

Πρόβλεψη του Παραμένουτος Λόγου Κενών Αργιλικών Εδαφών μετά από Ξήρανση, από την Αρχική Κατάσταση, τη Φύση και τη Δομή τους

Prediction of the Residual Void Ratio of Clayey Soils after Drying, from their Initial State, Physical Properties and Structure

ΜΠΑΡΔΑΝΗΣ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc/DIC, Υποψ. Διδ. Ε.Μ.Π., ΕΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε.
ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Μ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Οι Bardanis & Kavvasdas (2006) διατύπωσαν μία εμπειρική συσχέτιση ανάμεσα στον παραμένουτο λόγο κενών αργιλικών εδαφών μετά από ξήρανση και την αρχική κατάσταση τους (όπως εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών) και τη φύση τους (όπως εκφράζεται από το όριο υδαρότητας και την ανηγμένη πυκνότητα στερεάς φάσης). Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται η πρόταση για την επέκταση αυτής της συσχέτισης και για αργιλικά εδάφη με δομή λόγω φυσικών διεργασιών καταλήγοντας σε μία ενιαία εμπειρική συσχέτιση που επιτρέπει την πρόβλεψη του παραμένουτος λόγου κενών από τον αρχικό λόγο κενών, το όριο υδαρότητας και την ανηγμένη πυκνότητα στερεάς φάσης, και μία εμπειρική παράμετρο σχετιζόμενη με τη δομή των φυσικών εδαφών .

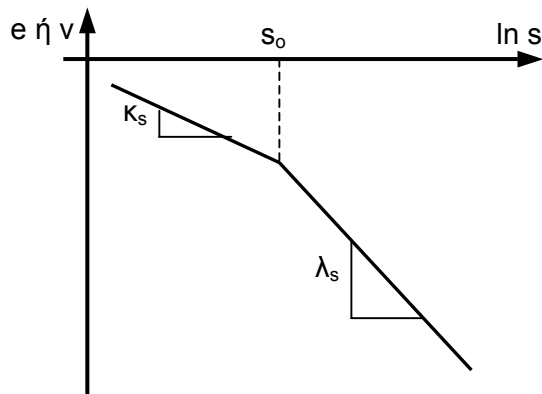
ABSTRACT : Bardanis & Kavvasdas (2006) proposed an empirical relation between the residual void ratio of clayey soils after drying and their initial state (as expressed by initial void ratio) and their nature (as expressed by liquid limit and specific gravity). In this article the relation is generalized for clayey soils with structure due to natural processes by proposing an empirical relation predicting the residual void ratio after drying from initial void ratio, liquid limit, specific gravity and an empirical parameter related to the structure of natural soils.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

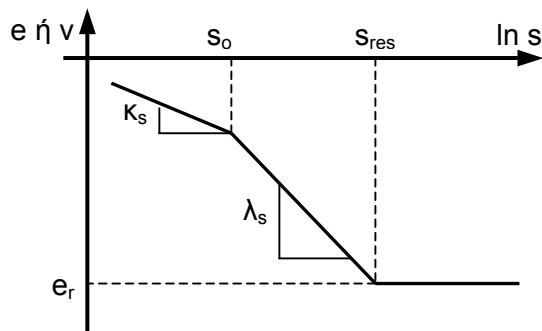
Η πρόβλεψη των μεταβολών όγκου κατά τις μεταβολές της μύζησης (suction) είναι κεντρικής σημασίας στη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Καταστατικά προσομοιώματα που έχουν προταθεί για μη κορεσμένα εδάφη προβλέπουν τις μεταβολές όγκου χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους μεταβολής όγκου που αντιστοιχούν στην ελαστική και την πλαστική περιοχή (ενδεικτικά: Alonso et al, 1990). Όπως φαίνεται στο Σχ. 1, για μεταβολές της μύζησης υπό σταθερή τάση, ο λόγος κενών e μεταβάλλεται γραμμικά με την μύζηση s (σε λογαριθμική κλίμακα) με βάση τον δείκτη k_s για τιμές της μύζησης μέχρι την μύζηση διαρροής s_0 και γραμμικά με βάση τον δείκτη λ_s για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της μύζησης διαρροής (σε αντιστοιχία με την περιγραφή της μεταβολής του λόγου κενών

από τους δείκτες k και λ κατά τις μεταβολές τάσης). Ένα τέτοιο προσομοίωμα επιτυγχάνει τη ρεαλιστική πρόβλεψη των μεταβολών όγκου αργιλικών εδαφών για τιμές της μύζησης μικρότερες από εκείνες που αντιστοιχούν στο παραμένουτο ποσοστό υγρασίας w_{res} , αλλά τις υπερεκτιμά σημαντικά για μεταβολές της μύζησης μέχρι τιμές της, κοντά, ή και μεγαλύτερες από τη μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένουτο ποσοστό υγρασίας, όπως άλλωστε έχει τεκμηριωθεί πειραματικά από δοκιμές προσδιορισμού ορίου συρρίκνωσης (ενδεικτικά: Fredlund & Rahardjo, 1993). Πιο πρόσφατα έχουν προταθεί προσομοιώματα με παραμέτρους που περιορίζουν τις μεταβολές όγκου κατά την αύξηση της μύζησης υπό σταθερή τάση (Kohgo, 2004, Μπαρδάνης & Καββαδάς, 2006β). Για να μπορεί να προβλεφθεί κάτι τέτοιο (με γνωστές τις παραμέτρους k_s , λ_s) χρειάζεται είτε η τιμή της μύζησης στην οποία ο λόγος κενών

λαμβάνει την παραμένουσα τιμή του, s_{res} , είτε ο παραμένον λόγος κενών, e_r (Σχ. 2).



Σχήμα 1. Προσομοίωση μεταβολών λόγου κενών κατά τις μεταβολές μύζησης υπό σταθερή τάση από τα υπάρχοντα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη.
Figure 1. Simulation of void ratio changes due to constant stress suction changes by existing unsaturated soil models.



Σχήμα 2. Παραμένον λόγος κενών μετά από ξήρανση, e_r , και μύζηση επίτευξής του, s_{res} .
Figure 2. Residual void ratio after drying, e_r , and the suction it is achieved, s_{res} .

2. Η ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ BARDANIS & KAVVADAS, 2006

Οι Bardanis & Kavvasdas (2006) διατύπωσαν μία εμπειρική συσχέτιση που προβλέπει την τιμή του παραμένοντος λόγου κενών e_r αργιλικών και μαργαϊκών εδαφών από την αρχική κατάσταση και τη φύση τους, όπως εκφράζονται αντίστοιχα από τον αρχικό λόγο κενών e_0 , και το όριο υδαρότητας w_L και την ανηγμένη πυκνότητα στερεάς φάσης G_s . Για τη διατύπωση αυτής της συσχέτισης πραγματοποίησαν δοκιμές σε αργιλικά και μαργαϊκά εδάφη γνωστού αρχικού λόγου κενών και φυσικών χαρακτηριστικών, κατά τις οποίες προσδιόρισαν το παραμένον ποσοστό υγρασίας και τον παρα-

Πίνακας 1. Φυσικά χαρακτηριστικά εδαφών των δοκιμών των Bardanis & Kavvasdas, 2006.
Table 1. Index properties of the soils tested by Bardanis & Kavvasdas, 2006.

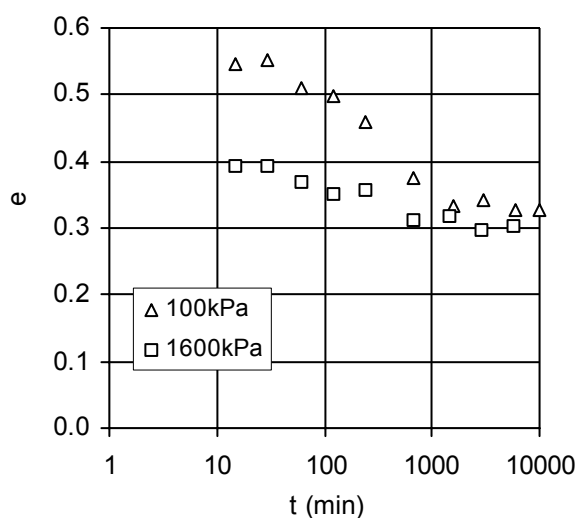
Έδαφος	w_L (%)	I_p	G_s	Άργιλος (%)
Άργιλος Χανίων	24	9	2.68	18
Καολίνη Speswhite	64	32	2.61	68
Μάργα Κορίνθου	34	12	2.67	11
Μάργα Κηφισιάς	31	16	2.66	25

μένοντα λόγο κενών. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών του προγράμματος δοκιμών τους παρουσιάζονται στον Πίν. 1.

Δείγματα των τεσσάρων εδαφών αναζυμώθηκαν σε αρχικό ποσοστό υγρασίας περίπου 1.5 φορές το όριο υδαρότητάς τους με προσθήκη απαερωμένου, απεσταγμένου νερού. Οι πολτοί (slurries) που παρήχθησαν αφέθησαν τον απαιτούμενο χρόνο για να ολοκληρωθεί η ύγρανση τους (hydration) με μέτρηση του ποσοστού υγρασίας του πολτού σε τακτά χρονικά διαστήματα (και προσθήκη νερού αν απαιτείτο ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας), αλλά και τακτική ανάμειξη, ώστε να μην γίνεται καθίζηση των μεγαλύτερων σωματιδίων προκαλώντας ανομοιογένεια του πολτού. Μετά την ολοκλήρωση της ύγρανσης, υλικό από τον κάθε πολτό συμπιεζόταν υπό μονοδιάστατες συνθήκες προς επίτευξη διαφόρων τιμών λόγου κενών. Τα δείγματα αυτά αφήνονταν στη συνέχεια να ξεραθούν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το ίδιο έγινε και με ίδιου μεγέθους δείγματα των πολτών (πολτός χυνόταν μέσα σε μεταλλικούς δακτυλίους συμπίεσομέτρου κολλημένους επί γυάλινων δίσκων ώστε τα δείγματα του πολτού να έχουν ίδιο μέγεθος και σχήμα με τα δοκίμια από τα συμπίεσομέτρα). Το βάρος των δειγμάτων μετρείτο μέχρι σταθεροποίησής του, οπότε και είχε επιτευχθεί το παραμένον ποσοστό υγρασίας.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η σταθεροποίηση του ολικού βάρους (και άρα του ποσοστού υγρασίας των δοκιμίων) αντιστοιχούσε και στη σταθεροποίηση του λόγου κενών (που ήταν το ζητούμενο), εκτός από τα δείγματα που αφήνονταν να ξεραθούν μέχρι σταθεροποίησης του ποσοστού υγρασίας τους, άλλα δείγματα αφήνονταν να ξεραθούν (από την ίδια αρχική κατάσταση) μέχρι μικρότερα χρονικά διαστήματα. Και αυτά τα δείγματα, και εκείνα που αφέθηκαν να ξεραθούν εντελώς, κόβονταν διαμετρικά στα δύο, με το ένα μισό να χρησιμοποιείται για μέτρηση του ποσοστού υγρασίας και το άλλο για μέτρηση του λόγου κενών

μέσω εμβάπτισης σε υγρή παραφίνη. Έτσι, και το ποσοστό υγρασίας, και ο λόγος κενών κατά την ξήρανση ήταν γνωστά για κάθε εδαφικό υλικό και κάθε αρχική τιμή λόγου κενών στον οποίο είχε στερεοποιηθεί, επιτρέποντας τον προσδιορισμό της πλήρους καμπύλης ξήρανσης ($e-w$) και άρα του ορίου συρρίκνωσης w_s (shrinkage limit) και του λόγου κενών σε αυτό, e_s . Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι η πρότυπη αλλά επιτρέπει τον προσδιορισμό και του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας, w_{res} , και του παραμένοντος λόγου κενών, e_r . Στο Σχ. 3 παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής του λόγου κενών με το χρόνο ξήρανσης στην ατμόσφαιρα δοκιμίων Αργίλου Χανίων μετά από μονοδιάστατη συμπίεση στα 100 και στα 1600 kPa. Όπως προκύπτει από τη σύγκριση των Σχ. 2 και 3 οι καμπύλες $e-t$ είναι γεωμετρικά όμοιες με τις καμπύλες $e-s$.



Σχήμα 3. Μεταβολή του λόγου κενών με το χρόνο ξήρανσης στην ατμόσφαιρα δοκιμίων Αργίλου Χανίων συμπιεσμένων στα 100 και 1600 kPa.

Figure 3. Void ratio change with the time of drying in the atmosphere of Chania Clay consolidated to 100 and 1600 kPa.

Οι περιορισμοί της πειραματικής μεθόδου έγκεινται στην ανάγκη αναπαραγωγής δοκιμίων αναζυμωμένων υλικών με τα ίδια χαρακτηριστικά, στην ακρίβεια της μεθόδου μέτρησης του λόγου κενών με τη μέθοδο εμβάπτισης σε παραφίνη και στην ανομοιογένεια των δοκιμίων ως προς το ποσοστό υγρασίας τους, ιδίως στα μικρά χρονικά διαστήματα από την έναρξη της ξήρανσης. Παρόλα αυτά, αν παρασκευάζονται προσεκτικά οι πολτοί του αναζυμωμένου υλικού και εκτελούνται προσεκτικά οι δοκιμές

συμπίεσης των πολτών μέχρι συγκεκριμένες τιμές του λόγου κενών, τότε πράγματι μπορούν να παρασκευαστούν πρακτικά όμοια δοκίμια και να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση των w και e σε διάφορους χρόνους μετά από την έναρξη της ξήρανσης. Ομοίως, προσεκτική εφαρμογή της μεθόδου μέτρησης λόγου κενών με εμβάπτιση σε υγρή παραφίνη και ταχείες κινήσεις, ιδίως όταν πρόκειται για τα δοκίμια που έχουν αφεθεί να ξεραθούν μόνο για λίγα λεπτά, μπορούν να εξασφαλίσουν ακριβή μέτρηση του λόγου κενών, χωρίς να χρειαστεί να γίνει χρήση υδραργύρου, όπως προτείνουν για τον προσδιορισμό της καμπύλης ξήρανσης οι Fredlund & Rahardjo (1993). Τέλος, δεδομένου ότι για μικρούς χρόνους από την έναρξη της ξήρανσης το ποσοστό υγρασίας δεν είναι ομοιόμορφο μέσα στα δοκίμια, το δοκίμιο πρέπει να κλείνεται αεροστεγώς μέσα σε πλαστική σακούλα (αφήνοντας όσο το δυνατόν λιγότερο αέρα στο εσωτερικό) και να τοποθετείται σε ξηρό, σκοτεινό μέρος μέχρι να επιτευχθεί ομοιογένεια του ποσοστού υγρασίας. Προφανώς ταχύτητα και επιδεξιότητα κινήσεων κατά την τοποθέτηση και την εξαγωγή του δοκιμίου από τη σακούλα για μέτρηση των w και e , είναι κρίσιμες για την ακριβή μέτρηση των μεγεθών.

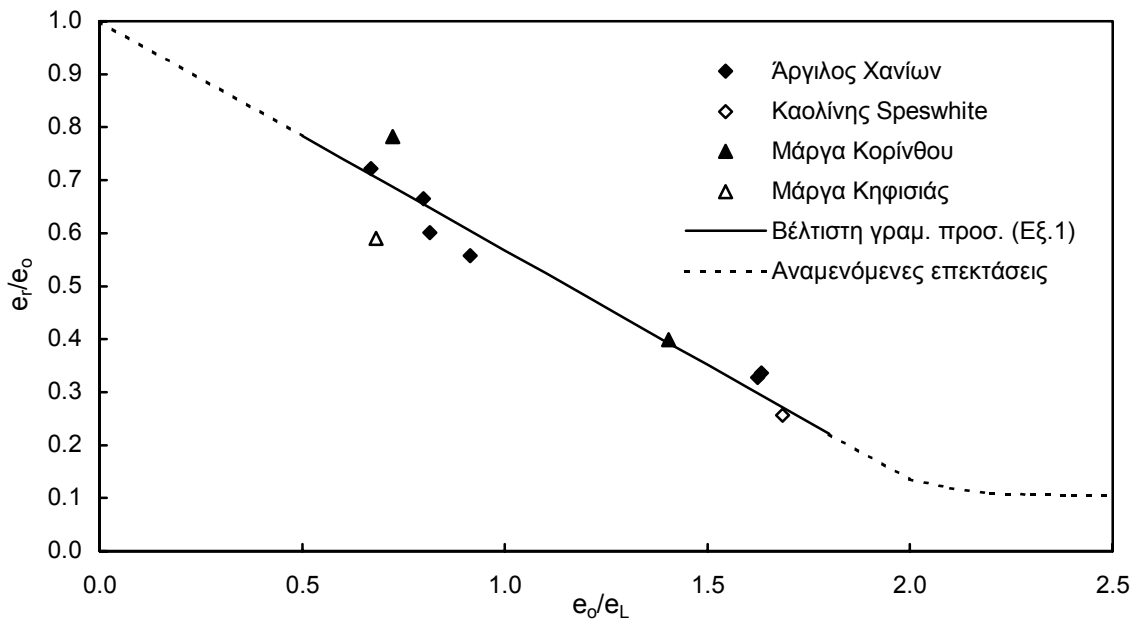
Στο Σχ. 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των Bardanis & Kanvadas (2006). Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται ο αρχικός λόγος κενών e_o , κανονικοποιημένος ως προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας $e_L (= w_L \cdot G_s)$ και στον κατακόρυφο άξονα ο παραμένων λόγος κενών e_r , κανονικοποιημένος ως προς τον αρχικό λόγο κενών. Η λογική των συγκεκριμένων κανονικοποιήσεων προέκυψε, αφενός από την ανάγκη να αναχθούν τα αποτελέσματα για ένα δεδομένο υλικό ως προς την ίδια βάση αναφοράς (διαίρεση του e_r με το e_o), και αφετέρου για να αναχθούν και όλα τα υλικά ως προς την ίδια βάση αναφοράς (διαίρεση του e_o με το e_L). Η εμπειρική συσχέτιση που προέκυψε από το Σχ. 4 περιγράφεται από την Εξ. 1 (διέρχεται αβίαστα από το σημείο $e_r/e_L=0$, $e_o/e_L=1$ με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης $R^2=90\%$), η οποία με αναδιάταξη μετατρέπεται στην Εξ. 2 από την οποία προκύπτει απευθείας ο παραμένων λόγος κενών μετά από ξήρανση:

$$\frac{e_r}{e_o} = 1 - m \cdot \frac{e_o}{e_L} \quad (1)$$

$$e_r = e_o \left(1 - \frac{m}{w_L \cdot G_s} \cdot e_o \right) \quad (2)$$

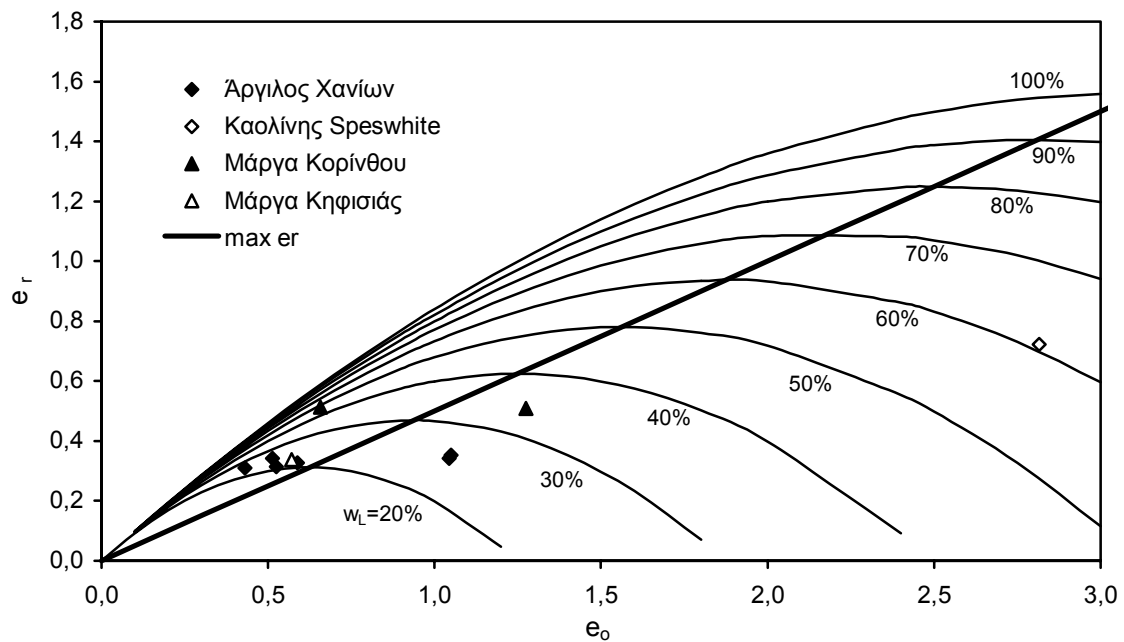
όπου m εμπειρική σταθερά που υπολογίστηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα ίση με 0.43. Οι ίδιοι συγγραφείς προέβλεψαν από την Εξ. 2 την τιμή του αρχικού λόγου κενών για την οποία ο παραμένων λόγος κενών μετά από ξή-

ρανση γίνεται μέγιστος (Εξ. 3). Προέβλεψαν επίσης την τιμή που λαμβάνει ο μέγιστος παραμένων λόγος κενών για διάφορα εδάφη, δηλαδή διαφορετικούς συνδυασμούς w_L και G_s (Εξ. 4). Στο Σχ. 5 παρουσιάζονται τα πειρα-



Σχήμα 4. Κανονικοποιημένος παραμένων λόγος κενών μετά από ξήρανση (e_r/e_0) ως προς τον κανονικοποιημένο αρχικό λόγο κενών (e_0/e_L) κατά την έναρξη της ξήρανσης με την βέλτιστη γραμμική προσέγγιση και τις εκτιμώμενες επεκτάσεις της.

Figure 4. Normalized residual void ratio after drying (e_r/e_0) vs normalized initial void ratio (e_0/e_L) at the beginning of drying with best linear fit and expected extensions of the relation established.



Σχήμα 5. Παραμένων λόγος κενών e_r μετά από ξήρανση ως προς τον αρχικό λόγο κενών e_0 κατά την έναρξη της ξήρανσης με καμπύλες ίσου e_r για σταθερές τιμές ορίου υδαρότητας.

Figure 5. Residual void ratio e_r after drying vs initial void ratio e_0 at the beginning of drying with contours of e_r for constant liquid limit values.

ματικά αποτελέσματα στο χώρο e_r - e_o με απεικόνιση και των καμπυλών που προβλέπονται για διάφορες τιμές w_L (υποθέτοντας $G_s = 2.65$).

$$e_o(e_r \rightarrow \max) = \frac{w_L \cdot G_s}{2 \cdot m} = \frac{e_L}{2 \cdot m} \quad (3)$$

$$e_{r,\max} = \frac{w_L \cdot G_s}{4 \cdot m} = \frac{e_L}{4 \cdot m} \quad (4)$$

Η Εξ. 2 επιτρέπει την πρόβλεψη του παραμένοντος λόγου κενών μετά από ξήρανση για αναζυμωμένα αργιλικά και μαργαϊκά εδάφη, η ξήρανση των οποίων ξεκίνησε, με τα εδάφη αυτά ευρισκόμενα, είτε σε μορφή πολτών, είτε σε στερεή κατάσταση, στην οποία περιήλθαν μετά από στερεοποίηση σε μικρότερη τιμή του λόγου κενών (εκτιμάται ότι για μεγαλύτερες τιμές e_o/e_L από $1.8 \div 2.0$ η ευθεία της εμπειρικής συσχέτισης πρέπει να αρχίζει να γίνεται καμπύλη που τείνει ασυμπτωτικά στον άξονα e_o/e_L). Η εξίσωση αυτή λοιπόν δεν προτείνεται ούτε για εδάφη με δομή που προήλθε από φυσικές διεργασίες, όπως στερεοποίηση στη γεωλογική χρονική κλίμακα ή σιμέντωση, ούτε και για συμπυκνωμένα εδάφη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από δοκιμές σε φυσικά εδάφη που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και εκείνα που βρέθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία

3. ΠΡΟΤΑΣΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΕΔΑΦΗ ΜΕ ΔΟΜΗ ΛΟΓΩ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Επιχειρώντας την επέκταση της συσχέτισης των Bardanis & Kanvadas (2006) για εδάφη με «δομή» λόγω φυσικών διεργασιών πραγματοποιήθηκαν νέες δοκιμές και αναζητήθηκαν και πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Αρχικά μετρήθηκε ο παραμένων λόγος κενών της φυσικής Μάργας Κορίνθου. Υψηλής ποιότητας δείγματα αυτής αποκόπηκαν από τα πρηνή της Διώρυγας της Κορίνθου και με δοκίμια φυσικού υλικού από αυτά και δοκίμια που παρασκευάστηκαν μετά από αναζύμωση και επανασυμπύεση στον ίδιο λόγο κενών με εκείνον του υλικού επιτόπου προσδιορίστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού του υλικού και στις δύο μορφές του (Μπαρδάνης & Καββαδάς, 2006α). Αφήνοντας δοκίμια του φυσικού υλικού να ξεραθούν υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες μέχρι την επίτευξη παραμένοντος ποσοστού υγρασίας μετρήθηκε και αυτό αλλά και ο παραμένων λόγος κενών με την μέθοδο που περιγράφηκε ήδη. Ο αρχικός λόγος κενών

του φυσικού υλικού ήταν 0.64 και ο παραμένων λόγος κενών μετά την ξήρανση του υλικού προέκυψε 0.62.

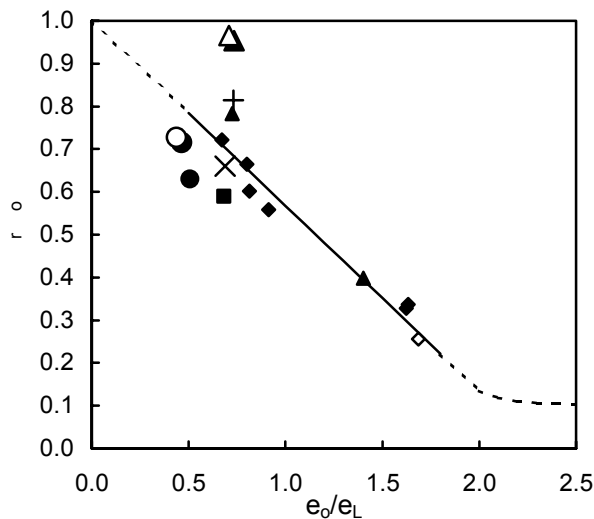
Η δυσκολία εξεύρεσης υψηλής ποιότητας δειγμάτων φυσικού υλικού δεν επέτρεψε την πραγματοποίηση επιπλέον δοκιμών, οπότε αναζητήθηκαν πειραματικά δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίν. 2. Η βιβλιογραφική διερεύνηση αποκάλυψε μικρό αριθμό δεδομένων: μόνο μία αναφορά με δεδομένα παρόμοια με αυτά για τη Μάργα Κορίνθου όπου μπορεί να γίνει σύγκριση ανάμεσα στο φυσικό και το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό (Melgarejo et al., 2002) και δύο ακόμη με δεδομένα για αναζυμωμένα/επανασυμπιεσμένα εδάφη (Dineen, 1997, και Cunningham et al., 2003) που προστίθενται στα πειραματικά δεδομένα εξαγωγής της συσχέτισης των Bardanis & Kanvadas (2006). Στο Σχ. 6 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα με τα οποία προέκυψε η εμπειρική συσχέτιση των Bardanis & Kanvadas (2006), η γραφική απεικόνιση της συσχέτισης αυτής και τα νέα πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία και τις δοκιμές στη φυσική Μάργα Κορίνθου. Όπως φαίνεται από το Σχ. 6, ενώ τα αποτελέσματα του Dineen (1997) και των Cunningham et al. (2003) με τα νέα δεδομένα για τα αναζυμωμένα/επανασυμπιεσμένα εδάφη βρίσκονται πολύ κοντά στα πειραματικά δεδομένα των Bardanis & Kanvadas (2006) χωρίς να αλλοιώνουν την εμπειρική τους συσχέτιση (μόνο το R^2 γίνεται 0.81 από 0.90), τα πειραματικά δεδομένα για τα φυσικά εδάφη βρίσκονται σημαντικά υψηλότερα από τα αντίστοιχά τους για τα αναζυμωμένα/επανασυμπιεσμένα και για τη Μάργα Κορίνθου μάλιστα, υψηλότερα και από την γραφική απεικόνιση της εμπειρικής συσχέτισης, η οποία άρα υποτιμά τον παραμένοντα λόγο κενών e_r για φυσικά εδάφη.

Πίνακας 2. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών από πειραματικά δεδομένα δημοσιευμένα στη διεθνή βιβλιογραφία.

Table 2. Index and mechanical properties of soils from published experimental data.

Βιβλιογραφική αναφορά	w_L (%)	I_p -	G_s -	e_o -	e_r -	
Dineen, 1997	64	32	2.61	1.15	0.76	
Cunningham et al., 2003	28	18	2.64	0.54	0.44	
Melgarejo et al., 2002	Αναζ. Φυσ.	95	48	2.65 ¹	1.27 1.10	0.80 0.80
Μάργα Κορίνθου	Αναζ. Φυσ.	34	12	2.67	0.66 0.64	0.58 0.62

¹: Δεν αναφέρεται, έχει υποτεθεί.



- | | |
|-------------------------------|------------------------|
| ◆ Αργίλος Χανίων | ◇ Καολίνης Speswhite |
| ▲ Μάρ. Κορίνθου-Αναζ. | △ Μάρ. Κορίνθου-Φυσ. |
| ■ Μάργα Κηφισιάς | — Βέλτιστη γραμ. προσ. |
| - - - - - Αναμ/νες επεκτάσεις | × Dineen, 1997 |
| ● Melgarejo, 2002-Rec | ○ Melgarejo, 2002-Nat |
| + Cunningham, 2003 | |

Σχήμα 6. Κανονικοποιημένος παραμένων λόγος κενών e_r/e_o ως προς τον κανονικοποιημένο αρχικό λόγο κενών (e_o/e_L) με τη βέλτιστη γραμμική προσέγγιση, τις εκτιμώμενες επεκτάσεις της και τα νέα δεδομένα.

Figure 6. Normalized residual void ratio e_r/e_o vs normalized initial void ratio (e_o/e_L) with best linear fit, expected extensions of the relation established and new data.

Τα πειραματικά δεδομένα για τα φυσικά εδάφη είναι πολύ λίγα αλλά με τα εξής ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά: στη μεν Μάργα Κορίνθου ο αρχικός λόγος κενών φυσικού και αναζυμωμένου/επανασυμπιεσμένου υλικού είναι πρακτικά ο ίδιος και το δεύτερο έχει μικρότερο παραμένοντα λόγο κενών e_r από το πρώτο, στο δε υλικό των Melgarejo et al. (2002) –αμμώδης, ιλυώδης άργιλος από κορρήματα– ο παραμένων λόγος κενών είναι ο ίδιος, αλλά με το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό να έχει πολύ υψηλότερο αρχικό λόγο κενών. Στο Σχ. 7 παρουσιάζεται το διάγραμμα e_r-e_o για τα δύο εδαφικά υλικά με τα πειραματικά δεδομένα και την αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη με βάση την Εξ. 2. Και για τα δύο εδαφικά υλικά το φυσικό έδαφος βρίσκεται πάνω από τη θεωρητική καμπύλη (αν διερχόταν ακριβώς από το πειραματικό σημείο για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο έδαφος), κατά την διαδρομή Α-Β για τη Μάργα Κορίνθου και τη διαδρομή Γ-Δ για το υλικό των Melgarejo et al. (2002). Εύκο-

λα λοιπόν προκύπτει ότι αν είναι e_{rn} ο παραμένων λόγος κενών ενός εδαφικού υλικού στη φυσική του κατάσταση και e_r ο παραμένων λόγος κενών του υλικού αυτού αναζυμωμένου και επανασυμπιεσμένου στον ίδιο αρχικό λόγο κενών με το φυσικό υλικό, τότε ισχύει:

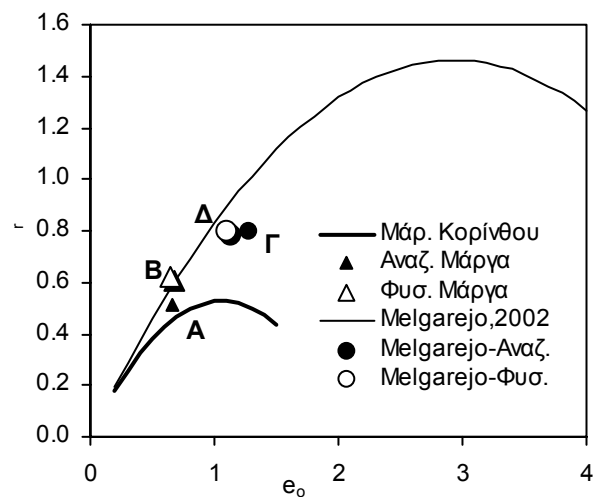
$$e_{rn} = M_r \cdot e_r \quad (5)$$

και άρα ο παραμένων λόγος κενών e_r φυσικών και αναζυμωμένων/επανασυμπιεσμένων εδαφών δίνεται από την Εξ. 6:

$$e_r = M_r \cdot e_o \left(1 - \frac{m}{w_L \cdot G_s} \cdot e_o \right) \quad (6)$$

όπου m η εμπειρική σταθερά της Εξ. 2 και M_r αυξητικός συντελεστής για την πρόβλεψη του παραμένοντος λόγου κενών φυσικών εδαφών. Προφανώς $M_r > 1$ και για $M_r = 1$ η Εξ. 6 εκφυλίζεται στην Εξ. 2.

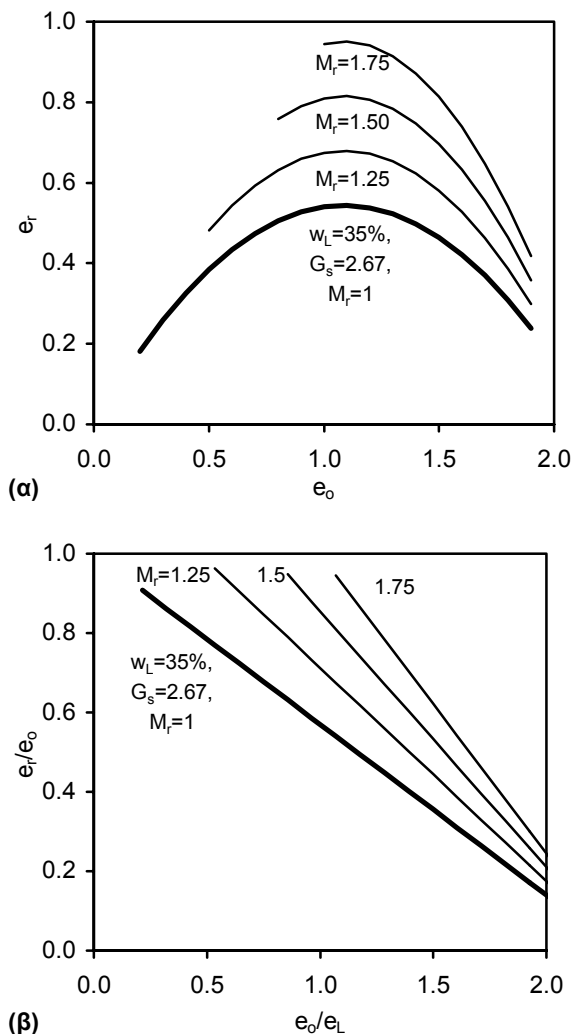
Για τον υπολογισμό του M_r για κάθε εδαφικό υλικό η διαδικασία προσδιορισμού περιλαμβάνει δοκιμές όπως αυτές για τη Μάργα Κορίνθου με παρασκευή αναζυμωμένου/επανασυμπιεσμένου εδάφους με τον ίδιο λόγο κενών με το φυσικό υλικό, οπότε $M_r = e_{rn}/e_r$. Αν το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο έδαφος έχει διαφορετικό αρχικό λόγο κενών από τον αρχικό λόγο κενών του φυσικού εδάφους τότε υπολογίζεται από την Εξ. 2 ο παραμένων λόγος κενών του αναζυμωμένου/επανασυμπιε-



Σχήμα 7. Παραμένων λόγος κενών e_r ως προς τον αρχικό λόγο κενών e_o για τη Μάργα Κορίνθου και το υλικό των Melgarejo et al. (2002).

Figure 7. Residual void ratio e_r vs initial void ratio e_o for Corinth Marl and the soil used by Melgarejo et al. (2003).

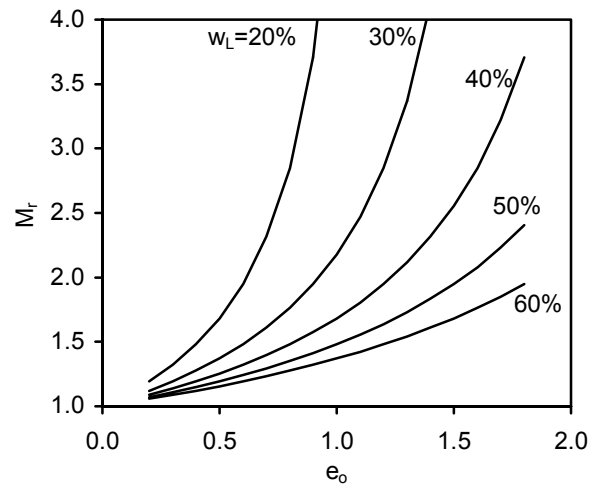
σμένου εδάφους αν είχε τον ίδιο αρχικό λόγο κενών με το φυσικό έδαφος και αυτός διαιρεί τον μετρηθέντα παραμένοντα λόγο κενών του φυσικού εδάφους. Προφανώς η δεύτερη μέθοδος αναμένεται να είναι λιγότερο ακριβής (ή ακόμα και χωρίς φυσικό νόημα όπως στην περίπτωση του υλικού των Melgarejo et al., 2002) από την πρώτη αφού υποθέτει ότι τα πειραματικά δεδομένα για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο έδαφος δεν έχουν καμία απόκλιση από την Εξ. 2. Στο Σχ. 8α παρουσιάζονται καμπύλες $e_r - e_o$ για δεδομένα $w_L=35\%$ και $G_s=2.67$ και διάφορες τιμές του M_r , και στο Σχ. 8β κανονικοποιημένες με το e_L και το e_o . Αύξηση του M_r προκαλεί «διαστολή» των κα-



Σχήμα 8. α) Παραμένων λόγος κενών e_r ως προς τον αρχικό λόγο κενών e_o , και β) e_r/e_o ως προς e_o/e_L για διάφορες τιμές του M_r .
 Figure 8. α) Residual void ratio e_r vs initial void ratio e_o , and β) e_r/e_o vs e_o/e_L for various values of M_r .

μπυλών $e_r - e_o$ για τα αναζυμωμένα/επανασυμπιεσμένα εδάφη στο επίπεδο $e_r - e_o$ και μετατόπισή τους στο επίπεδο $e_r/e_o - e_o/e_L$. Προφανώς η Εξ. 6 έχει νόημα για τιμές του M_r , τέτοιες ώστε $e_r < e_o$. Αντικαθιστώντας την Εξ. 6 στην ανισότητα αυτή προκύπτει εύκολα ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή M_r για την οποία έχει νόημα η Εξ. 6 δίνεται από την Εξ. 7, από την οποία προκύπτει ότι το μέγιστο M_r είναι συνάρτηση του αρχικού λόγου κενών. Στο Σχ. 9 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της Εξ. 7 για διάφορες τιμές του ορίου υδαρότητας.

$$M_{r,max} = \frac{1}{1 - \frac{m}{w_L \cdot G_s} \cdot e_o} \quad (7)$$



Σχήμα 9. Μέγιστο M_r ως προς τον αρχικό λόγο κενών e_o για διάφορες τιμές ορίου υδαρότητας.
 Figure 9. Maximum M_r vs initial void ratio e_o for various liquid limit values.

Ο αριθμός των διαθέσιμων πειραματικών αποτελεσμάτων προσδιορισμού του παραμένοντος λόγου κενών μετά από ξήρανση για φυσικά εδάφη είναι πολύ μικρός για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ο,τιδήποτε περισσότερο από τη διαπίστωση μίας τάσης εξέλιξης του μεγέθους αυτού σε σχέση με το ίδιο μέγεθος για αναζυμωμένα/επανασυμπιεσμένα εδάφη. Η Εξ. 6 λοιπόν αποτελεί περισσότερο μαθηματική διατύπωση αυτής της τάσης παρά εργαλείο πρόβλεψης του παραμένοντος λόγου κενών φυσικών εδαφών. Για να μετατραπεί σε τέτοιο θα απαιτηθούν περισσότερες δοκιμές προσδιορισμού παραμένοντος λόγου κενών φυσικών εδαφών και σύγκριση με τον αντίστοιχο των ίδιων εδαφών αναζυμωμένων και επανασυμπιεσμένων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δημοσιευμένα αποτελέσματα δοκιμών συρρίκνωσης αναζυμωμένων και φυσικών αργιλικών εδαφών επιβεβαιώνουν ότι η μείωση του λόγου κενών τους λόγω αύξησης της μύζησης υπό σταθερή τάση έχει ένα συγκεκριμένο όριο για κάθε εδαφικό υλικό. Υπάρχοντα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη δεν προβλέπουν κάτι τέτοιο, με αποτέλεσμα να υπερεκτιμούν τις ογκομετρικές μεταβολές για τιμές της μύζησης κοντά ή και πέρα από την τιμή της μύζησης που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών. Οι Bardanis & Kavvasas (2006) διατύπωσαν μία εμπειρική συσχέτιση που προβλέπει την τιμή του παραμένοντος λόγου κενών από τον αρχικό λόγο κενών, το όριο υδαρότητας και την ανηγμένη πυκνότητα στερεάς φάσης (Εξ. 2). Η συσχέτιση αυτή προέκυψε από πειραματικά αποτελέσματα σε αργιλικά και μαργαίκα εδάφη αναζυμωμένα και επανασυμπιεσμένα υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως σε διάφορες τιμές λόγου κενών.

Στο παρόν άρθρο προστέθηκαν πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία που επιβεβαιώνουν την ισχύ της συσχέτισης των Bardanis & Kavvasas (2006) για αναζυμωμένα/επανασυμπιεσμένα εδάφη, και νέα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών σε φυσικά εδάφη (άλλα πραγματοποιήθηκαν εξ επί τούτου και άλλα αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία). Με βάση τα αποτελέσματα στα φυσικά εδάφη διατυπώθηκε η πρόταση επέκτασης της συσχέτισης των Bardanis & Kavvasas (2006) και για φυσικά εδάφη. Ο παραμένων λόγος κενών εδαφών με δομή λόγω φυσικών διεργασιών βρέθηκε υψηλότερος από τον αντίστοιχο των ίδιων υλικών αναζυμωμένων και επανασυμπιεσμένων στον ίδιο αρχικό λόγο κενών με τα φυσικά εδάφη. Η παρατήρηση αυτή εισήχθη στην Εξ. 2 με τη μορφή του αυξητικού συντελεστή M_r , ο οποίος πολλαπλασιάζει τον παραμένοντα λόγο κενών αναζυμωμένων/επανασυμπιεσμένων εδαφών όπως προβλέπεται από την Εξ. 2. Στην παρούσα φάση η Εξ. 6 συνιστά μόνο μαθηματική καταγραφή της διαπιστωθείσας τάσης μεταξύ παραμένοντος λόγου κενών φυσικών και αναζυμωμένων/επανασυμπιεσμένων εδαφών και όχι εργαλείο πρόβλεψης. Για να μετατραπεί σε τέτοιο θα απαιτηθούν περισσότερες δοκιμές σε φυσικά εδάφη με ταυτόχρονη μελέτη της δομής τους, ώστε ο συντελεστής M_r να συσχετιστεί με αυτήν -στην οποία άλλωστε οφείλεται η διαφορά στον παραμένοντα λόγο κενών φυσικών και αναζυμωμένων/επανασυμπιεσμένων εδαφών.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Δείγματα της Αργίλου Χανίων και της Μάργας Κηφισιάς προσφέρθηκαν από την εταιρεία Ε-ΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε. Ο κ. Κωνσταντάκης της «Περίανδρος» Α.Ε. προσέφερε βοήθεια για την προμήθεια δειγμάτων Μάργας Κορίνθου. Ο κ. Γ. Πυργιώτης, τεχνικός του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής ΕΜΠ βοήθησε στην προετοιμασία δειγμάτων. Μέρος της έρευνας του κ. Μπαρδάνη χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A. (1990), "A constitutive model for partially saturated soils", *Géotechnique*, 40, 3, pp. 405-430.
- Bardanis, M., Kavvasas, M. (2006), "Prediction of the limiting void ratio of clayey soils after drying", Proc. 4th Int. Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, 2-5 April, 2006.
- Cunningham, M. R., Ridley, A. M., Dineen, K., Burland, J. B. (2003). "The mechanical behaviour of a reconstituted unsaturated silty clay", *Géotechnique*, 53, 2, pp. 183-194.
- Dineen, K. (1997). "The influence of soil suction on compressibility and swelling", PhD Thesis, University of London.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. (1993). "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 517.
- Kohgo, Y. (2004). "Elastoplastic models for unsaturated soils with two suction effects and unsaturated soil behavior". Jucá et al. (eds), Proc. 3rd Int. Conf. Unsaturated Soils, Swets & Zeitlinger, Lisse, 3, pp. 905-915.
- Melgarejo, M. L., Ridley, A. M., Dineen, K. (2002). "A comparison of the soil water characteristic curves for reconstituted and undisturbed samples of a colluvium from Rio de Janeiro", Jucá, et al. (eds), Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 313-316.
- Μπαρδάνης, Μ., Καββαδάς, Μ. (2006α), «Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού εδαφικών υλικών από τον ελλαδικό χώρο», Πρακτικά 5^{ου} Παν. Συν. Γεωτ. & Γεωπ/κής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου. 2006.
- Μπαρδάνης, Μ., Καββαδάς, Μ. (2006β), «Ελαστοπλαστική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς μη κορεσμένων εδαφών», Πρακτικά 5^{ου} Παν. Συν. Γεωτ. & Γεωπ/κής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου. 2006.