

ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HERSCEL-BUCKLEY ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΕΣΟ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ

Χατζηαγγέλου Μ.¹ και Αναγνωστόπουλος Κ.²

¹ Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., 540 06, Θεσσαλονίκη, kanagnos@civil.auth.gr

² Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., 540 06, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η έγχυση αιωρημάτων προς ενίσχυση της αντοχής χαλαρών εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών ή για τη δημιουργία στεγανωτικών στρώσεων κάτω από φράγματα είναι μια ευρέως εφαρμοζόμενη μέθοδος τις τελευταίες δεκαετίες. Οι ολοένα και μεγαλύτερες απαιτήσεις για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε συνδυασμό πάντα με το κόστος αποτέλεσαν το κίνητρο για τη βελτίωση της μεθόδου καθώς επίσης και την ανάγκη προσδιορισμού των παραγόντων εκείνων που καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν διάφορα ερευνητικά πεδία με σκοπό να μελετηθεί η ροή των ενεμάτων σε διάφορα μέσα (ρηγματωμένο βράχο, χονδρόκοκκες άμμοι). Στην εργασία αυτή μελετάται η ανάπτυξη ενός μοντέλου με σκοπό τον προσδιορισμό της μέγιστης απόστασης διείσδυσης ενέματος σε πορώδες μέσο, με τη χρήση του εκθετικού νόμου των Herscel-Buckley. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των προκυπτόντων αποτελεσμάτων με τα προερχόμενα από επι τόπου δοκιμές ενέσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε χαλαρή αποσαθρωμένη βραχώμαζα.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τον προσδιορισμό της μέγιστης απόστασης διείσδυσης ενεμάτων διαμέσω μιας ρωγμής ή ενός πορώδους μέσου στηρίζεται στο μοντέλο ροής Bingham και η μαθηματική του έκφραση είναι:

$$L_{max} = \frac{R}{2} \cdot \frac{P}{\tau_0} \quad (1)$$

όπου: τ_0 : τάση διαρροής
P : πίεση
R : ακτίνα κυλινδρικού σωλήνα

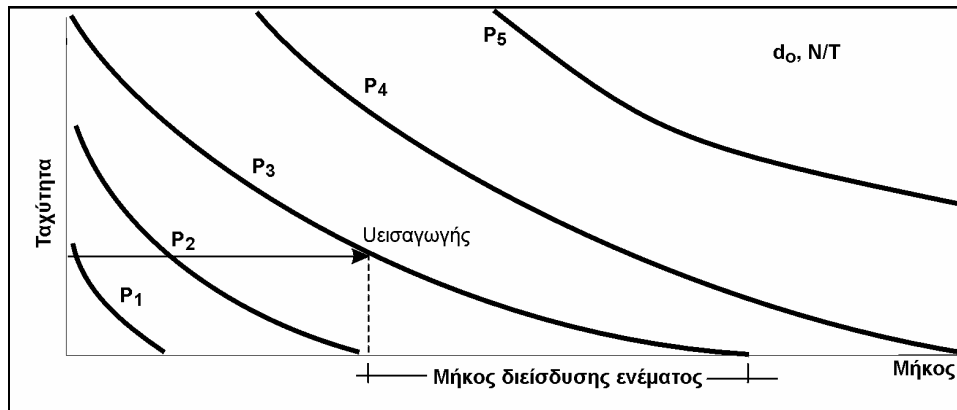
Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο η σχέση μεταξύ διαμητρικής τάσης – διαμητρικής παραμόρφωσης είναι γραμμική ενώ καθοριστικός παράγοντας για τη διείσδυση του ενέματος αποτελεί η τάση διαρροής. Πειραματικές δοκιμές έδειξαν ότι η ρεολογική συμπεριφορά των αιωρημάτων τσιμέντου δεν ανταποκρίνεται σε αυτό το απλοϊκό μοντέλο αλλά ακολουθεί αυτή των μη νευτωνικών ρευστών, για τον προσδιορισμό της οποίας χρειάζονται δύο σταθερές (Hakanson 1993, Χρηστάρας et al. 1999, Γκουδούλας et al. 1999, Christaras et al. 2000). Μία από τις πλέον συνηθισμένες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή αρκετών μη νευτωνικών ρευστών είναι αυτή του εκθετικού νόμου (Herscel-Bukley):

$$\tau = \tau_0 + k(-\dot{\gamma})^n \quad (2)$$

όπου: k : δείκτης συνοχής
n : δείκτης ροϊκής συμπεριφοράς
 $\dot{\gamma}$: διαμητρική παραμόρφωση

Δεχόμενοι ότι το πορώδες μιας εδαφικής μάζας, η οποία πρόκειται να υποστεί ένεση, απαρτίζεται από ένα δίκτυο τριχοειδών καναλιών ελάχιστης ισοδύναμης διαμέτρου d_0 ο υπολογισμός της μέγιστης απόστασης που θα καλύψει το ένεμα από την οπή έγχυσης μπορεί να γίνει ως εξής:

Θεωρούμε ότι η πτώση της ταχύτητας κατά την κίνηση του ενέματος σε ένα τριχοειδές κανάλι απείρου μήκους μπορεί να προσομοιωθεί με τη μεταβολή των τιμών της ταχύτητας ροής του ενέματος σε τριχοειδή ιξωδόμετρα διαφόρων μηκών και αντίστοιχης σταθερής διαμέτρου d_0 .



Σχήμα 1. Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει του μήκους των τριχοειδών σωλήνων διαμέτρου d_0 για διάφορες τιμές πίεσης p και προσδιορισμός του μήκους διείδυσης του ενέματος.

Συνεπώς βάσει των εργαστηριακών μετρήσεων και θεωρητικών υπολογισμών (Εξ. 2) που προκύπτουν κατασκευάζεται διάγραμμα που συσχετίζει τη μεταβολή της ταχύτητας με το μήκος L , για διάφορες τιμές πίεσης (Σχ. 1).

Γνωρίζοντας επομένως την ταχύτητα εισαγωγής του ενέματος στα τριχοειδή κανάλια και την πίεση παροχής το μέγιστο μήκος διείδυσης υπολογίζεται νομογραφικά ή από αντίστοιχους πίνακες ως η διαφορά μεταξύ αυτού που αντιστοιχεί στη $U_{εισαγωγής}$ και του μήκους για το οποίο η ταχύτητα θεωρείται ότι είναι πολύ μικρή έως μηδενική.

Η ταχύτητα εισαγωγής του ενέματος $U_{αρχ}$ εντός των τριχοειδών καναλιών ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$U_{αρχ} = \frac{Q_{ολ}}{n \cdot S} \quad (3)$$

όπου: n : πορώδες εγγεόμενου εδάφους
 S : η επιφάνεια κατά μήκος της οπής γεώτρησης
 $Q_{ολ}$: παροχή αντλίας

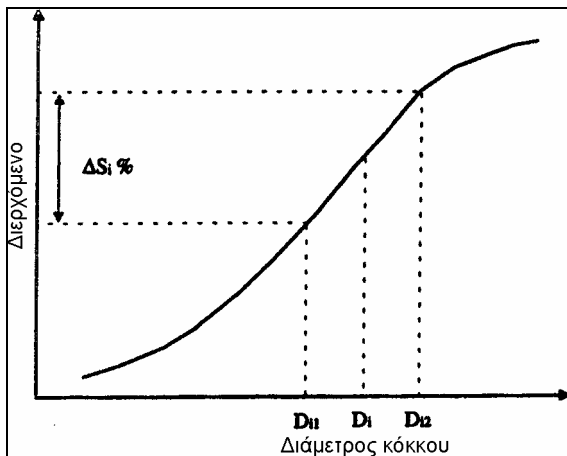
Για να υπολογισθεί η ελάχιστη ισοδύναμη διάμετρος d_0 των τριχοειδών καναλιών του εδάφους από την κοκκομετρική καμπύλη είναι αναγκαίο να εκτιμηθεί πρωτίστως η ισοδύναμη διάμετρος (D_h) των κόκκων. Η ισοδύναμη διάμετρος των κόκκων προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση (Kovacs 1981):

$$D_h = \frac{1}{\sum \frac{\Delta S_i}{D_i}} \quad (4)$$

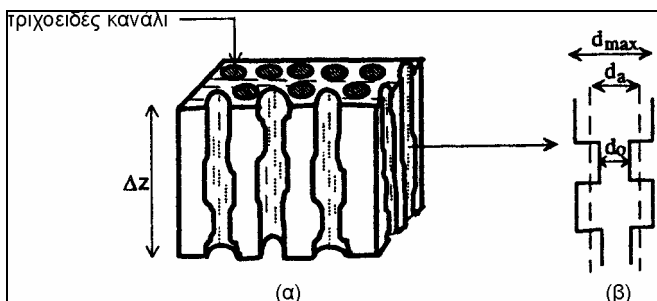
όπου D_i είναι η μέση διάμετρος κόκκων στο i διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών κοσκίνων και ΔS_i το αντίστοιχο βάρος του κρατηθέντος εδάφους διαιρεμένου με το ολικό βάρος του δείγματος (Σχ. 2 και 3). Συνεπώς, γνωρίζοντας το πορώδες n του δοκιμίου και κάνοντας την παραδοχή ότι οι κόκκοι είναι ιδίου σχήματος τότε η ελάχιστη διάμετρος d_0 δίνεται από τον τύπο:

$$d_0 = 2.67 \frac{n}{1-n} \cdot \frac{D_h}{\alpha} \quad (5)$$

όπου: α : συντελεστής σχήματος κόκκου με τιμή 6 για σφαιρικά σωματίδια



Σχήμα 2. Υπολογισμός της μέσης διαμέτρου από την κοκκομετρική καμπύλη.



Σχήμα 3. Απεικόνιση των τριχοειδών καναλιών α) Σε ένα στοιχειώδες τμήμα της άμμου, β) Η ελάχιστη ισοδύναμη διάμετρος των τριχοειδών καναλιών d_0 .

Σύμφωνα με τα προηγούμενα η παρούσα εργασία μελετά τη ρεολογική συμπεριφορά ενεμάτων διαφόρων αναλογιών N/T (νερό / τσιμέντο) μέσω μιας εκτεταμένης εργαστηριακής έρευνας σε τριχοειδή ιξωδόμετρα και κάνοντας χρήση του μοντέλου Herschel-Buckley υπολογίζει τις ρεολογικές σταθερές βάσει των οποίων είναι εφικτός ο σχεδιασμός των νομογραφημάτων καθώς επίσης και ενός στατιστικού μοντέλου για τον προσδιορισμό της μέγιστης απόστασης διείσδυσης ενός ενέματος σε πορώδες μέσο (χονδρή άμμος). Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέρχονται από πραγματοποιηθείσες δοκιμές ενέσεων κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε χαλαρή αποσαθρωμένη βραχώμαζα στην περιοχή της Ασπροβάλτας.

2 ΥΛΙΚΑ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για την παρασκευή των ενεμάτων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου II/45 με ειδική επιφάνεια Blain $4500\text{cm}^2/\text{g}$, ειδικό βάρος $3,15\text{g}/\text{cm}^3$ και χαρακτηριστική αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 45 MPa στις 28 ημέρες. Η χημική του σύσταση παρουσιάζεται στον πίνακα 1.

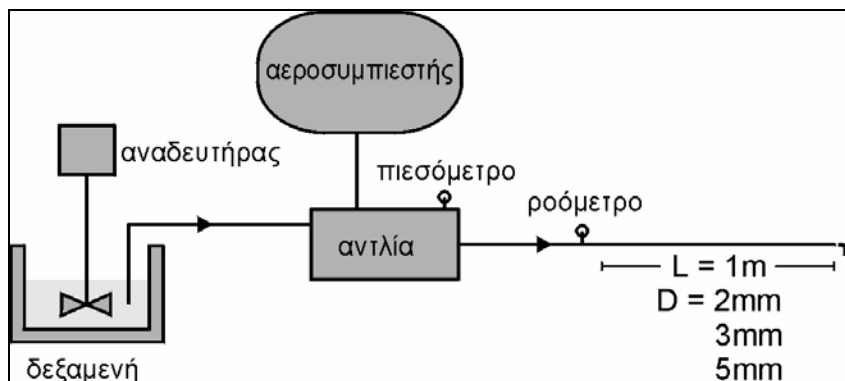
Πίνακας 1. Ποσοτική ανάλυση τσιμέντου

Ενώσεις	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Απώλεια πυρώσεως
Ποσοστό (%)	30	7,5	2	52	2	3	1,5	0,5	1,5

Τα προς μελέτη ενέματα παρασκευάστηκαν σε παρτίδες των 10l με καλή ανάμειξη επί 5 λεπτά τουλάχιστον νερού και τσιμέντου σε αναλογίες που κυμάνθηκαν από N/T = 5:1 έως 2:1. Ο αναδευτήρας που χρησιμοποιήθηκε ήταν υψηλόστροφος.

Οι ρεολογικές ιδιότητες μετρήθηκαν σε τριχοειδές ιξωδόμετρο διαμέτρου τριχοειδούς $D = 2,3$ και 5mm μέσω της καταγραφής των σχέσεων διατμητικής τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης (Σχ. 4).

Η μέθοδος του τριχοειδούς ιξωδόμετρου επιλέχθηκε αντί της κλασσικής μεθόδου των περιστροφικών ιξωδομέτρων για το λόγο ότι οι ρεολογικές ιδιότητες των ενεμάτων θα έπρεπε να προσδιορισθούν κάτω από συνθήκες παρόμοιες με τις επί τόπου ούτως ώστε τα δεδομένα που θα προέκυπταν εργαστηριακά να μπορούν να συσχετισθούν με τα αντίστοιχα των επί τόπου. Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα των τριχοειδών ιξωδομέτρων, το οποίο και λήφθηκε σοβαρά υπόψη στην παρούσα έρευνα, είναι η δυνατότητα χρήσης τους για εφαρμογή υψηλών πιέσεων και μεγάλων ρυθμών διατμητικής παραμόρφωσης, σε αντίθεση με τα περιστροφικά τα οποία δύναται να χρησιμοποιηθούν για μέγιστη πίεση περίπου 100kPa. Το σύστημα τριχοειδούς ιξωδομετρίας που κατασκευάστηκε είχε τη δυνατότητα λήψης ρεολογικών παραμέτρων για χαμηλές και υψηλές πιέσεις έως 450kPa (Maria et al 2003, Anagnostopoulos & Stavridakis 2004).



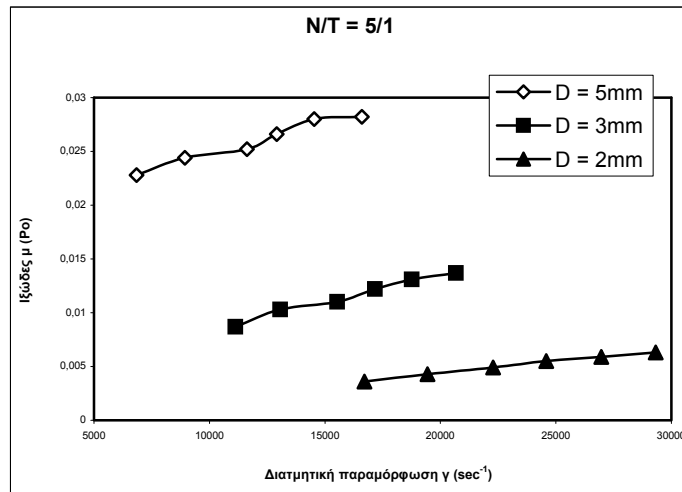
Σχήμα 4. Σύστημα τριχοειδούς ιξωδόμετρου

3 ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

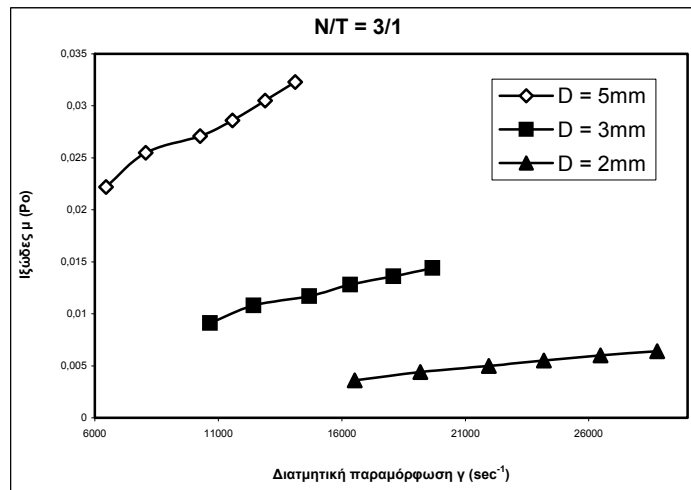
Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται η τάση εκκίνησης τ_0 και οι ρεολογικοί συντελεστές k και n ενεμάτων διαφόρων υδρομετρικών συντελεστών, για διαμέτρους τριχοειδούς 2,3 και 5mm. Στα σχήματα 5(α) - (δ) διαφαίνεται η σχέση μεταξύ φαινομένου ιξώδους και ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης. Παρατηρείται ότι η χαμηλότερη και υψηλότερη τιμή ιξώδους είναι 2,5 και 37 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του νερού ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{sec}$). Το ιξώδες των ενεμάτων ανεξαρτήτου υδρομετρικού συντελεστή αυξανόταν όσο μεγάλωνε ο ρυθμός διάτμησης, φαινόμενο το οποίο παρατηρήθηκε για όλες τις διαμέτρους τριχοειδούς και που υποδεικνύει ότι το ένεμα συμπεριφέρεται ως ένα εκτατό υλικό (shear thickening). Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται προφανώς στην αύξηση της ακαμψίας που προκύπτει από την εκτατότητα του όγκου εξαιτίας της καταστροφής της δομής του αιωρήματος. Μια επίσης αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι όσο μειωνόταν η διάμετρος του τριχοειδούς τόσο περισσότερο μειώνονταν οι τιμές του ιξώδους όπως και της τάσης εκκίνησης. Όσο πυκνότερο ήταν το ένεμα η τιμή της τάσης εκκίνησης αυξανόταν, αύξηση όμως όχι ιδιαίτερα σημαντική.

Πίνακας 2. Τάση εκκίνησης τ_0 και συντελεστές k και n ενεμάτων διαφόρων υδρομετρικών συντελεστών για διάμετρο τριχοειδούς 2,3 και 5mm.

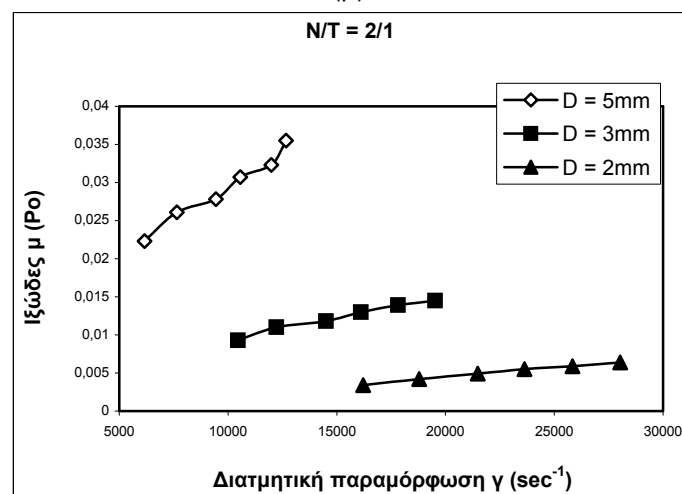
W/C	τ_0 (N/m ²)	D (mm)	k	n
5:1	31.25	5	0.0025	1.244
3:1	43.75	5	0.0004	1.441
2:1	50	5	0.0001	1.589
1:1	56.25	5	0.0001	1.596
5:1	15.9	3	$9\cdot 10^{-6}$	1.724
3:1	20.18	3	10^{-5}	1.721
2:1	25.2	3	10^{-5}	1.699
1:1	34.7	3	$2\cdot 10^{-5}$	1.646
5:1	13.6	2	$2\cdot 10^{-7}$	1.997
3:1	15.82	2	10^{-7}	2.024
2:1	20.33	2	$3\cdot 10^{-8}$	2.157
1:1	22.5	2	10^{-6}	1.842



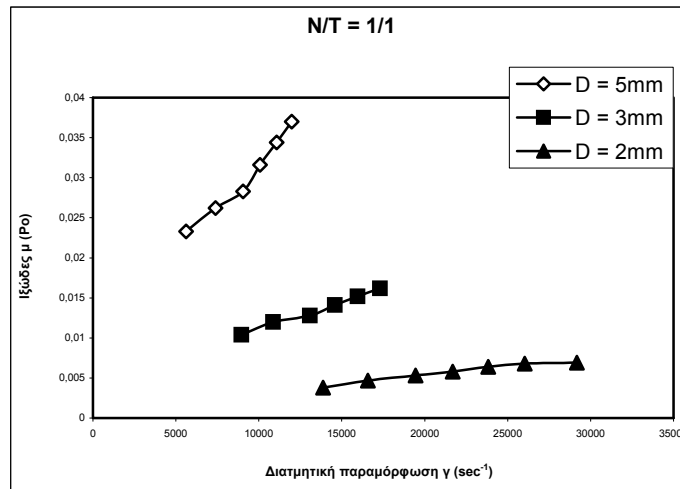
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 5(α-δ). Φαινόμενο ιξώδες συναρτήσεως του ρυθμού διαμητικής παραμόρφωσης ενεμάτων διαφόρων υδρομετρικών συντελεστών, για διάμετρο τριχοειδούς 2, 3 και 5mm.

4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2) το ισοδύναμο της διαμητικής τάσης λαμβάνεται η εξίσωση:

$$\frac{R}{2} \cdot \frac{\Delta P}{L} = \tau_o + k \left(\frac{8u_{av}}{d} \right)^n \quad (6)$$

όπου ΔP: η διαφορά πίεσης μεταξύ των άκρων του τριχοειδούς σωλήνα
 L: μήκος τριχοειδούς σωλήνα
 R: ακτίνα τριχοειδούς σωλήνα
 d: διάμετρος τριχοειδούς σωλήνα
 u_{av} : μέση ταχύτητα ενέματος

Επομένως γνωρίζοντας τις σταθερές k και n καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός από την εξίσωση (6) ενός εύρους τιμών ταχύτητας που αντιστοιχεί σε ένα εύρος τιμών μήκους για σταθερή πίεση P.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης με σκοπό τον προσδιορισμό του μήκους διείσδυσης ενέματος με υδρομετρικό συντελεστή $N/T = 1$ (συνηθέστερη αναλογία που χρησιμοποιείται στις τσιμεντενέσεις) σε πορώδες μέσο με ελάχιστη ισοδύναμη διάμετρο πόρου d_o κάνοντας χρήση των τιμών της ταχύτητας που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου Herschel-Buckley. Συγκεκριμένα, το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης συσχετίζει το μήκος ροής με τη διάμετρο d_o του τριχοειδούς, την πίεση έγχυσης P και τη μέση ταχύτητα του ενέματος σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$L = \alpha_o + \alpha_1 \cdot d_o + \alpha_2 \cdot P + \alpha_3 \cdot u$$

Κάνοντας χρήση του στατιστικού προγράμματος SPSS το βέλτιστο μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης είναι το ακόλουθο:

$$L = 15,616 + 948,332 \cdot d_o + 214,888 \cdot P - 85,45 \cdot u$$

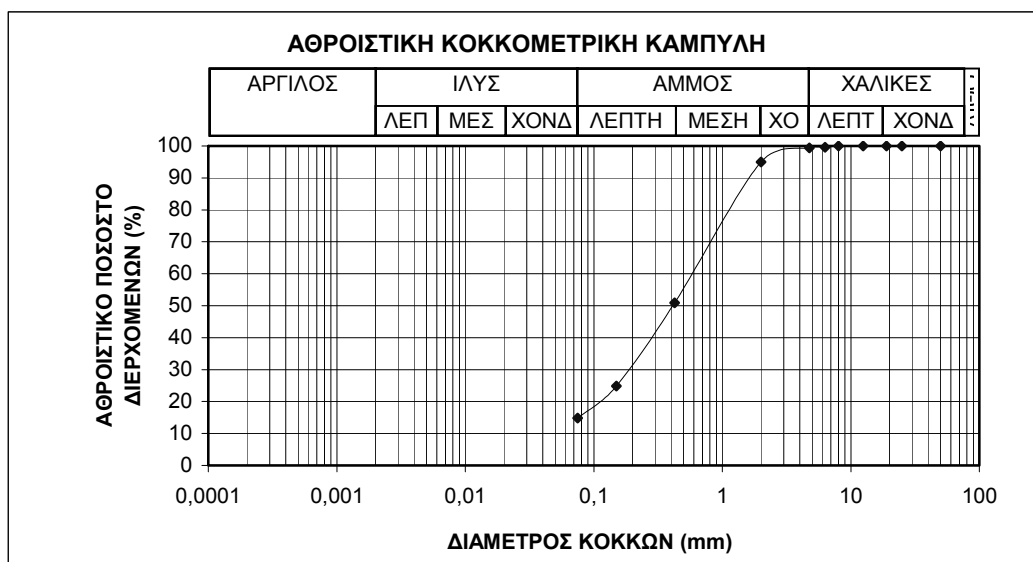
όπου η ταχύτητα u σε m/sec, η διάμετρος d_o σε m, η πίεση P σε bar και το μήκος σε cm. Το μοντέλο έχει συντελεστή συσχετισμού $R^2 = 0,997$ ενώ η τιμή του συντελεστή F είναι 10.894,7 κατά πολύ μεγαλύτερη από την οριακή τιμή $F_{3,50,0,005}$ ίση με 4,28, αποδεικνύοντας την πολύ καλή αξιοπιστία του. Συνεπώς το μήκος διείσδυσης του ενέματος σε ένα πορώδες μέσο με ελάχιστη ισοδύναμη διάμετρο πόρων d_o , πίεση έγχυσης P και αρχική ταχύτητα u υπολογίζεται ως η διαφορά του μήκους που αντιστοιχεί στην αρχική ταχύτητα u και του μήκους που αντιστοιχεί σε ταχύτητα μηδέν.

5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ

5.1 Γενικά

Η σήραγγα Ι Ασπροβάλας είναι οδική σήραγγα δύο κλάδων μήκους 250m περίπου. Ανήκει στο υπό κατασκευή τμήμα Ασπροβάλας Στρυμώνα (11.2-11.3) της Εγνατίας Οδού. Η περιοχή διέλευσης της σήραγγας τοποθετείται γεωτεκτονικά στη Σερβομακεδονική μάζα και πιο συγκεκριμένα στην ενότητα των Κερδουλίων. Η σήραγγα διέρχεται από αποσαθρωμένους και κατακερματισμένους γνευσίους, μάρμαρα και εμφανίσεις αμφιβολιτών. Εξαιτίας της έντονης αποσάθρωσης και του κατακερματισμού η ποιότητα του υλικού είναι τόσο πτωχή ώστε σε πολλές θέσεις το υλικό εκσκαφής μπορεί να προσομοιαστεί με εδαφικό σχηματισμό (Σχ. 6). Η κατάσταση αυτή είναι μια από τις αιτίες μικρού και μεγάλου εύρους αστοχιών κατά την εκσκαφή. Αν και το βήμα εκσκαφής ήταν μικρό, της τάξεως του ενός μέτρου, παρ'όλα αυτά, το φαινόμενο της ροής ή της κατάπτωσης από την οροφή του αποσαθρωμένου υλικού, δεν ήταν δυνατό να αποφευχθεί.

Μεγάλου εύρους αστοχία υπό μορφή κατάπτωσης του θόλου παρατηρήθηκε στον αριστερό κλάδο της σήραγγας κατά την εκσκαφή στη Χ.Θ.10+137,45. Η συγκεκριμένη θέση βρίσκεται σε ρηξιγενή ζώνη. Από τη στιγμή της εμφάνισης της ρηξιγενούς αυτής ζώνης στη Χ.Θ.10+124,90, η εκσκαφή πραγματοποιούνταν με διακεκομμένους ρυθμούς εξαιτίας καταπτώσεων στο θόλο και συνεχόμενων ολισθήσεων του μετώπου. Η ροή ύδατος στη Χ.Θ.10+133,54 επιδείνωσε το φαινόμενο των ολισθήσεων και προκάλεσε την εκδήλωση της κατάπτωσης. Το εύρος της αστοχίας ήταν σημαντικό, με αποτέλεσμα τη διακοπή των εργασιών και την αποκατάσταση της κατάπτωσης.

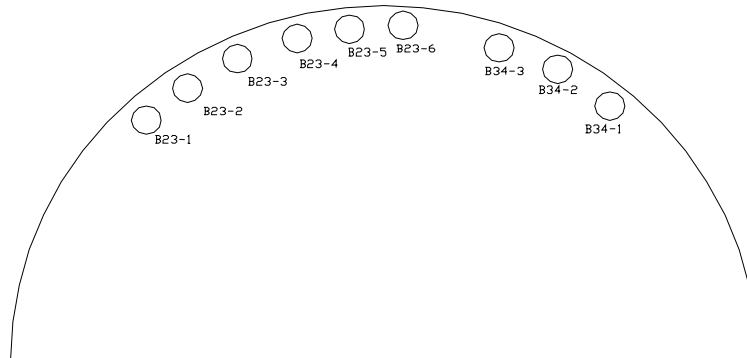


Σχήμα 6. Κοκκομετρική ανάλυση της αποσαθρωμένης βραχώμαζας.

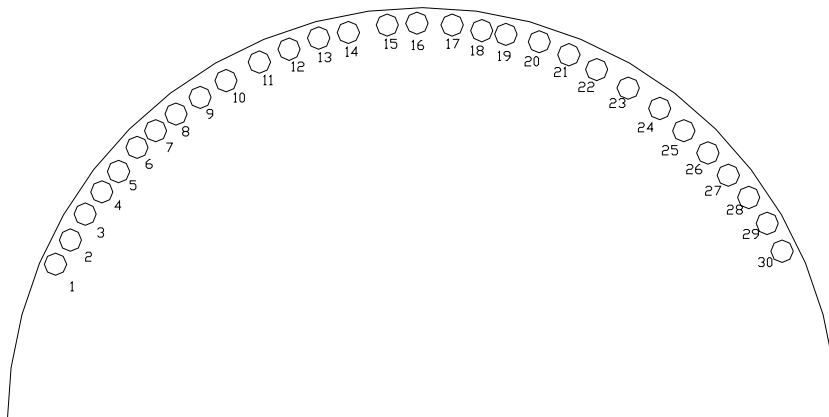
Τσιμεντενέσεις μήκους 6, 9 και 10m υπό γωνία $45^\circ - 60^\circ$ πραγματοποιήθηκαν περιμετρικά του θόλου με σκοπό την αποκατάσταση της κατάπτωσης. Πιο συγκεκριμένα, ακολουθήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

1. Διάνοξη εννιά διατρημάτων διαμέτρου 104mm μήκους 6m, 9m και 10m υπό κλίση περίπου $40^\circ - 60^\circ$ για την έγχυση χονδρού αμμοκονιάματος (Σχ. 7).
2. Τοποθέτηση διάτρητων σωλήνων Φ3" μήκους 3m έως 9m.
3. Προσπάθεια εισπίεσης χονδρού αμμοκονιάματος (700kg τσιμέντο + 400kg άμμο + 600kg νερό) χωρίς αποτέλεσμα λόγω της ελάχιστης ύπαρξης σημαντικών κενών. Η προσπάθεια επαναλήφθηκε χρησιμοποιώντας αραιό αμμοκονίαμα με ελάχιστα ικανοποιητικά αποτελέσματα, λόγω εμφράξεως των κενών διέλευσης του αμμοκονιάματος (χαμηλή απορρόφηση).
4. Επανεκτέλεση τσιμεντενέσεων χαμηλής πίεσεως, στα ίδια διατρήματα, με αναλογία τσιμέντου/νερού 1/1 και αντλία ενέσεων μέχρι αρνήσεως.
5. Εκσκαφή μετώπου. Το βήμα εκσκαφής περιορίστηκε στο 0,5m εξαιτίας ροής υλικού από την ο-

ροφή. Η ακτίνα επίδρασης του ενέματος που επιτεύχθηκε με την εκτέλεση των τσιμεντενέσεων ήταν μικρή, της τάξεως μερικών εκατοστών γύρω από κάθε οπή ένεσης, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συνολική σταθεροποίηση του θόλου και του μετώπου.



Σχήμα 7. Σχηματική απεικόνιση θέσης διατρήσεων εισπίεσης χονδρού αμμοκονιάματος.



Σχήμα 8. Σχηματική απεικόνιση θέσης διατρήσεων σωλήνων προπορείας.

6. Με σκοπό την καλύτερη υποστήριξη του θόλου και δεδομένου του μικρού μήκους διεύθυνσης του ενέματος, επιλέχθηκε διάνοιξη 30 διατρημάτων Φ3" περιφερειακά αυτού, και τοποθέτηση διατρητών σωλήνων προπορείας Φ2" μήκους 6m, με κλίση 20° ως προς το οριζόντιο επίπεδο (Σχ. 8).
7. Εκτέλεση τσιμεντενέσεων δια μέσω των σωλήνων προπορείας. Η αναλογία τσιμέντου/νερού που χρησιμοποιήθηκε για τη σύσταση του ενέματος ήταν 1/1 και η ενεμάτωση έγινε σε πίεση 4atm με αρχική παροχή αντλίας 50m³/h.
8. Καθαρισμός των υλικών της κατάπτωσης από το δάπεδο της σήραγγας μέχρι τον πόδα του πρανούς και επένδυση του κατώτερου τμήματος του μετώπου, από το οποίο αφαιρέθηκαν τα υλικά, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10cm (Chatziangelou & Christaras 2003).
9. Τμηματική περιφερειακή εκσκαφή της διατομής, με την προϋπόθεση ότι η επιφάνεια είναι ευσταθής και δεν ολισθαίνει το μέτωπο. Άμεση επένδυση της τμηματικής εκσκαφής με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10cm.
10. Τοποθέτηση πλαισίου και εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος περιφερειακά στο πλαίσιο.
11. Εκσκαφή του πυρήνα του μετώπου με διατήρηση κλίσεων πρανούς περίπου 45° σύμφωνα με το βήμα της εκσκαφής που προηγήθηκε και άμεση επένδυση της εκσκαφής με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10cm.

5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων

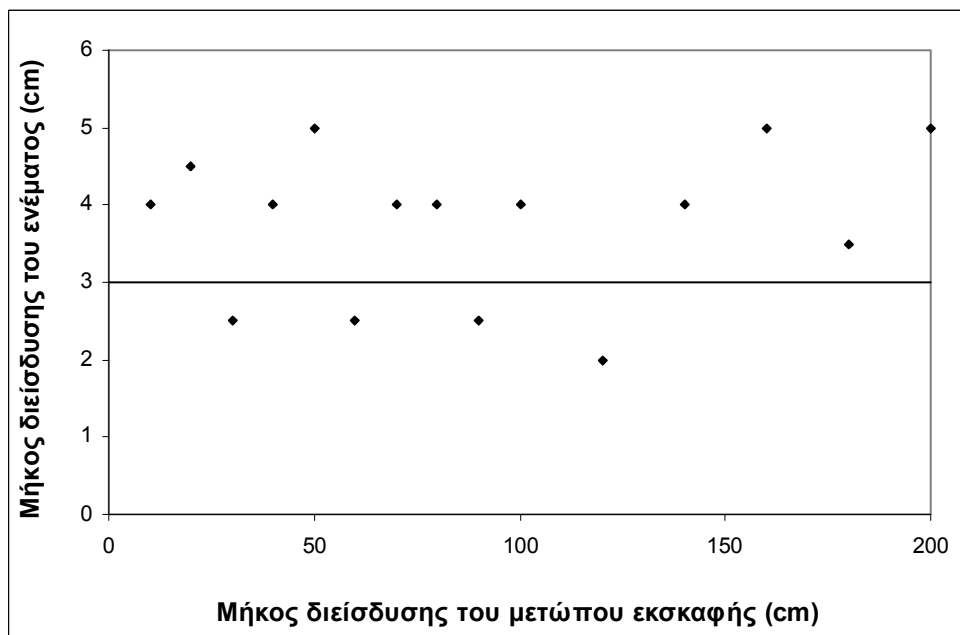
Εφαρμόζοντας το μοντέλο Kovacs υπολογίσθηκε η ελάχιστη διάμετρος των τριχοειδών πόρων της αποσαθρωμένης βραχώμαζας, η οποία ήταν 0,2mm (πορώδες $n = 0,3$). Η αρχική ταχύτητα εισαγωγής του ενέματος εντός των πόρων ήταν 0,032m/sec με πίεση κεφαλής 4 bar. Αντικαθιστώντας αυτές τις τιμές στο μοντέλο πρόβλεψης υπολογίσθηκε ως μέγιστο μήκος διείσδυσης του ενέματος τα 3cm περίπου. Στο επόμενο σχήμα (Σχ. 9) παρουσιάζεται η παρατηρηθείσα διείσδυση του ενέματος σε διάφορα σημεία κατά μήκος του άξονα του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας σε σύγκριση με αυτήν που προσδιορίστηκε από το μοντέλο.

Η μεγαλύτερη διείσδυση που παρατηρήθηκε ήταν 5cm από το σημείο έγχυσης ενώ η μικρότερη 2cm. Προφανώς η διακύμανση αυτή οφείλεται στην ανισοτροπία της βραχώμαζας, σε τοπικές συνθήκες και αστάθμητους παράγοντες αλλά και στην αναμενόμενη απόκλιση του μοντέλου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις ιζωδομετρίες στο εργαστήριο προέκυψαν τα κάτωθι συμπεράσματα:

1. Τα ενέματα, ανεξαρτήτου υδρομετρικού συντελεστή, παρουσίασαν ιδιότητες εκτατού υλικού ($n > 1$, αύξηση του ρυθμού διάτμησης συνεπαγόταν αύξηση του ιξώδους).
2. Μείωση της διαμέτρου των τριχοειδών είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του ιξώδους.
3. Η τάση εκκίνησης δεν παρουσίασε σημαντικές διαφοροποιήσεις όσον αφορά τη μεταβολή της σύστασης του ενέματος και της διαμέτρου του τριχοειδούς.



Σχήμα 9. Συσχετισμός μεταξύ της υπολογισθείσας απόστασης διείσδυσης από το μοντέλο και της παρατηρούμενης κατά τη διάρκεια εκσκαφής του μετώπου της σήραγγας.

Το μήκος διείσδυσης που προέκυψε από την εφαρμογή των παραμέτρων τσιμεντένεσης (παροχή - ταχύτητα - πίεση) στο μοντέλο πρόβλεψης είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές του μήκους διείσδυσης που παρατηρήθηκε από τις επί τόπου δοκιμές.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Γκουδούλας Θ., Καστρινάκης Ε. & Νυχάς Σ. 1999. Μελέτη ρεολογίας και δομών πυκνών αιωρημάτων λιγνίτη σε υδατικό μέσο. 2^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, 815-818.
- Χρηστάρας Β., Μαρσιολάκος Η., Φουντούλης Ι., Δημητρίου Α., Αθανασιάς Σ., Λεμονή Ε. & Χατζηαγγέλου Μ. 1999. Διαδικασίες αποστράγγισης των Μακεδονικών Τάφων στα Λευκάδια του Ν. Ημαθίας. 5^ο Πανελλήνιο

- Υδρογεωλογικό Συνέδριο, Λευκωσία, Κύπρος, 203-281.
- Anagnostopoulos C. & Stavridakis E. 2004. Development of physical and engineering properties of injected sand with latex-superplasticized grouts. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 9, A.
- Chatziangelou M. & Christaras B. 2003. Shotcrete application effectiveness as support measure at poor quality rock masses. *International Symposium of Industrial Minerals and Building Stones*, Konstantinoupolis, Turkey, 745-749.
- Christaras B., Mariolagos I. & Chatziangelou M. 2000. Protection of buried monuments against ground water activity using grouting techniques. *PACT 59/2000 (Revue du conseil de l' Europe)*, 201-208.
- Hakanson U. 1993. Rheology of fresh cement-based grouts. PhD Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Kovacs G. 1981. Seepage hydraulics, Elsevier Scientific, Amsterdam.
- Maria A., Barrufet G. & Setiadama A. 2003. Experimental viscosities of heavy oil mixtures up to 450K and high pressure using a mercury capillary viscometer. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 40, 17-26.

ABSTRACT

USE OF HERSCEL-BUCKLEY MODEL FOR THE PREDICTION OF GROUT PROPAGATION IN POROUS MEDIA AND COMPARISON WITH IN SITU RESULTS

Chatziangelou M.¹ and Anagnostopoulos C.²

¹ *Laboratory of Engineering Geology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 54006, Thessaloniki, Greece*

² *Laboratory of Soil Mechanics and Foundations, School of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 54006, Thessaloniki, Greece*

Grouting as a mean to strengthen weak soils or rock mass for construction foundations or underground facilities has been used for decades. With an increased demand for technical efficiency and cost reduction, the need to improve the method has also increased. The know-how of grouting relates to several fields of research, for instance flow in porous media and the behaviour of grouting research. In this paper, a grout propagation prediction model in porous media is studied with the use of Herscel-Buckley law. Continuously, a comparison between the results of prediction model and those derived from cement grouting during the excavation of a tunnel in a weathering rock mass, is carried out.