

# Βελτίωση Εδάφους με Προφόρτιση Επιταχυνόμενη με Χαλικοπασσάλους – Η Περίπτωση του Αεροδρομίου Κέρκυρας

## Soil Improvement by Preloading Accelerated by Stone Columns – The Case of Corfu Airport

ΠΛΑΤΗΣ, Α.Δ. Πολιτικός Μηχανικός, M.Eng., ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε.  
ΜΙΧΑΛΗΣ, Η.Κ. Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc., DIC  
ΜΑΛΛΙΟΥ, Κ.Θ. Πολιτικός Μηχανικός, ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Παρουσιάζεται η καλά τεκμηριωμένη από πλευράς ενόργανων μετρήσεων περίπτωση της επέκτασης των δαπέδων του αεροδρομίου Κέρκυρας “Καποδίστριας”, όπου έχει γίνει βελτίωση του μαλακού αργιλικού υπεδάφους με προφόρτιση, επιταχυνόμενη με χαλικοπασσάλους. Οι ενόργανες μετρήσεις αφορούν τόσο το δοκιμαστικό επίχωμα, που προηγήθηκε της κατασκευής του έργου, όσο και το ίδιο το επίχωμα προφόρτισης, περιέλαβαν δε μεταλλικούς δείκτες καθίζησης και ηλεκτρικά πιεζόμετρα. Η διάρκεια των μετρήσεων ήταν ιδιαίτερα μεγάλη (5 έτη). Τα αποτελέσματα των ενόργανων μετρήσεων σχολιάζονται και συγκρίνονται με τα αναμενόμενα βάσει των στοιχείων της μελέτης και γίνονται προτάσεις για άλλα αντίστοιχα έργα.

**ABSTRACT:** The well documented, in terms of instrumentation, case of Corfu airport, where the soil is improved by preloading accelerated by stone columns, is presented. The instrumentation included settlement plates and electric piezometers and was applied both in a trial embankment constructed before commencement of foundation works as well as in the preloading embankment itself. The duration of monitoring was exceptionally long (5 years). The results of the monitoring are discussed and compared with the expected ones and finally proposals are made concerning the type and methodology of monitoring that should be adopted in other similar projects.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα ανακοίνωση αναφέρεται στη μέθοδο βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης της επέκτασης των δαπέδων στάθμευσης αεροσκαφών του αεροδρομίου Κέρκυρας “Καποδίστριας”. Η περιοχή της επέκτασης βρίσκεται νότια των εγκαταστάσεων του αεροδρομίου, εντός της λιμνοθάλασσας Χαλκιοπούλου. Η διάταξη του έργου φαίνεται στο Σχήμα 1.

Η μέθοδος θεμελίωσης που επελέγη αφορά τη βελτίωση των επιφανειακών, αργιλικών, αλλουβιακών αποθέσεων, με προφόρτιση, επιταχυνόμενη με χαλικοπασσάλους (Χ/Π).

### 2. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα ανώτερα εδαφικά στρώματα αποτελούνται κυρίως από πολύ μαλακές ως μαλακές αργί-

λους, μέσης ως υψηλής πλαστικότητας, μεταβλητού πάχους 3-17 m, οι οποίες υπέρκεινται του μαργαίικου υποβάθρου, το οποίο παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο (ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε., 1999).

Οι εδαφικές συνθήκες στην περιοχή του έργου, όπως αυτές προσδιορίστηκαν με δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και πνευτρομετρήσεις, φαίνονται σε μια χαρακτηριστική γεωτεχνική τομή στο Σχήμα 2. Πιο αναλυτικά το υπέδαφος στην περιοχή της επέκτασης αποτελείται από τις εξής επί μέρους στρώσεις:

**Στρώμα 1:** Τεφρή, πολύ μαλακή ως μαλακή ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης ως υψηλής πλαστικότητας (CL2-CH), έντονα μεταβλητού πάχους (3-17 m).

**Στρώμα 1α:** Καστανή ως καστανοπράσινη ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σιφρή ως πολύ σιφρή.



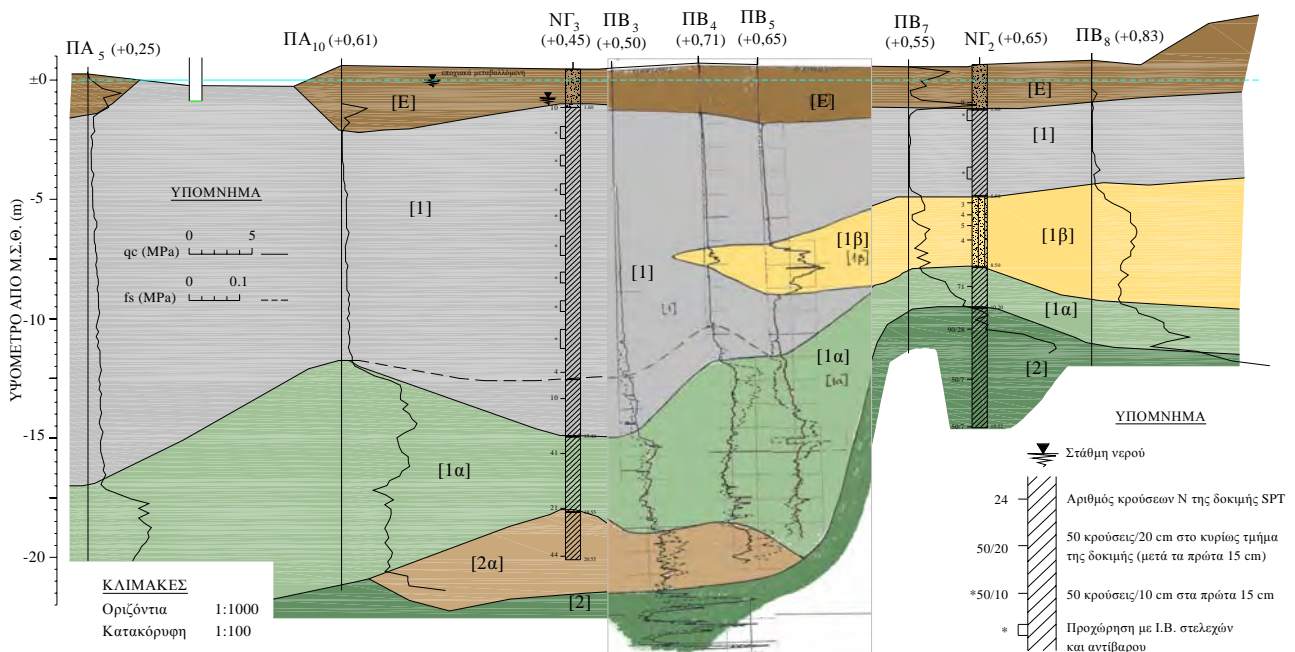
Σχήμα 1. Περιοχή επέκτασης Α/Δ Κέρκυρας  
Figure 1. Corfu airport parking expansion area.

**Στρώμα 1β:** Τεφροπράσινη ΑΜΜΟΪΛΥΣ (SM) ως ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΙΛΥΣ (OL) χαλαρή ως μέσης πυκνότητας, πάχους 1,40-3,00 m, το οποίο απαντάται εντός του στρώματος [1] ή κάτω από αυτό.

**Στρώμα 2:** Τεφροπράσινη ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2) πολύ σιφρή ως σκληρή (ΜΑΡΓΑΪΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ).

**Στρώμα 2α:** Τοπικά το μαργαϊκό υπόβαθρο απαντάται και υπό μορφή σιφρής ως σκληρής αμμώδους ΑΡΓΙΛΟΥ χαμηλής πλαστικότητας (CL1), λευκόφαιου ως ανοικτού καστανού χρώματος.

Οι παράμετροι σχεδιασμού που υιοθετήθηκαν για τους εδαφοτεχνικούς υπολογισμούς της μελέτης παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 1.



Σχήμα 2. Χαρακτηριστική γεωτεχνική τομή στην περιοχή του έργου  
Figure 2. Geotechnical section at the area of the project.

Πίνακας 1. Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού

Table 1. Geotechnical Design Parameters

| ΠΑΡΑ-<br>ΜΕΤΡΟΣ               | ΣΤΡΩΜΑ             |                    |      |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|------|
|                               | [1]                | [1α]               | [1β] |
| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 13+0,5z≤20         | 20                 | 20   |
| $\phi'$                       | -                  | -                  | 28°  |
| $c'$ (kPa)                    | -                  | -                  | 0    |
| $\Phi_u$                      | 0°                 | 0°                 | -    |
| $c_u$ (kPa) <sup>(1)</sup>    | 1,5z               | 90                 | -    |
| $E_s$ (MPa)                   | 0,5                | 5                  | 6    |
| $c_v$ (m <sup>2</sup> /s)     | 3x10 <sup>-8</sup> | 3x10 <sup>-8</sup> | -    |
| $c_H/c_v$                     | 2                  | -                  | -    |
| $C_{ec}$                      | 0,20 (z=0-2m)      |                    |      |
|                               | 0,15 (z=2-8m)      | 0,10               | -    |
|                               | 0,10 (z>8m)        |                    |      |
| $\Delta c_u/\Delta \sigma'_v$ | 0,20               | -                  | -    |

(<sup>1</sup>) z = βάθος από Μ.Σ.Θ. (±0,00 m)

### 3. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

Λόγω του έντονα μεταβλητού πάχους της μαλακής αργιλικής στρώσης [1], οι αναμενόμενες καθιζήσεις για απ' ευθείας έδραση των επιχωμάτων των δαπέδων στον πυθμένα της λιμνοθάλασσας εκτιμήθηκαν μεταξύ 600-1100 mm περίπου (ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε., 1999). Η χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων αυτών εκτιμήθηκε ότι θα είναι γενικά βραδεία και έντονα μεταβλητή, λόγω του σημαντικά διαφορετικού πάχους των αργιλικών στρώσεων, καθώς και της παρουσίας ενδιάμεσης στραγγιστικής στρώσης ([1β]) μόνο σε τμήμα του χώρου του έργου.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω (γενικά μεγάλες καθιζήσεις, έντονα μεταβαλλόμενες τόσο χωρικά όσο και χρονικά) αναμένετο να παρατηρηθούν συν τω χρόνω διάφορα λειτουργικά προβλήματα όπως:

- Ανεξέλεγκτη μεταβολή των ρύσεων των δαπέδων, που θα οδηγήσει σε δυσλειτουργία ή και αχρήστευση ορισμένων στραγγιστικών τάφρων, καθώς και σε συγκέντρωση λιμναζόντων νερών σε ορισμένες περιοχές των δαπέδων.
- Παραμορφώσεις των δαπέδων, αυξανόμενες με το χρόνο, και ενδεχόμενη ρηγματώσή τους.
- Διαφορικές καθιζήσεις και δημιουργία αναβαθμών στις θέσεις των τεχνικών (φρεάτια, υπόγεια κανάλια κλπ.), οι οποίες θα επανεμφανίζονται, έστω και μετά από επιδιόρθωση, λόγω της βραδείας εξέλιξης των καθιζήσεων.

### 4. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προαναφερθέντα προβλήματα, προβλέφθηκε η επιτάχυνση και ολοκλήρωση του μεγαλύτερου μέρους των καθιζήσεων πριν από την κατασκευή των ασφαλτικών στρώσεων, με τη βοήθεια χαλικοπασσάλων διαμέτρου 0,70 m εκτεινομένων εντός της ανώτερης πολύ μαλακής αργιλικής στρώσης που συμβάλλει στην εκδήλωση του μεγαλύτερου μέρους των καθιζήσεων. Η αξονική απόσταση μεταξύ χαλικοπασσάλων ποικίλει από θέση σε θέση μεταξύ 2,00-4,50 m.

Επίσης προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των καθιζήσεων από δευτερογενή συμπίεση (μακροχρόνιες υποχωρήσεις ερπυστικού τύπου μετά το πέρας της στερεοποίησης), αλλά και για να επιταχυνθεί ακόμα περισσότερο η εκδήλωση των αναμενόμενων καθιζήσεων από τα φορτία του έργου, προβλέφθηκε η προφόρτιση του χώρου του έργου με επίχυμα ύψους τουλάχιστον 1,50 m πάνω από την τελική στάθμη των δαπέδων. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Πλατής κ.ά., 2006) η υπερφόρτιση (εφαρμογή πίεσης προφόρτισης μεγαλύτερης από την επιβαλλόμενη από τα φορτία του έργου) είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος μείωσης των καθιζήσεων από δευτερογενή συμπίεση, ιδιαίτερα σε κανονικά στερεοποιημένες υψηλής πλαστικότητας ή οργανικές αργίλους (όπως στην περίπτωση του στρώματος [1]).

Επιπλέον, προβλέφθηκε η επιτάχυνση των καθιζήσεων με γεωσύνθετα στραγγιστήρια σε τριγωνικό κάνναβο πλευράς 1,50 m σε δευτερεύουσες περιοχές εκτός δαπέδων, όπου δεν απαιτείτο κάποια ιδιαίτερη ενίσχυση του εδάφους, αλλά ήταν επιθυμητό να ολοκληρωθούν οι καθιζήσεις σε έναν εύλογο χρόνο, προκειμένου να διατηρηθούν οι διαμορφωμένες κλίσεις για την ομαλή απορροή των ομβρίων από τα δάπεδα προς τις αντίστοιχες αποστραγγιστικές τάφρους (ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε., 2002).

### 5. ΕΝΟΡΓΑΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Λόγω της μεγάλης σημασίας της ταχύτητας εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης, προκειμένου να καθοριστεί ο κατάλληλος χρόνος αφαίρεσης του επιχώματος προφόρτισης, προβλέφθηκε η συστηματική παρακολούθηση των καθιζήσεων και της εκτόνωσης των υπερπίεσεων του νερού των πόρων καθ' όλη τη διάρκεια της προφόρτισης, με την εγκατάσταση καταλλήλων οργάνων μέτρησης και τη συνεχή αξιολόγηση των στοιχείων αυτών. Για το σκο-

πό αυτό, σε όλη την προφορτιζόμενη έκταση, τοποθετήθηκαν από τη στάθμη +0,60 m τα εξής όργανα παρακολούθησης:

- 143 μεταλλικοί δείκτες καθίζησης σε κάρναβο 25x25 m.
- 45 ηλεκτρικά πιεζόμετρα σε κάρναβο 50x50 m εκτεινόμενα σε βάθος h/4, h/2 και 3h/4 εντός του στρώματος της μαλακής αργίλου, όπου h είναι το πάχος του στρώματος αυτού στην εκάστοτε θέση.

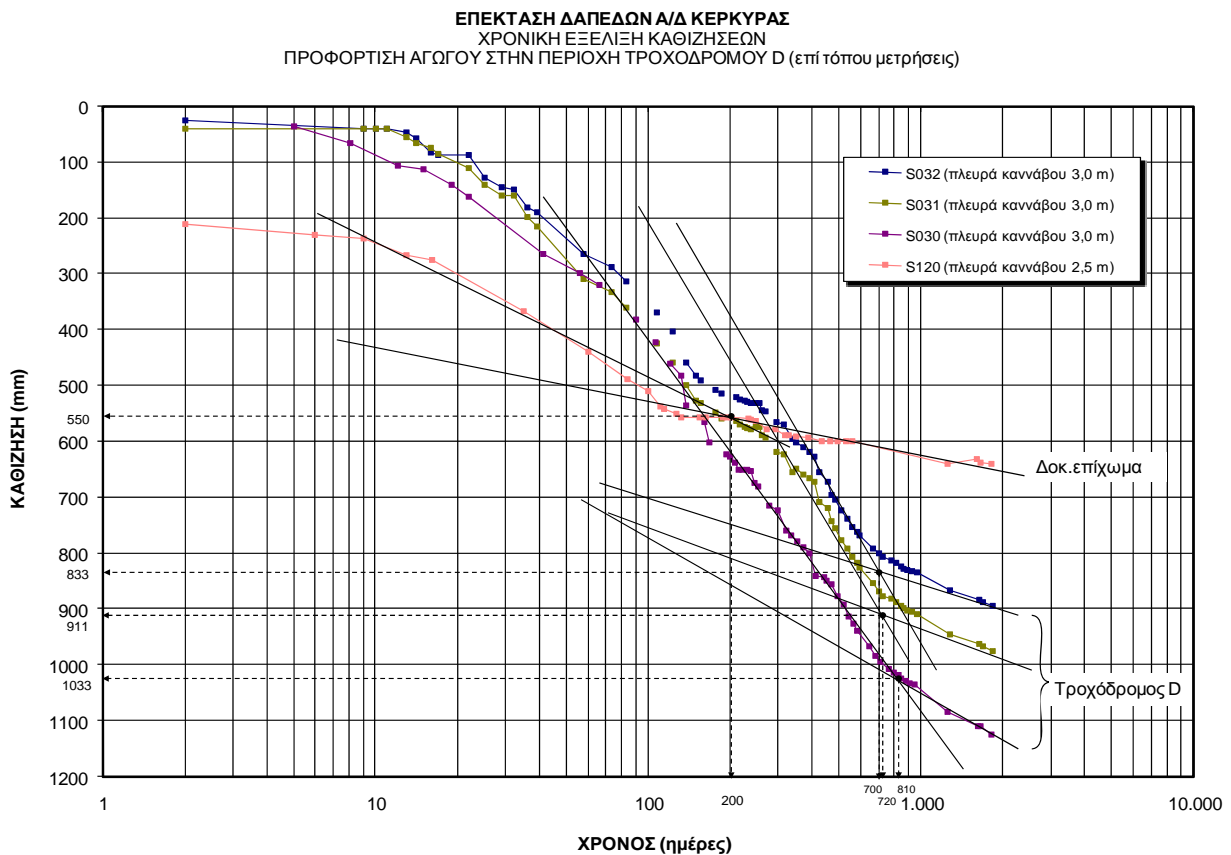
Προκειμένου να διαπιστωθεί εγκαίρως η συμπεριφορά του εδάφους θεμελίωσης και να αποφασιστεί τυχούσα απαιτούμενη τροποποίηση της διαδικασίας βελτίωσης του εδάφους (κάρναβος χαλικοπασσάλων ή ύψος προφόρτισης), προβλέφθηκε η άμεση κατασκευή τμήματος των επιχώσεων διαστάσεων 60x90 m, στην ανατολική πλευρά των δαπέδων. Στο τμήμα αυτό των επιχώσεων συνορεύουν 4 διαφορετικοί κάρναβοι χαλικοπασσάλων (πλευράς 2,00-2,50-3,00-3,50 m αντίστοιχα), οπότε το τμήμα αυτό προηγήθηκε όλων των υπολοίπων εργασιών προκειμένου να λειτουργήσει ως δοκιμαστικό επίχωμα. Στο τμήμα αυτό τοποθετήθηκαν επίσης τα εξής όργανα παρακολούθησης της προφόρτισης:

- 8 μεταλλικοί δείκτες καθίζησης (στάθμη έδρασης το +0,60 m).
- 6 ηλεκτρικά πιεζόμετρα τοποθετούμενα ανά 2 σε στάθμη -2,50 m, -5,00 m και -7,50 m αντίστοιχα.

Οι διαθέσιμες μετρήσεις καθιζήσεων έχουν ληφθεί εντός χρονικού διαστήματος 62 μηνών, από 12-09-02 έως 17-10-07.

Η προφόρτιση έγινε τμηματικά στο χώρο του έργου με μετακύλιση του επιχώματος προφόρτισης. Μετά το πέρας της εργολαβίας παρέμειναν 3 περιοχές προφόρτισης, οι οποίες εξακολουθούν να είναι υπό προφόρτιση ακόμη και σήμερα. Από αυτές τις περιοχές, οι 2 παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της συνεχιζόμενης εξέλιξης καθιζήσεων (στην ουσία δευτερογενών), οι μετρήσεις των οποίων παρουσιάζονται και σχολιάζονται στην παρούσα ανακοίνωση.

Από την πρώτη περιοχή αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα των δεικτών καθίζησης S030, S031 και S032, ενώ από τη δεύτερη, του δείκτη καθίζησης S120. Οι επί τόπου μετρήσεις των δεικτών αυτών παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Δείκτες καθίζησης S030, S031, S032 και S120  
Figure 3. Settlement monitoring points S030, S031, S032 and S120.

## 6. ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

Οι αναστροφές αναλύσεις που έγιναν, βασιζόμενες στα στοιχεία των παραπάνω δεικτών, περιέλαβαν μεταξύ άλλων επανεκτίμηση των συντελεστών που καθορίζουν τόσο το μέγεθος όσο και τη χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων στο συμπιεστό στρώμα [1], το οποίο κυρίως συμβάλλει στις μετρηθείσες καθιζήσεις. Οι συντελεστές που επανεκτιμήθηκαν ήταν:

- Ο λόγος πρωτογενούς συμπίεσης  $C_{ec}$ .
- Ο συντελεστής κατακόρυφης στερεοποίησης  $c_v$ .
- Ο λόγος  $c_h/c_v$  (και κατ' επέκταση ο λόγος των διαπερατοτήτων  $k_h/k_v$ ).
- Ο συντελεστής δευτερογενούς συμπίεσης  $C_{\sigma}$ .

Πιο συγκεκριμένα το  $C_{ec}$  του στρώματος [1] ( $C_{ec[1]}$ ) εκτιμήθηκε για κάθε έναν από τους δείκτες S030, S031, S032, S120 χωριστά, με τη βοήθεια της σχέσης:

$$s = \sum_{i=1}^2 H_i C_{\sigma i} \log \left( \frac{\Delta \sigma_v + \sigma'_{vi}}{\sigma'_{vi}} \right) \quad (1)$$

όπου ο δείκτης 1 αφορά το αργιλικό στρώμα [1], ενώ ο δείκτης 2 αφορά το στρώμα [1α], λαμβάνοντας σε κάθε θέση υπόψη:

- το μέγεθος της μετρηθείσας καθίζησης  $s$  λόγω πρωτογενούς στερεοποίησης,
- το πάχος  $H_i$  των συμπιεστών στρωμάτων [1], [1α], [1β] και
- τον κάρνα των Χ/Π κατά Priebe (1995), (τριγωνικός πλευράς 3,00 m στην περιοχή των δεικτών S030, S031 και S032 και τριγωνικός πλευράς 2,50 m στην περιοχή του δείκτη S120)

και θεωρώντας ότι ισχύουν οι παράμετροι συμπίεσιμότητας των υποστρωμάτων [1α] και [1β] που προτείνονται στη γεωτεχνική έρευνα ( $C_{ec[1\alpha]} = 0,10$  και  $E_{s[1\beta]} = 6$  MPa – ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε., 1999), μια και η συμβολή τους είναι μικρή στο σύνολο των καθιζήσεων.

Σημειώνεται ότι προκειμένου να υπολογιστούν από τις μετρηθείσες συνολικά καθιζήσεις, οι καθιζήσεις που αντιστοιχούν στην πρωτογενή στερεοποίηση (έτσι ώστε να υπολογιστεί από την αναστροφή ανάλυση το  $C_{ec}$ ), εκτιμήθηκαν και αφαιρέθηκαν από τις μετρηθείσες καθιζήσεις οι άμεσες καθιζήσεις, οι ο-

ποίες αντιστοιχούν στο σύνολο των καθιζήσεων του στρώματος [1β] (αμμοίλυσ), όπου αυτό υπάρχει, και στο 10% της καθίζησης από στερεοποίηση (κατά Padfield and Sharrock, 1983) για τα στρώματα [1] και [1α].

Από αυτή την αναστροφή ανάλυση προέκυψε για μεν τους δείκτες S030, S031, S032 του επιχώματος προφόρτισης του τροχοδρόμου D μικρή διακύμανση των τιμών του  $C_{ec}$  ( $C_{ec[1]} = 0,19 \div 0,21$ ), ενώ για το δείκτη S120 του δοκιμαστικού επιχώματος προέκυψε σημαντικά μικρότερη τιμή ( $C_{ec[1]} = 0,09$ ).

Εξαιτίας της σαφούς διαφοροποίησης της συμπίεσιμότητας της αργιλικής στρώσης [1] μεταξύ της περιοχής του τροχοδρόμου D και του δοκιμαστικού επιχώματος, έγινε επανεξέταση των αποτελεσμάτων των διαθέσιμων δοκιμών συμπίεσομέτρου. Σύμφωνα με αυτή επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη διαφοροποίησης της συμπίεσιμότητας του στρώματος [1], κατά τρόπο ώστε αυτό να είναι πιο συμπιεστό προς τα δυτικά από ότι στην ανατολική περιοχή του έργου. Έτσι για την επανεκτίμηση των καθιζήσεων λήφθηκε τιμή  $C_{ec[1]} = 0,20$  για τους δείκτες S030, S031 και S032, ενώ λήφθηκε μειωμένη τιμή  $C_{ec[1]} = 0,10$  για τους υπολογισμούς στην περιοχή του δείκτη S120.

Όσον αφορά τη χρονική εξέλιξη της πρωτογενούς στερεοποίησης λόγω κατακόρυφης και οριζόντιας στράγγισης, αυτή εκτιμήθηκε για μεν την οριζόντια στράγγιση κατά Barron (1948) και Hansbo (1981), για δε την κατακόρυφη στράγγιση σύμφωνα με τη θεωρία μονοδιάστατης στερεοποίησης κατά Terzaghi. Ο σύνθετος βαθμός στερεοποίησης  $U$  λόγω ταυτόχρονης κατακόρυφης και οριζόντιας στράγγισης εκτιμήθηκε με εφαρμογή της σχέσης του Carrillo (1942):

$$(1-U) = (1-U_v) \times (1-U_h) \quad (2)$$

όπου:

$U$ : σύνθετος βαθμός στερεοποίησης

$U_h$ : βαθμός στερεοποίησης λόγω οριζόντιας στράγγισης

$U_v$ : βαθμός στερεοποίησης λόγω κατακόρυφης στράγγισης.

Οι παραδοχές των υπολογισμών για την εκτίμηση της οριζόντιας και κατακόρυφης στερεοποίησης παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 2. Ειδικά στην περίπτωση του δοκιμαστικού επιχώματος (δείκτης S120), όπου είχε παρατηρηθεί, όπως προαναφέρθηκε, σημαντική διαφορά στο μέγεθος αναμενόμενων και μετρηθεισών καθιζήσεων, έγινε παραμετρική ανάλυση σε ότι αφορά τις τιμές των κρίσιμων παραμέτρων  $c_v$  και  $c_h/c_v = k_h/k_v$ , οι οποίες κα-

θορίζουν το ρυθμό εξέλιξης των καθιζήσεων. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν γι' αυτές τις παραμετρικές αναλύσεις φαίνονται επίσης στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Παραδοχές Εκτίμησης Στερεοποίησης  
Table 2. Consolidation Estimation Assumptions

| Παράμετρος  | Δείκτες S30, S31, S32   | Δείκτης S120             |
|---|-------------------------|--------------------------|
| Κάναβος Χ/Π   | Τριγωνικός πλευράς 3,0m | Τριγωνικός πλευράς 2,50m |
| Διάμετρος Χ/Π $d_w$ (m)                                 | 0,70 (*)                | 0,70 (*)                 |
| Διάμετρος ζώνης διατάραξης $d_r=1,35d_w$ (m)            | 0,945 (*)               | 0,945 (*)                |
| Παροχετευτική ικανότητα Χ/Π $q_w$ (m <sup>3</sup> /sec) | $2 \times 10^{-5}$ (*)  | $2 \times 10^{-5}$ (*)   |
| $c_v \times 10^{-8}$ (m <sup>2</sup> /s)                | 3 (*)                   | 3 (*)/5/6/10             |
| Λόγος $c_h/c_v$   | 2 (*)                   | 2 (*)/3/4                |
| Λόγος $k_h/k_v$   | 2 (*)                   | 2 (*)/3/4                |
| $C_{ec}$  | 0,20 (**)               | 0,10 (**)                |

(\*) Αντιστοιχούν στις παραδοχές της μελέτης

(\*\*) Τιμές που προέκυψαν από την ανάστροφη ανάλυση

Προκειμένου να συμπληρωθούν οι καμπύλες χρονικής εξέλιξης των καθιζήσεων σε βάθος χρόνου και να συγκριθούν με τις μετρηθείσες, λήφθηκαν υπόψη οι καθιζήσεις που προκύπτουν από δευτερογενή συμπίεση, οι οποίες υπολογίστηκαν από την παρακάτω σχέση:

$$S_s = C_\alpha \cdot H \cdot \log \frac{t}{t_p} \quad (3)$$

όπου:

$C_\alpha$ : ρυθμός δευτερογενούς συμπίεσης,  $\left( \frac{\Delta H / H}{\Delta \log t} \right)$

H: πάχος του στρώματος [1]

$t_p$ : χρόνος έναρξης δευτερογενούς καθιζήσης

$\Delta H$ : μείωση πάχους στρώματος [1] λόγω δευτερογενούς συμπίεσης.

Λόγω της ιδιαίτερα μεγάλης διάρκειας της προφόρτισης (62 μήνες) δόθηκε η ευκαιρία να εκτιμηθούν τα  $C_\alpha$  και  $t_p$  από τις καμπύλες των μετρήσεων για κάθε δείκτη χωριστά με τη βοήθεια του Σχήματος 3. Στον Πίνακα 3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εκτιμηθείσες τιμές.

Πίνακας 3. Παράμετροι Δευτερογενούς Συμπίεσης

Table 3. Secondary Compression Parameters

| Δείκτης | $C_\alpha$ | $t_p$ (μέρες) |
|---------|------------|---------------|
| S030    | 0,029      | 810           |
| S031    | 0,021      | 720           |
| S032    | 0,019      | 700           |
| S120    | 0,010      | 200           |

Στα Σχήματα 4 και 5 συγκρίνονται οι πραγματικές καμπύλες καθιζήσεων συναρτήσει του λογαρίθμου του χρόνου με τις προκύπτουσες υπολογιστικές με τις προαναφερθείσες παραδοχές.

Από το Σχήμα 4 προκύπτει ότι οι θεωρητικές καμπύλες των δεικτών S030, S031 και S032 προσέγγισαν ικανοποιητικά αυτές των μετρήσεων (δηλ. θεωρούνται επιτυχείς οι παραδοχές της μελέτης).

Αντίθετα, στην περίπτωση του δείκτη S120 αποδείχθηκε ότι οι πραγματικές καθιζήσεις είχαν εξελιχθεί ταχύτερα από τα αναμενόμενα στη μελέτη και ότι η καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών μετρήσεων επιτυγχάνετο με το συνδυασμό των παραμέτρων  $c_v = 5 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s,  $c_h/c_v = 3$  και  $C_{ec} = 0,10$  (βλ. Σχήμα 5).

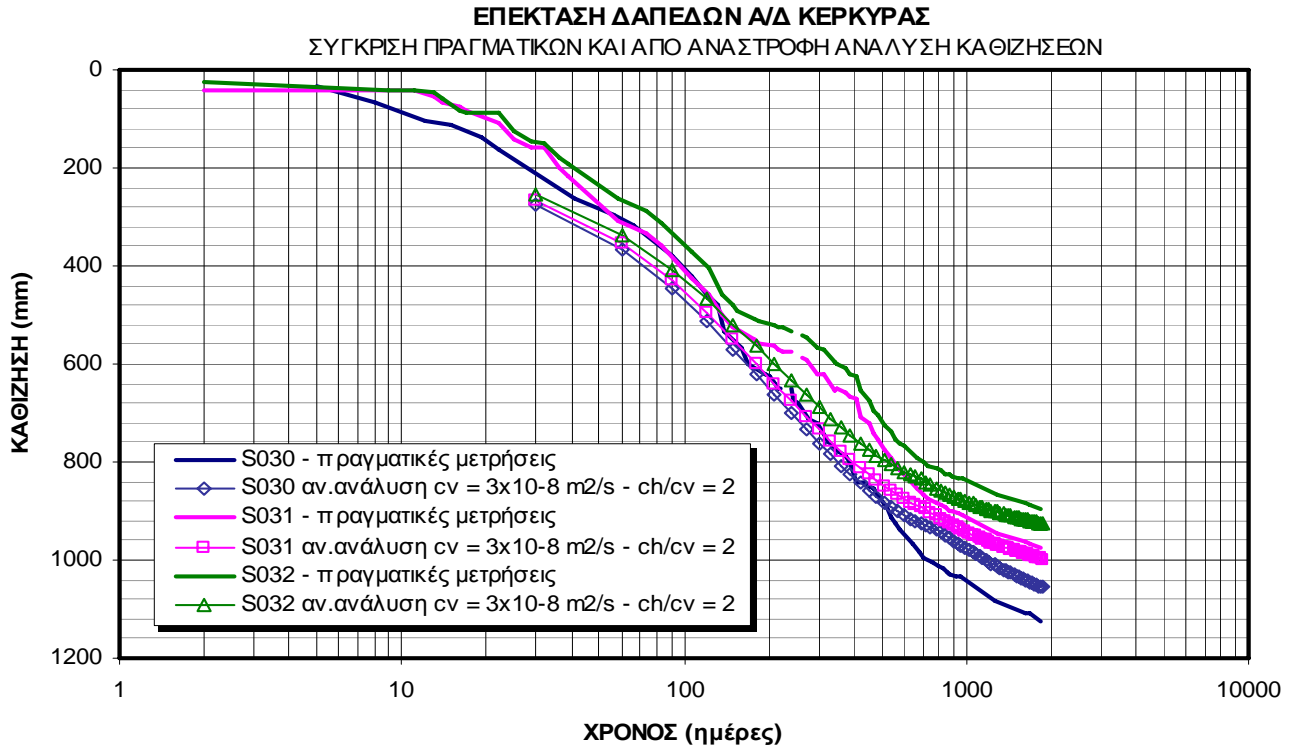
Τέλος, λαμβάνοντας τη μέση τιμή του δείκτη πρωτογενούς στερεοποίησης  $C_c$  από τις εργαστηριακές δοκιμές και τις τιμές του ρυθμού δευτερογενούς συμπίεσης  $C_\alpha$ , όπως αυτές εκτιμήθηκαν από τις καμπύλες των επί τόπου μετρήσεων, έγινε εκτίμηση του λόγου  $C_\alpha/C_c$ , όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 4. Στον Πίνακα αυτό δεν παρουσιάζεται η περιοχή του δείκτη S120 λόγω του ότι δεν υπήρχαν επαρκή εργαστηρικά στοιχεία.

Πίνακας 4. Λόγος  $C_\alpha/C_c$

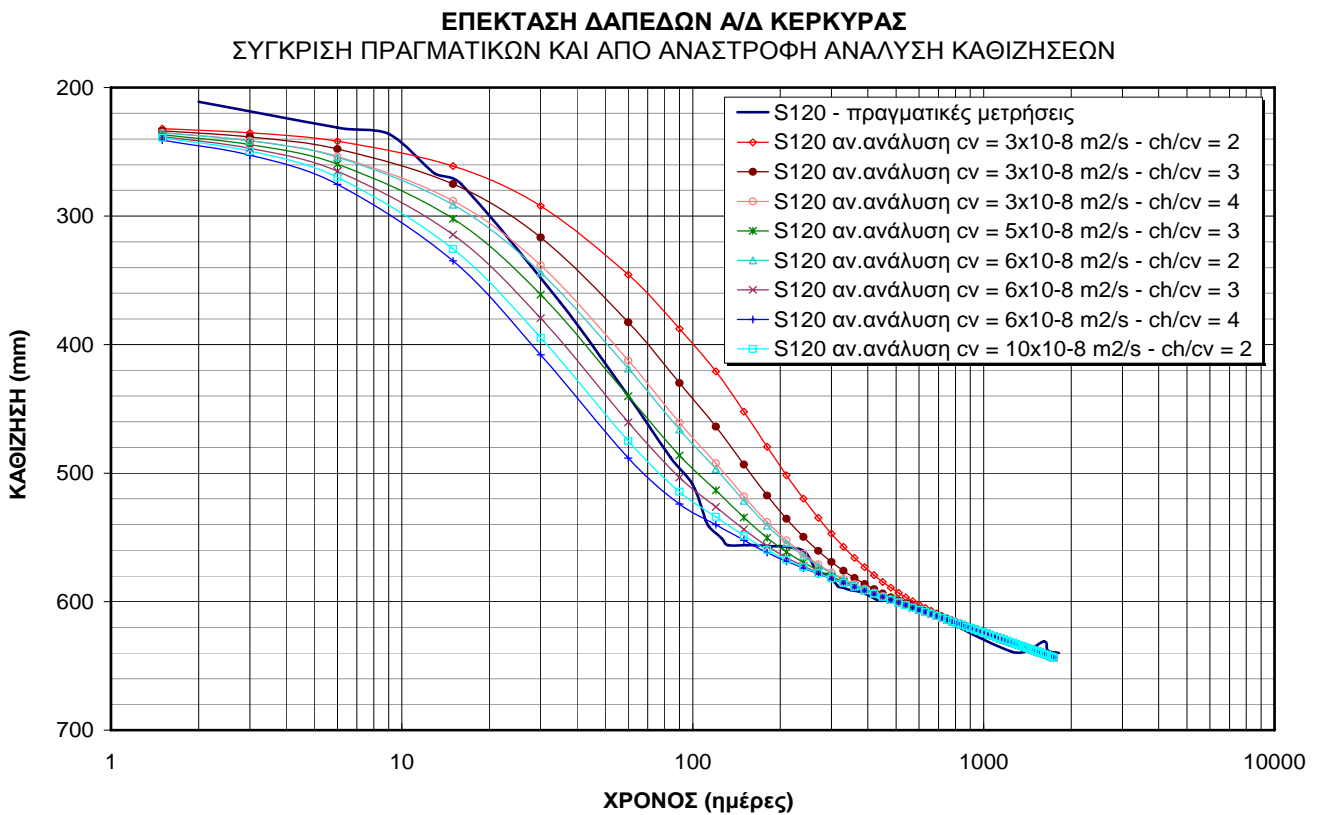
Table 4.  $C_\alpha/C_c$  Ratio

| Δείκτης | $C_\alpha$ | $C_c$ | $C_\alpha/C_c$ |
|---------|------------|-------|----------------|
| S30     | 0,029      | 0,579 | 0,050          |
| S31     | 0,021      | 0,579 | 0,036          |
| S32     | 0,019      | 0,579 | 0,033          |

Βιβλιογραφικά ο λόγος  $C_\alpha/C_c$  για κανονικά στερεοποιημένες, πλαστικές αργίλους κυμαίνεται εντός σχετικά στενών ορίων, τα οποία σύμφωνα με τους Mesri and Castro (1987) είναι  $C_\alpha/C_c = 0,05 \pm 0,01$ . Όπως προκύπτει από τον παραπάνω Πίνακα 4, οι προκύπτουσες τιμές του λόγου  $C_\alpha/C_c$ , βάσει μακροχρόνιων μετρήσεων πεδίου, εμπίπτουν γενικά εντός των ορίων αυτών.



Σχήμα 4. Δείκτες καθίζησης S030, S031, S032 (τροχόδρομος D)  
Figure 4. Settlement monitoring points S030, S031, S032 (taxiway D).



Σχήμα 5. Δείκτης καθίζησης S120 (δοκιμαστικό επίχωμα)  
Figure 5. Settlement monitoring point S120 (trial embankment).

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από μακροχρόνιες (διάρκειας 5 ετών) συστηματικές μετρήσεις καθιζήσεων σε δύο επιχώματα προφόρτισης, σε κανονικά στερεοποιημένα άργιλο υψηλής πλαστικότητας, επιταχυνόμενης με Χ/Π σε διάφορους καννάβους, προέκυψαν τα εξής:

- Διαπιστώθηκε ότι ο λόγος  $C_{\alpha}/C_c$  κυμάνθηκε μεταξύ  $0,033 \pm 0,050$ , που είναι εντός των διδόμενων στη βιβλιογραφία ορίων  $C_{\alpha}/C_c = 0,05 \pm 0,01$ , (Mesri and Castro, 1987) για πλαστικές κανονικά στερεοποιημένες αργίλους.
- Σε πλαστικές, κανονικά στερεοποιημένες αργίλους δε θα πρέπει να υποτιμάται η συμβολή της δευτερογενούς συμπίεσης στις μακροχρόνιες καθιζήσεις, η οποία δεν μπορεί να επιταχυνθεί με τη χρήση στραγγιστηρίων, σε αντίθεση με τις καθιζήσεις από πρωτογενή στερεοποίηση. Ελλείψει εργαστηριακών στοιχείων το  $C_{\alpha}$  μπορεί να εκτιμάται προσεγγιστικά από το λόγο  $C_{\alpha}/C_c$ , ο οποίος βιβλιογραφικά κυμαίνεται μεταξύ:  
Ανόργανες κανονικά στερεοποιημένες αργίλοι:  
Γενικά:  $C_{\alpha}/C_c = 0,04 \pm 0,01$  (Mesri and Castro, 1987)  
Ελληνικές αργίλοι:  $C_{\alpha}/C_c = 0,02 \pm 0,01$  (Πλατής κ.ά., 2006)  
Πλαστικές κανονικά στερεοποιημένες αργίλοι:  
Γενικά:  $C_{\alpha}/C_c = 0,05 \pm 0,01$  (Mesri and Castro, 1987)
- Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι καθιζήσεις από δευτερογενή συμπίεση μέσω προφόρτισης, θα πρέπει η προφόρτιση να ξεπερνά (ει δυνατόν τουλάχιστον κατά 50%) τα λειτουργικά φορτία του έργου (να γίνεται δηλαδή υπερφόρτιση).
- Στις περιπτώσεις βελτίωσης του εδάφους με προφόρτιση επιταχυνόμενη με στραγγιστήρια, ιδιαίτερα σε μεγάλης έκτασης έργα, σκόπιμο είναι να προβλέπεται η κατασκευή δοκιμαστικού επιχώματος με διάφορους καννάβους στραγγιστηρίων, προκειμένου να διαπιστωθεί εγκαίρως η αποτελεσματικότητα των στραγγιστηρίων και να προγραμματιστεί ορθολογικά το ύψος της προφόρτισης και ο τελικός κάρναβος των στραγγιστηρίων, ανάλογα και με το διαθέσιμο χρόνο προφόρτισης.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barron, R. A. (1948), "Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells", Transactions ASCE 113.
- Carrillo, N. (1942), "Simple Two- and Three-Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils", Journal of Mathematics and Physics 1942, 21:1-5.
- ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. (1999), "Νότια Επέκταση Δαπέδου Στάθμευσης Αεροσκαφών Κρατικού Αεροδρομίου Κέρκυρας «Καποδίστριας» - Γεωτεχνική Έρευνα", Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε. - Ε.Υ.Δ.Ε. Αεροδρομίων Νοτίου Ελλάδος.
- ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. (2002), "Νότια Επέκταση Δαπέδου Στάθμευσης Αεροσκαφών Κρατικού Αεροδρομίου Κέρκυρας «Καποδίστριας» - Μελέτη Εφαρμογής Τροποποιημένης Λύσης", Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε. - Ε.Υ.Δ.Ε. Αεροδρομίων Νοτίου Ελλάδος.
- Hansbo, S. (1981), "Consolidation of Fine Grained Soils by Prefabricated Drains", 10th International Conference SMFE, Stockholm.
- Mesri, G. and Castro, A. (1987), " $C_{\alpha}/C_c$  Concept and  $K_{\alpha}$  during Secondary Compression", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 3, pp. 230-247.
- Padfield, C. J. and Sharrock, M. J. (1983), "Settlement of structures on clay soils", CIRIA Spec. Pub. No 27.
- Πλατής, Α. Δ., Παγουλάτου, Μ. Ν., Ανδρεάδης Γ. Ι. και Ζαβιτσάνος Ν. Α. (2006), "Συσχέτιση του Δείκτη Δευτερογενούς Συμπίεσης ( $C_{\alpha}$ ) με το Λόγο Υπερφόρτισης του Εδάφους", 5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, Τόμος 1, σελ. 215-222.
- Priebe, H. J. (1995), "The Design of Vibro Replacement", Ground Engineering, December 1995.