

Αριθμητική Προσομοίωση της Συμπιεστότητας Σύνθετων Γεωυλικών

Numerical Simulation of Mixed Soil Compressibility

ΤΣΟΤΣΟΣ, Σ.Σ.
ΚΑΡΑΟΥΛΑΝΗΣ, Φ.Ε.
ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ, Θ. Χ.

Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.
Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Υποψήφιος Διδάκτορας, Α.Π.Θ.
Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Γεωλογικές δομές αποτελούμενες από βραχώδη τεμάχη περιβαλλόμενα από ασθενέστερο εδαφικό υλικό συναντώνται συχνά σε γεωτεχνικά προβλήματα. Στο παρόν άρθρο προτείνεται μια μεθοδολογία για την αριθμητική προσομοίωση και την εκτίμηση της συμπιεστότητας σύνθετων γεωυλικών η οποία στηρίζεται σε προσομοιώσεις Monte-Carlo. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται σε δύο σειρές αριθμητικών πειραμάτων, από τα αποτελέσματα των οποίων προκύπτουν διαδικασίες ορθότερης εκτίμησης των μετακινήσεων σε σχέση με την πολύ συντηρητική θεώρηση ότι η συμπιεστότητα του σύνθετου γεωυλικού είναι παρόμοια με την συμπιεστότητα του εδαφικού συστατικού.

ABSTRACT: Geological materials that consist of rocky fragments embedded in softer soil materials are frequently met in geotechnical problems. In this article a methodology is proposed for the numerical modeling and evaluation of the compressibility of mixed soils based on Monte Carlo simulations. The proposed methodology is applied on two series of numerical experiments and from the results obtained, better procedures for evaluating displacements are proposed compared to the conservative assumption that the compressibility of a mixed soil is similar to the compressibility of the soil component.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Συνήθης πρακτική κατά την προσομοίωση σύνθετων γεωυλικών (βραχωδών τεμαχών περιβαλλόμενων από εδαφικό γεωυλικό) είναι η παραδοχή ότι η συμπιεστότητα τους ισούται με την συμπιεστότητα του εδαφικού υλικού αγνοώντας την επιρροή της παρουσίας των βραχωδών τεμαχών. Αυτή η παραδοχή οδηγεί συχνά σε υπερεκτίμηση των προβλεπόμενων μετακινήσεων.

Σε προηγούμενες εργασίες έχει μελετηθεί το μέγεθος της συμπιεστότητας τόσο εργαστηριακά (Tsotsos *et al*, 2006), με δοκιμές οιδημέτρου σε δοκίμια αναζυμωθέντων και ανακατασκευασθέντων μειγμάτων άμμου-αργίλου με διάφορα ποσοστά ανάμιξης, όσο και αριθμητικά (Tsotsos *et al*, 2010) μετά από κατάλληλη προσομοίωση του σύνθετου γεω-

υλικού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για την περιγραφή και στη συνέχεια την αποτίμηση της παραμορφωσιμότητας των μειγμάτων προτάθηκαν έξι διαφορετικές χαρακτηριστικές καταστάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται με πρώτο και βασικό κριτήριο την ποσοστιαία αναλογία του εδαφικού υλικού στο συνολικό μείγμα. Οι καταστάσεις αυτές επιβεβαιώθηκαν τόσο εργαστηριακά, όσο και αριθμητικά. Όπως είναι εύλογο και όπως φάνηκε στα αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων, η συμπιεστότητα του σύνθετου γεωυλικού εξαρτάται από τις συμπιεστότητες των δύο επιμέρους συνιστωσών κατά διαφορετικό όμως τρόπο και βαθμό σε κάθε μια των έξι καταστάσεων.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η περαιτέρω κατανόηση και μελέτη του μηχανισμού παραμόρφωσης σύνθετων γεω-

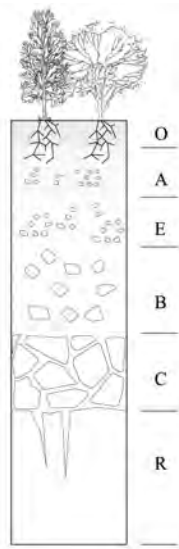
υλικών. Αρχικά εξετάζονται περισσότερες παράμετροι οι οποίες θεωρήθηκε ότι επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά και ειδικότερα την συμπιεστότητα των σύνθετων γεωυλικών. Στη συνέχεια αναπτύσσεται μια πιο σύνθετη μεθοδολογία για την αριθμητική προσομοίωση της συμπιεστότητας του σύνθετου γεωυλικού, η οποία στηρίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε προσομοιώματα Monte-Carlo, όπως αυτά προκύπτουν από τις κατανομές των παραμέτρων. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται και αξιολογείται σε δύο σειρές αριθμητικών πειραμάτων.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1 Σχηματισμός του Εδάφους

Το έδαφος αποτελεί το τελικό προϊόν της μηχανικής, χημικής και βιολογικής εξαλλοίωσης του μητρικού πετρώματος. Συναντάται συνήθως σε στρώσεις που ονομάζονται εδαφικοί ορίζοντες, αποκαλύπτονται από τις εδαφικές τομές και χαρακτηρίζονται από τον τρόπο και τη διάρκεια της δημιουργίας τους. Μια τυπική εδαφική τομή φαίνεται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 1).

Διάφορες φυσικές διεργασίες στη συνέχεια, όπως η διάβρωση και η μεταφορά αλλά και η διαφορετική αντοχή (μηχανική και χημική) του αρχικού πετρώματος, μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις από το τυπικό εδαφικό προφίλ και σε εξαιρετικά σύνθετα γεωυλικά.



Σχήμα 1. Ένα τυπικό εδαφικό προφίλ (Soil Survey Division Staff, 1993).
Figure 1. A typical soil profile (Soil Survey Division Staff, 1993).

2.2 Σύνθετα Γεωυλικά

Την παρούσα εργασία, όπως αναφέρθηκε, ενδιαφέρουν τα σύνθετα γεωυλικά που αποτελούνται από βραχώδη τεμάχια περιβαλλόμενα από εδαφικό υλικό. Τα γεωυλικά αυτά συναντώνται αρκετά συχνά και σε διάφορες κλίμακες σε προβλήματα Γεωτεχνικής Μηχανικής και περιλαμβάνουν προϊόντα υπολειμματικών εδαφών (Φωτ. 1), αποθέσεις που περιέχουν τεμάχια αποσπασμένων βράχων (Φωτ. 2), κατακερματισμένους βράχους (Φωτ. 3) ή ακόμα και μεγάλης κλίμακας συμπλέγματα ετερογενών γεωλογικών σχηματισμών (mélanges, Φωτ. 4).



Φωτογραφία 1. Υπολειμματικά εδάφη (Φωτ.: University of Idaho).
Photograph 1. Residual soils (Photo: University of Idaho).



Φωτογραφία 2. Αποθέσεις.
Photograph 2. Transported soils.



Φωτογραφία 3. Κατακερματισμένος βράχος.
Photograph 3. Fractured rock.



Φωτογραφία 4. Mélanges (Narooma, Αυστραλία).
Photograph 4. Mélanges (Narooma, Australia).

Όλα τα προαναφερθέντα εδάφη χαρακτηρίζονται από έντονη χωρική ανομοιογένεια που έχει σαν αποτέλεσμα την δυσκολία λήψης χαρακτηριστικών δειγμάτων (βλ. και Σχήμα 2), η οποία εξαρτάται σημαντικά από τον διαθέσιμο εξοπλισμό αλλά και τις προθέσεις και τις ικανότητες του προσωπικού (Medley, 2001). Επομένως, εξαιτίας των παραπάνω καθίσταται δυσχερής ο χαρακτηρισμός και η γεωτεχνική κατάταξη τους και ακόμα περισσότερο ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων τους, θέμα που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια.

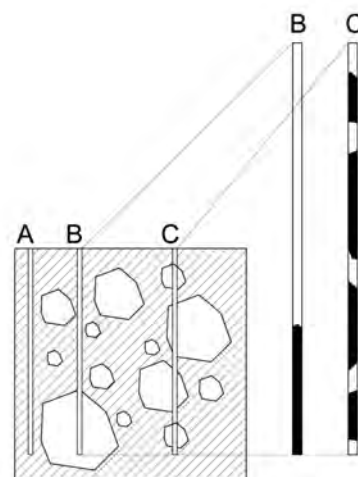
2.3 Χαρακτηρισμός και Κατάταξη Σύνθετων Γεωυλικών

Γεωλογικές δομές που αποτελούνται από βραχώδη τεμάχια τα οποία περιβάλλονται από ασθενέστερο εδαφικό υλικό, είναι αρκετά συνηθισμένες στη γεωλογία με αποτέλεσμα να υπάρχουν πάνω από 1000 γεωλογικοί όροι

που τις περιγράφουν (Laznicka, 1998). Για τον χαρακτηρισμό και την κατάταξη των δομών αυτών έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορα συστήματα, που συνήθως προσανατολίζονται προς συγκεκριμένες κατηγορίες σύνθετων δομών, ανάλογα με συγκεκριμένα γεωλογικά χαρακτηριστικά τους και τη γεωλογική τους ιστορία.

Έτσι, οι Wesley και Ifan (1997) προτείνουν ένα σύστημα κατάταξης για τα υπολειμματικά εδάφη στο οποίο περιλαμβάνονται και πληροφορίες της δομής του εδάφους. Η Ιταλική Γεωτεχνική Εταιρία προτείνει (AGI 1997), ένα απλό σύστημα κατάταξης προσανατολισμένο στις γεωτεχνικές ιδιότητες, για «δομικά πολύπλοκους σχηματισμούς» το οποίο, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει υπολειμματικά εδάφη και *mélanges*. Ο Raymond (1984) κατηγοριοποιεί τα *mélanges* και παρόμοιους βραχώδεις σχηματισμούς και εισάγει τον όρο «block-in-matrix» *mélanges*.

Ο Medley (1994) γενικεύει τον παραπάνω όρο σε «block-in-matrix» rocks, ή εν συντομία *bitrocks*, ο οποίος δεν έχει κάποια γεωλογική ή γεωτεχνική προέλευση. Ο όρος αυτός περιγράφει κατά τον Medley «ένα μείγμα βράχων (rocks) το οποίο αποτελείται από γεωτεχνικώς “σημαντικά” τεμάχια (blocks), μέσα σε μία εδαφική ενότητα (matrix)». Η έννοια του γεωτεχνικώς σημαντικού τεμάχους εξαρτάται κυρίως από το μέγεθός του σε σχέση με το μέγεθος της περιοχής μελέτης και σε μικρότερο βαθμό από την διαφορά των μηχανικών ιδιοτήτων των τεμαχίων σε σχέση με τις μηχανικές ιδιότητες του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού.

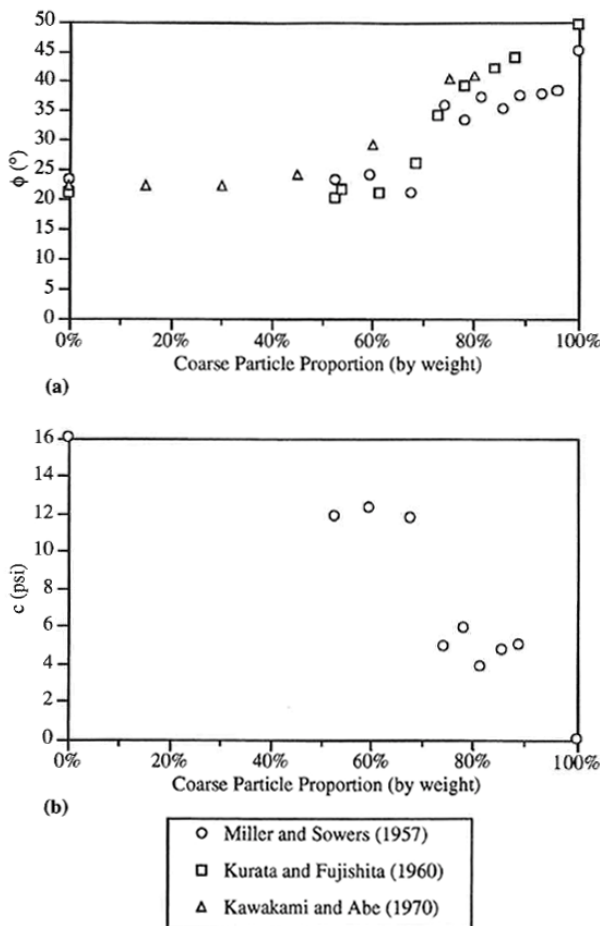


Σχήμα 2. Δυσκολίες κατά την δειγματοληψία σύνθετων εδαφικών υλικών.
Figure 2. Difficulties in mixed soil sampling.

2.4 Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Η έντονη χωρική ανομοιογένεια έχει σαν συνέπεια την δυσκολία προσδιορισμού των μηχανικών παραμέτρων των προαναφερθέντων σύνθετων γεωυλικών.

Όσον αφορά στις παραμέτρους αντοχής, χαρακτηριστικές είναι οι πειραματικές εργασίες σε σύνθετα γεωυλικά βραχωδών τεμαχίων/αργίλων που υποβάλλονται σε αστράγγιστες δοκιμές χωρίς στερεοποίηση (Miller & Sowers, 1957), δοκιμές άμεσης διάτμησης (Kurata & Fujishita, 1960) και αστράγγιστες δοκιμές μετά από στερεοποίηση (Kawakami και Abe, 1970), αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (Lindquist, 1994).



Σχήμα 3. Γωνία εσωτερικής τριβής (a) και συνοχή (b) συναρτήσει της κατά βάρος αναλογίας βραχωδών τεμαχίων/αργιλικού εδάφους (ολικές τάσεις) (Lindquist, 1994).
 Figure 3. Internal friction angle and cohesion versus coarse particle/clay matrix proportion (total stresses) (Lindquist, 1994).

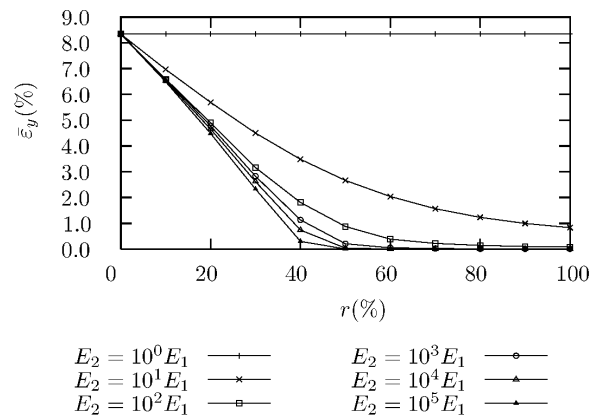
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όταν το ποσοστό των βραχωδών τεμαχίων ξεπερνά ένα όριο μεταξύ 50% έως 70%, η γωνία τριβής αυξάνεται σημαντικά και μειώνεται η συνοχή. Το γεγονός αυτό σύμφωνα με τους Miller και Sowers (1957) εξηγείται από τη δημιουργία σκελετού από τα βραχώδη τεμάχια. Οι Ifsan και Tang (1993) προτείνουν την αύξηση κατά 3° της γωνίας εσωτερικής τριβής για κάθε ποσοστιαία αύξηση 10% πάνω από ποσοστό 25% και έως το 75% κατά βάρος βραχωδών τεμαχίων και τέλος ο Lindquist (1994) θεωρεί ως ανώτατο ποσοστιαίο όριο το 85% με 90%, πάνω από το οποίο θεωρεί ότι το υλικό πρέπει να θεωρείται κατακεραματισμένος βράχος.

Βάσει των παραπάνω, όσον αφορά στις παραμέτρους αντοχής, μπορεί να θεωρηθεί για το σύνθετο γεωυλικό ότι όταν:

- $r < 25\%$, τότε συμπεριφέρεται σαν έδαφος,
- $r > 75\%$, τότε συμπεριφέρεται σαν βραχώδες μέσο,
- $25\% < r < 75\%$ τότε συμπεριφέρεται σαν σύνθετο γεωυλικό,

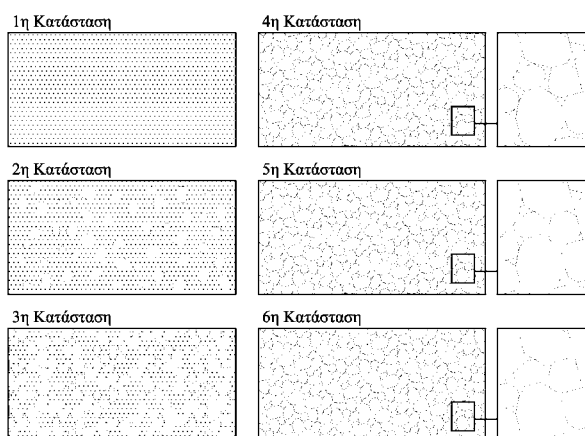
όπου r , το ποσοστό των βραχωδών τεμαχίων.

Όσον αφορά στην παραμορφωσιμότητα και στη συμπίεστικότητα των σύνθετων γεωυλικών, οι σχετικές αναφορές στη βιβλιογραφία είναι πολύ περιορισμένες. Σχετικά, σε δύο πρόσφατες δημοσιεύσεις ((Tsotsos *et al.*, 2006) και (Tsotsos *et al.*, 2010)), έχει προταθεί η διάκριση των σύνθετων γεωυλικών σε έξι πρότυπες καταστάσεις, εξαρτώμενες από την αναλογία των βραχωδών τεμαχίων/εδάφους.



Σχήμα 4. Μεταβολή της κατακόρυφης ανηγμένης μετακίνησης σε σχέση με το ποσοστό των βραχωδών τεμαχίων (Tsotsos *et al.*, 2010).
 Figure 4. Vertical deformation vs. percentage of rock fragments (Tsotsos *et al.*, 2010).

Στην πρώτη κατάσταση το σύνθετο γεωυλικό αποτελείται μόνο από εδαφικό υλικό, ενώ στην έκτη μόνο από βραχώδη τεμάχια. Οι ενδιάμεσες τέσσερις περιγράφουν χαρακτηριστικές καταστάσεις του μείγματος, κατά τις οποίες: (2^η) τα τεμάχια περιβάλλονται από το εδαφικό υλικό, (3^η) τα τεμάχια αρχίζουν να βρίσκονται σε επαφή και να σχηματίζουν τμήματα σκελετού, (4^η) σχηματίζεται ολοκληρωμένα ο σκελετός ενώ τα κενά μεταξύ των τεμαχίων καταλαμβάνονται από εδαφικό υλικό και (5^η), οριστικοποιείται η διάταξη του σκελετού ενώ μέρος μόνο των κενών καταλαμβάνεται από εδαφικό υλικό.



Σχήμα 5. Απεικόνιση των διαδοχικών χαρακτηριστικών καταστάσεων αμμοαργιλικών μειγμάτων με αυξανόμενο ποσοστό άμμου (Tsotsos *et al*, 2006).

Figure 5. Representation of the sequential characteristic cases of clay sand mixtures with increasing sand content (Tsotsos *et al*, 2006).

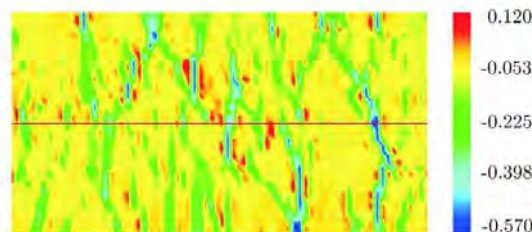
Η παραπάνω πρόταση διερευνήθηκε εργαστηριακά σε μείγματα άμμου/αργίλου τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμές συμπίεσότητας οιδημέτρου. Από την πειραματική εργασία προέκυψε ότι η συμπίεσότητα του σύνθετου γεωυλικού στην 2^η και στην 3^η κατάσταση είναι μικρότερη εκείνης που αντιστοιχεί στην ποσοστιαία αναλογία των δύο υλικών ενώ στις 3 τελευταίες (4^η, 5^η και 6^η) φαίνεται να πλησιάζει τη συμπίεσότητα της άμμου. Ειδικότερα, η 3^η κατάσταση, στην οποία αρχίζει να σχηματίζεται ο σκελετός από τα κοκκώδη τεμάχια, αποτελεί μια μεταβατική κατάσταση και φαίνεται να αντιστοιχεί σε ποσοστό μεταξύ του 40% και 60%.

Η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη μελετήθηκε και αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Tsotsos, Karaoulanis &

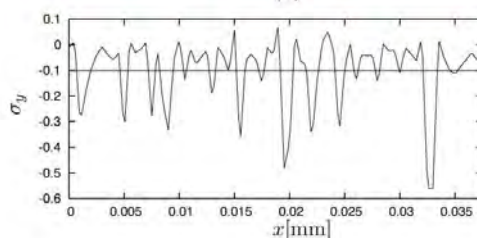
Chatzigogos, 2010), όπου αφενός επιβεβαιώθηκαν οι χαρακτηριστικές καταστάσεις του μείγματος και οι αντίστοιχες συμπεριφορές, αφετέρου διερευνήθηκε ο ρόλος του μέτρου παραμόρφωσης του υλικού των τεμαχίων σε σχέση με το μέτρο του εδαφικού υλικού.



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 6. Αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής συμπίεσότητας. (Tsotsos *et al*, 2010). Τα βραχώδη τεμάχια (μπλε χρώμα) στη συγκεκριμένη εικόνα καταλαμβάνουν το 40% του χώρου (a). Στο σχήμα (b) διακρίνονται οι διαδρομές των υψηλών κατακόρυφων τάσεων, ενώ στο σχήμα (c) φαίνεται η διαφοροποίηση των κατακόρυφων τάσεων κατά μήκος της μέσης οριζόντιας επιφάνειας.

Figure 6. Numerical simulation of compressibility test (Tsotsos *et al*, 2010). The granular material (blue) occupies 40% of the sample (a). In figure (b) the vertical stress paths can be seen while in (c) the stress diversity in a horizontal cross-section is plotted.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Στη συνέχεια προτείνεται μια μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης της συμπίεσότητας των σύνθετων γεωυλικών, μέσω επαναληπτικών αναλύσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

3.1 Χαρακτηριστικές Παράμετροι

Οι παράμετροι που θεωρείται ότι επηρεάζουν την συμπίεστικότητα ενός σύνθετου γεωυλικού είναι:

1. Η αναλογία των δύο συστατικών του.
2. Η συμπίεστικότητα του εδαφικού υλικού και των βραχωδών τεμαχών, εκφραζόμενη με τα αντίστοιχα μεγέθη των μέτρων παραμόρφωσης E_1 και E_2 .
3. Το μέγεθος των βραχωδών τεμαχών.
4. Η διάταξη, το σχήμα και ο προσανατολισμός των βραχωδών τεμαχών.

Οι παραπάνω παράμετροι μπορούν να προσδιοριστούν από επιτόπια αναγνώριση, τη διάνοιξη εδαφικών τομών και την εκτέλεση ερευνητικών γεωτρήσεων, όμως ο αξιόπιστος προσδιορισμός τους παρουσιάζει αβεβαιότητες και έχει ενδιαφέρον να θεωρηθούν, τουλάχιστον ορισμένες, ως στοχαστικές μεταβλητές.

Όπως αναφέρθηκε, στις δύο προηγούμενες εργασίες μελετήθηκε η επιρροή μόνο των δύο πρώτων παραμέτρων, οι οποίες πιστεύεται ότι είναι οι σημαντικότερες. Η παρούσα εργασία εστιάζεται κυρίως στη μελέτη του τρόπου και του βαθμού επιρροής του μεγέθους των τεμαχών.

3.2 Μεθοδολογία Επίλυσης

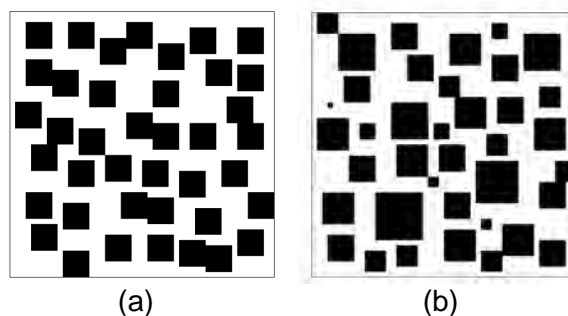
Η μεθοδολογία επίλυσης στηρίζεται στην μέθοδο Monte-Carlo, σύμφωνα με την οποία το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων επαναληπτικών επιλύσεων ενός μοντέλου του οποίου οι μεταβλητές επιλέγονται με τυχαία δειγματοληψία από ένα πεπερασμένο σύνολο τιμών. Η διαδικασία περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα:

1. Ορίζεται το παραμετρικό μοντέλο $y=f(x_1, x_2, \dots, x_q)$, όπου π.χ. x η θέση του τεμαχούς και q ο αριθμός των τεμαχών.
2. Δημιουργείται ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών εισόδου $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iq}$, που θεωρούνται ότι ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή.
3. Επιλύεται το πρόβλημα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και το αποτέλεσμα αποθηκεύεται ως y_i .
4. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 και 3 για $i=1, \dots, n$. Ο αριθμός των επαναλήψεων n καθορίζεται από την φύση του προβλήματος (Harr, 1987).
5. Αναλύονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε δύο σειρές αριθμητικών πειραμάτων. Για τις ανάγκες αυτών των πειραμάτων, θεωρείται περιοχή μοναδιαίων διαστάσεων η οποία προσομοιώνεται υπό συνθήκες οιδημέτρου και διακριτοποιείται με 2500 τετράκομβα πεπερασμένα στοιχεία. Και στις δύο σειρές πειραμάτων θεωρείται ότι το εδαφικό υλικό έχει μέτρο ελαστικότητας $E_1=1$ ενώ τα βραχώδη τεμάχια περιγράφονται από τετράγωνες, μη αλληλοεπικαλυπτόμενες περιοχές εντός του καννάβου με μέτρο ελαστικότητας $E_2=100E_1$. Και τα δύο υλικά θεωρούνται αβαρή και ισότροπα ελαστικά ενώ ο λόγος του Poisson λαμβάνεται ίσος με $\nu=0.2$.

Στην πρώτη σειρά των αριθμητικών πειραμάτων θεωρείται ότι το μέγεθος των τεμαχών, όπως αυτό περιγράφεται από τον αριθμό των στοιχείων με τα οποία διακριτοποιείται η πλευρά του τετραγωνικού τεμαχούς, είναι σταθερή και ίση με 1 ή 5, και επομένως κάθε τέμαχος καταλαμβάνει επιφάνεια ίση με το 0,04% ή το 1% της συνολικής επιφάνειας και το 2% ή το 10% του συνολικού ύψους αντίστοιχα.



Σχήμα 7. Τεμάχια σταθερού μεγέθους ίσου με 5 (a) και μεταβλητού μεγέθους (b) για $r=40\%$.
Figure 7. Constant size (equals 5) blocks (a) and variable size block (b) for $r=40\%$.

Με έναν τυχαίο τρόπο (ομοιόμορφη κατανομή) παράγονται 150 διαφορετικές δομές μη αλληλοεπικαλυπτόμενων τεμαχών για ποσοστά $r=0,1, \dots, 63\%$ (βλ. π.χ. Σχήμα 7(a) για $r=40\%$), οι οποίες στη συνέχεια επιλύονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος αλλά και η τυπική απόκλιση της μετακίνησης στην άνω οριζόντια επιφάνεια. Ο αριθμός των 150 επαναλήψεων κρίνεται ικανός ώστε η ακρίβεια του μέσου όρου να θεωρείται ικανοποιητική. Η επαναληπτική διαδικασία δεν συνεχίστηκε για μεγαλύτερο ποσοστό r , καθώς παρουσιάζονται

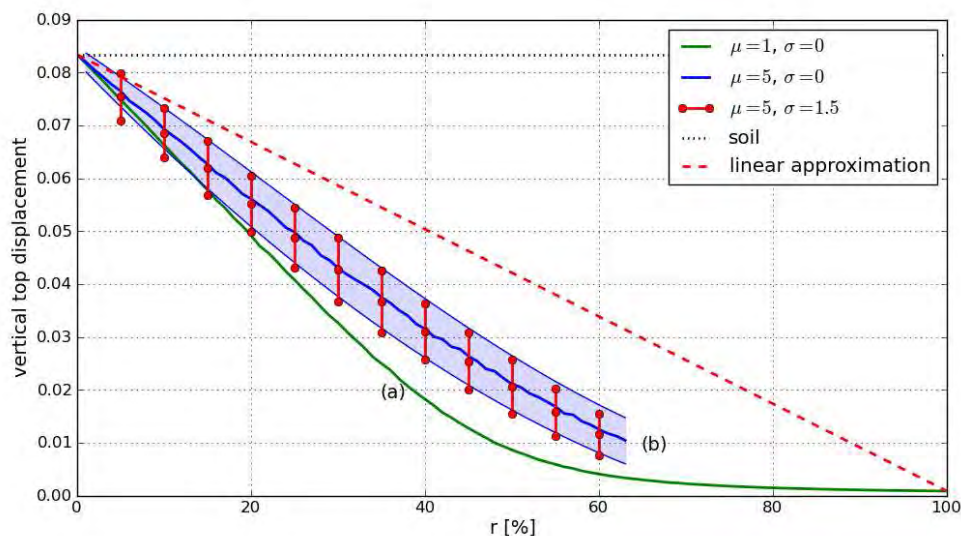
δυσκολίες στην παραγωγή του απαιτούμενου αριθμού δειγμάτων.

Στη δεύτερη σειρά των αριθμητικών πειραμάτων θεωρείται ότι το μέγεθος των τεμαχών δεν είναι σταθερό αλλά διαφέρει (Σχήμα 7(b)), έχοντας την ίδια μέση διάσταση ($\mu=5$) αλλά τυπική απόκλιση $\sigma=1.5$ και στη συνέχεια παράγονται και επιλύονται και πάλι 150 διαφορετικές δομές μη αλληλοεπικαλυπτόμενων τεμαχών για ποσοστά $r=0,5, \dots, 60\%$.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 26351 επιλύσεις με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων *nemesis* (2010) τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8), όπου δίνονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην κορυφή συναρτήσεως του ποσοστού r . Πιο αναλυτικά, η καμπύλη (a) του σχήματος ($\mu=1, \sigma=0$) ταυτίζεται με την καμπύλη του σχήματος 4 που αντιστοιχεί στην τιμή του λόγου $E_2/E_1=100$, ενώ η καμπύλη (b) αντιστοιχεί στην περίπτωση τεμαχών πενταπλάσιου μήκους πλευράς ($\mu=5, \sigma=0$). Η συγκριτική θεώρηση των δύο καμπυλών δίνει μια ενδεικτική εικόνα της επιρροής του μεγέθους των τεμαχών (σε σχέση και με το μέγεθος της περιοχής μελέτης) στην υπολογιζόμενη μετακίνηση. Πέραν αυτού, το εύρος της ζώνης που περιβάλλει την καμπύλη (b), αποτελεί μέτρο της επιρροής της διάταξης των τεμαχών στη συμπίεστικότητα. Τέλος η περίπτωση της ανομοιομορφίας του μεγέθους των βραχωδών τεμαχών ($\mu=5, \sigma=1.5$) δίνεται σε χαρακτηριστικές θέσεις ($r=0,5, \dots, 60\%$) και συγκρινόμενη με την προαναφερθείσα ζώνη φαίνεται ότι η επιρροή της είναι μικρή.

Έχοντας υπόψη και την επιρροή του λόγου των μέτρων παραμόρφωσης των δύο υλικών, όπως αυτή περιγράφεται στο Σχήμα 4, οδηγούμαστε στα επόμενα συμπεράσματα.

- Η θεώρηση ότι η συμπίεστικότητα του σύνθετου γεωυλικού είναι ίση με τη συμπίεστικότητα του εδαφικού υλικού οδηγεί σε υπερεκτίμηση των μετακινήσεων.
- Για μικρά ποσοστά τεμαχών (κατάσταση 2) η επιρροή της παρουσίας των είναι μεγαλύτερη εκείνης που αντιστοιχεί στο ποσοστό τους (π.χ. για $r=10\%$, η μετακίνηση μειώνεται σε ποσοστό 12% έως και 20%). Το μέγεθος της μειωτικής επιρροής εξαρτάται όχι μόνο από τον λόγο E_2/E_1 όπως είναι εύλογο, αλλά και από το μέγεθος των τεμαχών και τη διάταξη τους.
- Για μεγάλα ποσοστά τεμαχών ($r>60\%-80\%$, καταστάσεις 4, 5 και 6) η συμπίεστικότητα οδηγείται σταδιακά σε μια τιμή η οποία είναι μεγαλύτερη εκείνης του υλικού της βραχόμαζας και η οποία εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τις συνθήκες επαφής των τεμαχών στον διαμορφούμενο σκελετό. Πιστεύεται λοιπόν ότι, η προταθείσα προσομοίωση δεν καλύπτει ικανοποιητικά τις καταστάσεις αυτές και η προσπάθεια των συγγραφέων του άρθρου έχει συγκεντρωθεί στο θέμα αυτό με σκοπό την βελτίωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας.



Σχήμα 8. Μετακινήσεις συναρτήσεως του ποσοστού r των βραχωδών τεμαχών.
Figure 8. Displacements vs. rock fragments percentage r .

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γεωλογικές δομές που αποτελούνται από βραχώδη τεμάχια τα οποία περιβάλλονται από ασθενέστερο εδαφικό συναντώνται αρκετά συχνά σε προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής. Στο παρόν άρθρο επεκτείνονται προηγούμενες εργασίες, στις οποίες περιγράφηκαν έξι χαρακτηριστικές καταστάσεις δομών οι οποίες μελετήθηκαν πειραματικά και αριθμητικά και προτείνεται μια απλή μεθοδολογία για την αριθμητική προσομοίωση των σύνθετων γεωυλικών. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται σε δύο σειρές αριθμητικών πειραμάτων, από τα αποτελέσματα των οποίων, μετά από επεξεργασία, προκύπτουν και προτείνονται διαδικασίες βελτιωμένης και ορθότερης εκτίμησης των μετακινήσεων σε σχέση με την πολύ συντηρητική θεώρηση ότι η συμπίεστικότητα του σύνθετου γεωυλικού είναι παρόμοια με την συμπίεστικότητα του εδαφικού συστατικού.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο Υποψήφιος Διδάκτορας Φώτιος Ε. Καραουλάνης θα ήθελε να ευχαριστήσει το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.) για τη χορήγηση υποτροφίας εσωτερικού (Αρ. Πρωτ. 4506/2005).

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Wesley L.D. and Irfan T.Y. (1997), "Classification of Residual Soils", *Mechanics of Residual Soils*, G.E. Blight (ed.), Balkema, Rotterdam, pp.17-29.
- Associazione Geotecnica Italiana, AGI (1997), "Proceedings of the International Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Formations", Capri, Italy.
- Harr M.E. (1987), "Reliability Based Design in Civil Engineering", Dover, New York..
- Irfan T.Y. and Tang, K.Y. (1992) "Effect of the coarse fraction on the shear strength of colluvium", Hong Kong Geotechnical Engineering Office, Report 15/92.
- Kawakami H. and Abe H. (1970), "Shear characteristics of Saturated Gravelly Clays", *Transactions of the Jap. Soc. Civil Eng.* Vol. 2, pp.295-298.
- Kurata S. and Fujishita T. (1960), "Research on the Engineering Properties of Sand-Clay Mixtures", *Proc. 1st Asian Conf. Soil and Mechanics*. New Delhi, India. Vol.1(4), pp.1-12.

- Laznicka P. (1988), "Breccias and Coarse Fragmentites: Petrology, Environments, Ores", Elsevier, Amsterdam, New York.
- Lindquist E.S. (1994), "The Strength and Deformation Properties of Melange", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- Medley, E.W. (1994), "The engineering characterization of mélanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks)", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- Medley E. (2001), "Orderly Characterization of Chaotic Franciscan Melanges", *FelsBau* 19, Vol. 4, pp.20-33.
- Miller E.A. and Sowers G.F. (1957), "The Strength Characteristics of Soil-Aggregate Mixtures", *Highway Research Board Bulletin*, Vol.183, pp.16-23.
- nemesis (2010), *an experimental finite element code*, <http://www.nemesis-project.org>.
- Raymond, L.A. (1984), "Classification of mélanges", *Melanges: Their nature, origin and significance*. Raymond L.A. (ed.), Geological Society of America, Boulder, Colorado, Special Publication 228, pp.7-20.
- Soil Survey Division Staff (1993). "Soil Survey Manual", Soil Conservation Service. Us Department of Agriculture. Handbook 18.
- Τσότσος Σ., Γραμματικόπουλος Ι. και Μοδίτσης Π. (2006), "Μελέτη της Συμπίεστικότητας Σύνθετων Γεωυλικών (Βραχώδη Τεμάχια Περιβαλλόμενα από Εδαφικό Υλικό)", Πρακτικά του 5^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Τόμος 1, σελ 309-316.
- Tsotsos S., Karaoulanis F.E. and Chatzigogos T. (2010), "A New Concept on the Compressibility of Mixed Soils: Experimental and Numerical Approach", *Geotechnical and Geological Engineering* Vol. 28, No. 10, pp.199-207.