schimada, S., Ide, M., and Iwasa, H. 1992. "Development of a Gas-Liquid Reaction Injection System," *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, American Society of Civil Engineers, *Geotechnical Special Publication* 30(1), 325-336
- Siwula and Krizek 1992 Siwula, J. M., and Krizak, R. J. 1992. "Permanence of Grouted Sand Exposed to Various Water Chemistries," *Grouting, Soil Improvement and*

Geosynthetics, American Society of Civil Engineers, *Geotechnical Special Publication* 30(1), 1403-1419.

Tausch 1992 Tausch, N. 1992. "Recent European Developments in Constructing Grouted Slabs," *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, American Society of Civil Engineers, *Geotechnical Special Publication* 30(1), 301-312.

Vesic 1972 Vesic, A. S. 1972. "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass," American Society Civil Engineers, *J. Soil Mech. and Foundations Div.* 98, 265-290.

Vinson and Mitchell 1972 Vinson, T. S., and Mitchell, J. K. 1972. "Polyurethane Foamed Plastic in Soil Grouting," American Society Civil Engineers, *J. Soil Mech. and Foundations Div.* 99.

Yonekura and Kaga 1992 Yonekura, R., and Kaga, M. 1992. "Current Chemical Grout Engineering in Japan," *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, American Society of Civil Engineers, *Geotechnical Special Publication* 30(1), 725-736.

Waller, Hue, and Baker 1984 Waller, M. J., Hue, P. J., and Baker, W. H. 1983. "Design and Control of Chemical Grouting. Vol. 1 - Construction Control," Federal Highway Administration Report FHWA/RD-82/036, Federal Highway Administration, Washington, DC.