



ΠΡΑΞΗ:

**«ΘΑΛΗΣ- Π.Θ.: ΑΠΟΤΡΟΠΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΕΔΑΦΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΜΕΣΩ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΠΟΡΩΝ ΜΕ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΣ ΑΣΦΑΛΗ ΝΑΝΟ-ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ»
MIS 375618**

Επιστημονικός Υπεύθυνος:

Επικ. Καθ. Αχ. ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

ΔΡΑΣΗ 2

*Προκαταρκτικές εργαστηριακές δοκιμές: ρεολογία,
διαπερατότητα, διηθησιμότητα, ανεμπόδιστη θλίψη*

ΠΑΡΑΔΟΤΕΑ:

Τεχνική Έκθεση Πεπραγμένων (Π2)

Ιούνιος 2014



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα

	Περιεχόμενα	1
	Κατάλογος συμβόλων	3
1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
2.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ	7
2.1	Χημικά χαρακτηριστικά	7
2.2	Ρεολογικά χαρακτηριστικά	10
2.3	Μηχανικά χαρακτηριστικά	29
3.	ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	31
3.1	Διαδικασία δοκιμής διαπερατότητας	32
3.2	Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας	33
4.	ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΣΕ ΕΔΑΦΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ	37
4.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης και είδους δοκιμών	37
4.2	Λεπτομέρειες πειραμάτων εισπίεσης πυριτίας	45
4.3	Αδρή αναλυτική προσομοίωση προς τα άνω 1Δ εισπίεσης πυριτίας	53
4.4	Πειραματικός έλεγχος ακρίβειας προσομοιώματος της προς τα άνω 1Δ εισπίεσης πυριτίας	58

4.5	Συμπεράσματα	63
5.	ΑΝΤΟΧΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	64
5.1	Διαδικασία δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης	64
5.2	Διαδικασία προετοιμασίας δοκιμών	64
5.3	Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης	65
6.	ΣΧΕΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΥΡΙΤΙΑΣ	72
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	82

Κατάλογος συμβόλων

CS	Κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου ή απλούστερα κολλοειδής πυριτία (colloidal silica)
CS (%)	ποσοστό πυριτίας κατά βάρος στο διάλυμα
C_u (kPa)	αστράγγιστη διατμητική αντοχή
D_r (%)	σχετική πυκνότητα
e	δείκτης πόρων
e_{max}	μέγιστος δείκτης πόρων
e_{min}	ελάχιστος δείκτης πόρων
f_c (%)	ποσοστό λεπτοκόκκων
G_s	αδιάστατο ειδικό βάρος στερεών κόκκων
k (m/s)	διαπερατότητα (m/s)
PI (%)	δείκτης πλαστικότητας
pH_{opt}	τιμή του pH του διαλύματος, στο οποίο προκύπτει ο ελάχιστος χρόνος γέλης t_{gmin}
t_{gmin}	ελάχιστος χρόνος γέλης του διαλύματος, που επιτυγχάνεται για τιμή του $pH = pH_{opt}$
q (kPa)	εκτροπική (αποκλίνουσα) τάση
γ (kN/m ³)	ειδικό βάρος εδάφους
γ_d (kN/m ³)	ξηρό ειδικό βάρος εδάφους
ϵ_a (%)	αξονική παραμόρφωση
μ (cP)	ιξώδες υγρού πόρων
N	κανονικότητα (normality) διαλύματος
ρ_d (Mg/m ³)	ξηρή πυκνότητα εδάφους
σ_0 (kPa)	ολική τάση
τ (kPa)	διατμητική τάση
A	Εμβαδόν διατομής δοκιμίου
CS _{nom}	Συγκέντρωση (%) κ.β. κολλοειδούς πυριτίας στο αρχικό διάλυμα
G_s	Ειδική βαρύτητα (specific gravity)
H_{cs}	Διαφορά στάθμης μετώπου κολλοειδούς πυριτίας κατά την εισπίεση συγκριτικά με την αρχική στάθμη

H_{ini}	Αρχική διαφορά στάθμης μεταξύ μετώπου CS και δεξαμενής εισόδου
i	Υδραυλική κλίση
L	Μήκος δοκιμίου εισπίεσης
N	Κανονικότητα
n	Πορώδες εδάφους
Q_{calc}	Εκτιμώμενη παροχή πυριτίας με βάση νόμο Darcy
Q_{meas}	Μετρούμενη παροχή πυριτίας
Q_{vel}	Υπολογιζόμενη παροχή πυριτίας μέσω της ταχύτητας ανόδου του μετώπου κατά την εισπίεση
S_r (%)	Βαθός κορεσμού (%) εδάφους
V_{meas}	Ταχύτητα ανόδου του μετώπου πυριτίας εντός εδαφικών δοκιμών
w (%)	Ποσοστό υγρασίας εδάφους
ΔH_{req}	Απαιτούμενη διαφορά στάθμης για ισορροπία στηλών νερού και πυριτίας
ΔH_{test}	Επιβαλλόμενη διαφορά σταθμών στις δεξαμενές εισόδου πυριτίας και εξόδου νερού κατά τη δοκιμή
μ_{calc}	Εκτιμώμενη τιμή ιξώδους πυριτίας με βάση νόμο Darcy
μ_{meas}	Μετρούμενη τιμή ιξώδους πυριτίας (σε ιξωδόμετρο)
μ_{vel}	Υπολογιζόμενη τιμή ιξώδους πυριτίας μέσω της ταχύτητας ανόδου του μετώπου κατά την εισπίεση
ρ	Πυκνότητα πυριτίας
ρ_w	Πυκνότητα νερού

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί το **Παραδοτέο 2** του Ερευνητικού Προγράμματος:

**ΘΑΛΗΣ - ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ - «Αποτροπή σεισμικής
ρευστοποίησης εδάφους θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών μέσω
εμπλουτισμού του υγρού πόρων με περιβαλλοντικώς ασφαλή νάνο-
σωματίδια»**

Το εν λόγω Ερευνητικό Πρόγραμμα έχει κωδικό **MIS 375618**, και εκπονείται υπό το συντονισμό του Επίκουρου Καθηγητή **Αχιλλέα Παπαδημητρίου** (Επιστημονικός Υπεύθυνος).

Πιο συγκεκριμένα, το εν λόγω Παραδοτέο σχετίζεται με τη **Δράση 2** του Προγράμματος, η οποία έχει τίτλο **Προκαταρκτικές εργαστηριακές δοκιμές: ρεολογία, διαπερατότητα, διηθησιμότητα, ανεμπόδιστη θλίψη**. Όπως προκύπτει από τον τίτλο της, και όπως αναφέρεται στην εγκεκριμένη απόφαση εκτέλεσης με ίδια μέσα, η Δράση 2 *«αποτελείται από μια σειρά προκαταρκτικών εργαστηριακών δοκιμών, διαφορετικής φύσης και στόχων»*.

Με βάση την ίδια απόφαση, το **Παραδοτέο 2** συνίσταται από μία *«Τεχνική Έκθεση για: (α) διαδικασίες εργαστηριακών δοκιμών και τα δεδομένα για: i) χημικές, ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες του εμπλουτισμένου υγρού πόρων, ii) διαπερατότητα των μη-σταθεροποιημένων και των σταθεροποιημένων εδαφών, iii) διήθηση του σταθεροποιητή σε 2 εδάφη (άμμος, ιλυώδης άμμος), iv) αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη των 2 σταθεροποιημένων εδαφών, (b) συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και του ποσοστού κατά βάρος του σταθεροποιητή (ή/και του pH) για τα 2 εδάφη»*.

Έτσι, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα (χημικά, ρεολογικά και μηχανικά) χαρακτηριστικά του εμπλουτισμένου υγρού πόρων (κολλοειδούς πυριτίας), ενώ στο Κεφάλαιο 3 η έμφαση δίνεται στη διαπερατότητα φυσικών και σταθεροποιημένων εδαφών. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι δοκιμές διηθησιμότητας της κολλοειδούς πυριτίας σε εδαφικά δοκίμια, ενώ το Κεφάλαιο 5 επικεντρώνεται σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σταθεροποιημένων εδαφών. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται μια συσχέτιση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με το ποσοστό κατά βάρος της πυριτίας, ως μία από τις διαδικασίες ελέγχου ποιότητας της παθητικής σταθεροποίησης, στην πράξη.

Τα εργαστηριακά αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ προέκυψαν από δοκιμές που εκτελέστηκαν στα κάτωθι εργαστήρια μέλων ΚΕΟ:

- Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής (ΕΓΜ) του Π.Θ.
- Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής (ΕΕΘΓΣΜ) του Α.Π.Θ.
- Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής (ΕΓΜ) του Παν. Πατρών (Π.Π.)
- Εργαστήριο Εδαφομηχανικής (ΕΕ) του Ε.Μ.Π.

Οι ερευνητικές δραστηριότητες της Δράσης 2, και η καταγραφή τους στο Παραδοτέο 2, εκτελέσθηκαν με την πολύτιμη συνδρομή των κάτωθι:

Μέλη ΚΕΟ

- **Θεοδώρα Τίκα**, Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- **Γεώργιος Αθανασόπουλος**, Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Π.
- **Βασιλική Γεωργιάννου**, Καθηγήτρια, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- **Δημήτριος Αχιλιάς**, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Χημείας, Α.Π.Θ.
- **Αχιλλέας Παπαδημητρίου**, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Π.Θ.

Μέλη ΟΕΣ

- **Αντιγόνη Βράννα**, Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ Α.Π.Θ.
- **Γεωργία Αγαπουλάκη**, Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ Π.Θ.
- **Γεώργιος Κονίνης**, Πολιτικός Μηχανικός, Συνεργάτης Α.Π.Θ.
- **Παναγιώτης Τριαντάφυλλος**, Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.
- **Μαρία Κωνσταντίνου**, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Συνεργάτης Ε.Μ.Π.
- **Ιωάννης Πανταζόπουλος**, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Συνεργάτης Π.Π.
- **Αναστάσιος Μπατίλας**, Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ Π.Π.

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο – ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: **ΘΑΛΗΣ**. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ

Σύμφωνα με το Παραδοτέο 1 του προγράμματος, ως σταθεροποιητής για τον εμπλουτισμό του υγρού πόρων ρευστοποιήσιμου εδάφους επιλέχθηκε το κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου ή κολλοειδής πυριτία (colloidal silica) με εμπορικό όνομα Ludox®-SM. Στο κεφάλαιο του παρόντος Παραδοτέου 2 παρουσιάζονται τα χημικά, ρεολογικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της εν λόγω κολλοειδούς πυριτίας, στις παραγράφους 2.1, 2.2 και 2.3, αντίστοιχα, που ακολουθούν.

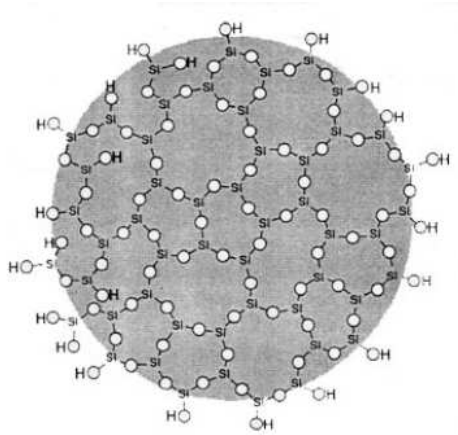
2.1 Χημικά χαρακτηριστικά

Στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα, η έμφαση δίνεται στο κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου Ludox®-SM, που είναι αυτό που έχει χρησιμοποιηθεί πιο ευρέως στη βιβλιογραφία παθητικής σταθεροποίησης εδαφών, και έχει όλα τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Παραδοτέο 1. Πρόκειται για προϊόν της Sigma-Aldrich® και έρχεται διαλυμένο σε συγκέντρωση CS = 30%, όπως προκύπτει και από:

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/420794?lang=en®ion=GR>

Πιο συγκεκριμένα, το Ludox®-SM είναι διάλυμα μικροσκοπικών σωματιδίων πυριτίου σε νερό. Η μέση διάμετρος των σωματιδίων είναι της τάξης των 7nm σε μέγεθος. Το κολλοειδές οξειδίου του πυριτίου (ή η κολλοειδής πυριτία) είναι μη τοξικό, βιολογικά και χημικά αδρανές, άοσμο, μη εύφλεκτο, και δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά την εφαρμογή του όσο και μετά το πέρας αυτής. Για την καλύτερη διατήρηση του, προτείνεται η αποθήκευση του σε ξηρό περιβάλλον

20°-25°C (Iler et al 1979, Whang 1995). Η διάρκεια ζωής για το κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου ξεπερνά τα 25 έτη (Whang 1995). Τα μόρια του είναι σφαιρικά με αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια (λόγω των υδροξυλίων OH⁻) όπως φαίνονται στην Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1. Σχηματική απεικόνιση μορίου οξειδίου του πυριτίου (Silco Inc. 1995)

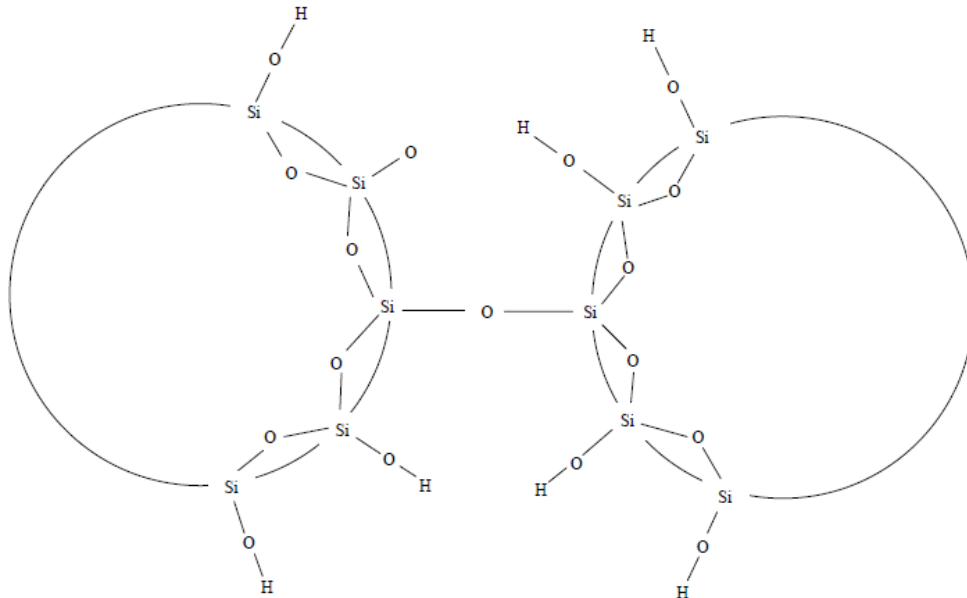
Πιο αναλυτικά οι επιμέρους ιδιότητες του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου Ludox®-SM, που χρησιμοποιείται στο ερευνητικό πρόγραμμα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1. Βασικά χαρακτηριστικά κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου Ludox®-SM (DuPont 1997)

Είδος πυριτίας	Ludox®-SM
SiO ₂ /Na ₂ O κατά βάρος	50
Σταθεροποιητής	Νάτριο
Φορτίο σωματιδίων	Αρνητικό
Πυρίτιο SiO ₂ (% κατά βάρος)	30
Ιξώδες (cP)	5.5
Μέση διάμετρος σωματιδίων (nm)	7
Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	345

Το κολλοειδές οξειδίο πυριτίου δημιουργείται όταν μόρια H₄SiO₄ αλληλεπιδρούν για να σχηματίσουν δεσμούς σιλοξάνης (Si-O-Si) με άλλα αντίστοιχα μόρια (Iler et al 1979). Οι επιφάνειες των σωματιδίων περιέχουν ομάδες σιλανόλης με ελεύθερους

δεσμούς, SiOH. Όταν τα σωματίδια αλληλεπιδρούν με άλλα σωματίδια, σχηματίζουν δεσμούς σιλοξάνης μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

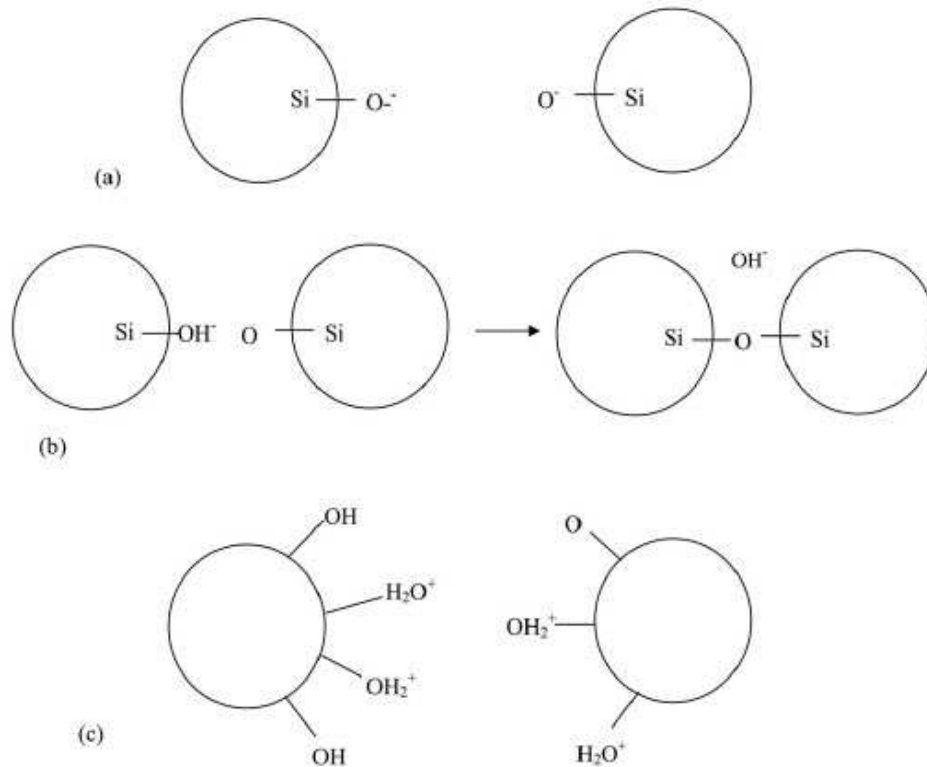


Σχήμα 2.2. Σχηματισμός δεσμών σιλοξάνης κατά τη μετατροπή σε γέλη (Moridis et al.1995)

Στη συνέχεια και όταν τα συ-σωματίδια αυξηθούν στο επιθυμητό μέγεθος, το διάλυμα μπορεί να σταθεροποιηθεί με την αύξηση του pH για να αποφευχθεί η περαιτέρω ανάπτυξη των σωματιδίων. Η αύξηση του pH κάνει τα μόρια να ιονιστούν και έτσι απωθούνται. Η δημιουργία γέλης στο υδατικό διάλυμα μπορεί να προκληθεί σε μεταγενέστερο χρόνο, μειώνοντας τις απωστικές δυνάμεις με έναν ελεγχόμενο τρόπο, που επιτρέπει στα κολλοειδή σωματίδια να πήξουν, να αυξηθούν σε μέγεθος, και τελικά να διαμορφώσουν μια πυκνή δομή. Ο χρόνος αυτός καθορίζεται από το ποσοστό της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων μεταξύ τους.

Τα διαλύματα οξειδίου του πυριτίου σταθεροποιούνται χωρίς να μετατραπούν σε γέλη χρησιμοποιώντας αλκαλικά διαλύματα, όπως το υδροξείδιο του νατρίου, NaOH. Το αλκάλιο αντιδρά με τις επιφάνειες των σωματιδίων, δημιουργώντας ένα αρνητικό φορτίο για τα σωματίδια με αποτέλεσμα την μεταξύ τους απώθηση. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.3.a. Τα ιόντα υδροξυλίου που προστίθεται από το αλκαλικό διάλυμα θα λειτουργούσαν ως καταλύτης στην πραγματικότητα στο σχηματισμό γέλης, λόγω της υψηλής φόρτισης των σωματιδίων και της μεταξύ τους απώθησης. Σε χαμηλότερες τιμές pH, η φόρτιση των σωματιδίων μειώνεται ανάλογα με τη συγκέντρωση των ιόντων υδροξυλίου στο διάλυμα. Ως εκ τούτου, τα

σωματίδια μπορούν να αλληλεπιδράσουν και να σχηματίσουν δεσμούς σιλοξάνης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.b. Το αποτέλεσμα είναι ότι ο ελάχιστος χρόνος γέλης, εμφανίζεται μεταξύ pH 5 και 7. Καθώς το pH συνεχίζει να μειώνεται κάτω από 5, τα ιόντα υδροξυλίου εξαφανίζονται και τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια μειώνονται σημαντικά, όπως φαίνεται στην Σχήμα 2.3.c. Ως εκ τούτου, ο ρυθμός σχηματισμού δεσμών σιλοξάνης μειώνεται και υπάρχει μια αντίστοιχη αύξηση του χρόνου που απαιτείται για τη μετατροπή του διαλύματος σε γέλη (Gallagher 2000).

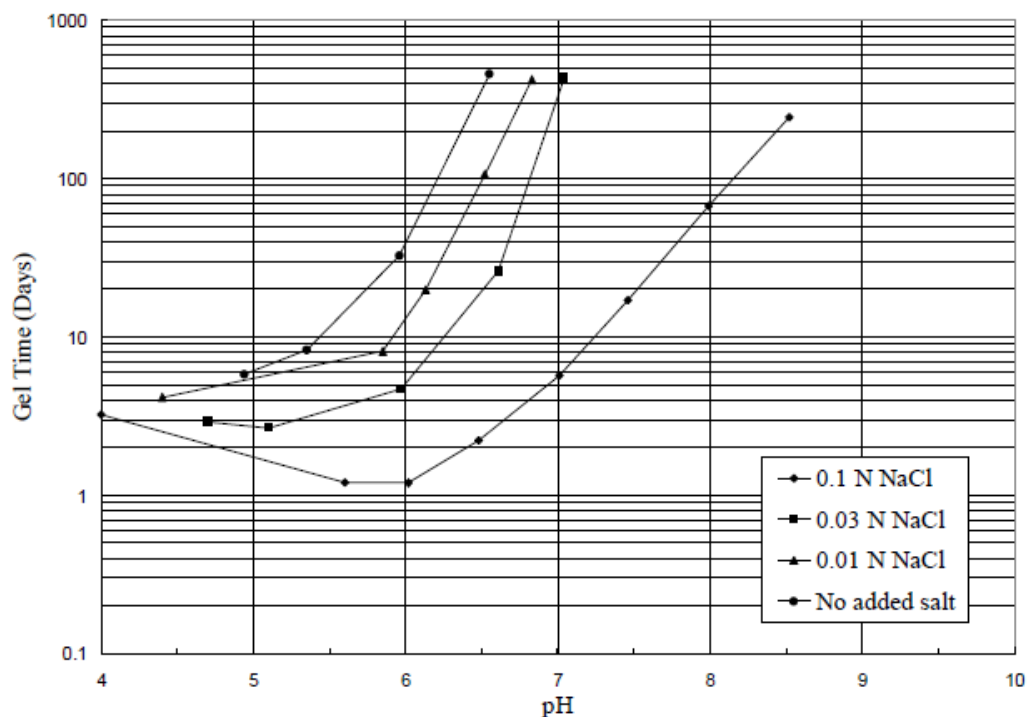


Σχήμα 2.3. Συμπεριφορά σωματιδίων του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου σε διαφορετικές τιμές pH: (a) $\text{pH} \geq 8$, (b) $5 \leq \text{pH} \leq 8$, (c) $\text{pH} \leq 5$ (Gallagher, 2000).

2.2 Ρεολογικά χαρακτηριστικά

Ο χρόνος που απαιτείται για την μετατροπή του διαλύματος οξειδίου του πυριτίου σε γέλη είναι πολύ σημαντικός, γιατί αυτός καθορίζει την αποτελεσματική εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης. Ο χρόνος γέλης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από το τέλος της ανάμειξης μέχρι το κολλοειδές οξύδιο 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 οποίο εξαρτάται 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 2.4 δίνεται ένα παράδειγμα τιμών χρόνων γέλης t_g κολλοειδούς πυριτίας Ludox®-SM, για διαλύματα με διαφορετικές τιμές pH και διαφορετικές περιεκτικότητες σε NaCl (τιμές κανονικότητας), από τη βιβλιογραφία. Οι χρόνοι που έχουν καταγραφεί σε δημοσιεύσεις για τη μετατροπή του διαλύματος σε γέλη έχουν ελάχιστη τιμή 30' (Noll et al. 1992), αλλά το άνω όριο είναι πρακτικώς απροσδιόριστο καθώς ο χρόνος αυτός εκτοξεύεται για πολύ πολύ μικρές (≤ 3) τιμές του pH (βλέπε Σχήμα 2.3, για εξήγηση), αλλά και για πολύ μεγάλες (≥ 8) του pH (βλέπε Σχήμα 2.3 για εξήγηση, και Σχήμα 2.4 για παραδείγματα).



Σχήμα 2.4. Καμπύλες χρόνου γέλης σε σχέση με το pH και τη συγκέντρωση NaCl.(Gallagher 2000)

Το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου είναι ιδανικό προς χρήση για παθητική στερεοποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών, καθώς τα διαλύματα του έχουν χαμηλό αρχικό ιξώδες (λίγο μεγαλύτερο εκείνου του νερού ίσο με 1cP), αλλά και μεγάλους μα κυρίως ελεγχόμενους χρόνους κατά τους οποίους τα διαλύματα μετατρέπονται σε γέλη. Γίνεται κατανοητό, ότι για πρακτικούς λόγους είναι πολύ σημαντική η αποφυγή της πρόωρης ή της καθυστερημένης μετατροπής του διαλύματος σε γέλη. Ο χρόνος γέλης ελέγχεται λαμβάνοντας υπόψη τις κάτωθι τρεις (3) βασικές επιδράσεις:

1. Δεδομένης της αποθήκευσης της εμπορικής κολλοειδούς πυριτίας Ludox®-SM με χρήση NaOH που προσαυξάνει το pH σε τιμές της τάξης του 10 (και καθυστερεί εξαιρετικά την γέλη), προσθήκη υδροχλωρικού οξέος HCl (ή και οποιουδήποτε άλλου οξέος) οδηγεί ελεγχόμενα σε μείωση της τιμής του pH, και, αν αυτό είναι αναγκαίο, στην περιοχή τιμών όπου παρατηρούνται οι ελάχιστοι χρόνοι γέλης ($5 \leq \text{pH} \leq 7$).
2. Δεδομένης της εμπορίας της κολλοειδούς πυριτίας Ludox®-SM σε μεγάλες συγκεντρώσεις $\text{CS} = 30\%$, αραίωση του διαλύματος με νερό οδηγεί ελεγχόμενα σε μείωση της συγκέντρωσης κατά βάρος σε τιμές CS της τάξης του 5% με 10%, που οδηγούν σε ικανοποιητικής ποιότητας γέλη με σαφώς μικρότερο κόστος. Επισημαίνεται ότι η αραίωση του διαλύματος για λόγους μείωσης κόστους οδηγεί και σε αύξηση του χρόνου γέλης.
3. Δεδομένης της αραίωσης με νερό (για λόγους κόστους) και της προσθήκης HCl (για μείωση του χρόνου γέλης) στην εμπορικά διαθέσιμη κολλοειδή πυριτία Ludox®-SM, έλεγχος του ακριβούς χρόνου γέλης είναι δυνατή με προσθήκη NaCl (ή οποιουδήποτε άλλου άλατος, π.χ. CaCl_2). Επισημαίνεται ότι η προσθήκη αλάτων, ανάλογα με την κανονικότητά τους (παίζει ρόλο τόσο η ποσότητα όσο και το σθένος των κατιόντων), οδηγεί σε μείωση του χρόνου γέλης

Επιπλέον, για τον έλεγχο της διηθησιμότητας (δηλαδή της δυνατότητας εισπίεσης) με χαμηλή πίεση (του ενέματος) της κολλοειδούς πυριτίας, δεν παίζει μόνο ρόλο ο συνολικός χρόνος γέλης, αλλά και η τιμή του ιξώδους της στη φάση εισπίεσής της. Αυτό επειδή η τιμή του ιξώδους συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα διήθησης της πυριτίας εντός του εδάφους, δηλαδή όσο αυξάνει το ιξώδες τόσο μικραίνει η ταχύτητα διήθησης για το ίδιο έδαφος. Συνεπώς, η μελέτη των ρεολογικών χαρακτηριστικών της κολλοειδούς πυριτίας, από την ανάμιξη μέχρι τη γέλη παίζει σημαντικό ρόλο στην επιτυχή εκτέλεση της παθητικής σταθεροποίησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι κύριοι παράμετροι που καθορίζουν τη ρεολογική συμπεριφορά διαλυμάτων Ludox®-SM είναι:

- η συγκέντρωση κατά βάρος, $\text{CS}(\%)$, της πυριτίας στο διάλυμα
- η τιμή του pH του διαλύματος
- η κανονικότητα N κατιόντων στο διάλυμα

Έτσι, προκειμένου να διερευνηθούν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά της κολλοειδούς πυριτίας Ludox®-SM χρησιμοποιήθηκε το ιξωδόμετρο Brookfield LVDV-II+PX (Σχήμα 2.5) και υδατόλουτρο τύπου TC-150, του οίκου Brookfield (Σχήμα 2.6), το οποίο διατηρούσε σταθερή τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια μέτρησης του ιξώδους στους 25°C . Ο εξοπλισμός αυτός αγοράστηκε μετά από πρόχειρο μειοδοτικό διαγωνισμό στο πλαίσιο του προγράμματος.



Σχήμα 2.5. Περιστροφικό ιξωδόμετρο Brookfield LVDV-II+PX



Σχήμα 2.6. Υδατόλουτρο TC-150, του οίκου Brookfield

Η σύνδεση του υδατόλουτρου με το ιξωδόμετρο έγινε με τη συνδεσμολογία που φαίνεται στο Σχήμα 2.7, με κυκλοφορία νερού γύρω από τον μαύρο κύλινδρο (με κόκκιν ετικέτα) υποδοχής ανοξειδωτού δοχείου (guardleg) μέσα στο οποίο γίνεται η περιστροφική μέτρηση του ιξώδους.



Σχήμα 2.7. Σύνδεση υδατόλουτρου με ιξωδόμετρο

Για τις ανάγκες του ερευνητικού προγράμματος και τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων για κάθε πιθανή περίπτωση στην πράξη έγιναν στο **Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Π.Θ.** δοκιμές μέτρησης ιξώδους σε μίγματα κolloειδούς οξειδίου του πυριτίου.

Ο στόχος των δοκιμών αυτών ήταν η κατάστρωση καμπυλών εξέλιξης του ιξώδους με το χρόνο t για διαλύματα με διαφορετικές:

- συγκεντρώσεις κατά βάρος κolloειδούς πυριτίας CS(%),
- τιμές κανονικότητας NaCl,
- τιμές pH,

Επισημαίνεται, ότι το pH του διαλύματος ρυθμίστηκε με προσθήκη (με σταγονόμετρο) HCl της SIGMA-ALDRICH® με συγκέντρωση 37%, μοριακό βάρος MW: 36.46g/mole και πυκνότητα 1.20g/ml στους 25°C. Η ποσότητα του HCl που προστίθεται δεν έχει πρακτική σημασία, όσο έχει το τελικό pH που επιτυγχάνεται με την προσθήκη του. Αναφέρεται εδώ ότι το pH μετρήθηκε με πεχάμετρο του οίκου Metrohm, type 826 pH mobile, που αγοράστηκε στο πλαίσιο του προγράμματος.

Απο εκεί και πέρα, η μετατροπή σε γέλη επιταχύνθηκε με προσθήκη καθαρού NaCl (> 99.8% καθαρότητα) της Sigma-Aldrich® με μοριακό βάρος του χλωριούχου νατρίου της SIGMA-ALDRICH ίσο με 58.44g/mole. Αντίθετα με το HCl, η ποσότητα του προστιθέμενου NaCl έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς δεν επηρεάζει το pH αλλά καθορίζει το ιζώδες και τους χρόνους γέλης της κolloειδούς πυριτίας. Εν προκειμένω, η συγκέντρωση NaCl (ή η περιεκτικότητα σε NaCl) προσμετράται σε όρους κανονικότητας. Πιο συγκεκριμένα, περιεκτικότητα των διαλυμάτων σε χλωριούχο νάτριο NaCl ίση με 1N αντιστοιχεί σε 58.5g σε 1lt διαλύματος, δηλαδή επί τη βάση του μοριακού βάρους του. Επισημαίνεται ότι η μέτρηση των ποσοτήτων για την παρασκευή των μιγμάτων έγινε με χρήση ζυγαριάς ακρίβειας 2 δεκαδικών του γραμμαρίου (0.01g).

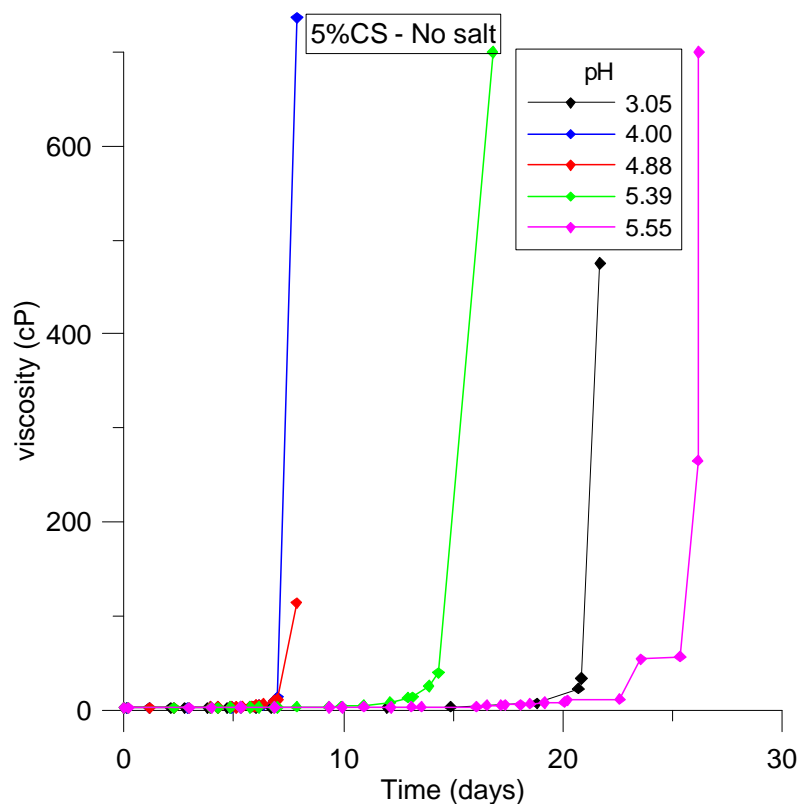
Οι δοκιμές μέτρησης ιζώδους με το χρόνο που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος έγιναν σε διαλύματα με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 2.2, που ακολουθεί. Οι μετρήσεις έγιναν με σταθερή τιμή 200 περιστροφών ανά λεπτό για τις μικρές (έστω) τιμές ιζώδους, αλλά όσο το ιζώδες μεγάλωνε η τιμή αυτή μειωνόταν αναγκαστικά με βάση τις ενδείξεις του οργάνου ώστε να καθίσταται δυνατή η μέτρηση του ιζώδους. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να υπάρχει υψηλή τιμή στρεπτικής τάσης στον μετρητή, σύμφωνα με το εγχειρίδιο αλλά και τη βιβλιογραφία (Gallagher 2000).

Πίνακας 1.2. Συγκέντρωση CS, NaCl και εύρη pH των δοκιμών που εκτελέστηκαν.

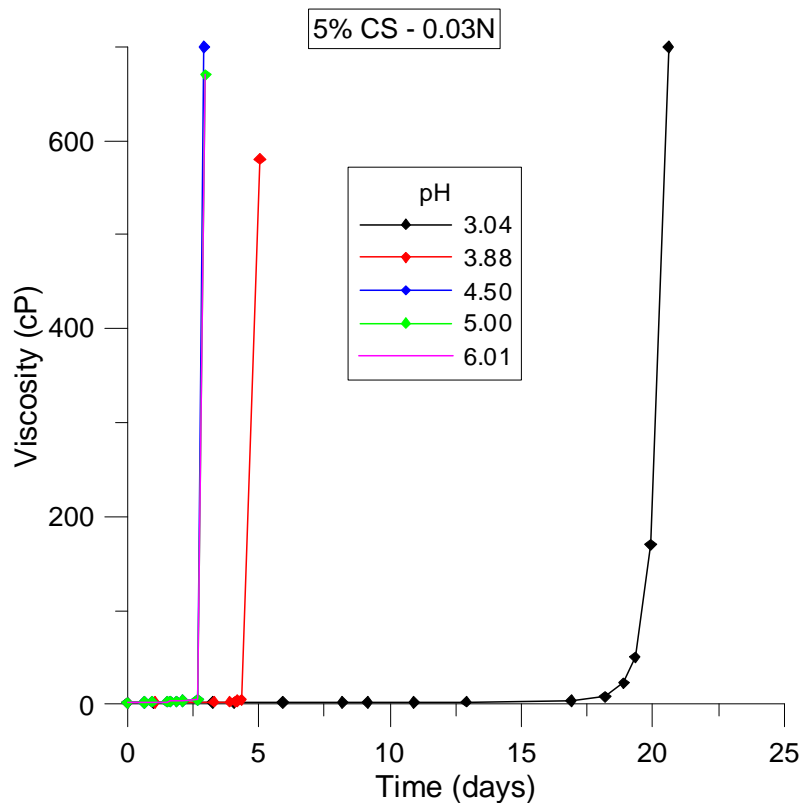
Συγκέντρωση CS (%)	Συγκέντρωση NaCl (σε όρους κανονικότητας)	Εύρος pH
5	0	3.00 - 5.55
	0.03N	3.00 – 6.00
	0.1N	4.00 – 7.50
7.5	0	3.00 – 6.55
	0.03N	5.00 – 6.50
	0.1N	5.00 – 7.30
10	0	2.80 – 6.88
	0.03N	3.00 – 7.55
	0.1N	3.80 – 7.50

Όπως προαναφέρεται, ο χρόνος που χρειάστηκε κάθε διάλυμα από το τέλος της ανάμειξης του μέχρι να πάρει τη μορφή γέλης, ονομάζεται χρόνος γέλης t_g , και συνεπώς, κάθε διάλυμα έχει τη δική του τιμή t_g ως συνάρτηση των τριών (3) ανωτέρω παραμέτρων. Σημειώνεται ότι ως χρόνος γέλης επιλέχθηκε ο χρόνος της τελευταίας μετρηθείσας τιμής με ιζώδες (μ) άνω των 100cP, καθώς ο χρόνος για μετατροπή σε πλήρως σχηματισμένη γέλη (firm gel), είναι αμελητέος από τη χρονική στιγμή αυτή και μετά. Αναφέρεται εδώ ότι αυτός ο τρόπος ορισμού του χρόνου γέλης t_g είναι συμβατός με τη βιβλιογραφία (π.χ Gallagher 2000), και επίσης προκύπτει από την πρακτική αδυναμία μέτρησης ιζώδους με περιστροφικό ιζωδόμετρο σε πλήρως σχηματισμένη γέλη.

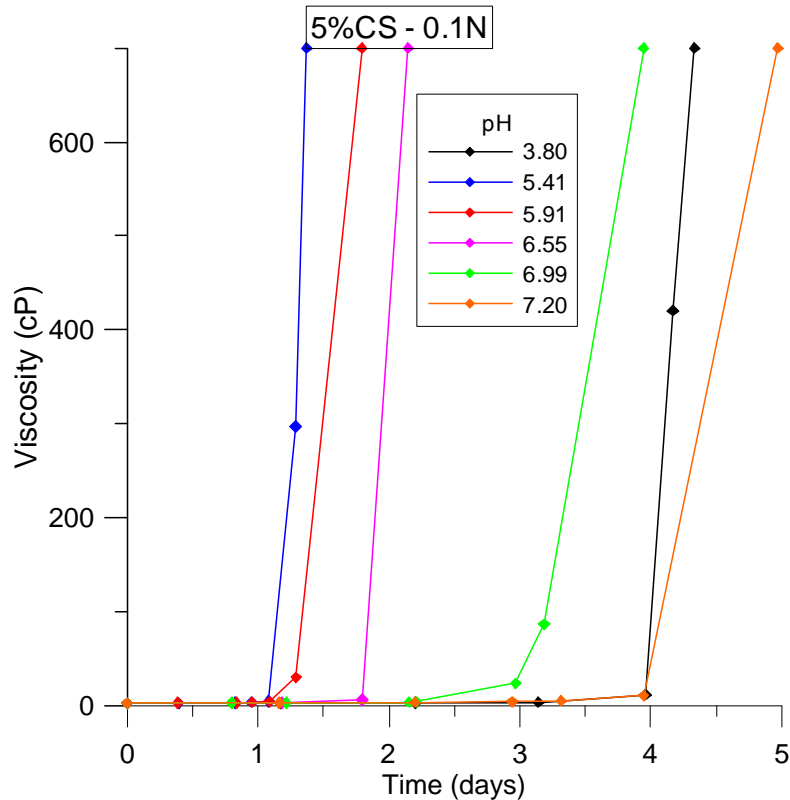
Πιο συγκεκριμένα, στα **Σχήματα 2.8 έως 2.10** παρουσιάζονται οι καμπύλες ιζώδους μ – χρόνου t για διαλύματα με χαμηλή συγκέντρωση κολλοειδούς πυριτίας CS=5%, με τρεις (3) διαφορετικές τιμές κανονικότητας NaCl: 0N (καθόλου NaCl), 0.03N και 0.1N, αντίστοιχα. Κάθε ένα από αυτά τα σχήματα εμπεριέχει καμπύλες που αφορούν μίγματα με διαφορετικές τιμές pH. Στη συνέχεια, στα **Σχήματα 2.11 έως 2.13** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες ιζώδους μ – χρόνου t για διαλύματα με μέτρια συγκέντρωση κολλοειδούς πυριτίας CS=7.5%, και τις ίδιες τρεις (3) διαφορετικές τιμές κανονικότητας NaCl: 0N (καθόλου NaCl), 0.03N και 0.1N. Τέλος, στα **Σχήματα 2.14 έως 2.16** γίνεται το ίδιο για διαλύματα με υψηλή συγκέντρωση κολλοειδούς πυριτίας CS=10%.



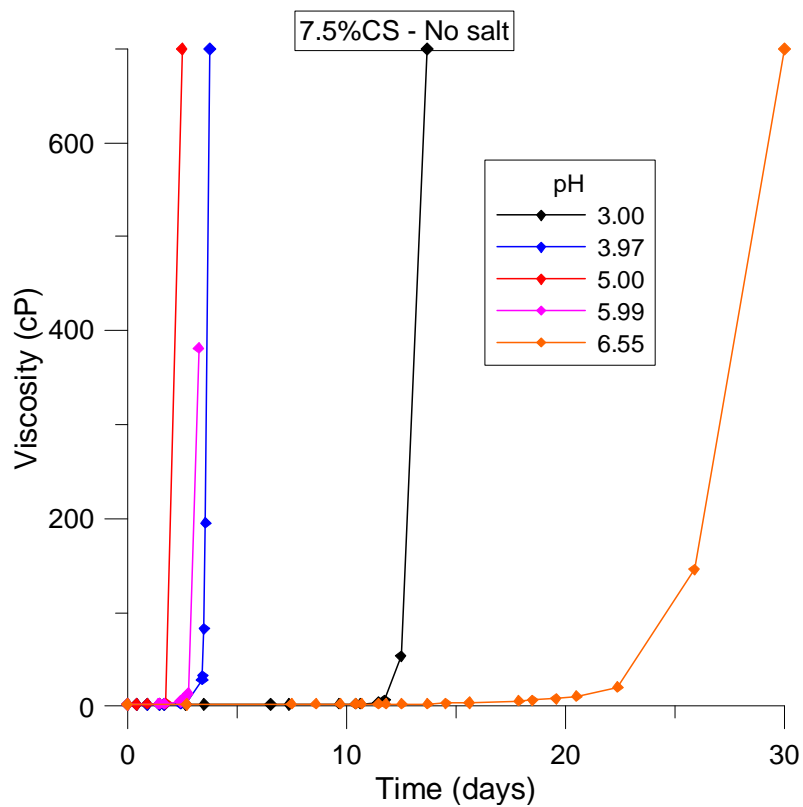
Σχήμα 2.8. Εξέλιξη ιζώδους μ με το χρόνο t για συγκέντρωση CS=5%, χωρίς προσθήκη NaCl και διαφορετικές τιμές του pH.



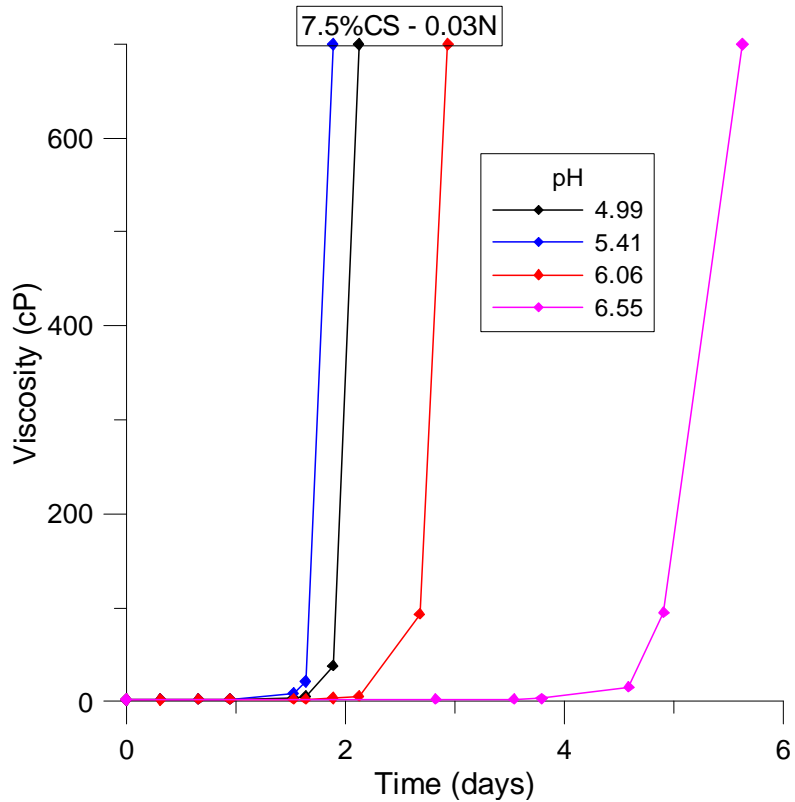
Σχήμα 2.9. Εξέλιξη ιξώδους μ με το χρόνο t για συγκέντρωση CS=5%, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.03N και διαφορετικές τιμές του pH.



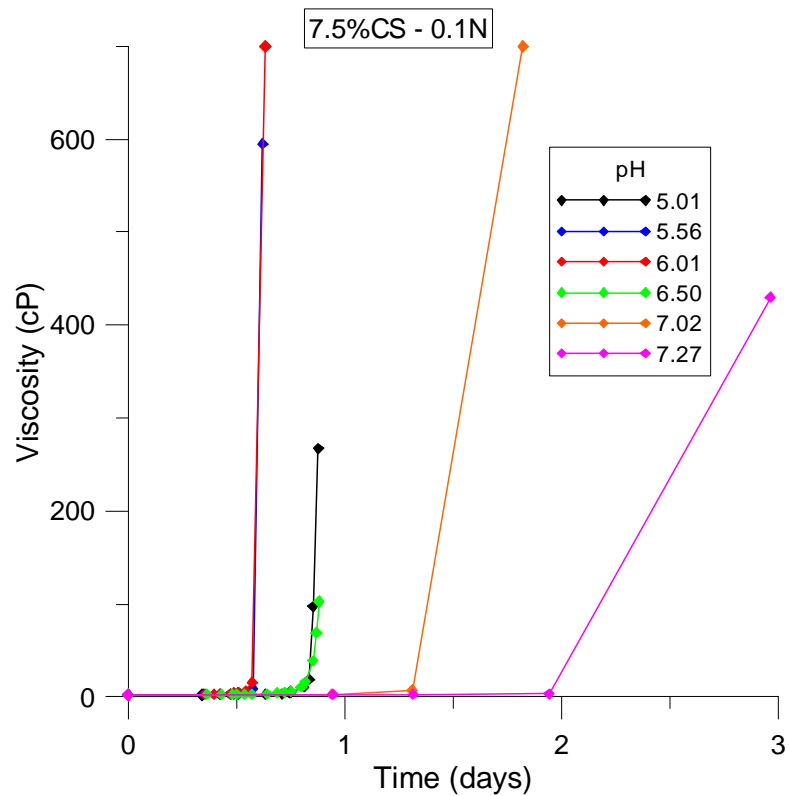
Σχήμα 2.10. Εξέλιξη ιξώδους μ με το χρόνο t για συγκέντρωση CS=5%, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.1N και διαφορετικές τιμές του pH.



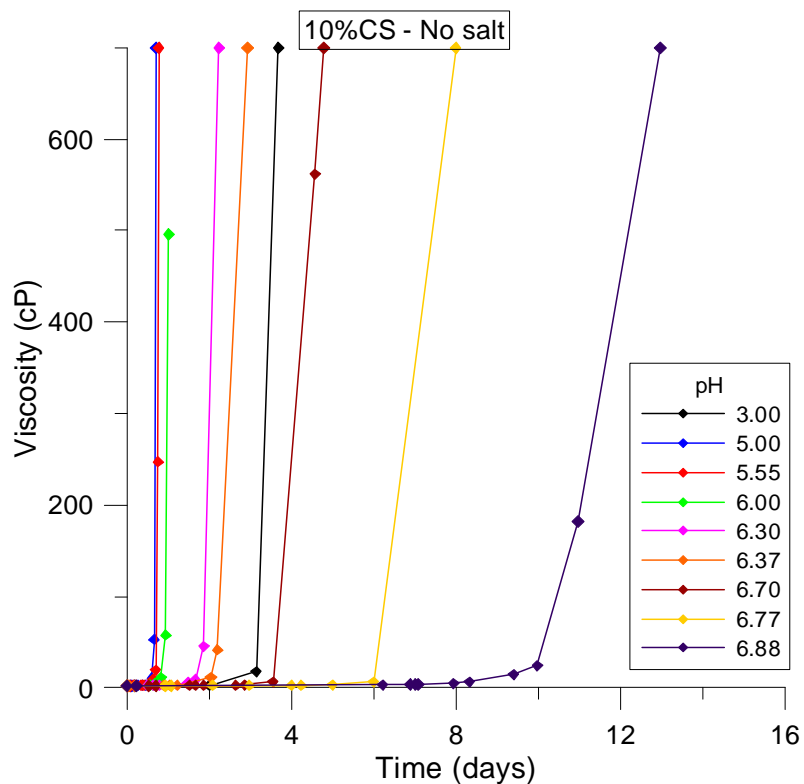
Σχήμα 2.11. Εξέλιξη ιξώδους μ με το χρόνο t για συγκέντρωση CS=7.5%, χωρίς προσθήκη NaCl και διαφορετικές τιμές του pH.



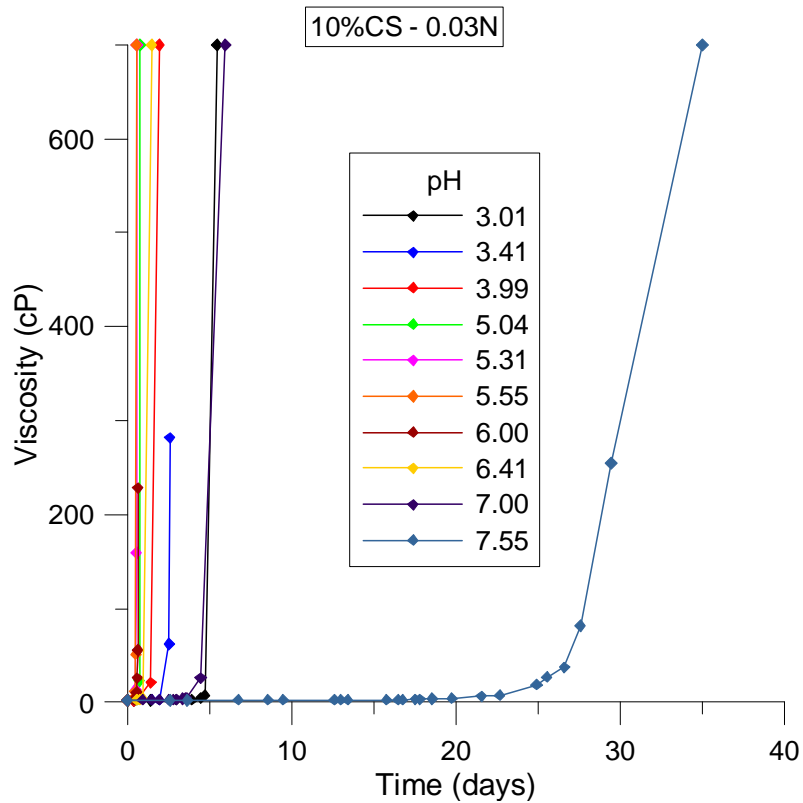
Σχήμα 2.12. Εξέλιξη ιξώδους μ με το χρόνο t για συγκέντρωση CS=7.5%, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.03N και διαφορετικές τιμές του pH.



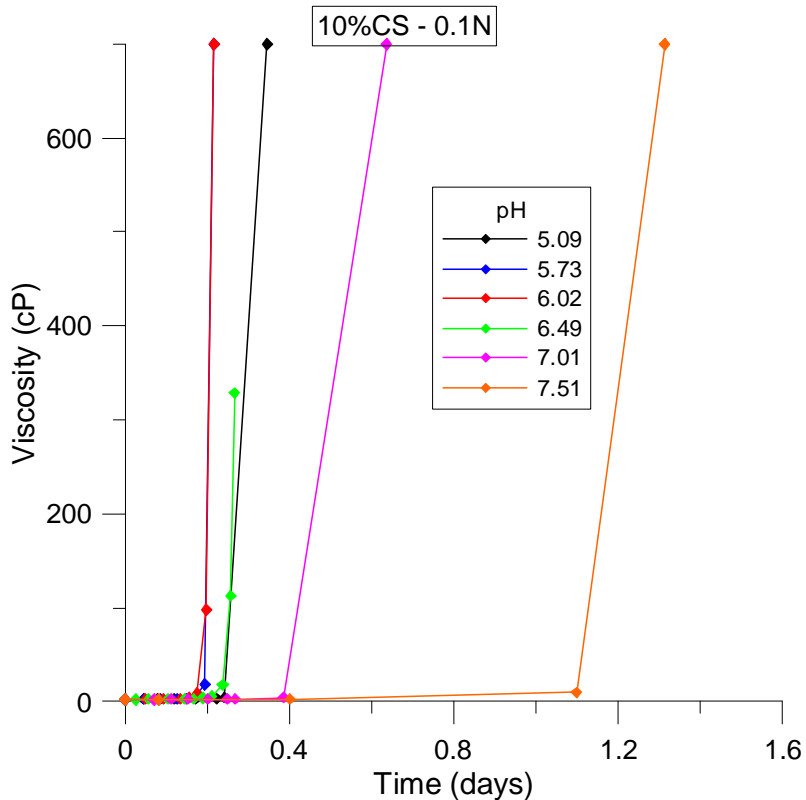
Σχήμα 2.13. Εξέλιξη ιξώδους μ με το χρόνο t για συγκέντρωση CS=7.5%, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.1N και διαφορετικές τιμές του pH.



Σχήμα 2.14. Εξέλιξη ιξώδους μ με το χρόνο t για συγκέντρωση CS=10%, χωρίς προσθήκη NaCl και διαφορετικές τιμές του pH.



Σχήμα 2.15. Εξέλιξη ιξώδους μ με το χρόνο t για συγκέντρωση CS=10%, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.03N και διαφορετικές τιμές του pH.



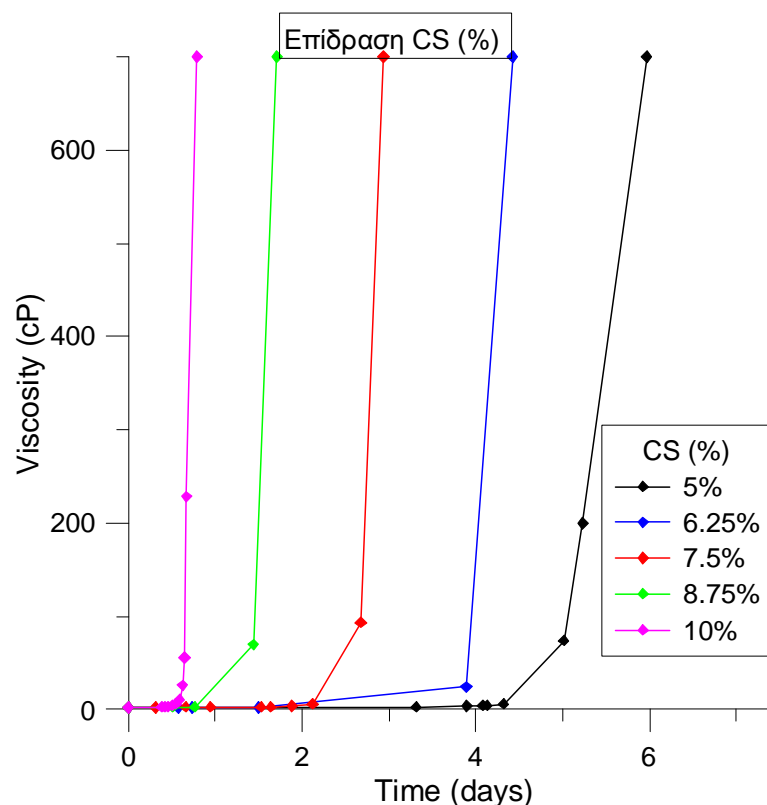
Σχήμα 2.16. Εξέλιξη ιξώδους μ με το χρόνο t για συγκέντρωση CS=10%, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.1N και διαφορετικές τιμές του pH.

Σημειώνεται, ότι η τιμή $\mu = 700\text{cP}$, δεν ήταν σε όλες τις δοκιμές η τελικώς μετρηθείσα τιμή του ιξώδους, καθώς υπήρχαν και μετρήσεις μεγαλύτερων τιμών στα περισσότερα δείγματα οι οποίες δεν παρουσιάζονται χάριν ευκρίνειας απεικόνισης.

Από τα σχήματα αυτά προκύπτουν συνολικά τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η σχέση μ - t έχει ένα αρχικώς γραμμικό σχεδόν τμήμα, από την αρχική τιμή ιξώδους που είναι λίγο μεγαλύτερη εκείνης του νερού (1cP), μέχρι τιμές ιξώδους περί τα 3cP ή λίγο μεγαλύτερη (έως 6cP), πάνω από την οποία το ιξώδες αυξάνει ραγδαία και το μίγμα οδηγείται τάχιστα σε μορφή γέλης. Η μορφή αυτή της σχέσης μ - t είναι γενική και ισχύει για οποιοδήποτε συνδυασμό CS(%)-N-pH.
- Η τιμή του pH παίζει καθοριστικό ρόλο στο χρόνο γέλης του μίγματος. Η επίδρασή του δεν είναι μονοτονική, καθώς υπάρχει πάντα μια τιμή pH για την οποία ο χρόνος γέλης γίνεται ελάχιστος, ενώ μεγαλύτερες και μικρότερες τιμές pH οδηγούν σε σαφώς μεγαλύτερους χρόνους γέλης για τον ίδιο πάντα συνδυασμό CS(%) – N.
- Η τιμή της κανονικότητας σε NaCl παίζει επίσης σπουδαίο ρόλο στο χρόνο γέλης. Η επίδρασή της είναι μονοτονική, δηλαδή όσο αυξάνει η κανονικότητα τόσο μειώνεται ο χρόνος γέλης για τον ίδιο συνδυασμό CS(%) – pH.
- Η τιμή της συγκέντρωσης κατά βάρος της κολλοειδούς πυριτίας CS(%) παίζει, και αυτή, σπουδαίο ρόλο στο χρόνο γέλης. Ομοίως με την κανονικότητα, η επίδρασή της είναι μονοτονική, δηλαδή όσο αυξάνει η συγκέντρωση CS(%) τόσο μειώνεται ο χρόνος γέλης για τον ίδιο συνδυασμό N – pH.
- Συνολικά, οι χρόνοι γέλης που μετρήθηκαν στις δοκιμές αυτές κυμαίνονται από μερικές ώρες μέχρι περίπου ένα μήνα, καλύπτοντας πρακτικώς όλες τις περιπτώσεις της πράξης

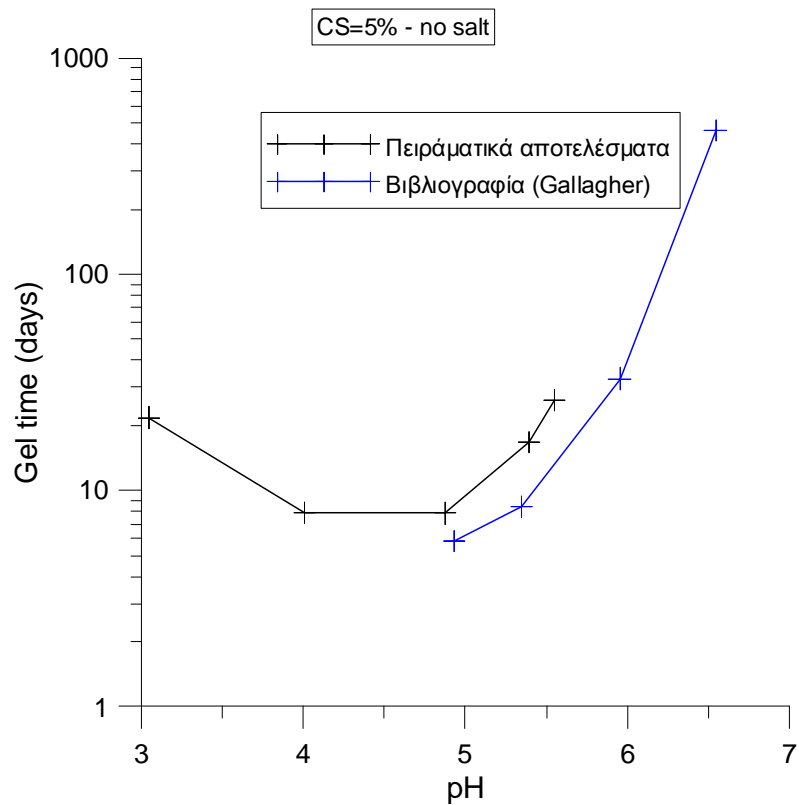
Για να διερευνηθεί σαφέστερα η επίδραση της συγκέντρωσης κατά βάρος της κολλοειδούς πυριτίας CS(%), μιας παραμέτρου που σχετίζεται και με το κόστος της παθητικής σταθεροποίησης, εκτελέστηκαν επιπλέον δυο (2) δοκιμές με pH = 6.00 για συγκεντρώσεις CS = 6.25% και 8.75% και περιεκτικότητα NaCl 0.03N προκειμένου να επιβεβαιωθεί η επίδραση της συγκέντρωσης CS στο χρόνο γέλης. Έτσι, στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η σαφώς μονοτονική και σημαντική επίδραση της συγκέντρωσης κατά βάρος της κολλοειδούς πυριτίας CS(%) στις καμπύλες ιξώδους μ – χρόνου t , καθώς και την έντονα μειωτική επίδραση στο χρόνο γέλης.



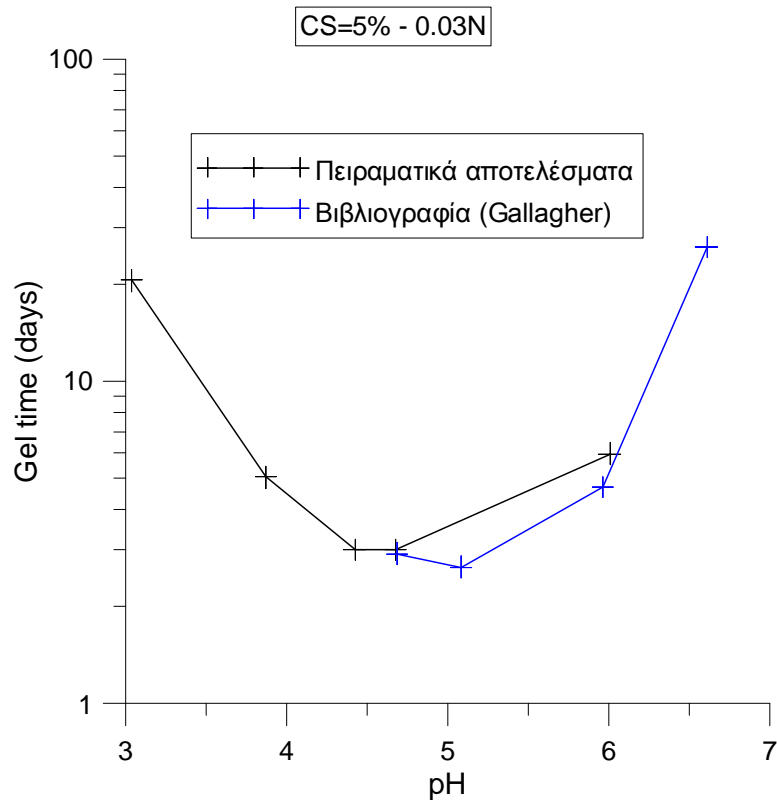
Σχήμα 2.17. Εξέλιξη ιξώδους μ με το χρόνο t για συγκεντρώσεις CS = 5, 6.25, 7.5, 8.75, και 10%, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.03N και pH=6.00.

Για πρακτικές εφαρμογές, το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στο χρόνο γέλης t_g του κάθε διαλύματος, καθώς αυτός καθορίζει το ποιος συνδυασμός CS(%)-N-pH θα επιλεγεί προς χρήση. Δεδομένου ότι οι δύο (2) εκ των τριών (3) παραμέτρων, CS(%) και N, έχουν μονοτονική επίδραση στο χρόνο γέλης t_g ιδιαίτερη σημασία έχει η σχέση χρόνου γέλης t_g – pH των διαλυμάτων κολλοειδούς πυριτίας.

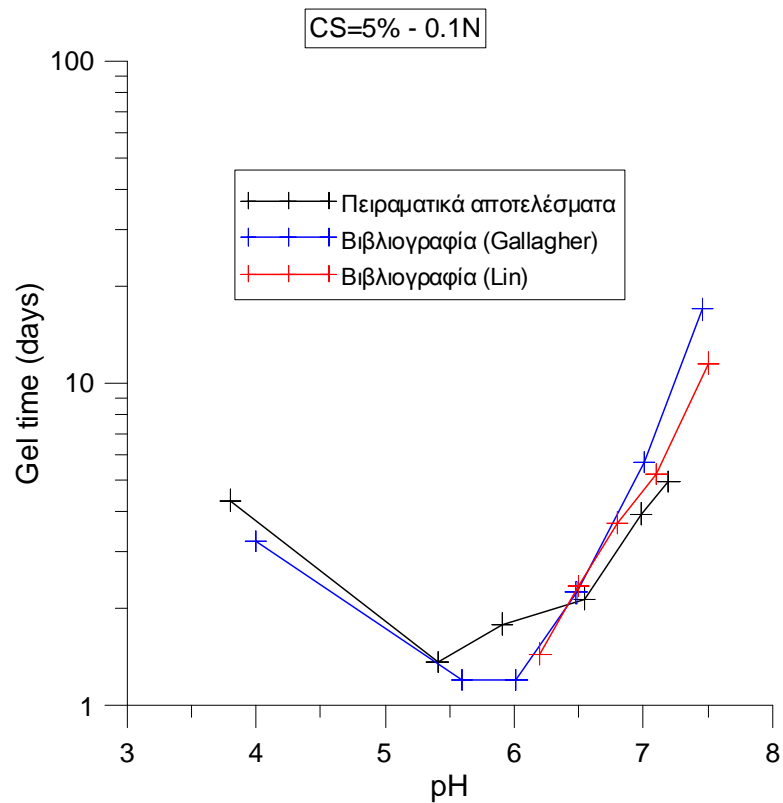
Έτσι, στα **Σχήματα 2.18 έως 2.20** παρουσιάζονται οι καμπύλες χρόνου γέλης t_g – pH για διαλύματα με χαμηλή συγκέντρωση κολλοειδούς πυριτίας CS=5%, με τρεις (3) διαφορετικές τιμές κανονικότητας NaCl: 0N (καθόλου NaCl), 0.03N και 0.1N, αντίστοιχα. Κάθε ένα από αυτά τα σχήματα εμπεριέχει καμπύλες που αφορούν μίγματα με διαφορετικές τιμές pH, και αντιστοιχούν στις δοκιμές των Σχημάτων 2.8 έως 2.10 αντίστοιχα. Στη συνέχεια, στα **Σχήματα 2.21 έως 2.23** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες χρόνου γέλης t_g – pH για διαλύματα με μέτρια συγκέντρωση κολλοειδούς πυριτίας CS=7.5%, και τις ίδιες τρεις (3) διαφορετικές τιμές κανονικότητας NaCl: 0N (καθόλου NaCl), 0.03N και 0.1N (που αντιστοιχούν στις δοκιμές των Σχημάτων 2.11 έως 2.13). Τέλος, στα **Σχήματα 2.24 έως 2.26** γίνεται το ίδιο για διαλύματα με υψηλή συγκέντρωση κολλοειδούς πυριτίας CS=10%, που αντιστοιχούν με τη σειρά τους στις δοκιμές των Σχημάτων 2.14 έως 2.16. Στα σχήματα που ακολουθούν, πέρα από τα πειραματικές μετρήσεις, παρουσιάζονται και αντίστοιχα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία, χάριν σύγκρισης.



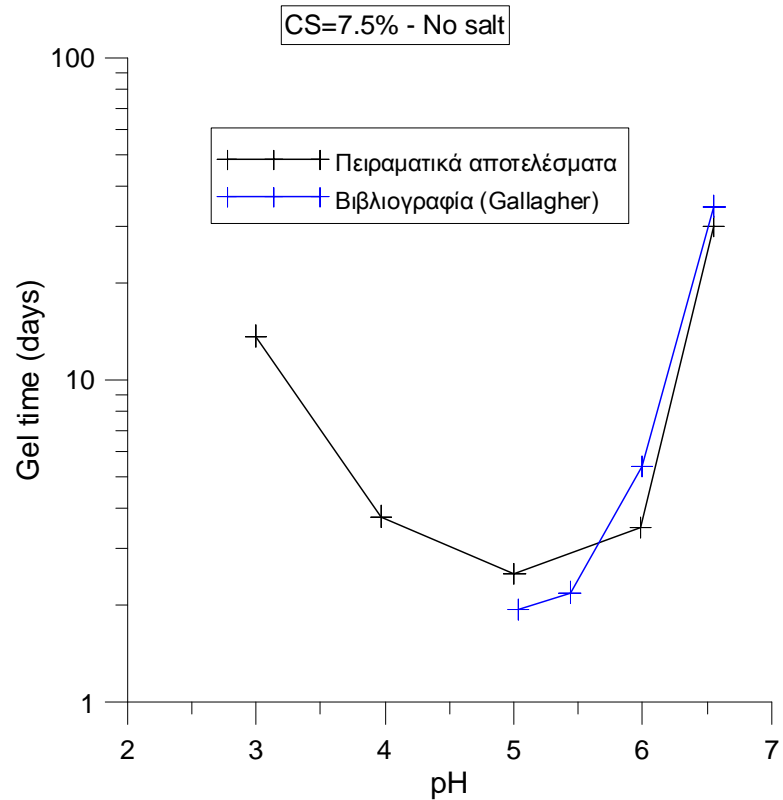
Σχήμα 2.18. Καμπύλη χρόνου γέλης t_g - pH διαλυμάτων για ποσοστό **CS = 5%**, χωρίς προσθήκη NaCl, και σύγκριση με τη βιβλιογραφία (Gallagher, 2000)



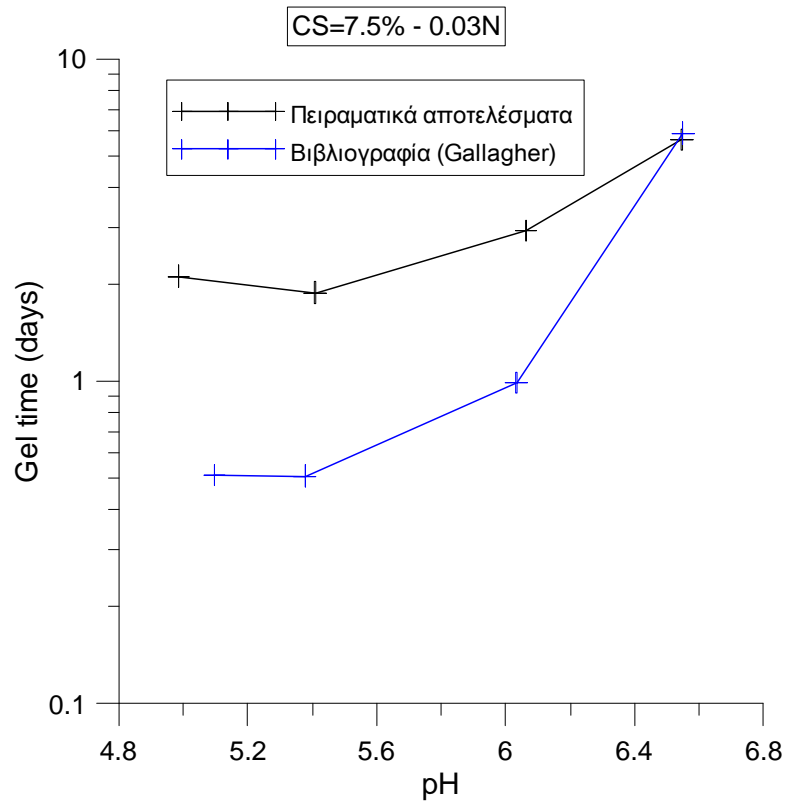
Σχήμα 2.19. Καμπύλη χρόνου γέλης t_g - pH διαλυμάτων για ποσοστό **CS = 5%**, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.03N και σύγκριση με τη βιβλιογραφία (Gallagher, 2000)



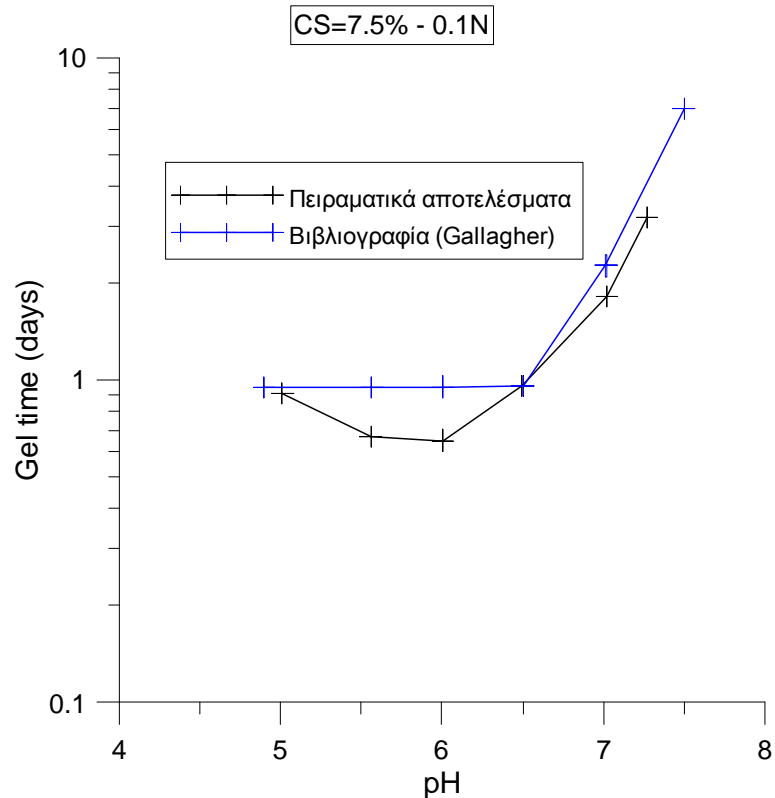
Σχήμα 2.20. Καμπύλη χρόνου γέλης t_g - pH για ποσοστό **CS = 5%**, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.1N και σύγκριση με τη βιβλιογραφία (Gallagher, 2000, Lin, 2006)



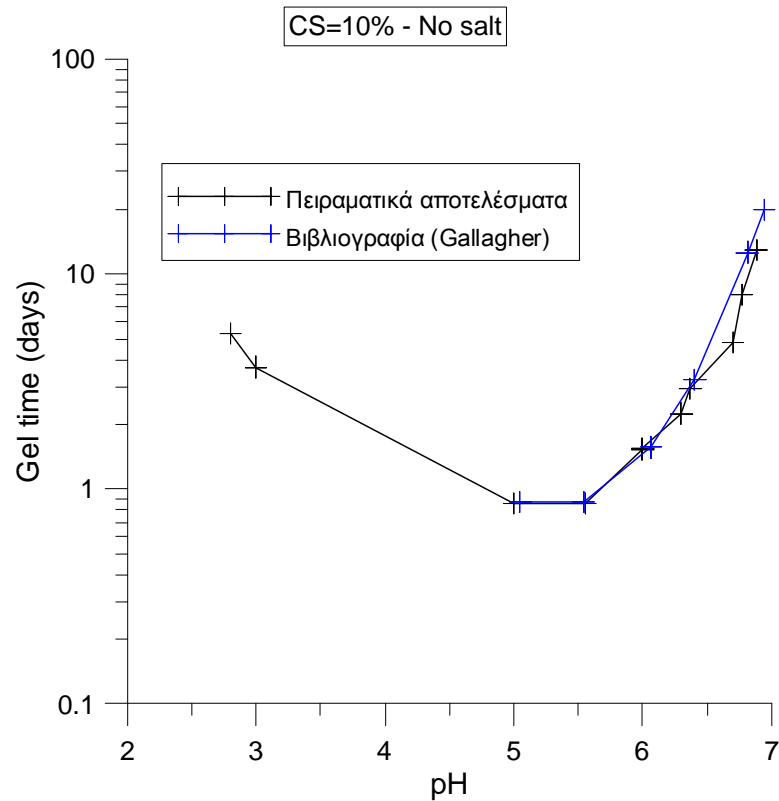
Σχήμα 2.21. Καμπύλη χρόνου γέλης t_g - pH διαλυμάτων για ποσοστό **CS = 7.5%**, χωρίς προσθήκη NaCl, και σύγκριση με τη βιβλιογραφία (Gallagher, 2000)



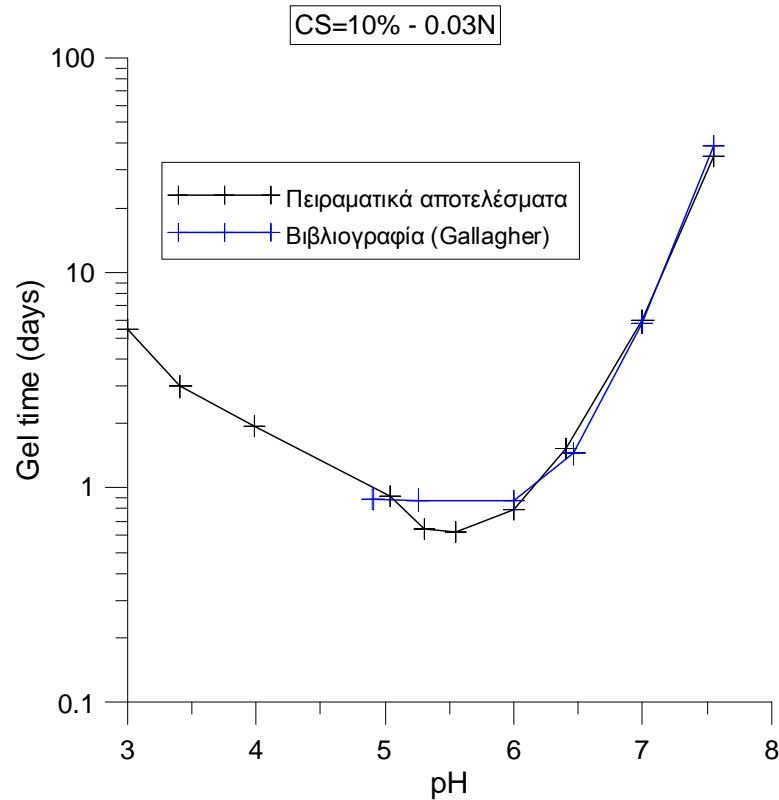
Σχήμα 2.22. Καμπύλη χρόνου γέλης t_g - pH διαλυμάτων για ποσοστό **CS = 7.5%**, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.03N και σύγκριση με τη βιβλιογραφία (Gallagher, 2000)



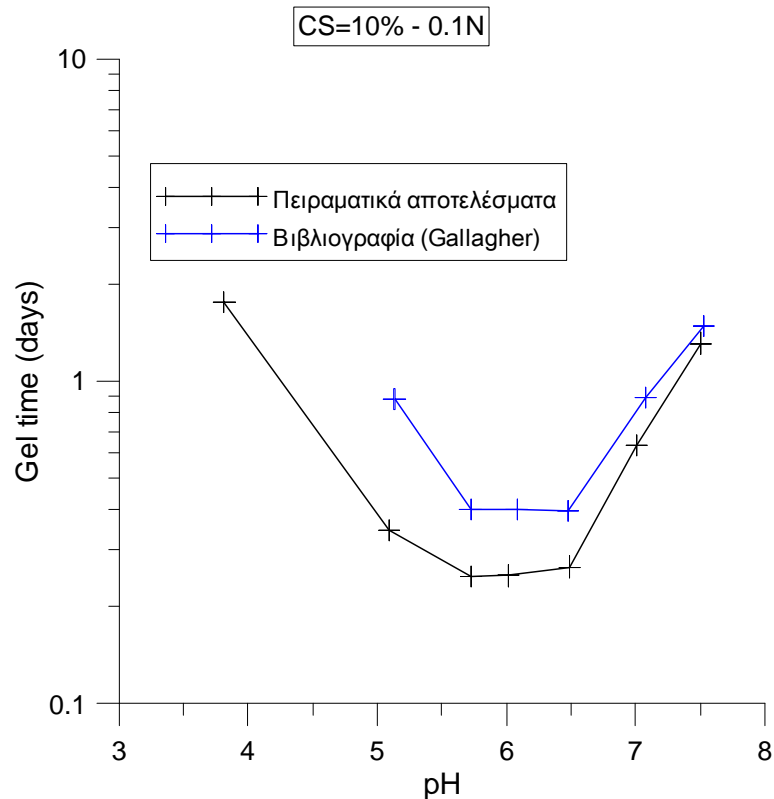
Σχήμα 2.23. Καμπύλη χρόνου γέλης t_g - pH διαλυμάτων για ποσοστό **CS = 7.5%**, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.1N και σύγκριση με τη βιβλιογραφία (Gallagher, 2000)



Σχήμα 2.24. Καμπύλη χρόνου γέλης t_g - pH διαλυμάτων για ποσοστό **CS = 10%**, χωρίς προσθήκη NaCl, και σύγκριση με τη βιβλιογραφία (Gallagher, 2000)



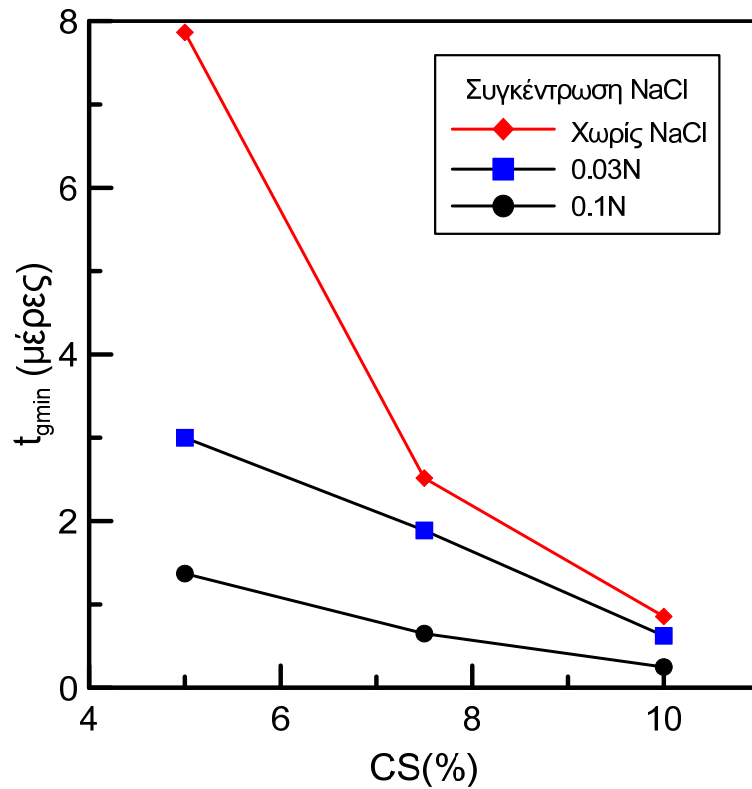
Σχήμα 2.25. Καμπύλη χρόνου γέλης t_g - pH διαλυμάτων για ποσοστό **CS = 10%**, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.03N και σύγκριση με τη βιβλιογραφία (Gallagher, 2000)



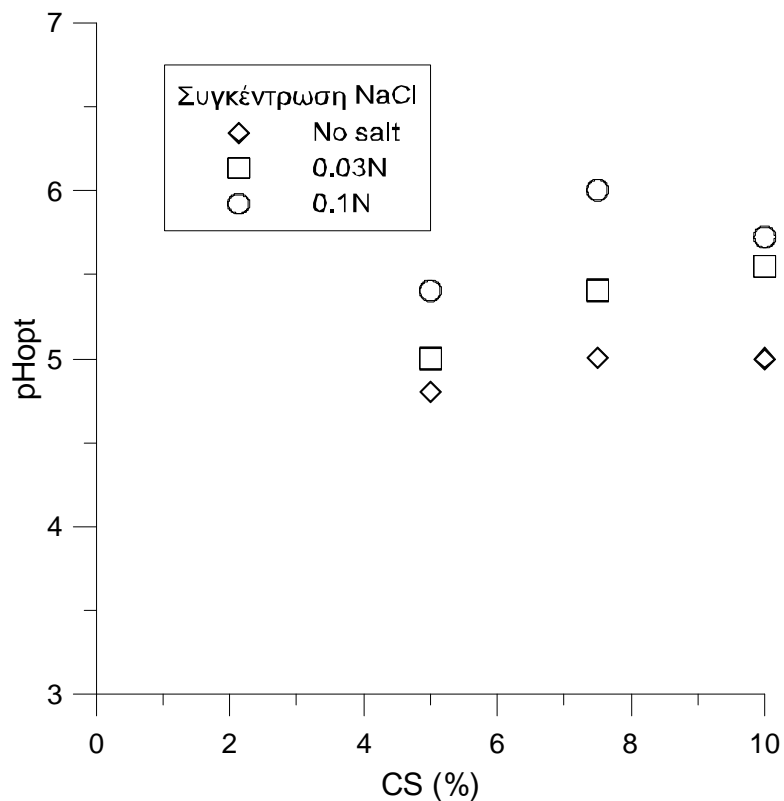
Σχήμα 2.26. Καμπύλη χρόνου γέλης t_g - pH διαλυμάτων για ποσοστό **CS = 10%**, συγκέντρωση NaCl ίση με 0.1N και σύγκριση με τη βιβλιογραφία (Gallagher, 2000)

Από τα σχήματα αυτά προκύπτουν συνολικά τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για κάθε συνδυασμό (CS, N) υπάρχει τιμή του pH, που θα ονομάζεται στο εξής pH_{opt} , για την οποία παρατηρείται ο ελάχιστος χρόνος γέλης (t_{gmin}). Αυτό συμβαίνει γιατί, σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία (π.χ. Gallagher 2000, ή βλέπε παράγραφο 2.1) σε τιμές $pH < pH_{opt}$ τα ιόντα υδροξυλίου που δημιουργούν το αρνητικό φορτίο στην επιφάνεια των σωματιδίων της πυριτίας αδρανοποιούνται και έτσι καθυστερεί η γέλη. Αντίθετα, σε τιμές $pH > pH_{opt}$ τα ιόντα υδροξυλίου είναι πάρα πολλά, και έτσι δημιουργούνται απωθητικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων της πυριτίας, οι οποίες και πάλι έχουν ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της γέλης.
- Η τιμή του pH_{opt} είναι διαφορετική για κάθε συνδυασμό (CS, N), αλλά κυμαίνεται μεταξύ 4.75 και 6.0 στους συνδυασμούς που ελέγχθηκαν εδώ. Το εύρος αυτό είναι σύμφωνο με τη βιβλιογραφία.
- Οι μετρήσεις που έγιναν στο πλαίσιο του έργου συμφωνούν και διευρύνουν το εύρος των μετρήσεων της βιβλιογραφίας (π.χ. **Σχήματα 2.24, 2.25**), και όλες μαζί συνιστούν ένα ικανό πλήθος μετρήσεων για πρακτικές εφαρμογές (π.χ. οι ελάχιστοι χρόνοι γέλης t_{gmin} κυμαίνονται από μερικές ώρες μέχρι σχεδόν 8 μέρες).



Σχήμα 2.27. Επίδραση του ποσοστού κατά βάρος πυριτίας CS(%) στην τιμή του ελάχιστου χρόνου γέλης t_{gmin} για διάφορες συγκεντρώσεις NaCl.



Σχήμα 2.28. Επίδραση του ποσοστού κατά βάρος πυριτίας CS(%) στην τιμή του «βέλτιστου» pH_{opt} για διάφορες συγκεντρώσεις NaCl.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν το ζεύγος (pH_{opt} , t_{gmin}) και αυτή πραγματοποιείται στα **Σχήματα 2.27 και 2.28**, όπου διερευνάται η επίδραση του ποσοστού κατά βάρος της πυριτίας CS(%) στις τιμές του t_{gmin} και pH_{opt} , αντίστοιχα για όλες τις κανονικότητες NaCl που μελετήθηκαν. Από τα σχήματα αυτά προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Ο ελάχιστος χρόνος γέλης t_{gmin} μειώνεται ραγδαία με την αύξηση του ποσοστού κατά βάρος της πυριτίας CS(%) και αρκετά σημαντικά με την αύξηση της συγκέντρωσης NaCl.
- Ίδιοι (ελάχιστοι) χρόνοι γέλης t_{gmin} μπορούν να επιτευχθούν με διαφορετικούς συνδυασμούς (CS, N), γεγονός που επιτρέπει τη βελτιστοποίηση κόστους – προσδοκώμενης αντοχής.
- Η τιμή του «βέλτιστου» pH_{opt} αυξάνεται με αύξηση της συγκέντρωσης NaCl, αλλά δεν υπάρχει σαφής συσχέτιση με το ποσοστό κατά βάρος CS(%), τουλάχιστον για τις πρακτικώς χρήσιμες τιμές CS = 5 έως 10% που εξετάστηκαν εδώ.

2.3. Μηχανικά χαρακτηριστικά

Στα πλαίσια διερεύνησης των μηχανικών χαρακτηριστικών του εμπλουτισμένου υγρού πόρων, στο **Εργαστήριο Εδαφομηχανικής Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής του Α.Π.Θ.** διαμορφώθηκαν δοκίμια από διάλυμα κολλοειδούς πυριτίας με ονομαστική διάμετρο 50mm και ύψος 100mm και κατά βάρος συγκέντρωση **CS = 6% και 10%**, ώστε να υπολογισθεί η αστράγγιστη διατμητική αντοχή τους. Η έννοια της «αστράγγιστης» διατμητικής αντοχής χρησιμοποιείται εδώ καταχρηστικά, και υποδηλώνει απλά ότι η εκτίμησή της γίνεται επί τη βάση των εξωτερικά επιβαλλόμενων τάσεων.

Το διάλυμα συγκέντρωσης πυριτίας CS = 6% διαθέτει συγκέντρωση 0.18N NaCl και $pH \approx 6,00$. Ο συνδυασμός αυτός οδηγεί σε χρόνο γέλης t_g περίπου ίσο με 11 ώρες. Αντίστοιχα, το διάλυμα συγκέντρωσης πυριτίας CS = 10% διαθέτει 0.03N NaCl και $pH \approx 6,00$ και μετατρέπεται σε γέλη σε 10 ώρες. Οι σχετικώς μικροί αυτοί χρόνοι γέλης επιλέχθηκαν για να καταστούν δυνατές οι εργαστηριακές δοκιμές σε εύλογο χρόνο. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος ωρίμανσης (curing time) των δοκιμίων ήταν τετραπλάσιος του χρόνου γέλης (gel time) των διαλυμάτων.

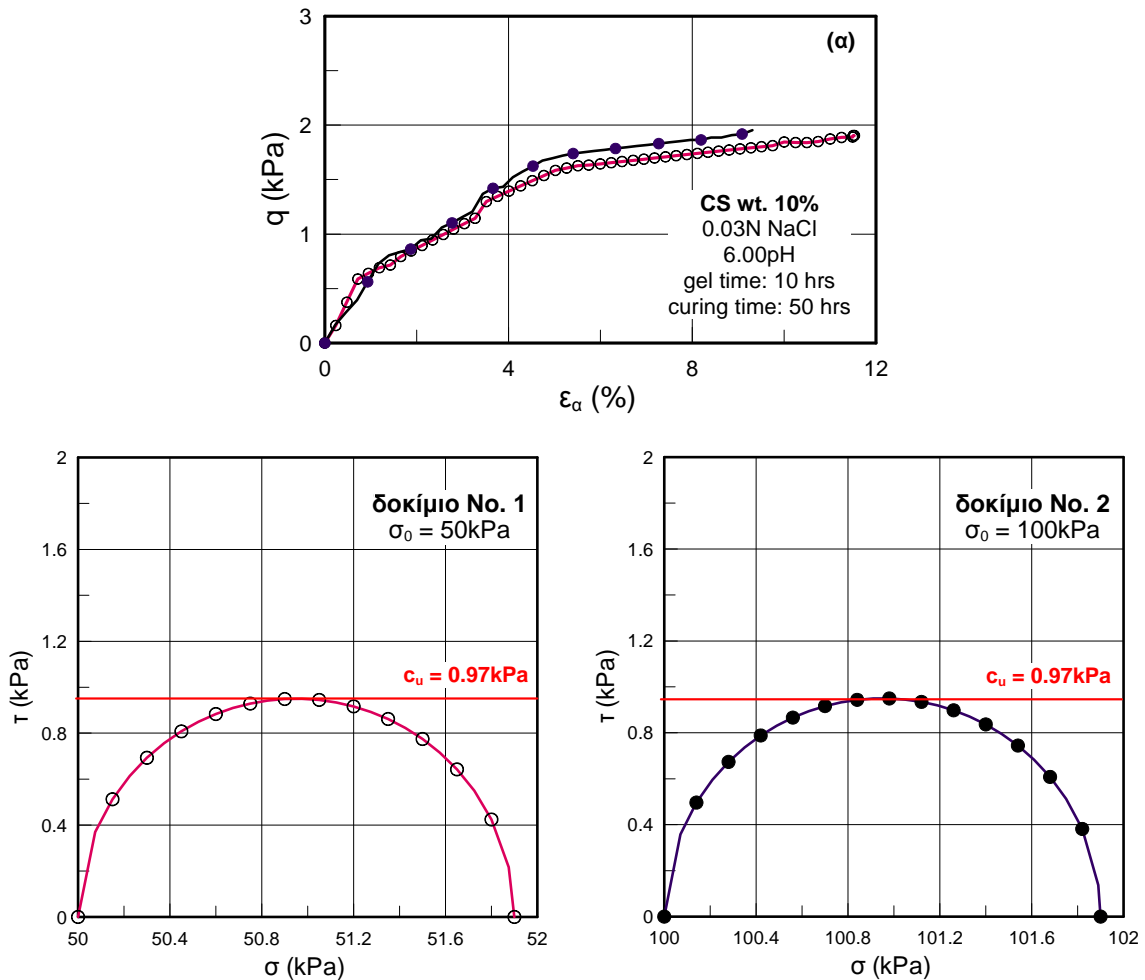
Όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.29**, τα δοκίμια που διαμορφώθηκαν από διάλυμα πυριτίας CS = 6% ήταν ασταθή και κατέστη αδύνατη η εργαστηριακή μέτρηση της «αστράγγιστης» διατμητικής αντοχής τους, που μπορεί να θεωρηθεί πρακτικώς μηδενική.



Σχήμα 2.29. Διαμόρφωση δοκιμών καθαρής πυριτίας CS = 6% και 10%.

Τα δοκίμια που διαμορφώθηκαν από διάλυμα πυριτίας **CS = 10%** δεν είχαν το ίδιο πρόβλημα (αστάθειας), και χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή τριαξονικών δοκιμών UU σε δύο ολικές τάσεις, $\sigma_0 = 50\text{kPa}$ και 100kPa . Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.30**. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.30α παρουσιάζεται η σχέση αποκλινουσών τάσεων – παραμορφώσεων, ενώ στο Σχήμα 2.30β παρουσιάζονται οι κύκλοι Mohr των δοκιμών στη μέγιστη διατμητική τάση και η εκτίμηση της «αστράγγιστης» διατμητικής αντοχής. Και στις δύο περιπτώσεις, στα 50kPa και 100kPa η «αστράγγιστη» διατμητική αντοχή προέκυψε ίση με $C_u = 0.97\text{kPa}$, η τιμή της οποίας είναι τόσο χαμηλή που μπορεί να σχετίζεται και με την παρουσία της ελαστικής μεμβράνης.

Χαμηλές τιμές αντοχής έχουν παρατηρηθεί και στη βιβλιογραφία (π.χ. τιμές $C_u = 2.1\text{kPa}$, Towhata 2007) για τέτοια υλικά (CS = 6.5%, με χρόνο ωρίμανσης 30 ημερών, αλλά άγνωστο κατά πόσο πρόκειται για Ludox®-SM), και αυτή η τάξη μεγέθους δείχνει να αποτυπώνει τη συμπεριφορά της κolloειδούς πυριτίας ως μιας γέλης με χαμηλή, σχεδόν αμελητέα, αντοχή, η οποία όμως δείχνει να είναι σημαντικά συμπιεστή (μέτρο ελαστικότητας αρκετών δεκάδων ή λίγων εκατοντάδων kPa, με μέτρηση λόγου Poisson 0.3, Towhata 2007). Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το γεγονός ότι η μετρηθείσα τιμή αντοχής $C_u = 0.97\text{kPa}$, αλλά και η σχέση αποκλινουσών τάσεων – παραμορφώσεων δεν εξαρτάται από το επίπεδο των ολικών τάσεων στο οποίο γίνεται η δοκιμή.



Σχήμα 2.30. Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών UU για $\sigma_0 = 50 \text{ kPa}$ και 100 kPa σε δοκίμια καθαρής σταθεροποιημένης πυριτίας wt. 10%. **(α)** Μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης, q με την αξονική παραμόρφωση, ϵ_a (%). **(β)** Κύκλοι Mohr στην αστοχία και «αστράγγιστη» διατμητική αντοχή.

3. ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

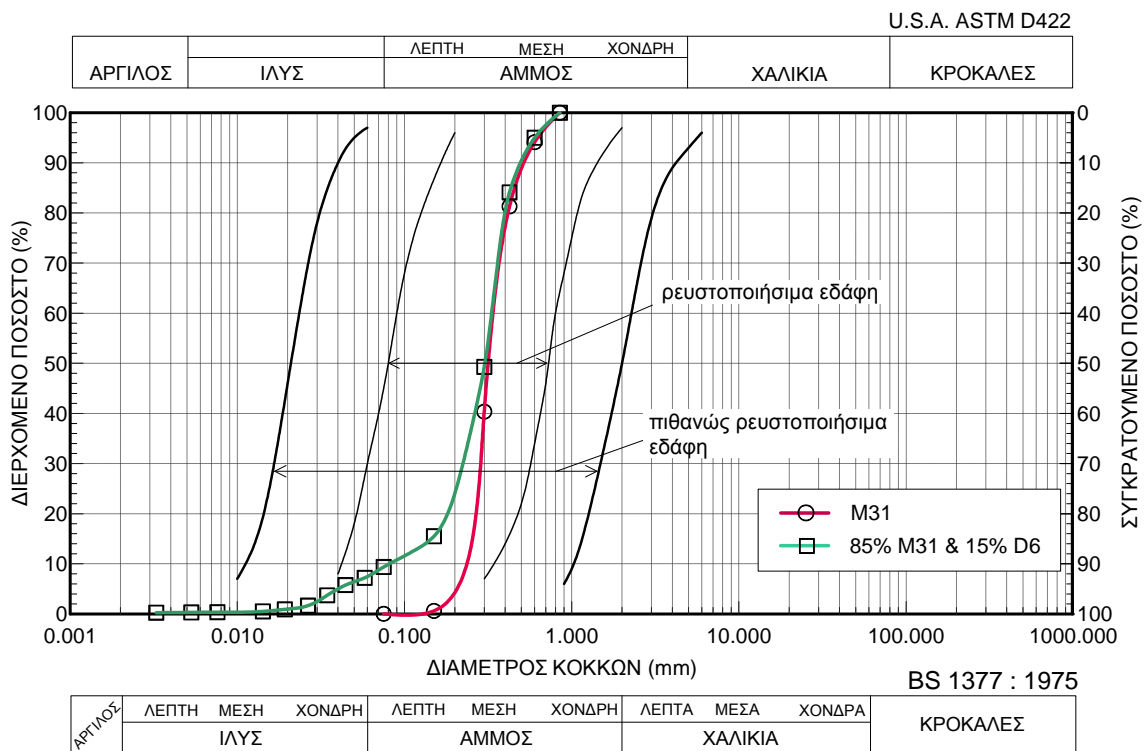
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αποτελέσματα από δοκιμές διαπερατότητας στα εδάφη που θα χρησιμοποιηθούν για τις ανάγκες του προγράμματος. Πιο συγκεκριμένα, στην παράγραφο 3.1 παρουσιάζεται η διαδικασία μέτρησης της διαπερατότητας, ενώ στην παράγραφο 3.2 δίνονται τα σχετικά αποτελέσματα. Η έμφαση δίνεται εδώ στην τεκμηρίωση και τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο **Εργαστήριο Εδαφομηχανικής Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής του Α.Π.Θ.**, αλλά στο τέλος δίνεται μια συνολική εικόνα και από άλλες δοκιμές διαπερατότητας που έγιναν σε συνεργαζόμενα εργαστήρια.

3.1. Διαδικασία δοκιμής διαπερατότητας

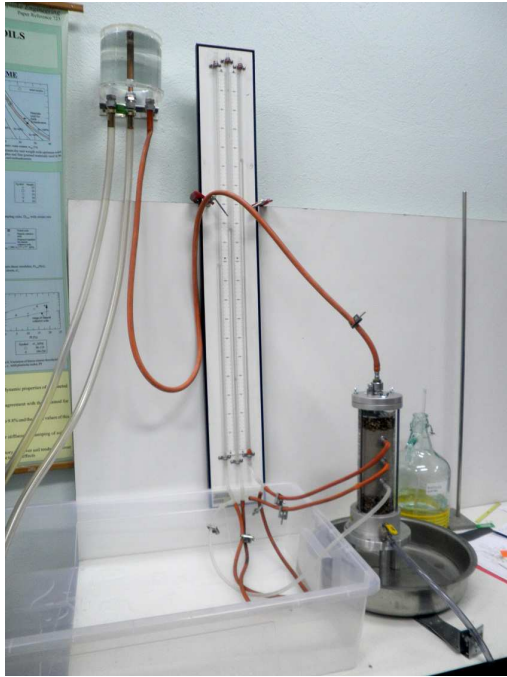
Στο Ε.Ε.Θ.Γ.Σ.Μ. του Α.Π.Θ. πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διαπερατότητας στην καθαρή άμμο και στο μείγμα άμμου-ιλύος με τη μέθοδο του σταθερού υδραυλικού φορτίου, σύμφωνα με τις Βρετανικές Προδιαγραφές (BS 1377 : Part 5 : 1990).

Σημειώνεται ότι έγινε χρήση απαερωμένου νερού σε όλα τα στάδια των δοκιμών. Οι κοκκομετρικές καμπύλες της άμμου και του μείγματος άμμου-ιλύος παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.

Τα δοκίμια διαμορφώθηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο της υγρής υποσυμπύκνωσης (undercompaction, Ladd 1974), η οποία προφέρει τη δυνατότητα διαμόρφωσης ομοιόμορφων δοκιμίων σε μεγάλο εύρος πυκνοτήτων. Μετά την διαμόρφωση των δοκιμίων και την τοποθέτηση φίλτρων ακολούθησε ο κορεσμός τους. Η κυψέλη του διαπερατόμετρου του Εργαστηρίου διαθέτει εσωτερική διάμετρο 75mm και τρία σημεία έλεγχου του υδραυλικού φορτίου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.1. Κοκκομετρικές καμπύλες της άμμου M31 και του μείγματος άμμου - ιλύος ($f_c = 10\%$), που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές διαπερατότητας.



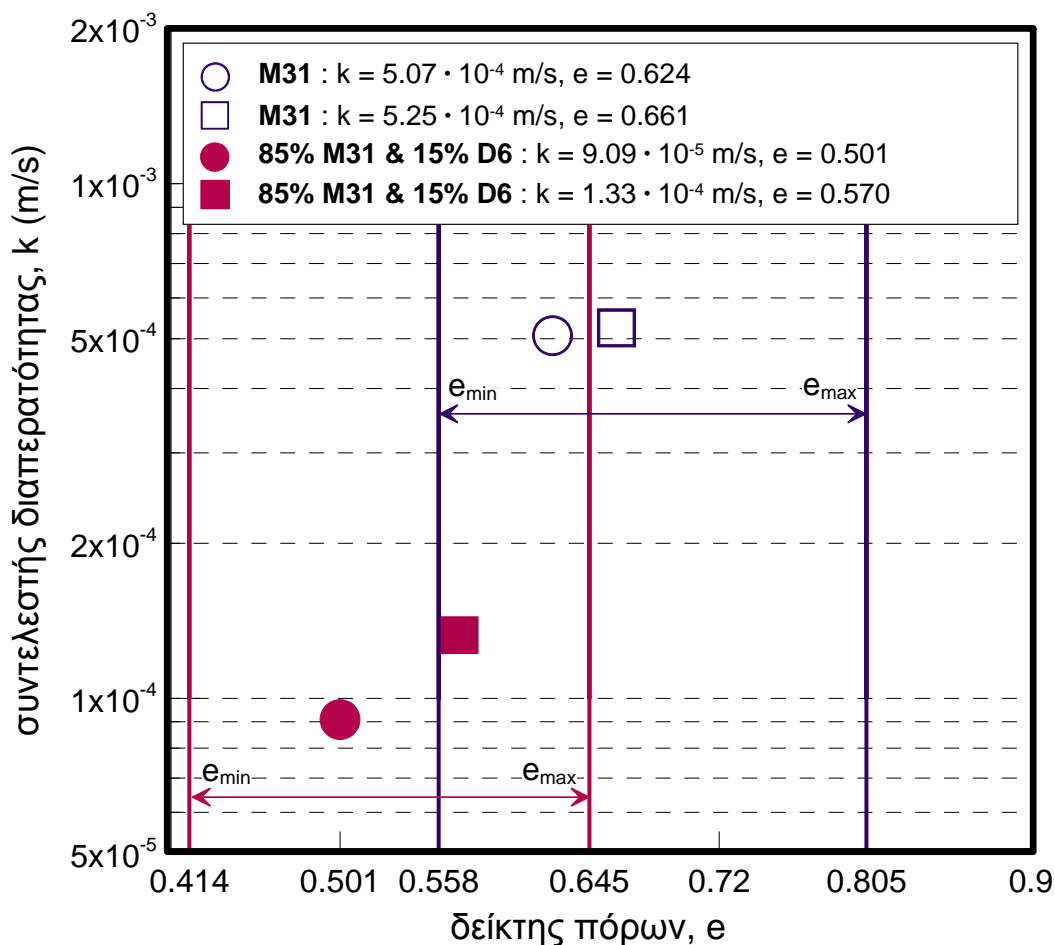
Σχήμα 3.2. Διάταξη του διαπερατόμετρου σταθερού υδραυλικού φορτίου του Ε.Ε.Θ.Γ.Σ.Μ. του Α.Π.Θ. (ενδεικτικά)

3.2. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται συνοπτικά στους Πίνακες 3.1, 3.2 και 3.3, που εκτελέστηκαν στα Α.Π.Θ., Παν. Πατρών και Π.Θ., αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1. Σύνοψη αποτελεσμάτων δοκιμών διαπερατότητας (στο Α.Π.Θ.) της άμμου και του μείγματος άμμου – ιλύος (τα αποτελέσματα και στο Σχήμα 3.3)

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	$1.33 \cdot 10^{-4}$

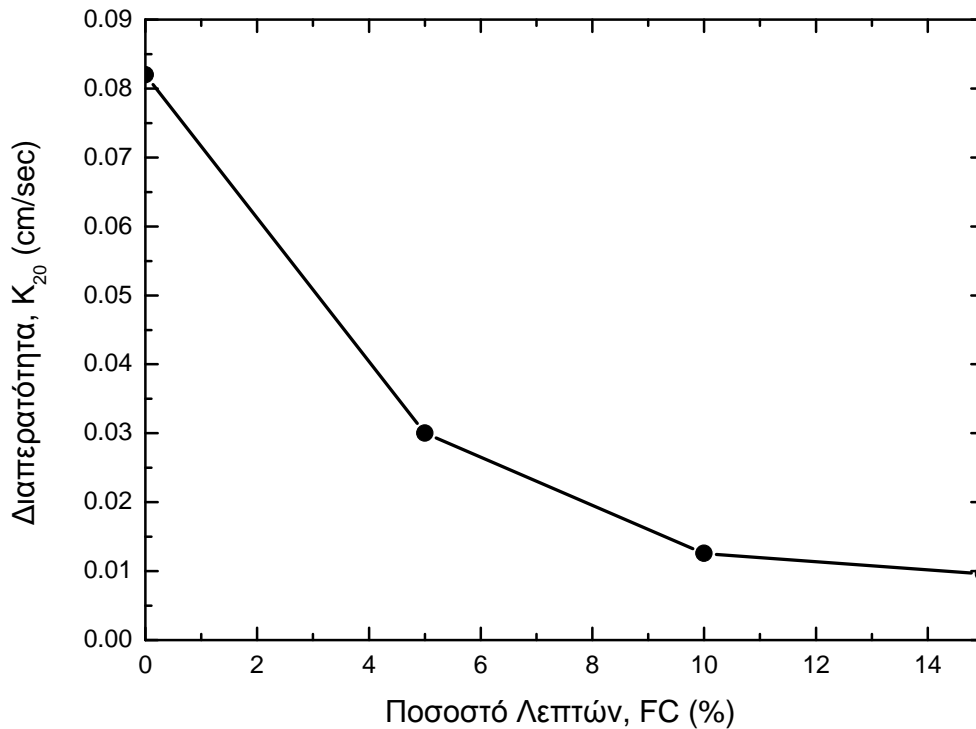


Σχήμα 3.3. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας (στο Α.Π.Θ.) της άμμου και του μείγματος άμμου - ιλύος.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 3.2 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 3.2. 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	$0.96 \cdot 10^{-4}$

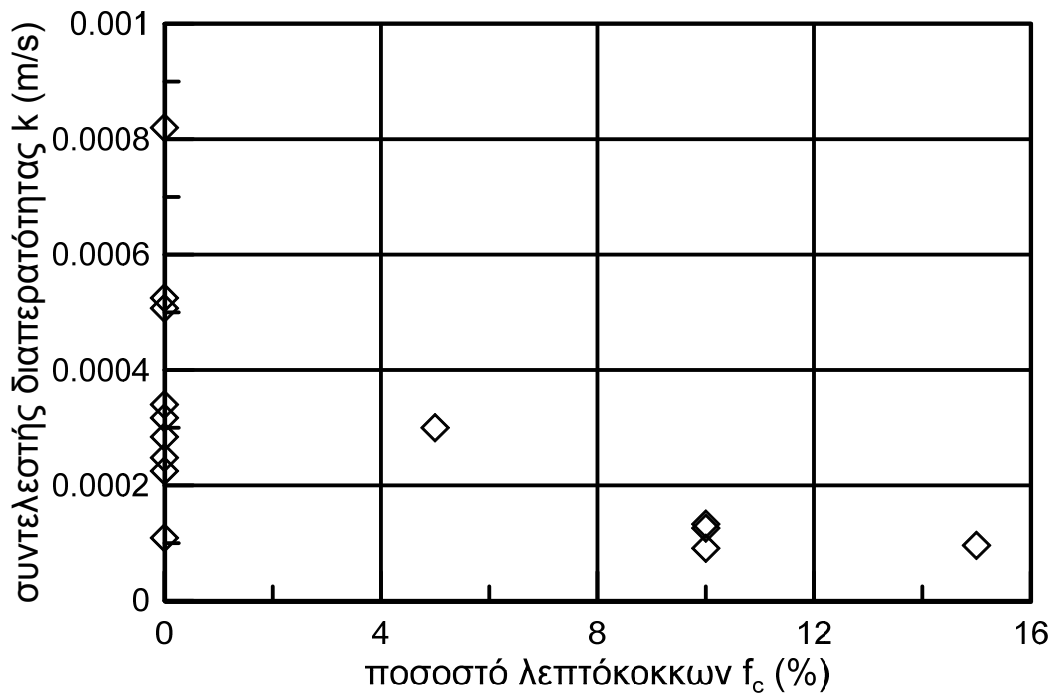


Σχήμα 3.4. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας (στο Παν. Πατρών) της άμμου και του μείγματος άμμου - ιλύος.

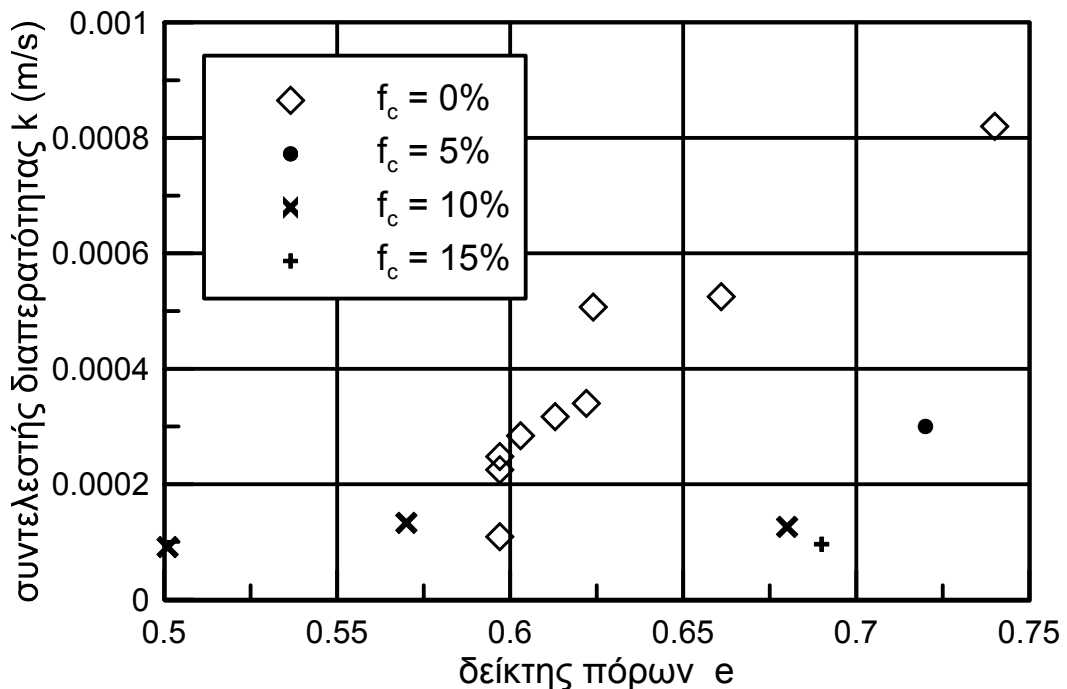
Επιπλέον, στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας που εκτελέστηκαν σε καθαρή άμμο διαφόρων πυκνοτήτων στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Π.Θ.).

Πίνακας 3.3. 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	$3.40 \cdot 10^{-4}$



Σχήμα 3.5. Επίδραση ποσοστού λεπτόκοκκων f_c (%) στο συντελεστή διαπερατότητας των μιγμάτων άμμου M31 – ιλύος D6 από όλες τις δοκιμές διαπερατότητας που εκτελέστηκαν.



Σχήμα 3.6. Επίδραση δείκτη πόρων e στο συντελεστή διαπερατότητας των μιγμάτων άμμου M31 – ιλύος D6 από όλες τις δοκιμές διαπερατότητας που εκτελέστηκαν.

Στη συνέχεια, στα Σχήματα 3.5 και 3.6 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας που έγιναν στο πλαίσιο του προγράμματος. Από το Σχήμα 3.5 προκύπτει ότι αύξηση του ποσοστού λεπτόκοκκων $f_c(\%)$ απομειώνει το συντελεστή διαπερατότητας, όπως αναμενόταν. Παρόλα αυτά η απομείωση αυτή δεν οφείλεται αποκλειστικά στο ποσοστό λεπτόκοκκων $f_c(\%)$, αλλά και στη μείωση του δείκτη πόρων e , όπως διαφαίνεται και από το Σχήμα 3.6. Σε κάθε περίπτωση, ακόμη και για μικρά ποσοστά λεπτόκοκκων $f_c(\%)$, ο συντελεστής διαπερατότητας είναι της τάξης του 10^{-4}m/s , οπότε γίνεται ευχερής η εισπίεση κολλοειδούς πυριτίας, απ' ό,τι προκύπτει και από το παρόν Παραδοτέο.

Αναφέρεται τέλος, ότι δοκιμές διαπερατότητας σε σταθεροποιημένα δοκίμια δεν πραγματοποιήθηκαν. Ο λόγος είναι ότι όταν η πυριτία γίνει σταθερή γέλη, η διαπερατότητα των σταθεροποιημένων μη-συνεκτικών εδαφών γίνεται πολύ μικρή, της τάξης αργιλικών υλικών (Gallagher 2000). Άλλωστε, η κολλοειδής πυριτία έχει χρησιμοποιηθεί και ως υλικό περιορισμού επέκτασης ρυπαντών σε εδάφη.

4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΠΥΡΙΤΙΑΣ ΣΕ ΕΔΑΦΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι δοκιμές εισπίεσης κολλοειδούς πυριτίας σε εδαφικά δοκίμια που έγιναν στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος. Οι δοκιμές αυτές στοχεύουν στη διερεύνηση των εισπιεσιμότητας της πυριτίας στα διάφορα εδάφη, και την κατοχύρωση των παραμέτρων που την καθορίζουν. Έτσι, στην παράγραφο 4.1 γίνεται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των δοκιμών που εκτελέστηκαν, και στην παράγραφο 4.2 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των εκτελεσθέντων δοκιμών.

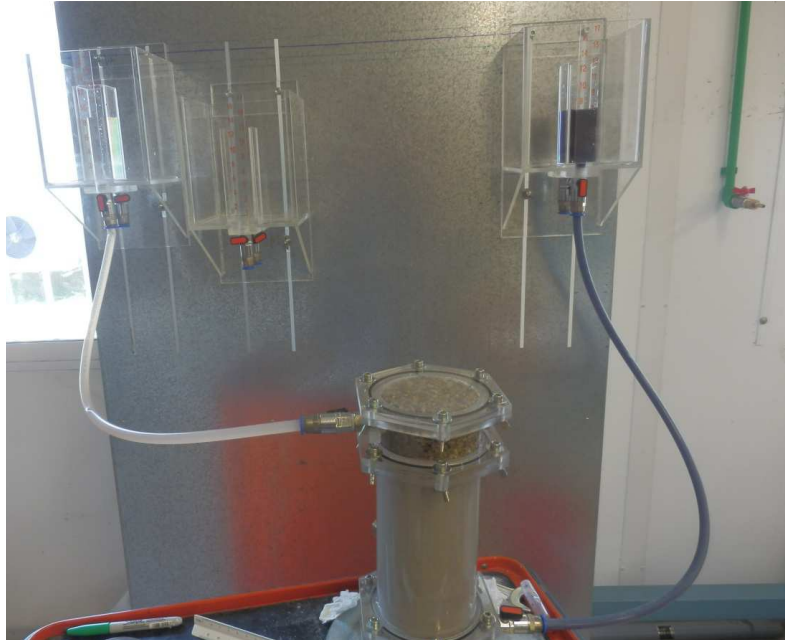
4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης και είδους δοκιμών

Για τις 1Δ δοκιμές κατακόρυφης εισπίεσης που κατασκευάστηκε μια διάταξη διαπερατομέτρου (από plexiglass) με ειδικές απαιτήσεις κατασκευής που φαίνεται στο Σχήμα 4.1 συνολικά, και με λεπτομέρεια στο Σχήμα 4.2.

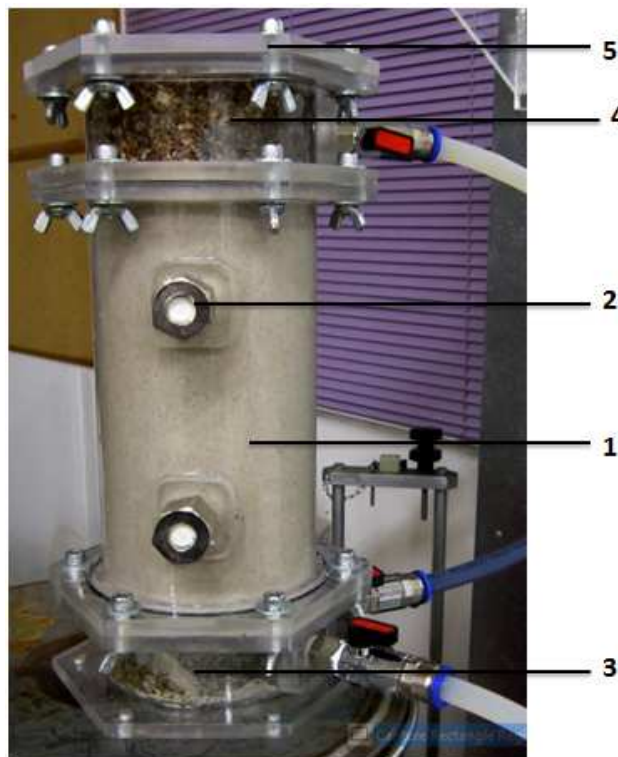
Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη αυτή αποτελείται από:

- Μεμονωμένα κυλινδρικά τμήματα ύψους 20cm και διαμέτρου 10cm, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2 (No1)
- Δειγματοληψίες πάνω στα τμήματα αυτά από τις οποίες γίνεται εξαγωγή του υγρού των πόρων, όπως αυτό φαίνεται αναλυτικά στο Σχήμα 4.2. (No2)
- Ένα κυλινδρικό τμήμα ύψους 5cm, με δύο ενσωματωμένες βάνες για την εισπίεση νερού και CS. (Σχήμα 4.2, No3)
- Ένα κυλινδρικό τμήμα ύψους 5cm, με μια ενσωματωμένη βάνη για την έξοδο του υγρού των πόρων, νερού ή CS. (Σχήμα 4.2, No4)
- Τάπα για το κλείσιμο του διαπερατομέτρου (Σχήμα 4.2, No5)

- Τρεις δεξαμενές, μια για την είσοδο του νερού, μια για την είσοδο του CS και μία για την έξοδο του υγρού των πόρων. (Σχήμα 4.1)
- Σωλήνες για την σύνδεση των δεξαμενών με το διαπερατόμετρο. (Σχήμα 4.1)
- O-rings για τη στεγάνωση κατά την προετοιμασία του δοκιμίου και κατά τη διάρκεια του πειράματος ενδιάμεσα σε κάθε μεμονωμένο τμήμα



Σχήμα 4.1. Κατασκευασθείς εξοπλισμός διαπερατόμετρου για την εισπίεση κολλοειδούς πυριτίας (χρωματισμένη μπλε) σε κατακόρυφη εδαφική στήλη.



Σχήμα 4.2. Διάταξη διαπερατόμετρου και επιμέρους τμήματα.

Η αρχική υδραυλική κλίση που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε ξεχωριστό πείραμα, επιτεύχθηκε με διαφορά στάθμης ανάμεσα στις δεξαμενές εισόδου (με πυριτία) και εξόδου (αρχικώς με νερό), και ήταν ίση με 0.05. 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 βαίνει μειούμενη με το χρόνο, λόγω της προς τα άνω εισπίεσης ενός υδατικού διαλύματος βαρύτερου του νερού (βλέπε λεπτομέρειες στην παράγραφο 4.2).

Προετοιμασία μείγματος CS

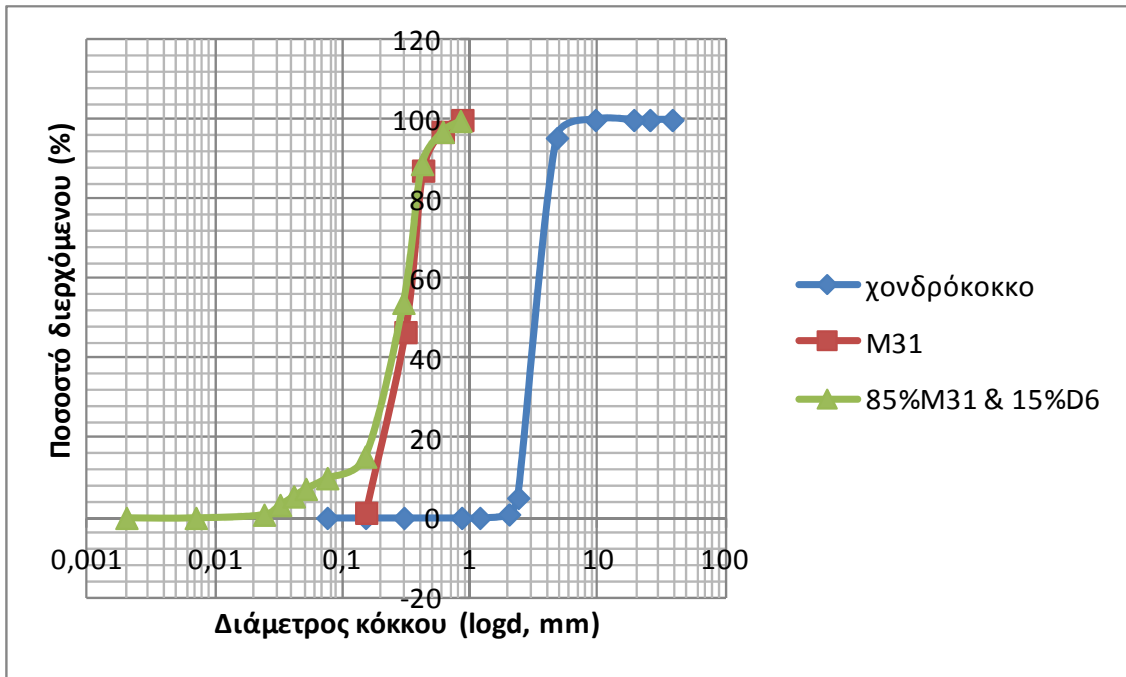
Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, έγιναν 1Δ δοκιμές εισπίεσης σε μικρά και μεγάλα δοκίμια, ύψους 20cm και 40cm, αντίστοιχα. Για τις ανάγκες των πειραμάτων εισπίεσης σε αμμώδη δοκίμια, επιλέχθηκε ένα διάλυμα πυριτίας με CS = 10%, και τιμές pH=5.55 και συγκέντρωση καθαρού NaCl ίση με 0.1N για τα μικρά, και διάλυμα με pH=7.00 και συγκέντρωση καθαρού NaCl ίση με 0.1N για τα μεγάλα δοκίμια. 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, δηλαδή αντίστοιχα εντελώς με τα διαλύματα για τις δοκιμές ιξωδομέτρου που περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2 του παρόντος Παραδοτέου. 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.

Προετοιμασία διαπερατόμετρου

Οι δοκιμές εισπίεσης εκτελέστηκαν στα παρακάτω δοκίμια:

- Δοκίμιο άμμου M31 με μικρό μέγεθος (20cm)
- Δοκίμιο άμμου M31 με μεγάλο μέγεθος (40cm)
- Δοκίμιο ιλυώδους άμμου (85% M31 – 15% ιλύς D6) με μικρό μέγεθος (20cm)

Για την προετοιμασία των δοκιμίων άμμου και ιλυώδους άμμου, συναρμολογήθηκε το διαπερατόμετρο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. 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 4.3.

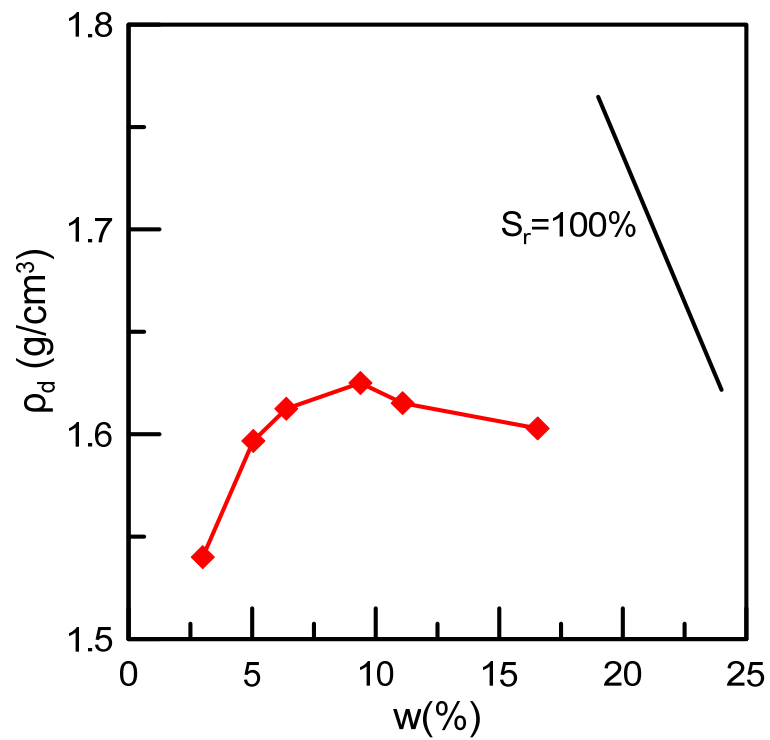


Σχήμα 4.3. Σύγκριση κοκκομετρικής διαβάθμισης χονδρόκοκκου υλικού που τοποθετείται στο πάνω και στο κάτω τμήμα του διαπερατόμετρου, άμμου (M31) και ιλυώδους άμμου (85%M31&15%D6).

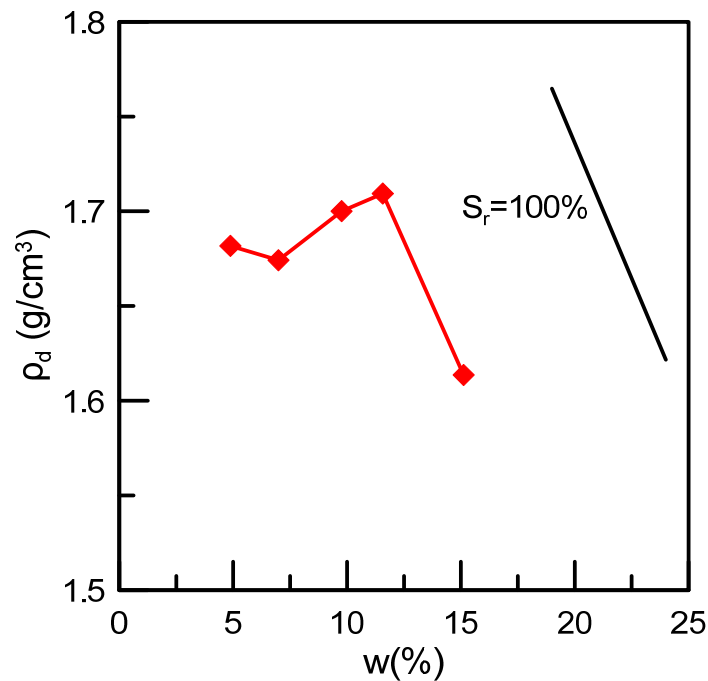
Αφού τοποθετήθηκε η κάτω στρώση χονδρόκοκκου υλικού (πάχους 5cm, στο τμήμα 3, βλέπε Σχήμα 4.2), στη συνέχεια τοποθετήθηκαν όσα τμήματα μήκους 20cm χρειάζονται ανά δοκιμή. Εντός αυτών, προετοιμάζεται το δοκίμιο άμμου (ή ιλυώδους άμμου, ανάλογα με τη δοκιμή), με τη μέθοδο υπο-συμπύκνωσης (under-compraction, Ladd, 1978) σε εννιά στρώσεις, με τη χρήση ειδικού εργαλείου (tamper) που κατασκευάστηκε για το σκοπό αυτό, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Η συμπύκνωση γίνεται 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 επιβάλλει ενέργεια σε όλη τη διατομή του δοκιμίου ταυτόχρονα. Η αρχική υγρασία που χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή του δοκιμίου επιλέχθηκε ίση με 6%. Στα Σχήματα 4.5 και 4.6 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 4.5) 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 αμμόδη 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 4.4. Εργαλείο για συμπύκνωση εδαφικού υλικού (tamper).



Σχήμα 4.5. Αποτελέσματα πρότυπης δοκιμής Proctor για την άμμο M31.



Σχήμα 4.6. Αποτελέσματα πρότυπης δοκιμής Proctor για την ιλυώδη άμμο μίγματος 85% M31 – 15% D6.

Τα υπόλοιπα τμήματα μήκους 20cm (τμήμα 2, βλ. Σχήμα 4.2) 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 4.2).

Μετά την προετοιμασία τους, τα δοκίμια αφέθηκαν να κορεστούν μέσω ενυδάτωσης (hydration) που πραγματοποιήθηκε επιτρέποντας την κυκλοφορία καθαρού νερού μέσω των δεξαμενών για 1 μέρα και υπό χαμηλή πίεση. 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 4.1, 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 4.2). Όμως, δεδομένης της κοκκομετρίας του χονδρόκοκκου υλικού (βλ. σύγκριση με άμμο και ιλυώδη άμμο στο Σχήμα 4.3) και της μικρής διαδρομής του νερού εντός αυτού (5cm, έναντι 20 ή 40cm στην άμμο ή την ιλυώδη άμμο) οι μετρούμενες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας k θεωρούνται ως αντιστοιχούσες

πρακτικώς στο μετρούμενο αμμώδες έδαφος, και μη επηρεασμένες από το χονδρόκοκκο έδαφος. Άλλωστε, ανεξάρτητη δοκιμή διαπερατότητας που εκτελέστηκε σε δοκίμιο του χονδρόκοκκου υλικού έδωσε τιμή $k = 8.8 \cdot 10^{-4}$ m/s, γεγονός που πρακτικώς επιβεβαιώνει την ως άνω απλούστευση.

Αναφέρεται τέλος, ότι εκτελέστηκε άλλη μια δοκιμή εισπίεσης σε δοκίμιο άμμου M31 μήκους 40cm από την οποία εξήχθησαν μόνο δειγματοληψίες μέτρησης του ποσοστού κατά βάρος πυριτίας CS(%) στο υγρό των πόρων (δοκιμή 7), και για την οποία δεν υπάρχουν άλλες μετρήσεις, και για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζεται καν στον Πίνακα 4.1. Τέλος, επισημαίνεται ότι έγινε και μια δοκιμή εισπίεσης σε δοκίμιο ιλυώδους άμμου, η οποία και πάλι δεν παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1, καθώς υπήρξε δυσχέρεια στον εντοπισμό της στάθμης της εισπιεζόμενης πυριτίας λόγω της ύπαρξης των λεπτόκοκκων (βλέπε παρακάτω για λεπτομέρειες).

Πίνακας 4.1. 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	$3.40 \cdot 10^{-4}$

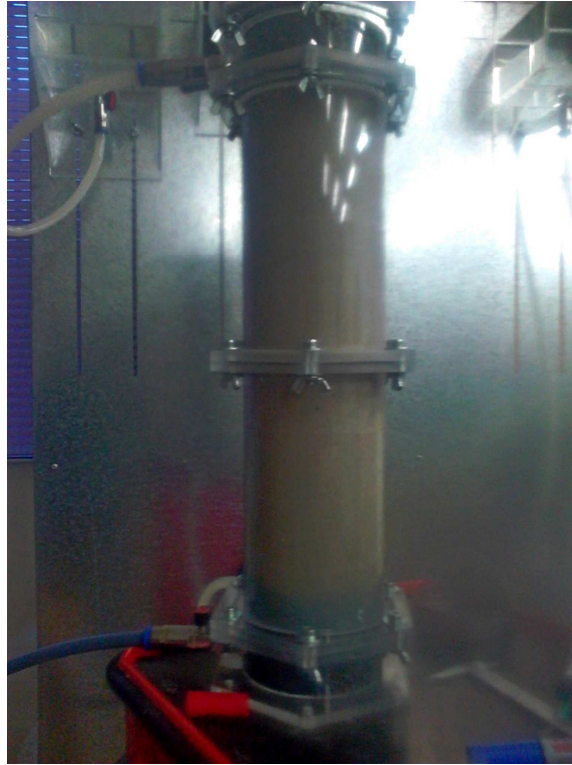
Χαρακτηριστικές απεικονίσεις της πειραματικής διαδικασίας εισπίεσης πυριτίας σε μικρό και μεγάλο δοκίμιο παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.7, 4.8, 4.9, ενώ στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική εικόνα από τη δοκιμή εισπίεσης στο δοκίμιο ιλυώδους άμμου, από την οποία προκύπτει η αδυναμία ευχερούς παρατήρησης του μετώπου της κολλοειδούς πυριτίας. Στο εν λόγω δοκίμιο, επίσης δεν υπήρξε δυνατότητα δειγματοληψίας πυριτίας, και πάλι πιθανώς λόγω των λεπτόκοκκων που πιθανώς έφρασαν την βελόνα σύριγγας που χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία υγρού πόρων (βλ. και Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.7. Θέση μετώπου κολλοειδούς πυριτίας (με μπλέ χρώμα) μέσα σε μικρό δοκίμιο άμμου. Η πυριτία έχει εμβαπτίσει πλήρως το χοδρόκοκκο υλικό και εισέρχεται στο αμμώδες.



Σχήμα 4.8. Θέση μετώπου κολλοειδούς πυριτίας (με μπλέ χρώμα) στο μέσο ύψος εντός μικρού δοκιμίου άμμου. Φαίνεται η σκούρα μπλέ 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

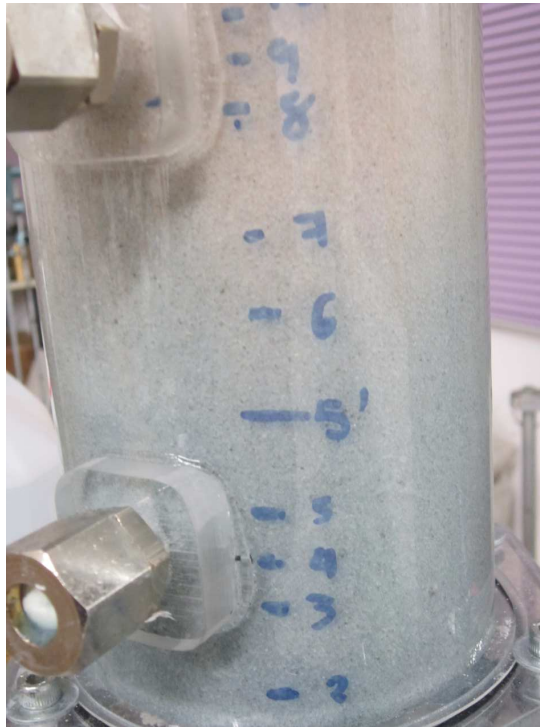


Σχήμα 4.9. Θέση μετώπου κολλοειδούς πυριτίας (με μπλέ χρώμα) μέσα στο μεγάλο δοκίμιο άμμου. Η πυριτία έχει εμβαπτίσει πλήρως το χοδρόκοκκο υλικό και έχει ξεκινήσει την άνοδό της στα κάτω 20cm του δοκιμίου. Φαίνεται ο σωλήνας εισόδου της πυριτίας στο κάτω μέρος του δοκιμίου, γεμάτος από σκούρα μπλέ πυριτία

4.2 Λεπτομέρειες πειραμάτων εισπίεσης πυριτίας

Στη συνέχεια των όσων γενικών και περιγραφικών παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.1, το ενδιαφέρον εδώ δίνεται στη διαδικασία με την οποία η βαρύτερη και υψηλότερου ιξώδους πυριτία πρακτικώς εκτοπίζει (ή όχι;) το ελαφρύτερο και χαμηλότερου ιξώδους νερό, όταν εισπιέζεται κατακόρυφα προς τα άνω με χαμηλή πίεση. Για να διερευνηθεί αυτό, η έμφαση δίνεται στις λεπτομέρειες δύο (2) εκ των δοκιμών εισπίεσης, τις δοκιμές 4 και 5 που εκτελέστηκαν σε μικρό δοκίμιο άμμου M31 (βλ. Πίνακα 4.1). Ο λόγος που γίνεται αυτή η επιλογή είναι ότι οι δοκιμές αυτές μπορούν να θεωρηθούν ευχερώς τυπικές της όλης διαδικασίας, και η μελέτη των λεπτομερειών τους μπορεί να αποδώσει χρήσιμα συμπεράσματα για την διαδικασία εισπίεσης πυριτίας που αφορούν σε όλες τις δοκιμές και γενικότερα στο φαινόμενο.

Συγκεκριμένα, τα δοκίμια 4 και 5 προετοιμάστηκαν με τη μέθοδο υπο-συμπύκνωσης όπως αυτή προτάθηκε από τον Ladd (1978) σε εννιά στρώσεις συνολικού πάχους 20cm (+ 5cm χοδρόκοκκο έδαφος πάνω και κάτω), με τελικό δείκτη πόρων ίσο με $e=0.603$ και 0.613 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.10. Αδυναμία σαφούς εντοπισμού μετώπου πυριτίδας εντός δοκιμίου ιλυώδους άμμου. Η ύπαρξη πυριτίδας εντός του δοκιμίου δεν είναι όμως αμφισβητήσιμη δεδομένης της αλλαγής χρώματος στο κάτω έναντι του άνω μέρους του δοκιμίου.

Το δοκίμιο εντός του διαπερατόμετρου συνδέθηκε με σωλήνα από την πάνω πλευρά (άνω βάνα) και με ανοιχτή την κάτω βάνα, προκειμένου να εισέλθει από πάνω απιονισμένο νερό με χαμηλή υδραυλική κλίση. Το νερό αντικαθιστά σιγά-σιγά τον αέρα που ενυπάρχει από τη διαδικασία προετοιμασίας του δοκιμίου, και για το λόγο αυτό η διαδικασία αυτή ονομάζεται ενυδάτωση (hydration) και σε όλα τα πειράματα διήρκησε 1 μέρα. Στη συνέχεια, η κάτω βάνα έκλεισε και το δοκίμιο αφέθηκε να σε ηρεμία για 1 μέρα ακόμα, υπό υδροστατικές συνθήκες.

Μετά την πάροδο 2 ημερών, έγινε δοκιμή διαπερατότητας με σταθερή ροή νερού από πάνω προς τα κάτω υπό δύο διαφορετικές μικρές αλλά σταθερές υδραυλικές κλίσεις. Οι συγκεκριμένες δοκιμές έγιναν με είσοδο νερού από την άνω βάνα μέσω σωλήνα και έξοδο νερού από την κάτω βάνα (χωρίς σωλήνα) και μέτρηση του χρόνου που απαιτείται για την έξοδο 10, 15, 20, 25, 30, 35, 50ml νερού εντός ογκομετρικού σωλήνα. Η παρουσίαση των λεπτομερών αποτελεσμάτων αυτών των δοκιμών θεωρείται μη αναγκαία στο πλαίσιο του παρόντος, και επισημαίνεται απλά ότι προέκυψε διαπερατότητα ίση με $k = 2.84 \cdot 10^{-4} \text{m/s}$ και $3.17 \cdot 10^{-4} \text{m/s}$ για τα δοκίμια 4 και 5, αντίστοιχα, τιμές συμβατές με τη μικρή διαφορά στο δείκτη πόρων στα 2 αυτά δοκίμια.

Μετά από το πείραμα διαπερατότητας προκειμένου να αποκατασταθούν οι υδροστατικές συνθήκες, συνδέθηκαν τόσο η πάνω όσο και η κάτω βάνα με τις δεξαμενές απιονισμένου νερού και μετά άνοιξαν οι βάνες 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 σε μπλε απόχρωση. Στόχος των πειραμάτων εισπίεσης ήταν η χρήση μικρών υδραυλικών κλίσεων και κατακόρυφη προς τα άνω εισπίεση. Έτσι, η στάθμη της πυριτίας τοποθετήθηκε 1cm πιο ψηλά από τη στάθμη που οδηγεί σε συνθήκες ισορροπίας (μη-ροής) όταν η κάτω βάνα συνδέεται με την δεξαμενή εισόδου πυριτίας και η άνω με τη δεξαμενή εισόδου. Η εναλλαγή στην κάτω βάνα μεταξύ των 2 δεξαμενών εισόδου νερού και πυριτίας είναι ευχερής, δεδομένου ότι το τμήμα του διαπερατομέτρου που τοποθετείται στην κάτω πλευρά του δοκιμίου έχει 2 βάνες στο ίδιο ύψος και έτσι είναι εύκολη η εναλλαγή μεταξύ των 2 δεξαμενών εισόδου. Η επιλεγείσα τιμή του 1cm αντιστοιχεί σε «αρχική» υδραυλική κλίση ίση με 0.05, καθώς το μήκος του δοκιμίου άμμου είναι 20cm (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 καθόλη την πειραματική διαδικασία. Αυτό επιτεύχθηκε με τη διαρκή προσθήκη πυριτίας στην ομώνυμη δεξαμενή εισόδου και την ταυτόχρονη αφαίρεση υγρού από τη δεξαμενή εξόδου, όποτε χρειαζόταν. 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.

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 δοκιμίου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11. Η μέτρηση των απαιτούμενων χρόνων για την κάλυψη συγκεκριμένων αποστάσεων κατά μήκος του δοκιμίου επέτρεψε τον υπολογισμό της μετρούμενης ταχύτητας διήθησης πυριτίας V_{meas} μέσα στο δοκίμιο.

Τέλος, ταυτόχρονα με τη δοκιμή εισπίεσης, γινόταν 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 αλλάζει με το χρόνο.

Οι τρεις αυτές μετρήσεις και το πως αλλάζουν με το χρόνο χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των δοκιμών εισπίεσης στην παράγραφο 4.3 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.11. 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

Στις εν λόγω δοκιμές 4 και 5 παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ότι η εισπίεση πρακτικώς σταμάτησε (το μέτωπο της πυριτίας σταθεροποιήθηκε) παρά το γεγονός ότι η διαφορά στάθμης στις δεξαμενές εισόδου (πυριτίας) και εξόδου (νερού) παρέμενε σταθερή. Συγκεκριμένα, στη δοκιμή 4 η εισπίεση πρακτικώς σταμάτησε τη χρονική στιγμή που το μέτωπο της πυριτίας έφτασε στα 13cm πάνω από την κάτω ίνα της άμμου, ενώ αντίστοιχα, στη δοκιμή 5 το ίδιο συνέβη στα 11cm. Ο λόγος που πρακτικώς σταμάτησε η ροή ήταν ότι στις ανεξάρτητες μετρήσεις του ιξώδους, η πυριτία εκείνη τη στιγμή είχε ήδη φθάσει να χαρακτηρίζεται από ιξώδες 6cP, δηλαδή η πυριτία έχει γίνει επαρκώς «παχύρρευστη» για να μη μπορεί να εισπιαστεί μέσα σε ένα μη-συνεκτικό έδαφος (τουλάχιστον υπό μικρή υδραυλική κλίση). Το αποτέλεσμα αυτό είναι συμβατό με τη βιβλιογραφία, όπου η εισπίεση θεωρείται ότι ολοκληρώνεται όταν το ιξώδες της πυριτίας φτάσει τα 3.6 – 4.0cP (Gallagher and Lin, 2009). Η διαφορά στις ανωτέρω οριακές τιμές του ιξώδους είναι φυσιολογική, αν σκεφτεί κανείς ότι σε τιμές ιξώδους μεγαλύτερη από 3.5cP περίπου, η άνοδος της τιμής του ιξώδους είναι ραγδαία (βλέπε σχετικές καμπύλες στην παράγραφο 2 του παρόντος Π2).

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(%)

Η δειγματοληψία ικανοποιητικής ποσότητας υγρού των πόρων γινόταν με φαρμακευτική σύριγγα (βλ. Σχήμα 4.8 για τη διαδικασία συλλογής και Σχήμα 4.12 για την τυπική ποσότητα δείγματος). Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε ανοξειδωτους υποδοχείς και αφέθηκαν στο φούρνο στους 200°C για δύο ημέρες, μια διαδικασία που έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν (Lin 2006, Gallagher and Lin 2009).

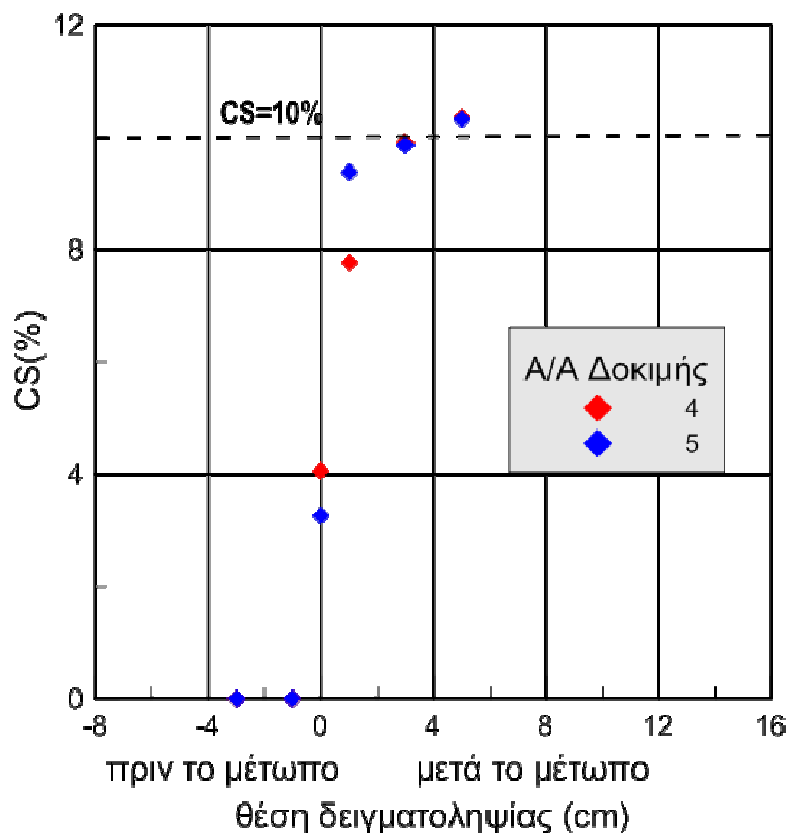


Σχήμα 4.12. Δείγμα χρωματισμένου (μπλε) υγρού πόρων με πυριτία μετά τη δειγματοληψία και εντός της φαρμακευτικής σύριγγας.

Η μάζα του υλικού που απέμεινε μετά το ψήσιμο 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

συμπεριλαμβάνεται και η μάζα του NaCl, αλλά και η όποια μάζα των νανοσωματιδίων του χρώματος, αλλά και οι δύο θεωρούνται αμελητέες για τις ανάγκες του πειράματος σε σχέση με τη μάζα της πυριτίας. Οι δειγματοληψίες γίνονταν μέσω συγκεκριμένων υποδοχών στο διαπερατόμετρο, και σημαντικό για τις ανάγκες μας ήταν το ποσοστό CS(%) που μετράται σε κάθε θέση μέσα στο δοκίμιο, συγκριτικά με τη θέση που βρίσκεται το μέτωπο της πυριτίας. Με άλλα λόγια, 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.

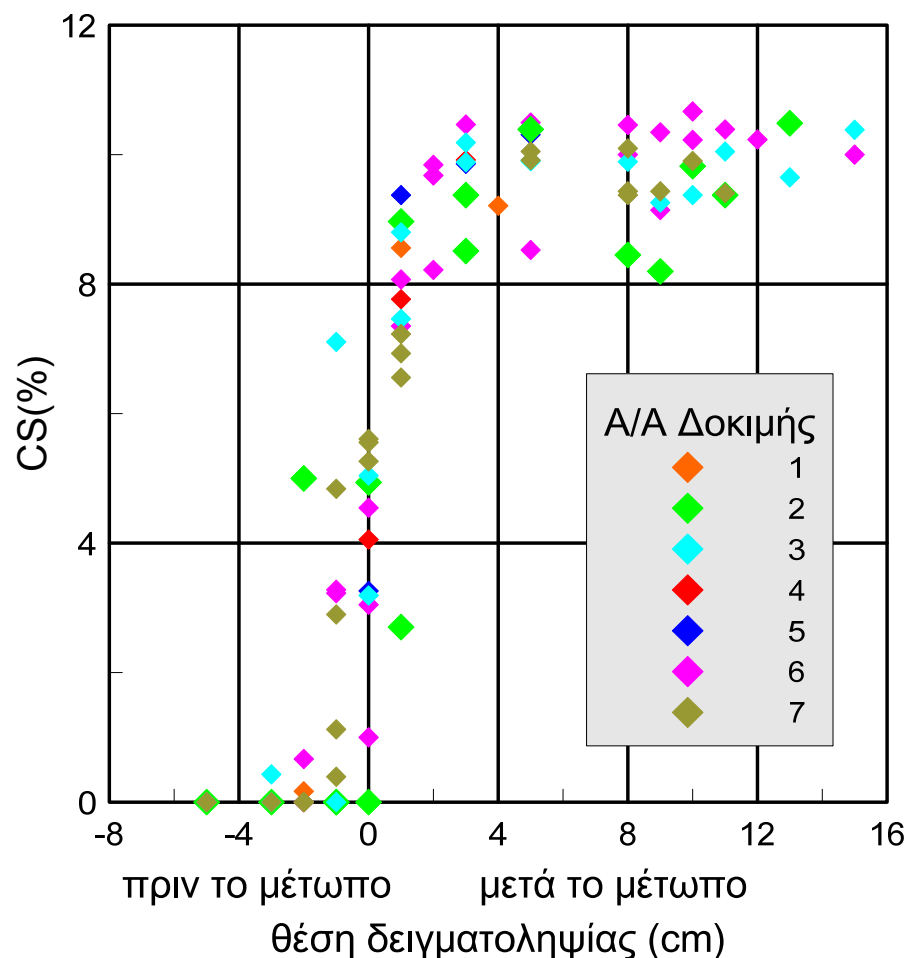
Συνεπώς, τα ποσοστά πυριτίας κατά βάρος CS(%) στα δείγματα που εξήχθησαν από τις δοκιμές #4 και #5 ως συνάρτηση της θέσης (απόστασης) της δειγματοληψίας από το οπτικά εκτιμώμενο μέτωπο της πυριτίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.13. Οι δειγματοληψίες που αναφέρονται σε αρνητικές τιμές θέσης στον άξονα X αφορούν δείγματα που ελήφθησαν από υποδοχείς που βρίσκονταν πριν το μέτωπο, 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.



Σχήμα 4.13. Ποσοστό πυριτίας κατά βάρος CS(%) σε σχέση με την απόσταση του σημείου δειγματοληψίας από το μέτωπο (Δοκιμή 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} στα πειράματα #4 και #5.

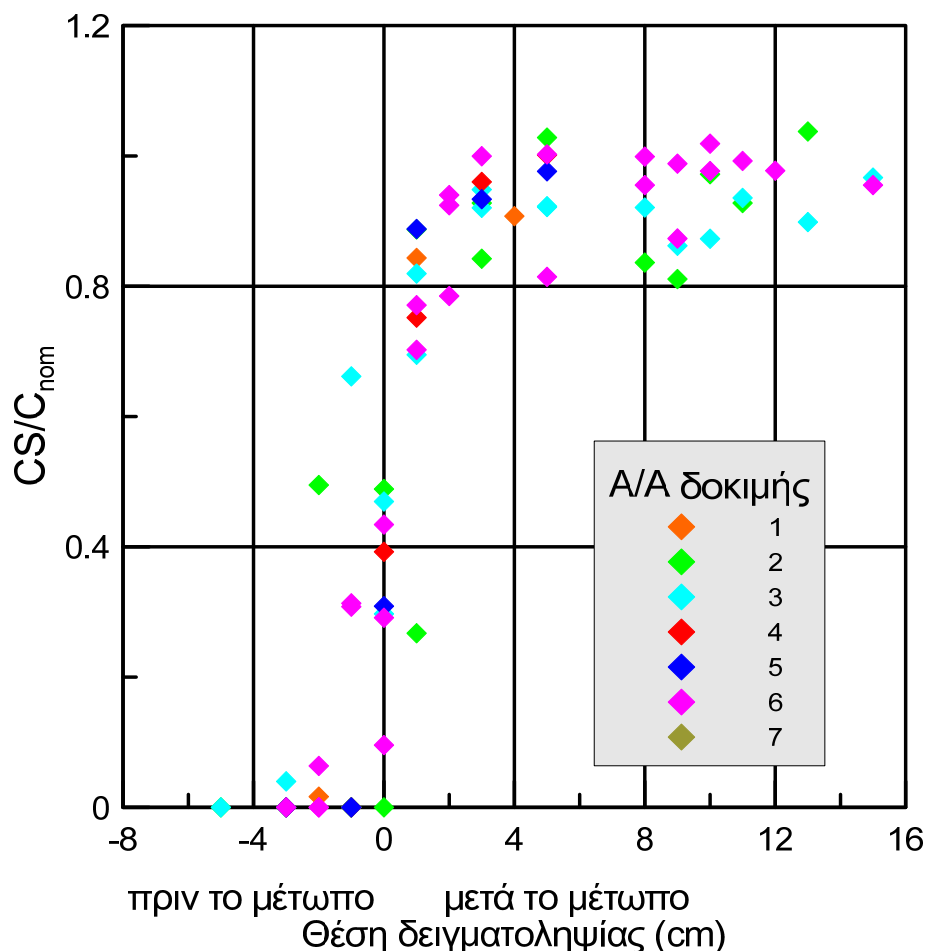
Για να διασαφηνιστεί αν η συμπεριφορά αυτή είναι χαρακτηριστική για όλες τις δοκιμές εισπίεσης που εκτελέστηκαν, το Σχήμα 4.14 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων CS(%) και από τις επτά (7) δοκιμές εισπίεσης που παρουσιάζονται εδώ. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων CS(%) παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.14, ως συνάρτηση της θέσης της δειγματοληψίας συγκριτικά με το μέτωπο της πυριτίας (δηλαδή στη μορφή του Σχήματος 4.12). Τα ίδια συγκεντρωτικά αποτελέσματα επαναλαμβάνονται στο Σχήμα 4.15, απλά το ποσοστό κατά βάρος της πυριτίας CS παρουσιάζεται κανονικοποιημένο ως προς την ονομαστική τιμή της πυριτίας στο υγρό πόρων, δηλαδή εκείνη κατά την Παρασκευή του διαλύματος της πυριτίας CS_{nom} .



Σχήμα 4.14. 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 4.15. 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.

4.3 Αδρή αναλυτική προσομοίωση προς τα άνω 1Δ εισπίεσης πυριτίας

Όπως περιγράφεται σε προηγούμενες παραγράφους και κεφάλαια, η κολλοειδής πυριτία είναι ένα βαρύτερο ($\rho = 1.05\text{-}1.06\text{g/ml}$) και πιο παχύρρεστο υγρό (ιξώδες μεγαλύτερο από $1.25\text{-}1.4\text{ cP}$ από την αρχή της ανάμιξης) που πρακτικώς εκτοπίζει το νερό από τους πόρους του εδάφους κατά τη διάρκεια της προς τα άνω 1Δ εισπίεσής της. Τα δύο (2) υγρά αυτά εμφανίζουν μια στενή μεταβατική ζώνη ανάμιξης (πάχους 4cm) εντός του αμμώδους εδάφους, τουλάχιστον για τις μικρές υδραυλικές κλίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές εισπίεσεις. Για μεγαλύτερες υδραυλικές κλίσεις, το πάχος της ζώνης αναμένεται στενότερο. Ως μια έμμεση οπτική επιβεβαίωση της μη-γενικευμένης ανάμιξης των δύο (2) υγρών παρατίθεται το Σχήμα 4.16, όπου η πυριτία έχει κατακλύσει πλήρως το δοκίμιο, τον σωλήνα εξόδου και εισέρχεται στη δεξαμενή εξόδου, και όπου φαίνεται η μικρού πάχους μπλέ πυριτία στο κάτω μέρος της δεξαμενής, η οποία κατά τα λοιπά είναι γεμάτη με νερό.

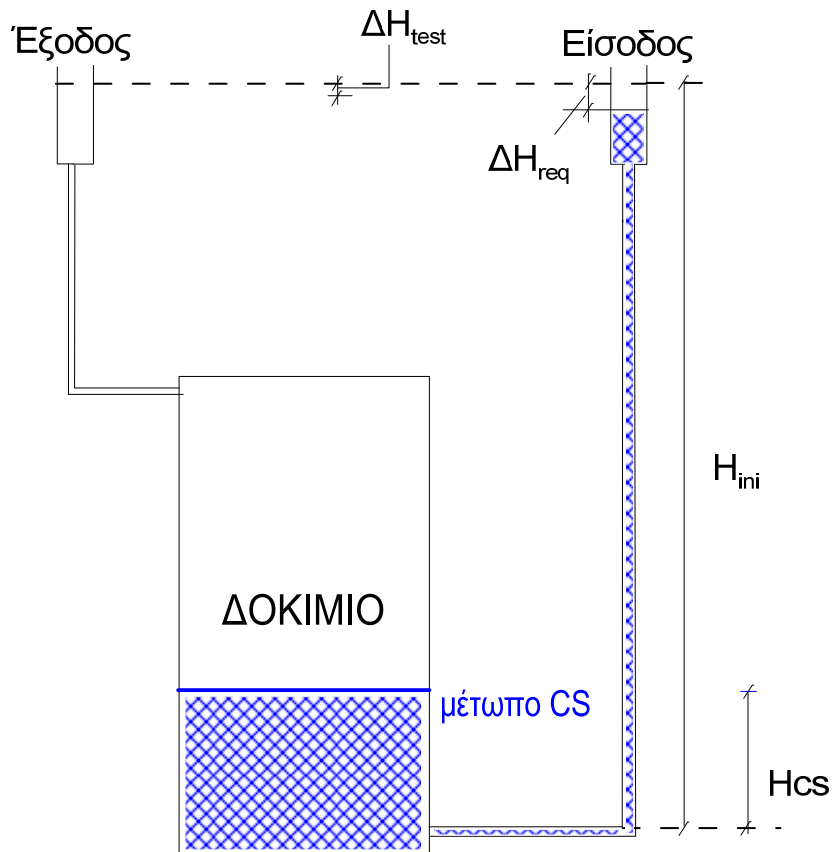
Πέραν της διαφοράς πυκνότητας, σημαντικό ρόλο στην εισπίεση παρουσιάζει και η μεταβολή του ιξώδους του υγρού πόρων (π.χ. στην παράγραφο 4.2 αναφέρεται ότι στις δοκιμές 4 και 5 η εισπίεση σταμάτησε λόγω αύξησης του ιξώδους). Συνεπώς, η αναλυτική μελέτη της εισπίεσης δεν είναι το πιο απλό πρόβλημα. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τους Gallagher and Lin (2009), ο νόμος Darcy μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της εισπίεσης, αρκεί να ληφθεί υπόψη το μεταβαλλόμενο ιξώδες. Αυτό θεωρείται δεδομένο στην παρούσα εργασία, και επαρκές όταν μελετάται η εισπίεση πυριτίας μετά τον πλήρη κατακλυσμό του δοκιμίου όπου η πυριτία έχει εκτοπίσει πλήρως το νερό και κατά την οποία η ροή γίνεται σταθερής υδραυλικής κλίσης. Όμως, κατά τον κατακλυσμό, δηλαδή όταν το

μέτωπο της πυριτιάς ανεβαίνει εντός του δοκιμίου, ο νόμος Darcy δεν θεωρείται επαρκής, καθώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαφορά των πυκνοτήτων των δύο (2) υγρών κατά τον υπολογισμό των υδραυλικών κλίσεων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση της υδραυλικής κλίσης ακόμη και αν γεωμετρικά οι στάθμες στις δεξαμενές εισόδου και εξόδου μένουν σταθερές. Για το σκοπό αυτό, θεωρείται χρήσιμη η εξίσωση Bernoulli, στην οποία υπάρχει σαφής αναφορά στο ειδικό βάρος του υγρού κατά τον υπολογισμό του υδραυλικού ύψους.



Σχήμα 4.16. Κατάσταση κατά τη δοκιμή εισπίεσης, όπου η (μπλε) πυριτία έχει κατακλύσει το μικρό (20cm) δοκίμιο και έχει αρχίσει να εισέρχεται στη δεξαμενή εξόδου (βλέπε βαρύτερο μπλε υγρό στο βάθος της δεξαμενής εξόδου που κατά τα άλλα περιέχει νερό).

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να ληφθούν υπόψη όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες παρουσιάζεται παρακάτω. Για την ευκολότερη κατανόηση του προσομοιώματος παρουσιάζεται το Σχήμα 4.17 με όλους τους απαιτούμενους συμβολισμούς και όλα τα χρησιμοποιούμενα φυσικά μεγέθη.



Σχήμα 4.17. Σχηματική απεικόνιση φυσικών μεγεθών κατά την προς τα άνω 1D εισπίεση (μπλε) πυριτίας, που χρησιμοποιούνται για τον καταρτισμό αδρού προσομοιώματος της εισπίεσης.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.17, στη δεξαμενή εισόδου εισάγεται πυριτία (με πυκνότητα $\rho = 1.05-1.06 \text{ g/ml}$) και στη δεξαμενή εξόδου εισάγεται απιονισμένο νερό (με $\rho_w = 1.00 \text{ g/ml}$). Στην αρχή της δοκιμής, το μέτωπο της πυριτίας (CS) βρίσκεται στη στάθμη της βάνας εισόδου, και άρα απέχει από τη στάθμη της δεξαμενής εξόδου H_{ini} . Αν η πυριτία έχει γεμίσει το σωλήνα εισόδου και η στάθμη της στη δεξαμενή εισόδου βρίσκεται σε ύψος H_{ini} , τότε υπάρχει ροή της πυριτίας προς το δοκίμιο, καθώς είναι βαρύτερη από το νερό που εκτοπίζει. Αντιθέτως, υπάρχουν συνθήκες μη-ροής, αν η πίεση στη βάνα εισόδου είναι λίγο μικρότερη, δηλαδή αν η στάθμη της πυριτίας στη δεξαμενή εισόδου είναι λίγο πιο χαμηλά. Το πόσο πιο χαμηλά εκτιμάται με βάση την εξίσωση Bernoulli, εξισώνοντας την πίεση για μια στήλη

νερού ύψους H_{ini} με την πίεση για μια στήλη πυριτίας ύψους ($H_{ini} - \Delta H_{ini}$). Η αρχική τιμή αυτής της αναγκαίας διαφοράς στάθμης στις δύο δεξαμενές ΔH_{ini} δίνεται από:

$$\Delta H_{ini} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_w}\right) H_{ini} \quad (4.1)$$

Με τον τρόπο αυτό πριν από κάθε δοκιμή εκτιμάται η αναγκαία διαφορά των ελεύθερων επιφανειών της δεξαμενής εισόδου και εξόδου για συνθήκες μη-ροής, η οποία επιβεβαιωνόταν με αρκετή ακρίβεια όταν άνοιγαν οι βάνες εισόδου και εξόδου. Στη συνέχεια, για την επίτευξη της επιθυμητής «αρχικής» υδραυλικής κλίσης αρκεί η προσθήκη επιπλέον διαλύματος CS για να ξεκινήσει η ροή.

Αν η εξίσωση 4.1 εφαρμοστεί όχι μόνο για τις αρχικές συνθήκες, αλλά και για κάθε θέση του προς τα άνω μετατοπιζόμενου μέτωπου της πυριτίας, τότε αντί για H_{ini} θα πρέπει να χρησιμοποιείται η διαφορά ($H_{ini} - H_{cs}$) και η αναγκαία διαφορά των ελεύθερων επιφανειών της δεξαμενής εισόδου και εξόδου για συνθήκες μη-ροής ΔH_{req} μειώνεται και δίνεται από:

$$\Delta H_{req} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_w}\right) (H_{ini} - H_{cs}) \quad (4.2)$$

Προφανώς, $\Delta H_{req} \leq \Delta H_{ini}$ με βάση τις σχέσεις (4.1) και (4.2), και $\Delta H_{req} = 0$ όταν γίνει πλήρης κατακλυσμός του δοκιμίου και της δεξαμενής εξόδου από πυριτία. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η τιμή του ΔH_{req} μεταβάλλεται συνεχώς όσο μετακινείται το μέτωπο της πυριτίας προς τα άνω. Επισημαίνεται ότι H_{cs} ορίζει το πόσο πιο ψηλά έχει μετακινηθεί το μέτωπο της πυριτίας από την αρχική του θέση, στο ύψος της βάνας εισόδου.

Ορίζοντας ως ΔH_{test} τη διαφορά των σταθμών στις δεξαμενές εισόδου και εξόδου, τότε η ροή ξεκινά αν $\Delta H_{test} < \Delta H_{req}$. Στις δοκιμές εισπίεσης επιλέγηκε να εφαρμοστεί σταθερή τιμή $\Delta H_{test} = \Delta H_{ini} - 1\text{cm}$ και $\Delta H_{test} = \Delta H_{ini} - 2\text{cm}$ στα δοκίμια ύψους $L = 20\text{cm}$ και 40cm , αντίστοιχα. Δηλαδή η στάθμη της πυριτίας στη δεξαμενή εισόδου αυξήθηκε κατά 1cm και 2cm , αντίστοιχα, αλλά πάντα (σε όλες τις δοκιμές) η στάθμη της πυριτίας ήταν πιο χαμηλά από τη στάθμη του νερού. Οι στάθμες αυτές κρατήθηκαν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια των εισπίεσεων με εισαγωγή πυριτίας στη δεξαμενή εισόδου και εξαγωγή νερού στη δεξαμενή εξόδου. Η υδραυλική κλίση που προκύπτει κατά τις δοκιμές αυτές δίνεται από:

$$i = \frac{\Delta H_{req} - \Delta H_{test}}{L} \quad (4.3)$$

Από τη σχέση 4.3 προκύπτει ότι αρχικώς, όταν $\Delta H_{req} = \Delta H_{ini}$ ισχύει ότι $i=0.05$, ανεξαρτήτως ύψους δοκιμίου. Στη συνέχεια της δοκιμής όμως, όταν $\Delta H_{req} \leq \Delta H_{ini}$ η υδραυλική κλίση μειώνεται σταδιακά, παρά το γεγονός ότι οι στάθμες στις δεξαμενές εισόδου και εξόδου παραμένουν σταθερές.

Ο νόμος του Darcy λαμβάνοντας υπόψη και το ιξώδες του υγρού των πόρων έχει τη μορφή:

$$Q = \frac{k}{\mu} iA \quad (4.4)$$

όπου Q η παροχή (σε cm^3/s), k ο συντελεστής διαπερατότητας του δοκιμίου (σε cm/s) μετρημένος πριν την εισπίεση πυριτίας, i η υδραυλική κλίση (αδιάστατη, βλ. σχέση 4.3), A το εμβαδό της διατομής του διαπερατόμετρου (ίσο με 78.54cm^2) και μ το ιξώδες του υγρού των πόρων (θεωρούμενο αδιάστατο, δηλαδή διαιρεμένο με 1cP το ιξώδες του νερού που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτίμηση του k).

Με βάση το Σχήμα 4.17, κατά τη διάρκεια της εισπίεσης μέσα στο δοκίμιο της άμμου, ο νόμος του Darcy θα πρέπει να εφαρμοστεί ξεχωριστά για το τμήμα του δοκιμίου που κατακλύζεται από πυριτία και ξεχωριστά για το τμήμα που έχει ακόμη νερό στους πόρους. Όμως, λόγω της διατήρησης της μάζας, οι παροχές στα δύο τμήματα είναι ίσες κάθε στιγμή και η εκτίμηση της υδραυλικής κλίσης i με βάση τη σχέση 4.3 αφορά όλο το δοκίμιο. Συνεπώς, θεωρείται πως αρκεί η εφαρμογή της σχέσης 4.4 για την προσομοίωση της προς τα άνω 1Δ εισπίεσης πυριτίας. Το κατά πόσον αυτό ισχύει, και το πόσο καλά μπορεί να προσεγγιστεί η εισπίεση μένει να αποδειχτεί από τα πειράματα εισπίεσεων που έγιναν. Ο έλεγχος ακρίβειας θα γίνει παρακάτω με δύο, πρακτικώς ισοδύναμους τρόπους:

(α) Εκτίμηση της παροχής Q

Q_{calc} : είναι η πρώτη εκτίμηση της παροχής, η οποία γίνεται με βάση τη σχέση 4.4, αλλά λαμβάνοντας υπόψη την διαρκώς μειούμενη υδραυλική κλίση i (σχέση 4.3), και το διαρκώς αυξανόμενο ιξώδες της πυριτίας μ_{meas} που μετράται ανεξάρτητα. Συνεπώς, η σχέση 4.4 γράφεται ως:

$$Q_{calc} = \frac{k}{\mu_{meas}} iA \quad (4.5)$$

Q_{vel} : είναι η δεύτερη εκτίμηση της παροχής, η οποία γίνεται με βάση την οπτικά μετρούμενη ταχύτητα διήθησης πυριτίας V_{meas} μέσα στο δοκίμιο, η οποία δίνει τη φαινόμενη ταχύτητα πολλαπλασιαζόμενη με το πορώδες n της άμμου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_{vel} = (V_{meas} n) A \quad (4.6)$$

Οι δύο αυτές εκτιμήσεις της παροχής συγκρίνονται με την μετρούμενη παροχή πυριτίας Q_{meas} που εισπίζεται μέσα στο δοκίμιο, και το πόσο καλά ή άσχημα την προβλέπουν αντικατοπτρίζει την αξιοπιστία του αδρού προσομοιώματος της 1Δ προς τα άνω εισπίεσης.

(β) Εκτίμηση του ιξώδους μ της πυριτίας

μ_{calc} : είναι η πρώτη εκτίμηση του ιξώδους, η οποία γίνεται με βάση τη σχέση 4.4, αλλά λαμβάνοντας υπόψη την διαρκώς μειούμενη υδραυλική κλίση i (σχέση 4.3), και τη διαρκώς μειούμενη παροχή Q_{meas} που μετράται ανεξάρτητα. Συνεπώς, η σχέση 4.4 γράφεται ως:

$$\mu_{calc} = \frac{k}{Q_{meas}} iA \quad (4.7)$$

μ_{vel} : είναι η δεύτερη εκτίμηση του ιξώδους, η οποία γίνεται με βάση την οπτικά μετρούμενη (διαρκώς μειούμενη) ταχύτητα διήθησης πυριτίας V_{meas} μέσα στο δοκίμιο (η οποία δίνει τη φαινόμενη ταχύτητα πολλαπλασιαζόμενη με το πορώδες n), και μετά από κατάλληλο μετασχηματισμό με βάση τη γενική σχέση 4.4 δίνει:

$$\mu_{vel} = \frac{ki}{V_{meas}n} \quad (4.8)$$

Οι δύο αυτές εκτιμήσεις του ιξώδους συγκρίνονται με το μετρούμενο ιξώδες μ_{meas} της πυριτίας που εισπνέζεται μέσα στο δοκίμιο, και το πόσο καλά ή άσχημα το προβλέπουν αντικατοπτρίζει την αξιοπιστία του αδρού προσομοιώματος της 1Δ προς τα άνω εισπίεσης.

Συνολικά λοιπόν, η σύγκριση 2 εκτιμώμενων με 1 μετρούμενη παροχή Q , ή ισοδύναμα η σύγκριση 2 εκτιμώμενων με 1 μετρούμενο ιξώδες μ θα μας υποδείξει την ορθότητα ή μη του αδρού αναλυτικού προσομοιώματος μονο-διάστατης εισπίεσης, και θα μας δώσει κατευθυντήριες γραμμές για το ποιες μετρήσεις επιτόπου είναι πιο αξιόπιστες για την ποιότητα εφαρμογής της εισπίεσης σε πρακτικές εφαρμογές.

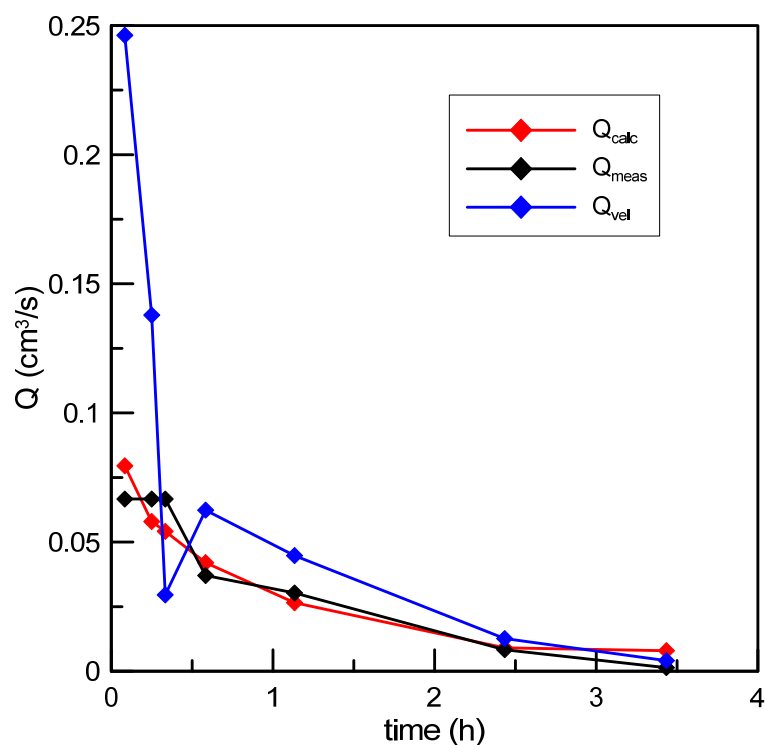
4.4 Πειραματικός έλεγχος ακρίβειας προσομοιώματος της προς τα άνω 1Δ εισπίεσης πυριτίας

Σύμφωνα με την παράγραφο 4.2, έγιναν έξι (6) πλήρεις δοκιμές εισπίεσης πυριτίας. Καθώς εδώ στόχος είναι ο έλεγχος ακρίβειας και μόνον, και όχι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών εισπίεσης (που όλες δίνουν ποιοτικά τα ίδια αποτελέσματα), στην παράγραφο αυτή η έμφαση δίνεται σε τρεις (3) από τις δοκιμές, δύο (2) σε μικρά δοκίμια (20 cm) και μία (1) δοκιμή μεγάλου δοκιμίου (40 cm) αμμώδους υλικού. Οι εν λόγω δοκιμές είναι οι 4,5,6 με βάση τον αύξοντα αριθμό τους και τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα 4.2. Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν αυτές οι δοκιμές, είναι ότι σε αυτές έγινε μια μετατροπή στις δεξαμενές εισόδου και εξόδου για ακριβέστερη μέτρηση της παροχής Q_{meas} (μετράται κρατώντας σταθερή τη στάθμη, όχι με κάποια άλλη απευθείας ογκομετρική μέθοδο).

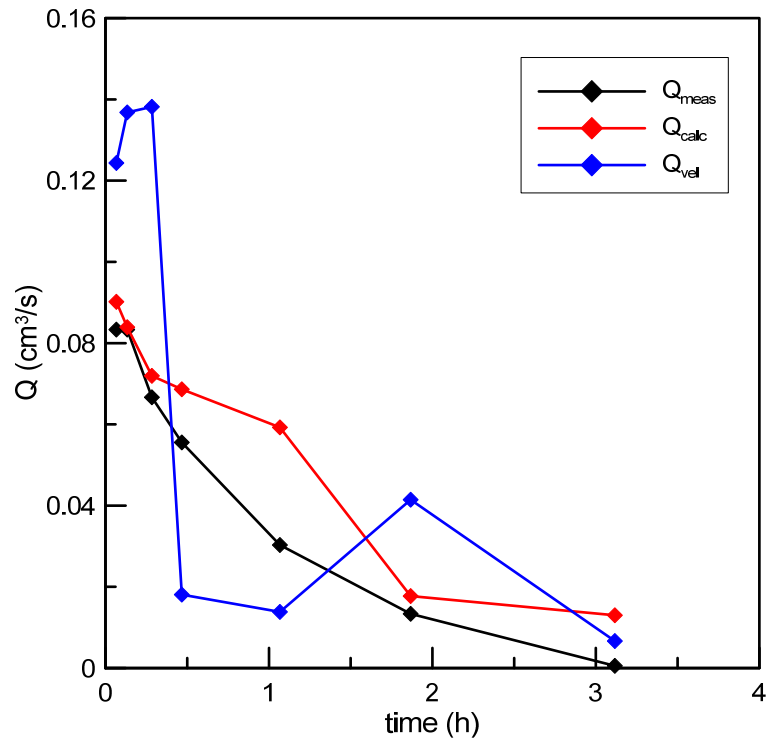
Πίνακας 4.2. Χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών και δοκιμών στα οποία έγινε η εισπίεση, και για τις οποίες γίνονται προβλέψεις με το αδρό προσομοίωμα.

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	$3.40 \cdot 10^{-4}$

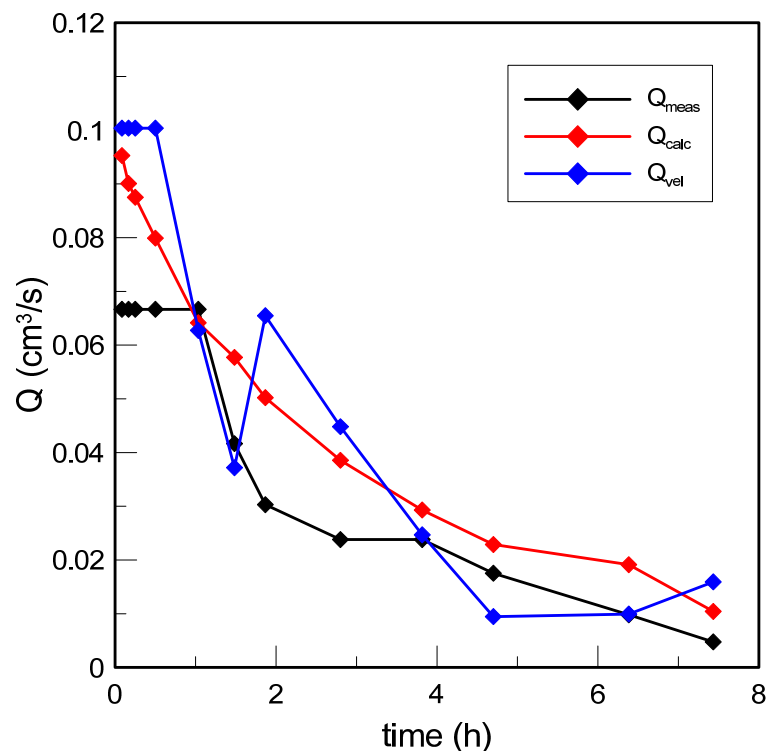
Στα Σχήματα 4.18 έως 4.20 συγκρίνεται η μεταβολή με το χρόνο της μετρημένης παροχής πυριτίας Q_{meas} με τις δύο (2) διαφορετικές εκτιμήσεις αυτής Q_{calc} και Q_{vel} κατά τη διάρκεια των δοκιμών 4, 5 και 6, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.18 Σύγκριση της μεταβολής με το χρόνο της μετρημένης παροχής πυριτίας Q_{meas} με τις δύο (2) διαφορετικές εκτιμήσεις αυτής Q_{calc} και Q_{vel} κατά τη διάρκεια της δοκιμής 4.



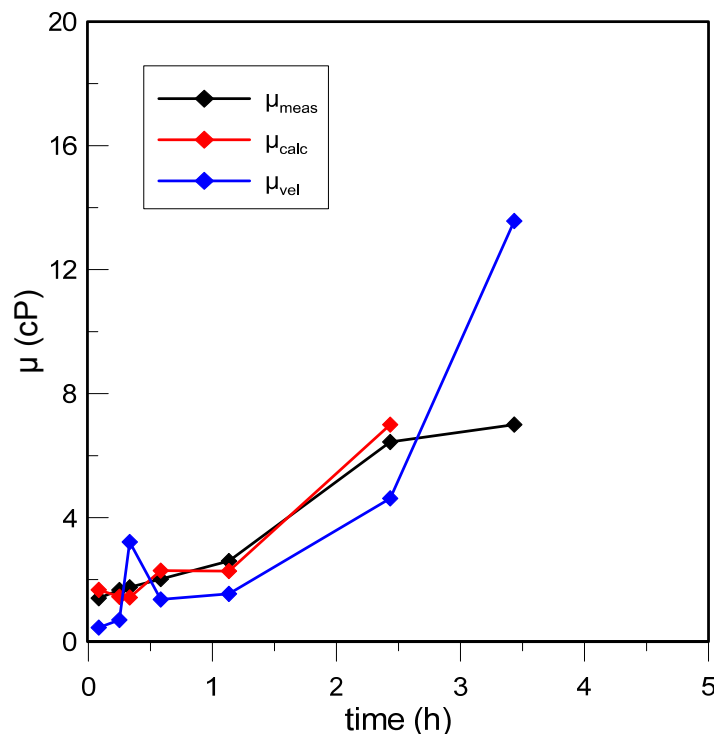
Σχήμα 4.19 Σύγκριση της μεταβολής με το χρόνο της μετρημένης παροχής πυριτιάς Q_{meas} με τις δύο (2) διαφορετικές εκτιμήσεις αυτής Q_{calc} και Q_{vel} κατά τη διάρκεια της δοκιμής 5.



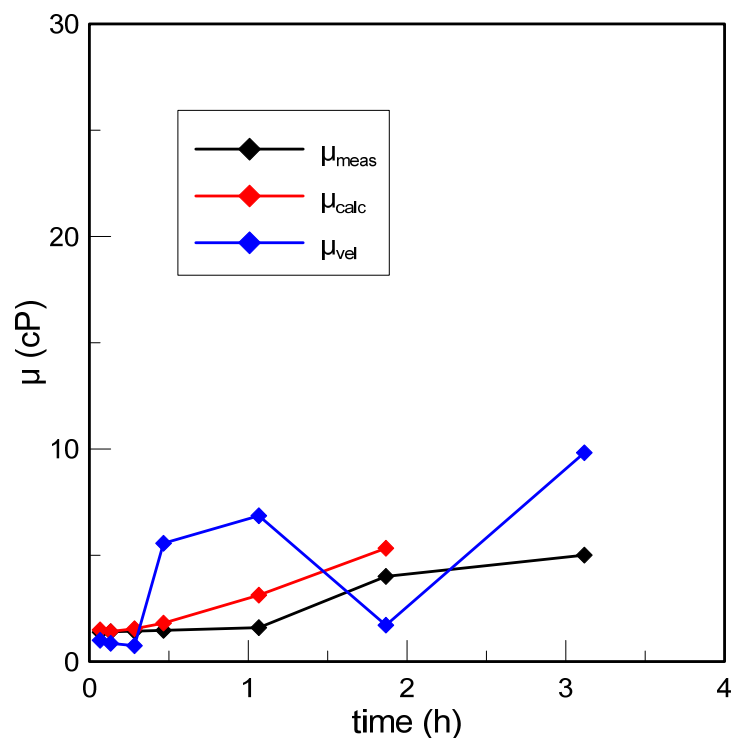
Σχήμα 4.20 Σύγκριση της μεταβολής με το χρόνο της μετρημένης παροχής πυριτιάς Q_{meas} με τις δύο (2) διαφορετικές εκτιμήσεις αυτής Q_{calc} και Q_{vel} κατά τη διάρκεια της δοκιμής 6.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι με την πάροδο του χρόνου, η παροχή Q_{meas} μειώνεται μέχρι μηδενισμού της (παύση εισπίεσης). Επίσης προκύπτει ότι για συγκρίσιμες τιμές αρχικής υδραυλικής κλίσης, μήκους και διαπερατότητας δοκιμίου και πρακτικώς ταυτόσημο διάλυμα πυριτίας (δοκιμές 4 και 5), η συνολική εισπίεση διαρκεί περί τις 3.2 έως 3.5 ώρες, ενώ αν διπλασιαστεί το μήκος του δοκιμίου και ο χρόνος γέλης της πυριτίας, αλλά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της δοκιμής (αρχική υδραυλική κλίση, διαπερατότητα εδάφους) μείνουν σταθερά η διάρκεια της εισπίεσης επίσης διπλασιάζεται (φθάνει τις 7.4 ώρες). Από απόψεως ακρίβειας του προσομοιώματος, τα σχήματα αυτά υποδεικνύουν ότι η εκτίμηση της παροχής με βάση την Q_{calc} είναι αρκετά ακριβής. Από την άλλη, η εκτίμηση της παροχής με βάση την Q_{vel} είναι ποιοτικά εντάξει, αλλά ποσοτικά παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ίσως και επειδή η διαδικασία μετρήσεων είναι απλώς οπτική.

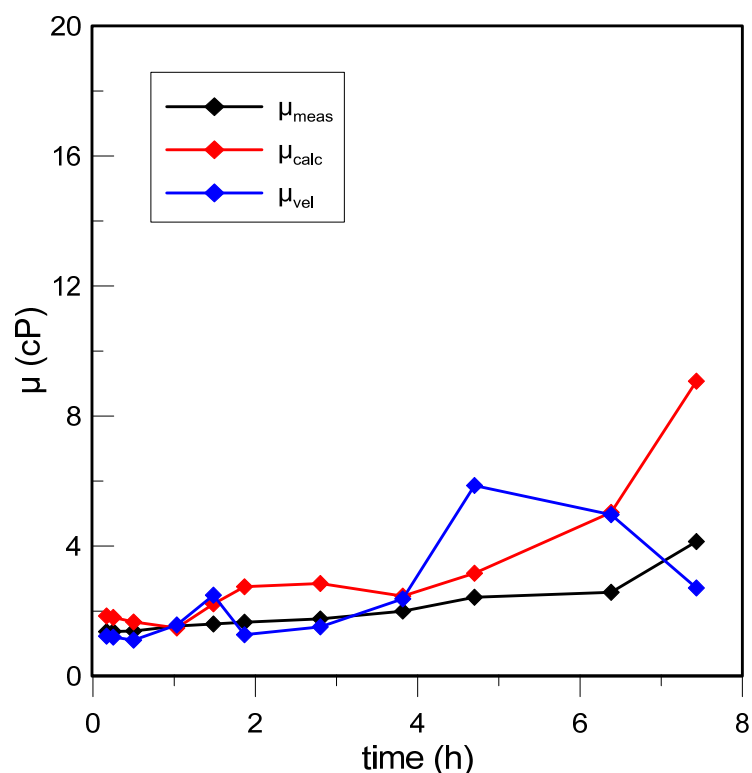
Στη συνέχεια, στα Σχήματα 4.21 έως 4.23 συγκρίνεται η μεταβολή με το χρόνο του μετρημένου ιξώδους πυριτίας μ_{meas} με τις δύο (2) διαφορετικές εκτιμήσεις αυτού μ_{calc} και μ_{vel} κατά τη διάρκεια των δοκιμών 4, 5 και 6, αντίστοιχα. Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι με την πάροδο του χρόνου, το ιξώδες μ_{meas} αυξάνει μέχρι τιμών που οδηγούν ουσιαστικά σε παύση εισπίεσης. Από απόψεως ακρίβειας του προσομοιώματος, προκύπτει ότι η έμμεση εκτίμηση ιξώδους με βάση την μ_{calc} είναι αρκετά ακριβής, ενώ η έμμεση εκτίμηση του ιξώδους με βάση την Q_{vel} είναι ποιοτικά συνεπής, αλλά ποσοτικά παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ίσως και επειδή η διαδικασία μετρήσεων είναι απλώς οπτική.



Σχήμα 4.21 Σύγκριση της μεταβολής με το χρόνο του μετρημένου ιξώδους πυριτίας μ_{meas} με τις δύο (2) διαφορετικές εκτιμήσεις αυτού μ_{calc} και μ_{vel} κατά τη διάρκεια της δοκιμής 4.



Σχήμα 4.22 Σύγκριση της μεταβολής με το χρόνο του μετρημένου ιξώδους πυριτίας μ_{meas} με τις δύο (2) διαφορετικές εκτιμήσεις αυτού μ_{calc} και μ_{vel} κατά τη διάρκεια της δοκιμής 5.



Σχήμα 4.23. Σύγκριση της μεταβολής με το χρόνο του μετρημένου ιξώδους πυριτίας μ_{meas} με τις δύο (2) διαφορετικές εκτιμήσεις αυτού μ_{calc} και μ_{vel} κατά τη διάρκεια της δοκιμής 6.

4.5 Συμπεράσματα

Από τα πειράματα προς τα άνω 1Δ εισπίεσης πυριτίας σε εδαφικά δοκίμια που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει ότι

- με την πάροδο του χρόνου, η παροχή Q_{meas} μειώνεται μέχρι μηδενισμού της (παύση εισπίεσης).
- η μείωση της παροχής οφείλεται σε δύο ταυτόχρονες επιδράσεις: α) την μείωση της υδραυλικής κλίσης, με την άνοδο του μετώπου της πυριτίας εντός του εδάφους, β) την αύξηση του ιξώδους της πυριτίας μέχρι τιμών που οδηγούν ουσιαστικά σε παύση εισπίεσης / αδυναμία διήθησης.
- στις συγκεκριμένες δοκιμές ο λόγος που τελικώς σταματά η εισπίεση είναι πρακτικώς η αύξηση του ιξώδους, καθώς κατά τη διάρκεια της εισπίεσης το ιξώδες φθάνει τιμές μεγαλύτερες από 3.5 – 4.0cP που σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αρκούν για να παύσουν την εισπίεση υπό χαμηλή υδραυλική κλίση (αρχική και μέγιστη τιμή 0.05 στις δοκιμές αυτές).
- για συγκρίσιμες τιμές αρχικής υδραυλικής κλίσης, μήκους και διαπερατότητας δοκιμίου και πρακτικώς ταυτόσημο διάλυμα πυριτίας (δοκιμές 4 και 5), η συνολική εισπίεση διαρκεί περί τις 3.2 έως 3.5 ώρες, ενώ αν διπλασιαστεί το μήκος του δοκιμίου και ο χρόνος γέλης της πυριτίας, αλλά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της δοκιμής (αρχική υδραυλική κλίση, διαπερατότητα εδάφους) μένουν σταθερά η διάρκεια της εισπίεσης επίσης διπλασιάζεται (φθάνει τις 7.4 ώρες).

Επιπλέον, από την αναλυτική προσομοίωση των πειραμάτων εισπίεσης προκύπτει ότι:

- ο νόμος Darcy μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια για την εκτίμηση της παροχής, αρκεί να ληφθεί υπόψη το χρονικώς αυξανόμενο ιξώδες που μπορεί να μετράται ανεξάρτητα και προκαταβολικά, και να αποτελέσει έτσι βάση του σχεδιασμού της εισπίεσης
- 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.

5. ΑΝΤΟΧΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

5.1 Διαδικασία δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης

Στο Ε.Ε.Θ.Γ.Σ.Μ. του Α.Π.Θ. πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου που σταθεροποιήθηκαν με διάλυμα κολλοειδούς πυριτίας κατά βάρους συγκέντρωσης CS = 6 και 10%. Οι δοκιμές έγιναν σύμφωνα με τις Βρετανικές Προδιαγραφές (BS 1377: Part 7: 1990). Τα δοκίμια είχαν ονομαστική διάμετρο 50mm και ύψος 100mm. Η φόρτιση έγινε με ρυθμό παραμόρφωσης 0.5%/min.

5.2 Διαδικασία προετοιμασίας δοκιμίων

Μελετήθηκαν δύο διαλύματα κολλοειδούς πυριτίας, με κατά βάρος συγκέντρωση πυριτίας CS = 6% και 10%. Το διάλυμα με CS = 6% προετοιμάστηκε ώστε να έχει 0.18N παρουσία χλωριούχου νατρίου NaCl και αρχική τιμή pH = 6. Ο συνδιασμός αυτός οδηγεί σε χρόνο γέλης ίσο με 11 ώρες. Αντίστοιχα, το διάλυμα με CS = 10% προετοιμάστηκε ώστε να έχει 0.03N παρουσία χλωριούχου νατρίου και αρχική τιμή pH = 6. Ο συνδιασμός αυτός οδηγεί σε χρόνο γέλης ίσο με 10 ώρες.

Για τη διαμόρφωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ο Πίνακας του Σχήματος 5.1, που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες του προγράμματος. Τα δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου προετοιμάστηκαν σε ειδικά διαμορφωμένες μεταλλικές μήτρες, με τη μέθοδο της υγρής υποσυμπύκνωσης (Ladd, 1974). Μετά την προετοιμασία των δοκιμίων, ακολούθησε ο κορεσμός τους. Ακολουθώντας, έγινε παροχή του διαλύματος κολλοειδούς πυριτίας από τη βάση προς την κορυφή του κάθε δοκιμίου. Η παροχή θεωρήθηκε ότι έχει ολοκληρωθεί όταν έχει εξέλθει από την κορυφή του δοκιμίου όγκος διαλύματος τετραπλάσιος του όγκου των κενών του δοκιμίου, για να εξασφαλιστεί πέρα από κάθε αμφιβολία ο πλήρης κατακλυσμός των πόρων του εδάφους με πυριτία. Σημειώνεται ότι κατά την παροχή διαλύματος κολλοειδούς πυριτίας, το ιξώδες, μ του διαλύματος είναι χαμηλό ($\mu < 3.5\text{cP}$).

Ακολουθώντας, και μετά το πέρας του χρόνου γέλης της πυριτίας, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν για ωρίμανση σε χώρο σταθερής θερμοκρασίας και υγρασίας.

Οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης πραγματοποιήθηκαν έπειτα από χρόνο ωρίμανσης των δοκιμίων τετραπλάσιο του χρόνου γέλης της πυριτίας, ήτοι για τα δοκίμια σταθεροποιημένα με διαλύματα CS = 6% και 10%, 55 ώρες και 50 ώρες αντίστοιχα, από τη στιγμή διαμόρφωσης του διαλύματος.



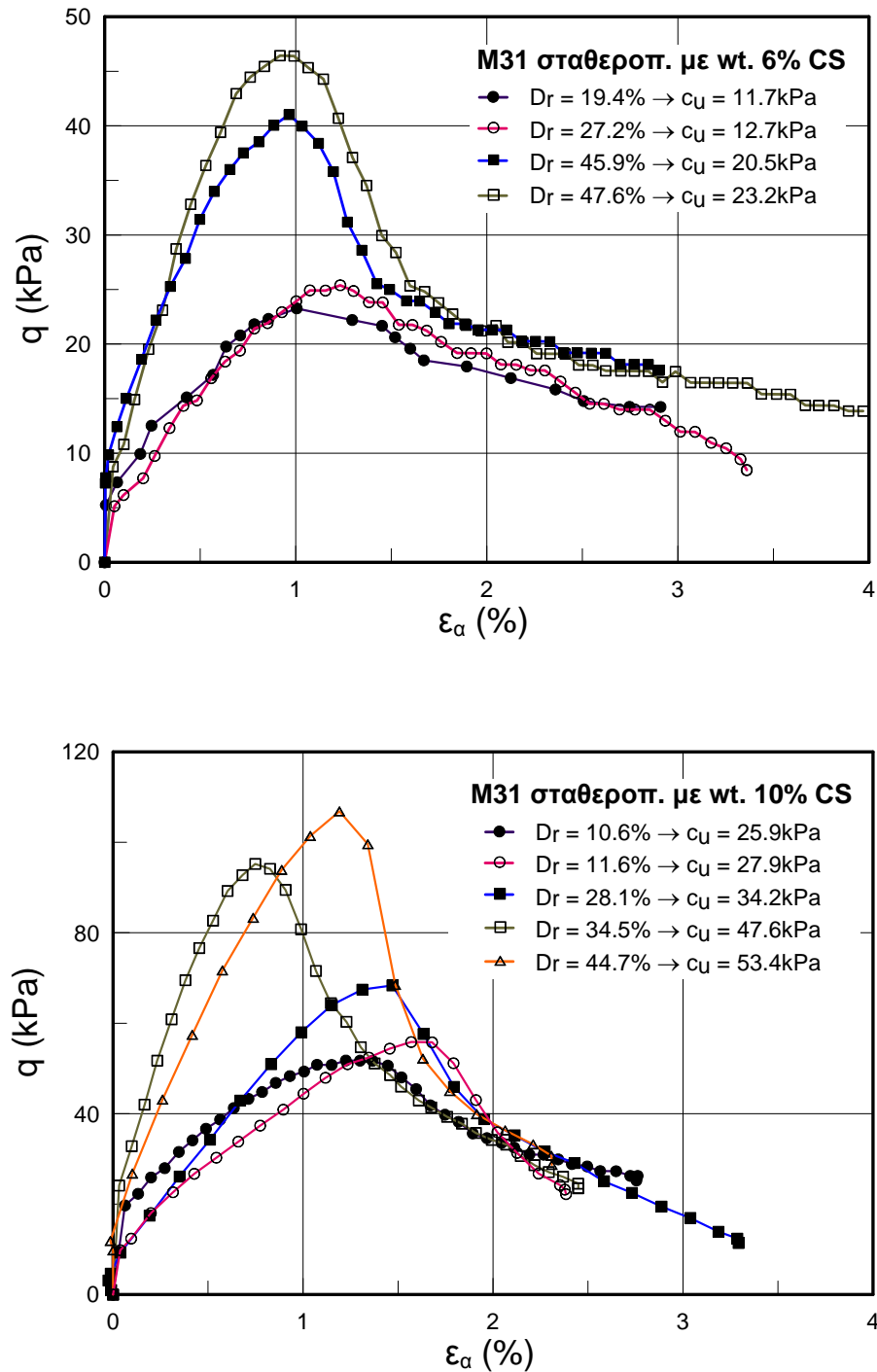
1. δεξαμενή παροχής CS
2. δεξαμενή παροχής απαερωμένου νερού
3. μανόμετρο πίεσης
4. διανεμητής παροχής CS στα εδαφικά δοκίμια
5. διανεμητής παροχής απαερωμένου νερού στα εδαφικά δοκίμια
6. διανεμητής παροχής CO₂ στα εδαφικά δοκίμια
7. μεταλλικές μήτρες διαμόρφωσης δοκιμίων

Σχήμα 5.1 Πίνακας διαμόρφωσης σταθεροποιημένων δοκιμίων του Ε.Ε.Θ.Γ.Σ.Μ. του Α.Π.Θ.

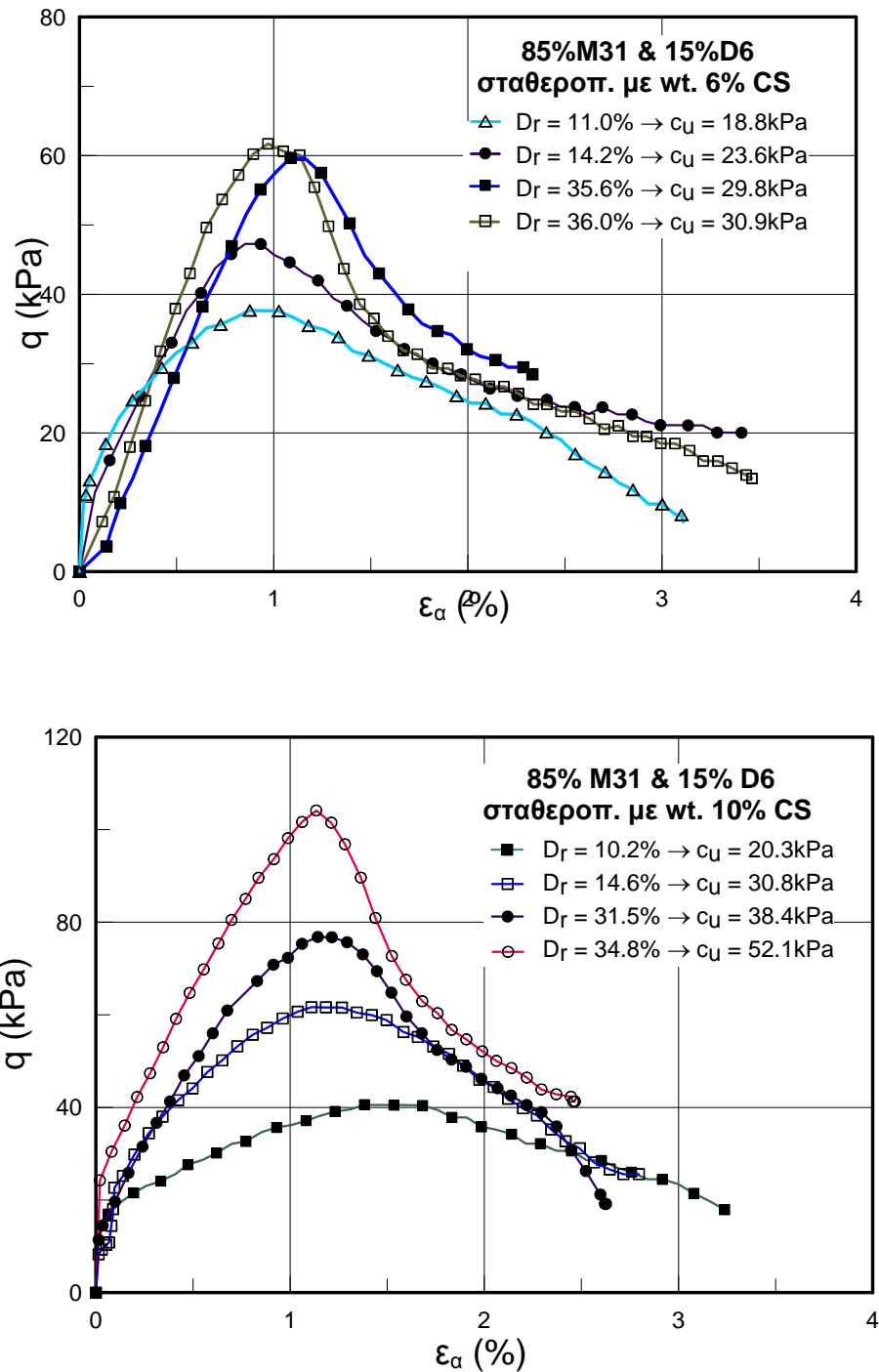
5.3 Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου, με χρήση διαλυμάτων πυριτίας κατά βάρους συγκέντρωσης CS = 6% και 10%. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε όρους μεταβολής της αποκλίνουσας τάσης q με την αξονική παραμόρφωση ϵ_a και προκύπτει σαφώς ότι η παθητική σταθεροποίηση μη συνεκτικών εδαφών προσφέρει μη-αμελητέα αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, η οποία παίρνει τη μέγιστη τιμή της σε τιμή $\epsilon_a = 1\% \pm 0.25\%$ περίπου, πέραν της οποίας ακολουθεί χαλάρωση προς μια τιμή αντοχής περίπου στο 50% της μέγιστης.

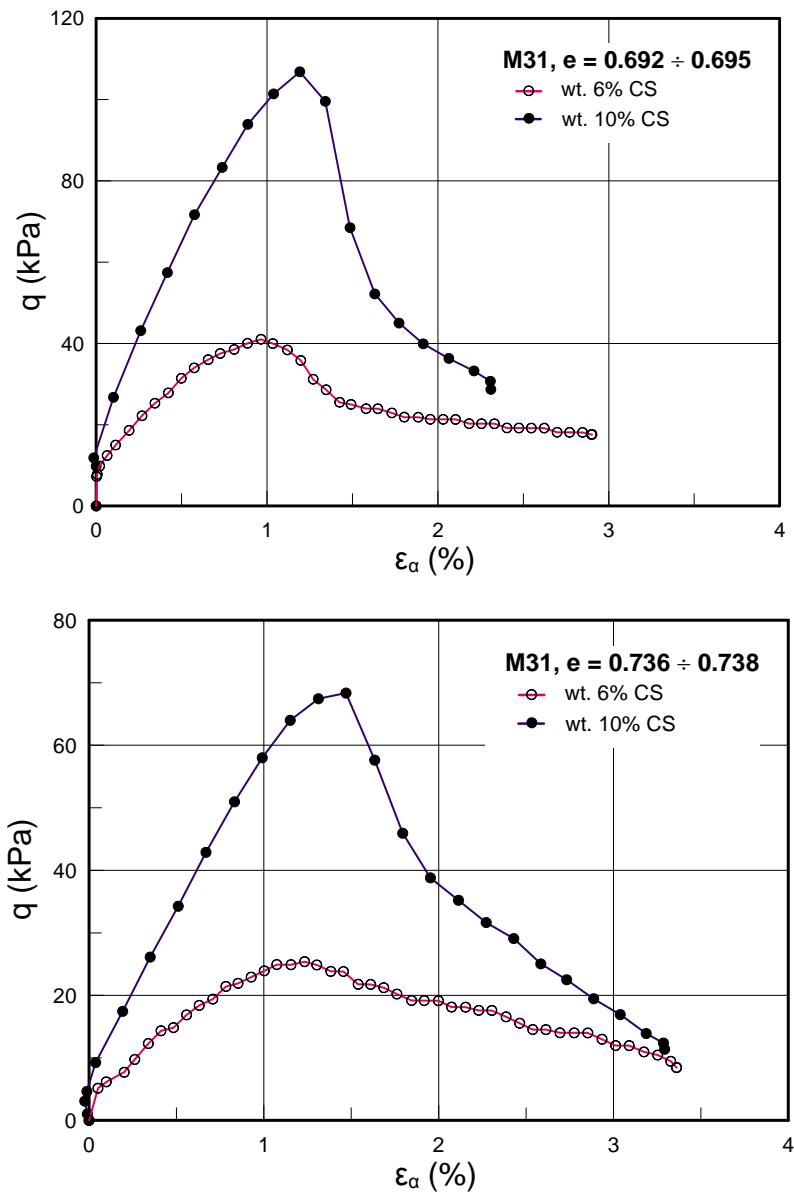
Πέραν αυτού, από το σχήμα αυτό προκύπτει σαφής αυξητική επίδραση της σχετικής πυκνότητας (ή μειωτική επίδραση του δείκτη πόρων) στη μέγιστη τιμή της «αστράγγιστης» διατμητικής αντοχής C_u . Επιπλέον προκύπτει και αντίστοιχη αυξητική επίδραση και της τιμής του ποσοστού κατά βάρος CS(%) της πυριτίας, στο διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για τη σταθεροποίηση. Με βάση όλα τα ανωτέρω, προκύπτει και μια αυξητική επίδραση της σχετικής πυκνότητας $D_r(\%)$ και του ποσοστού κατά βάρος της πυριτίας CS(%) στη δυσμησία του σταθεροποιημένου εδάφους.



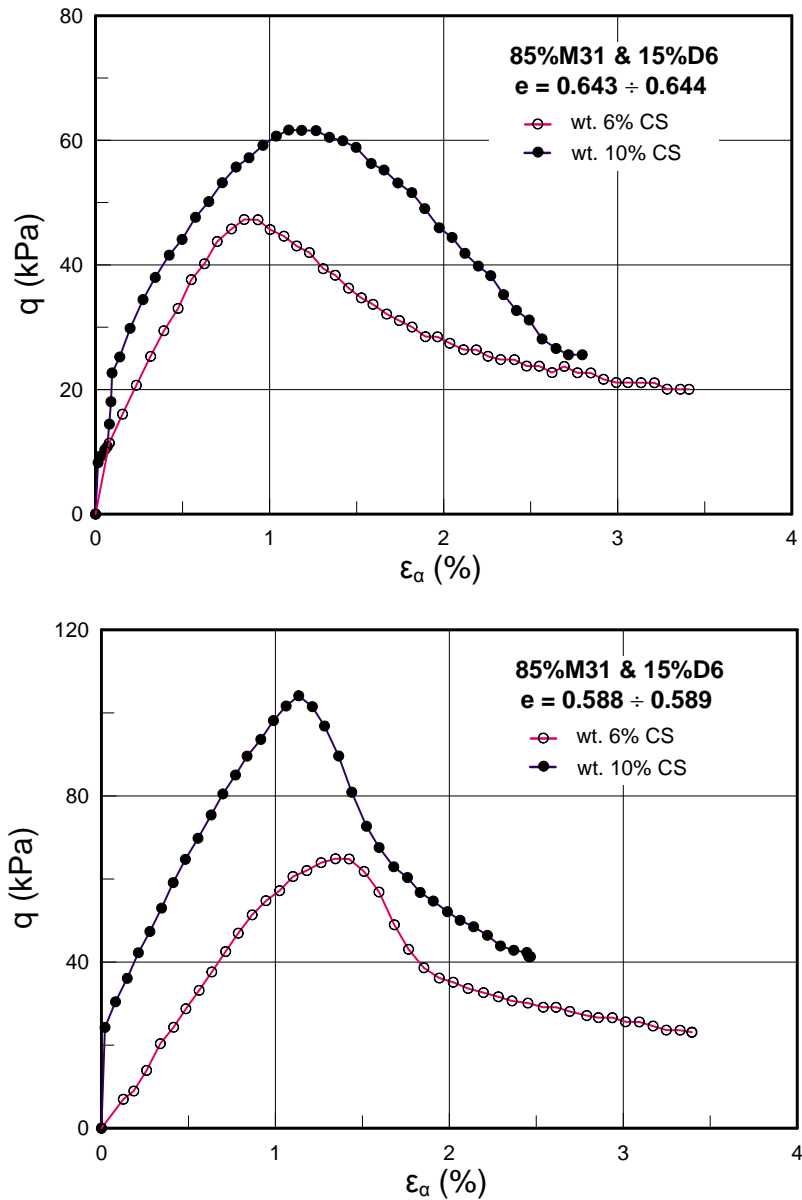
Σχήμα 5.2. Σχέση αποκλίνουσας τάσης q έναντι αξονικής παραμόρφωσης ϵ_{α} από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε δοκίμια άμμου M31 σταθεροποιημένα με διάλυμα πυριτίας: α) CS = 6% και β) CS = 10%



Σχήμα 5.3. Σχέση αποκλίνουσας τάσης q έναντι αξονικής παραμόρφωσης ε_α από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε δοκίμια μίγματος ιλυώδους άμμου (85% M31 – 15% D6, κατά βάρος) σταθεροποιημένα με διάλυμα πυριτίας: α) CS = 6% και β) CS = 10%



Σχήμα 5.4. Επίδραση του ποσοστού κατά βάρος CS(%) της πυριτίας στο υγρό των πόρων, στη σχέση αποκλίνουσας τάσης q έναντι αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια άμμου M31: α) δείκτη πόρων $e = 0.692 - 0.695$, β)) δείκτη πόρων $e = 0.736 - 0.738$

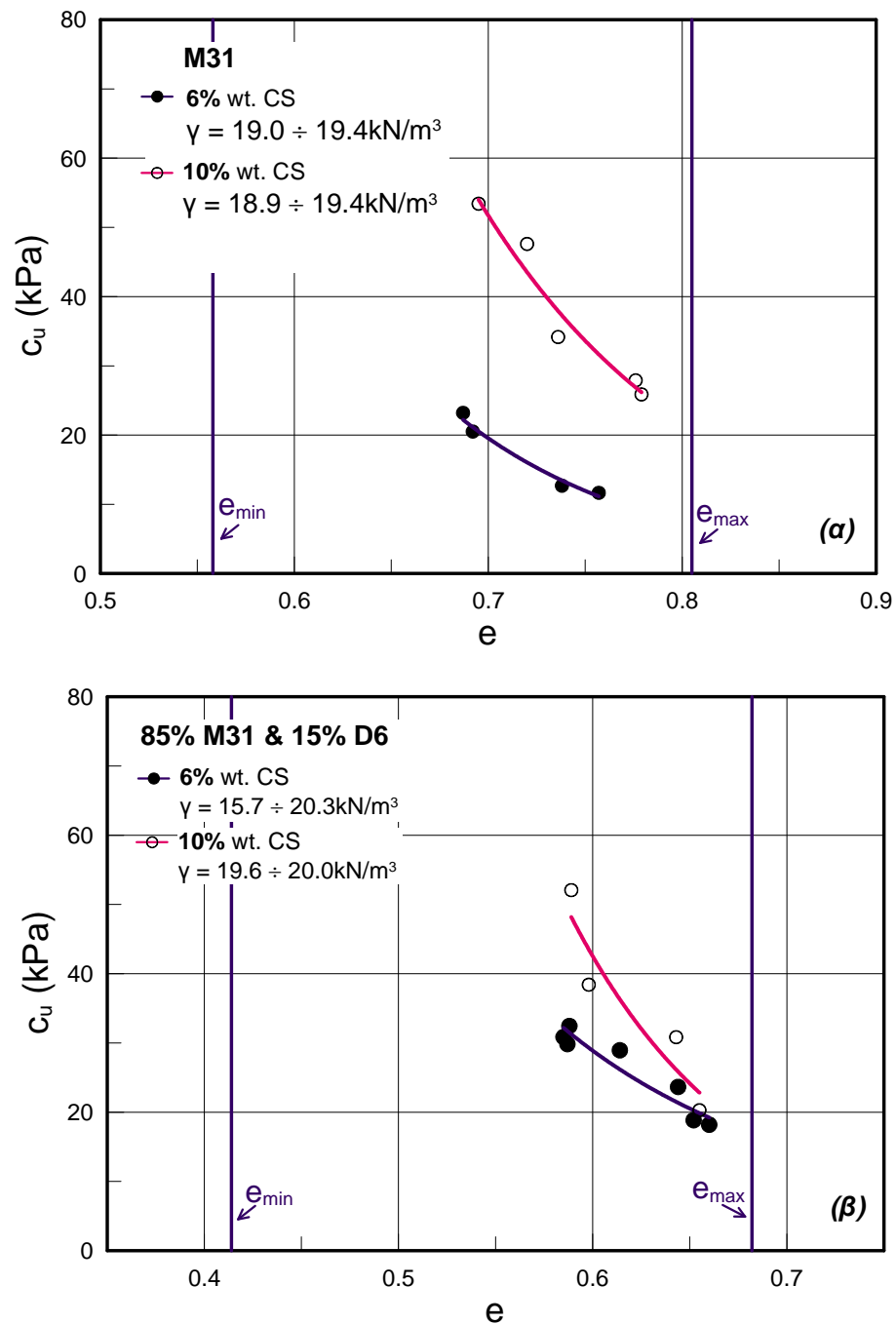


Σχήμα 5.5. Επίδραση του ποσοστού κατά βάρος CS(%) της πυριτίας στο υγρό των πόρων, στη σχέση αποκλίνοσας τάσης q έναντι αξονικής παραμόρφωσης ϵ_a σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια μίγματος ιλυώδους άμμου (85% M31 & 15% D6): α) δείκτη πόρων $e = 0.643 - 0.644$, β)) δείκτη πόρων $e = 0.588 - 0.589$

Στο Σχήμα **5.3** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε σταθεροποιημένα δοκίμια ιλυώδους άμμου, με χρήση διαλυμάτων πυριτίας κατά βάρους συγκέντρωσης CS = 6% και 10%. Και πάλι, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε όρους μεταβολής της αποκλίνουσας τάσης q με την αξονική παραμόρφωση ε_a και προκύπτουν ποιοτικώς αντίστοιχα αποτελέσματα με εκείνα της άμμου (π.χ. μέγιστη αντοχή σε $\varepsilon_a = 1\% \pm 0.25\%$ περίπου, πέραν της οποίας ακολουθεί χαλάρωση προς μια τιμή αντοχής περίπου στο 50% της μέγιστης, αυξητική επίδραση σχετικής πυκνότητας D_r και ποσοστού κατά βάρος πυριτίας CS).

Για καλύτερη ποσοτική διερεύνησης της επίδρασης του ποσοστού κατά βάρος της πυριτίας CS(%), στα Σχήματα **5.4** και **5.5** συγκρίνονται δοκιμές σε αντίστοιχες τιμές του δείκτη πόρων σε δοκίμια άμμου και ιλυώδους άμμου αντίστοιχα. Η σύγκριση σε όρους $q - \varepsilon_a$ υποδεικνύει ότι το ποσοστό CS(%) έχει πιο σημαντική επίδραση σε δοκίμια άμμου, παρά σε δοκίμια ιλυώδους άμμου, και αυτό ανεξαρτήτως δείκτη πόρων ή σχετικής πυκνότητας.

Επιπλέον, στο Σχήμα **5.6**, η έμφαση δίνεται στην «αστράγγιστη» διατμητική αντοχή C_u των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν. Από το σχήμα αυτό προκύπτει σαφώς η έντονα μειωτική επίδραση του δείκτη πόρων e στην μέγιστη αντοχή για όλα τα εδάφη και όλα τα ποσοστά πυριτίας. Επιπλέον όμως προκύπτει και ποσοτικά η προαναφερθείσα εντονότερη επίδραση του ποσοστού πυριτίας CS(%) στην τιμή της C_u των άμμων, συγκριτικά με εκείνη στα δοκίμια της ιλυώδους άμμου. Συγκρίνοντας όμως τις απόλυτες τιμές της C_u για τα διαφορετικά εδάφη προκύπτει σαφώς ότι για τις ιλυώδεις άμμους οι τιμές της C_u είναι μικρότερες εκείνων για άμμους σε αντίστοιχες τιμές του δείκτη πόρων. Οπότε ίσως να είναι προτιμότερη η χρήση της σχετικής πυκνότητας D_r για την ενιαία παρουσίαση αποτελεσμάτων C_u για σταθεροποιημένα μη-συνεκτικά εδάφη, καθώς τότε οι διαφοροποιήσεις είναι λιγότερο έντονες.



Σχήμα 5.6. Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, c_u με το δείκτη πόρων, e για δοκίμια (α) άμμου και (β) ιλυώδους άμμου, σταθεροποιημένα με διάλυμα πυριτίας wt. 6% και 10%.

6. ΣΧΕΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΥΡΙΤΙΑΣ

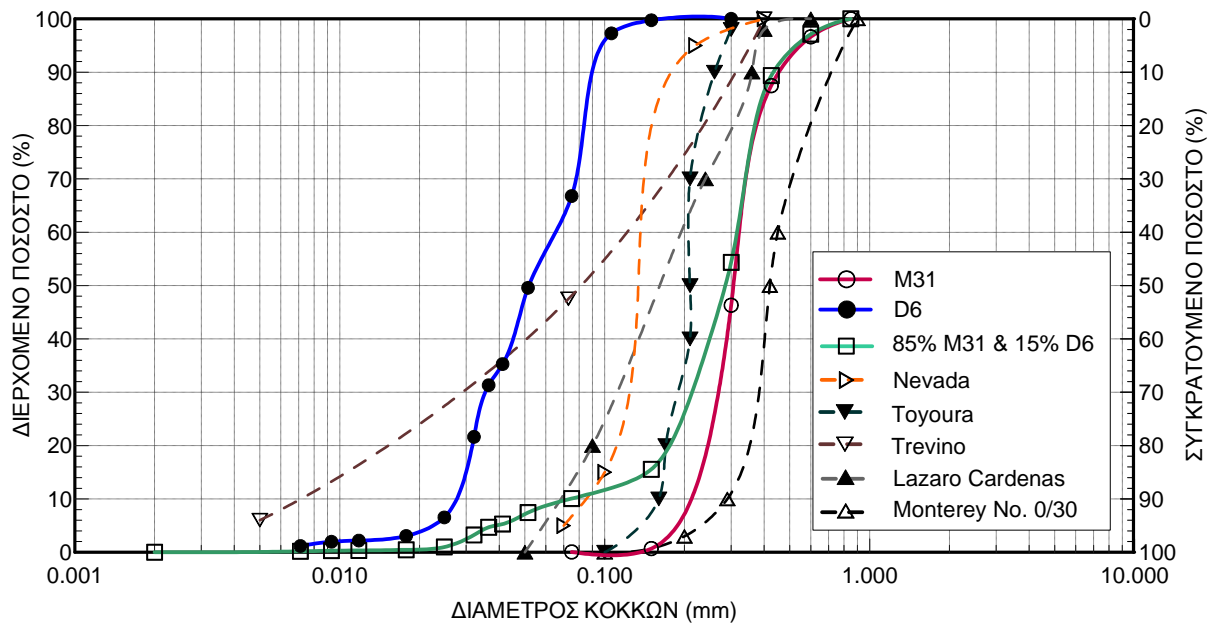
Όπως όλες οι μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους, έτσι και η παθητική σταθεροποίηση χρειάζεται έλεγχο ποιότητας αμέσως μετά την εφαρμογή της, και διακρίβωση πιθανών ζημιών αμέσως μετά από ισχυρές διεγέρσεις. Ένας εύχρηστος τρόπος να γίνει αυτό είναι με (καλής ποιότητας) δειγματοληψία και την εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης, δεδομένου ότι η παθητική σταθεροποίηση δημιουργεί μη-μηδενική αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u ακόμη και σε χαλαρά μη-συνεκτικά εδάφη (βλέπε Κεφάλαιο 5 του παρόντος Παραδοτέου). Με άλλα λόγια, ως τρόπος ελέγχου ποιότητας προτείνεται εδώ η λήψη δοκιμών μετά την σταθεροποίηση και η εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε αυτά. Αν η αντοχή q_u είναι συγκρίσιμη με τιμές από τη βιβλιογραφία για το ποσοστό πυριτίας κατά βάρος CS(%) που χρησιμοποιήθηκε, τότε μπορεί να πιστοποιηθεί εμμέσως η ποιότητα εκτέλεσης των εργασιών της σταθεροποίησης.

Για το σκοπό αυτό, συγκεντρώνονται αρχικώς από τις βιβλιογραφία μετρήσεις q_u από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, και συγκεκριμένα για τις άμμους:

- Nevada No.120: Gallagher and Lin (2006, 2009),
- Monterey No.30: Persoff et al. (1999), Gallagher (2000), Gallagher and Mitchell (2002),
- Trevino soil: Persoff et al. (1999)

Σύμφωνα με τις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις στο Σχήμα 6.1, τα εδάφη αυτά στα οποία έχουν γίνει δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης είναι και πιο χονδρόκοκκα (Monterey No.30) και πιο λεπτόκοκκα (Nevada No.120, Trevino soil) από τα εδώ μετρηθέντα M31 (άμμος) και 85%M31 & 15%D6 (ιλυώδης άμμος). Συνεπώς, ο συγκερασμός των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας με τα εδώ μετρηθέντα μπορεί να αποδώσει ένα ευρύ φάσμα απόκρισης για εφαρμογές της πράξης.

Αρχικώς όμως, γίνεται μια κριτική επισκόπηση και επεξεργασία αποτελεσμάτων για τα τρία (3) εδάφη της βιβλιογραφίας. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στη σχέση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u με το ποσοστό της πυριτίας κατά βάρος CS(%) στο διάλυμα. Η σχέση αυτή αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.2, και τα συμπαγή σύμβολα υποδεικνύουν τιμές από δοκίμια με γνωστή τιμή σχετικής πυκνότητας D_r , ενώ τα ανοιχτά σύμβολα το αντίθετο. Διαφορετικά χρώματα υποδεικνύουν διαφορετικές άμμους, και η έμφαση στην επεξεργασία δίνεται στις τιμές που αντιστοιχούν σε δοκίμια με γνωστή D_r (διαγραμμισμένη ζώνη). Αν και υπάρχει αρκετή διασπορά, η επίδραση του CS(%) είναι εκθετική στην τιμή της αντοχής q_u , η οποία κυμαίνεται από 30 έως 85kPa κατά μέση τιμή για τα συνήθη ποσοστά CS = 5 έως 10%. Δηλαδή, τα σταθεροποιημένα μη συνεκτικά εδάφη αποκτούν αντοχές αντίστοιχες μαλακής αργίλου και η μέτρηση της αντοχής q_u μπορεί να αποτελέσει έναν έμμεσο έλεγχο ποιότητας της εφαρμογής της.



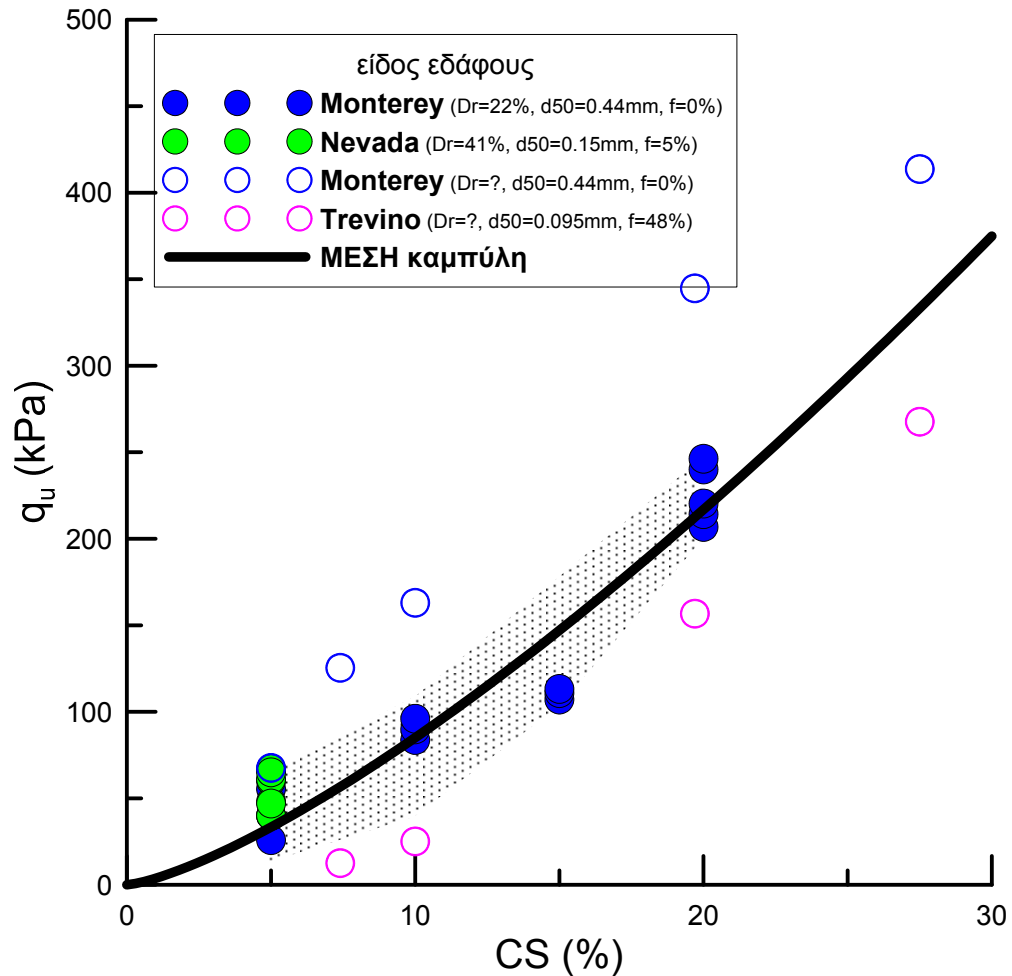
Σχήμα 6.1. Συγκριτική παράθεση κοκκομετρικών καμπυλών για την άμμο M31, την ιλύ D6, την ιλυώδη άμμο (85% M31 & 15% D6) και άλλες άμμους για τις οποίες υπάρχουν δοκιμές διατμητικής αντοχής διαφόρων τύπων

Χάριν ευκολίας στη χρήση, το Σχήμα 6.2 συμπεριλαμβάνει και τη μέση καμπύλη $q_u - CS$ που προκύπτει με βάση τα δεδομένα της βιβλιογραφίας, η οποία δίνεται από την απλή σχέση:

$$q_u (kPa) = 3.8 * [CS(\%)]^{1.35} \quad (6.1)$$

Η σχέση 6.1 θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τιμές $CS = 0$ έως 20% με βάση τα αποτελέσματα αυτά, με τις τιμές $CS = 5 - 10\%$ να είναι οι πλέον ενδεδειγμένες, για αξιόπιστη (κάτω όριο) και οικονομική (άνω όριο) σταθεροποίηση.

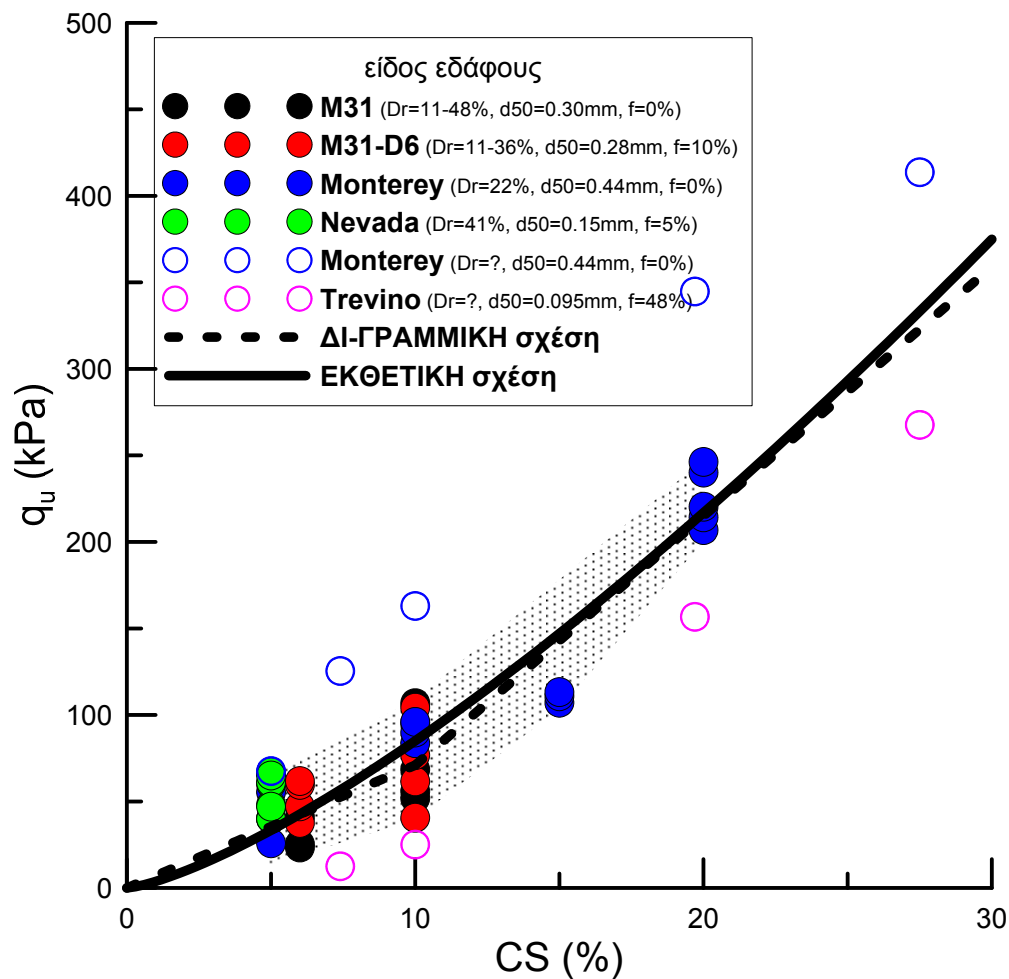
Βέβαια υπάρχει διασπορά στα δεδομένα, ειδικά με τις δοκιμές στις οποίες δεν είναι γνωστή η τιμή της σχετικής πυκνότητας D_r , η οποία σύμφωνα με το Κεφάλαιο 5 παίζει πρακτικώς εξίσου σημαντικό ρόλο στην απόκριση. Πιθανώς, οι αγνώστου D_r τιμές q_u για την άμμο Monterey θα πρέπει να αντιστοιχούν σε D_r σαφώς μεγαλύτερα από 22% (που αντιστοιχεί στα δεδομένα της άμμου Monterey με γνωστή D_r), αφού οδηγούν σε μεγαλύτερες τιμές q_u για το ίδιο ποσοστό $CS(\%)$. Αντίστοιχα, οι αγνώστου D_r τιμές q_u για το Trevino soil πιθανώς να σχετίζονται και με το υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων που εμπεριέχει το έδαφος αυτό, ή ισοδύναμα με τη μικρότερη τιμή D_r που δημιουργούν τα λεπτόκοκκα λόγω μεταβολής των e_{max} και e_{min} για την ίδια πάντα τιμή του δείκτη πόρων e . Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με το Κεφάλαιο 5, η ύπαρξη λεπτόκοκκων δίνει πιο χαμηλές τιμές q_u για το ίδιο ποσοστό πυριτίας $CS(\%)$ και τον ίδιο δείκτη πόρων e .



Σχήμα 6.2. Επίδραση του ποσοστού πυριτίας κατά βάρος CS(%) στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u για διαφορετικές άμμους, αμέσως μετά τη σταθεροποίηση (δεδομένα: Persoff et al. 1999, Gallagher 2000, Gallagher and Mitchell 2002, Gallagher and Lin 2006, 2009).

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 6.3, συγκρίνονται τα δεδομένα της βιβλιογραφίας από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5, σε όρους $q_u - \varepsilon_a$. Προκύπτει λοιπόν ότι τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5 εμπεριέχονται στη (διαγραμμισμένη) ζώνη συνήθους διακύμανσης που είχε προκύψει από τα βιβλιογραφικά δεδομένα (Σχήμα 6.2), με εξαίρεση 1-2 δοκιμές στην ιλυώδη άμμο που δίνουν λίγο χαμηλότερες τιμές q_u για CS = 10%. Με άλλα λόγια, τα αποτελέσματα του Παραδοτέου 2 είναι σαφώς συμβατά με τη βιβλιογραφία.

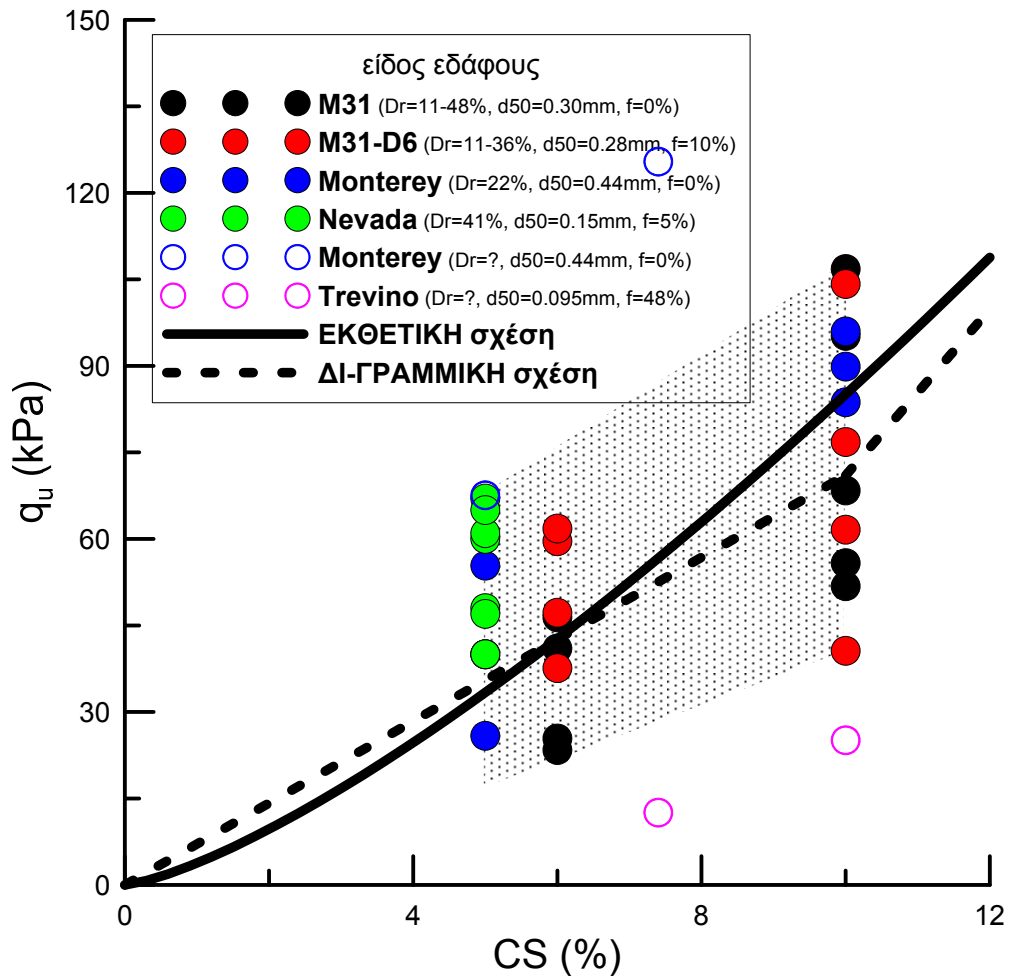
Τούτων δοθέντων, η σχέση 6.1 που είχε προκύψει από τη βιβλιογραφία (εκθετική σχέση στο Σχήμα 6.3) εξακολουθεί να δίνει μια αδρή προσέγγιση όλων των αποτελεσμάτων, αλλά με επαυξημένη πια διασπορά.



Σχήμα 6.3. Επίδραση του ποσοστού πυριτίας κατά βάρος CS(%) στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u για διαφορετικές άμμους, αμέσως μετά τη σταθεροποίηση (δεδομένα: Persoff et al. 1999, Gallagher 2000, Gallagher and Mitchell 2002, Gallagher and Lin 2006, 2009), συμπεριλαμβάνοντας τις δοκιμές του Κεφαλαίου 5.

Επιπλέον, για να μπορέσει μια εκθετική σχέση (σα την εξίσωση 6.1) να αποδώσει τις τιμές q_u σε όλο το εύρος του ποσοστού CS(%) δίνει μικρότερη σημασία στο σύνηθες εύρος CS = 5 – 10%, όπου διαφαίνεται μια υποεκτίμηση των τιμών q_u για CS = 5% και μια αντίστοιχη υπερεκτίμηση για CS = 10%. Συνεπώς, είναι προτιμότερο να προταθεί μια σχέση για τα συνήθη ποσοστά CS = 10%, και μία άλλη για μεγαλύτερα ποσοστά, αν και εφόσον αυτά θεωρηθούν εφαρμοστέα στην πράξη. Με τη λογική αυτή προτάθηκε η δι-γραμμική σχέση που αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.3, που δίνεται αναλυτικά από:

$$q_u(kPa) = \begin{cases} 7.1 CS(\%) & , \quad CS(\%) \leq 10\% \\ 71 + 14.4 [CS(\%) - 10\%] & , \quad 10\% < CS(\%) \leq 20\% \end{cases} \quad (6.2)$$



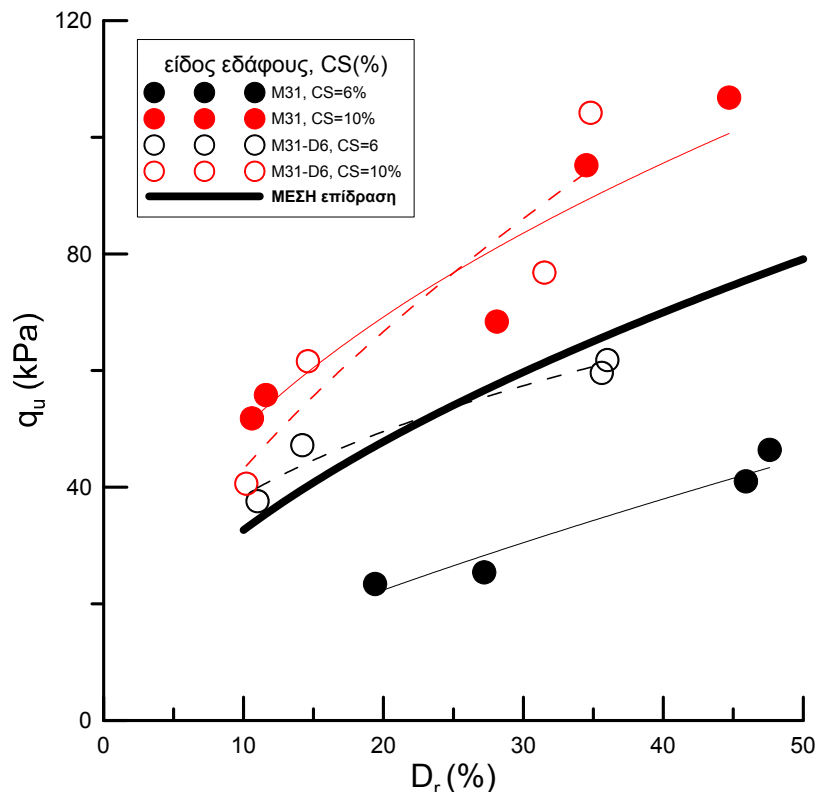
Σχήμα 6.4. Επίδραση του ποσοστού πυριτίας κατά βάρος CS(%) στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u για διαφορετικές άμμους, αμέσως μετά τη σταθεροποίηση (δεδομένα: Persoff et al. 1999, Gallagher 2000, Gallagher and Mitchell 2002, Gallagher and Lin 2006, 2009), συμπεριλαμβάνοντας τις δοκιμές του Κεφαλαίου 5, με έμφαση στα συνήθη ποσοστά προς χρήση CS = 5 – 10%.

Δίνοντας την έμφαση στα συνήθη ποσοστά CS(%), το Σχήμα 6.4 διερευνά την αξιοπιστία των δύο σχέσεων 6.1 (εκθετική) και 6.2 (δι-γραμμική) σε όρους $q_u - \epsilon_a$. Από το Σχήμα αυτό προκύπτει σαφώς πια ότι η εκθετική σχέση (6.1) δεν είναι και η βέλτιστη για το εν λόγω εύρος, καθώς μάλλον υποεκτιμά τις τιμές q_u για CS = 5% και μάλλον τις υπερεκτιμά για CS = 10%. Αντιθέτως, η δι-γραμμική σχέση (6.2) είναι μια βελτιωμένη πρόταση (δες προβλέψεις για CS = 10%), αν και εξακολουθεί να υποεκτιμά (ελαφρότερα όμως) τις τιμές q_u για CS = 5% (κάτω όριο εφαρμογής). Οι δύο σχέσεις κρίνονται ισοδύναμης αξιοπιστίας για τιμές CS = 6%.

Προσεκτική παρατήρηση του σχήματος 6.4 υποδεικνύει όμως ότι ακόμη και αυτή η δι-γραμμική σχέση 6.2 εμπεριέχει μεγάλη διασπορά. Για παράδειγμα, για CS = 5%, το εύρος τιμών q_u είναι από 26 έως 67kPa, ενώ το αντίστοιχο εύρος για CS = 10% είναι από 41 έως 107kPa, δηλαδή υπάρχει μια σχέση 1 προς 2.6 από τη ελάχιστη

έως τη μέγιστη τιμή q_u σε κάθε τιμή ποσοστού CS(%). Το εύρος αυτό υποδεικνύει ότι μάλλον χρειάζεται μια πιο επακριβής προσέγγιση της τιμής της q_u , καθώς η απλή συσχέτιση με το ποσοστό CS(%), είτε εκθετική ή δι-γραμμική, είναι υπερ-απλουστευτική. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η σχετική πυκνότητα D_r των εδαφών, η οποία διαφαίνεται από το Κεφάλαιο 5 να είναι εξίσου σημαντική παράμετρος με το ποσοστό πυριτίας κατά βάρος CS(%).

Για το σκοπό αυτό προτείνεται όπως η σχέση υπολογισμού να εμπεριέχει μια αύξουσα συνάρτηση της σχετικής πυκνότητας D_r (%). Για την εκτίμηση της μορφής αυτής της συνάρτησης, η έμφαση δίνεται στα δεδομένα του Κεφαλαίου 5, στα οποία η επίδραση της σχετικής πυκνότητας D_r (%) διερευνήθηκε ενδελεχώς.

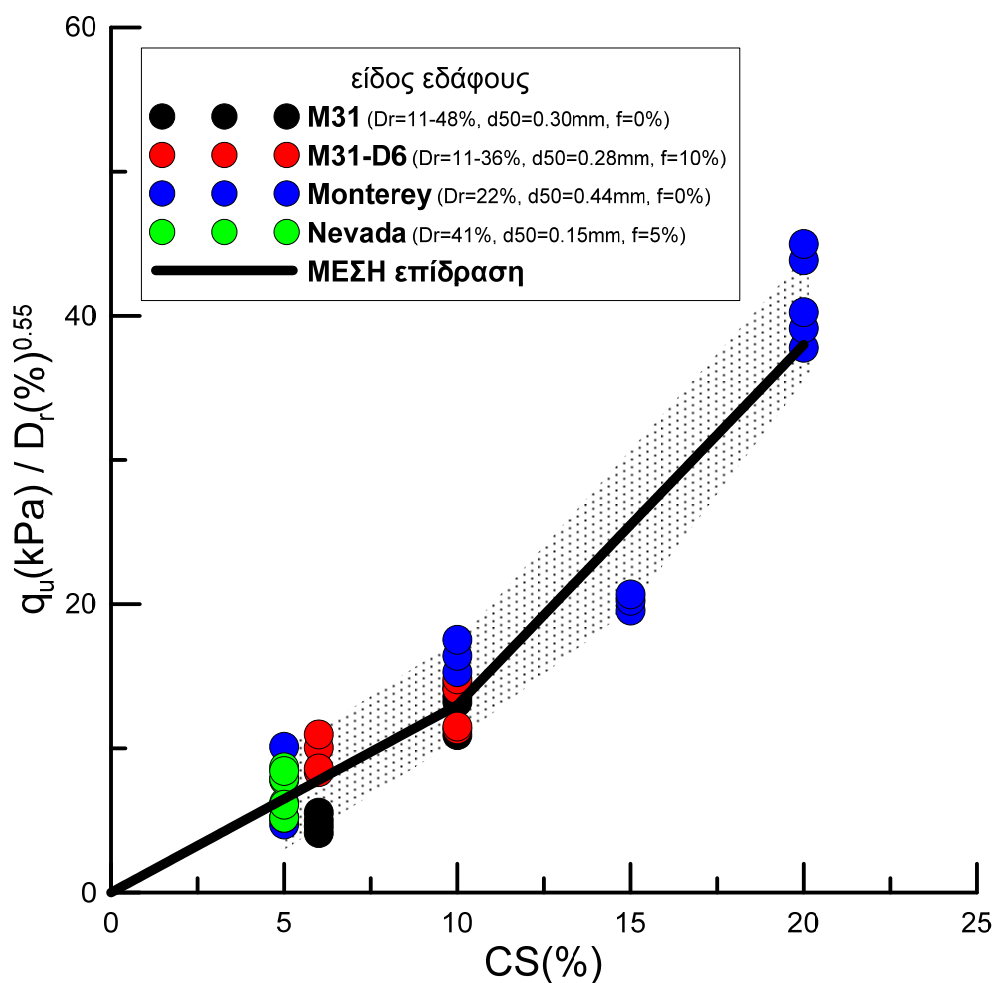


Σχήμα 6.5. Επίδραση της σχετικής πυκνότητας D_r (%) στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u σταθεροποιημένων εδαφών άμμου (M31) και ιλυώδους άμμου (μίγμα: 85% M31 & 15% D6) από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5, για τιμές CS = 6 και 10%.

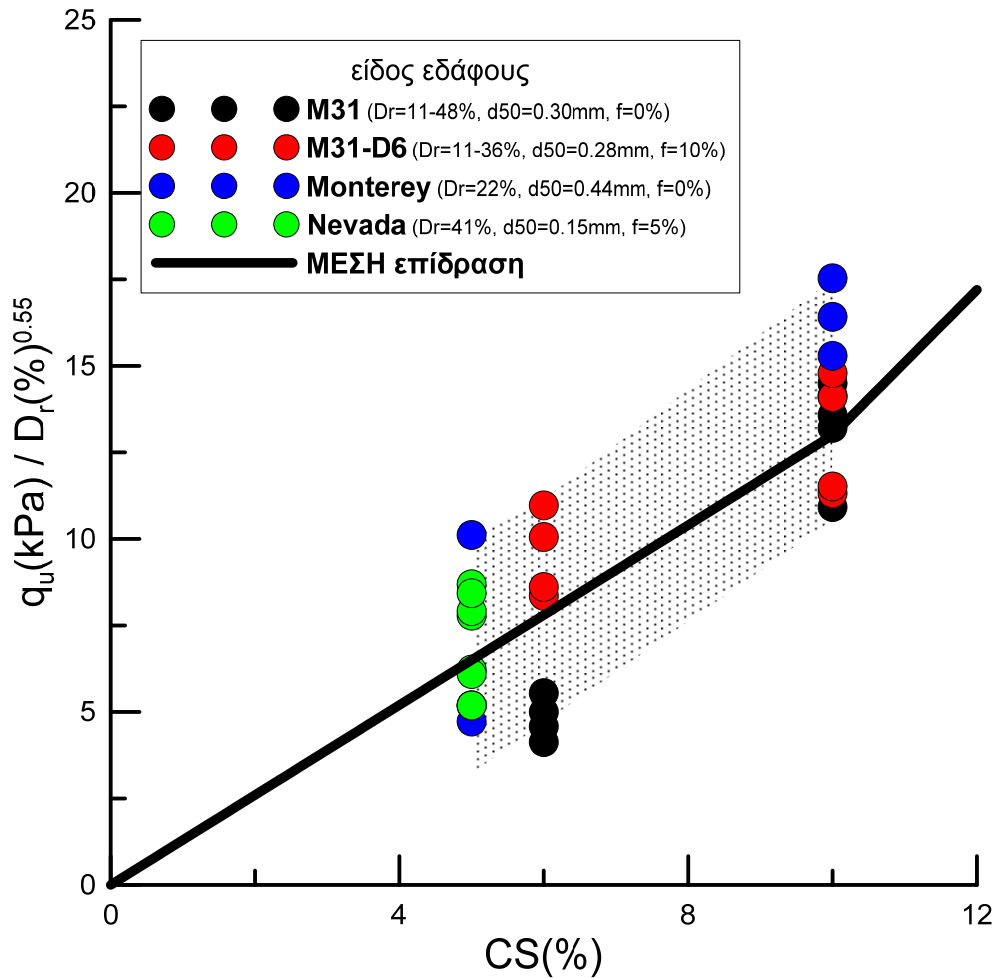
Στο πλαίσιο αυτό, στο Σχήμα 6.5 ποσοτικοποιείται η επίδραση της σχετικής πυκνότητας D_r (%) στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u σταθεροποιημένων εδαφών άμμου (M31) και ιλυώδους άμμου (μίγμα: 85% M31 & 15% D6) από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5, για τιμές CS = 6 και 10%. Η αυξητική επίδραση της D_r στις τιμές της q_u επιβεβαιώνεται και από τις 4 ομάδες δεδομένων στο Σχήμα 6.5. Στο ίδιο σχήμα υπάρχουν και καμπύλες βέλτιστης προσαρμογής ανά ομάδα δεδομένων που είναι όλες της μορφής $b \cdot D_r(\%)^a$, όπως και η καμπύλη μέσης

επίδρασης. Οι τιμές των εκθετών a των ανωτέρω σχέσεων κυμαίνονται από 0.36 (μίγμα για CS=6%) έως 0.76 (άμμος για CS=6%) με μέση τιμή 0.55, όση ακριβώς είναι η τιμή του εκθέτη a για την καμπύλη μέσης επίδρασης.

Συνεπώς, η αύξουσα συνάρτηση $D_r(\%)^{0.55}$ μπορεί εύλογα να θεωρηθεί ως ισχύουσα επίδραση στην τιμή της q_u για όλους του εδαφικούς τύπους και τιμές του ποσοστού CS(%). Με αυτό ως δεδομένο, τα πειραματικά αποτελέσματα τιμών q_u για τα οποία είναι γνωστή η τιμή της D_r χρησιμοποιούνται στο Σχήμα 6.6 για την εκτίμηση μιας πιο ακριβούς σχέσης εκτίμησης της q_u σταθεροποιημένων εδαφών. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές q_u διαιρούνται ως προς $D_r(\%)^{0.55}$ και συσχετίζονται με το ποσοστό πυριτίας CS(%).



Σχήμα 6.6. Επίδραση του ποσοστού πυριτίας κατά βάρος CS(%) στην «κανονικοποιημένη» αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη $q_u / D_r(\%)^{0.55}$ για διαφορετικές άμμους, αμέσως μετά τη σταθεροποίηση (δεδομένα: Persoff et al. 1999, Gallagher 2000, Gallagher and Mitchell 2002, Gallagher and Lin 2006, 2009), συμπεριλαμβάνοντας τις δοκιμές του Κεφαλαίου 5.



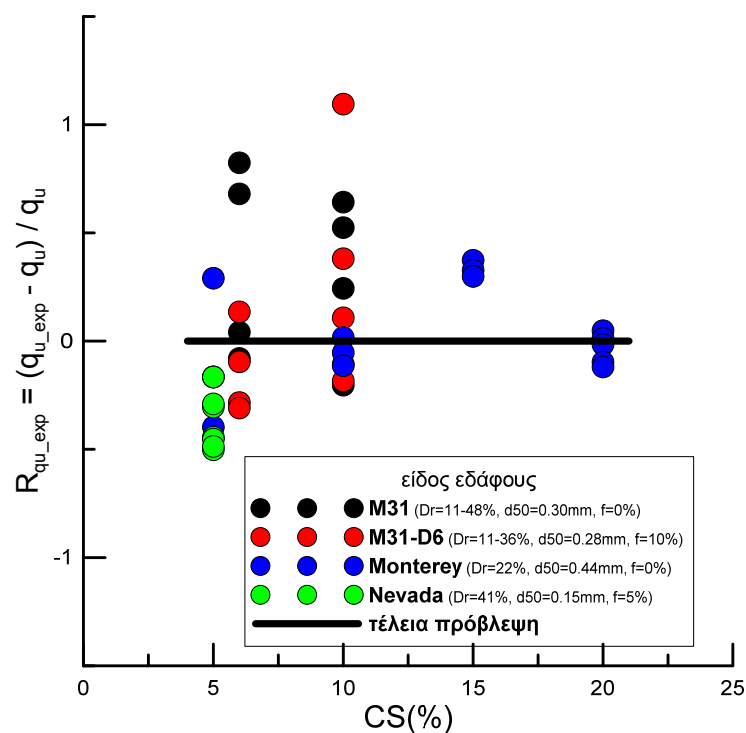
Σχήμα 6.7. Επίδραση του ποσοστού πυριτίας κατά βάρος CS(%) στην «κανονικοποιημένη» αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη $q_u / D_r(\%)^{0.55}$ για διαφορετικές άμμους, αμέσως μετά τη σταθεροποίηση (δεδομένα: Persoff et al. 1999, Gallagher 2000, Gallagher and Mitchell 2002, Gallagher and Lin 2006, 2009), συμπεριλαμβάνοντας τις δοκιμές του Κεφαλαίου 5, με έμφαση στα συνήθη ποσοστά προς χρήση CS = 5 – 10%.

Από το Σχήμα 6.6 προκύπτει ότι η διασπορά των δεδομένων μειώνεται, και ότι μπορεί και πάλι να οριστεί η δι-γραμμική σχέση επίδρασης του ποσοστού CS(%) για αυτή την «κανονικοποιημένη» αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη $q_u/D_r(\%)^{0.55}$. Η σχέση αυτή υπολογισμού της q_u παίρνει την εξής τελική αναλυτική μορφή:

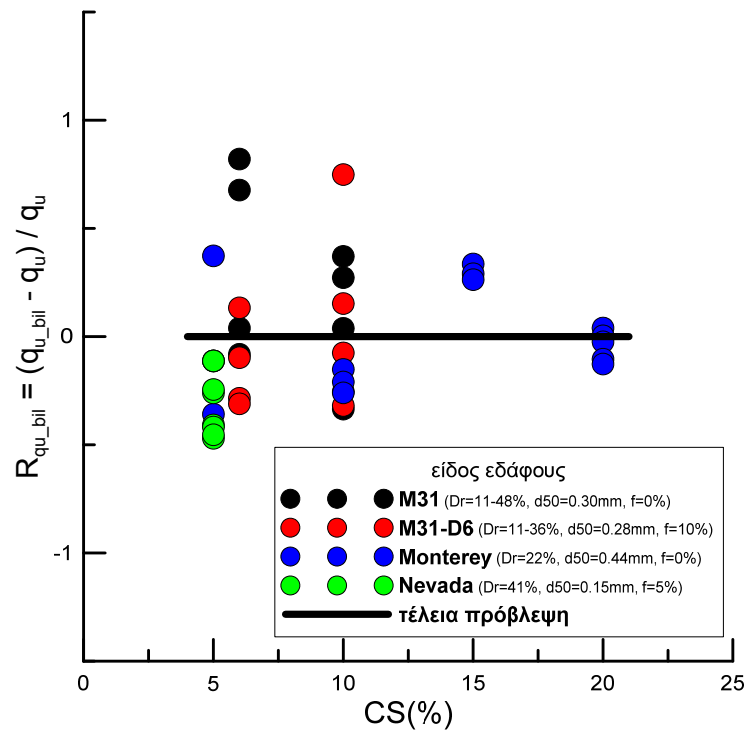
$$q_u(kPa) = \begin{cases} 1.3 CS(\%) D_r(\%)^{0.55} & , \quad CS(\%) \leq 10\% \\ [13 + 2.5[CS(\%) - 10\%]] D_r(\%)^{0.55} & , \quad 10\% < CS(\%) \leq 20\% \end{cases} \quad (6.3)$$

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 6.7, δίνεται έμφαση στα συνήθη ποσοστά προς χρήση CS = 5 – 10%, και διερευνάται εκεί η ακρίβεια της σχέσης 6.3. Είναι φανερό ότι η διασπορά των αποτελεσμάτων έχει μειωθεί συγκριτικά με την εικόνα στο Σχήμα 6.4. Για παράδειγμα, για CS = 5%, το εύρος τιμών $q_u / D_r(\%)^{0.55}$ είναι από 4.7 έως 10.1, ενώ το αντίστοιχο εύρος για CS = 10% είναι από 10.9 έως 17.5, δηλαδή υπάρχει μια σχέση 1 προς 1.7 έως 2.1 από τη ελάχιστη έως τη μέγιστη τιμή q_u σε κάθε τιμή ποσοστού CS(%), που είναι σαφώς μικρότερη από τη σχέση 1 προς 2.6 που βρέθηκε στο Σχήμα 6.4. Η απομειωμένη διασπορά υποδεικνύει ότι η συσχέτιση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη τόσο ως προς το ποσοστό πυριτίας CS(%), όσο και ως προς τη σχετική πυκνότητα $D_r(\%)$ οδηγεί σε μια επαρκώς ακριβή σχέση εκτίμησης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρακτικές εφαρμογές.

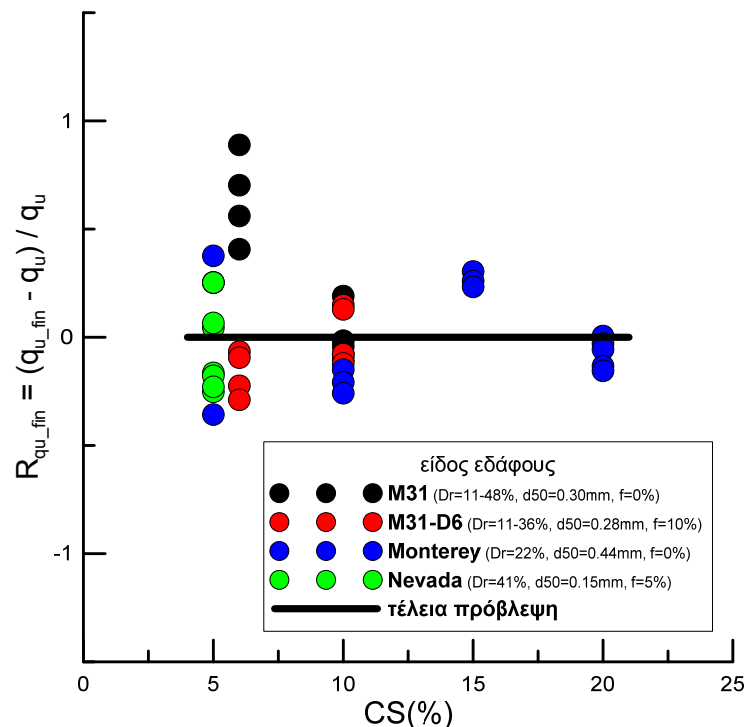
Η διερεύνηση της ακρίβειας πρόβλεψης της q_u με βάση τις σχέσεις 6.1, 6.2 και 6.3 διερευνάται στα Σχήματα 6.8, 6.9 και 6.10, αντίστοιχα, που ακολουθούν. Η ποσοτικοποίηση του λάθους πρόβλεψης γίνεται με την εκτίμηση του σχετικού λάθους R που δίνεται από τη σχέση: (πρόβλεψη – μέτρηση)/μέτρηση.



Σχήμα 6.8. Επίδραση του ποσοστού πυριτίας κατά βάρος CS(%) στο σχετικό λάθος εκτίμησης της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u από την εκθετική σχέση 6.1 για διαφορετικές άμμους.



Σχήμα 6.9. Επίδραση του ποσοστού πυριτίας κατά βάρος CS(%) στο σχετικό λάθος εκτίμησης της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u από την δι-γραμμική σχέση 6.2 για διαφορετικές άμμους.



Σχήμα 6.10. Επίδραση του ποσοστού πυριτίας κατά βάρος CS(%) στο σχετικό λάθος εκτίμησης της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u από την πολυ-παραμετρική σχέση 6.3 για διαφορετικές άμμους.

Έτσι, στα Σχήματα διερευνάται η επίδραση του ποσοστού πυριτίας CS(%) στο σχετικό λάθος R που προκύπτει από κάθε σχέση εκτίμησης ξεχωριστά. Τιμές του $R > 0$ υπονοούν υπερεκτίμηση, ενώ τιμές $R < 0$ αποδίδουν υποεκτίμηση της τιμής της αντοχής q_u . Τιμές του $R > 1$ αντιστοιχούν σε εκτιμήσεις υπερδιπλάσιες των μετρήσεων, ενώ τιμές του $R < 0.5$ αντιστοιχούν σε εκτιμήσεις υποδιπλάσιες. Διαφορετικά χρώματα συμβόλων αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τύπους εδάφους, όπως και στα προηγούμενα σχήματα του παρόντος κεφαλαίου.

Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι η σχέση 6.1 μπορεί να δώσει και υπερδιπλάσιες (CS = 10%) και υποδιπλάσιες (CS = 5%) τιμές της q_u , ενώ οι υπερεκτιμήσεις μειώνονται με χρήση της σχέσης 6.2. Με τη σχέση 6.3 όμως, μειώνονται και οι υποεκτιμήσεις, και συνολικά η πρόβλεψη γίνεται ακριβέστερη (σαφώς μικρότερη διασπορά, συνολικά).

Βιβλιογραφικές αναφορές

- 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.
- British Standards 1377: Part 5: 1990 Standard methods of test for soils for civil engineering purposes, *British Standards Institution*, Test 12, Compressibility, permeability and durability tests, pp. 1-33.
- British Standards 1377: Part 7: 1990 Standard methods of test for soils for civil engineering purposes, *British Standards Institution*, Test 12, Shear strength tests, pp. 1-48.
- Conlee, C. T. (2010). 'Dynamic properties of colloidal silica soils using centrifuge model tests and a full-scale field test'. *PhD dissertation*, Faculty of Drexel University, Philadelphia.
- DeJong J. T., Fritzsche 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.
- El Mohtar, C. S., Clarke, J., Bobet, A., Santagata, M., Drnevich, V. P. & Johnston, C. (2008a). 'Cyclic response of a sand'. *Proceedings*, 4th Intern. Conference on Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Sacramento, May 18-22.

- 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. & 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, Lin, Y., (2006), "Three-meter column testing of colloidal silica transport through porous media", *Geotechnical Special Publication*, (152), pp. 417-424
- Gallagher, P. M., Lin Y. (2009), "Colloidal silica transport through liquefiable porous media", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(11): 1702-1712
- Gratchev, I. B. & Sassa, K. (2007). 'Cyclic behavior of fine-grained soils at different pH values'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 2, 271-279.
- 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.
- Haldavnekar, V., Bobet, A., Santagata, M. & Drnevich, V. (2004). 'Soil treatment with a thixotropic fluid: an autoadaptive design for liquefaction prevention'. *Proceedings*, 11th Intern. Conference on Soil dynamics and earthquake engineering & 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol. 2, 553-560.
- 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.
- Kabashima, Y. & Towhata, I. (2000). 'Improvement of dynamic strength of sand by means of infiltration grouting'. *3rd International Conference on ground improvement techniques*, Singapore, 25-26 September.
- 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.
- Ladd, R.S. (1974) 'Specimen preparation and liquefaction of sands'. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.100, No.GT10, pp. 1180-1184.
- 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 silica-grouted 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

- 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.
- Persoff, P., Moridis, J., Apps, J. A. & Pruess, K. (1998). 'Evaluation tests for colloidal silica for use in grouting applications'. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 21, No. 3, September, 264-269.
- Persoff, P., Apps, J., Moridis, J. & Whang, J. M. (1999). 'Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 6, Paper No. 16545
- 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.
- Van Paasen L. A, Harkes M. P., van Zwieten G. A., van der Zon W. H., van der Star W. R. L., van Loosdrecht M. C. M. (2009), "Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method", *Proceedings, 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, M. Hamza et al (eds), Egypt.
- Vipulanandan, C. & Ata, A. (2000). 'Cyclic and damping properties of silicate-grouted sand'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 7, 650-656.