

Υπολογισμός Πλαστικών Παραμορφώσεων και Υδατικών Υπερπιέσεων λόγω Ανακυκλικής Φόρτισης, σε Άμμους με αρχικό εφελκυσμό

Empirical Relations for Permanent Strain and Pore Pressure for Cyclic Loading of Sand in state of initial extension

Δ. Ν. ΕΓΓΛΕΖΟΣ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζονται εμπειρικές σχέσεις για την πρόβλεψη της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης και της υδατικής υπερπίεσης, κατά την ανακυκλική τριαξονική φόρτιση άμμων, υπό αρχικές συνθήκες εφελκυσμού. Οι εμπειρικές σχέσεις εξάγονται μέσω πολυπαραμετρικής στατιστικής ανάλυσης, η οποία πραγματοποιείται επί αποτελεσμάτων από 14 ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές, ανισοτροπική στερεοποίηση, με μεταβλητές τις αρχικές τάσεις, το εύρος της ανακυκλικής διατμητικής τάσης, το δείκτη πόρων, και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης. Οι σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για απλοποιητικούς γεωτεχνικούς υπολογισμούς (λ.χ. φέρουσα ικανότητα, καθιζήσεις, ευστάθεια πρανών, αντιστηρίξεις κλπ), υπό ανακυκλική φόρτιση.

ABSTRACT: A set of empirical relations is developed for the prediction of permanent shear strain and excess pore pressure accumulation during undrained, cyclic triaxial loading of sand in state of initial extension. For this purpose, a multi-variable regression analysis is performed on results from 14 anisotropic tests, using as variables the initial stresses, the cyclic shear stress amplitude, the volume density and the applied number of load cycles. The relations provide the means for simplified geotechnical computations under cyclic loading (settlements and bearing capacity of foundations, slope stability, retaining walls etc).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανακυκλική φόρτιση μη συνεκτικών εδαφών, με μέσο ή μεγάλο εύρος παραμόρφωσης ή τάσης, προξενεί συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων και υπερπιέσεις του νερού πόρων. Αυτό έχει ως ενδεχόμενο αποτέλεσμα την πρόκληση καθιζήσεων ή την μείωση της φέρουσας ικανότητας των θεμελίων, την αυξημένη πλευρική τάση επί τοίχων αντιστήριξης, την αστάθεια πρανών κοκ.

Μία αυστηρή εδαφοδυναμική ανάλυση των ανωτέρω περιπτώσεων προϋποθέτει τη χρησιμοποίηση κατάλληλων αριθμητικών κωδίκων, καθώς και εδαφικών μοντέλων που να προβλέπουν με ακρίβεια την πλαστική συμπεριφορά των εδαφικών στοιχείων υπό καθεστώς δυναμικής φόρτισης.

Υπάρχουν εν τούτοις περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητή η χρησιμοποίηση εναλλακτικών απλοποιημένων μεθόδων, όπως φερ' ειπείν κατά τη φάση προκαταρκτικής μελέτης ή όταν η έλλειψη απαραίτητων εδαφικών παραμέτρων ή κατάλληλων καταστατικών μοντέλων για την ανακυκλική φόρτιση δεν επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση αριθμητικών κωδίκων. Στον ΕΑΚ2000, όπως και σε άλλους σύγχρονους κανονισμούς (λ.χ. EC-8) αναγνωρίζεται ότι το έδαφος δεν επιδρά μόνο στα χαρακτηριστικά της σεισμικής κίνησης αλλά, επιπλέον, επηρεάζει τη σεισμική απόκριση εδαφικών σχηματισμών και θεμελιώσεων, λόγω της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του κατά τη διάρκεια της δόνησης.

Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στην ανάπτυξη καθιζήσεων σε ξηρά κοκκώδη εδάφη (χωρίς προτεινόμενη ποσοτική εκτίμηση), καθώς και

στην ανάπτυξη υδατικής υπερπίεσης σε κορεσμένα εδάφη (με υπεραπλουστευμένες ποσοτικές εκτιμήσεις χαμηλής ακρίβειας).

Ως αποτέλεσμα, οι καθιζήσεις λόγω δυναμικής φόρτισης και ο υπολογισμός υδατικών υπερπίεσεων (με εξαίρεση την οριακή περίπτωση ρευστοποίησης), κατά κανόνα αγνοούνται όταν πρόκειται για μελέτη έργων συνήθους σπουδαιότητας.

Ο κύριος λόγος για την παράλειψη ποσοτικής αντιμετώπισης των ανωτέρω φαινομένων, σε επίπεδο συνήθων μελετών, είναι η έλλειψη αξιόπιστων απλοποιημένων σχέσεων υπολογισμού, με βάση αποτελέσματα από συνήθεις γεωτεχνικές έρευνες. Έτσι, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι και προσομοιώσεις του εδάφους, οι οποίες απαιτούν εξειδικευμένο λογισμικό και παραμέτρους που προκύπτουν από ειδικές δοκιμές εδαφοδυναμικής.

Στο προτεινόμενο άρθρο διατυπώνονται απλές εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό πλαστικών παραμορφώσεων και υδατικών υπερπίεσεων λόγω ανακυκλικής φόρτισης, σε κοκκώδη εδάφη τα οποία βρίσκονται σε **αρχική εντατική κατάσταση εφελκυσμού** ($\sigma'_v < \sigma'_h$). Τέτοιες περιπτώσεις απαντώνται αρκετά συχνά στην πράξη με χαρακτηριστικότερες:

- εδαφικό στοιχείο στην περιοχή ποδός φυσικού ή τεχνητού πρανούς
- εδαφικό στοιχείο στην επιφάνεια εκσκαφής
- εδαφικό στοιχείο στο θόλο ή στον πυθμένα σήραγγας

Οι σχέσεις μπορούν να βρουν πρακτική εφαρμογή στον υπολογισμό παραμορφώσεων αλλά και εδαφικών παραμέτρων για την πραγματοποίηση δυναμικών ή ψευδο-δυναμικών υπολογισμών. Οι προτεινόμενες σχέσεις για την περίπτωση εφελκυσμού στηρίζονται σε αντίστοιχες εμπειρικές σχέσεις που έχει αναπτύξει ο γράφων, στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής (Εγγλέζος, 2004), για τον υπολογισμό πλαστικών παραμορφώσεων και υδατικών υπερπίεσεων άμμων, λόγω ανακυκλικής φόρτισης, σε εδάφη τα οποία βρίσκονται σε **αρχική ισοτροπική** ($\sigma'_1 = \sigma'_3$) ή **θλιπτική εντατική κατάσταση** ($\sigma'_1 > \sigma'_3$).

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι πειραματικές τριαξονικές δοκιμές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία έχουν πραγματοποιηθεί επί δοκιμίων από:

- λεπτή άμμο Oosterschelde με μέση διάμετρο κόκκου $d_{50} = 0.17\text{mm}$ και συν-

τελεστή ομοιομορφίας $C_u = 1.40$ (Lambe, 1979).

Η μόρφωση δοκιμίων από άμμο Oosterschelde έγινε με τη μέθοδο των κτύπων σε υγρές στρώσεις (wet tamping) με δείκτες πόρων κυμαινόμενους από $e = 0.61 - 0.85$, οι οποίοι αντιστοιχούν σε χαμηλής έως μέσης πυκνότητας άμμους. Τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν ανισοτροπικά σε εφελκυσμό ($\sigma'_v \leq \sigma'_h$), και το εύρος της ανακυκλικής τάσης ($\pm \sigma_{v,c}$) παρέμενε σταθερό κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής δοκιμής.

Το εύρος των αρχικών εντατικών μεγεθών, καθώς και των ανακυκλικών τάσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, βάσει των ακόλουθων αναλλοίωτων μεγεθών:

$$\sigma'_o = (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3, \quad q_o = (\sigma'_v - \sigma'_h)/2$$

$$q_c = \sigma_{v,c}/2, \quad P = q_o/\sigma'_o M$$

όπου M δηλώνει την κλίση της γραμμής αλλαγής φάσης [PTL, (π.χ. Ishihara et al., 1975)], η οποία αποτελεί το όριο μεταξύ διαστολικής και συστολικής συμπεριφοράς στον τασικό χώρο $q_o - \sigma'_o$.

Πίνακας 1. Εύρος των εντατικών μεγεθών στις τριαξονικές δοκιμές εφελκυσμού
Table 1. Range of stress conditions in the cyclic triaxial extension tests

Άμμος Oosterschelde	
Αριθμός δοκιμών	14
CSR ($=q_o/\sigma'_o$)	0.07 - 0.43
σ'_o/p_a	0.42 - 7.00
P_E	0.00 - 0.89
q_o/q_c	0.00 - 5.00
e	0.62 - 0.86

3. ΥΠΕΡΠΙΕΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Στο Σχήμα 1 δείχνεται (με συνεχή γραμμή) η μεταβολή της υπερπίεσης του νερού των πόρων με τον αριθμό των (ομοιόμορφων) κύκλων φόρτισης για δύο δοκιμές με ανισοτροπική στερεοποίηση, μια στην περιοχή του εφελκυσμού ($q_o < 0$) και μία στην περιοχή της θλίψης ($q_o > 0$). Είναι σαφής η ποιοτική ομοιότητα στην εξέλιξη υδατικής υπερπίεσης για τις δύο καταστάσεις. Συγκεκριμένα, η αύξηση της υδατικής υπερπίεσης του νερού των πόρων είναι πρακτικά γραμμική επί της διπλής λογαριθμικής κλίμακας του σχήματος και τείνει να σταθεροποιηθεί στη μέγιστη δυνατή πίεση πόρων U_f .

Τα δεδομένα του Σχήματος 1 μπορεί να περιγραφούν κατά προσέγγιση ως ακολούθως:

$$U(N) = U_1 * N^c \leq U_f \quad (1)$$

Στην Εξίσωση (1) το μέγεθος N δηλώνει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης, U_f είναι η οριακή τιμή της υπερπίεσης του νερού των πόρων, η οποία αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση η οποία κείται επί της Γραμμής Αλλαγής Φάσης (PTL, Luong and Sidaner 1981):

$$U_f = \sigma'_o - q_o/M \quad (2)$$

και U_1 , η υδατική υπερπίεση κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης.

Στην περίπτωση της θλίψης ο όρος U_1 μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των αρχικών εντατικών συνθηκών υπό μορφή γινομένου ως ακολούθως (Εγγλέζος, 2004):

$$U_1 = Ap_a (q_c/\sigma'_o)^{a_1} (\sigma'_o/p_a)^{a_2} f_3(P) e^{a_4} \quad (3)$$

$$\text{όπου: } f_3(P) = \left(\frac{1-P}{1-(0.8P)^{a_3}} \right)$$

ή

$$U_1 = Ap_a f_1(q_c/\sigma'_o) f_2(\sigma'_o/p_a) f_3(P) f_4(e) \quad (4)$$

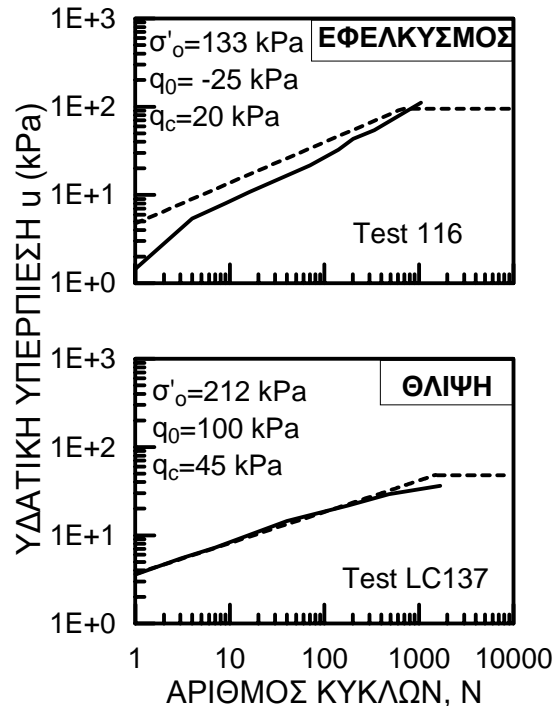
όπου p_a είναι η ατμοσφαιρική πίεση, η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των μονάδων. Οι σταθερές στην Εξίσωση 3 εκτιμήθηκαν μέσω πολυπαραμετρικής στατιστικής συσχέτισης (StatSoft Inc., 1995) επί δεδομένων από ένα σύνολο 181 δοκιμών. Από τη στατιστική ανάλυση προέκυψε ότι μία ιδιαίτερα καλή προσαρμογή των δεδομένων ($R=0.841$) επιτυγχάνεται για τις ακόλουθες τιμές:

$A=3.92$, $a_1=1.57$, $a_2=1.02$, $a_3=0.58$ και $a_4=4.70$

Η εφαρμογή των Εξισώσεων (1) και (3) για υπερπίεση στην καθαρή θλίψη στα δεδομένα με αρχικό εφελκυσμό οδηγεί σε προβλέψεις που υποτιμούν συστηματικά τις μετρήσεις. Συγκεκριμένα οι λόγοι πρόβλεψης RU_1 των δεδομένων για τον 1^ο κύκλο ($RU_1 = U_1$ πρόβλεψη/ U_1 -μέτρηση) στα δεδομένα εφελκυσμού, κυμαίνονται από 0.20 – 0.90 με μέσο όρο $RU_{1,m} = 0.52$. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από τη σύγκριση της τιμής U_1 πειραματικών δεδομένων σε αρχική θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα, με πρακτικά ίσες αρχικές εντατικές συνθήκες. Ειδικότερα η σύγκριση παρουσιάζεται στον Πίνακα (2). Κατόπιν

τούτου η εξίσωση για το μέγεθος U_1 επαναδιατυπώνεται με νέα πολυπαραμετρική στατιστική ανάλυση προσαρμογής επί των δεδομένων εφελκυσμού, θεωρώντας μεταβλητή το σταθερό όρο στην Εξίσωση (3) και δεδομένη την ποσοτική επίδραση των αρχικών παραμέτρων. Από τη στατιστική ανάλυση επί 14 δεδομένων προέκυψε με ακρίβεια $R=0.700$:

$A=6.15$, $a_1=1.57$, $a_2=1.02$, $a_3=0.58$ και $a_4=4.70$, για υπολογισμό του U_1 από την εξίσωση (3).



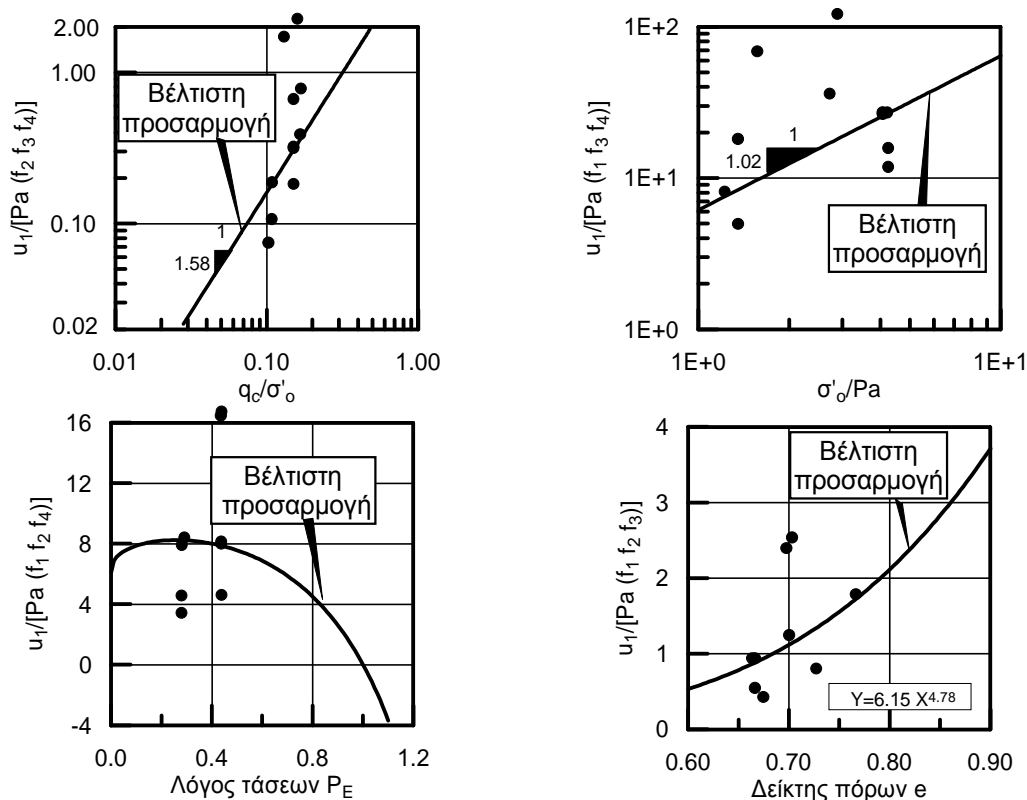
Σχήμα 1. Τυπική εξέλιξη της υδατικής υπερπίεσης με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης (Oosterschelde sand).

Figure 1. Typical accumulation of excess pore pressure with number of cycles (Oosterschelde sand).

Επιπλέον, ο εκθέτης c που εκφράζει την επίδραση των κύκλων φόρτισης στη συσσώρευση υδατικής υπερπίεσης, υπολογίζεται, στην περίπτωση θλίψης, από εμπειρική σχέση συναρτήσει των αρχικών εντατικών συνθηκών (123 δεδομένα, $R=0.58$):

$$c = 1.07 * \exp(-0.521 * P) * e^{1.584 * CSR^{0.20}} \quad (5)$$

Η εφαρμογή της εξίσωσης (5) για τον υπολογισμό του εκθέτη c στα δεδομένα εφελκυσμού οδηγεί σε συστηματική υποτίμηση



Σχήμα 2. Σύγκριση προβλέψεων και πειραματικών δεδομένων για την υδατική υπερπίεση.
Figure 2. Comparison between predictions and experimental data for excess pore pressures.

του μετρούμενου μεγέθους. Κατ' αναλογία με το μέγεθος U_1 , για τον ποσοτικό υπολογισμό του μεγέθους c , γίνεται νέα πολυπαραμετρική στατιστική ανάλυση προσαρμογής επί των δεδομένων εφελκυσμού, θεωρώντας μεταβλητή το σταθερό όρο στην εξίσωση (6) και δεδομένη την ποσοτική επίδραση των αρχικών παραμέτρων. Από τη στατιστική ανάλυση επί 14 δεδομένων προέκυψε με ακρίβεια $R=0.600$:

$$c_{ext} = 1.28 \cdot \exp(-0.521 \cdot P) \cdot e^{1.584 \cdot CSR^{0.20}} \quad (6)$$

Στο Σχήμα 1 περιλαμβάνονται, με διακεκομμένη γραμμή, αναλυτικές προβλέψεις (βάσει των Εξισώσεων (1), (2), (3) και (6)), προς σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

Η ποσοτική επιρροή των παραγόντων επίδρασης στο μέγεθος $U_{1,ext}$ και η ακρίβεια των προτεινόμενων σχέσεων, παρουσιάζεται στα Σχήματα 2α, 2β, 2γ, και 2δ. Με κατάλληλη κανονικοποίηση του μεγέθους U_1 , κάθε σχήμα εστιάζει στην επίδραση ενός συγκεκριμένου παράγοντα επίδρασης. Λόγου χάριν η επίδραση του λόγου ανακυκλικής τάσης q_0/σ'_o απεικονίζεται στο Σχήμα 2α συναρτήσεως του ανηγμένου μεγέθους $U_1/[p_a f_2(\sigma'_o/p_a) f_3(P_E) f_4(e)]$.

4. ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η εξάρτηση της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης γ ($= \epsilon_v - \epsilon_h$) με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης απεικονίζεται στο Σχήμα 3 (συνεχείς γραμμές). Ειδικότερα στο Σχήμα 3α παρουσιάζεται τυπική ανάπτυξη διατμητικής παραμόρφωσης για συνθήκες καθαρής θλίψης και στο Σχήμα 3β για συνθήκες καθαρού εφελκυσμού. Η ποιοτική ομοιότητα της εξέλιξης και στις δύο περιπτώσεις είναι προφανής. Η τυπική εξέλιξη της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης παρουσιάζει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο ο ρυθμός συσσώρευσης φθίνει εκθετικά, ενώ, στο τελικό στάδιο της φόρτισης η συσσώρευση πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης πραγματοποιείται με συνεχώς επιταχυνόμενο ρυθμό. Η συσσώρευση πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης εκφράζεται αναλυτικά ως ακολούθως:

$$\gamma = \gamma_1 N^\beta \left[1 + 0.01(N/N_{cr})^{5.0} \right] \quad (7)$$

όπου N ο αριθμός κύκλων φόρτισης, N_{cr} είναι ο αριθμός των κύκλων όπου παρουσιάζεται σημαντική αύξηση του ρυθμού συσσώρευσης παραμορφώσεων και οι καμπύλες του Σχήματος 3 κλίνουν απότομα προς τα ανάντη,

γ_1 η πλαστική διατμητική παραμόρφωση στο τέλος του 1^{ου} κύκλου, β η κλίση του διαγράμματος γ vs N σε διπλούς λογαριθμικούς άξονες, για το πρώτο στάδιο, και γ_{cr} η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο μέγεθος N_{cr} .

Η τιμή του μεγέθους γ_{cr} , στην περίπτωση της θλίψης, μπορεί να συσχετιστεί στατιστικά, με ικανοποιητική ακρίβεια (Εγγλέζος, 2004: 45 δεδομένα, $R=0.780$), με την παραμόρφωση γ_1 :

$$\gamma_{cr} = 1.281 \gamma_1^{0.517} \quad (8)$$

Επιπλέον, με συνδυασμό των Εξισώσεων (7) και (8), προκύπτει εμμέσως η τιμή του μεγέθους N_{cr} :

$$N_{cr} = (\gamma_{cr} / \gamma_1)^{(1/\beta)} \quad (9)$$

Η πλαστική διατμητική παραμόρφωση στο τέλος του πρώτου κύκλου φόρτισης γ_1 εκφράζεται υπό την ίδια γενική μορφή που χρησιμοποιείται και για το μέγεθος U_1 , δηλαδή:

$$\gamma_1(\%) = B (q_0/\sigma'_o)^{b1} (\sigma'_o/p_a)^{b2} P^{b3} e^{b4} \quad (10)$$

$$\eta \gamma_1 = B g_1(q_0/\sigma'_o) g_2(\sigma'_o/p_a) g_3(P) g_3(e) \quad (11)$$

Οι σταθερές των παραγόντων επίδρασης στην Εξίσωση 11, σε περίπτωση θλίψης, υπολογίστηκαν (Εγγλέζος, 2004) μέσω πολυπαραμετρικής στατιστικής συσχέτισης (StatSoft Inc., 1995), επί των διατιθέμενων πειραματικών δεδομένων (92 δοκιμές για συνθήκες TX). Μία ιδιαίτερως καλή προσαρμογή των δεδομένων ($R=0.715$) επιτυγχάνεται για τις ακόλουθες τιμές: $B= 9.25$, $b1=1.75$, $b2=0.73$, $b3=1.19$ και $b4=6.17$.

Η εφαρμογή των Εξισώσεων (7) - (12) για παραμόρφωση σε καθαρή θλίψη στα δεδομένα με αρχικό εφελκυσμό οδηγεί σε προβλέψεις που υποτιμούν συστηματικά τις μετρήσεις. Συγκεκριμένα οι λόγοι πρόβλεψης $R\gamma_1$ των δεδομένων για τον 1^ο κύκλο ($R\gamma_1 = \gamma_{1, \text{πρόβλεψη}}/\gamma_{1, \text{μέτρηση}}$) στα δεδομένα εφελκυσμού, κυμαίνονται από 0.05-0.45 με μέσο όρο $R\gamma_{1,m} = 0.20$. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από τη σύγκριση της τιμής γ_1 πειραματικών δεδομένων σε αρχική θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα, με πρακτικά ίσες αρχικές εντατικές συνθήκες, η οποία, επίσης, παρουσιάζεται στον Πίνακα (2). Κατόπιν τούτου η εξίσωση για

το μέγεθος γ_1 επαναδιατυπώνεται με νέα πολυπαραμετρική στατιστική ανάλυση προσαρμογής επί των δεδομένων εφελκυσμού, θεωρώντας μεταβλητή το σταθερό όρο στην εξίσωση (10) και δεδομένη

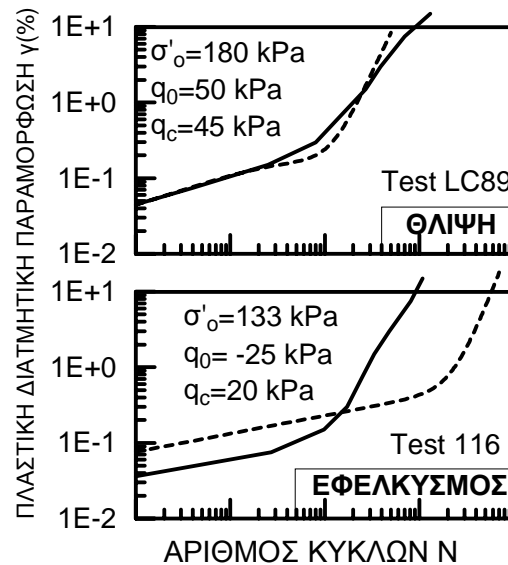
Πίνακας 2. Σύγκριση τριαξονικών δοκιμών σε θλίψη και εφελκυσμό

Table 2. Comparison of compression and extension triaxial tests

Σύγκριση δοκιμών (θλίψη/εφελκυσμός)	$U_{1-\theta\lambda}/U_{1-\epsilon\phi}$	$\gamma_{1-\theta\lambda}/\gamma_{1-\epsilon\phi}$
LC134 vs 79	0.05	0.02
LC151 vs 145	0.18	0.04

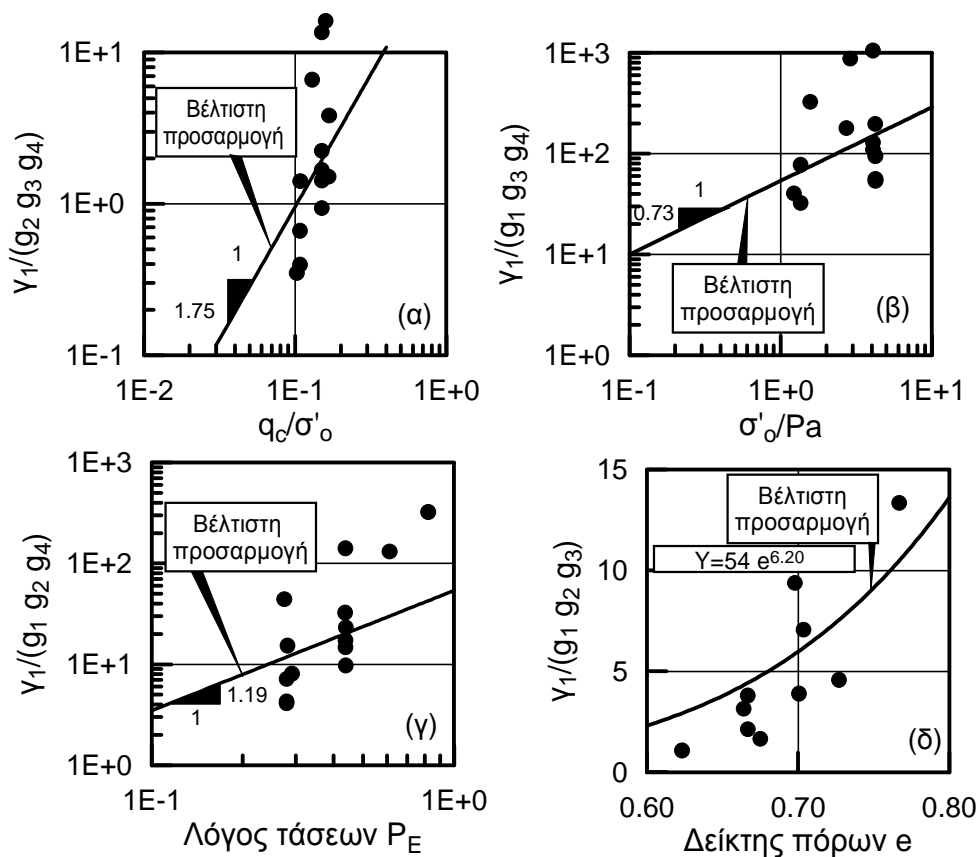
την ποσοτική επίδραση των αρχικών παραμέτρων. Από τη στατιστική ανάλυση επί 14 δεδομένων προέκυψε με ακρίβεια $R=0.741$: $B= 54.0$, $b1=1.75$, $b2=0.73$, $b3=1.19$ και $b4=6.17$, για υπολογισμό του γ_1 από την εξίσωση (11).

Επιπλέον, ο εκθέτης β (ρυθμός συσσώρευσης στο 1^ο στάδιο) υπολογίζεται, στην περίπτωση θλίψης (Εγγλέζος, 2004), από εμπειρική σχέση συναρτήσει των αρχικών εντατικών συνθη-



Σχήμα 3. Τυπική εξέλιξη της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης (Oosterschelde sand).

Figure 3. Typical accumulation of permanent shear strain with number of cycles (Oosterschelde sand).



Σχήμα 4. Σύγκριση προβλέψεων και πειραματικών δεδομένων για την πλαστική διατμητική παραμόρφωση.

Figure 4. Comparison between predictions and experimental data for permanent shear strain.

κών (88 δεδομένα, $R=0.70$), βάσει πειραματικών δεδομένων με ανισότροπη στερεοποίηση στην περιοχή της θλίψης:

$$\beta = 1.67 * CSR^{0.62} * (\sigma' / p_a)^{0.62} P^{0.21} * e^{3.42} \quad (12)$$

Η εφαρμογή της εξίσωσης (12) για τον υπολογισμό του εκθέτη β των δεδομένων εφελκυσμού οδηγεί σε συστηματική υποτίμηση του μετρούμενου μεγέθους. Με στατιστική ανάλυση προσαρμογής επί των δεδομένων εφελκυσμού (14 δεδομένα), με μεταβλητή το σταθερό όρο της εξίσωσης (12) και διατήρηση της επίδρασης των εντατικών παραμέτρων προκύπτει με ακρίβεια $R=0.56$:

$$\beta_{ext} = 3.19 * CSR^{0.62} * (\sigma' / p_a)^{0.62} P^{0.21} * e^{3.42} \quad (13)$$

Οι αναλυτικές προβλέψεις που λαμβάνονται με το συνδυασμό των Εξισώσεων (7)-(10) και (13), σχεδιάζονται με διακεκομμένες γραμμές εν αντιθέσει με τις συνεχείς γραμμές των πειραματικών δεδομένων του Σχήματος 3.

Η αναλυτική έκφραση για το μέγεθος $\gamma_{1,ext}$ συγκρίνεται με τα πειραματικά δεδομένα στα

Σχήματα 4α, 4β, 4γ, και 4δ. Η σύγκριση γίνεται με την ίδια μεθοδολογία που υιοθετείται στο Σχήμα 2, για την υδατική υπερπίεση U_1 , δηλαδή, ξεχωριστά για κάθε μία από τις μεταβλητές που υπεισέρχονται στις Εξισώσεις (10) και (11).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αξιολόγηση της γενικής ακρίβειας των προτεινομένων σχέσεων, γίνεται στα Σχήματα 5 και 6, στα οποία συγκρίνονται οι μετρηθείσες τιμές και οι αναλυτικές προβλέψεις, της υδατικής υπερπίεσης U_N , και της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης γ_N , για τον 1° , 3° , 5° , και 10° κύκλο αντίστοιχα. Οι κύκλοι αυτοί καλύπτουν πρακτικά τον αριθμό ισοδύναμων κύκλων φόρτισης των σεισμών του Ελληνικού χώρου. Στα σχήματα παρουσιάζονται οι λόγοι πρόβλεψης RU και $R\gamma$ (πρόβλεψη προς μέτρηση) συναρτήσει των αντίστοιχων μετρήσεων. Οι μετρήσεις υπερπίεσης είναι κανονικοποιημένες ως προς τη μέγιστη υπερπίεση U_f και οι μετρήσεις διατμητικής παραμόρφωσης ως προς την κρίσιμη διατμητική παραμόρφωση γ_{cr} , ώστε να φανεί τυχόν επίδραση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους

στην ακρίβεια της πρόβλεψης. Παρατηρείται ότι η σκέδαση των λόγων πρόβλεψης RU και R_γ δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα με τους κύκλους φόρτισης. Επίσης η πλειοψηφία των προβλέψεων για τον πρώτο κύκλο (στο εύρος μίας τυπικής απόκλιση από το M.O. πρόβλεψης) παρουσιάζει διακύμανση $0.38 < RU < 1.80$ και $0.33 < R_{\gamma} < 2.20$ αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι η σκέδαση αυξάνεται σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης, συνιστάται η χρησιμοποίηση των προτεινόμενων εμπειρικών σχέσεων με ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2.50 για την υδατική υπερπίεση και 3.00 για την πλαστική διατμητική παραμόρφωση.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η παρούσα εργασία στηρίχθηκε σε περιορισμένα πειραματικά δεδομένα προερχόμενα από το ίδιο εδαφικό υλικό (άμμος Oosterschelde) και βρίσκει εφαρμογή σε μέσες και λεπτές άμμους, για εντατικές συνθήκες που αντιστοιχούν αυστηρά σε αστράγγιστες ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές, σταθερής τάσης, στην περιοχή του εφελκυσμού. Ο εμπλουτισμός της πειραματικής βάσης με δεδομένα από αντίστοιχες δοκιμές σε άλλους εδαφικούς τύπους και σε μεγαλύτερο εύρος της τιμής των αρχικών εντατικών συνθηκών, αναμένεται να οδηγήσει σε εμπειρικές σχέσεις υψηλότερης ακρίβειας.

Επίσης από τα διαθέσιμα δεδομένα φαίνεται κατ' αρχήν ότι για τις ίδιες αρχικές εντατικές συνθήκες η υδατική υπερπίεση και η πλαστική

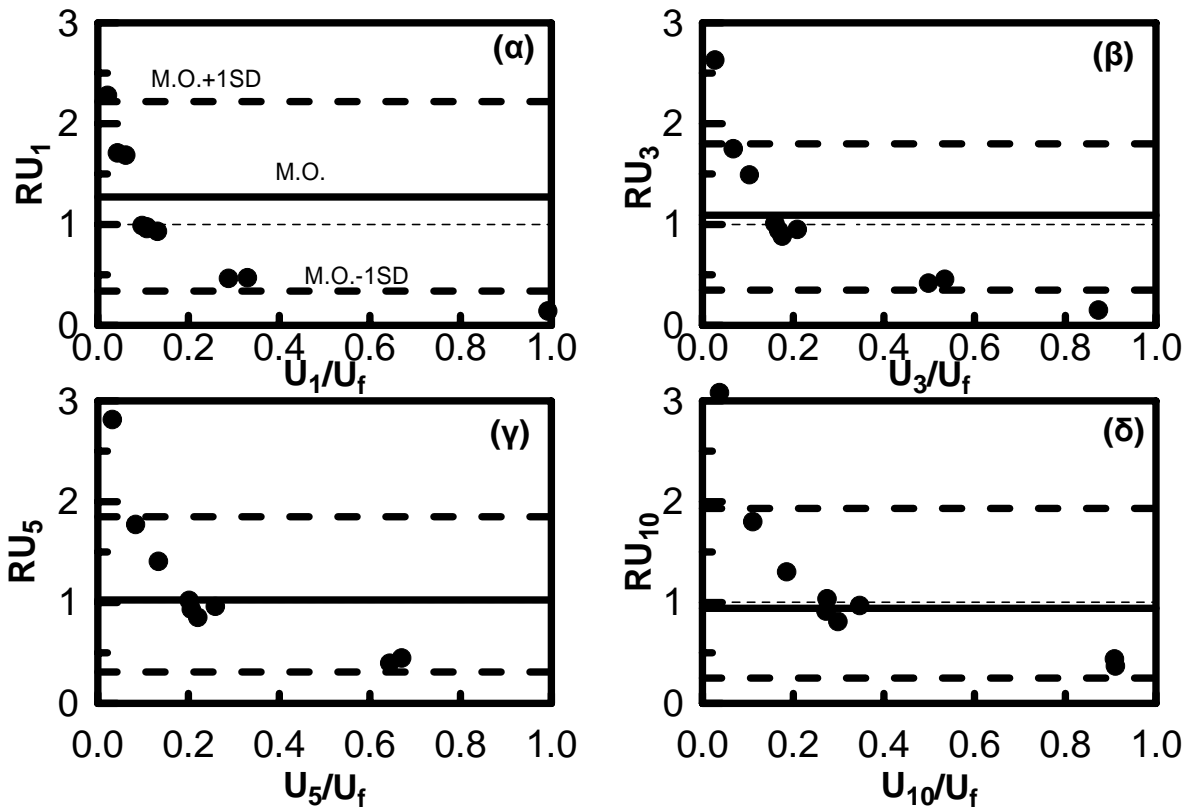
διατμητική παραμόρφωση λόγω ανακυκλικής φόρτισης είναι σαφώς μεγαλύτερη στην περίπτωση καθαρού εφελκυσμού, εν συγκρίσει προς την καθαρή θλίψη. Επιπλέον είναι φανερό ότι η επίδραση των βασικών παραμέτρων ανάπτυξης υδατικής υπερπίεσης και πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης δεν φαίνεται πρακτικά να διαφοροποιούνται μεταξύ θλίψης και εφελκυσμού. Κατόπιν τούτου οι εμπειρικές σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί για υπολογισμό υδατικής υπερπίεσης και πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης σε θλίψη (και οι οποίες είναι τεκμηριωμένες επαρκώς) μπορούν κατ' αρχήν με κατάλληλη στατιστική επεξεργασία να επεκταθούν και στην περίπτωση εφελκυσμού.

Εν κατακλείδι, η προτεινόμενη μεθοδολογία προσφέρει ένα αρχικό πλαίσιο για την πρόβλεψη υδατικών υπερπίεσεων και πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων σε άμμους με αρχικό εφελκυσμό υπό καθεστώς ανακυκλικής φόρτισης, χωρίς επ' ουδενί να παραγνωρίζεται η ανάγκη ειδικών εργαστηριακών δοκιμών, κατά το σχεδιασμό σημαντικών έργων.

Τέλος, οι προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις, πέραν της δυνατότητας που προσφέρουν για απλοποιημένους υπολογισμούς, παρέχουν την πρόσθετη δυνατότητα βαθμονόμησης καταστατικών μοντέλων και αριθμητικών κωδίκων που στοχεύουν στην πρόβλεψη της ανακυκλικής συμπεριφοράς άμμων.

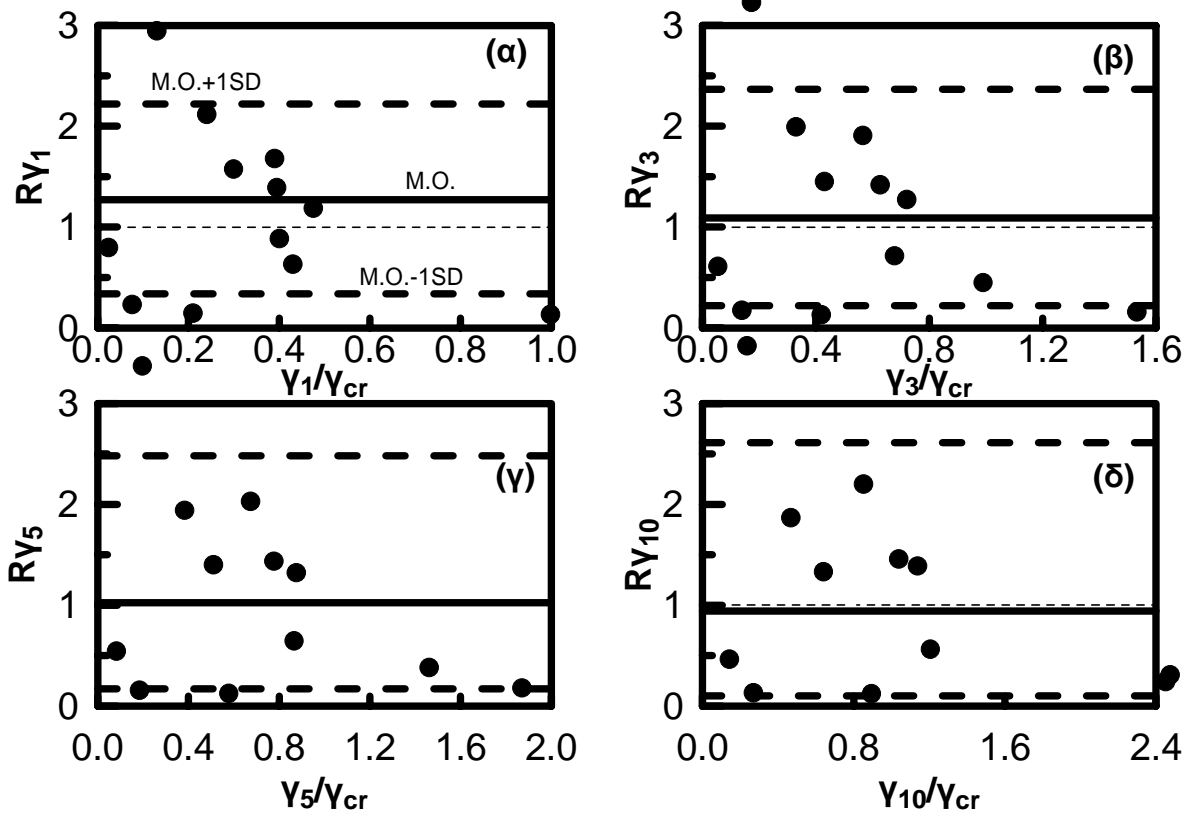
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Εγγλέζος Δ. (2004). «Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς του εδαφικού στοιχείου υπό ανακυκλική φόρτιση», *Διδ. Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα*.
- Bouckovalas, G. and Whitman, R.V. and Marr, W.A. (1983). "Permanent displacement of sand with cyclic loading", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 100(11), pp. 1606-1623.
- Egglezos D.N. and Bouckovalas, G. (1998). "Analytical relationships for earthquake induced pore pressure in sand, clay and silt", *Proc. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, September* (in CD-ROM).
- Ishihara, K.F. and Tatsuoka, and Yashuda, S. (1975). "Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses", *Soils and Foundations* 16(1), pp. 1-16.
- Lambe, T.W. (1979). "Cyclic triaxial tests on Oosterschelde sand". *MIT Research Report R79-24, Soils Publication No. 646*.
- Luong, M. P. and Sidaner, J.F. (1981). "Comportment cyclique et transitoire des sables". *Proc. 10th ICSMFE, Stockholm, Sweden* 3, pp. 257-260.
- Seed, H.B. and Booker, J.R. (1977). "Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains". *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 103(7), pp. 757-768.
- StatSoft, Inc. (1995). "STATISTICA for windows" [computer program]. Tulsa



Σχήμα 5. Σύγκριση προβλέψεων και μετρήσεων υδατικής υπερπίεσης (1^{ος}, 3^{ος}, 5^{ος}, 10^{ος} κύκλος).
Figure 5.

Predicted versus measured excess pore pressures (1th, 3rd, 5th and 10th loading cycle).



Σχήμα 6. Σύγκριση προβλέψεων και μετρήσεων πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης (1^{ος}, 3^{ος}, 5^{ος} και 10^{ος} κύκλος φόρτισης).
Figure 6. Predicted versus measured permanent shear strain (1th, 3rd, 5th and 10th loading cycle).