



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**<<Παθητική σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών:
Εισπιεσιμότητα κολλοειδούς πυριτίας>>**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΝΤΟΥΝΤΟΥΛΑΚΗ ΑΝΤΩΝΙΟΥ

Επιβλέπων : Αχιλλέας Παπαδημητρίου

Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2014



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 12904/1
Ημερ. Εισ.: 02-09-2014
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2014
ΝΤΟ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα, καταρχήν, να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή και επιβλέπων της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου για την καθοδήγηση που μου παρείχε και για τις άμεσες απαντήσεις και λύσεις που έδωσε στις δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν στην πειραματική διαδικασία όποτε χρειάστηκε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την υποψήφια διδάκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Γεωργία Αγαπουλάκη, που χωρίς τη συμβολή και τις υποδείξεις της η εκπόνηση της εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν στη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου και τον αδερφό μου για τη στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Μία νέα τεχνική βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών έναντι σεισμικής ρευστοποίησης, είναι η παθητική σταθεροποίηση (passive stabilization), κατά την οποία ένας σταθεροποιητής εισάγεται μέσω εισπίεσης χαμηλής υδραυλικής κλίσης στο ρευστοποιήσιμο έδαφος. Η νέα αυτή τεχνική βελτίωσης του εδάφους βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο διεθνώς. Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο ενός μεγάλου ερευνητικού προγράμματος που βρίσκεται σε εξέλιξη στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Π.Θ.) την περίοδο αυτή, και στοχεύει στο να καταστεί η παθητική σταθεροποίηση μια πρακτικώς εφαρμόσιμη τεχνική βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης.

Συγκεκριμένα, για την σωστή εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης στην πράξη χρειάζεται διερεύνηση της εισπιεσιμότητας του βέλτιστου σταθεροποιητή (κολλοειδούς πυριτίας, colloidal silica), ειδικά σε μεγάλες αποστάσεις. Συνεπώς, στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η ποιοτική και ποσοτική διερεύνηση της εισπιεσιμότητας της κολλοειδούς πυριτίας σε ρευστοποιήσιμα εδάφη. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν εννιά (9) δοκιμές εισπίεσης πυριτίας σε εδαφικά δοκίμια (πρακτικώς κορεσμένης) άμμου και μία (1) δοκιμή εισπίεσης σε αντίστοιχο δοκίμιο λυώδους άμμου (με ποσοστό λύος 10% κατά βάρος). Η εισπίεση πυριτίας έγινε κατακόρυφα προς τα άνω εντός κυλινδρικών δοκιμίων με μήκος 20cm, 40cm και 100cm, ενώ ο εισπιεζόμενος σταθεροποιητής είχε ποσοστό πυριτίας κατά βάρος CS = 10%. Το pH και το ιονικό σθένος της πυριτίας καθορίζονταν ανάλογα με τον επιθυμητό χρόνο γέλης σε κάθε δοκιμή. Πέραν των δοκιμών εισπίεσης, προτάθηκε και ένα αδρό αναλυτικό προσομοίωμα της κατακόρυφης προς τα άνω 1Δ εισπίεσης για την επεξεργασία των μετρήσεων και την κατανόηση των μηχανισμών που τη διέπουν. Έτσι, με βάση τις πειραματικές και αναλυτικές εργασίες που εκτελέστηκαν προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Η κατακόρυφη προς τα άνω 1Δ εισπίεση πυριτίας καθορίζεται από τη μείωση της υδραυλικής κλίσης της ροής (λόγω μεγαλύτερου βάρους της πυριτίας συγκριτικά με εκείνο του νερού) και την αύξηση του ιξώδους της πυριτίας με το χρόνο (λόγω δημιουργίας δεσμών σιλοξάνης μεταξύ των μορίων του πυριτίου). Το πρώτο επιβεβαιώθηκε από δοκιμή εισπίεσης πυριτίας με σταθερό ιξώδες, ενώ το δεύτερο από πολλαπλές δοκιμές εισπίεσης (σε διάφορα μήκη δοκιμίων).
- Πέραν της (αρχικής) υδραυλικής κλίσης, είναι ο έλεγχος του χρόνου γέλης της πυριτίας (μέσω ελέγχου του pH και της ιοντικής ισχύος) που πρακτικώς καθορίζουν την απόσταση που μπορεί να εισπιεστεί η πυριτία μέσω στο έδαφος. Τιμές ιξώδους πυριτίας μεγαλύτερες από 3.6cP (και σίγουρα μικρότερες από 6.0cP) οδηγούν πρακτικώς σε μηδενισμό της εισπίεσης σε αμμώδη εδάφη, ανεξαρτήτως της ύπαρξης μη-μηδενικής υδραυλικής κλίσης.
- Σε κάθε περίπτωση, στην κατακόρυφη προς τα άνω 1Δ εισπίεση πυριτίας, η παροχή της πυριτίας είναι μια φθίνουσα (αντίστροφα εκθετική) συνάρτηση του χρόνου. Η αρχική τιμή της παροχής πρακτικώς ελέγχεται από την αρχική υδραυλική κλίση, καθώς η αρχική τιμή του ιξώδους της πυριτίας είναι

πρακτικώς συνάρτηση κυρίως του ποσοστού κατά βάρος CS(%) της πυριτίας που εισπιέζεται (με μικρή διασπορά).

- Από τις δειγματοληψίες υγρού πόρων προκύπτει ότι ο χρωματισμός της κολλοειδούς πυριτίας (με χρώμα ζαχαροπλαστικής) λειτουργεί ικανοποιητικά ως δείκτης ύπαρξης πυριτίας στο υγρό πόρων εντός του εδάφους.
- Η προς τα άνω κατακόρυφη 1Δ εισπίεση κολλοειδούς πυριτίας με μικρή υδραυλική κλίση ουσιαστικά προκαλεί εκτόπιση του προϋπάρχοντος νερού στους πόρους της άμμου, με μια μικρού πάχους (4cm) μεταβατική ζώνη, όπου το ποσοστό κατά βάρος της πυριτίας CS(%) κυμαίνεται από 0% (καθαρό νερό) έως το ονομαστικό ποσοστό της πυριτίας CS_{nom} (=10% στις δοκιμές της εργασίας αυτής). Η επιτυχής χρήση χρωματισμού της πυριτίας επιτρέπει την χωροθέτηση αυτής της μεταβατικής ζώνης συγκριτικά με το μέτωπο ανόδου της πυριτίας, 2cm εντός του εδάφους με καθαρό νερό και 2cm εντός του εδάφους με πυριτία.
- Η αδρή αναλυτική προσομοίωση της εισπίεσης πυριτίας που προτείνεται κάνει χρήση μιας γενικευμένης μορφής του νόμου Darcy, λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση της περατότητας λόγω αύξησης του ιξώδους του υγρού πόρων (μετράται ανεξάρτητα) και τη μείωση της υδραυλικής κλίσης λόγω διαφοράς στην πυκνότητα της εισπιεζόμενης πυριτίας συγκριτικά με το εκτοπιζόμενο νερό (εκτιμάται ανεξάρτητα). Η καλή σύγκριση εκτιμήσεων – μετρήσεων για την παροχή της εισπιεζόμενης πυριτίας υποδεικνύει ότι ο νόμος Darcy μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επαρκή ακρίβεια για την εκτίμηση της εισπιεσιμότητας πυριτίας, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία.
- Η εκτίμηση παροχών με την παρακολούθηση της ταχύτητας ανόδου του μετώπου της πυριτίας μέσα στο έδαφος δίνει αδρή μόνο εκτίμηση της παροχής (ορθή κατά μέση τιμή, αλλά με διακυμάνσεις). Οι διακυμάνσεις δεν οφείλονται σε ελλιπές θεωρητικό υπόβαθρο της αναλυτικής προσέγγισης, αλλά επειδή οι σχετικοί υπολογισμοί βασίζονται στην οπτική παρατήρηση και όχι σε επακριβή ή ενόργανη μέτρηση

Επιβλέπων: Αχιλλέας Παπαδημητρίου, Επίκ. Καθηγητής

Ιούλιος 2014

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Περί Παθητικής σταθεροποίησης.....	1
1.2 Αποτελεσματικότητα Κολλοειδούς Πυριτίας στην αύξηση της αντίστασης έναντι Ρευστοποίησης.....	3
1.3 Αναγκαιότητα Δοκιμών Εισπίεσης.....	4
1.4 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εισπνεσιμότητα Πυριτίας στη βιβλιογραφία.....	6
2.1 Εισπίεση Πυριτίας σε Στήλες 0.9 μέτρων.....	6
2.2 Επιλογή Εδαφικών Υλικών.....	7
2.3 Κολλοειδής Πυριτία.....	8
2.4 Προετοιμασία και Εκτέλεση Δοκιμής 0.9 μέτρων.....	10
2.5 Σχέση Συγκέντρωσης Χλωριούχων Ιόντων και Κολλοειδούς Πυριτίας.....	13
2.6 Επιδράσεις του Ιξώδους στην Εισπνεσιμότητα Πυριτίας	14
2.7 Επιδράσεις του pH και της Ιοντικής Ισχύος στην Εισπίεση της Πυριτίας	15
2.8 Επιδράσεις της Υδραυλικής Κλίσης στην Εισπνεσιμότητα Πυριτίας.....	18
2.9 Επιδράσεις των Εδαφικών Υλικών στην Εισπνεσιμότητα Πυριτίας	19
2.10 Συμπεράσματα Δοκιμών σε Στήλες 0.9 m.....	21
2.11 Δοκιμές Εισπίεσης Πυριτίας σε Μεγαλύτερες Στήλες.....	26
2.12 Περιγραφή Δοκιμών Εισπίεσης σε Μεγαλύτερες Στήλες.....	26

2.13 Αποτελέσματα Δοκιμών Εισπίεσης σε Μεγαλύτερες Στήλες.....	30
2.14 Σχέση Συγκεντρώσεων της Κολλοειδούς Πυριτίας και των Χλωριούχων Ιόντων.....	35
2.15 Επιδράσεις του Ιζώδους στην Εισπνεσιμότητα σε Μεγαλύτερες Στήλες.....	36
2.16 Διανομή Κολλοειδούς Πυριτίας	37
2.17 Συμπεράσματα Δοκιμών σε Μεγαλύτερες Στήλες.....	37
2.18 Συμπεράσματα που Επαληθεύτηκαν στις Δοκιμές Μικρών και Μεγάλων Στηλών..	37
2.19 Έλεγχος Ομοιόμορφης Εισπνεσιμότητας της κολλοειδούς Πυριτίας σε χαλαρές Άμμους.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Περιγραφή Εδαφικών Υλικών και Διαμόρφωσης Δοκιμίου.....	45
3.1 Επιλογή Εδαφικών Υλικών.....	45
3.2 Φυσικά Χαρακτηριστικά Εδαφικών Υλικών.....	46
3.3 Φυσικές Ιδιότητες Εδαφικών Υλικών.....	47
3.4 Αποτελέσματα Δοκιμών Διαπερατότητας.....	50
3.5 Επιλογή Σταθεροποιητή.....	53
3.6 Χαρακτηριστικά Κολλοειδούς Πυριτίας.....	55
3.7 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης και Είδους Δοκιμών.....	58
3.8 Προετοιμασία Μείγματος CS.....	60
3.9 Προετοιμασία Διαπερατόμετρου.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Δοκιμές Εισπίεσης Κολλοειδούς Πυριτίας.....	70
4.1 Γενικά.....	70
4.2 Συνδεσμολογία – Διαδικασία – Μετρολογία.....	70
4.3 Περιγραφή δοκιμών εισπίεσης	74

4.3.1 Δοκιμή 1.....	74
4.3.2 Δοκιμή 2.....	80
4.3.3 Δοκιμή 3.....	84
4.3.4 Δοκιμή 4.....	86
4.3.5 Δοκιμή 5.....	91
4.3.6 Δοκιμή 6.....	95
4.3.7 Δοκιμή 7.....	98
4.3.8 Δοκιμή 8.....	99
4.3.9 Δοκιμή με πυριτία pH=10.....	107
4.4 Ποσοστό Πυριτίας σε σχέση με το Μέτωπο.....	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αδρή Αναλυτική Προσομοίωση	
της προς τα άνω 1Δ Εισπίεσης Πυριτίας.....	114
5.1 Περιγραφή και παρουσίαση προσομοιώματος.....	114
5.2 Έλεγχος ακρίβειας Προσομοιώματος της προς	
τα άνω 1Δ εισπίεσης πυριτίας με βάση τις δοκιμές εισπίεσης.....	119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα.....	125
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</u>	127

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1	Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά και αποτελέσματα δοκιμών.....	22
Πίνακας 2.2	Χαρακτηριστικές ιδιότητες εδαφικών υλικών.....	22
Πίνακας 2.3.α	Επιδράσεις του pH στο ιζώδες για κολλοειδής πυριτία 5% κ.β. με ιοντική ισχύ 0.1 N.....	23
Πίνακας 2.3.β	23
Πίνακας 2.4.	Επιδράσεις της ιοντικής ισχύς στο ιζώδες για κολλοειδής πυριτία 5% κ.β. με pH 6.8.....	24
Πίνακας 2.5	Χαρακτηριστικά και αποτελέσματα δοκιμών.....	31
Πίνακας 2.6	Μέσοι ρυθμοί ροής για τα ανάλογα χρονικά διαστήματα σε δοκιμές εισπίεσης κολλοειδούς πυριτίας 5% κ.β.....	32
Πίνακας 3.1.	Φυσικές ιδιότητες των επιλεγέντων εδαφικών υλικών.....	49
Πίνακας 3.2.	Σύνοψη αποτελεσμάτων δοκιμών διαπερατότητας (στο Α.Π.Θ.) της άμμου και του μείγματος άμμου – ιλύος.....	50
Πίνακας 3.3.	Σύνοψη αποτελεσμάτων δοκιμών διαπερατότητας (στο Π.Π.) της άμμου και του μείγματος άμμου – ιλύος.....	52
Πίνακας 3.4.	Σύνοψη αποτελεσμάτων δοκιμών διαπερατότητας (στο Π.Θ.) σε δείγματα άμμου διαφόρων πυκνοτήτων.....	53
Πίνακας 3.5.	Βασικά χαρακτηριστικά τύπων κολλοειδούς πυριτίας.....	56
Πίνακας 3.6.	Χαρακτηριστικά των δοκιμών άμμου Μ31 σε όρους δείκτη πόρων e, συντελεστή διαπερατότητας k για κάθε δοκιμή εισπίεσης....	66
Πίνακας 5.1.	Χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών και δοκιμών.....	119

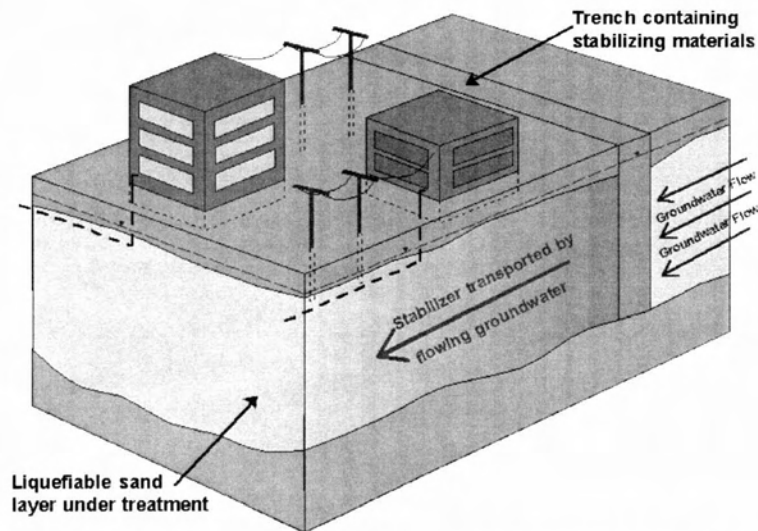
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Περί Παθητικής σταθεροποίησης

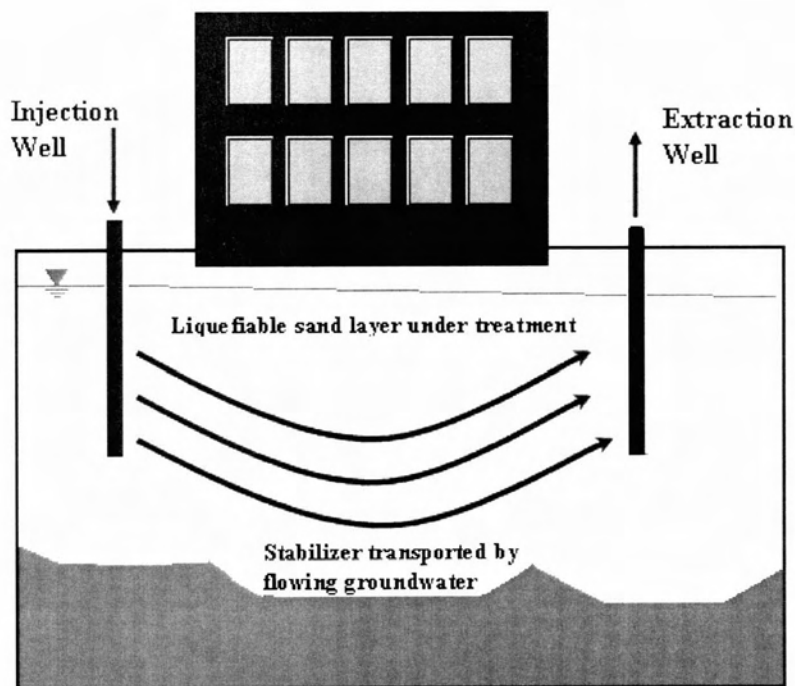
Η παθητική σταθεροποίηση αποτελεί μία νέα τεχνική βελτίωσης του εδάφους με στόχο την αποφυγή εμφάνισης του καταστροφικού φαινομένου της ρευστοποίησης. Η αδυναμία εφαρμογής άλλων μεθόδων βελτίωσης του εδάφους έναντι ρευστοποίησης σε ανεπτυγμένες-οικοδομημένες περιοχές οδήγησε τους ερευνητές προς αυτή τη κατεύθυνση. Η παθητική σταθεροποίηση βασίζεται στην εισαγωγή ενός μη τοξικού με ελεγχόμενο ιζώδες σταθεροποιητή στο εν δυνάμει ρευστοποιήσιμο έδαφος σε ολόκληρη την έκταση της θεμελίωσης της υπάρχουσας κατασκευής. Αναλυτικότερα, ο σταθεροποιητής τοποθετείται στα όρια της περιοχής θεμελίωσης και μέσω διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης παράλληλα με τη βοήθεια της υπόγειας ροής των υδάτων μεταφέρεται σε ολόκληρη τη περιοχή θεμελίωσης του προβληματικού εδάφους. Αρχικά και κατά την μεταφορά το ιζώδες του σταθεροποιητή είναι χαμηλό, ενώ όταν φτάσει στη ζητούμενη περιοχή το ιζώδες του αυξάνεται σταδιακά με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου γεωυλικού. Το νέο γεωυλικό καθιστά λιγότερη δυνατή την ανάπτυξη σημαντικών υπερπιέσεων πόρων προστατεύοντας τον εδαφικό σκελετό από το φαινόμενο της ρευστοποίησης και τις καταστροφικές συνέπειες που θα ακολουθούσαν για τις κατασκευές.

Έρευνες έχουν καταλήξει στο ότι το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου ή πιο απλά κολλοειδής πυριτία (Colloidal silica, CS) αποτελεί τον καταλληλότερο σταθεροποιητή για την εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης καθώς έχει χρονικά μεταβαλλόμενο μα ελεγχόμενο ιζώδες, υψηλή ανθεκτικότητα και διάρκεια ζωής, είναι περιβαλλοντικά ασφαλές και το κόστος του είναι χαμηλό. Ακόμη έχει επιβεβαιωθεί η συμβολή της κολλοειδούς πυριτίας στην αύξηση αντοχής μη συνεκτικών εδαφών έναντι ρευστοποίησης. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές η παθητική σταθεροποίηση αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη νέα μέθοδο καθώς η χρήση CS σε ποσοστό κατά βάρος 5% - 10% στο διηθούμενο διάλυμα δείχνει να επαρκεί για ικανοποιητική αύξηση της αντοχής του εδάφους έναντι ρευστοποίησης.

Η διαδικασία εισπίεσης ή διήθησης του σταθεροποιητή στο έδαφος θεμελίωσης γίνεται με τη διάνοιξη γεωτρήσεων ή τάφρων υψηλού και χαμηλού υδραυλικού ύψους όπου θα εισάγεται και θα εξάγεται το διάλυμα σταθεροποίησης αντίστοιχα. Οι παραπάνω μέθοδοι παρουσιάζονται εικονικά στα **Σχήματα 1.1.** και **Σχήμα 1.2** αντίστοιχα.



Σχήμα 1.1. Χαρακτηριστική τομή που παρουσιάζει τη μεταφορά του σταθεροποιητή στο έδαφος θεμελίωσης με τη βοήθεια της υπόγειας ροής. (Lin, Gallagher 2009)



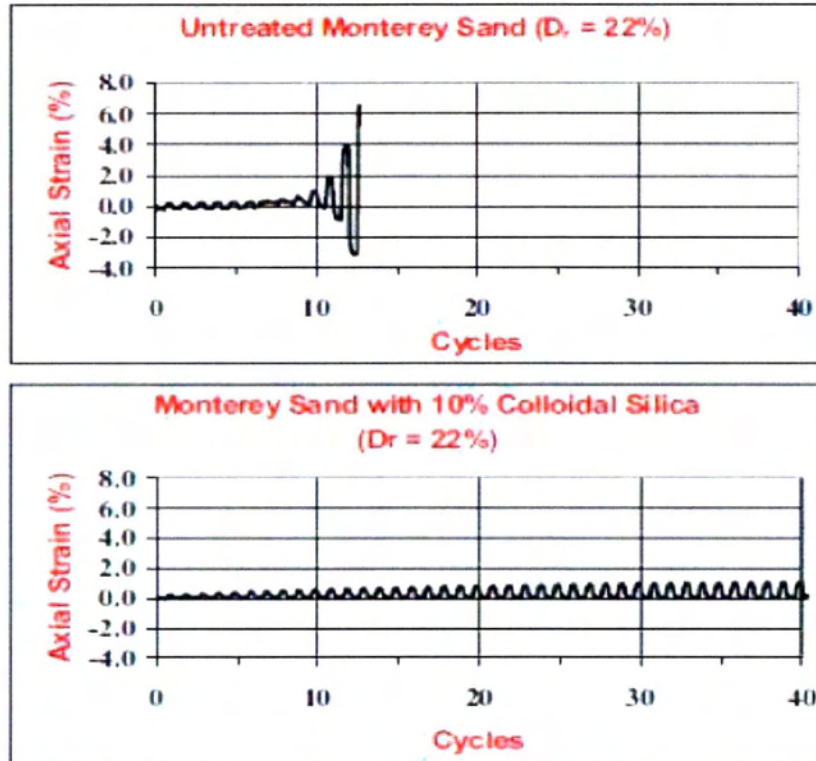
Σχήμα 1.2. Χαρακτηριστική τομή που παρουσιάζει την μεταφορά του σταθεροποιητή με τη βοήθεια γεωτρήσεων. (Lin 2006)

1.2 Αποτελεσματικότητα Κολλοειδούς Πυριτίας στην αύξηση της αντίστασης έναντι Ρευστοποίησης

Όπως προαναφέρθηκε, ως καταλληλότερος σταθεροποιητής όσον αφορά τους χρόνους γέλης, το χρονικό διάστημα και την ακρίβεια της μεταφοράς και το κόστος έχει αναγνωριστεί το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Gallagher, 2000; Gallagher and Mitchell, 2002; Koch, 2002; Liao et al., 2003; Thevanayagam και Jia, 2003; Gallagher and Finsterle, 2004; Gallagher et al., 2006).

Στη βιβλιογραφία για να επιβεβαιωθεί η συμβολή και η απόδοση του σταθεροποιητή από κολλοειδή πυριτία στην αντίσταση του μη συνεκτικού εδάφους έναντι ρευστοποίησης έχουν πραγματοποιηθεί, μεταξύ άλλων, δοκιμές τριαξονικής ανακυκλικής φόρτισης. Η ρευστοποίηση για φυσικές και σταθεροποιημένες άμμους ορίζεται όταν η ανακυκλική αξονική παραμόρφωση πλήρους εύρους (double amplitude DA) φθάσει μια τιμή DA = 1, 2 έως 5% (η επιλογή της τιμής είναι αυθαίρετη, αρκεί να υπάρχει συνέπεια πριν και μετά τη σταθεροποίηση). Στο **Σχήμα 1.3** παρουσιάζεται ενδεικτικά ο ρυθμός μεταβολής της αξονικής παραμόρφωσης με τους κύκλους σε ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές, για δύο δοκίμια άμμου με ίδια σχετική πυκνότητα $D_r=22\%$ τα οποία ήταν ισοτροπικά στερεοποιημένα με $\sigma_{v0}=100\text{kPa}$.

Στο ένα δοκίμιο άμμου είχε εισπιεστεί κολλοειδής πυριτία. Το δοκίμιο καθαρής άμμου «καταρρέει» (ραγδαία αύξηση παραμορφώσεων) στον 13^ο κύκλο φόρτισης με την τιμή DA να αυξάνει ραγδαία όταν η υπερπίεση πόρων αυξήθηκε σημαντικά. Αντίθετα το δοκίμιο με την σταθεροποιημένη άμμο οι παραμορφώσεις αναπτύσσονται σταδιακά και διατηρούνται καθ' όλη τη διάρκεια σε μειωμένα επίπεδα, ενώ το δοκίμιο δεν έχει «καταρρεύσει» ακόμη και μετά από 400 κύκλους φόρτισης (έφθασε σταδιακά τιμή DA=8%). Συνεπώς είναι εμφανής η θετική επίδραση της κολλοειδούς πυριτίας, καθώς η αντίσταση σε ρευστοποίηση αυξάνει σημαντικά.



Σχήμα 1.3.α) αξονική ανακυκλική παραμόρφωση μη σταθεροποιημένου δοκιμίου. β) δοκίμιο εμποτισμένο με κolloειδή πυριτία CS = 10%.(Gallagher 2000)

1.3 Αναγκαιότητα Δοκιμών Εισπίεσης

Για την σωστή εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης στην πράξη χρειάζεται διερεύνηση της εισπιεσιμότητας της πυριτίας, καθώς ένα σημαντικό εμπόδιο μπορεί να αποτελέσει η μεταφορά του σταθεροποιητή σε μεγάλες αποστάσεις. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της εισπιεσιμότητας της κolloειδους πυριτίας αλλά και της ομοιόμορφης κατανομής της πυριτίας μέσα στο «προβληματικό» έδαφος. Επίσης, αποσκοπεί να κατανοήσει τους μηχανισμούς μεταφοράς του σταθεροποιητή μέσω ρευστοποιήσιμων εδαφών και να καταγράψει ποιες μεταβλητές και με ποιο τρόπο την επηρεάζουν επαληθεύοντας τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Για όλες τις παραπάνω επιδιώξεις πραγματοποιήθηκαν 9 δοκιμές εισπίεσης πυριτίας σε κυλινδρικά εδαφικά δοκίμια κορεσμένης άμμου M-31 και 1 δοκιμή σε δοκίμιο ιλυώδους άμμου με ποσοστό ιλύος 10% κατά βάρος. Στις δοκιμές αυτές εξετάστηκαν προσεκτικά οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά του κolloειδούς οξειδίου του πυριτίου όπως το pH, η

ιοντική ισχύς των κατιόντων, το ιξώδες, και η υδραυλική κλίση. Τέλος διαμορφώθηκε μία αδρή αναλυτική προσομοίωση της προς τα άνω μονοδιάστατης εισπίεσης πυριτίας που εκτελέστηκε πειραματικά, για να αποτελέσει ένα εύχρηστο εργαλείο αργιοί σχεδιασμού της εισπίεσης.

1.4 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο παρόν Κεφάλαιο 1 έγινε μια εισαγωγή στο αντικείμενο και την αναγκαιότητα της παρούσας έρευνας, ενώ στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η εισπιεσιμότητα πυριτίας από βιβλιογραφική έρευνα και παρατίθενται τα συμπεράσματα των ερευνητών. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία και γίνεται περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας διαμόρφωσης των δοκιμίων. Έπειτα, στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι δοκιμές εισπίεσης που πραγματοποιήθηκαν (1Δ κατακόρυφες προς τα άνω εισπίεσεις σε δοκίμια ποικίλου μήκους), ενώ το Κεφάλαιο 5 πραγματεύεται μία αδρή αναλυτική προσομοίωση της προς τα άνω μονοδιάστατης εισπίεσης πυριτίας. Τέλος στο Κεφάλαιο 6 σχολιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που κατέληξε η συγκεκριμένη εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εισπιεσιμότητα Πυριτίας στη βιβλιογραφία

2.1 Εισπίεση Πυριτίας σε Στήλες 0.9 μέτρων

Από βιβλιογραφική έρευνα σε άλλες επιστημονικές διατριβές συγκεντρώθηκαν και καταγράφηκαν η διαδικασία εκτέλεσης της πειραματικής διαδικασίας και τα συμπεράσματα που κατέληξαν οι ερευνητές.

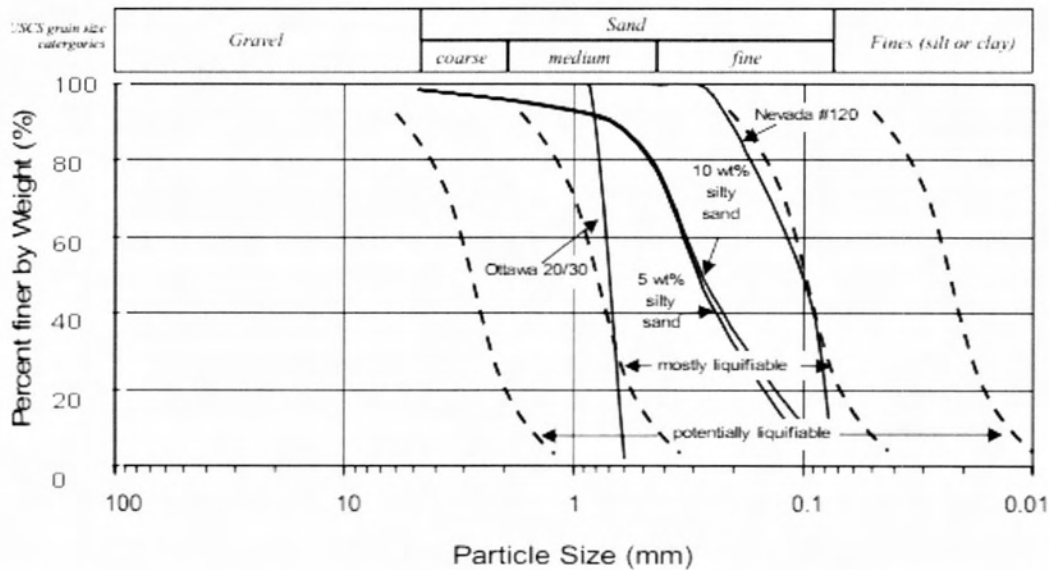
Στη διδακτορική διατριβή του Lin Yuanzhi πραγματοποιήθηκαν 15 δοκιμές σε κυλινδρικές στήλες ύψους 0,9 μέτρα (3 -feet) , 4 δοκιμές σε στήλες ύψους 3,0 μέτρα (10 feet) και μία σε στήλη ύψους 9 μέτρα (30-feet).

Ο σκοπός των δοκιμών στις μικρότερες κυλινδρικές στήλες ήταν να ερευνηθεί η δυνατότητα μεταφοράς διαλύματος CS ομοιόμορφα σε όλο τον όγκο του ρευστοποιήσιμου εδάφους που εμπεριείχαν ώστε να αποτραπεί το ενδεχόμενο ρευστοποίησης. Ο κύριος στόχος αποτελούσε αρχικά να διερευνηθεί εάν το ένεμα μπορούσε να μεταφερθεί με επαρκή συγκέντρωση των συστατικών του για να σταθεροποιήσει την άμμο καθώς και να κατανοηθούν οι μηχανισμοί μεταφοράς του διαλύματος σε ρευστοποιήσιμα εδάφη. Για την πραγματοποίηση των 15 δοκιμών χρησιμοποιήθηκε χαλαρή άμμος (Nevada No. 120 sand, Ottawa 20/30 sand και 5 % ή 10 % κατά βάρος διαβαθμισμένη ιλυώδης άμμος. Η ποσότητα του CS στο διάλυμα ήταν 5 % του βάρους το οποίο αποτελεί το μικρότερο ποσοστό το οποίο είναι ικανό για τη μετατροπή του μίγματος σε γέλη με δυνατή τη σταθεροποίηση του εδάφους (Gallagher and Mitchell 2002). Κατά τις δοκιμές εξετάστηκαν πολλές μεταβλητές όπως το ιξώδες, το pH και η ιοντική ισχύς του κολλοειδούς διαλύματος καθώς και ο τύπος του εδάφους η υδραυλική κλίση και η υδραυλική αγωγιμότητα. Τα εύρη του pH και η ιοντική ισχύς ήταν αρκετά μεγάλα καθώς με αυτόν τον τρόπο αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στη πράξη. Η υδραυλική κλίση κάθε δοκιμής επιλέχθηκε έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτική με τη πραγματική κλίση που μπορεί να υπάρχει σε ένα πεδίο εφαρμογής ή σε υδραυλικές κλίσεις που μπορούν να επιτευχθούν στο πεδίο με τη χρήση γεωτρήσεων και εισπίεσης.

Αναλυτικότερα οι τιμές των παραμέτρων για τη κάθε δοκιμή παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.1**.

2.2 Επιλογή Εδαφικών Υλικών

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές ήταν άμμος Nevada No.120, άμμος Ottawa 20/30 και ιλυώδης άμμος. Οι καμπύλες κατανομής του μεγέθους των κόκκων των εδαφικών υλικών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.1**. Στο **Σχήμα 2.1** είναι ορατό ότι τα εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές βρίσκονται στο φάσμα των πιο ρευστοποιήσιμων εδαφών.



Σχήμα 2.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμων Nevada 120, Ottawa 20/30, ιλυώδους άμμου 5% και 10% κ.β. (Lin 2006)

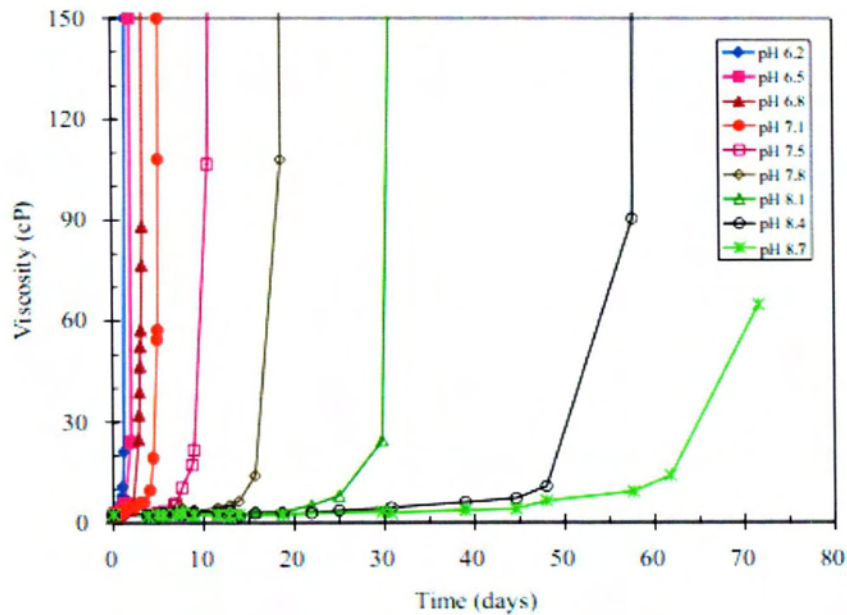
Η άμμος Nevada και η άμμος Ottawa είναι ομοιόμορφα διαβαθμισμένες πυριτικές άμμοι. Ο δείκτης C_c και ο δείκτης C_u της άμμου Nevada είναι 0.92 και 1.41 αντίστοιχα ενώ της Ottawa 1 και 1.16 αντίστοιχα. Η ιλυώδης άμμος που χρησιμοποιήσαν στα πειράματα προέκυψε από την ανάμειξη ιλύος και διαβαθμισμένης άμμου. Η ιλύς επιλέχθηκε αφού είχε ελεγχτεί ότι διέρχεται από το κόσκινο No. 200. Αναφέρεται ότι οι δείκτες C_c και C_u για 5% κατά βάρος ιλυώδη άμμο ήταν 1 και 2.95 αντίστοιχα ενώ για 10% κατά βάρος ιλυώδη άμμο ήταν 1.23 και 3.88 αντίστοιχα. Στον **Πίνακα 2.1** παρουσιάζονται αναλυτικές τιμές για τις σχετικές πυκνότητες και τις υδραυλικές αγωγιμότητες. Η πυκνότητα για κάθε δοκιμή προσδιορίστηκε διαιρώντας τη μάζα των εδαφικών υλικών που περιείχε η κυλινδρική στήλη με τον όγκο της στήλης. Οι σχετικές πυκνότητες προέκυψαν συγκρίνοντας την πυκνότητα της κάθε δοκιμής με τη μέγιστη και την ελάχιστη πυκνότητα. Στον **Πίνακα 2.2** παρουσιάζεται η μέση πυκνότητα της άμμου Nevada

Νο.120 με 5% ιλυώδη άμμο η οποία αποτελεί μια μέση τιμή από όλες τις δοκιμές. Τέλος η υδραυλική αγωγιμότητα για κάθε δοκιμή προσδιορίστηκε μετρώντας το ρυθμό ροής νερού βρύσης που διερχόταν μέσα από την κυλινδρική στήλη πριν την εισαγωγή του CS. Οι υδραυλικές αγωγιμότητες της άμμου Nevada με ποσοστό 5% κατά βάρος ιλυώδη άμμο που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.2** αποτελούν μέσες τιμές.

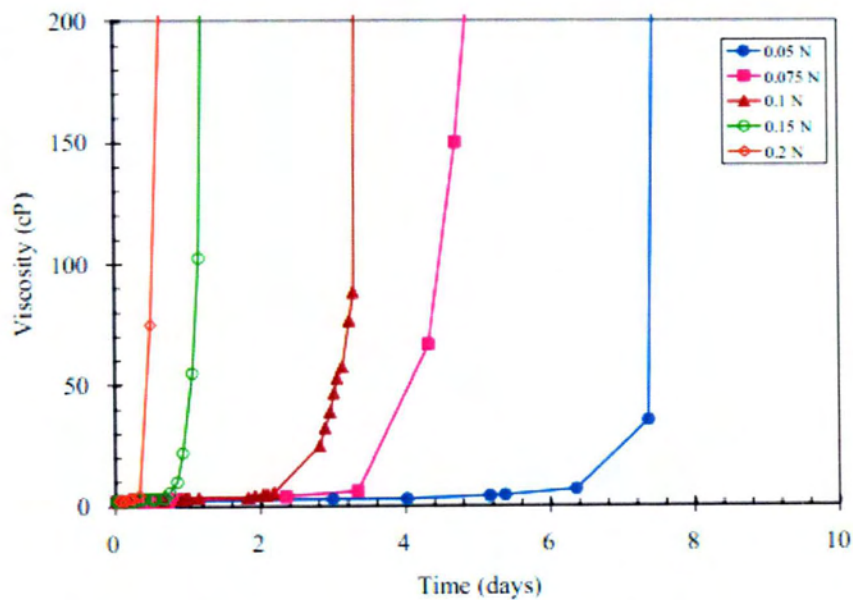
2.3 Κολλοειδής Πυριτία

Ο σταθεροποιητής CS που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές του Lin Yuanzhi ήταν Ludox® SM-30. Το Ludox® SM-30 διατίθεται σαν ένα διάλυμα με πυρίτιο 30% του βάρους, ιξώδες 5.5 cP και pH 10 ενώ Το μέσο σωματίδιο πυριτίου του Ludox® SM-30 είναι 7nm. Τα διαλύματα κολλοειδούς πυριτίου αραιώθηκαν με νερό ώστε το τελικό διάλυμα το CS να είναι στο 5% του βάρους καθώς από προηγούμενες έρευνες έχει αποδειχτεί ότι αυτή η σύσταση όταν εισάγεται σε ρευστοποιήσιμες άμμους επαρκεί για να αυξήσει την αντοχή τους σε κυκλική παραμόρφωση (Gallagher and Mitchell 2002). Το pH και η ιοντική ισχύς των κατιόντων του σταθεροποιητή προσαρμόστηκαν στις ζητούμενες τιμές χρησιμοποιώντας 6 N καθαρό HCl και καθαρό NaCl. Ο χρόνος γέλης προσδιορίστηκε ελέγχοντας τις καμπύλες μεταβολής του ιξώδους με το χρόνο.

Η ιοντική ισχύς των κατιόντων και οι τιμές του pH παρουσιάζονται για κάθε δοκιμή στον **Πίνακα 2.1**. Οι χρόνοι γέλης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.2** στο **Σχήμα 2.3**.



Σχήμα 2.2. Καμπύλες χρόνου γέλης για διάλυμα με CS 5% κ.β., ιοντική ισχύ 0.1 N και διαφορετικό pH . (Lin 2006)



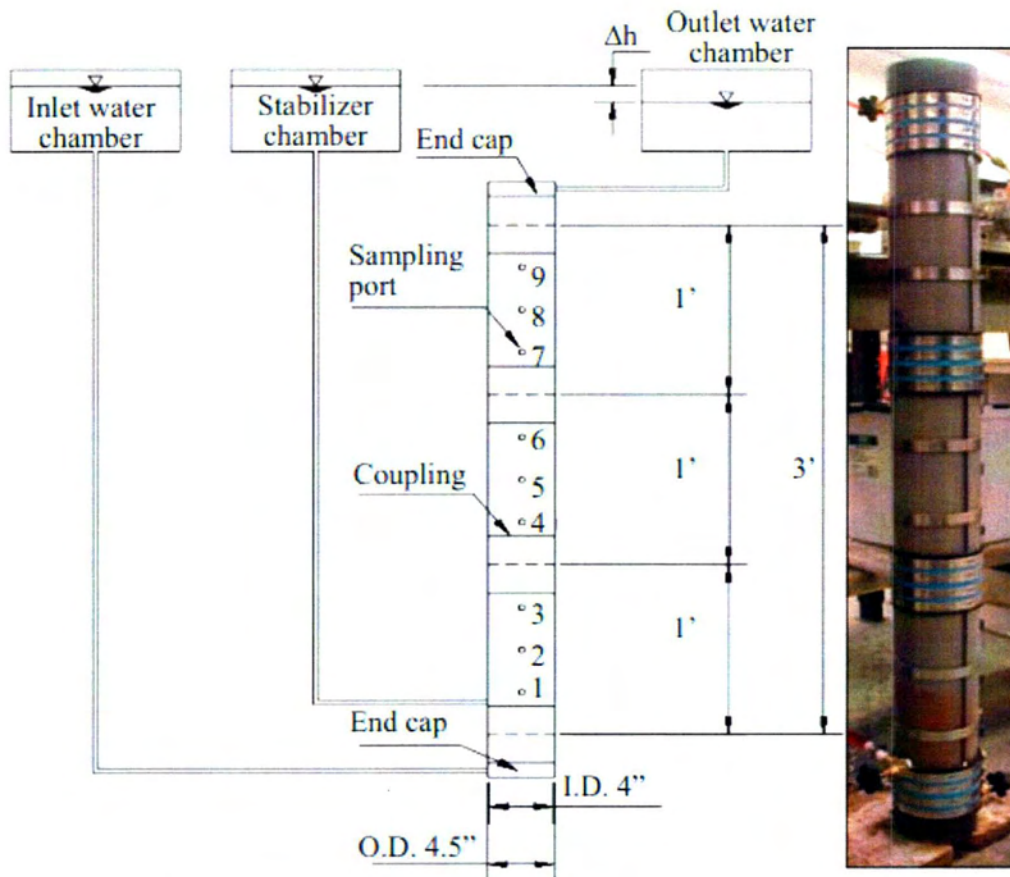
Σχήμα 2.3. Καμπύλες χρόνου γέλης για διάλυμα CS 5% κ.β., σταθερό pH και διαφορετική ιοντική ισχύ. (Lin 2006)

Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του ιξώδους μπορεί να περιγραφεί σαν μία εκθετική συνάρτηση με το χρόνο. Οι καμπύλες του χρόνου γέλης του διαλύματος CS με ιοντική δύναμη 0.1N και pH εύρους 6.2 έως 8.7 που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.2**

και τον **Πίνακα 2.3** αποδεικνύουν ένα μεγάλο εύρος χρόνων γέλης από 1.5 μέρα έως 72 μέρες. Στον **Πίνακα 2.3** και στο **Σχήμα 2.2** επίσης αποδεικνύεται ότι για μία σταθερή ιοντική ισχύ όταν αυξάνει η τιμή του pH αυξάνει και ο χρόνος γέλης. Οι καμπύλες χρόνου γέλης των διαλυμάτων κολλοειδούς πυριτίας με σταθερό pH και ιοντική ισχύ κατιόντων από 0.05 N έως 0.02 N στο **Σχήμα 2.3** και στον **Πίνακα 2.4** αποδεικνύουν ότι όταν αυξάνεται η ιοντική ισχύς των κατιόντων ή το ποσοστό NaCl ο χρόνος γέλης επιταχύνεται.

2.4 Προετοιμασία και Εκτέλεση Δοκιμής 0.9 μέτρων

Η κυλινδρική στήλη κατασκευάστηκε από PVC με πάχος 6 mm , αποτελούνταν από τρία διαμετρική κυλινδρικά τμήματα (ύψους 0,3m το καθένα) συνολικού μήκους 0,9m. Τα τρία μέλη ενώθηκαν με ελαστικούς συνδέσμους. Για την αποφυγή διαρροής κατά τη δοκιμή οι ενώσεις ανάμεσα στα τμήματα στεγανοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας δακτυλίδια σιλικόνης (O-rings) τα οποία τοποθετούνταν στις εσοχές που υπήρχαν στο σημείο επαφής μέλους με μέλος. Στη κορυφή και στη βάση της στήλης τοποθετήθηκαν πλαστικά καλύμματα. Η συνολική ροή του νερού πραγματοποιήθηκε μέσω της εισαγωγής του από μία βαλβίδα στη κάτω βάση της στήλης η οποία συνδέεται με την δεξαμενή εισόδου. Η συνολική διάταξη του πειράματος φαίνεται στο **Σχήμα 2.4**.



Σχήμα 2.4. Σχηματική απεικόνιση και φωτογραφία της στήλης 0.9 μέτρων. (Lin 2006)

Το μίγμα κολλοειδούς πυριτίας, αφού χρωματίστηκε με χρώμα ζαχαροπλαστικής, εισήχθη από την βαλβίδα(βάνα) έγχυσης που βρίσκεται 2,5 cm κατακόρυφη απόσταση από τη βάση της στήλης η οποία συνδέεται με τη δεξαμενή του σταθεροποιητή. Το εξαγόμενο νερό έρεε μέσω της βαλβίδας εξόδου που βρίσκεται στο επάνω κάλυμμα της στήλης. Το νερό από τη βαλβίδα εξόδου κατέληγε στη δεξαμενή εξόδου. Τονίζεται ότι καθ όλη τη διάρκεια της δοκιμής διατηρήθηκε σταθερή υδραυλική κλίση ανάμεσα στις δεξαμενές εισόδου και εξόδου και σταθεροποιητή ενώ οι κλίσεις που επιλέχθηκαν στις δοκιμές προσομοιώνουν τυπικούς υδροφορείς που μπορεί να συναντηθούν στο πεδίο. Η δεξαμενή του σταθεροποιητή γέμιζε με τη χρήση περισταλτικής αντλίας. Τέλος η στήλη διέθετε 9 θέσεις υποδοχείς κατακόρυφα από τη βάση έως τη κορυφή ,από τις οποίες γινόταν δειγματοληψία του υγρού των πόρων κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Για την προετοιμασία της δοκιμής το πρώτο μέλος συναρμολογούνταν και ενωνόταν με το κάλυμμα της βάσης χρησιμοποιώντας ελαστικό σύνδεσμο και δακτυλίδι σιλικόνης. Επίσης ένα μεταλλικό φίλτρο τοποθετούνταν στη βάση ώστε να αποφευχθεί ενδεχόμενο φράξιμο του καναλιού εισόδου. Στη συνέχεια τοποθετούνταν ένα παχύ στρώμα από χαλίκια 4-5cm που λειτουργούσαν ως φίλτρο και βοηθούσαν στην ομαλή και ομοιόμορφη σε όλο το πλάτος εισαγωγή του σταθεροποιητή στο σύνολο της διατομής του δοκιμίου. Στη συνέχεια γινόταν πλήρωση με κατάλληλη συμπίεση του πρώτου μέλους με άμμο. Κάθε επόμενο τμήμα της κυλινδρικής στήλης τοποθετούνταν και διαμορφώνονταν με την ίδια διαδικασία. Στο τέλος τοποθετούνταν το τελευταίο κάλυμμα και οι βαλβίδες συνδέονταν με τις δεξαμενές νερού.

Πριν την εισαγωγή του σταθεροποιητή η στήλη αφήνονταν για δύο τρεις ημέρες συνδεδεμένη με τις δεξαμενές νερού ώστε να υπάρχει προσομοίωση ροής από κάτω προς τα επάνω μέχρι που η άμμος να κορεστεί πλήρως. Κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου πραγματοποιούνταν μέτρηση της παροχής και υπολογιζόταν η υδραυλική αγωγιμότητα της κάθε δοκιμής.

Μέσες τιμές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.2**. Στη συνέχεια άρχιζε η εισαγωγή του μίγματος της κολλοειδούς πυριτίας από τη βάση της στήλης. Στη δεξαμενή του μίγματος του σταθεροποιητή η στάθμη ήταν σταθερή με τη στάθμη της δεξαμενής εισόδου του νερού. Μετά την εκκίνηση της εισαγωγής του σταθεροποιητή η ροή του συνεχίστηκε έως την πλήρη διανομή του σε όλο τον όγκο του εδάφους της στήλης ή έως ότου το ιξώδες του είχε αυξηθεί τόσο πολύ που η συνέχιση της ροής ήταν αδύνατη. Όπως ήδη προαναφέρθηκε ο σταθεροποιητής χρωματίστηκε με κόκκινο χρώμα ζαχαροπλαστικής ώστε να μπορεί να παρατηρηθεί η διανομή του στη στήλη. Επίσης η συγκέντρωση χλωριούχων, το pH, το ιξώδες και ο ρυθμός ροής παρακολουθούνταν κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

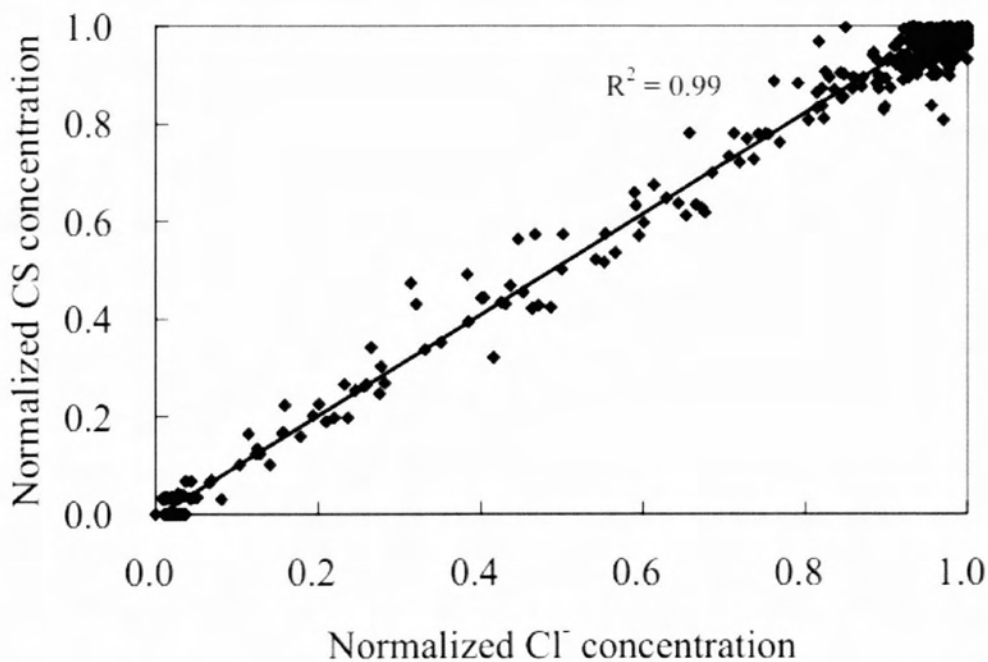
Για τον υπολογισμό του ποσοστού συγκέντρωσης της κολλοειδούς πυριτίας στο υγρό των πόρων πραγματοποιούνταν λήψη δειγμάτων υγρού πόρων, περίπου 5 ml, από υποδοχείς και ακολουθούσε καύση, σε φούρνο εργαστηρίου σε 200°C για 2-3 μέρες. Το βάρος του παραμένοντος υλικού μετά τη καύση χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του ποσοστού της πυριτίας στο αρχικό διάλυμα. Στο βάρος που

προέκυπτε από την καύση εκτός από την πυριτία περιλαμβάνονταν NaCl και διαλυμένα στερεά από το νερό βρύσης που όμως θεωρήθηκαν αμελητέα σε σχέση με το βάρος της πυριτίας.

Τα αποτελέσματα για τις 15 δοκιμές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 2.1**.

2.5 Σχέση Συγκέντρωσης Χλωριούχων Ιόντων και Κολλοειδούς Πυριτίας

Τα ιόντα χλωρίου αναμένονταν να αποτελούν ένα συντηρητικό και καλό δείκτη για το ποσοστό της κολλοειδούς πυριτίας που θα διανεμόταν μέσα στη στήλη. Για να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια της εν λόγω υπόθεσης μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις πυριτίας και των ιόντων χλωρίου. Οι συγκεντρώσεις πυριτίας και ιόντων χλωρίου κανονικοποιήθηκαν διαιρώντας τις συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν στα δείγματα με τις αρχικές συγκεντρώσεις της πηγής αντίστοιχα. Οι κανονικοποιημένες τιμές παρουσιάζονται για τις δοκιμές στο **Σχήμα 2.5**



Σχήμα 2.5. Συσχέτιση μεταξύ των κανονικοποιημένων συγκεντρώσεων χλωριούχων ιόντων και CS. (Lin 2006)

Η ύπαρξη μερικών τιμών μεγαλύτερων της μονάδας μπορεί να οφείλεται στις δυσκολίες βαθμονόμησης με τον ανιχνευτή χλωριούχων (chloride probe) ή της

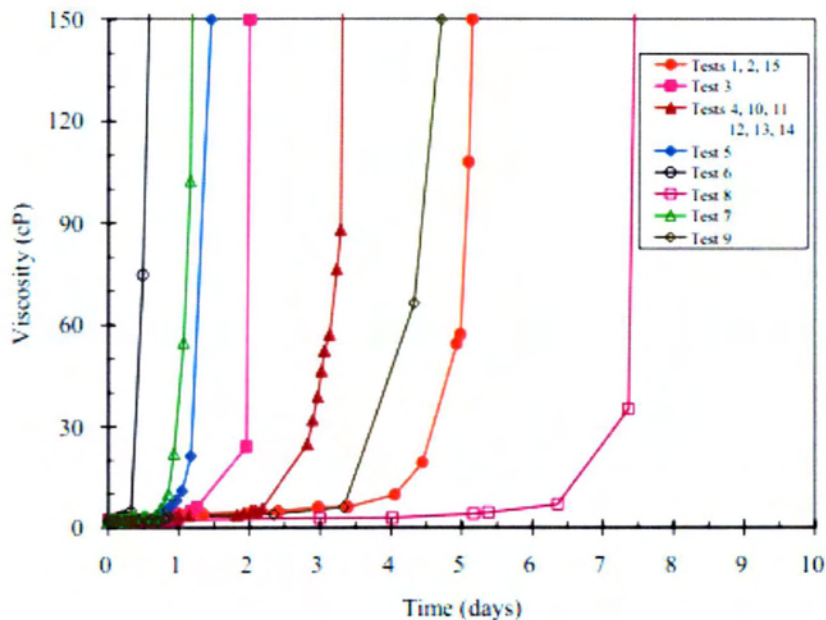
παρουσίας NaCl ή διαλυμένων στερεών στα δείγματα. Το **Σχήμα 2.5** απεικονίζει ότι υπάρχει μία γραμμική σχέση μεταξύ της κανονικοποιημένης συγκέντρωσης κολλοειδούς πυριτίας και κανονικοποιημένης συγκέντρωσης χλωριούχων (clorides) με τιμή $R^2=0.99$. Επομένως ο Lin Yuanzhi συμπεραίνει ότι η κανονικοποιημένη συγκέντρωση χλωριούχων αποτελεί ένα εξαιρετικό δείκτη του ποσοστού της κολλοειδούς πυριτίας στο υγρό των πόρων.

2.6 Επιδράσεις του Ιξώδους στην Εισπιεσιμότητα Πυριτίας

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός σχηματισμού όπως φαίνεται από τη παρακάτω σχέση

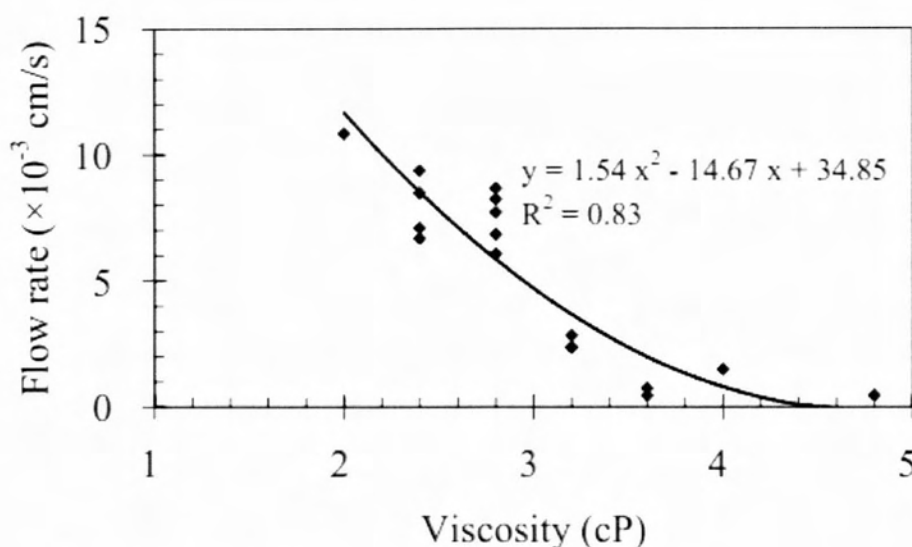
$$k = \frac{\kappa\gamma}{\mu}$$

είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το ιξώδες του υγρού που τον διαπερνάει, όπου k η υδραυλική αγωγιμότητα, κ εσωτερική διαπερατότητα του υλικού μέσου, μ το δυναμικό ιξώδες ρευστού, γ το ειδικό βάρος. Η διανομή της κολλοειδούς πυριτίας με χαμηλή πίεση μπορεί να επιτευχθεί όσο το ιξώδες παραμένει σε χαμηλές τιμές. Στο **Σχήμα 2.6** φαίνεται ότι το ιξώδες του σταθεροποιητή παραμένει χαμηλό μέχρι λίγο πριν τη μετατροπή του σε γέλη όπου αρχίζει να αυξάνει ταχύτατα.



Σχήμα 2.6. Καμπύλες χρόνου γέλης για τις δοκιμές 0.9 μέτρων. (Lin 2006)

Στο **Σχήμα 2.7** όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπιστώθηκε ότι η διανομή του σταθεροποιητή πραγματοποιείται γρηγορότερα όσο το ιξώδες είναι

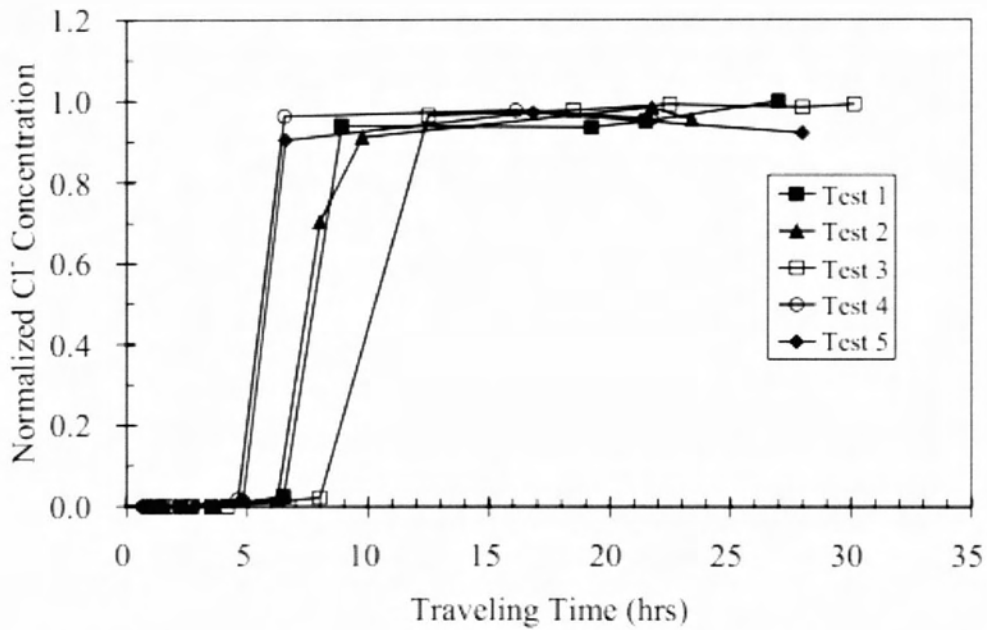


Σχήμα 2.7. Σχέση ρυθμού ροής ιξώδους. (Lin 2006)

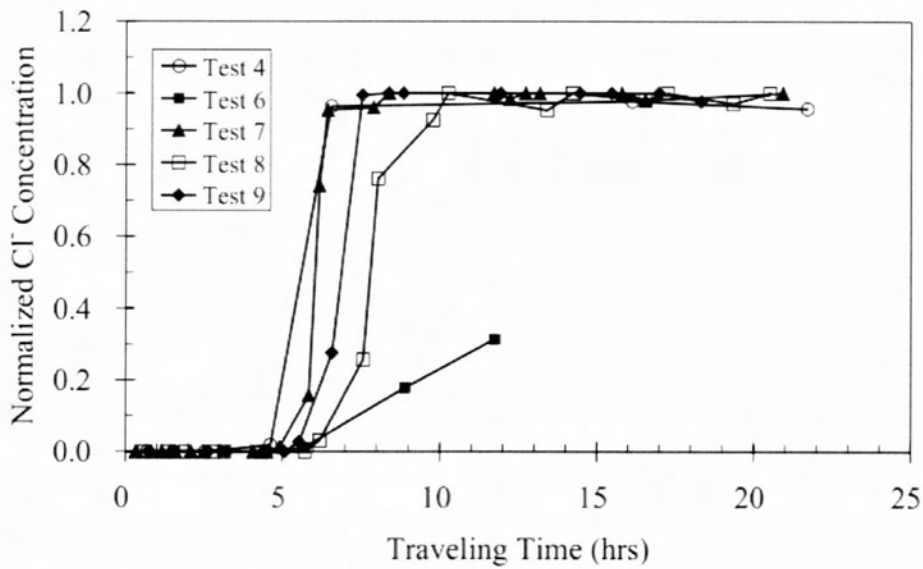
μικρότερο από 3.6 cP. Από τη στιγμή που ο σταθεροποιητής έχει ιξώδες 3.6 cP ο ρυθμός ροής μειώνεται 20% με συνέπεια την εξαιρετικά μεγάλη αύξηση του χρόνου διανομής του. Συνεπώς η διανομή πρέπει να πραγματοποιείται πριν το ιξώδες φτάσει την κομβική αυτή τιμή.

2.7 Επιδράσεις του pH και της Ιοντικής Ισχύος στην Εισπίεση της Πυριτίας

Ο χρόνος γέλης και κατά συνέπεια το ιξώδες επηρεάζονται από το pH και την ιοντική ισχύ των κατιόντων της κολλοειδούς πυριτίας. Για να διερευνηθεί η επιρροή του pH στις δοκιμές 1 έως 5 το pH μεταβαλλόταν ενώ η ιοντική ισχύς παρέμεινε σταθερή. Αντίστοιχα στις δοκιμές 4,6 έως 9 η ιοντική ισχύς μεταβαλλόταν και το pH διατηρήθηκε σταθερό. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στους **Πίνακες 2.1, 2.3, 2.4**. Στα **Σχήματα 2.8 και 2.9** είναι εμφανές ότι οι χρόνοι όπου ο σταθεροποιητής έφτασε στο μέσο της στήλης ήταν παρόμοιοι καθώς και το ιξώδες κάθε δοκιμής παρέμεινε χαμηλό με εξαίρεση την δοκιμή 6.



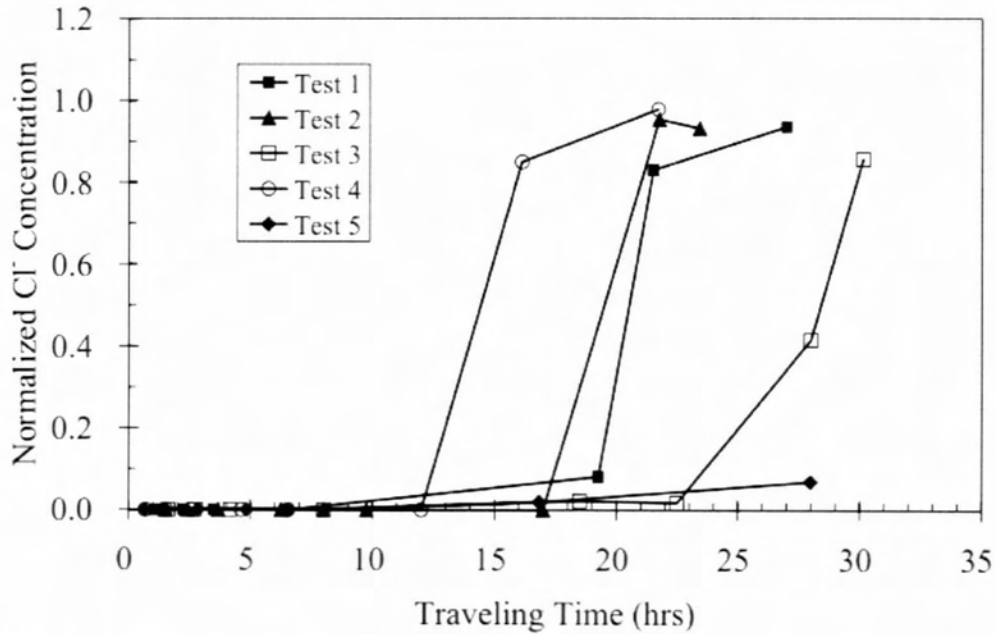
Σχήμα 2.8. Επιδράσεις του pH στις καμπύλες του χρόνου στο μέσο ύψος της στήλης. (Lin 2006)



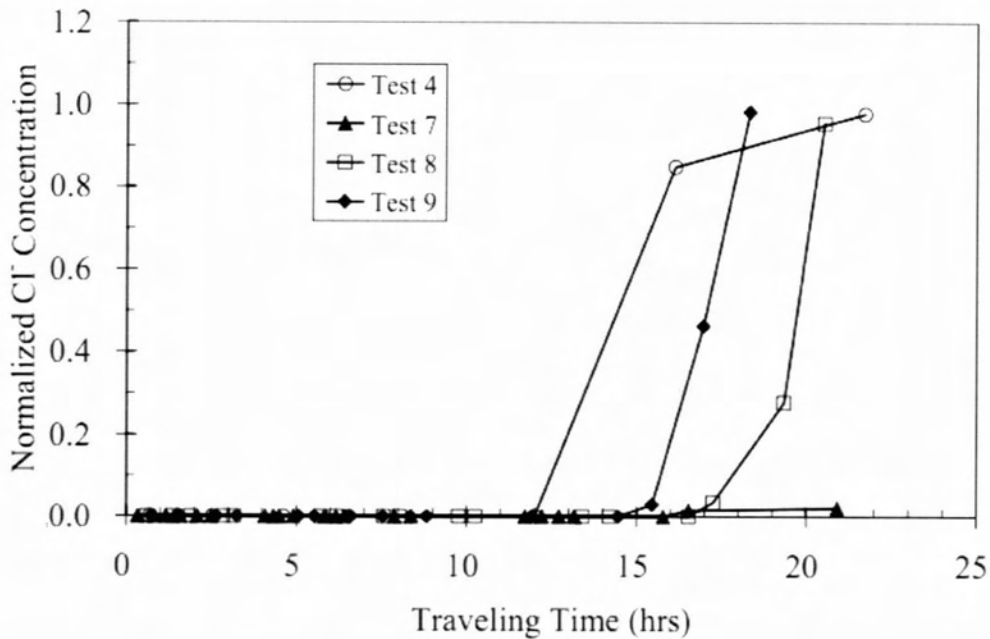
Σχήμα 2.9. Επιδράσεις της ιοντικής ισχύς στις καμπύλες του χρόνου στο μέσο ύψος της στήλης. (Lin 2006)

Στη δοκιμή 6 οι υψηλές τιμές της ιοντικής ισχύς οδήγησαν στην αύξηση του ιξώδους πριν ο σταθεροποιητής προλάβει να φθάσει στο μέσο της στήλης. Το Σχήμα 2.10 και το Σχήμα 2.11 παρουσιάζουν τις καμπύλες χρόνου και κανονικοποιημένης

συγκέντρωσης Cl^- στην κορυφή της στήλης και τη σημασία του ιξώδους στο χρόνο μεταφοράς.



Σχήμα 2.10. Επιδράσεις του pH στις καμπύλες του χρόνου στην κορυφή της στήλης. (Lin 2006)

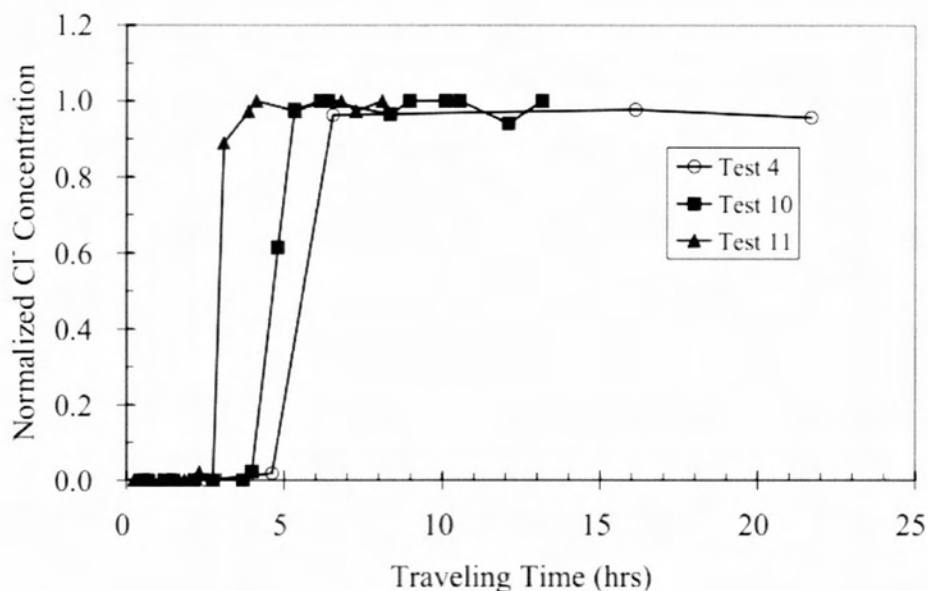


Σχήμα 2.11. Επιδράσεις της ιοντικής ισχύς στις καμπύλες του χρόνου στη κορυφή της στήλης. (Lin 2006)

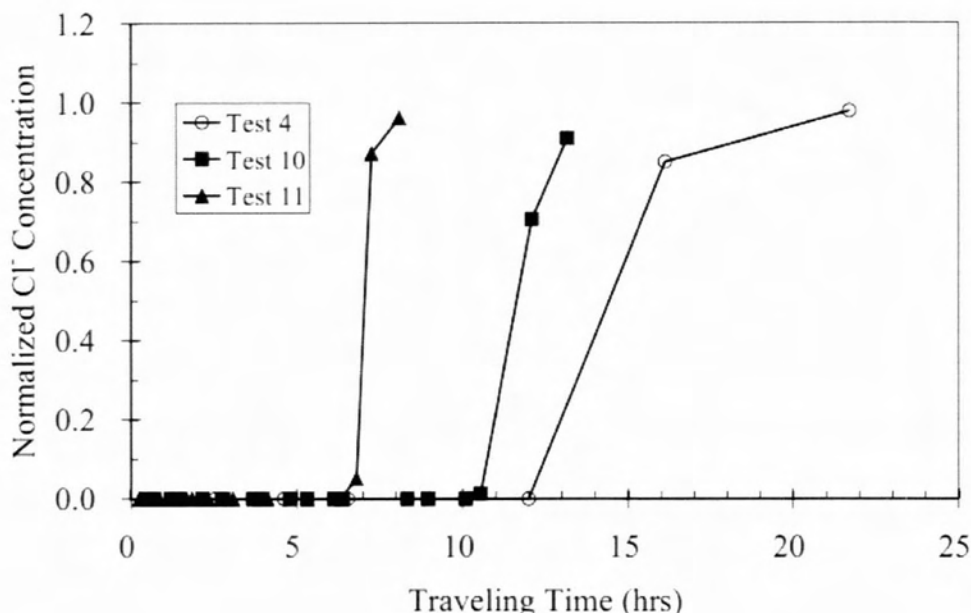
Όσο αυξάνει το ιξώδες ο χρόνος μεταφοράς του σταθεροποιητή αυξάνει δραματικά. Επίσης όσο πιο γρήγορα αυξήθηκε το ιξώδες διαπιστώθηκε ότι περισσότερος χρόνος απαιτήθηκε για να ολοκληρωθεί η δοκιμή. Για παράδειγμα στις δοκιμές 5 και 7 το ιξώδες αυξήθηκε περισσότερο από 3.6 cP και η ροή του μίγματος σταμάτησε στο 85% του ύψους της στήλης. Για το λόγο αυτό παρατηρούνται και μικρές έως ελάχιστες συγκεντρώσεις Cl στις συγκεκριμένες δοκιμές καθώς η πυριτία δεν εισπιάστηκε στην κορυφή της στήλης. Επομένως το pH και η ιοντική ισχύς των κατιόντων επηρεάζουν το ιξώδες ,που το τελευταίο επηρεάζει τη μεταφορά του μίγματος κολλοειδούς πυριτίας.

2.8 Επιδράσεις της Υδραυλικής Κλίσης στην Εισπιασιμότητα Πυριτίας

Η υδραυλική κλίση παρέχει τη κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά του μίγματος κολλοειδούς πυριτίας στη κορεσμένη άμμο της στήλης. Ο Lin Yuanzhi πραγματοποίησε τρεις δοκιμές για να εξετάσει την επίδραση της υδραυλικής κλίσης στη διανομή του σταθεροποιητή. Η δοκιμή 4 είχε υδραυλική κλίση 0.04 αντίστοιχα οι δοκιμές 6, 10 είχαν 0.087 και 0.137. Στα **Σχήματα 2.12** και **2.13** είναι εμφανές ότι η ταχύτητα μετάδοσης της κολλοειδούς πυριτίας είναι ανάλογη με την τιμή της υδραυλικής κλίσης.



Σχήμα 2.12. Επιδράσεις της υδραυλικής κλίσης στις καμπύλες του χρόνου στο μέσο ύψος της στήλης. (Lin 2006)



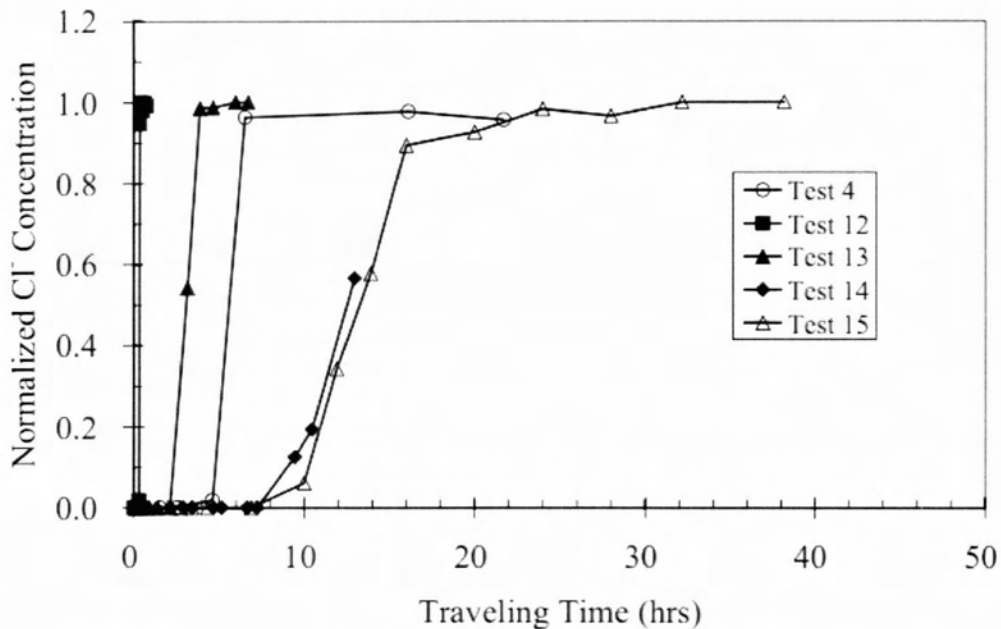
Σχήμα 2.13. Επιδράσεις της υδραυλικής κλίσης στις καμπύλες του χρόνου στη κορυφή της στήλης. (Lin 2006)

Επομένως ο νόμος του Darcy μπορεί να εφαρμοστεί σε εφαρμογές με παρόμοιες συνθήκες. Τονίζεται ότι το ιξώδες κατά την διάρκεια των συγκεκριμένων δοκιμών παρέμενε χαμηλό ώστε να μην επηρεάσει τη ταχύτητα μεταφοράς του σταθεροποιητή.

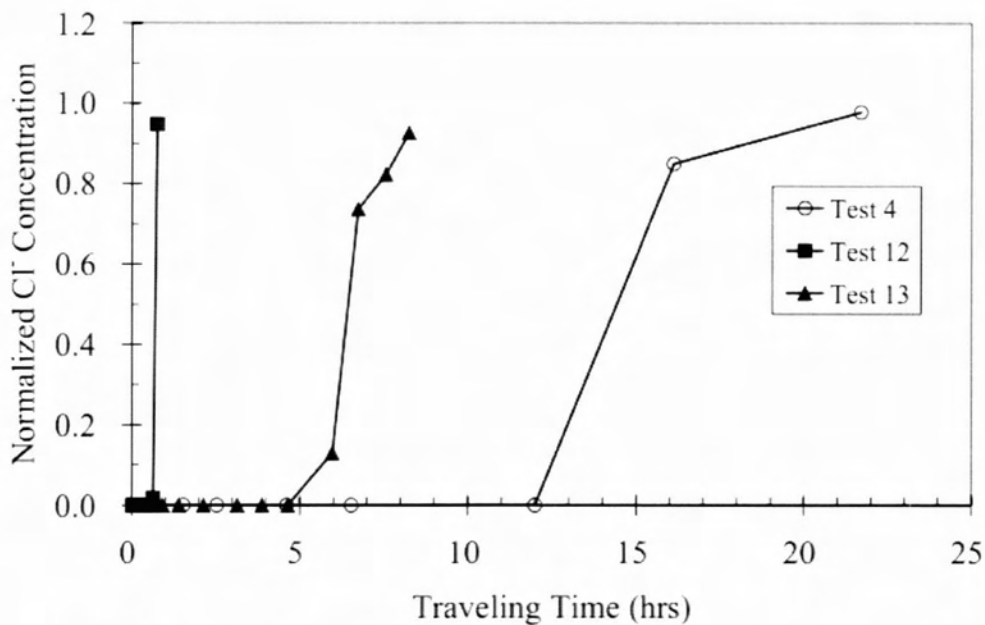
2.9 Επιδράσεις των Εδαφικών Υλικών στην Εισπιεσιμότητα Πυριτίας

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικού τύπου άμμοι για να εξεταστεί η επίδραση του εδαφικού υλικού. Χρησιμοποιήθηκαν άμμος Nevada, Ottawa 20/30 και διαβαθμισμένη άμμος αναμιγμένη με ιλύ σε ποσοστό 5% και 10% του βάρους (δοκιμές 4,12,13,14,15). Παρατηρήθηκε ότι οι δοκιμές σε ιλυώδη άμμο ήταν δύσκολο να ολοκληρωθούν καθώς υπήρχε επαναλαμβανόμενη έμφραξη των βαλβίδων εισόδου και εξόδου από τη μετακίνηση σωματιδίων ιλύος. Για την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων χρησιμοποιήθηκε διαβαθμισμένη άμμος. Ωστόσο η δοκιμή 14 δεν ολοκληρώθηκε καθώς υπήρξε διακοπή της ροής πιθανών λόγω της δημιουργίας υδραυλικού φράγματος μέσα στη στήλη. Στα **Σχήματα 2.14 και 2.15** παρουσιάζονται οι καμπύλες του χρόνου που

απαιτήθηκε για τη μεταφορά της κολλοειδούς πυριτίας (breakthrough curves) σε εδάφη με διαφορετικό πορώδες στο μέσο της στήλης.



Σχήμα 2.14. Επιδράσεις του τύπου εδάφους στις καμπύλες του χρόνου στο μέσο ύψος της στήλης. (Lin 2006)



Σχήμα 2.15. Επιδράσεις του τύπου εδάφους στις καμπύλες του χρόνου στη κορυφή της στήλης. (Lin 2006)

Ο ρυθμός μεταφοράς ήταν ανάλογος της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους. Στους Πίνακες 2.1, 2.2 φαίνεται ότι η υδραυλική αγωγιμότητα της στήλης άμμου

Ottawa είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την στήλη με άμμο Nevada, ομοίως σχεδόν δύο τάξεις μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μεταφοράς του μίγματος.

Στις δοκιμές 13 και 15 με 5% κ.β. ιλυώδη άμμο οι υδραυλικές αγωγιμότητες ήταν περίπου ίσες ενώ η υδραυλική κλίση της δοκιμής 13 ήταν 4 φορές μεγαλύτερη με συνέπεια ο ρυθμός μεταφοράς να είναι περίπου 4 φορές μεγαλύτερος από τη δοκιμή 15.

2.10 Συμπεράσματα Δοκιμών σε Στήλες 0.9m

Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη μεταφορά του μίγματος αποτελεί το ιζώδες του σταθεροποιητή. Το ιζώδες για να πραγματοποιηθεί η επιτυχώς η εισπίεση της κολλοειδούς πυριτίας θα πρέπει να παραμείνει σε τιμές μικρότερες από 3.6 cP. Η ιοντικής ισχύς και το pH επηρεάζουν το ιζώδες του μίγματος και επομένως τη μεταφορά του σταθεροποιητή. Η υδραυλική κλίση επηρεάζει το ρυθμό μεταφοράς του σταθεροποιητή αλλά σε μικρότερο βαθμό από το ιζώδες. Για το λόγο αυτό για μεγαλύτερες αποστάσεις πρέπει να επιλέγονται μεγαλύτερες υδραυλικές κλίσεις με στόχο τη μείωση του χρόνου εισπίεσης. Ένας ακόμη παράγοντας επιρροής αποτελεί η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους. Όταν μειώνεται η υδραυλική αγωγιμότητα αυξάνεται ο χρόνος διανομής του σταθεροποιητή. Τέλος οι κανονικοποιημένες συγκεντρώσεις χλωριούχων (chloride) αποτελούν ένα εξαιρετικό δείκτη του ποσοστού της κολλοειδούς πυριτίας στο ένεμα.(Lin Yuanzhi)

Πίνακας 2.1 Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά και αποτελέσματα δοκιμών.(Lin 2006)

Table 4-1. Testing program for 3-foot column tests

Test	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Soil Type ¹	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	O	SS5	SS10	SS5
Relative Density	0.41	0.39	0.43	0.39	0.42	0.42	0.41	0.40	0.40	0.40	0.42	0.39	0.32	0.31	0.35
Hydraulic Conductivity ($\cdot 10^{-3}$ cm/s)	6.5	8.3	4.6	8.9	8.6	4.6	8.9	8.3	8.5	7.9	8.6	2.20	6.2	2.6	5.0
pH	7.1	7.1	6.5	6.8	6.2	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	7.1
Ionic Strength (N)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.15	0.05	0.08	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Gradient, i	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.09	0.14	0.04	0.18	0.18
Travel Time (hrs)	32	32	23	45	18	7	17	124	56	45	45	45	45	45	32
Coverage (%)	100	100	100	100	85	40	85	100	100	100	100	100	100	50	85
Time to 50% Coverage (hrs)	8	8	10	7	7	8	6	8	8	5	3	1	4	14	16
μ at 50% Coverage (cP)	2.4	2.4	2.8	2.0	2.8	4.4	2.8	2.4	2.0	2.4	2.4	2.0	2.0	2.0	2.4
Time to 100% Coverage (hrs)	22	22	30	22	--	--	--	21	18	12	7	1	8	--	--
μ at 100% Coverage (cP)	2.8	3.2	6	2.8	--	--	--	2.4	2.0	2.8	2.4	2.0	2.0	--	--

¹ N=Nevada. O=Ottawa. SS5=5 wt % silty sand. SS10=10 wt % silty sand

Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικές ιδιότητες εδαφικών υλικών. (Lin 2006)

Sand type	d_{max} (kN/m ³)	d_{min} (kN/m ³)	e_{max}	e_{min}	D_{50} (mm)	D_r (%)	k (cm/s)
Nevada sand	17.3	13.9	0.89	0.51	0.15	41	7.6×10^{-3}
Ottawa sand	17.7	15.3	0.92	0.35	0.24	39	2.2×10^{-1}
5wt% silty sand	17.0	14.5	0.80	0.54	0.29	33	5.6×10^{-3}
10wt% silty sand	17.0	13.7	0.89	0.52	0.28	31	2.6×10^{-3}

Πίνακας 2.3.α Επιδράσεις του pH στο ιξώδες για κολλοειδής πυριτία 5% κ.β. με ιοντική ισχύ 0.1 N. (Lin 2006)

pH 6.2		pH 6.5		pH 6.8		pH 7.1		pH 7.5	
Time (days)	Viscosity (cP)	Time (days)	Viscosity (cP)	Time (days)	Viscosity (cP)	Time (days)	Viscosity (cP)	Time (days)	Viscosity (cP)
0.03	2.40	0.07	2.40	0.03	2.00	0.00	2.40	0.00	2.40
0.06	2.40	0.11	2.40	0.06	2.00	0.06	2.40	3.81	2.40
0.12	2.40	0.17	2.80	0.11	2.00	0.10	2.40	4.87	2.80
0.20	2.40	0.33	2.80	0.19	2.00	0.15	2.40	5.56	3.20
0.27	2.80	0.77	3.20	0.27	2.40	0.26	2.40	6.77	5.20
0.70	3.60	0.94	4.00	0.67	2.40	0.33	2.40	6.82	5.20
0.81	4.40	1.17	4.80	0.90	2.80	0.41	2.40	6.93	5.60
0.87	6.00	1.26	6.00	0.96	3.20	0.91	3.20	7.60	10.40
0.96	8.00	1.95	24.00	1.00	3.60	0.98	3.20	8.73	17.20
1.05	10.80	1.99	150.00	1.15	3.60	1.03	3.60	8.95	21.60
1.17	21.20	2.36	759.80	1.82	3.60	1.34	4.00	10.56	106.60
1.45	150.00			1.91	4.40	2.04	4.80	11.56	334.70
				2.03	4.80	2.41	4.80		
				2.08	4.80	2.97	6.00		
				2.18	5.60	3.39	6.00		
				2.82	24.80	4.05	9.60		
				2.89	32.00	4.44	19.20		
				2.96	38.80	4.93	54.40		
				3.02	46.40	4.98	57.20		
				3.06	52.40	5.09	108.00		
				3.13	57.20	5.14	150.00		
				3.23	76.40	5.22	186.40		
				3.29	88.00				
				3.70	1600.00				

Πίνακας 2.3.β Επιδράσεις του pH στο ιξώδες για κολλοειδής πυριτία 5% κ.β. με ιοντική ισχύ 0.1 N. (Lin 2006)

pH 7.8		pH 8.1		pH 8.4		pH 8.7	
Time (Days)	Viscosity (cP)	Time (Days)	Viscosity (cP)	Time (Days)	Viscosity (cP)	Time (Days)	Viscosity (cP)
0.00	2.40	0.00	2.40	0.00	2.40	0.00	2.40
3.81	2.40	3.81	2.40	3.81	2.40	3.81	2.00
4.87	2.40	4.87	2.40	4.87	2.40	4.87	2.40
5.56	2.80	5.56	2.40	5.56	2.80	5.56	2.40
6.77	2.80	6.82	3.20	6.93	2.80	6.93	2.40
7.61	4.40	7.64	3.60	7.64	2.40	7.64	2.80
8.86	3.20	8.95	2.40	8.95	3.20	8.95	2.40
8.95	3.60	11.56	2.80	11.56	3.20	11.56	2.40
11.56	4.40	12.85	2.80	12.85	3.60	12.85	2.00
12.85	5.20	13.88	2.40	13.88	2.00	13.88	2.40
13.88	6.40	15.68	3.20	15.68	2.80	18.67	2.40
15.68	14.00	18.67	3.20	18.67	2.80	29.77	3.20
18.67	108.00	21.92	5.20	21.92	2.80	30.73	2.80
18.70	164.40	24.99	8.00	24.99	3.60	39.02	3.60
		29.77	24.40	30.73	4.40	44.63	4.00
		30.73	150.40	39.02	6.00	48.00	6.40
				44.63	7.20	57.70	9.20
				48.00	10.80	61.81	14.00
				57.70	90.40	71.67	64.80
				61.81	1600.00		

Πίνακας 2.4. Επιδράσεις της ιοντικής ισχύς στο ιώδες για κολλοειδής πυριτία 5% κ.β. με pH 6.8. (Lin 2006)

0.05N (NaCl)		0.075 N (NaCl)		0.1 N (NaCl)		0.15 N (NaCl)		0.2 N (NaCl)	
Time (days)	Viscosity (cP)	Time (days)	Viscosity (cP)	Time (days)	Viscosity (cP)	Time (days)	Viscosity (cP)	Time (days)	Viscosity (cP)
0.00	2.40	0.00	2.00	0.03	2.00	0.00	2.00	0.06	2.40
0.03	2.40	0.03	2.00	0.06	2.00	0.01	2.40	0.13	2.40
0.06	2.40	0.06	2.00	0.11	2.00	0.03	2.40	0.19	3.20
0.08	2.40	0.08	2.00	0.19	2.00	0.05	2.40	0.24	3.20
0.12	2.40	0.12	2.00	0.27	2.40	0.07	2.40	0.32	4.40
0.13	2.40	0.13	2.00	0.67	2.40	0.09	2.40	0.49	74.80
0.24	2.40	0.24	2.00	0.90	2.80	0.10	2.40	0.69	249.50
0.26	2.40	0.26	2.00	0.96	3.20	0.17	2.40		
0.32	2.40	0.32	2.00	1.00	3.60	0.18	2.40		
0.33	2.40	0.33	2.00	1.15	3.60	0.19	2.40		
0.41	2.40	0.41	2.00	1.82	3.60	0.20	2.40		
0.43	2.40	0.43	2.00	1.91	4.40	0.24	2.40		
0.56	2.40	0.56	2.00	2.03	4.80	0.26	2.40		
0.59	2.40	0.59	2.00	2.08	4.80	0.27	2.80		
0.69	2.40	0.69	2.00	2.18	5.60	0.33	2.80		
0.72	2.40	0.72	2.00	2.82	24.80	0.35	3.20		
0.81	2.40	0.81	2.80	2.89	32.00	0.39	3.20		
0.85	2.40	0.85	3.20	2.96	38.80	0.49	3.20		
0.97	2.40	2.34	4.00	3.02	46.40	0.51	3.20		
2.99	2.80	3.34	6.00	3.06	52.40	0.53	3.20		
4.01	2.80	4.32	66.40	3.13	57.20	0.55	3.20		
5.16	4.00	4.71	150.00	3.23	76.40	0.66	3.20		
5.38	4.40	4.92	220.00	3.29	88.00	0.69	3.60		
6.36	6.80	5.34	3359.00	3.70	1600.00	0.75	5.60		
7.36	35.20					0.85	10.00		
8.36	3559.00					0.93	22.00		
						1.07	54.80		
						1.16	102.40		
						1.21	209.20		
						1.23	286.70		

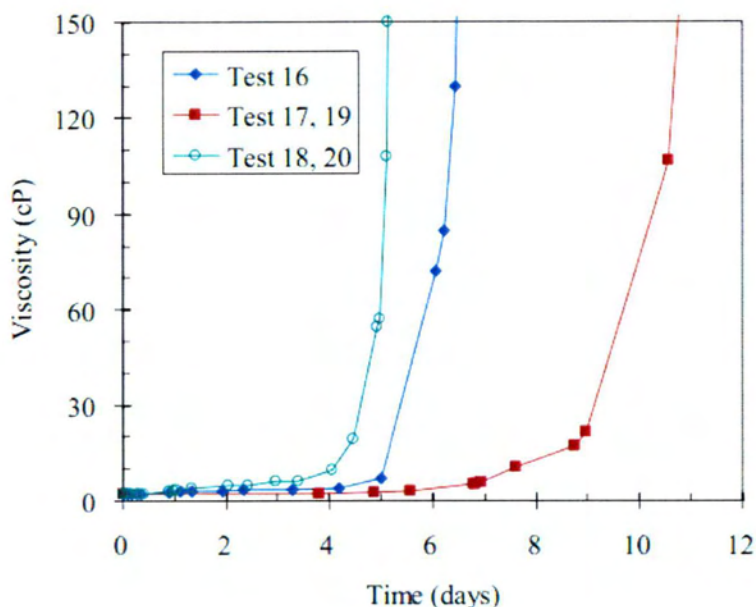
2.11 Δοκιμές Εισπίεσης Πυριτίας σε Μεγαλύτερες Στήλες

Από τη διδακτορική διατριβή του Lin Yuanzhi συγκεντρώθηκαν και παρουσιάζονται η διαδικασία και τα αποτελέσματα των δοκιμών σε στήλες μεγαλύτερου μεγέθους. Οι κύριοι στόχοι των δοκιμών σε μεγαλύτερες στήλες ήταν να εξακριβωθεί ότι το ένεμα κολλοειδούς πυριτίας μπορεί να μεταφερθεί σε μεγαλύτερες αποστάσεις με διατήρηση επαρκών συγκεντρώσεων των συστατικών του, ικανό να ελαχιστοποιήσει το κίνδυνο ρευστοποίησης. Επίσης, να προσδιοριστεί εάν οι ίδιοι μηχανισμοί κυριαρχούν στη διανομή της κολλοειδούς πυριτίας. Η ποσότητα της κολλοειδούς πυριτίας που διανεμήθηκε στη κάθε στήλη και η κατανομή της συγκέντρωσης κατά μήκος της στήλης μετρήθηκαν κατά τις δοκιμές. Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστούν οι σημαντικότεροι παράγοντες επιρροής στη μεταφορά του ενέματος της πυριτίας.

Στη διδακτορική διατριβή του Lin Yuanzhi πραγματοποιήθηκαν 4 δοκιμές σε στήλες ύψους 3 μέτρων και μία δοκιμή σε στήλη ύψους 9 μέτρων.

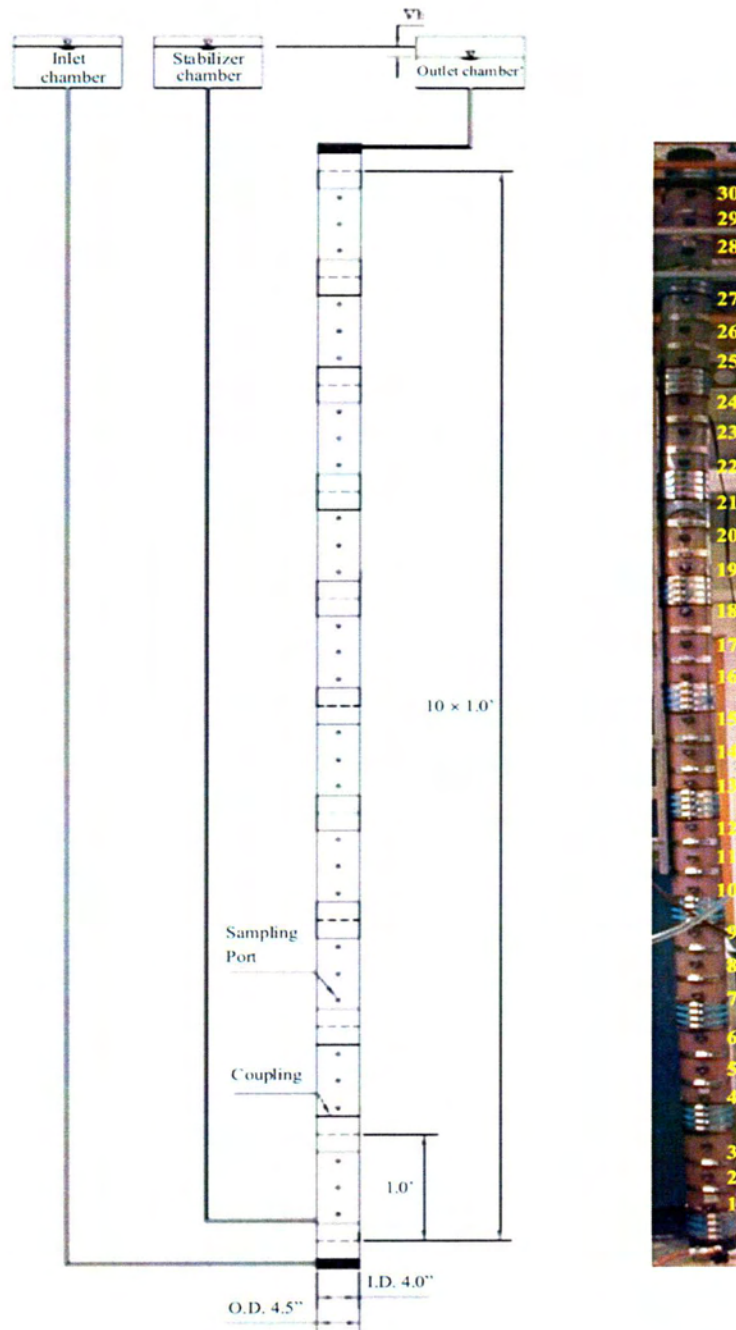
2.12 Περιγραφή Δοκιμών Εισπίεσης σε Μεγαλύτερες Στήλες

Η ιοντικής ισχύς των κατιόντων παρέμεινε σταθερή 0.1 N και το pH είχε τέτοιο εύρος ώστε το ιζώδες του σταθεροποιητή να παραμείνει χαμηλό κατά τη μεταφοράς του μέσα στη στήλη. Στις δοκιμές 16 και 17 χρησιμοποιήθηκε άμμος Nevada ενώ στις δοκιμές 18,19 και στην δοκιμή 20 της στήλης των 9 μέτρων χρησιμοποιήθηκε άμμος Ottawa 20/30. Η υδραυλική αγωγιμότητα της άμμου Nevada και της άμμου Ottawa που προσδιορίστηκαν ήταν 0.01 cm/s και 0.2 cm/sec αντίστοιχα. Λεπτομερείς τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα 5-1. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε αραιωμένο διάλυμα Ludox® SM-30 όπου η κολλοειδής πυριτία ήταν στο 5% του βάρους. Οι χρόνοι γέλης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.16** και είχαν εύρος από 4 έως 9 ημέρες.

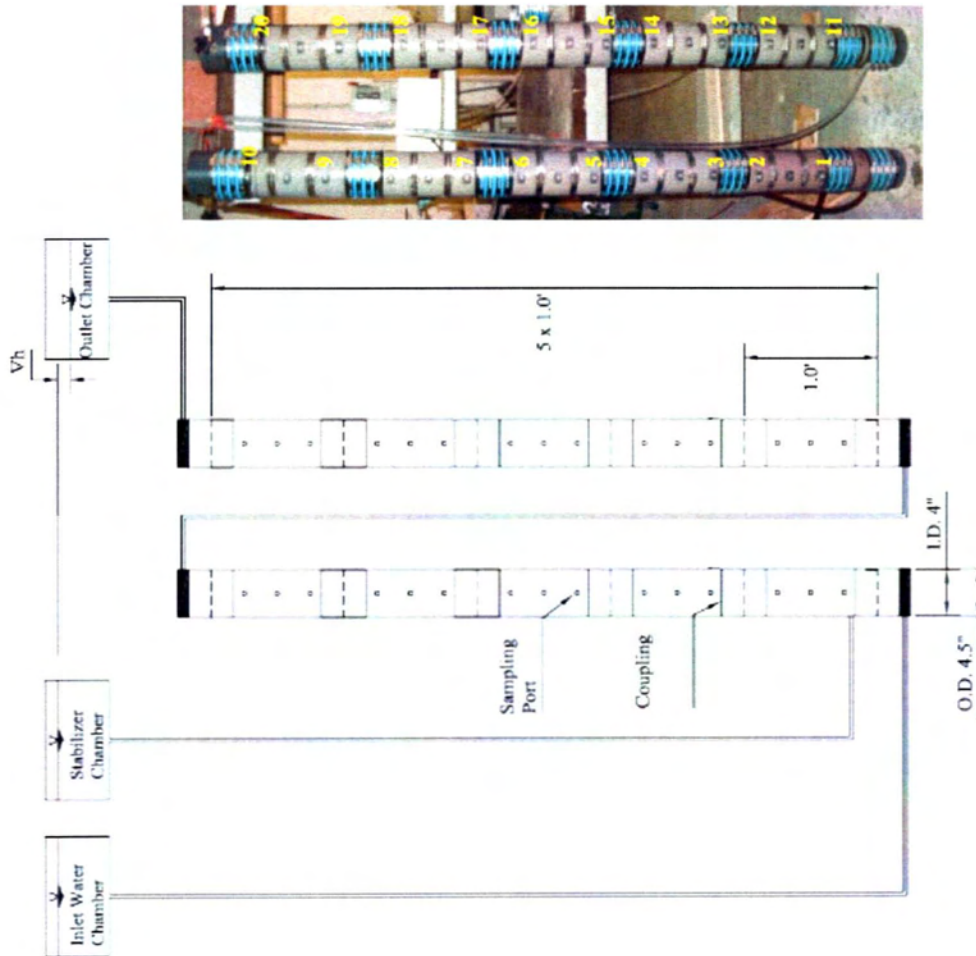


Σχήμα 2.16 Καμπύλες χρόνου γέλης. (Lin 2006)

Η προετοιμασία των δοκιμών ήταν ανάλογη με αυτή των μικρότερων κυλινδρικών στηλών. Οι στήλες ύψους 3 μέτρων αποτελούνταν από 10 μικρότερα μέλη ύψους 0.3 μέτρων ενώ η στήλη των 9 μέτρων από 15 μικρότερα μέλη ύψους 0.6 μέτρων. Οι στήλες των 3 μέτρων διαμορφώθηκαν με δύο διαφορετικούς τρόπους. Αρχική επιλογή ήταν η στήλη των 3 μέτρων να είναι ενιαία όπως στο **Σχήμα 2.17** όμως λόγω των δυσκολιών που προέκυψαν στην ένωση των μικρότερων μελών μεταξύ τους και στη δειγματοληψία του υγρού πόρων εφαρμόστηκε μία άλλη μέθοδος. Στην δεύτερη μέθοδο διαμορφώθηκαν δύο στήλες ύψους 1.5 μέτρων η κάθε μία, οι οποίες τοποθετήθηκαν εν σειρά **Σχήμα 2.18**. Οι στήλες συνδέθηκαν μεταξύ τους με σωλήνα η αρχή του οποίου βρισκόταν στην κορυφή της πρώτης στήλης και το τέλος του στη βάση της δεύτερης στήλης. Με αυτή τη σύνδεση το νερό και στη συνέχεια ο σταθεροποιητής έρεε από τη κορυφή της πρώτης στήλης στη βάση της δεύτερης στήλης. Στη δοκιμή της ενιαίας στήλης υπήρχαν 30 θέσεις δειγματοληψίας ενώ στις δοκιμές 17,18,19 υπήρχαν 20 θέσεις δειγματοληψίας (μία ανά 15 εκατοστά).

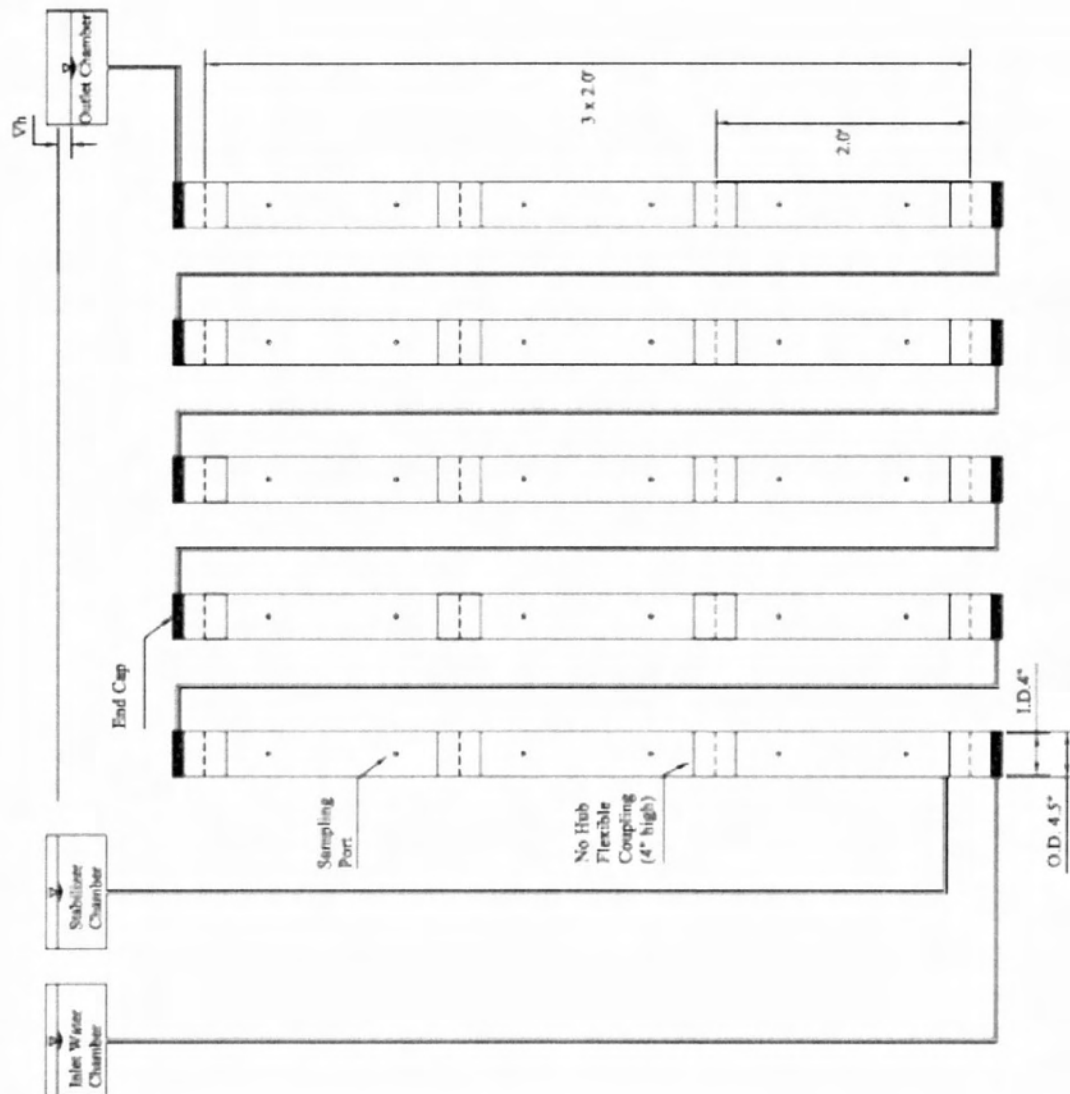


Σχήμα 2.17. Όψη από ενιαία στήλη ύψους 3 μέτρων. (Lin 2006)



Σχήμα 2.18. Όψη στήλης 3 μέτρων αποτελούμενη από δύο στήλες 1.5 μέτρου εν σειρά. (Lin 2006)

Στη δοκιμή της στήλης των 9 μέτρων συνδέθηκαν εν σειρά 5 μικρότερες στήλες ύψους 1.8 μέτρων η κάθε μία όπως φαίνεται σχηματικά στο **Σχήμα 2.20**. Το συνολικό μήκος της στήλης είχε 30 θέσεις δειγματοληψίας (μία θέση ανά 0.3 μέτρα).



Σχήμα 2.19. Σχηματική απεικόνιση στήλης 9 μέτρων. (Lin 2006)

2.13 Αποτελέσματα Δοκιμών Εισπίεσης σε Μεγαλύτερες Στήλες

Τα αποτελέσματα των δοκιμών απεικονίζονται στον Πίνακα 2.5 ενώ ο Πίνακας 2.6 περιλαμβάνει τους μέσους ρυθμούς ροής για τα αντίστοιχα διαστήματα εισπίεσης. Τα Σχήματα 2.20 έως και 2.25 παρουσιάζουν τους απαιτούμενους χρόνους για τη μετακίνηση της κολλοειδούς πυριτίας στη στήλη για διαφορετικές αποστάσεις μέσα σε αυτήν. Οι καμπύλες αυτές απεικονίζουν τη μεταβολή της συγκέντρωσης πυριτίας με το χρόνο. Οι δοκιμές 17 έως 20 αποδεικνύουν ότι η κολλοειδής πυριτία μπορεί

να μεταφερθεί σε μεγαλύτερες αποστάσεις με επαρκή συγκέντρωση των συστατικών της για να σταθεροποιήσει το προβληματικό έδαφος. Επίσης η ροή του νερού στις στήλες εν σειρά όπου είχε χρησιμοποιηθεί σύνδεση ήταν παρόμοια με την ενιαία στήλη συνεπώς μπορούν μεγαλύτερες στήλες να διασπώνται σε μικρότερες και να χρησιμοποιείται η εν σειρά διάταξη για τη διευκόλυνση της διαδικασίας.

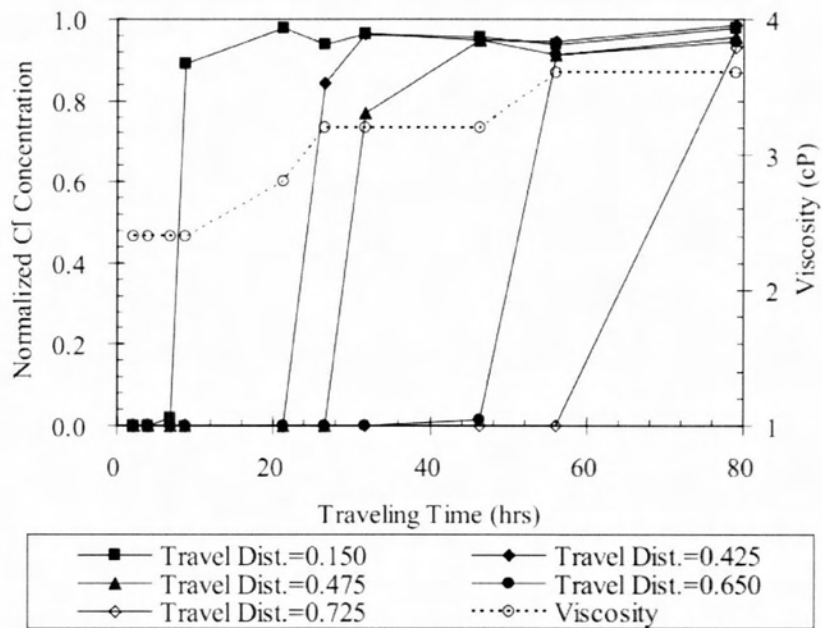
Πίνακας 2.5 Χαρακτηριστικά και αποτελέσματα δοκιμών. (Lin 2006)

Test	16	17	18	19	20
Column Length (feet)	10	10	10	10	30
Soil Type ¹	N	N	O	O	O
Relative Density	0.42	0.41	0.41	0.40	0.38
Permeability ($\times 10^{-3}$ cm/s)	11	13	161	163	207
pH	7.2	7.5	7.1	7.5	7.1
Ionic Strength (N)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Gradient, i	0.04	0.04	0.013	0.0065	0.018
Travel Time (hrs)	55	137	33	137	33
Coverage (%)	73	100	100	100	100
Time to 50% Coverage (hrs)	32	26	3	5	10
μ at 50% Coverage (cP)	3.2	2.0	2.0	2.4	2.4
Time to 100% Coverage (hrs)	--	74	6	12	25
μ at 100% Coverage (cP)	--	2.4	2.4	2.8	2.4

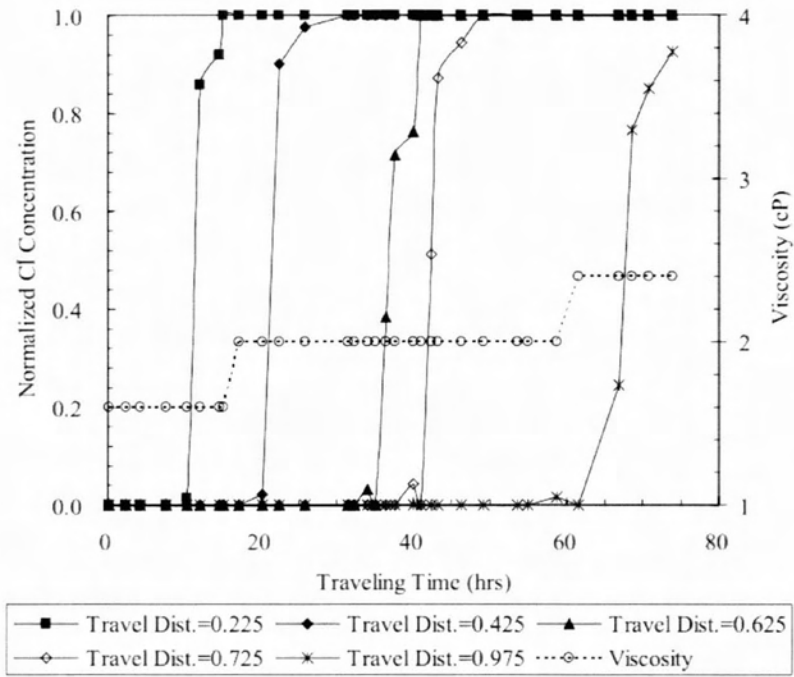
¹ N=Nevada; O=Ottawa

Πίνακας 2.6 Μέσοι ρυθμοί ροής για τα ανάλογα χρονικά διαστήματα σε δοκιμές εισπίεσης κολλοειδούς πυριτίας 5% κ.β. (Lin 2006)

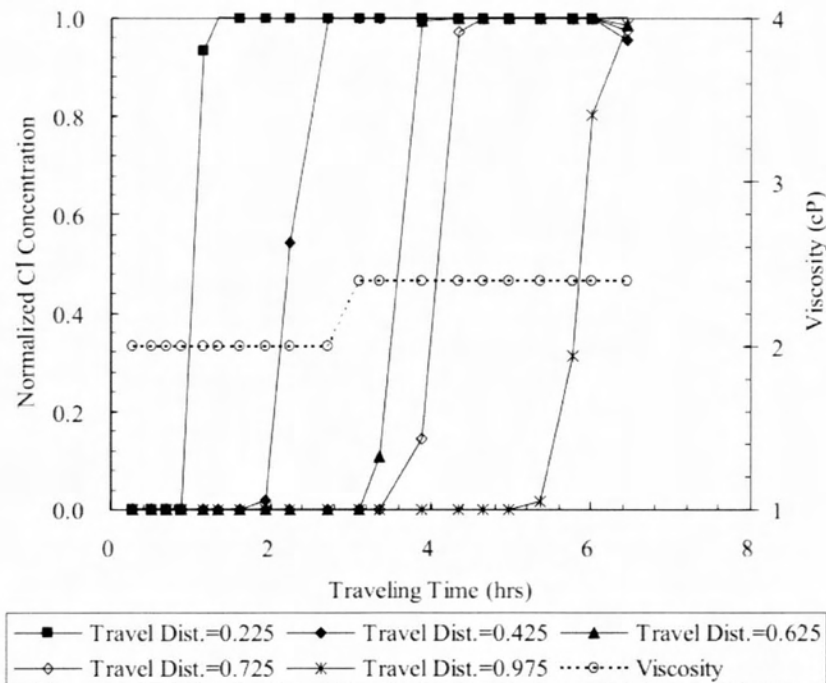
Test 16		Test 17		Test 18		Test 19		Test 20	
Interval (hrs)	Flow Rate (cm ³ /s)	Interval (hrs)	Flow Rate (cm ³ /s)	Interval (hrs)	Flow Rate (cm ³ /s)	Interval (hrs)	Flow Rate (cm ³ /s)	Interval (hrs)	Flow Rate (cm ³ /s)
0-9.3	0.038	0-4.3	0.049	0-0.5	0.538	0-0.3	0.475	0-1.2	0.455
9.3-22.9	0.031	4.3-10.4	0.049	0.5-0.9	0.629	0.3-1.0	0.383	1.2-2.6	0.362
22.9-33.8	0.023	10.4-14.7	0.051	0.9-1.4	0.545	1.0-1.6	0.298	2.6-4.0	0.333
33.8-57.7	0.014	14.7-20.3	0.049	1.4-1.9	0.452	1.6-2.6	0.301	4.0-5.1	0.464
57.7-80.8	0.005	20.3-26.0	0.041	1.9-2.6	0.450	2.6-3.4	0.248	5.1-6.7	0.372
		26.0-31.6	0.042	2.6-3.2	0.427	3.4-4.6	0.216	6.7-8.0	0.362
		31.6-37.7	0.042	3.2-3.8	0.425	4.6-5.4	0.343	8.0-9.4	0.392
		37.7-43.3	0.041	3.8-4.4	0.419	5.4-6.6	0.229	9.4-11.3	0.308
		43.3-53.2	0.033	4.4-5.1	0.387	6.6-8.0	0.173	11.3-13.1	0.269
		53.2-65.0	0.017	5.1-5.9	0.304	8.0-10.0	0.127	13.1-14.8	0.293
		65.0-74.2	0.015			10.0-13.2	0.111	14.8-17.2	0.228
								17.2-19.8	0.229
								19.8-21.7	0.248
								21.7-24.0	0.239



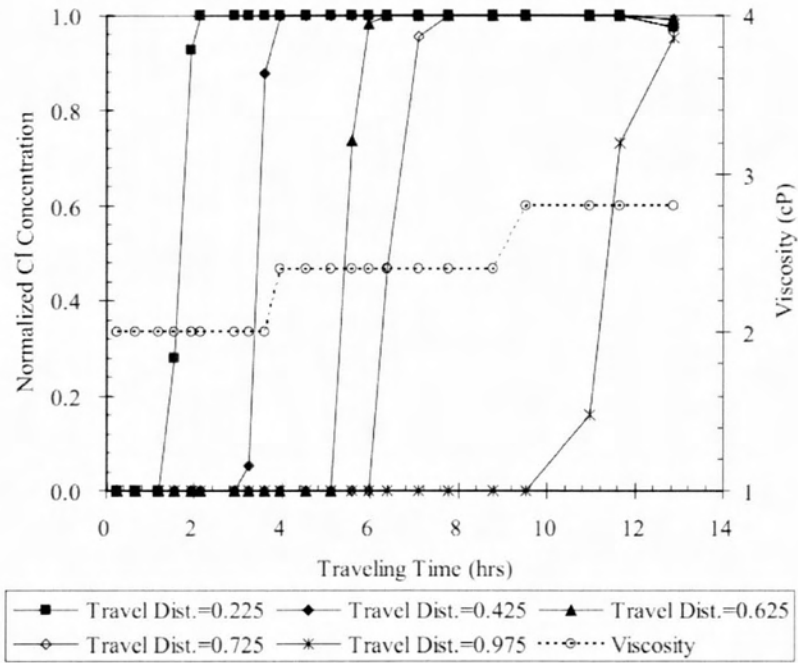
Σχήμα 2.20 Απαιτούμενοι χρόνοι για μετακίνησης κολλοειδούς πυριτίας ,δοκιμή 16. (Lin 2006)



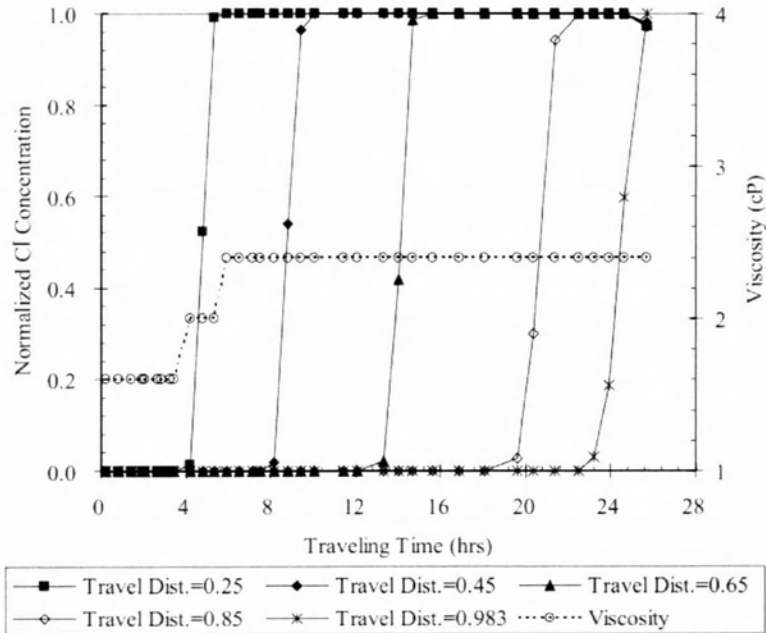
Σχήμα 2.21 Απαιτούμενοι χρόνοι για μετακίνησης κολλοειδούς πυριτίας ,δοκιμή 17 (Lin 2006)



Σχήμα 2.22 Απαιτούμενοι χρόνοι για μετακίνησης κολλοειδούς πυριτίας ,δοκιμή 18. (Lin 2006)



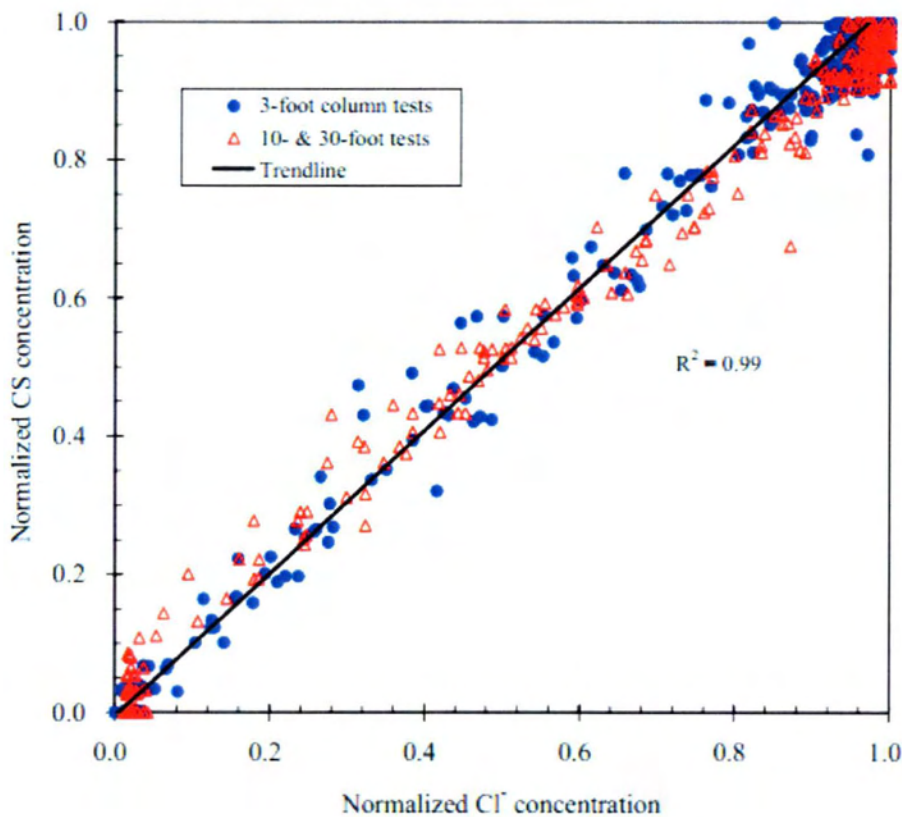
Σχήμα 2.23 Απαιτούμενοι χρόνοι για μετακίνησης κολλοειδούς πυριτίας ,δοκιμή 19. (Lin 2006)



Σχήμα 2.24 Απαιτούμενοι χρόνοι για μετακίνησης κολλοειδούς πυριτίας ,δοκιμή 20. (Lin 2006)

2.14 Σχέση των Συγκεντρώσεων της Κολλοειδούς Πυριτίας και των Χλωριούχων Ιόντων

Η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων κανονικοποιημένων χλωριούχων ιόντων και της κανονικοποιημένης κολλοειδούς πυριτίας είναι ανάλογη με αυτή στην προηγούμενη παράγραφο καθώς και εδώ τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ τους **Σχήμα 2.25**. Συνεπώς επαληθεύεται ότι οι κανονικοποιημένες συγκεντρώσεις χλωριούχων ιόντων αποτελούν ένα εξαιρετικό δείκτη των συγκεντρώσεων κολλοειδούς πυριτίας.



Σχήμα 2.25 Σχέση μεταξύ κανονικοποιημένων συγκεντρώσεων χλωριούχων και CS για όλες τις δοκιμές. (Lin 2006)

2.15 Επιδράσεις του Ιξώδους στην Εισπιεσιμότητα σε Μεγαλύτερες Στήλες

Το ιξώδες αποτέλεσε την κυριότερη μεταβλητή που επηρέασε την εισπίεση του σταθεροποιητή στις μικρές στήλες. Για τον λόγο αυτό ο διαθέσιμος χρόνος διανομής της κολλοειδούς πυριτίας προσδιορίστηκε ως το χρονικό διάστημα από την ανάμιξη του διαλύματος έως όταν το αρχικό ιξώδες του σταθεροποιητή διπλασιάστηκε.

Στις δοκιμές 16 και 17 η υδραυλική κλίση ήταν 0.04 ενώ χρησιμοποιήθηκε άμμος Nevada, η υδραυλική αγωγιμότητα και στις δύο δοκιμές υπολογίστηκε 0.01 cm/s. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών γινόταν μέτρηση του ρυθμού ροής και γινόταν σύγκριση με το ιξώδες του σταθεροποιητή. Στη δοκιμή 16 χρειάστηκαν 32 ώρες για να φτάσει ο σταθεροποιητής στο μέσο της στήλης με μέσο ρυθμό ροής 0.031 cm³/s ενώ το ιξώδες είχε τιμές μικρότερες από 3.2 cP. Όταν το ιξώδες αυξήθηκε πάνω από 3.2cP ο ρυθμός ροής ήταν 0.014 cm³/s και χρειάστηκαν 24 ώρες για να διανύσει 0.45 μέτρα ενώ όταν το ιξώδες αυξήθηκε πάνω από 3.6 cP ο ρυθμός ροής ήταν 0.005 cm³/s και ο σταθεροποιητής διένυσε μόλις 0.24 μέτρα και σταμάτησε. Ο σταθεροποιητής δεν κατάφερε να διανεμηθεί στο υπόλοιπο 27% της στήλης. Η δοκιμή 17 πραγματοποιήθηκε με ίδιες συνθήκες με τη 16 χάριν σύγκρισης, με εξαίρεση ότι ο χρόνος γέλης ήταν μεγαλύτερος **Σχήμα 2.16**. Λεπτομέρειες της δοκιμής παρουσιάζονται στους **πίνακες 2.5, 2.6**. Το ιξώδες στη διάρκεια της δοκιμής 17 αυξανόταν με πολύ αργό ρυθμό από 1.6 cP σε 2.4 cP και χρειάστηκαν 74 ώρες για την πλήρη διανομή του σταθεροποιητή στη στήλη. Ο μέσος ρυθμός ροής ήταν αρχικά 0.5 cm³/s για τη μισή διαδρομή ενώ στην υπόλοιπη μισή ο μέσος ρυθμός ροής ήταν 0.03 cm³/s. Το υψηλότερο ιξώδες του σταθεροποιητή που αντικαθιστούσε το νερό των πόρων οδήγησε σε μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας της άμμου και κατά συνέπεια του ρυθμού ροής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για τη διανομή του σταθεροποιητή για την ολοκλήρωση της μισής δοκιμής χρειάστηκαν 26 ώρες ενώ για την υπόλοιπη μισή 48 ώρες. Παρόμοια αποτελέσματα έδωσαν και οι άλλες δοκιμές 18-20 **Πίνακας 2.6**.

2.16 Διανομή Κολλοειδούς Πυριτίας

Στις 4 από τις 5 δοκιμές η κολλοειδής πυριτία μεταφέρθηκε επιτυχώς σε όλο τον όγκο της στήλης. Επίσης όταν η χρωματισμένη κολλοειδής πυριτία έφτανε στις ανάλογες θέσεις και πραγματοποιούνταν δειγματοληψία παρατηρήθηκε ότι η συγκέντρωση χλωριούχων ιόντων αυξανόταν σε τιμή περίπου ίση με αυτή του αρχικού διαλύματος. Τέλος όπως ήταν αναμενόμενο στις δοκιμές 18-20 όταν η υδραυλική κλίση μειώθηκε ο χρόνος διανομής του διαλύματος στη στήλη αυξήθηκε. Τα παραπάνω επιβεβαιώνουν ότι το μίγμα κολλοειδούς πυριτίας μπορεί να μεταφερθεί σε ρευστοποιήσιμα εδάφη στην επικείμενη τοποθεσία και με επαρκή διατήρηση των χημικών συστατικών του.

2.17 Συμπεράσματα Δοκιμών σε Μεγαλύτερες Στήλες

- Η κολλοειδής πυριτία μπορεί να διανεμηθεί σε ρευστοποιήσιμα εδάφη σε μεγάλες αποστάσεις πριν το αρχικό ιξώδες της διπλασιαστεί (φτάσει την τιμή 3.6 cP).
- Λόγω του περιορισμένου χώρου και των δυσκολιών που συναντώνται κατά την πειραματική διαδικασία, μεγάλες στήλες μπορούν να κατασκευαστούν με σύνδεση εν σειρά μικρότερων στήλων.

2.18 Συμπεράσματα που Επαληθεύτηκαν στις Δοκιμές Μικρών και Μεγάλων Στηλών

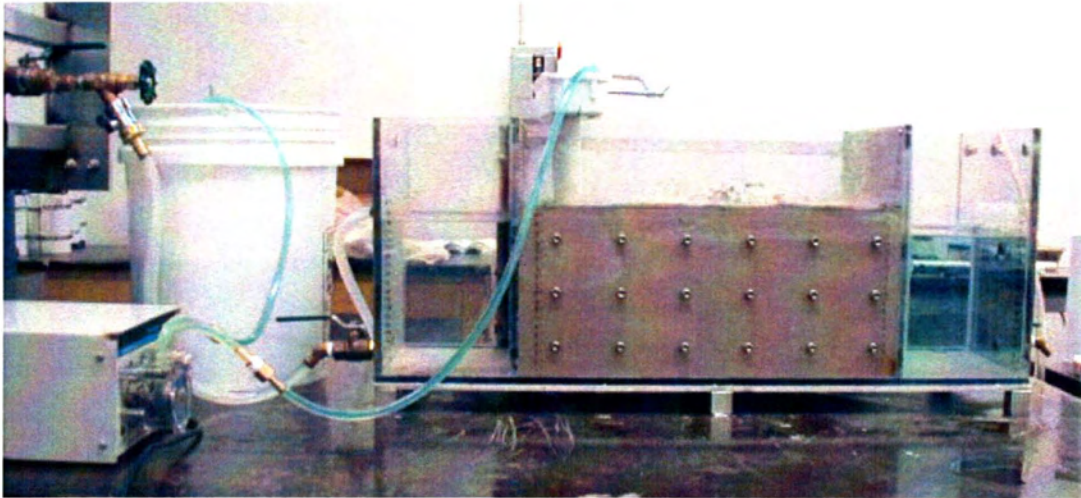
- Το ιξώδες αποτελεί τη κύρια μεταβλητή επιρροής του διαθέσιμου χρόνου διανομής της πυριτίας. Καταλληλότερες τιμές του ιξώδους για την μεταφορά του σταθεροποιητή σε ρευστοποιήσιμα εδάφη είναι μικρότερες του 3.6 cP.
- Οι κανονικοποιημένες συγκεντρώσεις χλωριούχων στο διάλυμα του σταθεροποιητή αποτελούν ένα καλό δείκτη του ποσοστού κολλοειδούς πυριτίας στο διάλυμα.

- Η ιοντική ισχύς και ο δείκτης pH επηρεάζουν τη μεταφορά του σταθεροποιητή καθώς επηρεάζουν το ιζώδες.
- Η ταχύτητα μεταφοράς του σταθεροποιητή μειώνεται όταν σε περισσότερους πόρους του εδάφους το νερό έχει αντικατασταθεί με τον μίγμα κολλοειδούς πυριτίας.

2.19 Έλεγχος Ομοιόμορφης Εισπίεσιμότητας της Κολλοειδούς Πυριτίας σε χαλαρές Άμμους

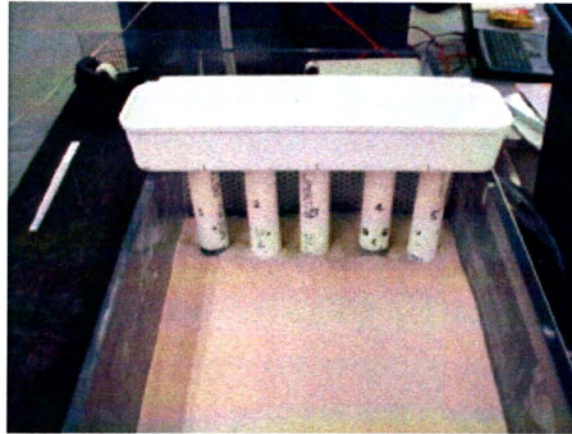
Εκτός από τις δοκιμές εισπίεσης που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποπαράγραφο, στην βιβλιογραφία έχουν πραγματοποιηθεί και ορισμένες διδιάστατες δοκιμές προκειμένου να διερευνηθεί η ικανότητα ομοιόμορφης μεταφοράς της κολλοειδούς πυριτίας σε χαλαρές άμμους χρησιμοποιώντας χαμηλής υδραυλικής κλίσης φρέατα εισπίεσης.

Η εν λόγω έρευνα περατώθηκε από τους Gallagher and Koch (2004) και χρησιμοποιήθηκαν πέντε φρέατα εισπίεσης για τη μεταφορά του υλικού σε χαλαρή άμμο Nevada No120, με σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.26**, οι διαστάσεις του είναι: 30.5 x 76 x 26.5 (cm) και αποτελείται από τρία μέρη, μια κεντρική δεξαμενή που τοποθετήθηκε η άμμος, και δυο εξωτερικές δεξαμενές για τον έλεγχο της ροής του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Το μήκος της ροής του διαμέσου της άμμου ορίστηκε ίσο με 46 cm, και κάθε δεξαμενή νερού έχει μήκος 15 cm, ενώ το ένα τμήμα της δεξαμενής του εδάφους μπορεί να αποσπαστεί ώστε να υπάρχει μια οπτική παρατήρηση της ροής του υλικού. Όπως παρατηρείται στο **Σχήμα 2.26** στις πλευρές του μοντέλου υπάρχουν μικρές οπές, που λειτουργούν ως δειγματοληψίες για τη μέτρηση πιθανών αλλαγών στις ιδιότητες του υγρού των πόρων και ως συνέπεια την ένδειξη ότι σε εκείνο το σημείο έχει μεταφερθεί κολλοειδής πυριτία.



Σχήμα 2.26 Μοντέλο διδιάστων δοκιμών. (Gallagher and Koch 2004)

Μετά την εισαγωγή του εδάφους στην κεντρική δεξαμενή, και τον κορεσμό του, ορίστηκε μια υδραυλική κλίση ίση με 0.04 και εισήχθη η κολλοειδής πυριτία μέσω των φρεάτων εισαγωγής τα οποία διέθεταν οπές στη κατακόρυφη τους διεύθυνση **Σχήμα 2.27.**



(a) Front



(b) Top

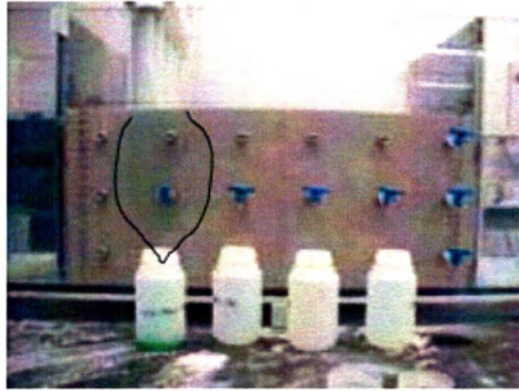
Σχήμα 2.27. Απεικόνιση φρεάτων εισόδου σταθεροποιητή. (Gallagher and Koch 2004)

Συνολικά διεξήχθησαν 15 πειράματα στόχος των οποίων ήταν ο περιορισμός του απαιτούμενου υλικού προκειμένου να σταθεροποιηθεί όλο το έδαφος.

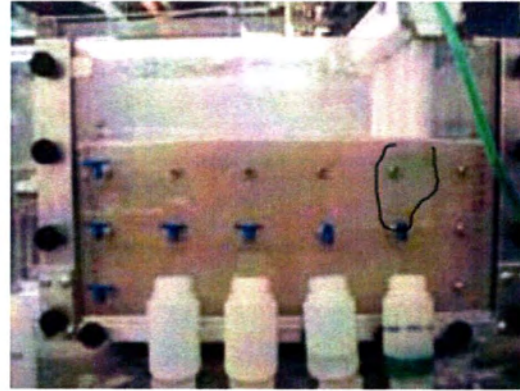
Στο πείραμα που θα παρουσιαστεί σε αυτή την παράγραφο χρησιμοποιήθηκε CS=5% με συγκέντρωση αλάτων ίση με 0.1N και pH=6.3 και η ποσότητα του υλικού ήταν ίση με δύο φορές τον όγκο των κενών. Ο χρόνος γέλης του διαλύματος αυτού είναι 2 μέρες το οποίο αντιστοιχεί σε ένα χρόνο μεταφοράς του υλικού ίσο με μισή μέρα, ο χρόνος δηλαδή μέχρι το ιζώδες του υλικού να αποκτήσει τιμή που να επιτρέπει τη μεταφορά του.

Το υλικό χρωματίστηκε με χρώμα ζαχαροπλαστικής για τη διευκόλυνση της οπτικής παρατήρησης και ως εκ τούτου το διαχωρισμό των σημείων στα οποία υπήρχε κολλοειδής πυριτία. Η πορεία της κολλοειδούς πυριτίας μέσα στον εδαφικό σχηματισμό παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.28**.

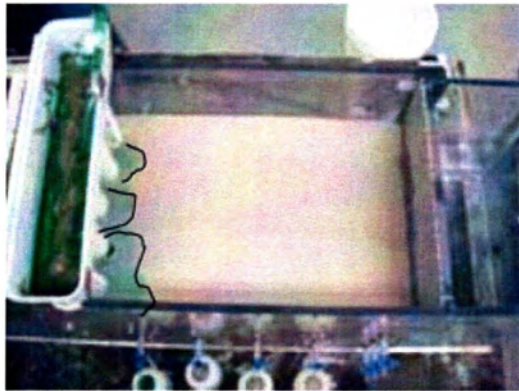
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είκοσι λεπτά μετά την έναρξη της δοκιμής το υλικό άρχισε να παρουσιάζεται στις πλάγιες πλευρές του εδάφους, ενώ μετά την πάροδο τριών ωρών εμφανίστηκε και στην επιφάνειά του **Σχήμα 2.28**. Στις επτά ώρες είχε σχηματιστεί ένα συνεχές μέτωπο το οποίο προχωρούσε κατά μήκος της κεντρικής δεξαμενής ενώ παρατηρήθηκαν κάποιες ραβδώσεις στις οποίες δεν είχε φτάσει το χρώμα. Εξαιτίας της διαφορετικής πυκνότητας της κολλοειδούς πυριτίας και του νερού υπήρχε μια τάση η σταθεροποίηση να γίνει στο κάτω μισό του εδάφους, το οποίο φάνηκε ως μια διαφορά χρονικής φάσης ανάμεσα στην εμφάνιση του χρωματισμένου υλικού στο κάτω και στο πάνω μέρος. Στο **Σχήμα 2.29** απεικονίζεται η πρόοδος του σταθεροποιητή μετά από 26, 30 και 45 ώρες.



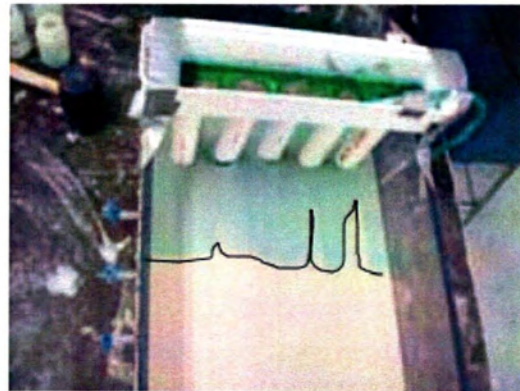
(a) 3 hours; flow l to r



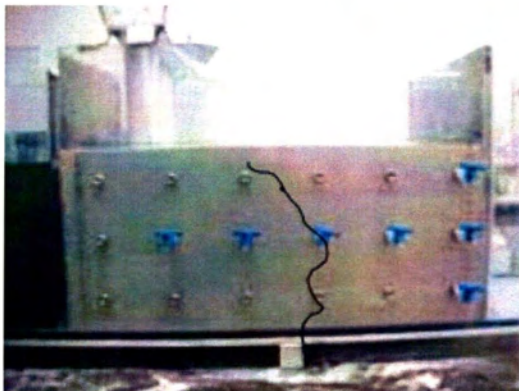
(b) 3 hours; flow r to l



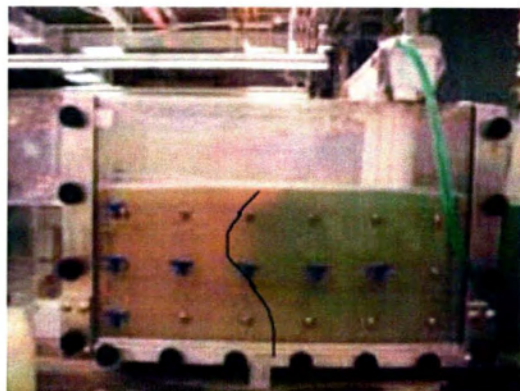
(c) 3 hours; top; flow l to r



(d) 10 hours; top; flow t to b

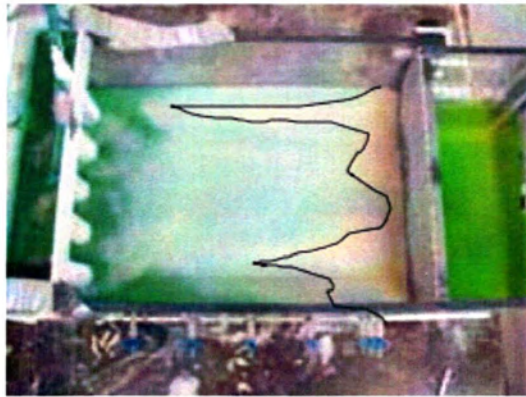


(e) 10 hours; flow l to r

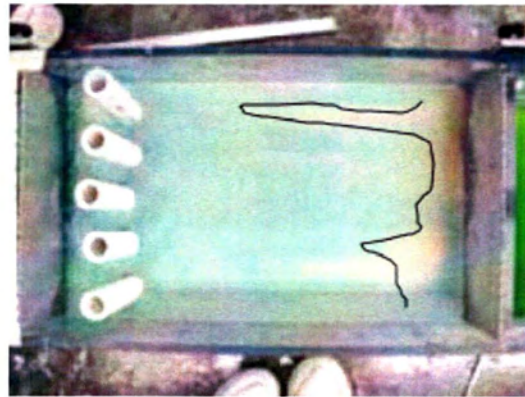


(f) 10 hours; flow r to l

Σχήμα 2.28. Πρόοδος χρωματισμένης κολλοειδούς πυριτίας στην δεξαμενή. (Gallagher and Koch 2004)



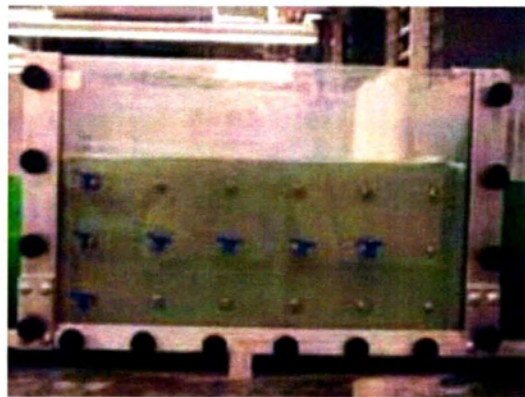
(g) 26 hours; top; flow l to r



(h) 30 hours; top; flow l to r



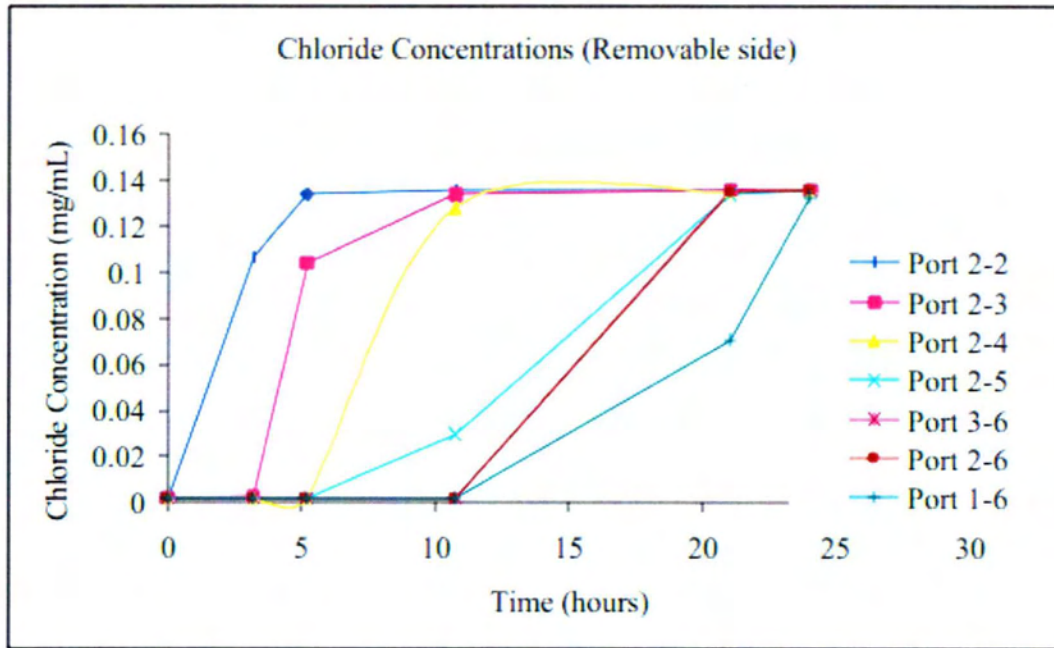
(i) 45 hours; flow l to r



(j) 45 hours; flow r to l

Σχήμα 2.29. Πρόοδος Σταθεροποιητή μετά από 26,30 και 45 ώρες. (Gallagher and Koch 2004)

Καθώς το διάλυμα κολλοειδούς πυριτίας περιέχει χλωριούχο νάτριο, έγινε εκτίμηση της εξέλιξης της συγκέντρωσης των χλωριούχων κατά τη διάρκεια της δοκιμής στις διάφορες δειματοληψίες και σύγκρισή του με τη συγκέντρωση του αρχικού διαλύματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο **Σχήμα 2.30** όπου μετά από 24 ώρες όλες οι καμπύλες καταλήγουν στο μέγιστό τους. Οι διάφορες καμπύλες αντιστοιχούν σε διαφορετικά σημεία δειματοληψίας. παράδειγμα η καμπύλη 2-3 αντιστοιχεί στη δειματοληψία στη δεύτερη γραμμή (από πάνω) και στην τρίτη σειρά (από δεξιά προς τα αριστερά).



Σχήμα 2.30. Συγκέντρωση των χλωριούχων κατά τη διάρκεια της δοκιμής. (Gallagher and Koch 2004)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Περιγραφή Εδαφικών Υλικών και Διαμόρφωσης Δοκιμίου

3.1 Επιλογή Εδαφικών Υλικών

Η επιλογή των εδαφικών υλικών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές, πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη, αφενός μεν τα φυσικά ρευστοποιήσιμα εδάφη στα οποία είναι δυνητικά εφαρμόσιμη η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης και αφετέρου τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αντίστοιχες εργαστηριακές μελέτες. Συγκεκριμένα, σε μελέτες επίδρασης της παρουσίας κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου στην αντίσταση ρευστοποίησης άμμων και ιλυωδών άμμων, έχει γίνει χρήση των (ως επί το πλείστον) ομοιόμορφων άμμων Trevino (Persoff et al., 1999), Monterey No. 30 (Gallagher P., 2000), Nevada (Koch, 2002, Lin, 2006, Pamuk et al., 2007, Spencer et al., 2008), Ottawa (Lin, 2006), Toyoura (Kodaka et al., 2005), Lazaro Cardenas (Diaz-Rodriguez et al, 2008) και ιλυωδών άμμων με ποσοστό ιλύος ίσο με 5% και 10% (Lin, 2006).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε η συμπεριφορά άμμων και ιλυωδών άμμων με σχετικά μικρή περιεκτικότητα λεπτοκόκκων (π.χ. ίση με 10%). Για να καταστεί συγκρίσιμη η συμπεριφορά των δύο τύπων εδαφών, η ιλυώδης άμμος διαμορφώθηκε με ανάμειξη του υλικού της επιλεγείσας άμμου με άλλο λεπτόκοκκο υλικό, κατά προτίμηση ίδιας ορυκτολογικής σύστασης. Έτσι, για τις ανάγκες του Προγράμματος επιλέγησαν προς χρήση δύο εδαφικά υλικά, ίδιας ορυκτολογικής σύστασης:

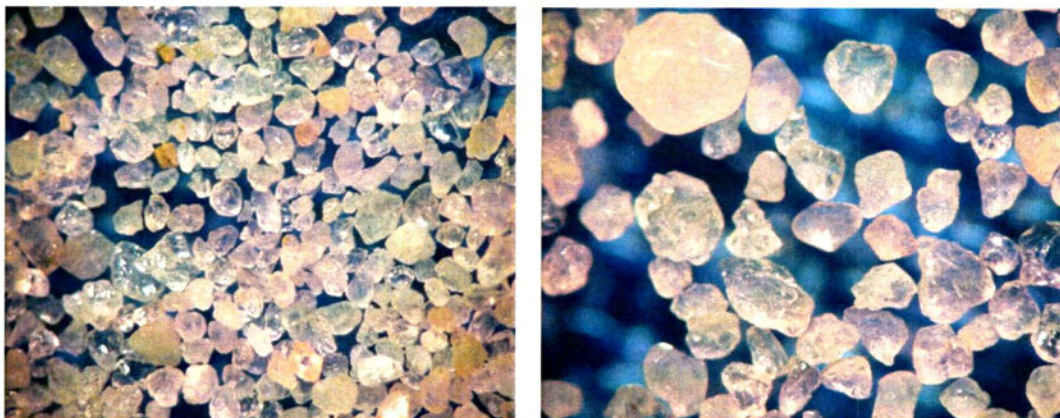
- η ομοιόμορφη μεσόκοκκη έως λεπτόκοκκη καθαρή άμμος M31, και
- η μη-πλαστική αμμώδης ιλύς D6, με ποσοστό ιλύος 67%.

Επισημαίνεται ότι η επιλεγείσα (αμμώδης) ιλύς με κωδικό όνομα D6 είναι αρκετά ομοιόμορφη και έχει σχετικά μεγάλη διαπερατότητα, ώστε να μην παρουσιαστούν προβλήματα κατά τον διαποτισμό των εδαφικών δοκιμίων με τον επιλεγμένο σταθεροποιητή. Η διαμόρφωση δοκιμίων ιλυώδους άμμου συνεπάγεται την ανάγκη

ανάμειξης των δύο υλικών, και για παράδειγμα για την επίτευξη ποσοστού λεπτόκοκκων $f_c=10\%$ χρειάζεται ανάμειξη της M31 και της D6 σε ποσοστά 85% και 15% αντίστοιχα.

3.2 Φυσικά Χαρακτηριστικά Εδαφικών Υλικών

Η άμμος M31 είναι φυσική χαλαζιακή άμμος από το Βέλγιο. Από εξέτασή της σε μικροσκόπιο έχει διαπιστωθεί ότι πρόκειται για καθαρή άμμο με σχετικά ομοιόμορφα στίλβωμένους κόκκους, με ανομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα, **Σχήμα 3.1**. Η στίλβωση αποτελεί ένδειξη προέλευσης από υδάτινο περιβάλλον. Οι κόκκοι στην πλειονότητά τους είναι διαυγείς, ενώ ένα ποσοστό $5\div 10\%$ είναι γαλακτόχρωμοι (ημιδιαφανείς), άλλης γενετικής προέλευσης. Υπάρχει απειροελάχιστη ποσότητα ($<1\%$) μαύρων κόκκων σιδηροξειδίων άγνωστης προέλευσης.

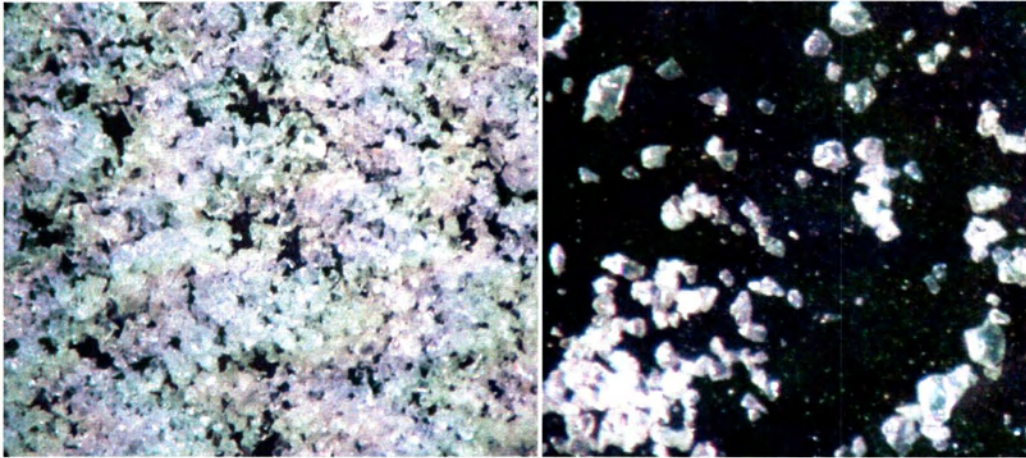


Σχήμα 3.1. Άποψη του σχήματος και της μορφής των κόκκων της άμμου M31. (Εικόνα από: Παραδοτέο Π1/ΠΡΑΞΗ: "ΘΑΛΗΣ ΑΠΟΤΡΟΠΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕΣΩ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΠΟΡΩΝ ΜΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΑΣΦΑΛΗ ΝΑΝΟ-ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ")

Η αμμώδης ιλύς D6, **Σχήμα 3.2**, είναι προϊόν θραύσης χαλαζιακής άμμου, με απειροελάχιστη ποσότητα ($<1\%$) μαύρων κόκκων, που οφείλονται πιθανόν σε ανθρώπινη επιμόλυνση. Οι κόκκοι της D6 είναι διαυγείς και, σε αντίθεση με την

άμμο M31, εξαιρετικά γωνιώδεις με έντονη στιλπνότητα, γεγονός που αποδίδεται στην κογχώδη θραύση τους.

Σημειώνεται ότι η ιλύς D6 είναι μη πλαστική, αδρανής και με ουδέτερη ενεργό οξύτητα (pH).



Σχήμα 3.2. Άποψη του σχήματος και της μορφής των κόκκων της ιλύος D6. (Εικόνα από: Παραδοτέο Π1/ΠΡΑΞΗ: “ΘΑΛΗΣ ΑΠΟΤΡΟΠΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕΣΩ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΠΟΡΩΝ ΜΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΑΣΦΑΛΗ ΝΑΝΟ-ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ”)

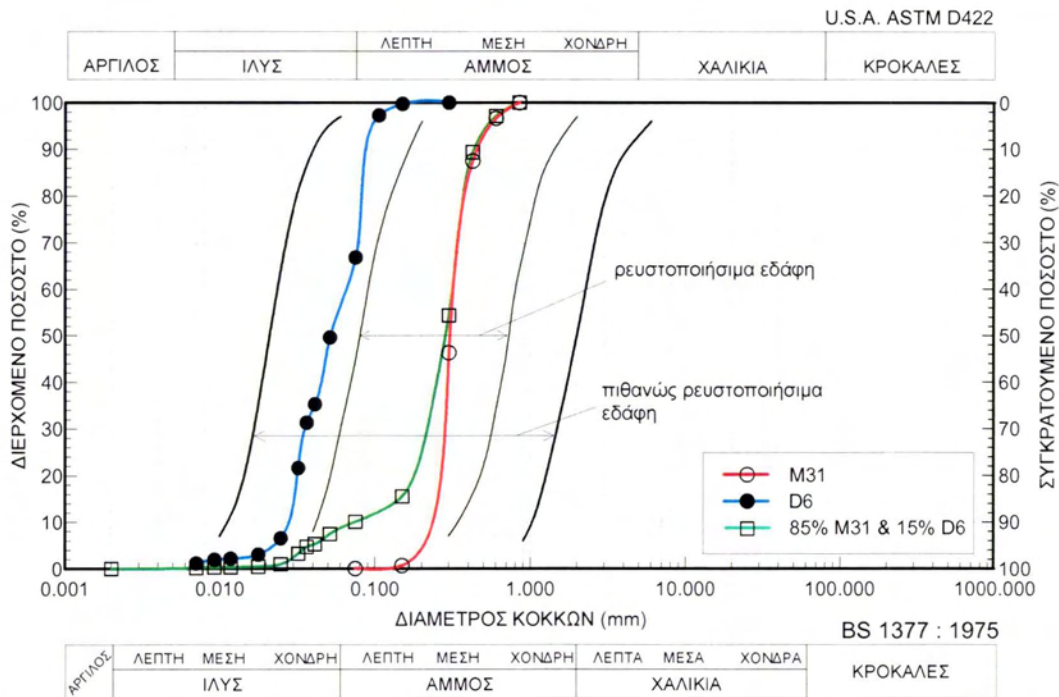
3.3 Φυσικές Ιδιότητες Εδαφικών Υλικών

Το **Σχήμα 3.3** απεικονίζει την κοκκομετρική διαβάθμιση των επιλεγέντων εδαφών: M31, D6 και, χάριν παραδείγματος, ενός μίγματος ιλυώδους άμμου των δύο εδαφών με $f_c=10\%$.

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται τα εύρη κοκκομετρίας για ομοιόμορφα εδάφη, που σχετίζονται στη βιβλιογραφία με ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης, καθώς και εκείνα που σχετίζονται με πιθανό σχετικό κίνδυνο. Όπως προκύπτει, η M31 θεωρείται ρευστοποιήσιμο έδαφος, ενώ και η καθαρή D6 μπορεί να θεωρηθεί ως πιθανώς ρευστοποιήσιμο έδαφος, τουλάχιστον με βάση τις κοκκομετρίες τους. Επιπλέον, η προαναφερθείσα ανάμειξη τους διαμορφώνει μια ιλυώδη άμμο

χαμηλού ποσοστού λεπτοκόκκων (π.χ. $f_c=10\%$) που θεωρείται και αυτή ρευστοποιήσιμο έδαφος, δηλαδή διατηρεί το χαρακτηρισμό της μητρικής άμμου.

Οι φυσικές ιδιότητες των υλικών παρατίθενται στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.3. Κοκκομετρικές καμπύλες για την άμμο M31, την ιλύ D6 και τα μείγματα άμμου-ιλύος (85% M31 & 15% D6) με ποσοστό ιλύος 10%.

Στο **Σχήμα 3.4** παρουσιάζεται συγκριτική παράθεση των κοκκομετρικών καμπυλών των επιλεγέντων υλικών, με άμμους που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες μελέτες της παθητικής σταθεροποίησης εδαφών. Όπως προκύπτει, τόσο η άμμος M31 όσο και η ιλυώδης άμμος με χαμηλό ποσοστό λεπτοκόκκων (π.χ. $f_c=10\%$) που προκύπτει από την ανάμειξη της με την αμμώδη ιλύ D6 έχουν κοκκομετρική διαβάθμιση εντός του εύρους των εδαφών που έχουν σταθεροποιηθεί στη βιβλιογραφία. Συνεπώς, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα είναι εν δυνάμει συγκρίσιμα με εκείνα της βιβλιογραφίας. Επιπλέον όμως, με τη χρήση των επιλεγέντων υλικών, για πρώτη φορά θα διερευνηθεί η επίδραση του ποσοστού λεπτοκόκκων στην παθητική σταθεροποίηση.

Πίνακας 3.1. Φυσικές ιδιότητες των επιλεγέντων εδαφικών υλικών.

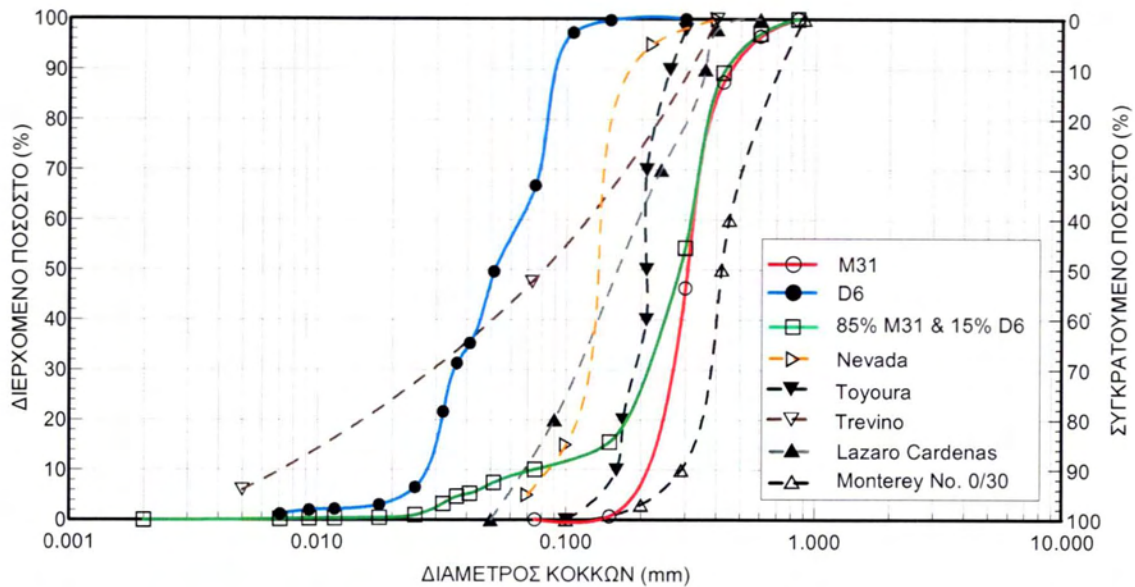
Μέγεθος	Άμμος M31	Ιλύς D6 ³	85% M31 + 15% D6
e_{max}	0.826	-	0.780
e_{min}	0.548	-	0.415
ρ_{dmin} ¹ (g/cm ³)	1.455	-	1.537
ρ_{dmax} ² (g/cm ³)	1.717	-	1.877
γ_{dmin} (kN/m ³)	14.27	-	15.07
γ_{dmax} (kN/m ³)	16.84	-	18.41
G_s	2.657	2.657	2.657
D_{50} (mm)	0.30	0.05	0.27
C_u	1.3	2.4	4
f_c (%)	0	67	10.61
PI	-	0	0

¹ Η ελάχιστη πυκνότητα (ρ_{dmin}) προσδιορίστηκε με δύο μεθόδους:

- εναπόθεση των υλικών στην πλέον δυνατή χαλαρή κατάσταση σε δοχείο γνωστού όγκου
- τοποθέτηση 1000±1g του υλικού σε κυλινδρικό ογκομετρικό σωλήνα (2000ml) και στη συνέχεια αναποδογύρισμα και επαναφορά (ASTM D4254-00)

² Η μέγιστη πυκνότητα (ρ_{dmax}) προσδιορίστηκε στη συσκευή δονητικής τράπεζας (συχνότητα 60Hz, διάρκεια 12min) (ASTM D4253)

³ Οι τιμές των μεγεθών των επιλεγέντων εδαφικών υλικών προέκυψαν από τα δείγματα που εστάλησαν στο ΕΕΘΓΣΜ του Α.Π.Θ. προς εξέταση και αποτελούν προεκτίμηση.



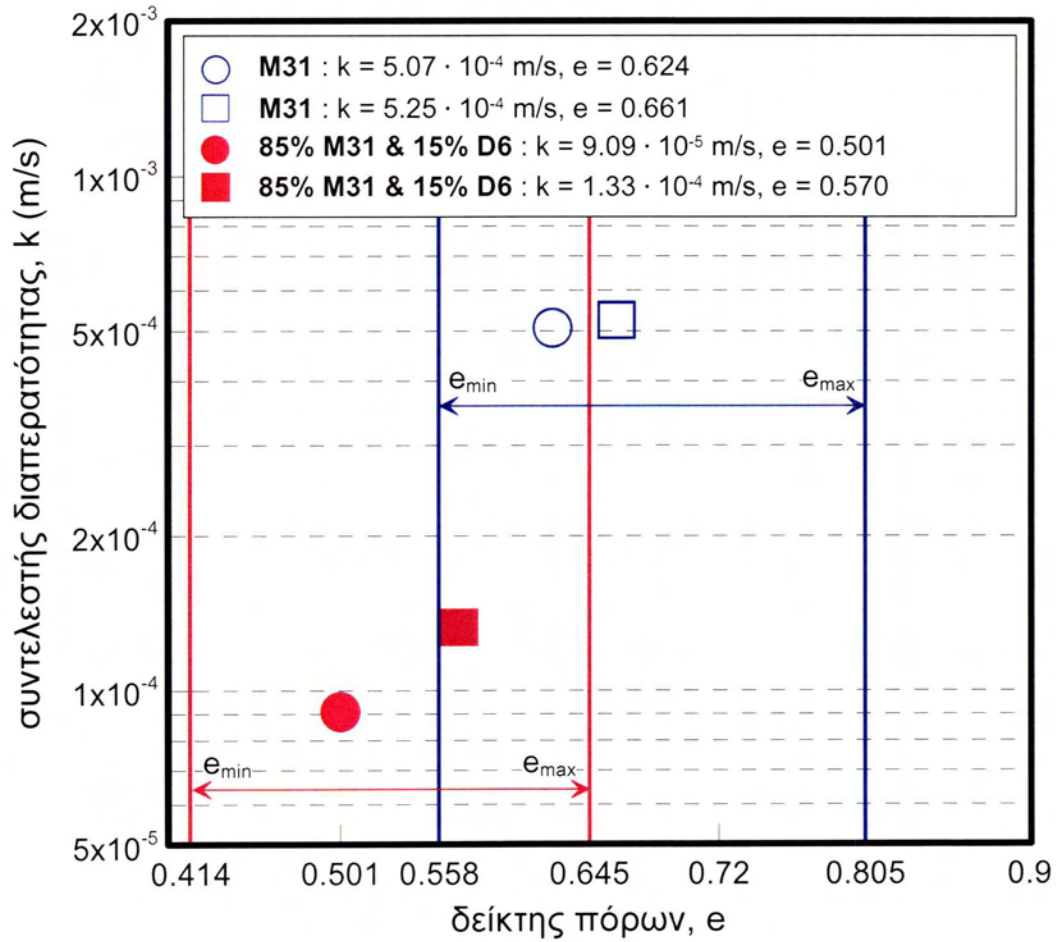
Σχήμα 3.4. Συγκριτική παράθεση κοκκομετρικών καμπυλών για την άμμο M31, την ιλύ D6 και τα μείγματα άμμου-ιλύος (π.χ. με $f_c=10\%$) με άμμους που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες μελέτες.

3.4 Αποτελέσματα Δοκιμών Διαπερατότητας

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται συνοπτικά στους Πίνακες 3.2, 3.3 και 3.4, που εκτελέστηκαν στα Α.Π.Θ., Παν. Πατρών και Π.Θ., αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2. Σύνοψη αποτελεσμάτων δοκιμών διαπερατότητας (στο Α.Π.Θ.) της άμμου και του μείγματος άμμου – ιλύος

Εδαφικός τύπος	Ξηρή πυκνότητα, ρ_d (Mg/m^3)	Δείκτης πόρων, e	Συντελεστής διαπερατότητας, k (m/s)
άμμος, M31	1.635	0.624	$5.07 \cdot 10^{-4}$
άμμος, M31	1.599	0.661	$5.25 \cdot 10^{-4}$
μείγμα άμμου-ιλύος, $f_c = 10\%$	1.768	0.501	$0.91 \cdot 10^{-4}$
μείγμα άμμου-ιλύος, $f_c = 10\%$	1.690	0.570	$1.33 \cdot 10^{-4}$

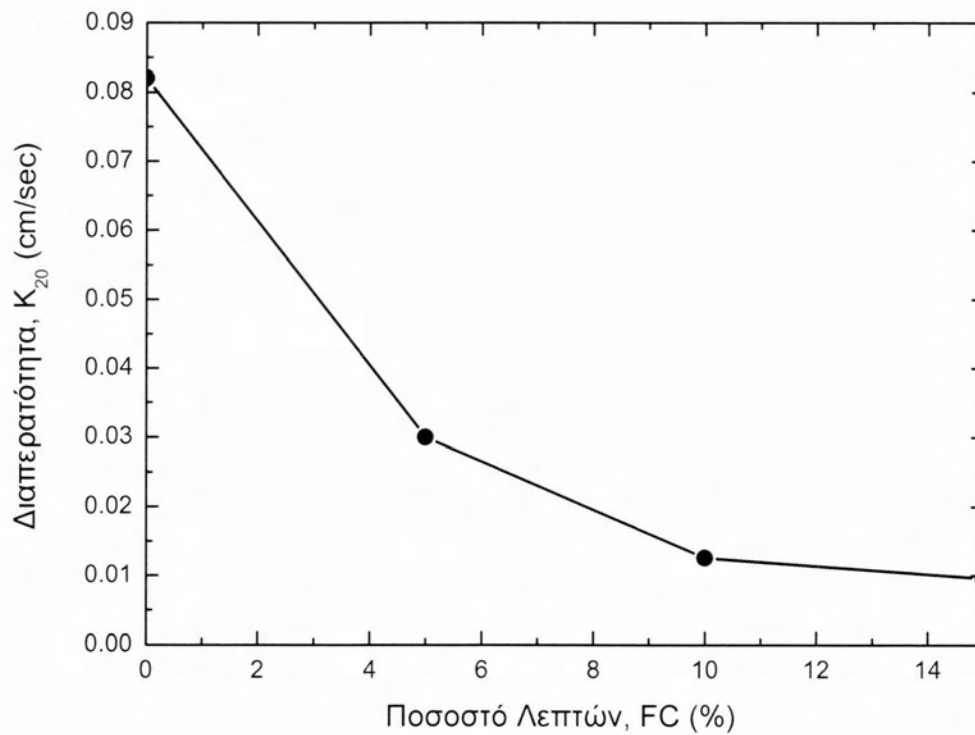


Σχήμα 3.5. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας (στο Α.Π.Θ.) της άμμου και του μείγματος άμμου - ιλύος.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας που εκτελέστηκαν σε καθαρή άμμο και μίγματα άμμου – ιλύος με διαφορετικά ποσοστά λεπτόκοκκων $f_c(\%)$ στο Πανεπιστήμιο Πατρών (Π. Π.).

Πίνακας 3.3. Σύνοψη αποτελεσμάτων δοκιμών διαπερατότητας (στο Π.Π.) της άμμου και του μείγματος άμμου – ιλύος (τα αποτελέσματα και στο Σχήμα 3.4)

Εδαφικός τύπος	Δείκτης πόρων, e	Συντελεστής διαπερατότητας, k (m/s)
άμμος, M31, $f=0\%$	0.74	$8.2 \cdot 10^{-4}$
μείγμα άμμου-ιλύος, $f_c = 5\%$	0.72	$3.0 \cdot 10^{-4}$
μείγμα άμμου-ιλύος, $f_c = 10\%$	0.68	$1.26 \cdot 10^{-4}$
μείγμα άμμου-ιλύος, $f_c = 15\%$	0.69	$0.96 \cdot 10^{-4}$



Σχήμα 3.6. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας (στο Παν. Πατρών) της άμμου και του μείγματος άμμου - ιλύος.

Επιπλέον, στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας που εκτελέστηκαν σε καθαρή άμμο διαφόρων πυκνοτήτων στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Π.Θ.).

Πίνακας 3.4. Σύνοψη αποτελεσμάτων δοκιμών διαπερατότητας (στο Π.Θ.) σε δείγματα άμμου διαφόρων πυκνοτήτων

Εδαφικός τύπος	Δείκτης πόρων, e	Συντελεστής διαπερατότητας, k (m/s)
άμμος, M31, f=0%	0.597	$1.09 \cdot 10^{-4}$
άμμος, M31, f=0%	0.597	$2.25 \cdot 10^{-4}$
άμμος, M31, f=0%	0.597	$2.48 \cdot 10^{-4}$
άμμος, M31, f=0%	0.603	$2.84 \cdot 10^{-4}$
άμμος, M31, f=0%	0.613	$3.17 \cdot 10^{-4}$
άμμος, M31, f=0%	0.622	$3.40 \cdot 10^{-4}$
άμμος, M31, f=0%	0.645	$3.10 \cdot 10^{-4}$

3.5 Επιλογή Σταθεροποιητή

Βασικές προϋποθέσεις για την επιλογή σταθεροποιητή του υγρού πόρων αποτελούν: α) χρονικά μεταβαλλόμενο και ελεγχόμενο ιξώδες, β) μη-τοξικότητα, γ) υψηλή ανθεκτικότητα και διάρκεια ζωής, δ) χαμηλό κόστος. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ως σταθεροποιητής χρησιμοποιήθηκε η κολλοειδής πυριτία.

Η κολλοειδής πυριτία είναι ένα υδατικό διάλυμα μικροσκοπικών σωματιδίων οξειδίου του πυριτίου, με μεγέθη που κυμαίνονται από 7 έως 22nm. Για παράδειγμα, σε μίγματα με CS 5% κατά βάρος, το κολλοειδές οξείδιο πυριτίου έχει

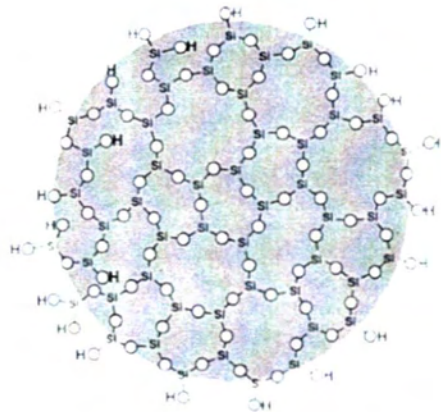
αρχικώς ιξώδες αντίστοιχο (έως διπλάσιο) του νερού, και γίνεται γέλη (gel) απότομα μετά από την πάροδο ελέγχιμου χρόνου, μέσω δημιουργίας οργανικών ενώσεων πυριτίου (siloxane bonds). Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος το ιξώδες παραμένει σε χαμηλή τιμή (και επιτρέπει τη διήθηση στην επιθυμητή θέση), ενώ ο χρόνος κατά τον οποίο γίνεται γέλη ρυθμίζεται από το ποσοστό κατά βάρος, το ακριβές μέγεθος των σωματιδίων, το pH και την ποσότητα (κανονικότητα) και την ιοντική ισχύ κατιόντων στο διάλυμα, η τελευταία επιτυγχάνεται κυρίως με προσθήκη αλάτων. Επιπλέον, το κολλοειδές οξειδίο πυριτίου είναι μη-τοξικό, βιολογικά και χημικά αδρανές. Επίσης είναι άφλεκτο και ανθεκτικό στο χρόνο, ενώ δεν απαιτούνται ειδικές προφυλάξεις κατά τη διάρκεια ή μετά τη χρήση του. Μακροσκοπική μέτρηση της επίδρασης της βελτίωσης με χρήση CS σε μίγματα από 4% έως 14.5% κατά βάρος στο υγρό των πόρων, σε διάφορες άμμους σε δοκιμές τριαξονικής φόρτισης και απλής διάτμησης υποδεικνύουν την αποτελεσματικότητά της κολλοειδούς πυριτίας. Οι χρόνοι γέλης προσδιορίζονται με μεγάλη ακρίβεια και έχουν μεγάλο εύρος στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι μπορούν να φτάσουν έως και τους 7 μήνες. Τέλος ένας ακόμη θετικός παράγοντας αφορά το κόστος του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου, το οποίο είναι σχετικά χαμηλό, σε σύγκριση με το αντίστοιχο της χρήσης άλλων μεθόδων βελτίωσης εδαφών. Το κόστος εξαρτάται από την κατά βάρος περιεκτικότητα του διαλύματος. Θεωρώντας πορώδες $\eta=35\%$, το κόστος του κολλοειδούς οξειδίου της πυριτίας σε διαλύματα 5, 10 και 15% θα ήταν αντίστοιχα 60\$, 120\$ και 180\$ ανά κυβικό μέτρο σταθεροποιημένου εδάφους, ενώ το κόστος για αργιλικά νανοσωματίδια θα ήταν 100÷200\$ ανά κυβικό μέτρο (Gallagher, 2000).

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, η κολλοειδής πυριτία θεωρείται άριστος σταθεροποιητής για τους παρακάτω λόγους:

- Η ευχερέστερη διηθησιμότητα, σε όρους ομοιομορφίας και σταθερότητας μίγματος
- Η σαφέστερη και πληρέστερη βιβλιογραφική κατοχύρωση της αποτελεσματικότητας στη σταθεροποίηση άμμων έναντι ρευστοποίησης
- Το ελαφρώς μικρότερο κόστος

3.6 Χαρακτηριστικά Κολλοειδούς Πυριτίας

Όπως προαναφέρθηκε το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (colloidal silica, ή CS), ή απλούστερα η κολλοειδής πυριτία, είναι ένα υδατικό διάλυμα μικροσκοπικών σωματιδίων οξειδίου του πυριτίου (βλ. **Σχήμα 3.7**).



Σχήμα 3.7. Σχηματική απεικόνιση μορίου οξειδίου του πυριτίου (Silco Inc. 1995)

Σύμφωνα και με την απεικόνιση, τα μόρια του οξειδίου του πυριτίου (δηλ. της πυριτίας) είναι σφαιρικά πολυμερή με αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια. Λόγω του μικρού μεγέθους και της αρνητικής φόρτισης της επιφάνειας, οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις καθορίζουν τη συμπεριφορά και τη δομή τους στο διάλυμα. Η γέλη προκύπτει από σχηματισμό δεσμών σιλοξάνης (siloxane, Si-O-Si) μεταξύ μορίων πυριτίας, απελευθερώνοντας νερό στο διάλυμα. Έτσι, το μέγεθος των σωματιδίων μεγαλώνει, κάτι που μακροσκοπικά οδηγεί σε αύξηση του ιξώδους και εν τέλη σε μετατροπή του διαλύματος σε γέλη. Η διαδικασία μετατροπής του διαλύματος σε γέλη είναι αέναη, και ο χρόνος που απαιτείται γι' αυτήν εξαρτάται από την ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση μεταξύ σωματιδίων. Συνεπώς, μπορεί να ελεγχθεί με προσθήκη αλάτων και μεταβολή του pH, καθώς και οι δύο αυτοί παράγοντες μεταβάλλουν τις απωθητικές δυνάμεις των μορίων της πυριτίας στο διάλυμα. Για παράδειγμα, η προσθήκη χλωριούχου νατρίου σε διάλυμα πυριτίας μειώνει το

διπλό στρώμα νερού που δημιουργείται στα μόρια της πυριτίας λόγω της ηλεκτροστατικής έλξης των δίπολων μορίων του νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη μείωση των απωθητικών δυνάμεων μεταξύ των μορίων της πυριτίας, και επιταχύνει τη δημιουργία δεσμών σιλοξάνης που είναι το προαπαιτούμενο για να ξεκινήσει η διαδικασία μετατροπής του διαλύματος σε γέλη.

Η χρήση της κολλοειδούς πυριτίας ως σταθεροποιητή προϋποθέτει τη βιομηχανική διάθεση του προϊόντος, με πιστοποιημένες διαδικασίες παρασκευής, σε ικανές ποσότητες και μικρό σχετικά κόστος. Στη βιβλιογραφία έχει αναφερθεί η χρήση κυρίως τριών (3) διαφορετικών ειδών κολλοειδούς πυριτίας, και τα οποία διερευνήθηκαν ως προς το ιξώδες και τους χρόνους γέλης τους, για να εντοπιστεί το βέλτιστο είδος προς χρήση για την παθητική σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών. Τα διαλύματα κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου που επιλέχθηκαν από την Gallagher (2000) για τις δοκιμές ήταν τα Ludox®-SM, Ludox®-HS-40 και Ludox®-TM. Μερικές από τις σημαντικότερες ιδιότητες αυτών των σταθεροποιητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5.

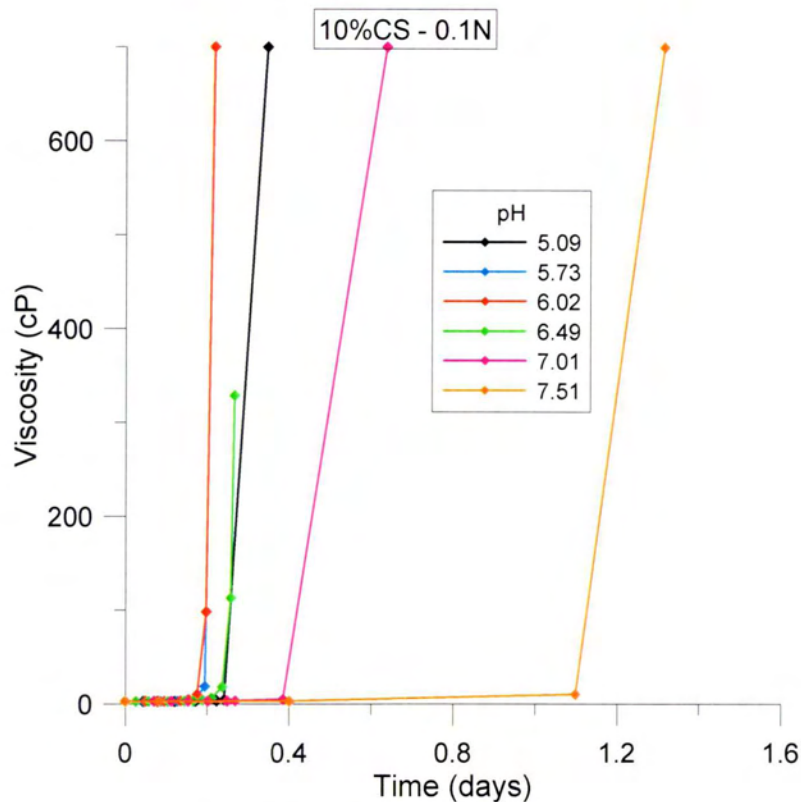
Πίνακας 3.5. Βασικά χαρακτηριστικά τύπων κολλοειδούς πυριτίας (Du Pont 1997)

Είδος πυριτίας	Ludox®-SM	Ludox®-HS-40	Ludox®-TM
SiO ₂ /Na ₂ O κατά βάρος	50	95	225
Σταθεροποιητής	Νάτριο	Νάτριο	Νάτριο
Φορτίο σωματιδίων	Αρνητικό	Αρνητικό	Αρνητικό
Πυρίτιο SiO ₂ (% κατά βάρος)	30	40	50
Ιξώδες (cP)	5.5	16	40
Μέση διάμετρος σωματιδίων (nm)	7	12	22
Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	345	220	140

Με βάση τα αποτελέσματα της Gallagher (2000), και το γεγονός ότι είναι ο πλέον χρησιμοποιηθείς τύπος κολλοειδούς πυριτίας σε παθητική σταθεροποίηση εδαφών, ο τύπος Ludox®-SM κρίνεται καταλληλότερος. Ο τύπος Ludox®-SM διαθέτει τη μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια ($345\text{m}^2/\text{g}$) και το μικρότερο μέγεθος κόκκων (7nm), καθιστώντας έτσι πιο μικρούς του χρόνους γέλης, σε σχέση με τους άλλους τύπους. Αντίστοιχα, χρειάζεται και μικρότερες ποσότητες κατά βάρος για να δημιουργηθεί γέλη, όντας έτσι και πιο οικονομική επιλογή.

Ο τύπος αυτός της πυριτίας, έπειτα από τη διάλυσή του με νερό βρύσης σε κατά βάρος συγκέντρωση 5% CS, το ιξώδες του γίνεται περίπου ίσο με 2cP ή λίγο μικρότερο, δηλαδή, συγκρίσιμο με εκείνο του καθαρού νερού. Καθώς το διάλυμα παρασκευάζεται σε αλκαλικό περιβάλλον ($\text{pH} = 10$) για να αποφεύγεται η μετατροπή του σε γέλη πριν τον επιθυμητό χρόνο, ο χρόνος αυτός μπορεί να μειωθεί και να βαθμονομηθεί με μείωση του pH (έως τιμές 5 έως 7) ή/και αυξάνοντας την ιοντική ισχύ του διαλύματος, γεγονός που μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας υδροχλωρικό οξύ και χλωριούχο νάτριο αντίστοιχα.

Ο χρόνος που απαιτείται για την μετατροπή του διαλύματος οξειδίου του πυριτίου σε γέλη είναι πολύ σημαντικός, καθώς καθορίζει την αποτελεσματική εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης. Ο χρόνος γέλης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από το τέλος της ανάμειξης μέχρι το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου να πάρει τη μορφή γέλης, δηλαδή να έχει αυξηθεί πολύ σημαντικά το ιξώδες του (π.χ σε τιμές μεγαλύτερες ή ίσες μερικών εκατοντάδων cP). Ο χρόνος μετατροπής σε γέλη εξαρτάται από το ποσοστό της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων μεταξύ τους, το ποσοστό αυτό επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (π.χ. Gallagher 2000), οι πιο σημαντικές εξ' αυτών είναι το ποσοστό κατά βάρος του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου CS(%) και η συγκέντρωση αλάτων (με έμφαση στα κατιόντα) στο διάλυμα (σε όρους κανονικότητας), το μέγεθος των σωματιδίων (σταθερά ίσο κατά μέση τιμή με 7nm στην επιλεγείσα Ludox®-SM), το pH και η θερμοκρασία του διαλύματος. Στο Σχήμα 3.8 δίνεται ένα παράδειγμα τυπικών καμπυλών εξέλιξης της τιμής του ιξώδους με το χρόνο.



Σχήμα 3.8. Εξέλιξη ιξώδους μ με το χρόνο t για συγκέντρωση CS=10%, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.1N και διαφορετικές τιμές του pH.

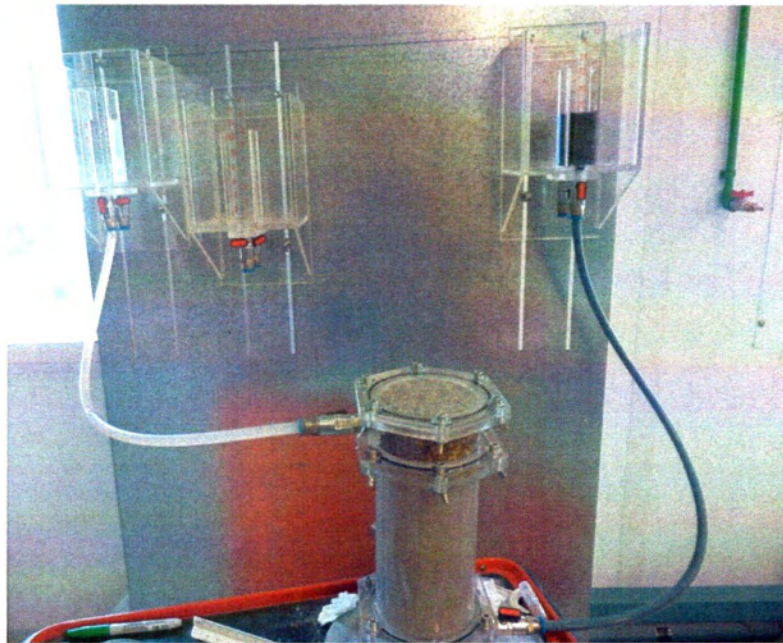
3.7 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης και Είδους Δοκιμών

Για τις 1Δ δοκιμές κατακόρυφης εισπίεσης κατασκευάστηκε μια διάταξη διαπερατομέτρου (από plexiglass) με ειδικές απαιτήσεις κατασκευής που φαίνεται στο Σχήμα 3.9 συνολικά, και με λεπτομέρεια στο Σχήμα 3.10.

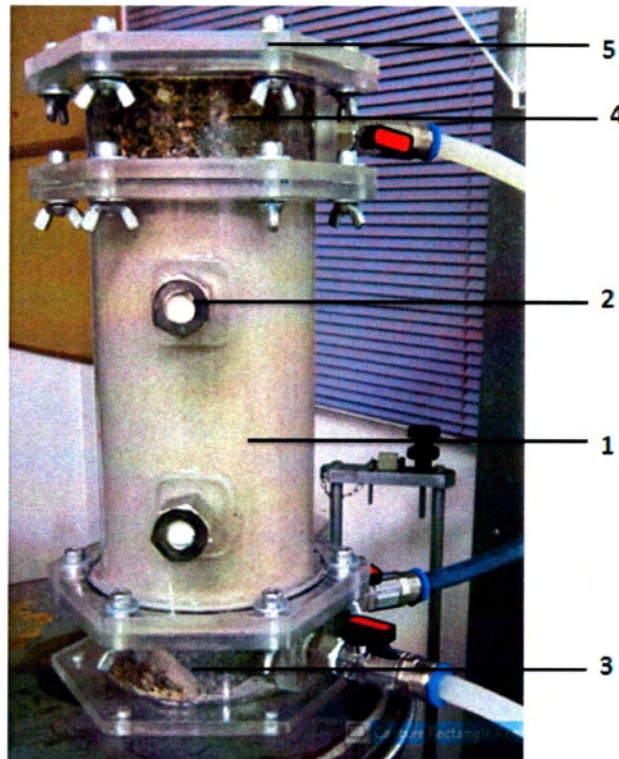
Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη αυτή αποτελείται από:

- Μεμονωμένα κυλινδρικά τμήματα ύψους 20cm και διαμέτρου 10cm, όπως αυτά παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.10** (No1)
- Υποδοχείς για δειγματοληψίες πάνω στα τμήματα αυτά από τις οποίες γίνεται εξαγωγή του υγρού των πόρων, όπως αυτό φαίνεται αναλυτικά στο **Σχήμα 3.10**. (No2)
- Ένα κυλινδρικό τμήμα ύψους 5cm, με δύο ενσωματωμένες βάνες για την εισπίεση νερού και CS. (Σχήμα 3.10, No3)

- Ένα κυλινδρικό τμήμα ύψους 5cm, με μια ενσωματωμένη βάνα για την έξοδο του υγρού των πόρων, νερού ή CS. (Σχήμα 3.10, Νο4)
- Κάλυμμα για το κλείσιμο του διαπερατόμετρου (Σχήμα 3.10, Νο5)
- Τρεις δεξαμενές, μια για την είσοδο του νερού, μια για την είσοδο του CS και μία για την έξοδο του υγρού των πόρων. (Σχήμα 3.9)
- Σωλήνες για την σύνδεση των δεξαμενών με το διαπερατόμετρο. (Σχήμα 3.9)
- O-rings για τη στεγάνωση κατά την προετοιμασία του δοκιμίου και κατά τη διάρκεια του πειράματος ενδιάμεσα σε κάθε μεμονωμένο τμήμα



Σχήμα 3.9. Κατασκευασθείς εξοπλισμός διαπερατόμετρου για την εισπίεση κολλοειδούς πυριτίας (χρωματισμένη μπλε) σε κατακόρυφη εδαφική στήλη.



Σχήμα 3.10. Διάταξη διαπερατόμετρου και επιμέρους τμήματα.

Η αρχική υδραυλική κλίση που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε επιμέρους πείραμα, επιτεύχθηκε με διαφορά στάθμης ανάμεσα στις δεξαμενές εισόδου (με πυριτία) και εξόδου (αρχικώς με νερό), και ήταν ίση με 0.05, εκτός του δοκιμίου ύψους ενός μέτρου που χρησιμοποιήθηκε κλίση ίση με 0.25. Άλλωστε, η όλη μεθοδολογία προτείνεται προς χρήση με χαμηλές πιέσεις εισπίεσης, και για το λόγο αυτό η υδραυλική κλίση επιλέχθηκε μικρή. Ο όρος «αρχική» υδραυλική κλίση αφορά το γεγονός ότι στις δοκιμές που εκτέλεστηκαν η υδραυλική κλίση φθίνει με το χρόνο, λόγω της προς τα άνω εισπίεσης ενός υδατικού διαλύματος βαρύτερου του νερού.

3.8 Προετοιμασία Μείγματος CS

Ο έλεγχος της διηθησιμότητας (δηλαδή της δυνατότητας εισπίεσης) με χαμηλή πίεση (του ενέματος) της κολλοειδούς πυριτίας, δεν εξαρτάται μόνο από το συνολικό χρόνο γέλης, αλλά και από την τιμή του ιξώδους της στη φάση εισπίεσής της. Αυτό εξηγείται καθώς η τιμή του ιξώδους συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα διήθησης της πυριτίας εντός του εδάφους, δηλαδή όσο αυξάνει το ιξώδες τόσο μειώνεται η ταχύτητα διήθησης για το ίδιο έδαφος. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι

κύριοι παράμετροι που καθορίζουν τη ρεολογική συμπεριφορά διαλυμάτων Ludox®-SM είναι:

- η συγκέντρωση κατά βάρος, CS(%), της πυριτίας στο διάλυμα
- η τιμή του pH του διαλύματος
- η κανονικότητα N κατιόντων στο διάλυμα
- η υδραυλική κλίση

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για τα διάφορα εύρη των παραμέτρων που επηρεάζουν το χρόνο γέλης για τις ανάγκες των πειραμάτων εισπίεσης σε αμμώδη δοκίμια, επιλέχθηκε διάλυμα πυριτίας με CS = 10%, με τιμές pH=5.55, συγκέντρωση καθαρού NaCl ίση με 0.1N για τα μικρά δοκίμια και για το δοκίμιο του ενός μέτρου. Για τα μεσαία δοκίμια χρησιμοποιήθηκε, επίσης, διάλυμα πυριτίας CS=10% με τιμές pH=7.00, συγκέντρωση καθαρού NaCl ίση με 0.1N. Ακόμη εκτελέστηκε και μια επιπλέον δοκιμή σε μικρό δοκίμιο με pH=10, δηλαδή χωρίς προσθήκη HCl στο μείγμα και χωρίς προσθήκη NaCl. Για τα διαλύματα αυτά παρατηρήθηκαν από τις μετρήσεις ιξώδους, χρόνοι γέλης ίσοι με 5 ώρες και 10 ώρες αντίστοιχα.

Επισημαίνεται ότι τα μίγματα CS προετοιμάστηκαν με χρήση απιονισμένου νερού, υδροχλωρικού οξέος και καθαρού χλωριούχου νατρίου. Επιπροσθέτως, για την οπτική παρατήρηση της διαδρομής της πυριτίας εντός του εδαφικού δοκιμίου έγινε χρωματισμός του διαλύματος με μπλε χρώμα ζαχαροπλαστικής. Η συνολική ποσότητα του διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε δοκιμή ήταν ίση με τον όγκο των κενών του δοκιμίου, καθώς στόχος ήταν να πληρωθούν πλήρως τα κενά του, αν το επέτρεπε η επιβαλλόμενη υδραυλική κλίση.

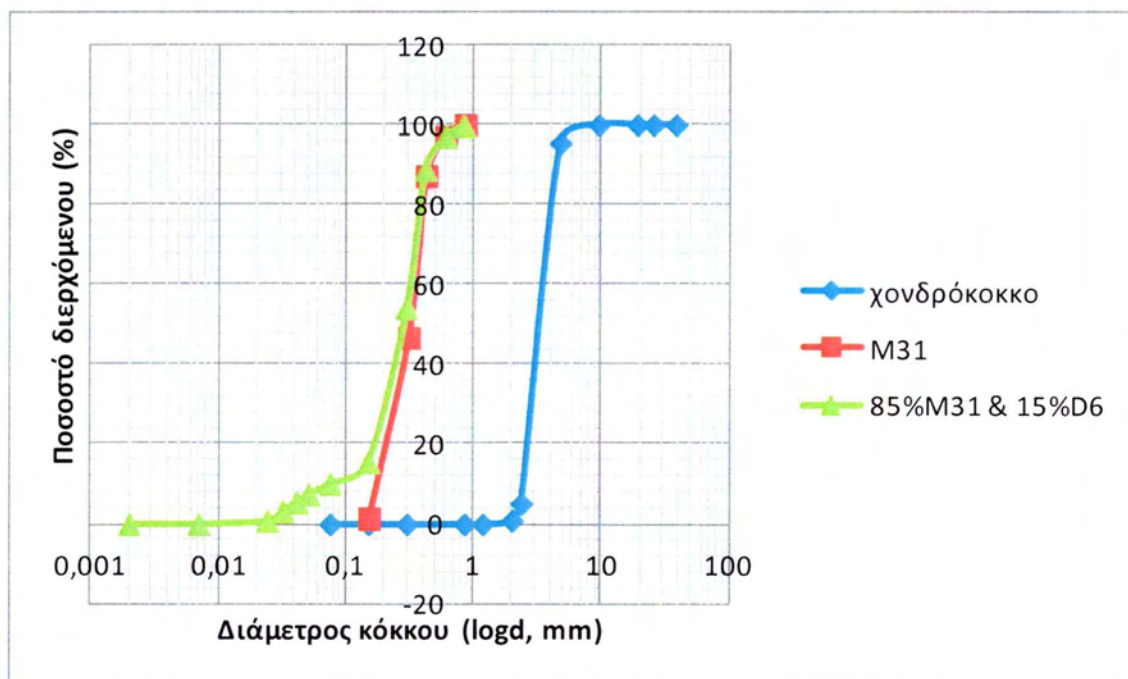
3.9 Προετοιμασία Διαπερατόμετρου

Οι δοκιμές εισπίεσης εκτελέστηκαν στα παρακάτω δοκίμια:

- Δοκίμιο άμμου M31 με μικρό μέγεθος (20cm), 6 δοκιμές
- Δοκίμιο άμμου M31 με μεσαίο μέγεθος (40cm), 2 δοκιμές
- Δοκίμιο άμμου M31 με μεγάλο μέγεθος (100cm), 1 δοκιμή

- Δοκίμιο ιλυώδους άμμου (85% M31 – 15% ιλύς D6) με μικρό μέγεθος (20cm), 1δοκιμή

Για την προετοιμασία των δοκιμών άμμου και ιλυώδους άμμου, συναρμολογήθηκε το διαπερατόμετρο όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.10**. Αρχικά για την καλύτερη διέλευση τόσο του νερού, όσο και της πυριτίας τοποθετήθηκε στα πρώτα και τα τελευταία 5cm του δοκιμίου μια στρώση χονδρόκοκκου υλικού λεπτών χαλίκων και μεταλλικό κόσκινο ανάμεσα στο υλικό αυτό και την οπή των βανών εισόδου και εξόδου της πυριτίας, ώστε να μη μετακινείται εδαφικό υλικό εκτός κυλινδρικού δοκιμίου. Η κοκκομετρία του χονδρόκοκκου υλικού συγκρινόμενη με τις κοκκομετρίες της άμμου M31 καθώς και της ιλυώδους άμμου φαίνεται στο **Σχήμα 3.11**.



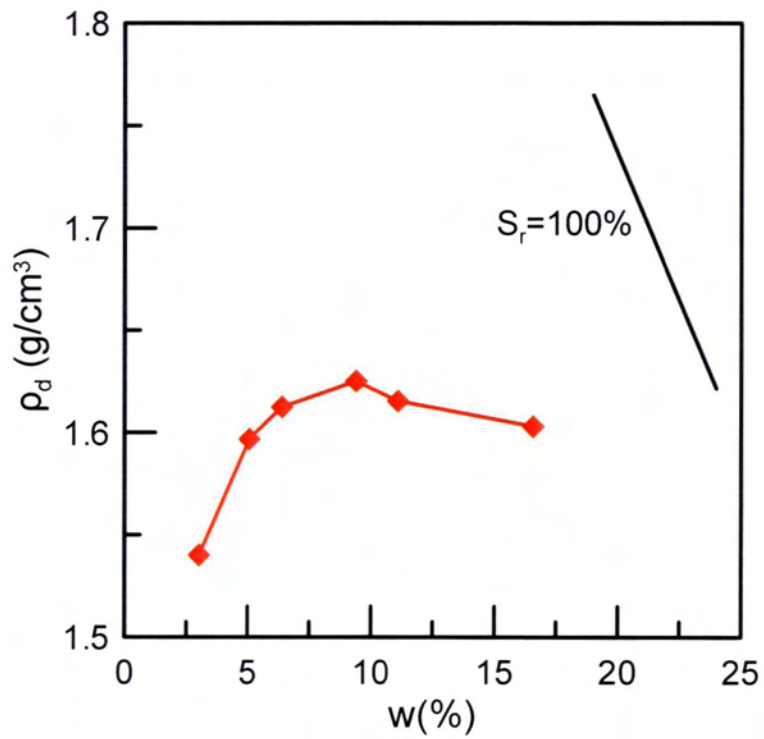
Σχήμα 3.11 Σύγκριση κοκκομετρικής διαβάθμισης χονδρόκοκκου υλικού που τοποθετείται στο πάνω και στο κάτω τμήμα του διαπερατόμετρου, άμμου (M31) και ιλυώδους άμμου (85%M31&15%D6).

Αφού τοποθετήθηκε η κάτω στρώση χονδρόκοκκου υλικού (πάχους 5cm, στο τμήμα 3, βλέπε Σχήμα 3.10), στη συνέχεια τοποθετήθηκαν όσα τμήματα μήκους 20cm χρειάζονται ανά δοκιμή. Εντός αυτών, προετοιμάζεται το δοκίμιου άμμου (ή

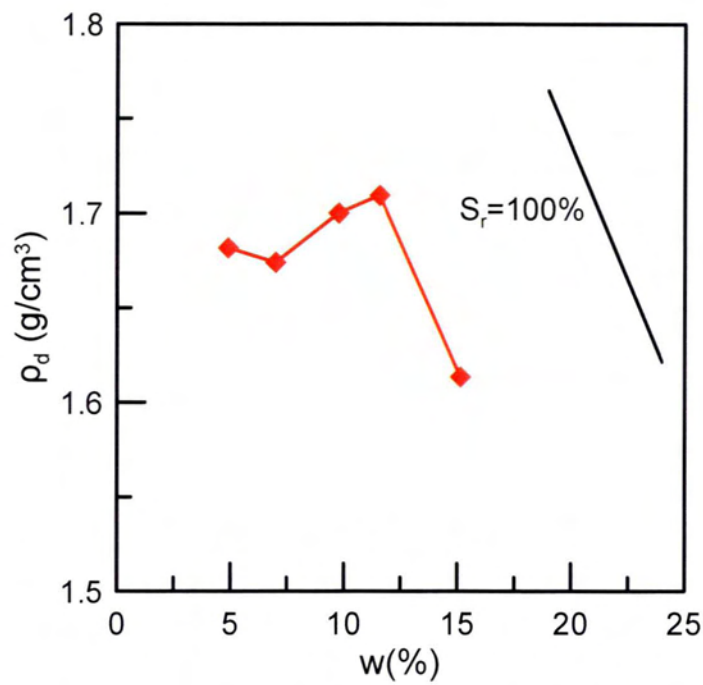
ιλυώδους άμμου, ανάλογα με τη δοκιμή), με τη μέθοδο υπό-συμπύκνωσης (under-compaction, Ladd, 1978) σε εννέα στρώσεις, με τη χρήση ειδικού εργαλείου (tamper) που κατασκευάστηκε για το σκοπό αυτό, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Η συμπύκνωση πραγματοποιήθηκε με σταθερή δύναμη και σταθερό και συγκεκριμένο αριθμό χτύπων για κάθε στρώση. Επισημαίνεται ότι η διάμετρος του ειδικού εργαλείου ήταν πρακτικώς ίση με τη διάμετρο του κυλινδρικού δοκιμίου, και έτσι κάθε χτύπος συμπύκνωσης μετέδιδε ενέργεια σε όλη τη διατομή του δοκιμίου ταυτόχρονα. Η αρχική υγρασία που χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή του δοκιμίου επιλέχθηκε ίση με 6%. Στα Σχήματα 3.13 και 3.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πρότυπης δοκιμής Proctor για την άμμο M31 και την ιλυώδη άμμο (85% M31 – 15% D6), αντίστοιχα. Για την άμμο ειδικά, η αρχική ξηρή πυκνότητα ρ_d της άμμου υπολογίζεται ως $1,55\text{g/cm}^3$, η οποία με βάση την καμπύλη συμπύκνωσης (Σχήμα 3.13) αντιστοιχεί σε βαθμό κορεσμού λίγο μικρότερο από $S_r = 30\%$. Όμως, από τους αναλυτικούς υπολογισμούς, δηλαδή από τη σχέση $S_r = G_s w/e$ ο βαθμός κορεσμού προκύπτει ως $S_r = 36\%$ για τα αμμώδη δοκίμια. Ο εν λόγω αρχικός βαθμός κορεσμού θεωρείται πιο αξιόπιστος, δεδομένου ότι η διαδικασία συμπύκνωσης και προετοιμασίας του δοκιμίου στο διαπερατόμετρο είναι εντελώς διαφορετική από τη διαδικασία στην πρότυπη δοκιμή Proctor.



Σχήμα 3.12. Εργαλείο για συμπύκνωση εδαφικού υλικού (tamper).



Σχήμα 3.13. Αποτελέσματα πρότυπης δοκιμής Proctor για την άμμο M31.



Σχήμα 3.14. Αποτελέσματα πρότυπης δοκιμής Proctor για την ιλυώδη άμμο μίγματος 85% M31 – 15% D6.

Τα υπόλοιπα τμήματα μήκους 20cm (τμήμα 2, βλ. **Σχήμα 3.10**) συναρμολογήθηκαν με τον ίδιο τρόπο ανάλογα με το συνολικό μήκος του δοκιμίου σε κάθε δοκιμή, ενώ υπήρχε και μια δεύτερη στρώση 5cm χονδρόκοκκου υλικού και στο πάνω τμήμα του διαπερατόμετρου (τμήμα 4, βλ. **Σχήμα 3.10**).

Μετά την προετοιμασία τους, τα δοκίμια αφέθηκαν να κορεστούν μέσω ενυδάτωσης που πραγματοποιήθηκε επιτρέποντας την κυκλοφορία καθαρού νερού μέσω των δεξαμενών για 1 μέρα και υπό μικρή υδραυλική κλίση. Ο βαθμός κορεσμού που επιτυγχάνεται με αυτή τη διαδικασία είναι αρκετά υψηλός και σίγουρα πολλαπλάσιος της αρχικής τιμής, αν και ακριβείς μετρήσεις αυτού δεν είναι δυνατές (ενδεικτικές μετρήσεις μετά το πέρας κάθε δοκιμής (άνοιγμα διαπερατόμετρου και λήψη δειγμάτων) υποδεικνύουν τιμές που προσεγγίζουν τον κορεσμό). Στη συνέχεια, μετρήθηκε ο συντελεστής διαπερατότητας (k σε m/s) του εκάστοτε δοκιμίου, και οι τιμές των μετρήσεων αυτών παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.6**, μαζί με το ύψος των δοκιμίων και το δείκτη πόρων του εδάφους στα οποία μετρήθηκαν. Οι τιμές αυτές της k μετρώνται σε δοκίμια που συμπεριλαμβάνουν συνολικώς 5cm χονδρόκοκκου υλικού στα δοκίμια (2.5cm πάνω και 2.5cm κάτω, καθώς οι βάνες εισόδου-εξόδου του νερού είναι στο μέσο του πάχους των τμημάτων 2 & 4 στο **Σχήμα 3.10**). Όμως, δεδομένης της κοκκομετρίας του χονδρόκοκκου υλικού και της μικρότερης διαδρομής του νερού εντός αυτού (5cm, έναντι 20, 40 ή 100 cm στην άμμο ή την λυώδη άμμο) οι μετρούμενες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας k θεωρούνται ως αντιστοιχούσες πρακτικώς στο μετρούμενο έδαφος, και μη επηρεασμένες από το χονδρόκοκκο έδαφος. Άλλωστε, ανεξάρτητη δοκιμή διαπερατότητας που εκτελέστηκε σε δοκίμιο του χονδρόκοκκου υλικού έδωσε τιμή $k = 8.1 \cdot 10^{-3}$ m/s, γεγονός που πρακτικώς επιβεβαιώνει την ως άνω απλούστευση.

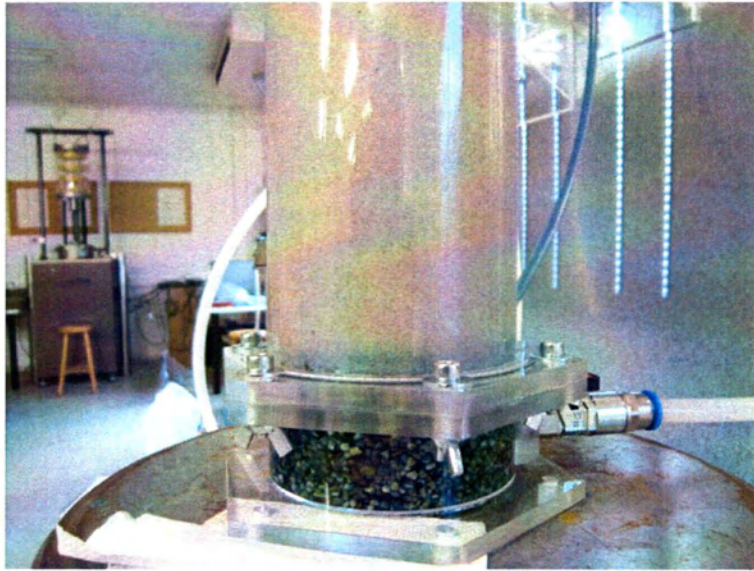
Αναφέρεται ότι στη δοκιμή 7, εισπίεσης σε δοκίμιο άμμου M31 ύψους 40cm, από την οποία εξήχθησαν μόνο δειγματοληψίες μέτρησης του ποσοστού κατά βάρος πυριτίας CS(%) στο υγρό των πόρων και για την οποία δεν υπάρχουν άλλες μετρήσεις, δεν παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.6**. Τέλος, επισημαίνεται ότι η δοκιμή εισπίεσης σε δοκίμιο λυώδους άμμου επίσης δεν παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.6** και υπήρχε δυσχέρεια στον εντοπισμό της στάθμης και της δειγματοληψίας της

εισπιεζόμενης πυριτίας λόγω της ύπαρξης των λεπτόκοκκων (βλέπε παρακάτω για λεπτομέρειες).

Πίνακας 3.6. Χαρακτηριστικά των δοκιμών άμμου M31 σε όρους δείκτη πόρων e , συντελεστή διαπερατότητας k για κάθε δοκιμή εισπίεσης

A/A δοκιμής	Ύψος δοκιμίου (cm)	Δείκτης πόρων (e)	Διαπερατότητα (k , m/s)
1	20	0.597	$1.09 \cdot 10^{-4}$
2	20	0.597	$2.25 \cdot 10^{-4}$
3	20	0.597	$2.48 \cdot 10^{-4}$
4	20	0.603	$2.84 \cdot 10^{-4}$
5	20	0.613	$3.17 \cdot 10^{-4}$
6	40	0.622	$3.40 \cdot 10^{-4}$
8	100	0.645	$3.10 \cdot 10^{-4}$

Χαρακτηριστικές απεικονίσεις της πειραματικής διαδικασίας εισπίεσης πυριτίας σε μικρό και μεγάλο δοκίμιο παρουσιάζονται στα Σχήματα **3.15**, **3.16**, **3.17**, ενώ στο Σχήμα **3.18** παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική εικόνα από τη δοκιμή εισπίεσης στο δοκίμιο ιλυώδους άμμου, από την οποία προκύπτει η αδυναμία ευχερούς παρατήρησης του μετώπου της κολλοειδούς πυριτίας. Στο εν λόγω δοκίμιο, επίσης δεν υπήρξε δυνατότητα δειγματοληψίας πυριτίας, πιθανώς λόγω των λεπτόκοκκων που πιθανώς έφρασαν την βελόνα σύριγγας που χρησιμοποιήθηκε για τη δειγματοληψία υγρού πόρων (βλ. και Σχήμα **3.16**).



Σχήμα 3.15. Θέση μετώπου κολλοειδούς πυριτίας (με μπλε χρώμα) μέσα σε μικρό δοκίμιο άμμου. Η πυριτία έχει εμβαπτίσει πλήρως το χοδρόκοκκο υλικό και εισέρχεται στο αμμώδες (δοκιμή 2).



Σχήμα 3.16. Θέση μετώπου κολλοειδούς πυριτίας (με μπλε χρώμα) στο μέσο ύψος εντός μικρού δοκίμιου άμμου. Φαίνεται η σκούρα μπλε είσοδος της πυριτίας στο σωλήνα στο

κάτω μέρος του δοκιμίου, και η διαδικασία δειγματοληψίας υγρού πόρων από θέση μπροστά (άνω) από το μέτωπο της πυριτίας εντός του δοκιμίου (δοκιμή 1)



Σχήμα 3.17. Θέση μετώπου κολλοειδούς πυριτίας (με μπλέ χρώμα) μέσα στο μεσαίο δοκίμιο άμμου. Η πυριτία έχει εμβαπτίσει πλήρως το χοδρόκοκκο υλικό και έχει ξεκινήσει την άνοδό της στα κάτω 20cm του δοκιμίου. Φαίνεται ο σωλήνας εισόδου της πυριτίας στο κάτω μέρος του δοκιμίου, γεμάτος από σκούρα μπλε πυριτία (Δοκιμή 6).



Σχήμα 3.18. Αδυναμία σαφούς εντοπισμού μετώπου πυριτίας εντός δοκιμίου ιλυώδους άμμου. Η ύπαρξη πυριτίας εντός του δοκιμίου δεν είναι όμως αμφισβητήσιμη δεδομένης της αλλαγής χρώματος στο κάτω έναντι του άνω μέρους του δοκιμίου (δοκιμή ιλυώδους άμμου).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Δοκιμές Εισπίεσης Κολλοειδούς Πυριτίας

4.1 Γενικά

Στη συνέχεια των όσων αναφέρθηκαν και παρουσιάστηκαν περιγραφικά στο Κεφάλαιο 3, στο Κεφάλαιο 4 το ενδιαφέρον εστιάστηκε στη διαδικασία με την οποία η βαρύτερη και υψηλότερου ιξώδους πυριτία πρακτικώς εκτοπίζει το ελαφρύτερο και με χαμηλότερο ιξώδες νερό, όταν εισπιέζεται κατακόρυφα προς τα άνω με χαμηλή υδραυλική κλίση. Για να διερευνηθεί αυτό, δόθηκε έμφαση στις λεπτομέρειες των δοκιμών εισπίεσης.

Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν οι δοκιμές 1-8 με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη κάθε μία ξεχωριστά. Η περιγραφή θα ξεκινήσει από τα δοκίμια των 20cm (μικρά δοκίμια, δοκιμές 1 έως 5), ύστερα τα δοκίμια 40cm (μεσαία δοκίμια, δοκιμές 6 και 7) και τέλος θα παρουσιαστεί το πείραμα του ενός μέτρου (μεγάλο δοκίμιο, δοκιμή 8). Η δοκιμή στο δοκίμιο της ιλυώδους άμμου δεν παρουσιάζεται στην εργασία, καθώς δεν ήταν ευδιάκριτη η παρατήρηση του μετώπου ενώ η δειγματοληψία ήταν αδύνατη πιθανών λόγω της εισχώρησης λεπτόκοκκων στη φαρμακευτική σύριγγα. Επιπλέον, παρουσιάζεται και μία δοκιμή με κολλοειδή πυριτία με $pH=10$ στην οποία δεν προστέθηκε $NaCl$. Στόχος της 9ης δοκιμής ήταν να διερευνηθεί η διηθησιμότητα διαλύματος πυριτίας, η οποία όμως διατηρεί σταθερό ιξώδες (λίγο μεγαλύτερο του νερού) σε αντιδιαστολή με την εισπίεση πυριτίας αυξανόμενου ιξώδους όπως ήταν σε όλες τις δοκιμές 1 έως 8..

4.2 Συνδεσμολογία – Διαδικασία - Μετρολογία

Το δοκίμιο άμμου προετοιμάστηκε σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια, το δοκίμιο εντός του διαπερατόμετρου συνδέθηκε με δεξαμενή νερού διαμέσου σωληνώσεως στην πάνω πλευρά (άνω βάνα), ενώ η μία κάτω βάνα αφέθηκε ανοιχτή, προκειμένου να εισέλθει από πάνω απιονισμένο νερό με χαμηλή υδραυλική κλίση. Το νερό αντικατέστησε σταδιακά τον αέρα των πόρων που υπήρχε στο δοκίμιο από τη διαδικασία προετοιμασίας του. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ενυδάτωση (hydration) και σε όλα τα πειράματα διήρκησε 1 μέρα. Στη

συνέχεια, η κάτω βάνα έκλεισε και το δοκίμιο αφέθηκε σε ηρεμία για 1 μέρα ακόμα, υπό υδροστατικές συνθήκες.

Μετά την πάροδο 2 ημερών, διεξάχθηκε δοκιμή διαπερατότητας με σταθερή ροή νερού από πάνω προς τα κάτω υπό δύο διαφορετικές μικρές αλλά σταθερές υδραυλικές κλίσεις. Οι συγκεκριμένες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με είσοδο νερού από την άνω βάνα μέσω σωλήνα και έξοδο νερού από την κάτω βάνα. Η κάτω βάνα ήταν ελεύθερη και δεν συνδέθηκε με κάποια δεξαμενή. Το νερό έρεε από την κάτω βάνα σε ογκομετρικό σωλήνα και παράλληλα σημειώνονταν το χρονικό διάστημα που απαιτούνταν για την πλήρωση 10, 15, 20, 25, 30, 35, 50ml νερού.

Όταν ολοκληρώθηκε το πείραμα διαπερατότητας προκειμένου να αποκατασταθούν οι υδροστατικές συνθήκες, συνδέθηκαν τόσο η πάνω όσο και η κάτω βάνα με τις δεξαμενές απιονισμένου νερού. Οι βάνες αφέθηκαν ανοιχτές μέχρι το όλο σύστημα έρθει σε ισορροπία (συνθήκες μη-ροής).

Το υδατικό διάλυμα πυριτίας προετοιμάστηκε ανεξάρτητα, με συγκέντρωση κατά βάρος ίση με $CS = 10\%$ και τοποθετήθηκε στην τρίτη δεξαμενή, μετά από χρωματισμό του με μπλε χρώμα ζαχαροπλαστικής. Στόχος στη διάρκεια των πειραμάτων εισπίεσης ήταν η χρήση μικρών υδραυλικών κλίσεων και κατακόρυφη προς τα άνω εισπίεση. Όταν η κάτω βάνα συνδέθηκε με την δεξαμενή εισόδου πυριτίας και η άνω με τη δεξαμενή εξόδου υπήρχε μία στάθμη ισορροπίας (μη-ροής). Η τελική στάθμη της πυριτίας τοποθετήθηκε σε υψηλότερη στάθμη από τη στάθμη ισορροπίας ώστε να πραγματοποιηθεί ροή. Η εναλλαγή στην κάτω βάνα μεταξύ των 2 δεξαμενών εισόδου, νερού και πυριτίας ήταν ευχερής, δεδομένου ότι το τμήμα του διαπερατόμετρου που τοποθετείται στην βάση του δοκιμίου έχει 2 βάνες στο ίδιο ύψος. Η μία βάνα στη βάση οδηγεί σε δεξαμενή νερού ενώ η δεύτερη στη δεξαμενή του σταθεροποιητή. Η επιλεγείσα τιμή της στάθμης της πυριτίας κάθε φορά αντιστοιχεί σε «αρχική» υδραυλική κλίση, ανάλογα με το μήκος του εκάστοτε δοκιμίου (η διαδρομή εντός του χονδρόκοκκου υλικού θεωρείται ότι δεν δημιουργεί απώλεια ενέργειας, και άρα μπορεί να αμεληθεί στους υπολογισμούς). Όταν ξεκίνησε η εισπίεση πυριτίας, οι στάθμες της δεξαμενής εισόδου πυριτίας (από κάτω στο δοκίμιο) και της δεξαμενής εξόδου (από πάνω στο

δοκίμιο) παρέμειναν σταθερές καθ' όλη την πειραματική διαδικασία. Αυτό επιτεύχθηκε με τη διαρκή προσθήκη πυριτίας στην ομώνυμη δεξαμενή εισόδου και την ταυτόχρονη αφαίρεση υγρού από τη δεξαμενή εξόδου, όποτε ήταν αναγκαίο. Με τον τρόπο αυτό, η μέτρηση των όγκων της προστιθέμενης πυριτίας με τον χρόνο αντιστοιχήθηκε στη μετρούμενη παροχή πυριτίας Q_{meas} που εισπίζεται μέσα στο δοκίμιο. Σημειώνεται ότι στη δοκιμή 1 δεν μετρήθηκαν παροχές και στις δοκιμές 2 και 3 η μέτρηση της παροχής δεν θεωρείται αξιόπιστη καθώς χρησιμοποιήθηκαν μεγάλης διαμέτρου δεξαμενές που καθιστούσαν πολύ δύσκολη την παρατήρηση πτώσης ή ανόδου των σταθμών της πυριτίας στη δεξαμενή εισόδου και του νερού στη δεξαμενή εξόδου αντίστοιχα. Κατά συνέπεια ίσως να είναι και λανθασμένη η εκτίμηση της αρχικής υδραυλικής κλίσης. Παρόλα αυτά χάριν πληρότητας, παρουσιάζονται το σύνολο των αποτελεσμάτων στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της δοκιμής εισπίεσης, καταγραφόταν ο απαιτούμενος χρόνος για την μετακίνηση του μετώπου της πυριτίας (μπλέ χρώματος) μέχρι προδιαγεγραμμένα σημεία κατά μήκος του δοκίμιου, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.1** Η μέτρηση των απαιτούμενων χρόνων για την κάλυψη συγκεκριμένων αποστάσεων κατά μήκος του δοκίμιου επέτρεψε τον υπολογισμό της μετρούμενης ταχύτητας διήθησης πυριτίας V_{meas} μέσα στο δοκίμιο.

Ταυτόχρονα με τη δοκιμή εισπίεσης, πραγματοποιούνταν μέτρηση της σχέσης ιξώδους – χρόνου του υλικού της πυριτίας στις συνθήκες θερμοκρασίας και σύστασης διαλύματος (σε δείγμα από το επιπλέον υλικό που δεν είχε ακόμη εισπιαστεί), ώστε να προκύψει το μετρούμενο ιξώδες μ_{meas} της πυριτίας, και το πως αυτό διαφοροποιείται με το χρόνο.

Οι τρεις αυτές μετρήσεις και το πως μεταβάλλονται με το χρόνο χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δοκιμών εισπίεσης στο Κεφάλαιο 5 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.1 Παράδειγμα άφιξης της πυριτίας ελάχιστα άνωθεν του σημείου #6 κατά μήκος του μικρού δοκιμίου άμμου κατά τη διάρκεια της δοκιμής 5. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι το άνω μισό του δοκιμίου έχει φυσικό χρώμα, όπως και ο σωλήνας στην άνω βάνα του δοκιμίου

Τέλος, παράλληλα με τη μέτρηση παροχής, ταχύτητας διήθησης και ιξώδους κολλοειδούς πυριτίας, γινόταν και δειγματοληψία του υγρού πόρων για τη μέτρηση του ποσοστού κατά βάρος της πυριτίας CS(%) σε αυτό. Οι λόγοι που έκαναν τη δειγματοληψία αναγκαία είναι οι κάτωθι:

- Ο χρωματισμός της κολλοειδούς πυριτίας έδινε οπτικά μια εκτίμηση της διήθησης στα αμμώδη (τουλάχιστον) εδάφη, η οποία θα έπρεπε να επιβεβαιωθεί και πειραματικά (εν δυνάμει θα μπορούσε να υπάρχει διάχυση του χρώματος, και όχι αναγκαστικά και της πυριτίας μέσα στο έδαφος, ή το ανάποδο).

Κατά την εισπίεση της πυριτίας, δεν είναι σαφές αν η βαρύτερη και πιο «παχύρρευστη» κολλοειδής πυριτία εκτοπίζει το νερό στους πόρους, ή υπάρχει διάχυση των μορίων της πυριτίας μέσα στο νερό αυτό. Συνεπώς, χρειάζεται η συσχέτιση της (οπτικά εκτιμώμενης) θέσης του μετώπου της πυριτίας με μετρήσεις

του ποσοστού κατά βάρος της πυριτίας CS(%). Για τη δειγματοληψία ικανοποιητικής ποσότητας υγρού των πόρων χρησιμοποιήθηκε φαρμακευτική σύριγγα (βλ. Σχήμα 4.2). Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε ανοξείδωτους υποδοχείς και αφέθηκαν στο φούρνο στους 200°C για δύο ημέρες). Η μάζα του υλικού που απέμεινε μετά την ξήρανση θεωρείται ότι είναι ίση με την πυριτία στο δείγμα, και συνεπώς ο λόγος της τελικής προς την αρχική μάζα του δείγματος δίνει το ποσοστό κατά βάρος CS(%) στο δείγμα. Είναι σαφές ότι στη μάζα συμπεριλαμβανόταν και η μάζα του NaCl, αλλά και η όποια μάζα των νανοσωματιδίων του χρώματος, οι οποίες όμως θεωρούνται αμελητέες για τις ανάγκες του πειράματος σε σχέση με τη μάζα της πυριτίας. Οι δειγματοληψίες λήφθηκαν μέσω συγκεκριμένων υποδοχών στο διαπερατόμετρο. Σημαντικό για τις ανάγκες του πειράματος ήταν το ποσοστό CS(%) που μετριόταν σε κάθε θέση μέσα στο δοκίμιο, συγκριτικά με τη θέση που βρίσκόταν το μέτωπο της πυριτίας, δεν είχε σημασία από ποια υποδοχή καθ' ύψος στο δοκίμιο γινόταν η δειγματοληψία, αλλά η θέση της υποδοχής συγκριτικά με τη θέση του μετώπου κατά τη στιγμή που γινόταν η δειγματοληψία από αυτήν.



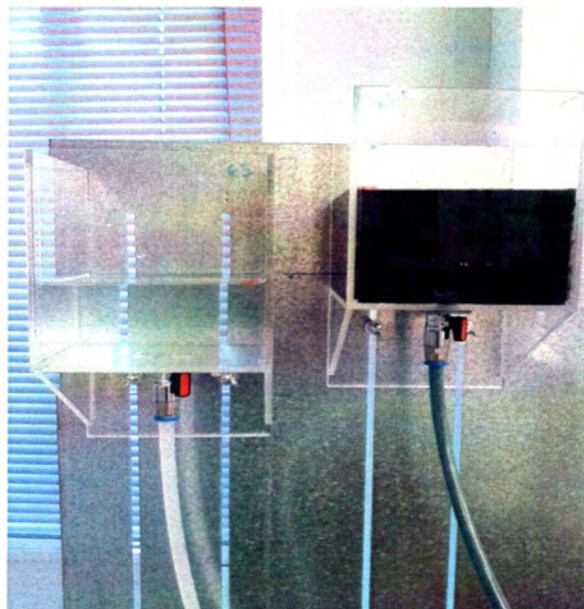
Σχήμα 4.2 Δειγματοληψία πυριτίας με χρήση φαρμακευτικής σύριγγας.

4.3 Περιγραφή δοκιμών εισπίεσης

4.3.1 Δοκιμή 1

Η Δοκιμή 1 προετοιμάστηκε όπως περιγράφεται στην ενότητα **3.9**. Η διαπερατότητα που υπολογίστηκε ήταν ίση με $k=1.09 \cdot 10^{-4}$ m/s, ενώ ο δείκτης πόρων εκτιμήθηκε ίσος με $e=0.597$. Στη δοκιμή 1 δεν μετρήθηκαν παροχές.

Το μείγμα CS που είχε προετοιμαστεί από πριν (παράγραφος 3.3.1), με συγκέντρωση όπως αυτή μετρήθηκε ίση με 10.15%. Οι δεξαμενές εισόδου CS και εξόδου φαίνονται στο **Σχήμα 4.3**. Το CS ξεκίνησε να εισέρχεται μέσα στο δοκίμιο **Σχήμα 4.4**, και να χρωματίζει αρχικά το χονδροκόκκο υλικό.



Σχήμα 4.3 Δεξαμενές εξόδου (νερού), εισόδου (μπλε σταθεροποιητής CS).



Σχήμα 4.4. Εμφάνιση CS στο χονδρόκοκκο υλικό (δοκιμή 1).

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγραφόταν η μετακίνηση του μετώπου σε συγκεκριμένα σημεία πάνω στο δοκίμιο. Φωτογραφίες του μετώπου στις θέσεις αυτές παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.5 - 4.7, ενώ το πλήρως χρωματισμένο δοκίμιο φαίνεται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.5. Μετατόπιση μετώπου CS και είσοδός του στο αμμόδες υλικό.



Σχήμα 4.6. Μετατόπιση μετώπου CS εντός του δοκιμίου κάτω από την πρώτη δειγματοληψία (δοκιμή 1).



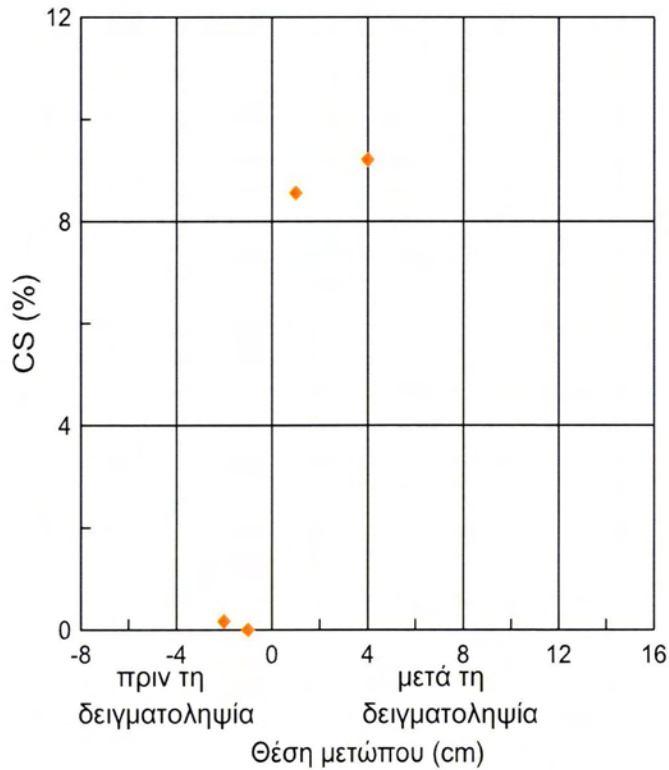
Σχήμα 4.7. Μετατόπιση μετώπου CS εντός του δοκιμίου πάνω από την πρώτη δειγματοληψία (δοκιμή 1).



Σχήμα 4.8. Πλήρης χρωματισμός δοκιμίου μετά από κατακλυσμό του δοκιμίου με πυριτία (δοκιμή 1).

Τη χρονική στιγμή που το μέτωπο έφτασε στα 9cm εμφανίστηκε αέρας στο σωλήνα εισόδου CS. Λόγω ανακίνησης του δοκιμίου τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, χρωματίστηκε και το υπόλοιπο δοκίμιο. Για το λόγο αυτό δεν υπάρχουν μετρήσεις από εκείνη τη στιγμή και μετά.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος εξαγόταν δείγματα που περιείχαν μια ικανοποιητική ποσότητα υγρού των πόρων με φαρμακευτική σύριγγα. Τα δείγματα αυτά, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τοποθετήθηκαν σε ανοξειδωτους υποδοχείς και αφέθηκαν στο φούρνο στους 200°C για δύο ημέρες. Τα δείγματα στη δοκιμή 1 εξήχθησαν όταν το μέτωπο ήταν σε ύψος 3, 6, και 9cm από την αρχή του δοκιμίου της άμμου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9 που φαίνεται η εξέλιξη του CS(%) σε σχέση με τη θέση της δειγματοληψίας πριν ή μετά το μέτωπο. Η μάζα του υλικού που απέμεινε μετά την ξήρανση θεωρείται ότι είναι αντιπροσωπευτική του ποσοστού CS(%) στο σημείο της δειγματοληψίας. Η μάζα αυτή συμπεριλάμβανε και τη μάζα του άλατος, η οποία θεωρείται αμελητέα για τις ανάγκες του πειράματος σε σχέση με τη μάζα της πυριτίας.



Σχήμα 4.9 Ποσοστό CS% ως συνάρτηση της θέσης μετώπου-δειγματοληψίας (δοκιμή 1).

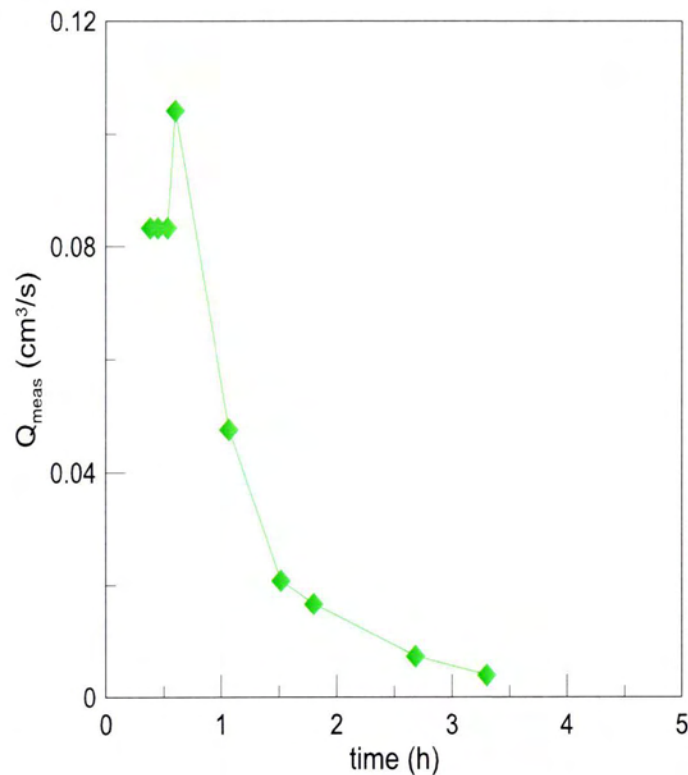
Οι δειγματοληψίες που αναφέρονται σε αρνητικές τιμές θέσης στον άξονα X αφορούν δείγματα που ελήφθησαν από υποδοχείς που βρίσκονταν πριν το μέτωπο, φθάσει σε αυτές, δηλαδή σε θέσεις πιο ψηλά από τη θέση του μετώπου στην κατακόρυφη προς τα άνω εισπίεση της πυριτίας. Αντίστοιχα, οι δειγματοληψίες που αναφέρονται σε θετικές τιμές θέσης στον άξονα X αφορούν δείγματα που ελήφθησαν από υποδοχείς που βρίσκονταν μετά το μέτωπο, δηλαδή σε θέσεις πιο χαμηλά από τη θέση του μετώπου στην κατακόρυφη προς τα άνω εισπίεση της πυριτίας.

Παρατηρείται πως όταν το δείγμα εξάγεται, ενώ το μέτωπο δεν έχει φτάσει ακόμα στο ύψος της δειγματοληψίας, το ποσοστό CS(%) είναι μηδενικό ή αμελητέο. Σε αντίθεση, όταν το μέτωπο έχει προχωρήσει πάνω από τη δειγματοληψία το ποσοστό αυτό αυξάνεται και βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτό του αρχικού μίγματος.

4.3.2 Δοκιμή 2

Η Δοκιμή 2 προετοιμάστηκε όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.9. Η διαπερατότητα που υπολογίστηκε ήταν ίση με $k=2.25 \cdot 10^{-4}$ m/s, ενώ ο δείκτης πόρων εκτιμήθηκε ίσος με $e=0.597$. Η αρχική υδραυλική κλίση ορίστηκε ίση με 0.05, το pH είχε τιμή 5.5 και η ιοντική ισχύς ήταν 0.1N.

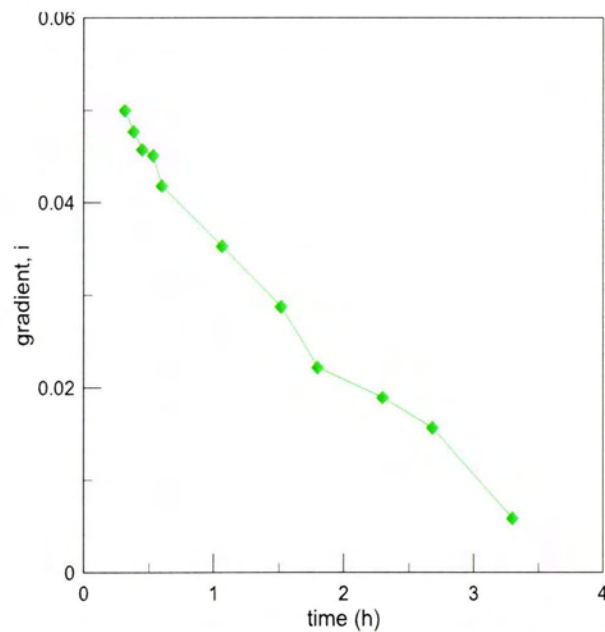
Όταν ξεκίνησε η εισπίεση πυριτίας, οι στάθμες της δεξαμενής εισόδου πυριτίας και της δεξαμενής εξόδου παρέμειναν σταθερές καθ όλη την πειραματική διαδικασία. Αυτό επιτεύχθηκε με τη διαρκή προσθήκη πυριτίας στην ομώνυμη δεξαμενή εισόδου και την ταυτόχρονη αφαίρεση υγρού από τη δεξαμενή εξόδου, όποτε ήταν αναγκαίο. Με τον τρόπο αυτό, η μέτρηση των όγκων της προστιθέμενης πυριτίας με τον χρόνο αντιστοιχήθηκε στη μετρούμενη παροχή πυριτίας Q_{meas} που εισπίζεται μέσα στο δοκίμιο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10.



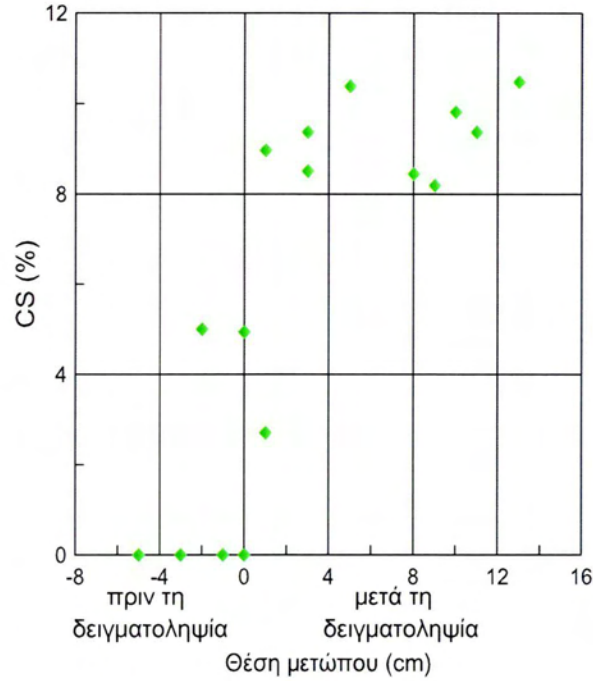
Σχήμα 4.10 Μετρούμενες παροχές με το συνολικό χρόνο δοκιμής 2

Από το **Σχήμα 4.10** προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος, οι τιμές των πραγματικών μετρούμενων παροχών μειώνονται. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται τόσο εξαιτίας του αυξανόμενου με το χρόνο ιξώδους όσο και εξαιτίας της διαρκώς μειούμενης υδραυλικής κλίσης που καθιστά την μετακίνηση του μετώπου ιδιαίτερα χρονοβόρα. Πρέπει να τονιστεί ότι η εκτίμηση των παροχών στη δοκιμή 2 δεν θεωρείται αξιόπιστη λόγω της χρήσης δεξαμενών μεγάλης διαμέτρου που καθιστούσαν πολύ δυσχερή τη λεπτομερή παρατήρηση της μεταβολής της στάθμης.

Στο **Σχήμα 4.11** παρουσιάζεται η φθίνουσα υδραυλική κλίση όπως υπολογίστηκε (βλ κεφάλαιο 5 για λεπτομέρειες). Όπως και στις υπόλοιπες δοκιμές εξήχθησαν δείγματα του υγρού των πόρων για τον υπολογισμό του ποσοστού του CS και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.12**.



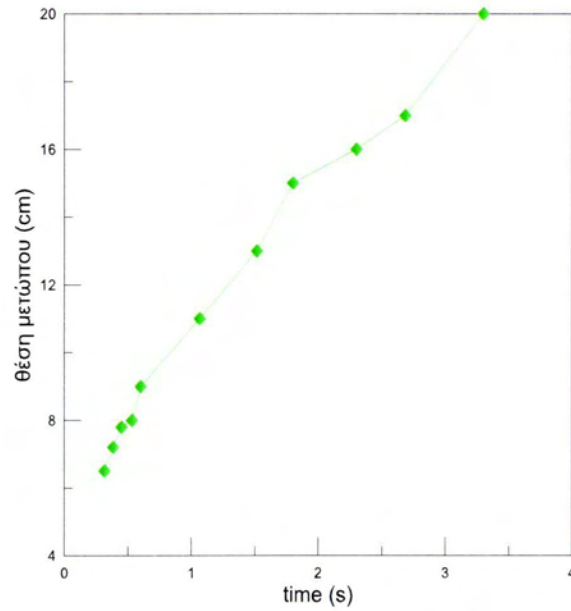
Σχήμα 4.11. Φθίνουσα υδραυλική κλίση με το χρόνο (δοκιμή 2).



Σχήμα 4.12 Ποσοστό CS% ως συνάρτηση της θέσης μετώπου-δειγματοληψίας (δοκιμή 2).

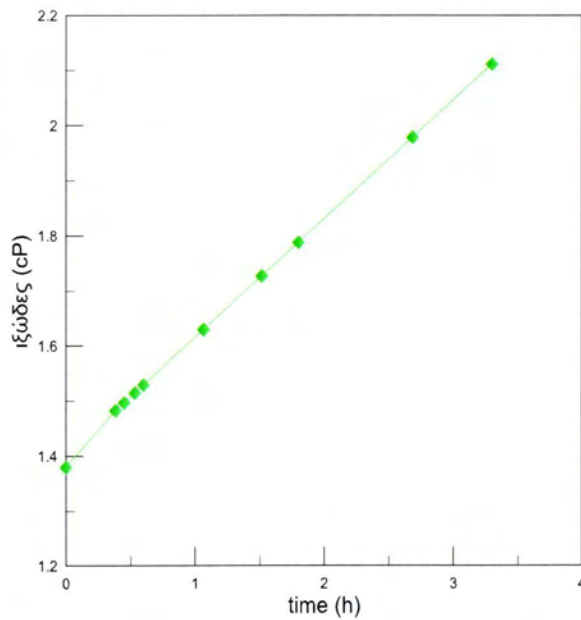
Κατά αντιστοιχία με τη δοκιμή 1 παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του CS από τη δειγματοληψία πριν το μέτωπο πλησιάζει σε αυτές η μάζα CS στο υγρό των πόρων, ενώ όταν το δείγμα ληφθεί αφού το μέτωπο κολλοειδούς πυριτίας έχει υπερβεί τη θέση δειγματοληψίας (βλέπε **Σχήμα 4.12** μετά τη δειγματοληψία) η μάζα του CS ήταν ποσοστιαία παρόμοια με αυτή του αρχικού μίγματος.

Στο **Σχήμα 4.13** απεικονίζεται η θέση μετώπου με το χρόνο, τονίζεται ότι το διάγραμμα προέκυψε από την οπτική παρατήρηση του μετώπου κατά τη διάρκεια της δοκιμής 2.



Σχήμα 4.13. Θέση μετώπου ανάλογα με το χρόνο από οπτική παρατήρηση (δοκιμή 2).

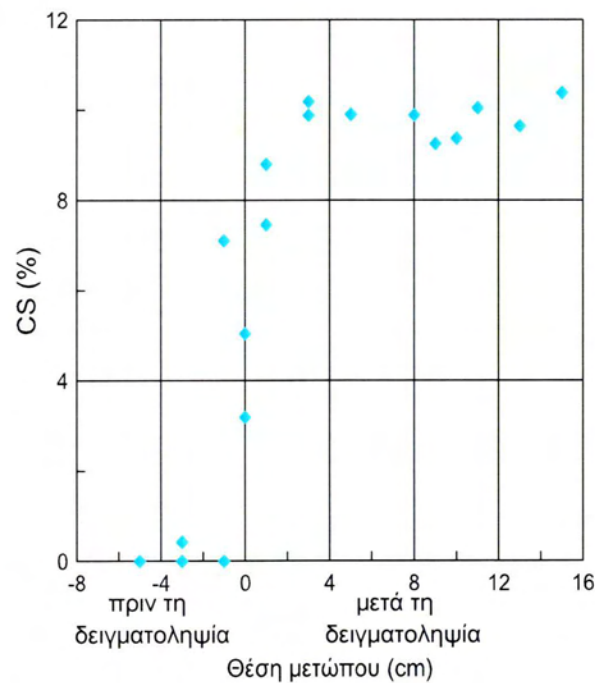
Στο **Σχήμα 4.14** παρουσιάζεται η μεταβολή του ιξώδους με το χρόνο από τις μετρήσεις ιξώδους κατά τη διάρκεια της δοκιμής.



Σχήμα 4.14. Αύξηση του ιξώδους της πυριτίας με το χρόνο (δοκιμή 2).

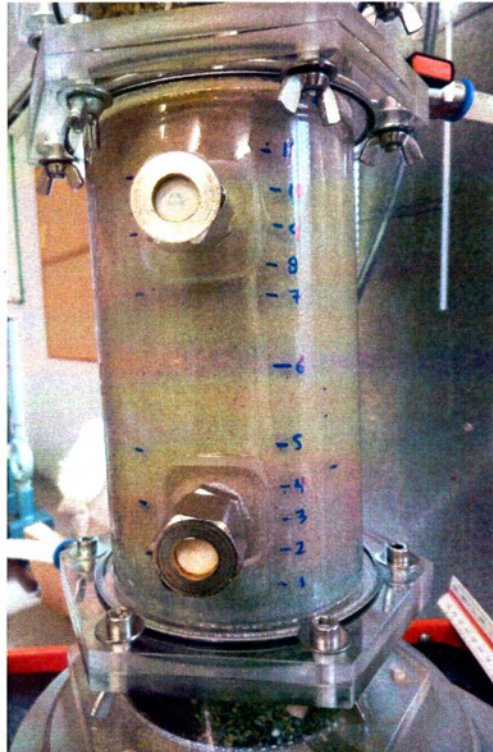
4.3.3 Δοκιμή 3

Σε αντιστοιχία με τις δοκιμές 1, 2 η δοκιμή 3 προετοιμάστηκε όπως περιγράφεται στην **παράγραφο 3.9**. Η διαπερατότητα που υπολογίστηκε ήταν ίση με $k=2.48 \cdot 10^{-4}$ m/s ενώ ο δείκτης πόρων προσδιορίστηκε ίσος με $e=0.597$. Ομοίως με τις προηγούμενες δοκιμές οι στάθμες στις δεξαμενές παρέμειναν σταθερές καθόλη τη πειραματική διαδικασία. Η μέτρηση της παροχής προστιθέμενης πυριτίας Q_{meas} σε αναλογία με το χρόνο δεν παρουσιάζεται καθώς δεν ήταν αξιόπιστη. Η χρήση δεξαμενών μεγαλύτερης διαμέτρου οδήγησε στην εσφαλμένη παρατήρηση μεταβολής της στάθμης των δεξαμενών. Για το λόγω αυτό νέες δεξαμενές χρησιμοποιήθηκαν και στις επόμενες δοκιμές. Από τη δειγματοληψία του υγρού των πόρων με συνάρτηση τη θέση της σε σχέση με τη θέση του μετώπου προέκυψε αντίστοιχα με τη δοκιμή 2 το **Σχήμα 4.15**.



Σχήμα 4.15. Ποσοστό CS% ως συνάρτηση της θέσης μετώπου-δειγματοληψίας (δοκιμή 3).

Στο **Σχήμα 4.15** παρατηρείται πως όταν το δείγμα εξάγεται από θέση δειγματοληψίας, πριν το μέτωπο φτάσει σε αυτή, δεν υπάρχει ή είναι αμελητέα η μάζα CS στο υγρό των πόρων, ενώ όταν το δείγμα ληφθεί αφού το μέτωπο κολλοειδούς πυριτίας έχει υπερβεί τη θέση δειγματοληψίας (βλέπε **Σχήμα 4.15** μετά τη δειγματοληψία) η μάζα του CS ήταν ποσοστιαία παρόμοια με αυτή του αρχικού μίγματος. Η εικόνα αυτή είναι παρόμοια με ό,τι παρατηρήθηκε και στις προηγούμενες δοκιμές. Στο **Σχήμα 4.16** και το **Σχήμα 4.17** παρατίθενται φωτογραφίες της στήλης κατά τη διάρκεια της δοκιμής με εμφανή τη θέση μετώπου.



Σχήμα 4.16. Θέση του μετώπου CS πριν την κάτω δειγματοληψία στη δοκιμή 3.



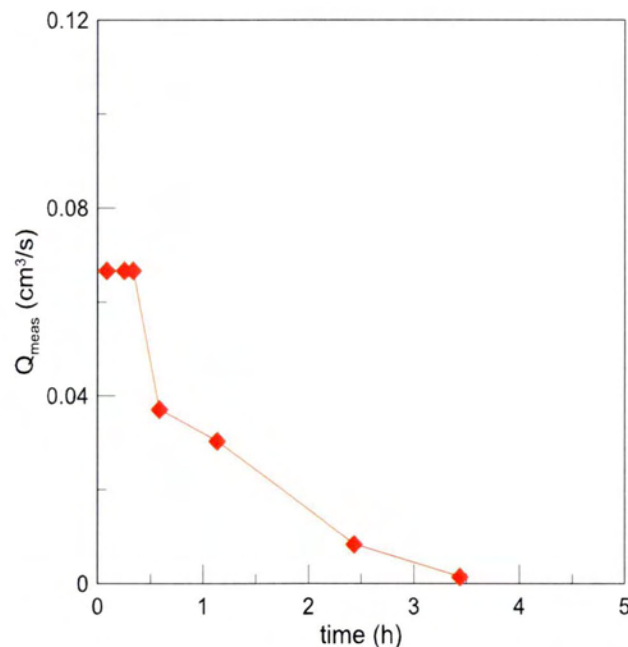
Σχήμα 4.17. Θέση του μετώπου CS λίγο μετά (πάνω από) τη δεύτερη δειγματοληψία στη δοκιμή 3.

4.3.4 Δοκιμή 4

Το δοκίμιο στη δοκιμή 4 ύψους 20cm κατασκευάστηκε όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.9. Χρησιμοποιήθηκε όπως και στις προηγούμενες δοκιμές άμμος M31. Η αρχική υδραυλική κλίση ήταν 0.05, ενώ η πυριτία είχε $pH = 5.5$ και η ιοντική ισχύς ήταν 0.1N. Η διαπερατότητα που υπολογίστηκε ήταν ίση με $k=2.84 \cdot 10^{-4}$ m/s ενώ ο δείκτης πόρων προσδιορίστηκε ίσως με $e=0.603$. Οι στάθμες διατηρήθηκαν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη συγκεκριμένη δοκιμή παρουσιάζει ότι ενώ υπήρχε διαφορά στάθμης μεταξύ των δεξαμενών εισόδου (πυριτίας) και εξόδου (νερού) η εισπίεση πυριτίας πρακτικώς σταμάτησε (υπήρξε σταθεροποίηση του μετώπου). Αναλυτικότερα στη δοκιμή 4 η πυριτία διένυσε 13 cm στην άμμο από τα συνολικά 20 cm άμμου του δοκιμίου. Το ιξώδες τη χρονική στιγμή που σταμάτησε η ροή μετρήθηκε και είχε τιμή 6 cP, όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 από

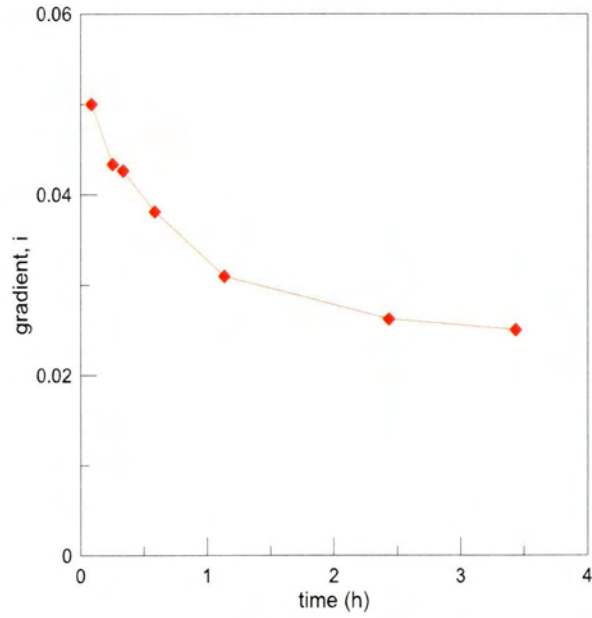
βιβλιογραφική έρευνα η εισπίεση δύσκολα συνεχίζεται μετά τα 3.6-4.0 cP (Gallagher and Lin, 2009).



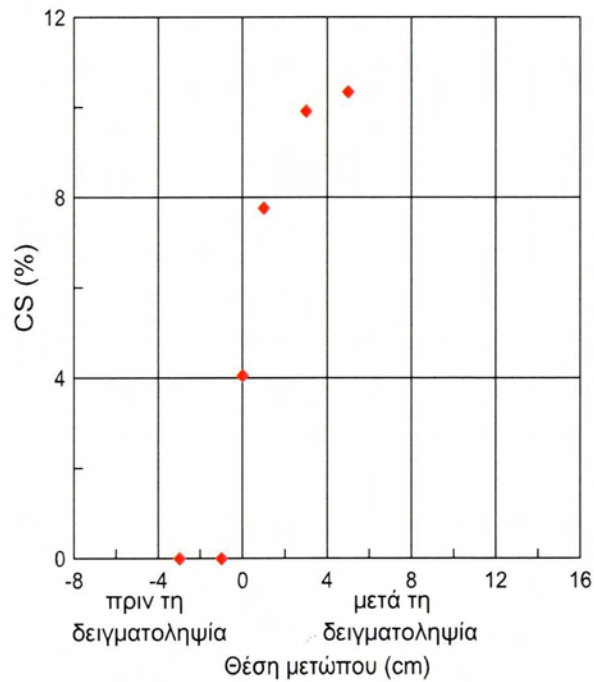
Σχήμα 4.18. Μετρούμενες παροχές με συνολικό χρόνο δοκιμής 4.

Από την άλλη, όταν η τιμή του ιξώδους ξεπεράσει τα 3.5 cP η αύξηση που ακολουθεί είναι ραγδαία, συνεπώς η διαφορά στις ανωτέρω τιμές μπορεί να δικαιολογηθεί με τη λογική ότι ο χρόνος μεταξύ 3.6 – 4.0 cP και 6.0cP μπορεί να είναι πολύ μικρός. Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα παροχών-χρόνου στο **Σχήμα 4.18.**, όπου, φυσιολογικά, παρουσιάζεται πτώση της παροχής με το χρόνο λόγω της αύξησης του ιξώδους και της μειούμενης υδραυλικής κλίσης. Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.19** παρουσιάζεται η μείωση της υδραυλικής κλίσης με το χρόνο όπως υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 5.

Τα ποσοστά πυριτίας κατά βάρος CS(%) στα δείγματα που εξήχθησαν από τη δοκιμή ως συνάρτηση της θέσης (απόστασης) της δειγματοληψίας από το οπτικά εκτιμώμενο μέτωπο της πυριτίας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.20.**

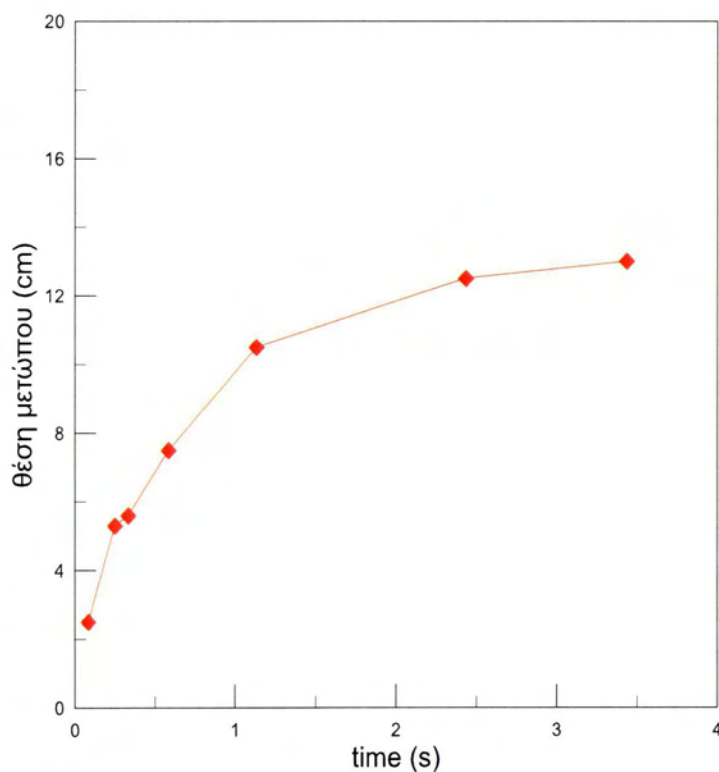


Σχήμα 4.19. Φθίνουσα υδραυλική κλίση με το χρόνο δοκιμή 4

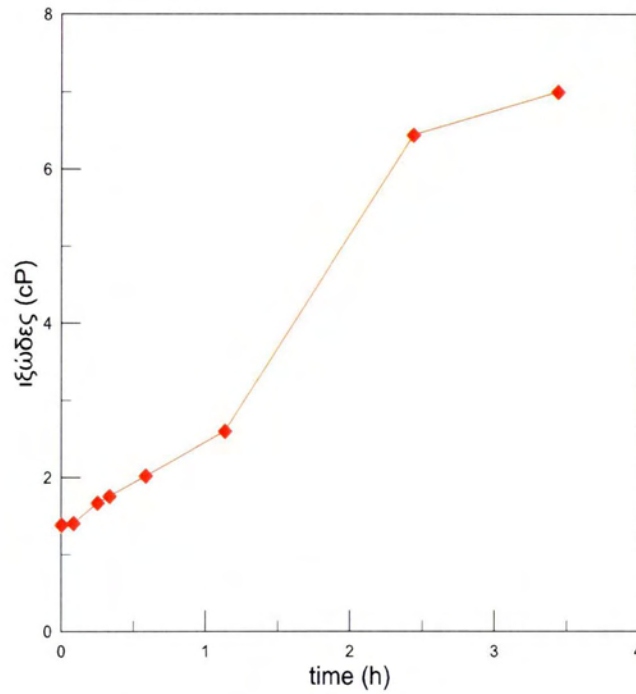


Σχήμα 4.20 Ποσοστό CS% ως συνάρτηση της θέσης μετώπου-δειγματοληψίας (δοκιμή 4).

Στο **Σχήμα 4.20** παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με αυτή των προηγούμενων δοκιμών δηλαδή η συγκέντρωση του CS κατά βάρος αυξάνει και πλησιάζει την τιμή του αρχικού μίγματος όταν η λήψη δείγματος πραγματοποιείται από θέση υποδοχής που έχει υπερβεί το μέτωπο (θέση μετώπου μετά τη δειγματοληψία). Για παράδειγμα η τελευταία τιμή, στα θετικά του άξονα X, που εμφανίζεται στο διάγραμμα είναι σε απόσταση 6 cm από το μέτωπο, δηλαδή η πυριτία έχει διανύσει απόσταση 6 cm μακρύτερα από την συγκριμένη υποδοχή, έχει τιμή CS περίπου ίση με 10 δηλαδή ίση με του αρχικού διαλύματος. Στο **Σχήμα 4.21** απεικονίζεται η οπτικά παρατηρούμενη θέση μετώπου με το χρόνο ενώ στο **Σχήμα 4.22** η μεταβολή του ιξώδους με το χρόνο. Στο **Σχήμα 4.23** φαίνεται η είσοδος του σταθεροποιητή στην άμμο.



Σχήμα 4.21. Θέση μετώπου ανάλογα με το χρόνο από οπτική παρατήρηση (δοκιμή 4).



Σχήμα 4.22. Αύξηση του ιζώδους με το χρόνο (δοκιμή 4).

Στο **Σχήμα 4.23** απεικονίζεται η είσοδος του σταθεροποιητή στην άμμο, δηλαδή σε μια θέση κάτω από την πρώτη δειγματοληψία αλλά πάνω από τη διεπιφάνεια χαλίκων-άμμου.

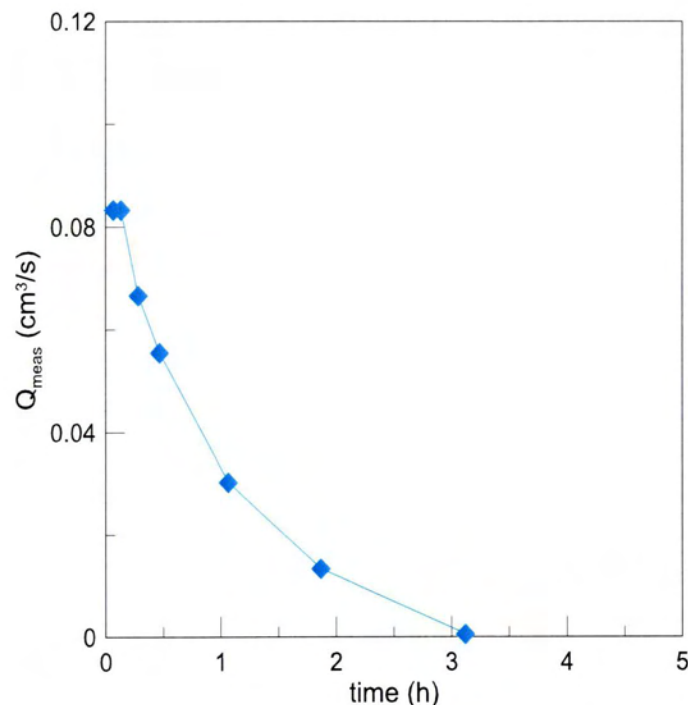


Σχήμα 4.23. Είσοδος του σταθεροποιητή στην άμμο (δοκιμή 4).

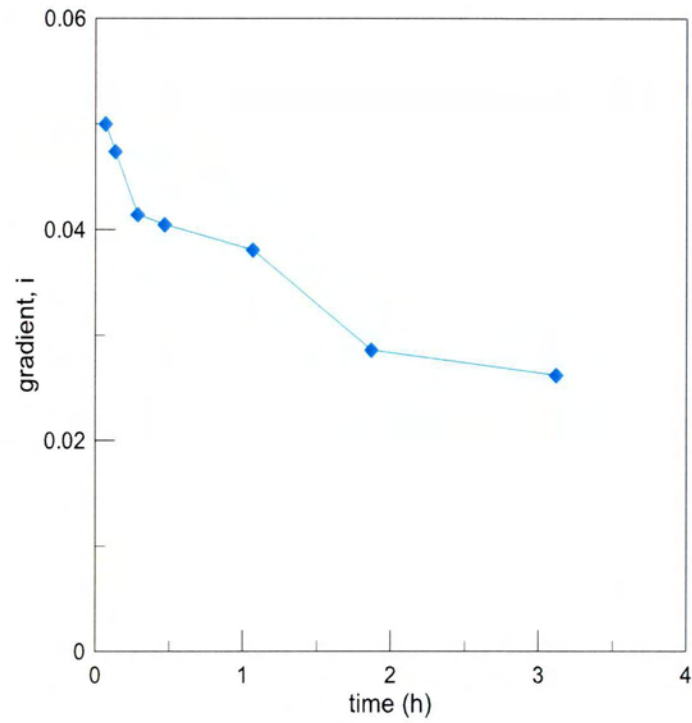
4.3.5 Δοκιμή 5

Το δοκίμιο στη δοκιμή 5 ύψους 20cm κατασκευάστηκε κατά τα γνωστά (βλ. παράγραφο 3.9). Χρησιμοποιήθηκε άμμος M31 και η αρχική υδραυλική κλίση ορίστηκε 0.05, το pH είχε τιμή 5.5 και η ιοντική ισχύς ήταν 0.1. Η διαπερατότητα που υπολογίστηκε ήταν ίση με $k=3.17 \cdot 10^{-4}$ m/s ενώ ο δείκτης πόρων προσδιορίστηκε ίσως με $e=0.613$.

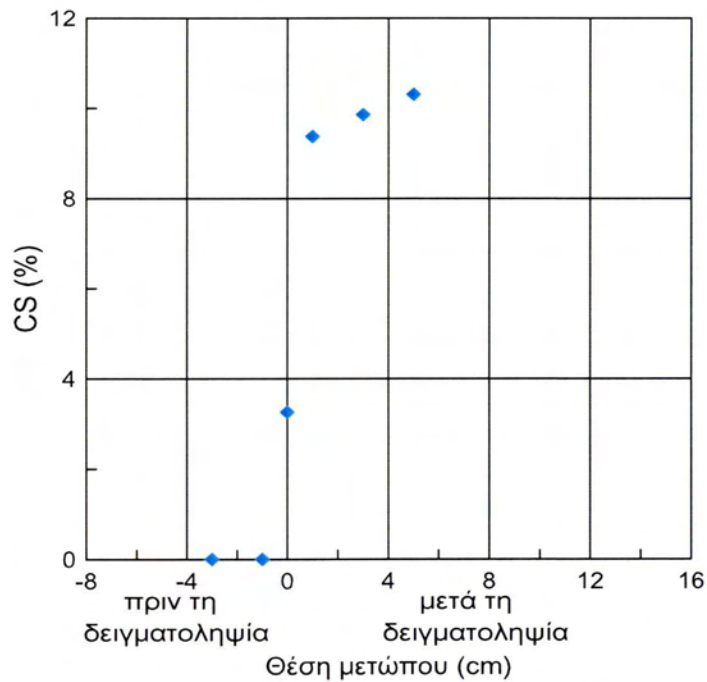
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν αντίστοιχη των προηγούμενων δοκιμών. Στη δοκιμή 5 όπως συνέβη και με τη δοκιμή 4 η πυριτία δεν διένυσε το συνολικό μήκος του δοκιμίου. Η πυριτία εισπιάστηκε σε απόσταση 11 cm στην άμμο. Ο κύριος παράγοντας διακοπής της διανομής του σταθεροποιητή αποτέλεσε η αύξηση της τιμής του ιζώδους. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα φθίνουσας παροχής-χρόνου (Σχήμα 4.24), φθίνουσας υδραυλικής κλίσης με το χρόνο (Σχήμα 4.25), συγκέντρωσης CS% ως συνάρτηση της θέσης δειγματοληψίας-μετώπου (Σχήμα 4.26), οπτικά παρατηρούμενη θέση μετώπου με το χρόνο (Σχήμα 4.27) και μεταβολή ιζώδους με το χρόνο (Σχήμα 4.28).



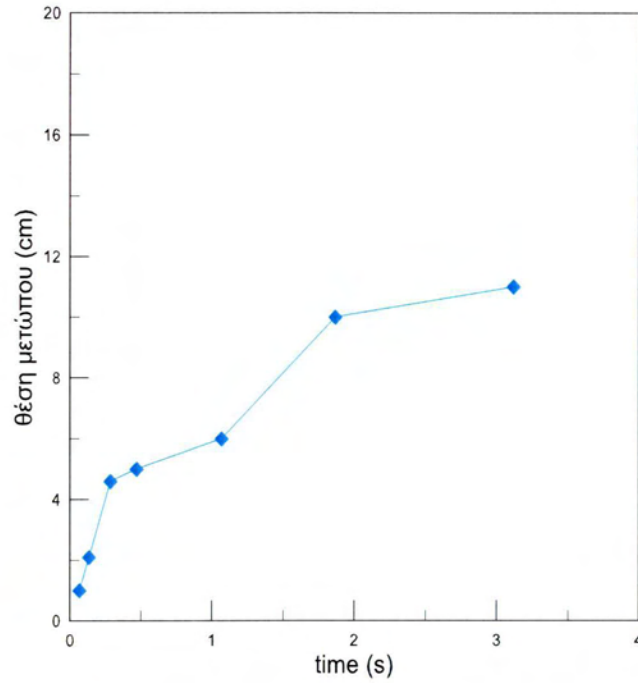
Σχήμα 4.24. Μετρούμενες παροχές με συνολικό χρόνο (δοκιμή 5).



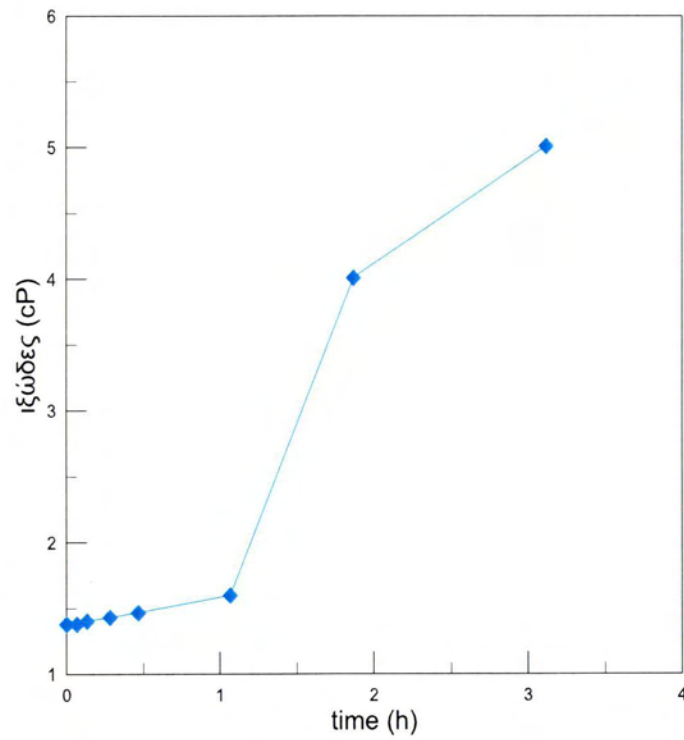
Σχήμα 4.25. Φθίνουσα υδραυλική κλίση με το χρόνο (δοκιμή 5).



Σχήμα 4.26. Ποσοστό CS% ως συνάρτηση της θέσης μετώπου-δειγματοληψίας (δοκιμή 5).

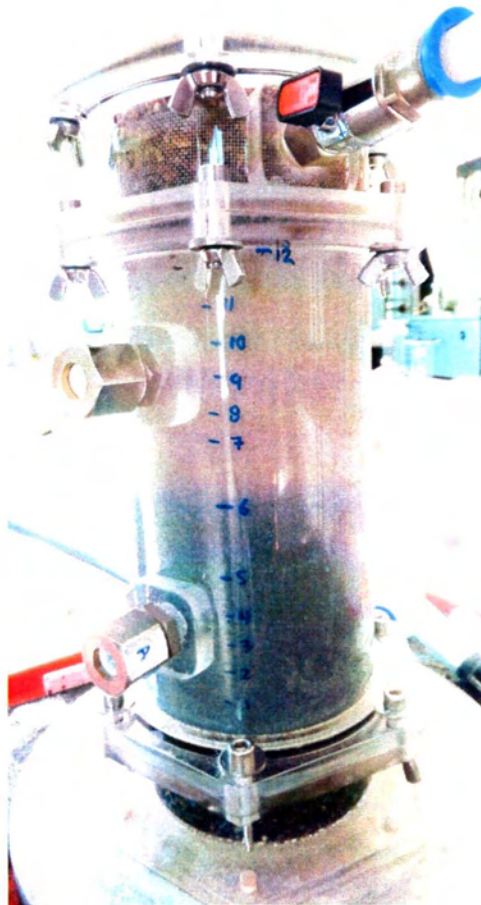


Σχήμα 4.27. Θέση μετώπου με το χρόνο από οπτική παρατήρηση (δοκιμή 5).



Σχήμα 4.28. Αύξηση του ιξώδους με το χρόνο (δοκιμή 5).

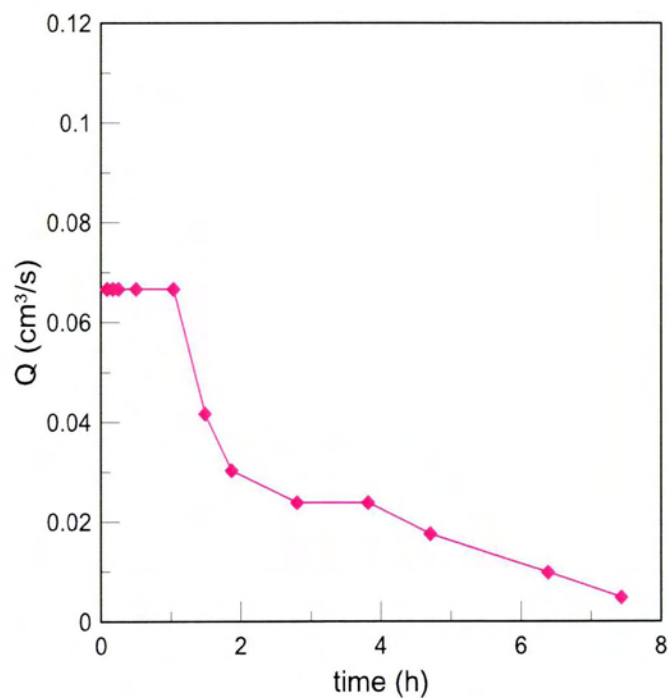
Τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα και επαληθεύουν τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών και της βιβλιογραφίας. Συνοπτικά είναι εμφανής η πτώση της παροχής με το χρόνο (Σχήμα 4.24) και ο μηδενισμός κυρίως λόγω της υψηλής αύξησης του ιξώδους (Σχήμα 4.28), καθώς η μεταβαλλόμενη υδραυλική κλίση όπως υπολογίστηκε (Κεφάλαιο 5) δεν έχει μηδενιστεί ώστε να διακοπεί η ροή (Σχήμα 4.25). Επιπλέον, στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζεται η θέση η οποία σταθεροποιήθηκε το μέτωπο της πυριτίας και σταμάτησε η εισπίεση.



Σχήμα 4.29. Θέση μετώπου πυριτίας όταν σταμάτησε η εισπίεση στη δοκιμή 5.

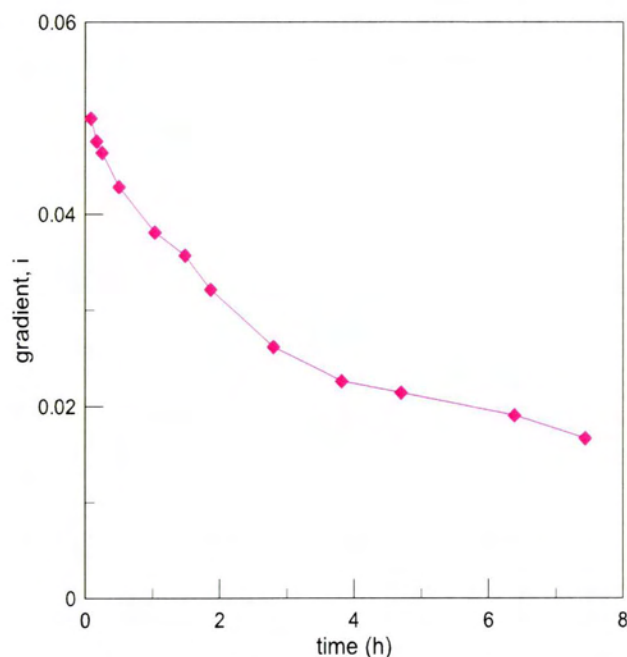
4.3.6 Δοκιμή 6

Το ιδιαίτερο στη δοκιμή 6 ήταν το ύψος του δοκιμίου (40 cm), που όμως και πάλι προετοιμάστηκε όπως περιγράφεται στη παράγραφο 3.9. Η στήλη συναρμολογήθηκε από 2 μικρότερα τμήματα ύψους 20cm. Η αρχική υδραυλική κλίση που επιλέχθηκε ήταν και πάλι 0.05, ενώ το pH είχε τιμή 7 και ιοντική ισχύς ήταν 0.1 N. Με την αύξηση του pH συγκριτικά με τις προηγούμενες δοκιμές έγινε δυνατή η καθυστέρηση της γέλης της πυριτίας, ούτως ώστε να προλάβει να εισπνεστεί σε διπλάσιου μήκους δοκίμιο με την ίδια αρχική υδραυλική κλίση. Η διαπερατότητα που μετρήθηκε ήταν ίση με $k = 3.40 \cdot 10^{-4}$ m/s, ενώ ο δείκτης πόρων προσδιορίστηκε ίσος με $e = 0.622$. Στο **Σχήμα 4.30** είναι εμφανής η μείωση της παροχής, η οποία πρακτικώς μηδενίζεται σε χρόνο μεγαλύτερο από 7 ώρες, δηλαδή τουλάχιστον διπλάσιο από το χρόνο των προηγούμενων δοκιμών (3 έως 3.5 ώρες) σε υποδιπλάσιο μήκος δοκιμίου.

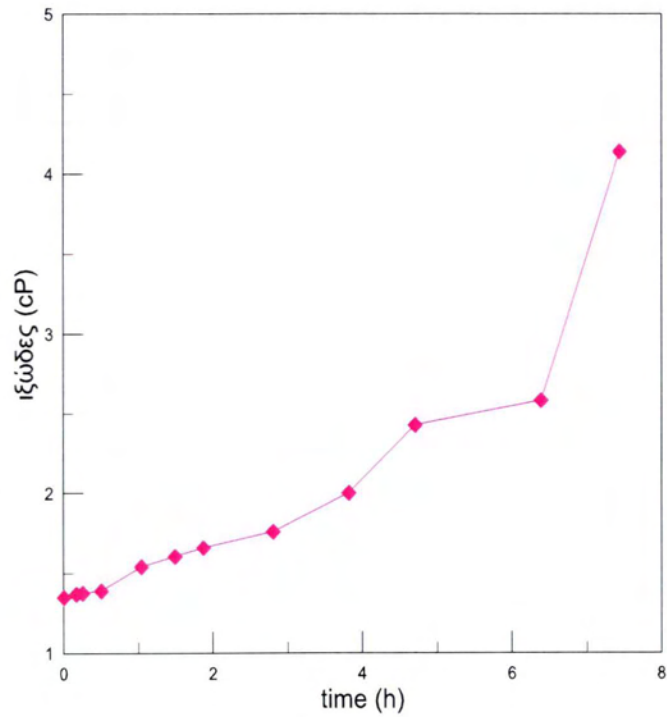


Σχήμα 4.30. Μετρούμενες παροχές με το συνολικό χρόνο δοκιμής 6.

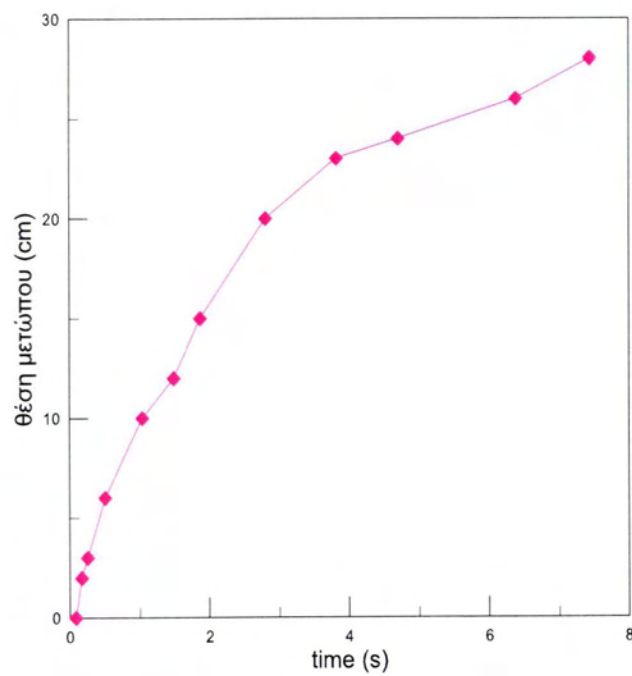
Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.31** παρουσιάζεται η μειούμενη υδραυλική κλίση της δοκιμής (τρόπος εκτίμησης, βλ. Κεφ. 5), ενώ το αυξανόμενο ιζώδες με το χρόνο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.32**. Χαρακτηριστικά, όταν το μέτωπο σταθεροποιείται (βλ. **Σχήμα 4.33**) είναι εμφανές ότι το ιζώδες έχει τιμή μεγαλύτερη από 3.6 cP γεγονός που έκανε αδύνατη την περαιτέρω εισπίεση του σταθεροποιητή. Στο **Σχήμα 4.34** παρουσιάζονται για το δοκίμιο ύψους 40 cm οι συγκεντρώσεις CS ως συνάρτηση της θέσης μετώπου ως προς τη θέση δειγματοληψίας. Όπως και στις δοκιμές των 20 cm πραγματοποιήθηκε λήψη υγρού πόρων κατά τη διάρκεια του πειράματος. Παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά με αυτή των μικρότερων δοκιμών, γεγονός που επαληθεύει τη επαρκή διανομή πυριτίας. Δηλαδή, όταν η λήψη δείγματος ήταν πριν το μέτωπο φθάσει στο ύψος της δειγματοληψίας η συγκέντρωση CS ήταν μηδενική.



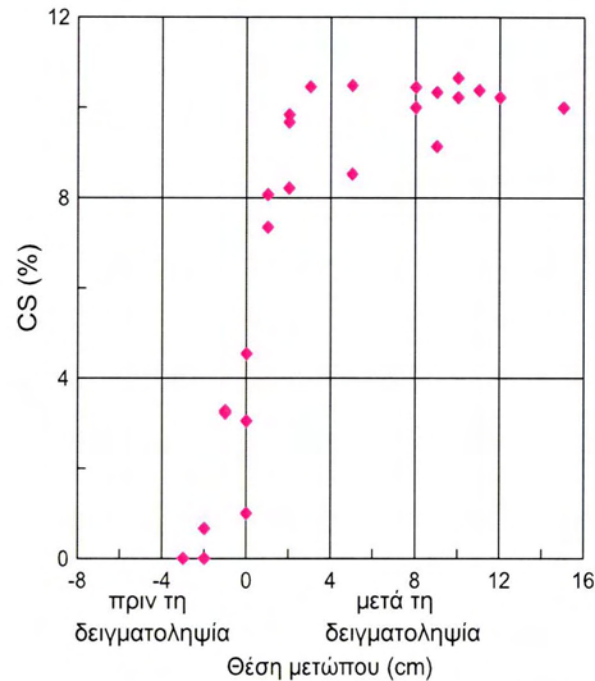
Σχήμα 4.31. Φθίνουσα υδραυλική κλίση με το χρόνο (δοκιμή 6).



Σχήμα 4.32. Αύξηση του ιξώδους με το χρόνο (δοκιμή 6).



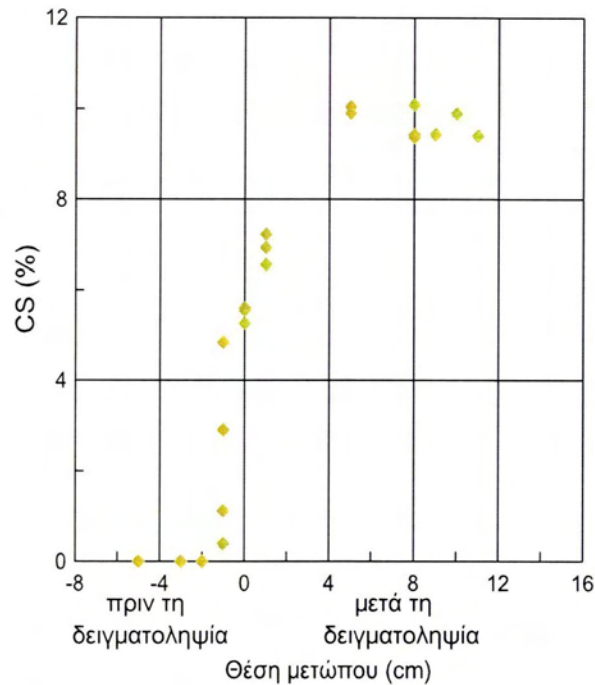
Σχήμα 4.33. Θέση μετώπου συναρτήσει του χρόνου από οπτική παρατήρηση (δοκιμή 6).



Σχήμα 4.34. Ποσοστό CS(%) από δείγματα συναρτήσει της θέσης μετώπου ως προς τη θέση δειγματοληψίας (δοκιμή 6).

4.3.7 Δοκιμή 7

Η δοκιμή 7 διεξήχθη σε δοκίμιο άμμου M31 ύψους 40 cm. Στη δοκιμή 7 δεν μετρήθηκαν αξιόπιστα παροχές, μεταβολή ιζώδους και δείκτης πόρων, λήφθηκαν μόνο δείγματα προς μέτρηση πυριτίας. Οι τιμές συγκέντρωσης του ποσοστού του CS που μετρήθηκαν από την ξήρανση των δειγμάτων της δειγματοληψίας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.35**. Ομοίως παρατηρήθηκαν, κατά αντιστοιχία με τη δοκιμή 6, μηδενικά ποσοστά συγκέντρωσης CS(%) από θέσεις δειγματοληψίας προτού τις υπερβεί το μέτωπο (θέση μετώπου πριν τη θέση δειγματοληψίας) και ποσοστά συγκέντρωσης ανάλογα του CS(%) του αρχικού διαλύματος, από θέσεις δειγματοληψίας που προσπέρασε το μέτωπο (βλ **Σχήμα 4.35** μετά τη δειγματοληψία).

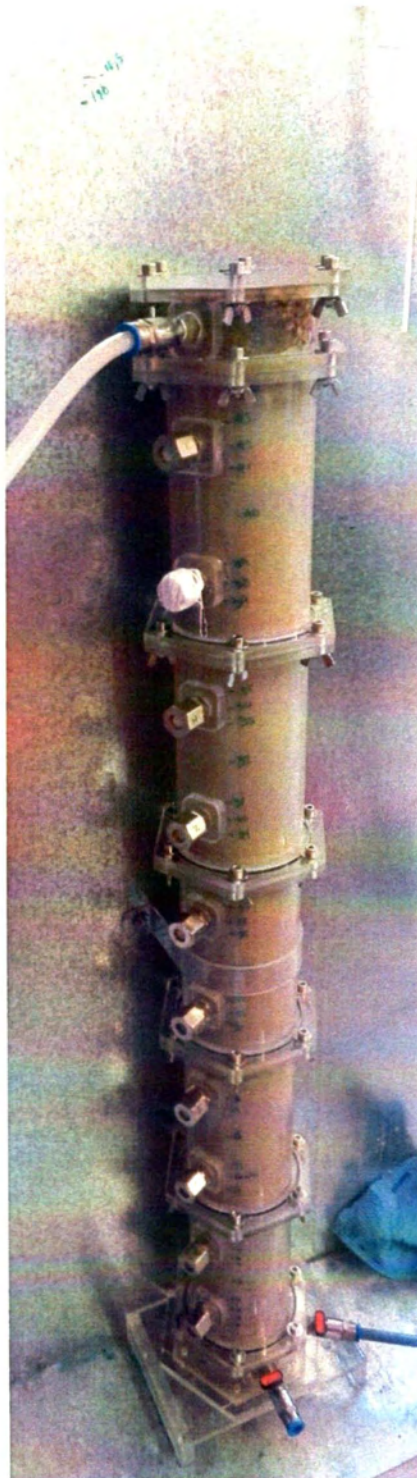


Σχήμα 4.35. Ποσοστό CS(%) από δείγματα συναρτήσει της θέσης μετώπου ως προς τη θέση δειγματοληψίας.

4.3.8 Δοκιμή 8

Το δοκίμιο της δοκιμής 8 ήταν μήκους 100cm, και ήταν το μεγαλύτερο από όλα όσα εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Στόχος της δοκιμής ήταν να διερευνηθεί αν ο σταθεροποιητής μπορεί να μεταφερθεί σε μεγαλύτερη απόσταση διατηρώντας επαρκή συγκέντρωση CS για την σταθεροποίηση του εδάφους. Το δοκίμιο ύψους 1 μέτρου αποτελείται από άμμο M31 απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.39**. Το δοκίμιο διαμορφώθηκε κατά τμήματα με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε στη παράγραφο 3.9. Η στήλη του δοκιμίου 8 συναρμολογήθηκε σταδιακά από 5 επιμέρους μικρότερες στήλες ύψους 20 cm, καθώς επίσης στη βάση του και την κορυφή του τοποθετήθηκε χονδρόκοκκο υλικό πάχους 5 cm αντίστοιχα (δηλαδή συνολικό ύψος δοκιμίου 110 cm). Το δοκίμιο αφέθηκε να κορεστεί για 1 μέρα και μετά πραγματοποιήθηκε δοκιμή διαπερατότητας. Η διαπερατότητα που υπολογίστηκε ήταν $k=3.10 \cdot 10^{-4}$ m/s. Η διαπερατότητα μετρήθηκε με διαφορετικό τρόπο από τις προηγούμενες δοκιμές. Η δεξαμενή που οδηγεί στην άνω βάνα πληρώθηκε με νερό, στη συνέχεια ανοίχτηκε η κάτω βάνα (δεν οδηγούσε σε δεξαμενή ήταν ελεύθερη) και άρχισε η ροή. Η δεξαμενή εισόδου ήταν

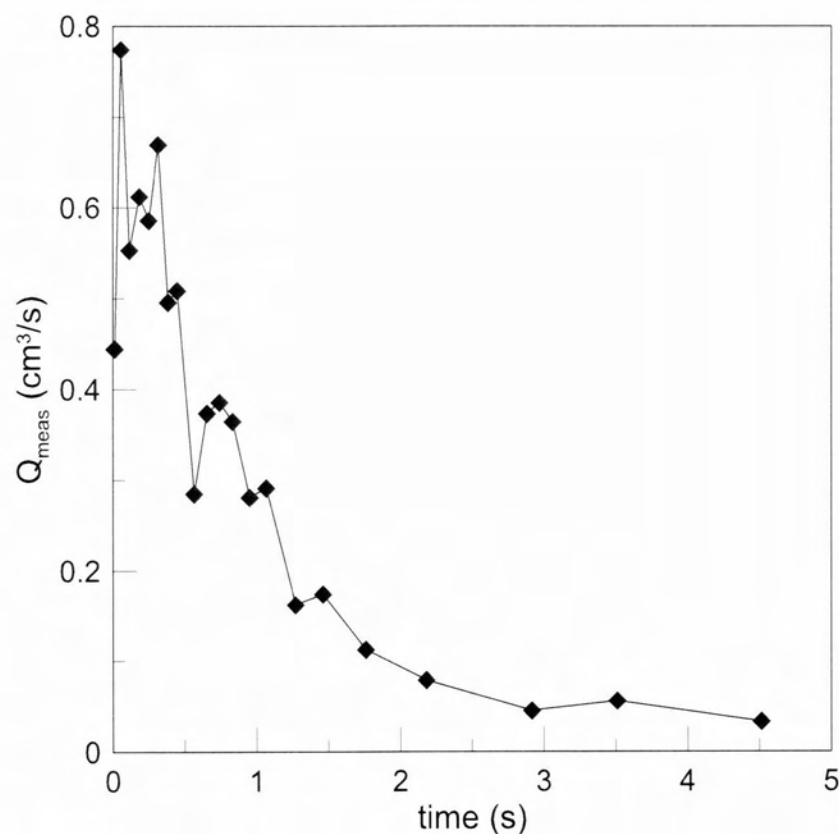
διαβαθμισμένη ανά 1 cm και είχε υπολογιστεί πόσος όγκος νερού απαιτούνταν για την άνοδο 1 cm στη στάθμη. Με την εκκίνηση της ροής χρονομετρούνταν το χρονικό διάστημα που απαιτούνταν για την πτώση 1 cm και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι παροχές και η διαπερατότητα.



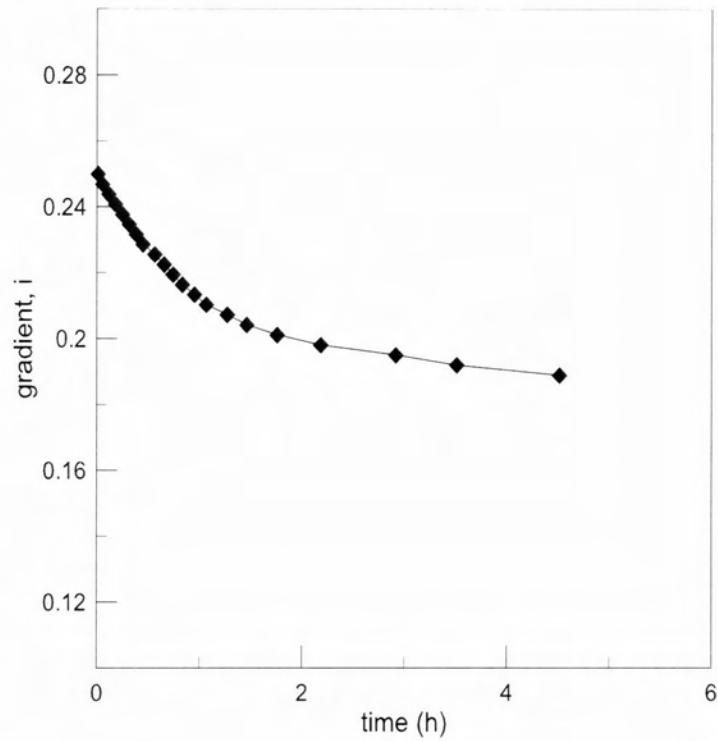
Σχήμα 4.39. Χαρακτηριστική άποψη δοκιμίου ενός μέτρου (δοκιμή 8).

Ο δείκτης πόρων εκτιμήθηκε $e=0.645$. Η δοκιμή διεξάχθηκε με αρχική υδραυλική κλίση 0.25, ενώ το pH είχε τιμή 5.5 και η ιοντική ισχύς $\text{NaCl}=0.1\text{N}$ όπως στις δοκιμές 2,3,4,5. Η αύξηση της αρχικής υδραυλικής κλίσης (5πλασιασμός) στόχευε στην δυνατότητα εισπίεσης σε 5πλάσιου μήκους δοκίμιο στον ίδιο χρόνο (καθώς ο χρόνος γέλης ήταν ίδιος με εκείνον στα δοκίμια 20cm).

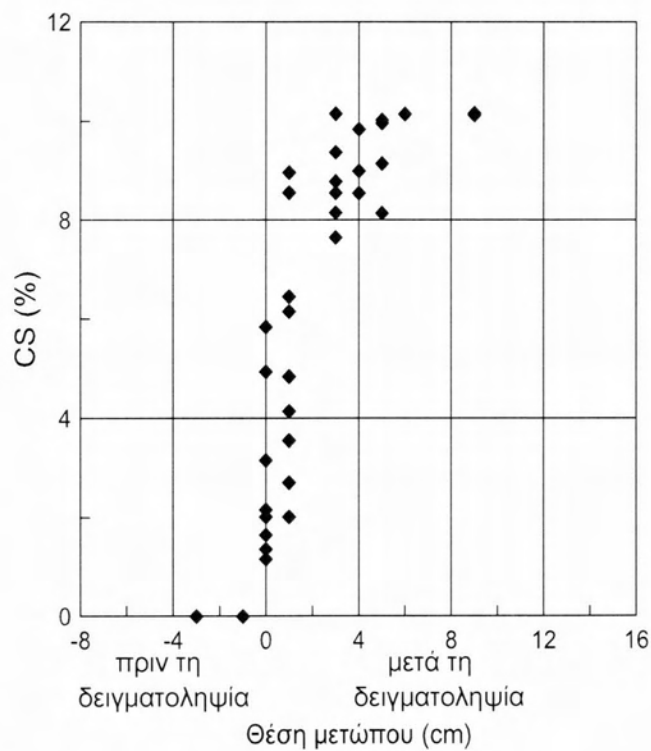
Κατά τη διάρκεια της δοκιμής οι παροχές με το χρόνο σημειώνονταν και παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.40**. Στο **Σχήμα 4.41** απεικονίζεται η φθίνουσα υδραυλική κλίση με το χρόνο όπως αυτή υπολογίστηκε (βλ. επόμενο Κεφάλαιο). Επίσης, και στη δοκιμή 8, λήφθηκαν δείγματα από το υγρό των πόρων, και η συγκέντρωση πυριτίας σε αυτό παρουσιάζεται ως συνάρτηση της θέσης του μετώπου της πυριτίας στο **Σχήμα 4.42**. Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.43** και στο **Σχήμα 4.44** απεικονίζονται η οπτικά παρατηρούμενη θέση μετώπου και η μεταβολή ιώδους με το χρόνο, αντίστοιχα.



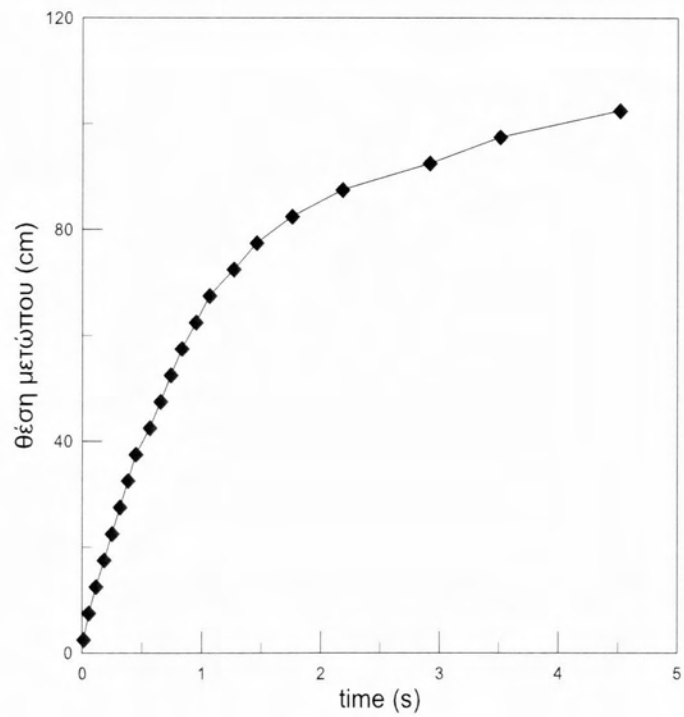
Σχήμα 4.40 Μετρούμενες παροχές με το συνολικό χρόνο δοκιμής 8



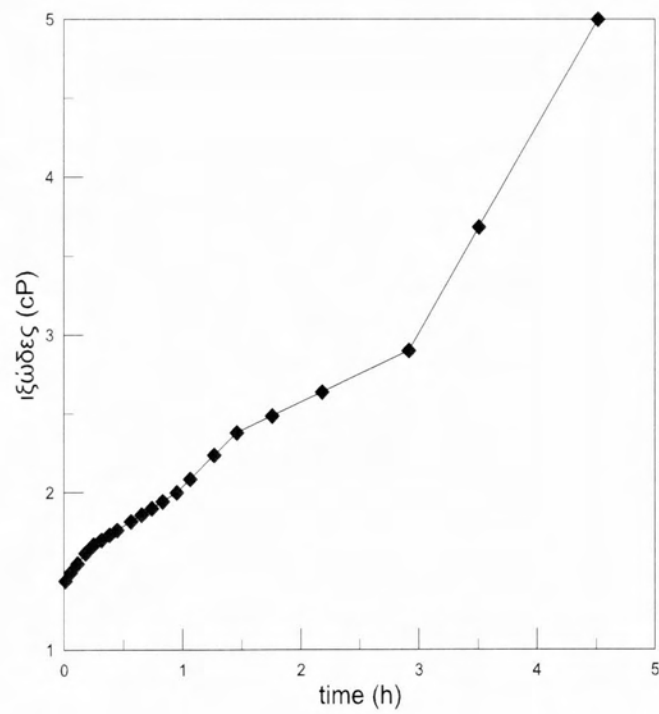
Σχήμα 4.41 Φθίνουσα υδραυλική κλίση με το χρόνο (δοκιμή 8)



Σχήμα 4.42 Ποσοστό CS(%) από δείγματα συναρτήσει της θέσης μετώπου ως προς τη θέση δειγματοληψίας.



Σχήμα 4.43. Θέση μετώπου ανάλογα με το χρόνο από οπτική παρατήρηση (δοκιμή 8).



Σχήμα 4.44. Αύξηση του ιζώδους με το χρόνο (δοκιμή 8).

Στο **Σχήμα 4.40** παρατηρείται μείωση της παροχής με το χρόνο, και η μείωση αυτή οφείλεται στη συνεχώς μειούμενη υδραυλική κλίση (**Σχήμα 4.41**), αλλά κυρίως στην αύξηση του ιξώδους (**Σχήμα 4.44**). Ο χρόνος της συνολικής εισπίεσης στο δοκίμιο 100cm είναι της ίδιας τάξης μεγέθους εκείνων για 20cm (δεδομένης της 5πλάσιας υδραυλικής κλίσης), αλλά λίγο μεγαλύτερος (4.5 ώρες έναντι 3.0 έως 3.5 ώρες) δεδομένου ότι η εισπίεση έφθασε μέχρι το άνω άκρο του δοκιμίου (φωτογραφία στο **Σχήμα 4.49**).

Ειδικότερα, η διανομή του CS πραγματοποιήθηκε σε όλη τη στήλη (βλ. θέση μετώπου **Σχήμα 4.43** και **Σχήμα 4.49**) χωρίς το μηδενισμό της παροχής, καθώς η επιλογή μεγάλης αρχικής υδραυλικής κλίσης οδήγησε σε γρηγορότερο ρυθμό εισπίεσης πριν την αύξηση του ιξώδους στη κρίσιμη τιμή. Σε αντιστοιχία με τις προηγούμενες δοκιμές είναι εμφανές ότι και στη δοκιμή του ενός μέτρου το ποσοστό του CS στο δείγμα μετά τη διέλευση του μετώπου από τη θέση δειγματοληψίας αυξάνει και πλησιάζει την τιμή του αρχικού δείγματος. Συνεπώς το CS μπορεί να μεταφερθεί με επαρκή διατήρηση των συστατικών του, σε πρακτικώς κορεσμένους μη συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς για τη σταθεροποίησή τους.

Στη συνέχεια (**Σχήμα 4.45** έως το **Σχήμα 4.48**) παρατίθενται φωτογραφίες που είναι ευδιάκριτη η θέση του μετώπου στη στήλη, όπως ανεβαίνει. Στο **Σχήμα 4.49** είναι ευδιάκριτο ότι ο σταθεροποιητής έχει εισπιαστεί σε όλη τη στήλη και εξέρχεται στη δεξαμενή εξόδου.



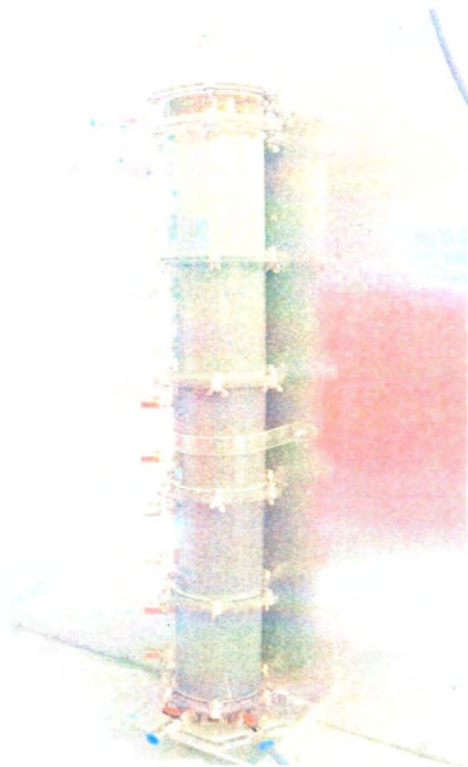
Σχήμα 4.45 Είσοδος πυριτίας στην άμμο (δοκίμιο 1m) στη δοκιμή 8



Σχήμα 4.46. Το CS έχει σχεδόν διανύσει 20cm στο δοκίμιο 1m (στη δοκιμή 8)



Σχήμα 4.47. Άνοδος μετώπου CS στο 4^ο τμήμα μήκους 20cm (δοκίμιο 1m, δοκιμή 8)



Σχήμα 4.48. Άνοδος μετώπου CS στο 5^ο τμήμα μήκους 20cm (δοκίμιο 1m, δοκιμή 8)



Σχήμα 4.49. Πλήρης χρωματισμός δοκιμίου και εμφάνιση CS στη δεξαμενή εξόδου (δοκιμή 1m) κατά τη διάρκεια της δοκιμής 8.

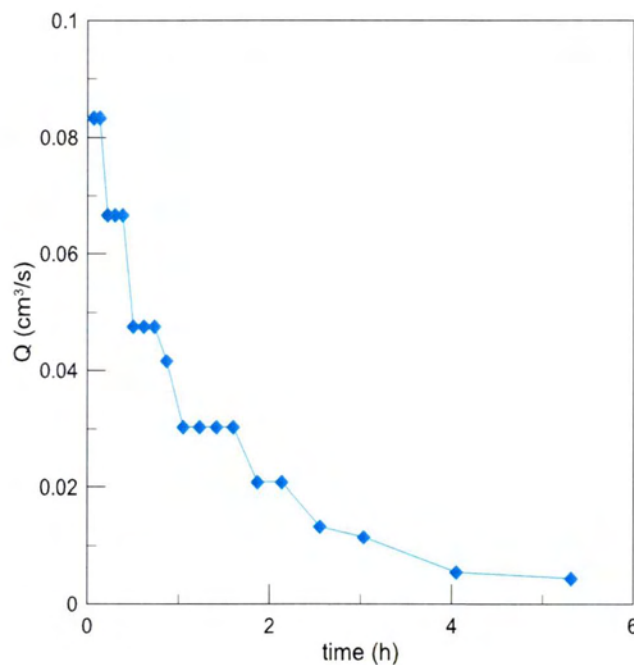
4.3.9 Δοκιμή με πυριτία pH=10

Για την κατανόηση της μεταβολής της υδραυλικής κλίσης στις μετρούμενες παροχές και στην εξέλιξη της ταχύτητας του μετώπου CS στην στήλη του εδάφους εκτελέστηκε ένα ακόμα πείραμα στο οποίο η τιμή του pH = 10 έτσι ώστε το ιξώδες να μην μεταβληθεί κατά τη διάρκεια της εισπίεσης.

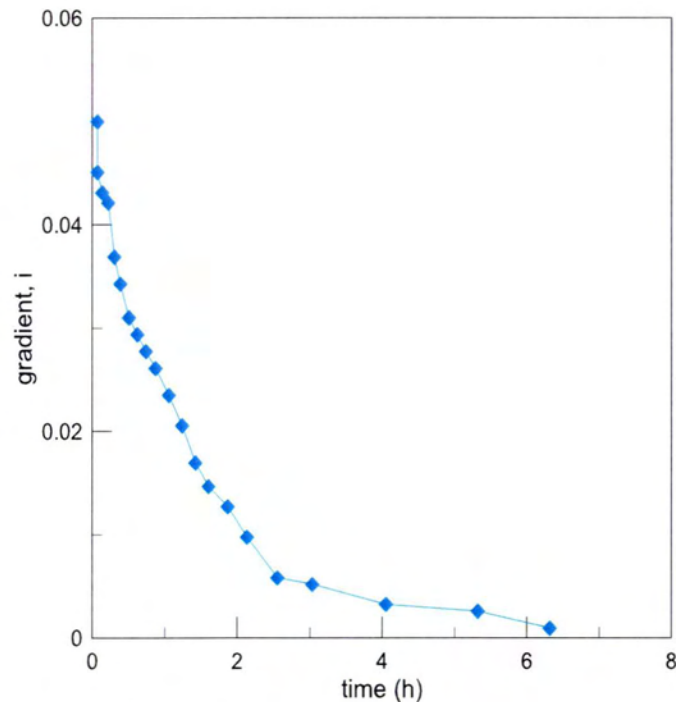
Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σε δοκίμιο άμμου M31 ύψους 20 cm. Το δοκίμιο διαμορφώθηκε όπως περιγράφεται στη παράγραφο 3.9. Η διαπερατότητα υπολογίστηκε $k=2.83 \cdot 10^{-4}$ m/s. Ο δείκτης πόρων της δοκιμής εκτιμήθηκε $e= 0.603$. Χαρακτηριστικό της δοκιμής αποτελεί εκτός από την τιμή του pH=10 δεν προστέθηκε NaCl ώστε ο ρυθμός μεταβολής του ιξώδους να είναι πολύ μικρός (πρακτικώς σταθερό ιξώδες). Η αρχική υδραυλική κλίση της δοκιμής ορίστηκε 0.05, όμοια δηλαδή με των δοκιμών 2,3,4,5. Σκοπός της δοκιμής ήταν η διατήρηση του ιξώδους όσο το δυνατό πλησιέστερα στην αρχική τιμή του και να διερευνηθεί η

επίδραση μόνο της μεταβολής της υδραυλικής κλίσης στην εισπίεση του σταθεροποιητή.

Στη δοκιμή παρατηρήθηκε μείωση της παροχής με το χρόνο (**Σχήμα 4.50**) που οφείλεται στη μειούμενη υδραυλική κλίση λόγω της ύπαρξης δύο υγρών με διαφορετικό ειδικό βάρος. Ο σταθεροποιητής δεν μεταφέρθηκε σε όλη τη στήλη και κατάφερε να εισπιαστεί σε απόσταση 17,5 cm από τη βάνα εισόδου δηλαδή σε απόσταση 15 cm μέσα στην άμμο. Το διαφορετικό σε αυτή τη δοκιμή είναι ότι το μέτωπο σταμάτησε να προχωράει εξαιτίας του σχεδόν μηδενισμού της υδραυλικής κλίσης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.51** και όχι εξαιτίας της αύξησης του ιξώδους όπως έγινε στις προηγούμενες δοκιμές.



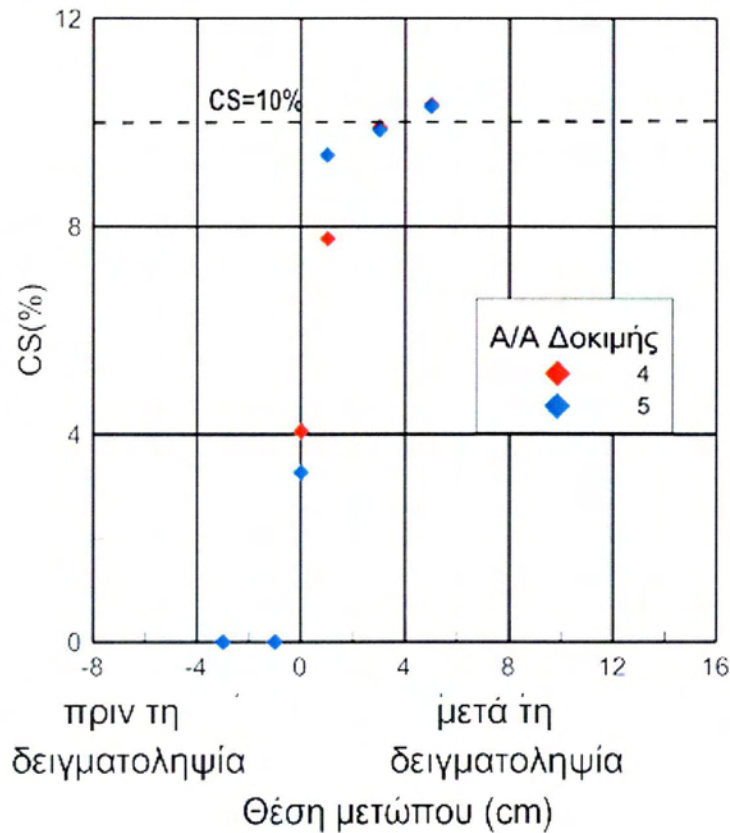
Σχήμα 4.50. Μείωση παροχών με το χρόνο, pH=10, N=0 λόγω μεταβολής υδραυλικής κλίσης (δοκιμή pH=10, δοκιμή 9).



Σχήμα 4.51. φθίνουσα υδραυλική κλίση με το χρόνο (δοκιμή pH=10, δοκιμή 9).

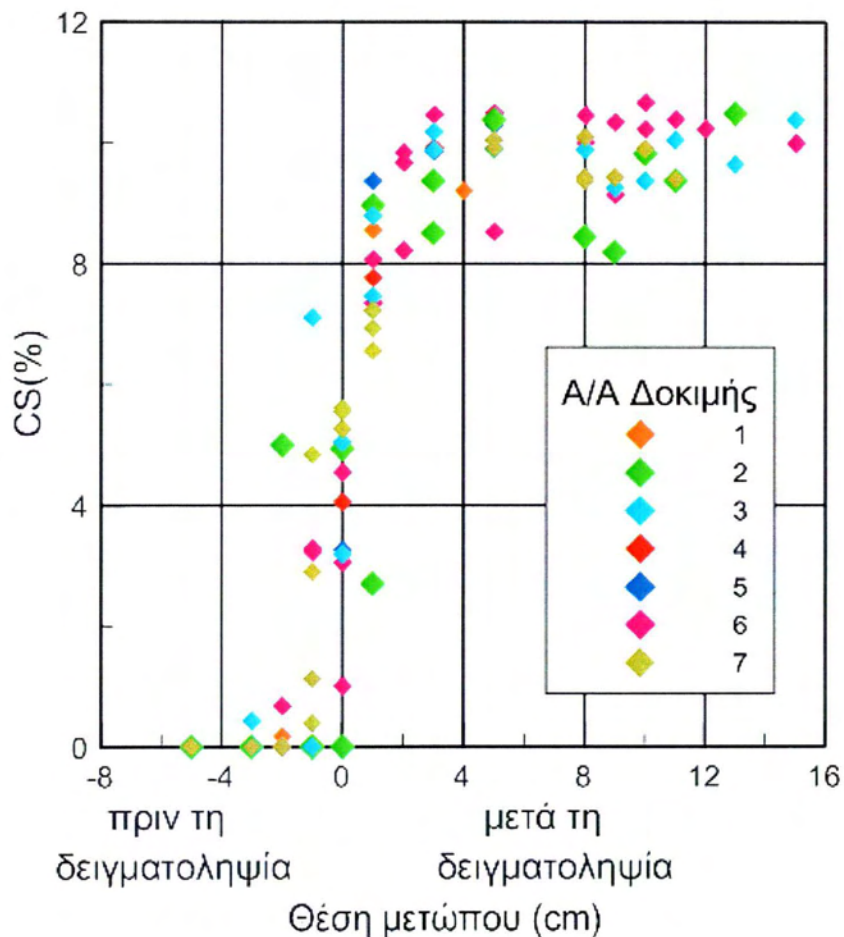
4.4 Ποσοστό Πυριτίας σε σχέση με το Μέτωπο

Στο Σχήμα 4.52 παρουσιάζονται μαζί οι μετρήσεις από τις δειγματοληψίες υγρού πόρων στις δοκιμές 4 και 5. Όπως προκύπτει, πριν φτάσει το μέτωπο (μετρήσεις σε αρνητικές τιμές θέσεις), το ποσοστό της πυριτίας μετράται να είναι μηδενικό. Αντίθετα, σε μετρήσεις που γίνονται ακριβώς στη θέση του μετώπου (μετρήσεις σε μηδενική τιμή θέσης), το ποσοστό της πυριτίας είναι 3.5 – 4%, το ποσοστό αυτό ανεβαίνει σε τιμές 8 – 9.5% σε απόσταση 1cm πίσω από το μέτωπο, ενώ σε αποστάσεις 2cm και μεγαλύτερες πίσω από το μέτωπο οι τιμές του CS που μετρώνται είναι πρακτικώς ίσες με 10% δηλαδή, την ονομαστική τιμή της πυριτίας CS_{nom} στις δοκιμές 4 και 5.



Σχήμα 4.52 Ποσοστό πυριτίας κατά βάρος CS(%) σε σχέση με την απόσταση του σημείου δειγματοληψίας από το μέτωπο (Δοκιμές 4 και 5)

Για να διασαφηνιστεί αν η συμπεριφορά αυτή είναι χαρακτηριστική για όλες τις δοκιμές εισπίεσης που εκτελέστηκαν, το Σχήμα 4.53 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων CS(%) και από τις επτά (7) δοκιμές εισπίεσης που παρουσιάζονται εδώ. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων CS(%) παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.53, ως συνάρτηση της θέσης της δειγματοληψίας συγκριτικά με το μέτωπο της πυριτίας (δηλαδή στη μορφή του Σχήματος 4.52). Τα ίδια συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το ποσοστό κατά βάρος της πυριτίας CS επαναλαμβάνονται στο Σχήμα 4.54, κανονικοποιημένα ως προς την ονομαστική τιμή της πυριτίας στο υγρό πόρων, δηλαδή εκείνη κατά την παρασκευή του διαλύματος της πυριτίας CS_{nom} .

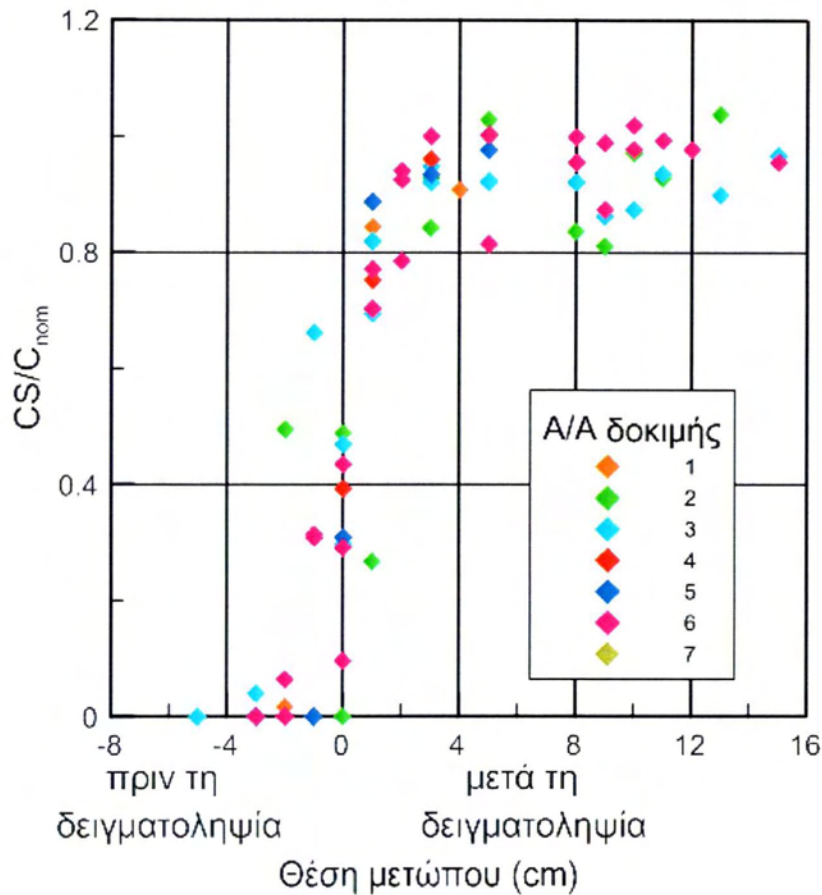


Σχήμα 4.53 Ποσοστό πυριτίας κατά βάρος CS(%) σε σχέση με την απόσταση του σημείου δειγματοληψίας από το μέτωπο (συγκεντρωτικά: δοκιμές 1 έως 7)

Με βάση τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων ποσοστού κατά βάρος πυριτίας CS από τις δειγματοληψίες προκύπτει:

- Η ύπαρξη μιας καμπύλης τύπου S στη σχέση θέσης δειγματοληψίας (συγκριτικά με το μέτωπο ανόδου) και ποσοστού κατά βάρος της πυριτίας στο υγρό των πόρων. Φυσικά, όσες περισσότερες δοκιμές εισπίεσης λαμβάνονται υπόψη, τόσο μεγαλώνει η διασπορά της καμπύλης S, χωρίς όμως να αλλάζει ποιοτικά η μορφή της. Ως διασπορά (λόγω ανομοιομορφίας του υγρού πόρων) αποδίδεται η ύπαρξη τιμών CS λίγο μεγαλύτερων της ονομαστικής $CS_{nom} = 10\%$ των δειγμάτων που προετοιμάστηκαν.
- Σε δειγματοληψίες πριν το μέτωπο ($< -2\text{cm}$) δεν προκύπτει ουσιώδες ποσοστό κατά βάρος της πυριτίας ($CS > 2\%$ ή 20% της ονομαστικού

ποσοστού CS = 10%), δηλαδή δε διαφαίνεται ουσιώδης ανάμιξη των δύο υγρών πριν την οπτική άφιξη της πυριτίας, ενώ το ποσοστό CS = 0% σε απόσταση 4cm πριν το μέτωπο.



Σχήμα 4.54. Κανονικοποιημένο ποσοστό πυριτίας κατά βάρος CS/CS_{nom} σε σχέση με την απόσταση του σημείου δειγματοληψίας από το μέτωπο (συγκεντρωτικά: δοκιμές 1 έως 7)

- Σε δειγματοληψίες μετά το μέτωπο ($\geq 2\text{cm}$) δεν προκύπτει ουσιώδης διαφορά στο ποσοστό κατά βάρος της πυριτίας σε σχέση με την ονομαστική τιμή του (διαφορά $< 20\%$ της ονομαστικού ποσοστού CS = 10%, ή τιμές CS $> 8\%$), αν και χρειάζεται απόσταση ίση με 10cm από το μέτωπο, ώστε το ποσοστό κατά βάρος της πυριτίας να έχει διαφορά μικρότερη από 10% της ονομαστικής τιμής ή τιμές CS $> 9\%$.

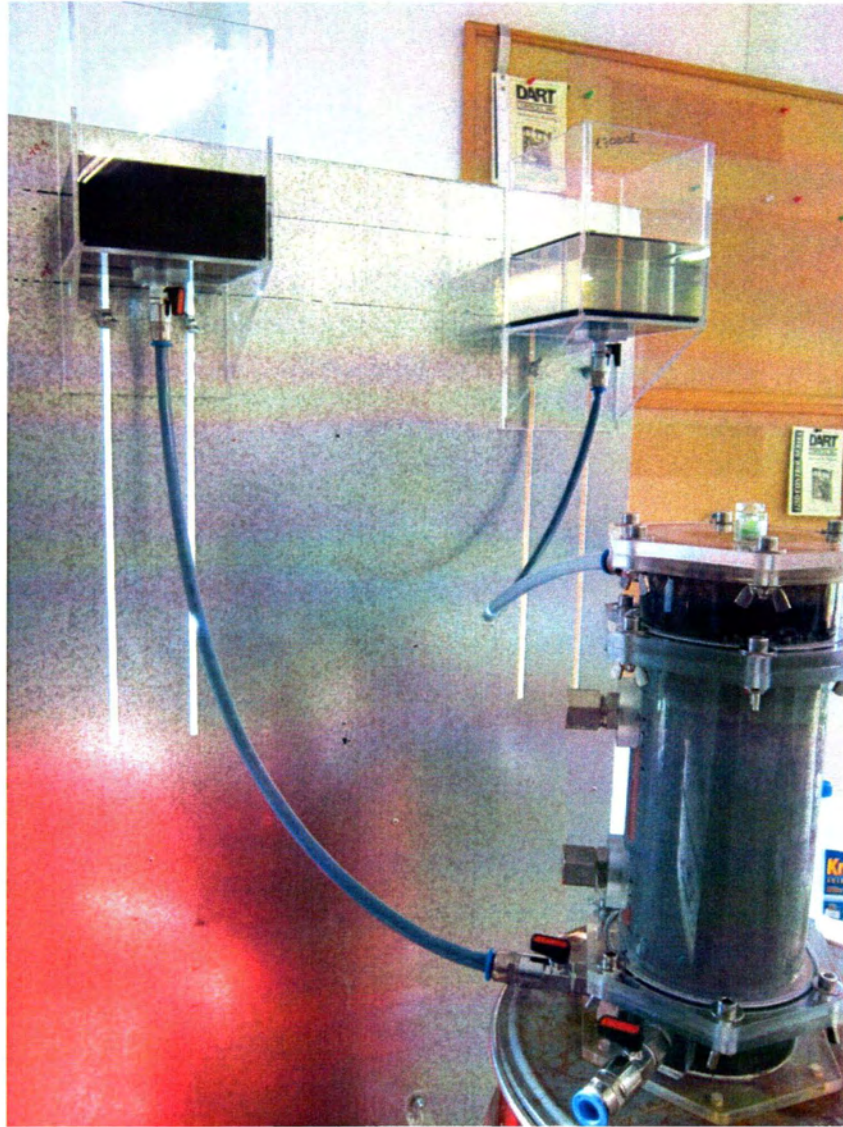
- Σε μια περιοχή πάχους 4cm (2cm πριν και μετά το μέτωπο), προκύπτει μια μεταβατική ζώνη στις τιμές ποσοστού κατά βάρος της πυριτίας, η οποία όμως έχει μέση τιμή $CS = 5\%$ (το μισό της ονομαστικής) ακριβώς στη θέση του μετώπου, με τις μικρότερες τιμές να βρίσκονται πριν το μέτωπο και τις μεγαλύτερες αμέσως μετά από αυτό.
- Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, η προς τα άνω κατακόρυφη 1Δ εισπίεση κολλοειδούς πυριτίας με μικρή υδραυλική κλίση ουσιαστικά προκαλεί εκτόπιση του προϋπάρχοντος νερού στους πόρους του εδάφους, με μια μικρού πάχους (4cm) μεταβατική ζώνη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αδρή Αναλυτική Προσομοίωση της προς τα άνω 1Δ Εισπίεσης Πυριτίας

5.1 Περιγραφή και παρουσίαση προσομοιώματος

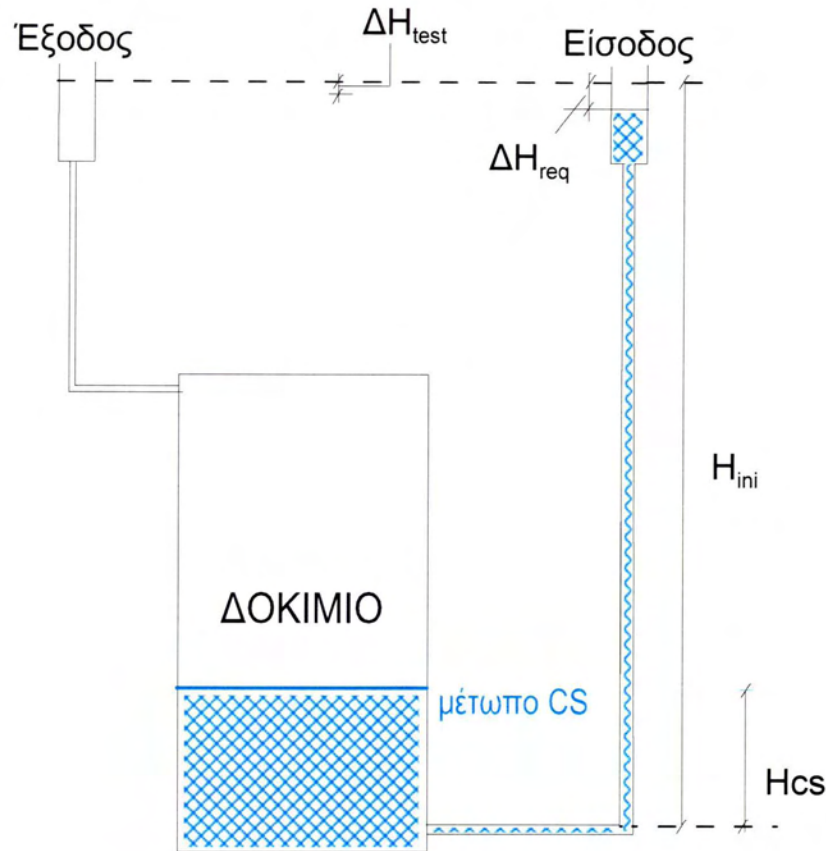
Όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 4, οι δοκιμές εισπίεσης πραγματοποιήθηκαν με δύο διαφορετικά υγρά στις δεξαμενές εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Τα υγρά αυτά, νερό στη δεξαμενή εισόδου και διάλυμα κολλοειδούς πυριτίας (CS) στην δεξαμενή εξόδου, παρουσιάζουν διαφορετικές πυκνότητες, καθώς το CS είναι βαρύτερο. Το γεγονός αυτό μπορεί να γίνει και οπτικά αντιληπτό από το **Σχήμα 5.1** στο οποίο φαίνεται στη δεξαμενή εξόδου ότι το μπλε διάλυμα CS ως βαρύτερο ($\rho=1.05-1.06\text{g/ml}$, έναντι 1.00g/ml του νερού) δεν αναμειγνύεται γρήγορα με το νερό αλλά παραμένει στο κάτω μέρος της δεξαμενής (συν τω χρόνω βέβαια, θα υπάρξει ανάμιξη λόγω διάχυσης των σωματιδίων της πυριτίας). Επιπλέον, το διάλυμα CS όπως έχει αναφερθεί αντιπροσωπεύεται από μια καμπύλη μεταβαλλόμενου ιξώδους με το χρόνο. Τα δύο αυτά δεδομένα με βάση την εξίσωση Bernoulli επηρεάζουν τα υδραυλικά φορτία κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα από τις δειγματοληψίες είναι σαφές ότι το διάλυμα CS εκτοπίζει το νερό που βρίσκεται στο δοκίμιο εφόσον όταν το μέτωπο ανόδου του υλικού περάσει τη δειγματοληψία το ποσοστό CS που έχει φτάσει ως τη δειγματοληψία είναι ίσο με αυτό της δεξαμενής εισόδου.

Με βάση όλα τα παραπάνω δεδομένα, είναι κατανοητό ότι η χρήση του νόμου του Darcy δεν είναι απλή και χρειάζεται να ληφθούν υπόψη όλες αυτές οι διαφοροποιήσεις συγκριτικά με τις παραδοχές Darcy (σταθερή διήθηση και ένα υγρό σταθερού ιξώδους).



Σχήμα 5.1. Κατάσταση κατά τη δοκιμή εισπίεσης, όπου η (μπλε) πυριτία έχει κατακλύσει το μικρό (20cm) δοκίμιο και έχει αρχίσει να εισέρχεται στη δεξαμενή εξόδου (βλέπε λεπτή μπλε στρώση από τον βαρύτερο σταθεροποιητή στον πυθμένα της δεξαμενής εξόδου, δοκιμή 2).

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να ληφθούν όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες υπόψη παρουσιάζεται παρακάτω. Για την ευκολότερη κατανόηση του προσομοιώματος παρουσιάζεται το Σχήμα 5.2 με όλους τους απαιτούμενους συμβολισμούς και όλα τα χρησιμοποιούμενα φυσικά μεγέθη.



Σχήμα 5.2. Σχηματική απεικόνιση φυσικών μεγεθών του προσομοιώματος.

Στις δεξαμενές εισόδου και εξόδου εισάγεται το διάλυμα CS με πυκνότητα ίση με $\rho=1.05-1.06$ g/ml και απιονισμένο νερό με πυκνότητα ίση με $\rho_w=1.00$ g/ml αντίστοιχα. Η διαφορά στις πυκνότητες των υγρών με βάση την εξίσωση Bernoulli οδηγεί σε μία διαφορά σταθμών κατά την ισορροπία των δύο υγρών που δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta H = (1 - \rho_w/\rho)H \quad (5.1)$$

με H την απόσταση του μετώπου του υλικού από την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής εισόδου.

Με τον τρόπο αυτό πριν από κάθε δοκιμή υπολογίζεται η διαφορά των ελεύθερων επιφανειών της δεξαμενής εισόδου και εξόδου κατά την ισορροπία με βάση την απόσταση του μετώπου του υλικού από την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής εισόδου κατά την εκκίνηση της δοκιμής (H_{ini}). Για την επίτευξη της επιθυμητής

υδραυλικής κλίσης αρκεί η προσθήκη επιπλέον διαλύματος CS για να ξεκινήσει η ροή.

Η εξίσωση 5.1 υποδεικνύει ότι κάθε φορά που θα αλλάζει το H , δηλαδή κάθε φορά που το μέτωπο CS θα αλλάζει θέση θα απαιτείται μια διαφορετική τιμή του ΔH προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία (ΔH_{req}) το οποίο προκύπτει ως:

$$\Delta H_{req} = (1 - \rho_w/\rho)(H_{ini} - H_{CS}) \quad (5.2)$$

με H_{CS} την απόσταση του μετώπου κάθε χρονική στιγμή από την αρχική θέση του μετώπου στην ισορροπία

Η διαφορά των σταθμών κατά τη διάρκεια της δοκιμής (ΔH_{test}) διατηρείται σταθερή και ίση με ΔH_{req} (στην ισορροπία) μειωμένη κατά 1cm για τα δοκίμια των 20cm και 2cm για τα δοκίμια των 40cm, τιμές οι οποίες δίνουν μια αρχική υδραυλική κλίση ίση με 0.05. Εξαιτίας της διαφοράς πυκνοτήτων των δυο υγρών και της εξάρτησης της θέσης ισορροπίας από τη θέση του μετώπου κατά τη διάρκεια της δοκιμής η διατήρηση σταθερού ΔH_{test} ανάμεσα στις δεξαμενές προκαλεί μια διαρκώς μειούμενη υδραυλική κλίση η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$i = \frac{\Delta H_{req} - \Delta H_{test}}{L} \quad (5.3)$$

Ο υπολογισμός της παροχής που εισέρχεται μέσα στο δοκίμιο υπολογίστηκε με δύο τρόπους. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$Q_{calc} = \frac{i \cdot A \cdot k}{\mu_{meas}}, \quad (5.4)$$

με A το εμβαδόν του δοκιμίου και k την διαπερατότητα που μετρήθηκε στην αρχή της διαδικασίας (με χρήση καθαρού νερού).

Επιπλέον έγινε μια προσπάθεια υπολογισμού της παροχής μέσω της φαινόμενης ταχύτητας του μετώπου μέσα στο δοκίμιο. Η μετρούμενη ταχύτητα ανόδου του μετώπου (V_{meas}) της CS προκύπτει απλά από την διαίρεση της απόστασης που έχει διανύσει το μέτωπο (οπτική παρατήρηση) δια του χρόνου που απαιτήθηκε για την μετατόπιση αυτή. Η ταχύτητα αυτή αποτελεί την ταχύτητα διήθησης της πυριτίας, η

οποία πολλαπλασιαζόμενη με την τιμή του πορώδους (n) του εδάφους δίνει τη φαινόμενη ταχύτητα της πυριτίας μέσα στο δοκίμιο. Με τη σειρά της, η ταχύτητα διήθησης πολλαπλασιαζόμενη με την επιφάνεια A του δοκιμίου δίνει μια ακόμη εκτίμηση της παροχής Q_{vel} :

$$Q_{vel} = V_{meas}nA \quad (5.5)$$

Συνεπώς, από τη σύγκριση της χρονικής μεταβολής των τριών (3) τιμών παροχών, της μετρούμενης Q_{meas} και των δύο εκτιμώμενων Q_{calc} και Q_{vel} προκύπτει μια εκτίμηση της ορθότητας του αδρού προσομοιώματος της μονο-διάστατης εισπίεσης που παρουσιάστηκε ανωτέρω.

Ένας άλλος τρόπος εκτίμησης της ορθότητας του αδρού προσομοιώματος της μονο-διάστατης εισπίεσης που παρουσιάστηκε ανωτέρω είναι η σύγκριση εκτιμήσεων – μετρήσεων να γίνει επί τη βάση της χρονικής μεταβολής τριών (3) τιμών του ιξώδους της πυριτίας, και συγκεκριμένα της μετρούμενης (σε περιστροφικό ιξωδόμετρο) μ_{meas} και δύο εκτιμώμενων τιμών ιξώδους:

$$\mu_{calc} = \frac{iAk}{Q_{meas}} \quad (5.6)$$

$$\mu_{vel} = \frac{iAk}{Q_{vel}} \quad (5.7)$$

δηλαδή με βάση τις μετρήσεις παροχών Q_{meas} και Q_{vel} αντίστοιχα.

Η σύγκριση των τριών τιμών παροχών ή/και των τριών τιμών ιξώδους υποδεικνύει την ορθότητα ή μη του αδρού αναλυτικού προσομοιώματος μονο-διάστατης εισπίεσης, και δίνει κατευθυντήριες γραμμές για το ποιες μετρήσεις επιτόπου είναι πιο αξιόπιστες για την ποιότητα εφαρμογής της εισπίεσης σε πρακτικές εφαρμογές.

5.2 Έλεγχος ακρίβειας Προσομοιώματος της προς τα άνω 1Δ εισπίεσης πυριτίας με βάση τις δοκιμές εισπίεσης

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν ενδεικτικά τα αποτελέσματα δύο δοκιμών μικρών δοκιμών (20 cm) και μίας δοκιμής μεσαίου δοκιμίου (40 cm) αμμώδους υλικού.

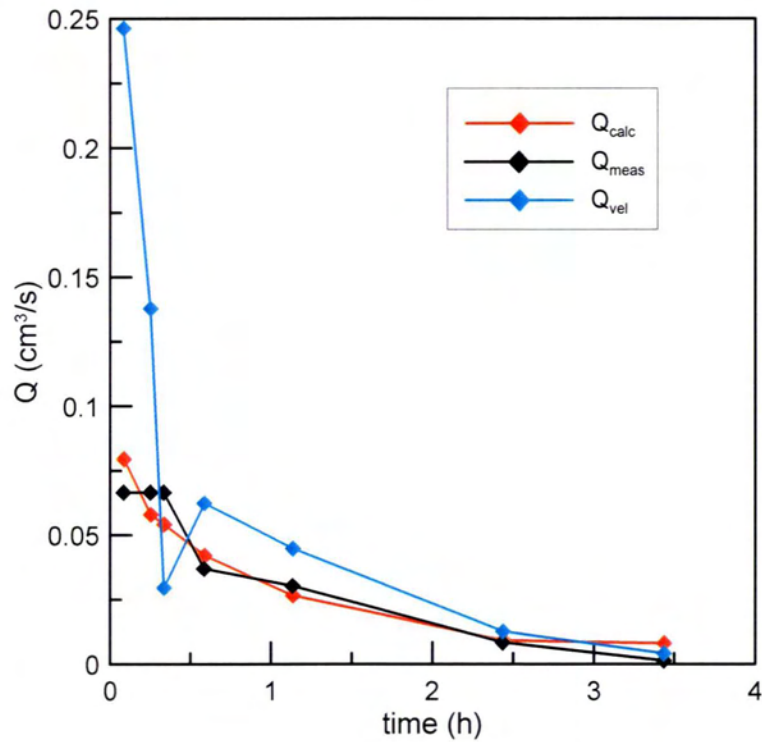
Σε κάθε μία από αυτές τις δοκιμές συγκρίθηκαν οι παροχές που μετρήθηκαν επιτόπου με τις παροχές οι οποίες υπολογίστηκαν με τον τρόπο που αναλυτικά επεξηγήθηκε παραπάνω. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε σύγκριση της εξέλιξης του ιξώδους με το χρόνο που μετρήθηκε με το ιξωδόμετρο και του ιξώδους που υπολογίστηκε από το αναλυτικό προσομοίωμα. Οι δοκιμές είναι οι 4,5,6 με βάση τον αύξοντα αριθμό τους και τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον **Πίνακα 5.1**.

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών και δοκιμών.

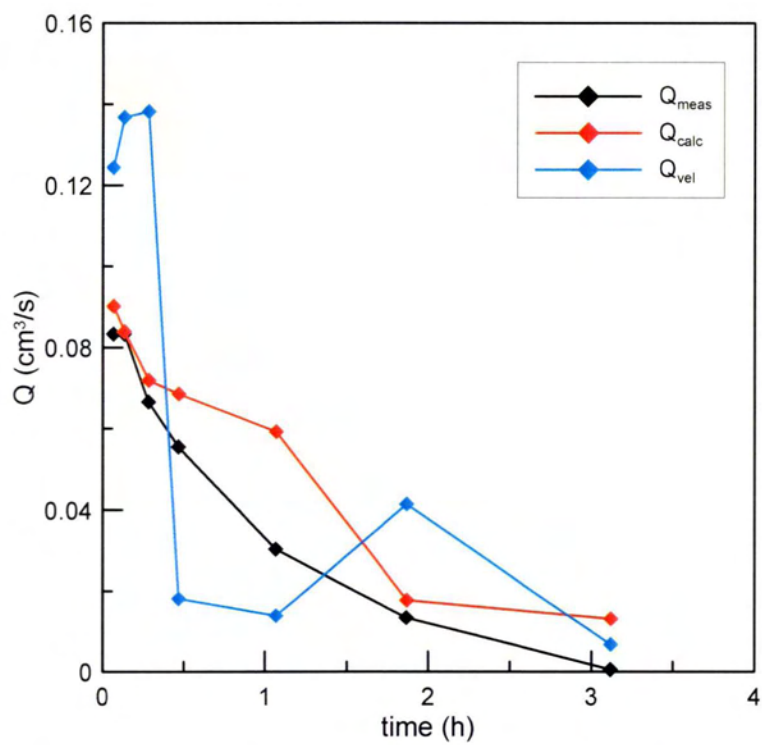
A/A δοκιμής	Ύψος δοκιμίου (cm)	Δείκτης πόρων (e)	Διαπερατότητα (k, m/s)
4	20	0.603	$2.84 \cdot 10^{-4}$
5	20	0.613	$3.17 \cdot 10^{-4}$
6	40	0.622	$3.40 \cdot 10^{-4}$

Οι δοκιμές αυτές επιλέχθηκαν επειδή ο εξοπλισμός τροποποιήθηκε με την εισαγωγή δεξαμενών μικρότερης διαμέτρου και ήταν πιο ακριβής η μέτρηση των παροχών (συγκριτικά με τις δοκιμές 1 έως 3, βλ. Κεφ. 4).

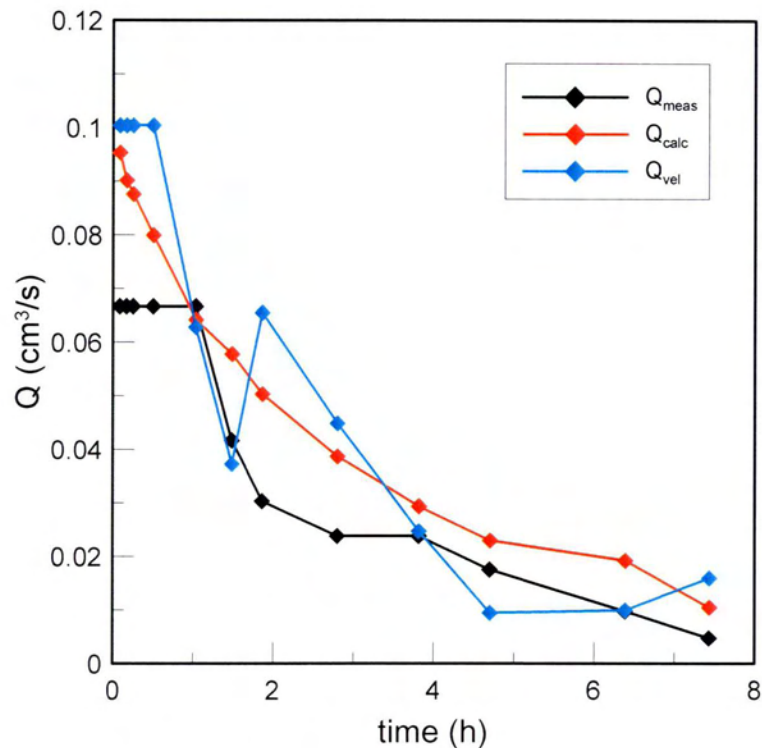
Στα Σχήματα 5.3, 5.4 και 5.5 φαίνεται η εξέλιξη των μετρούμενων και εκτιμώμενων παροχών με το χρόνο για τις δοκιμές 4, 5 και 6 αντίστοιχα, ενώ στα Σχήματα 5.6, 5.7 και 5.8 φαίνεται η εξέλιξη του ιξώδους με το χρόνο.



Σχήμα 5.3. Σύγκριση εξέλιξης μετρούμενων και εκτιμώμενων παροχών με το χρόνο στη Δοκιμή 4



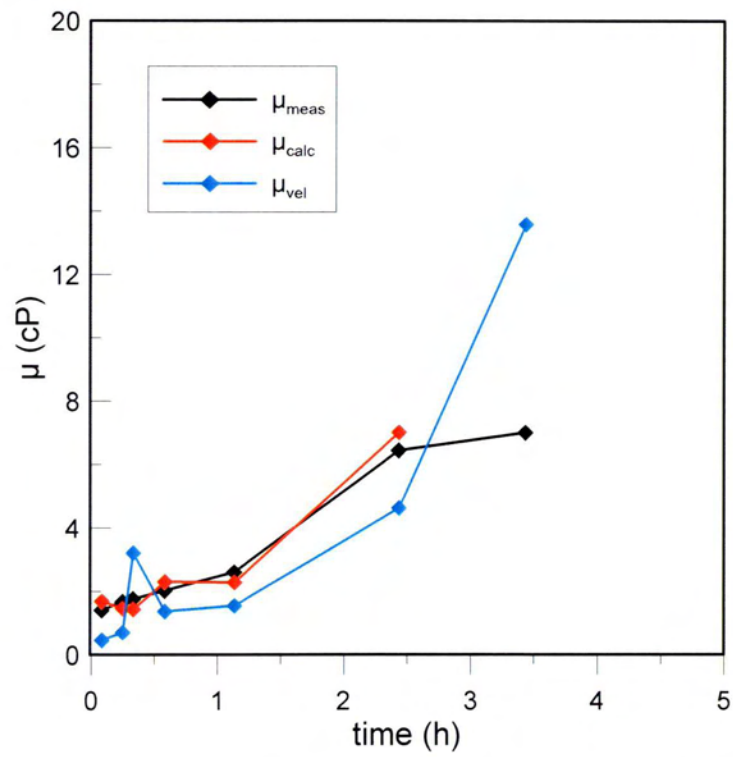
Σχήμα 5.4. Σύγκριση εξέλιξης μετρούμενων και εκτιμώμενων παροχών με το χρόνο στη Δοκιμή 5.



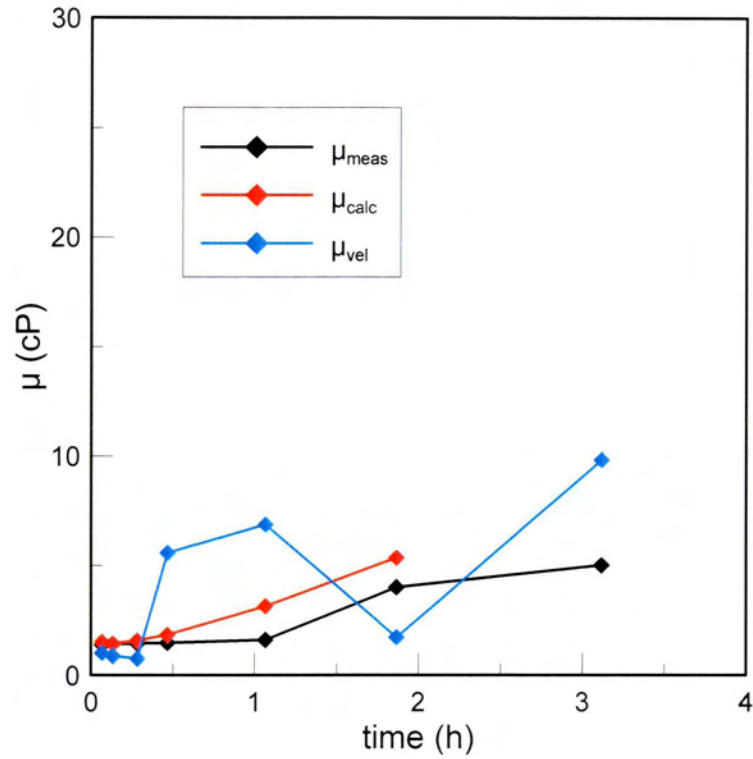
Σχήμα 5.5. Σύγκριση εξέλιξης μετρούμενων και εκτιμώμενων παροχών με το χρόνο για τη Δοκιμή 6.

Στη Δοκιμή 4, πριν ξεκινήσουν οι μετρήσεις της παροχής το σύστημα CS – νερό αφέθηκε να ισορροπήσει για να επαληθευτεί το ΔH_{req} για ισορροπία που προτείνεται για όλο το προσομοίωμα. Για το λόγο αυτό, δεν υπάρχουν μετρήσεις παροχών στο πρώτο χρονικό διάστημα εφόσον δεν είχε αποκατασταθεί σταθερή υδραυλική κλίση.

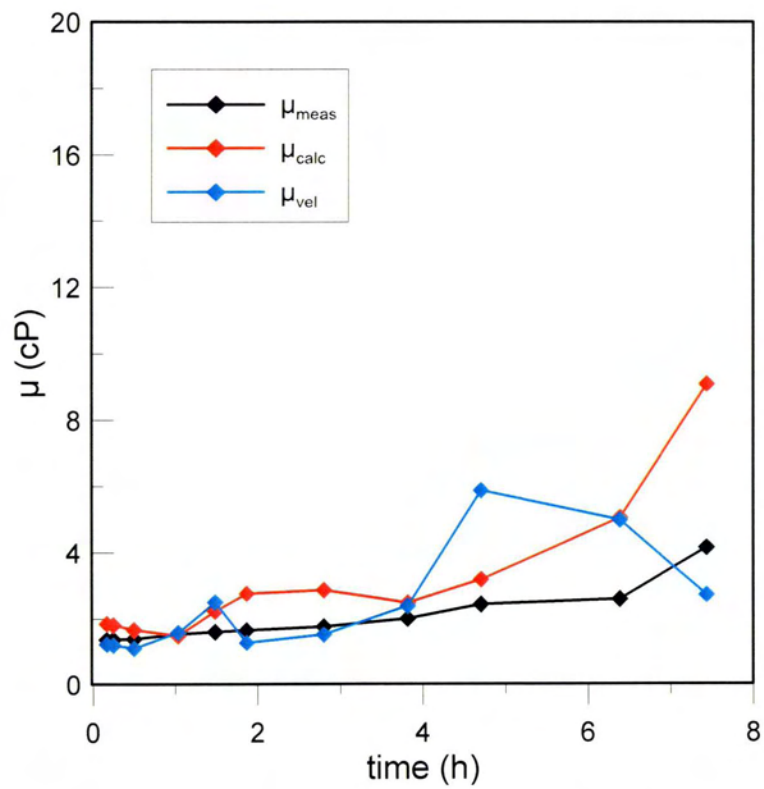
Από τα **Σχήματα 5.3** έως **5.5** προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος, οι τιμές των πραγματικών μετρούμενων παροχών μειώνονται. Παρατηρώντας πιο προσεκτικά την συμπεριφορά αυτή, ο ρυθμός με τον οποίο μειώνονται οι τιμές αυτές μοιάζει να ακολουθεί εκθετική μορφή. Την συμπεριφορά αυτή μπορεί να την αποδώσει σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό τόσο το απλό προσομοίωμα που χρησιμοποιεί τη σχέση (5.4), όσο και ο εναλλακτικός τρόπος ο οποίος χρησιμοποιεί την ταχύτητα ανόδου του μετώπου ως βάση της εκτίμησης των παροχών.



Σχήμα 5.6. Σύγκριση εξέλιξης μετρούμενων και εκτιμώμενων τιμών ιξώδους με το χρόνο στη Δοκιμή 4.



Σχήμα 5.7. Σύγκριση εξέλιξης μετρούμενων και εκτιμώμενων τιμών ιξώδους με το χρόνο για τη Δοκιμή 5.



Σχήμα 5.8. Σύγκριση εξέλιξης μετρούμενων και εκτιμώμενων τιμών ιξώδους με το χρόνο για τη Δοκιμή 6.

Από τα Σχήματα 5.6 έως 5.8 προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος, οι τιμές των πραγματικών μετρούμενων ιξωδών αυξάνονται. Τα ιξώδη (μ_{calc}) που υπολογίζονται μέσω της σχέσης (5.6) ανταποκρίνονται περισσότερο στις πραγματικά μετρούμενες τιμές ιξώδους (μ_{meas}), ενώ μπορεί να είναι και πιο συντηρητικά. Αντίθετα τα ιξώδη (μ_{vel}) που υπολογίζονται μέσω της σχέσης (5-7) στην οποία εμπεριέχεται η ταχύτητα από την οπτική παρατήρηση του μετώπου δεν είναι ακριβή, καθώς όπως απεικονίζεται και στα σχήματα επιδέχονται ακόμη και μειώσεις. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η μέτρηση της θέσης του μετώπου γίνεται οπτικά, δηλαδή με μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με τη μέτρηση του ιξώδους σε περιστροφικό ιξωδόμετρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

Με βάση την πειραματική και αναλυτική εργασία που παρουσιάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα σχετικά με την εισπιεσιμότητα κολλοειδούς πυριτίας:

- Η κατακόρυφη προς τα άνω 1Δ εισπίεση πυριτίας καθορίζεται από τη μείωση της υδραυλικής κλίσης της ροής (λόγω μεγαλύτερου βάρους της πυριτίας συγκριτικά με εκείνο του νερού) και την αύξηση του ιξώδους της πυριτίας με το χρόνο (λόγω δημιουργίας δεσμών σιλοξάνης μεταξύ των μορίων του πυριτίου). Το πρώτο επιβεβαιώθηκε από δοκιμή εισπίεσης πυριτίας με σταθερό ιξώδες, ενώ το δεύτερο από πολλαπλές δοκιμές εισπίεσης (σε διάφορα μήκη δοκιμίων).
- Πέραν της (αρχικής) υδραυλικής κλίσης, είναι ο έλεγχος του χρόνου γέλης της πυριτίας (μέσω ελέγχου του pH και της ιοντικής ισχύος) που πρακτικώς καθορίζουν την απόσταση που μπορεί να εισπιαστεί η πυριτία μέσω στο έδαφος. Τιμές ιξώδους πυριτίας μεγαλύτερες από 3.6cP (και σίγουρα μικρότερες από 6.0cP) οδηγούν πρακτικώς σε μηδενισμό της εισπίεσης σε αμμώδη εδάφη, ανεξαρτήτως της ύπαρξης μη-μηδενικής υδραυλικής κλίσης.
- Σε κάθε περίπτωση, στην κατακόρυφη προς τα άνω 1Δ εισπίεση πυριτίας, η παροχή της πυριτίας είναι μια φθίνουσα (αντίστροφα εκθετική) συνάρτηση του χρόνου. Η αρχική τιμή της παροχής πρακτικώς ελέγχεται από την αρχική υδραυλική κλίση, καθώς η αρχική τιμή του ιξώδους της πυριτίας είναι πρακτικώς συνάρτηση κυρίως του ποσοστού κατά βάρος CS(%) της πυριτίας που εισπιέζεται (με μικρή διασπορά).
- Από τις δειγματοληψίες υγρού πόρων προκύπτει ότι ο χρωματισμός της κολλοειδούς πυριτίας (με χρώμα ζαχαροπλαστικής) λειτουργεί ικανοποιητικά ως δείκτης ύπαρξης πυριτίας στο υγρό πόρων εντός του εδάφους.
- Η προς τα άνω κατακόρυφη 1Δ εισπίεση κολλοειδούς πυριτίας με μικρή υδραυλική κλίση ουσιαστικά προκαλεί εκτόπιση του προϋπάρχοντος νερού

στους πόρους της άμμου, με μια μικρού πάχους (4cm) μεταβατική ζώνη, όπου το ποσοστό κατά βάρος της πυριτίας CS(%) κυμαίνεται από 0% (καθαρό νερό) έως το ονομαστικό ποσοστό της πυριτίας CS_{nom} (=10% στις δοκιμές της εργασίας αυτής). Η επιτυχής χρήση χρωματισμού της πυριτίας επιτρέπει την χωροθέτηση αυτής της μεταβατικής ζώνης συγκριτικά με το μέτωπο ανόδου της πυριτίας, 2cm εντός του εδάφους με καθαρό νερό και 2cm εντός του εδάφους με πυριτία.

- Η αδρή αναλυτική προσομοίωση της εισπίεσης πυριτίας που προτείνεται κάνει χρήση μιας γενικευμένης μορφής του νόμου Darcy, λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση της περατότητας λόγω αύξησης του ιξώδους του υγρού πόρων (μετράται ανεξάρτητα) και τη μείωση της υδραυλικής κλίσης λόγω διαφοράς στην πυκνότητα της εισπιεζόμενης πυριτίας συγκριτικά με το εκτοπιζόμενο νερό (εκτιμάται ανεξάρτητα). Η καλή σύγκριση εκτιμήσεων – μετρήσεων για την παροχή της εισπιεζόμενης πυριτίας υποδεικνύει ότι ο νόμος Darcy μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επαρκή ακρίβεια για την εκτίμηση της εισπιεσιμότητας πυριτίας, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία.
- Η εκτίμηση παροχών με την παρακολούθηση της ταχύτητας ανόδου του μετώπου της πυριτίας μέσα στο έδαφος δίνει αδρή μόνο εκτίμηση της παροχής (ορθή κατά μέση τιμή, αλλά με διακυμάνσεις). Οι διακυμάνσεις δεν οφείλονται σε ελλιπές θεωρητικό υπόβαθρο της αναλυτικής προσέγγισης, αλλά επειδή οι σχετικοί υπολογισμοί βασίζονται στην οπτική παρατήρηση και όχι σε επακριβή ή ενόργανη μέτρηση

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Bolisetti, T., Reitsma, S. & Balachandar, R. (2009). 'Experimental investigations of colloidal silica grouting in porous media'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 5, 697-700.
- Conlee, C. T. (2010). 'Dynamic properties of colloidal silica soils using centrifuge model tests and a full-scale filed test'. *PhD dissertation*, Faculty of Drexel University, Philadelphia.
- DeJong J. T., Fritzges M. B., Nusslein K. (2006), "Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11): 1381-1392.
- Díaz-Rodríguez, J. A., Antonio-Izarraras, V. M., Bandini, P. & López-Molina, J. A. (2008). 'Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout'. *Can. Geotech. Journal*, 45, 1345-1355.
- DuPont. (1997). Ludox Colloidal Silica: Properties, Uses, Storage, and Handling. *product information*.
- El Mohtar C. S. (2008), "Pore fluid engineering: An autoadaptive design for liquefaction mitigation", PhD Thesis, Purdue University
- El Mohtar, C. S., Santagata, M., Bobet, A., Drnevich, V. P. & Johnston, C. (2008b). 'Effect of plastic fines on the small strain stiffness of sand'. Proceedings, 4th Intern. Symposium on deformational characteristics of geomaterials (IS-Atlanta), September 22-24.
- Gallagher, P. M. (2000). 'Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk'. *Ph.D. dissertation*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Gallagher, P. M., Conlee, S. T. & Rollins, K. M. (2007). "Full-Scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 2, 186–196.
- Gallagher P.M. and Koch, A. J. (2004). "Model testing of passive site stabilization: A new grouting technique." Grouting and Ground Treatment: Proc., 3rd Int. Conf., ASCE, Reston, Va., 1478-1489.
- Gallagher P.M. and Lin Y. (2005), "Column testing to determine colloidal silica transport mechanisms", *Geotechnical Special Publication*, (130-142), pp. 1821-1830.

- Gallagher, P. M. and Lin Y. (2009). "Colloidal Silica Transport through Liquefiable Porous Media." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(11), 1702–1712.
- Gallagher, P. M. & Mitchell, J. K. (2002). 'Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand'. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 9–12, 1017–1026.
- Gallagher, P. M., Pamuk, A., Abdoun, T. (2007b), "Stabilization of Liquefiable Soils Using Colloidal Silica Grout", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 19, No. 1, pp. 33-40, January.
- Gallagher, P. M., Pamuk, A., Koch, A. J. and Abdoun, T. H (2002). "Centrifuge Modeling of Passive Site Remediation". *Proc., 7th United States National Conf. on Earthquake Engineering (7NCEEE): Urban Earthquake Risk, Earthquake Engineering Research Institute, Oak-land, Calif*
- Gratchev, I. B., Sassa, K., Osipov, V. I., Fukuoka, H. & Wang, G. (2007). 'Undrained cyclic behavior of bentonite-sand mixtures and factors affecting it'. *Geotech. Geol. Eng.*, 25: 349-367.
- Hunt, J., Ezzedine, S., Bourcier, W., Roberts, S. & Roberts, J. (2012). 'Silica gel behavior under different EGS chemical and thermal conditions: an experimental study'. *Proceedings of the 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California, SGP-TR-194.
- Koch, A. J. (2002), "Model Testing of Passive Site Stabilization." Ph.D. dissertation, Drexel University
- Kodaka, T., Ohno, Y. & Takyu, T. (2005). 'Cyclic shear characteristics of treated sand with colloidal silica grout'. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Conf. 16, Vol. 2, 401-404.
- Kodaka, T., Oka, F., Ohno, Y., Takyu, T. & Yamasaki, N. (2005). 'Modeling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand'. *Geomechanics, Testing, Modeling and Simulation, Geotechnical Special Publication No. 143*, ASCE, 205-216.
- Lin, Y. (2006). 'Colloidal silica transport mechanisms for passive site stabilization of liquefied soils'. *PhD dissertation*, Faculty of Drexel University, Philadelphia.
- Mollamahmutoglu, M. & Yilmaz, Y. (2010). 'Pre- and post-cyclic loading strength of silicagROUTED sand'. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering* 163, Issue GE6, 343-348.

Pamuk, A., Gallagher, P. M., and Zimmie, T. (2007). 'Remediation of piled foundations against lateral spreading by passive site stabilization technique'. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 864-874

Papadimitriou A. G., Agapoulaki G. I. (2013), "Mechanical response and simulation of sands stabilized with colloidal silica against seismic liquefaction", Proceedings, International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering: From Case History to Practice in Honor of Prof. K. Ishihara, Istanbul, Turkey, 17-19 June.

Papadimitriou A. G., Agapoulaki G. I.(2013) "Passive stabilization: a novel technique for seismic liquefaction mitigation at foundation soil of existing structures"

Papadopoulou, A. I. (2008). 'Laboratory investigation into the behaviour of silty sands under monotonic and cyclic loading'. *PhD dissertation*, Civil Engineering Department, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.

Papadopoulou, A. I. & Tika, Th. (2008). 'The effect of fines on critical state and liquefaction characteristics of silty sands'. *Soils and Foundations*, Vol. 48, No. 5, 713-725.

Silco International;. (2005). Colloidal Silica Technical Information.

Spencer, L. M., Rix, G. J. & Gallagher, P. (2008), 'Colloidal silica gel and sand mixture dynamic properties'. *Proceedings, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* (GSP 181), Sacramento, CA.

Towhata, I. (2007). 'Developments of soil improvement technologies for mitigation of liquefaction risk'. *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering - Invited Lectures*, 355-383, Springer.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000121261

