ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ



ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

& ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ

ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΡΙΜΠΕΝΗ ΛΗΔΑ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ν.ΓΕΡΟΛΥΜΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ & ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ

-ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ-

.....

Λήδα Α. Κριμπένη

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π

Copyright © Λήδα Α. Κριμπένη, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για μη κερδοσκοπικό σκοπό συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

-Σελ-

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	9
1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΒΑΘΙΕΣ ΕΚΣΚΑΦΕΣ	.1
1.3 ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΑ	.19

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:</u>

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΡΓΟ	25
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΠΟΥ ΕΠΛΕΧΘΗΚΕ	25
2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ	26
2.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	29
2.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟ ΠΑΡΟΝ ΕΡΓΟ	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

3.1	HARDENING SOIL MODEL –ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	42
3.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ HARDENING SOIL MODEL (ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ)	.43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ	48
4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ	52
4.2.1 ΑΡΧΙΚΗ ΕΞΙΔΑΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	52
4.2.2 ΠΡΩΤΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ	60
4.2.3 ΔΕΥΤΕΡΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

5.1	HARDENING SOIL SMALL MODEL	80
5.2	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

6.1	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ HARDENING SOIL	92
6.2	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ HS SMALL	93
6.2	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	93

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....94

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

	00
ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟΥ /	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2:	
ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	
ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΜΗ	104
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3:	
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ PLAXIS 3D	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΕΡΓΟΥ	110

ŀ

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το πέρας των πενταετών σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το θέμα της είναι η αντίστροφη ανάλυση εκσκαφής και προσωρινής αντιστήριξης υπόγειου χώρου στάθμευσης αυτοκινήτων που κατασκευάστηκαν στην περιοχή της Πλατείας Πλατάνου, Δήμου Κηφισιάς τον Αύγουστο του 2013.

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή του Τομέα Γεωτεχνικής Μηχανικής και επιβλέποντα της εργασίας, κ. Ν. Γερόλυμο, για την πολύτιμη βοήθεια και συνεχή καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της. Η επιστημονική αρωγή του αλλά και η εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, συντέλεσαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ακόμη, πολλές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στον πολιτικό μηχανικό – Εδαφομηχανικό, κ. Χ. Λάμαρη, στου οποίου το γραφείο εργάστηκα στο πλαίσιο της Πρακτικής Άσκησης, για την απλόχερη παροχή όλων των απαραίτητων στοιχείων και δεδομένων για την παρούσα εργασία, χωρίς τα οποία δεν θα ήταν δυνατή η υλοποίηση της.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει θέμα την αντίστροφη ανάλυση εκσκαφής και προσωρινής αντιστήριξης υπόγειου χώρου στάθμευσης στην περιοχή της Πλατείας Πλατάνου, Δήμου Κηφισιάς τον Αύγουστο του 2013.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν το μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας που διέπει την επιστήμη της Γεωτεχνικής Μηχανικής, η παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε στα απολύτως αντικειμενικά δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας που διενεργήθηκε για το έργο. Για την ανάλυση του προβλήματος, αναπτύχθηκαν προσομοιώματα Π.Σ. με χρήση του προγράμματος Plaxis 2D. Εφαρμόστηκε «θαμιστική» μέθοδος ελέγχου της απόκρισης και επαναπροσδιορισμού των εδαφικών παραμέτρων, με στόχο το συνταίριασμα των υπολογιζόμενων σε κάθε επανάληψη μετακινήσεων με τις αντίστοιχες μετρηθείσες από το κλισιόμετρο.

Ως παράμετροι βελτιστοποίησης επιλέχθηκαν: (1) ο καταστατικός νόμος εδαφικής συμπεριφοράς (Hardening Soil Model και Hardening Soil Small Model), (2) τα μέτρα δυστμησίας και παραμορφωσιμότητας του εδάφους, (3) η στρωματογραφία και (4) οι κινηματικοί περιορισμοί στην σύνδεση των πασσάλων με τον κεφαλόδεσμο.

The topic of this diploma thesis is the reverse analysis of the deep excavation and the temporary retaining methods that were used for the construction of an underground car park at Platanos Square, in the area of Kifisia (Athens) in August 2013.

Taking into consideration the high level of subjectivity underlying at the science of Geotechnical Engineering, this thesis was based on the completely objective data of the geotechnical research which was conducted for the project. In order to approach the problem, models of finite elements were developed using the program Plaxis 2D. The soil parameters were estimated by "trial and error" method, in order to get a satisfactory matching between the curves measured by the inclinometers and those calculated with Plaxis 2D.

The optimization parameters of the analysis were the following: (1) the constitutive law of soil behaviour (Hardening Soil Model and Hardening Soil Small Model), (2) the modulus of stiffness and deformation of the soil (3) the stratigraphy of the area of study and (4) the kinematic constraints concerning the connection of the piles with the headband.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση της βαθιάς εκσκαφής και της μεθόδου αντιστήριξης πρανών που υλοποιήθηκαν επί των οδών Ανδριανού & Κόκοτα (πλατεία Πλατάνου) στο Δήμο Κηφισιάς. Στο υπό μελέτη οικόπεδο κατασκευάστηκε νέος υπόγειος σταθμός αυτοκινήτων, με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο οποίος αποτελείται από έξι (6) υπόγεια. Τα έργα εκσκαφών και αντιστηρίξεως των πρανών ολοκληρώθηκαν τον Αύγουστο του 2013.

Για την μελέτη στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα απολύτως αντικειμενικά δεδομένα, δηλαδή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τοίχου αντιστήριξης, τη μηχανική συμπεριφορά των δομητικών υλικών (πάσσαλοι, αγκύρια), τη στρωματογραφία, τη Στάθμη του Υδροφόρου Ορίζοντα και τέλος τις μετρήσεις από το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης (κλισιόμετρα).

Από το υπό μελέτη έργο επιλέχθηκε η <u>ανατολική πλευρά</u> η οποία προσομοιάστηκε αρχικά στο πρόγραμμα Π.Σ. Plaxis 2D 7.2 με χρήση καταστατικού νόμου Hardening Soil, ενώ στη συνέχεια στο πρόγραμμα Plaxis 2D 8.6 με χρήση καταστατικού νόμου Hardening Soil Small. Ο λόγος που επιλέξαμε αυτή την πλευρά είναι η μεγάλη ευαισθησία της σε οποιαδήποτε μετακίνηση λόγω ύπαρξης του κτιρίου τράπεζας σε πολύ κοντινή απόσταση

Ως κύριος στόχος της εργασίας ορίστηκε το συνταίριασμα των καμπυλών οριζόντιων μετακινήσεων –βάθους που έδωσε το Κλισιόμετρο 7 (KL-7) (Σχήμα 1) με τις προκύπτουσες από την ανάλυση με Π.Σ.





1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΒΑΘΙΕΣ ΕΚΣΚΑΦΕΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΕΙΣ

Πριν την παρουσίαση της διαδικασίας διερεύνησης που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θεωρήθηκε σκόπιμη η παράθεση γενικών στοιχείων για τις βαθιές εκσκαφές και για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης αντιστήριξης σε κάθε περίπτωση.

Γενικά, βαθιά εκσκαφή θεωρείται η εκσκαφή που ξεπερνά τα 4.50-5.00 μέτρα. Όπου η ύπαρξη ανυποστήρικτης εκσκαφής είναι αδύνατη, είτε λόγω έλλειψης διαθέσιμου χώρου, είτε λόγω σύστασης εδάφους, είτε λόγω παρουσίας γειτονικών κατασκευών ευαίσθητων στην ανάπτυξη παραμορφώσεων, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός της κατάλληλης Διάταξης Αντιστήριξης Πρανών. Απαραίτητη προϋπόθεση ασφαλούς και ορθολογικού σχεδιασμού αποτελεί η γνώση των γεωτεχνικών συνθηκών της περιοχής που περιβάλει την εκσκαφή, δηλαδή των φυσικών ιδιοτήτων, παραμέτρων διατμητικής αντοχής και συμπιεστότητας του εδάφους (c, γ, φ, Ε). Αυτό επιτυγχάνεται με την εκπόνηση της Γεωτεχνικής Έρευνας-Μελέτης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Βασικό κριτήριο επιλογής της κατάλληλης Διάταξης Αντιστήριξης αποτελούν πέρα από τη σύσταση του εδάφους και την παρουσία υπόγειων υδάτων, η χρονική διάρκεια του ορύγματος καθώς και ο έλεγχος των παραμορφώσεων των όμορων κατασκευών. Απαιτείται επιμελής επίβλεψη των εργασιών και ενόργανη παρακολούθηση της εκσκαφής, προκειμένου να εγγυάται συνεχώς η ασφάλεια του έργου.

Οι αντιστηρίξεις με κριτήριο τη χρονική τους διάρκεια χαρακτηρίζονται ως Προσωρινές και Μόνιμες.

Προσωρινή Αντιστήριξη καλείται η αντιστήριξη η διάρκεια ζωής της οποίας δεν ξεπερνά τα δύο (2) έτη. Πρόκειται για τις συνήθεις αντιστηρίξεις που βλέπουμε στα αστικά περιβάλλοντα για την κατασκευή υπόγειων χώρων στάθμευσης, βάθρων γεφυρών, ανοικτών ορυγμάτων για τη διέλευση αγωγών, μετρό κτλ. Μετά την πάροδο των δύο ετών οι ωθήσεις γαιών αναλαμβάνονται είτε από τον φέροντα οργανισμό της κατασκευής, είτε στην περίπτωση των ανοικτών ορυγμάτων, από τα υλικά επίχωσης.

Μόνιμη Αντιστήριξη καλείται η κατασκευή της οποίας η διάρκεια ζωής ξεπερνά σαφώς τα δύο έτη, ιδανικά ξεπερνά και το χρόνο ζωής του τεχνικού έργου. Μόνιμες

αντιστηρίξεις εφαρμόζονται σε μόνιμα πρανή οδοποιίας, κατολισθήσεις, κατασκευές Εκσκαφής-Επανεπίχωσης (cut&cover), σε λιμενικά έργα και σε περιπτώσεις όπου δεν είναι επιθυμητή η παραλαβή εδαφικών στατικών και σεισμικών ωθήσεων από τον φέροντα οργανισμό του νέου κτιρίου.

Οι αντιστηρίξεις με κριτήριο τη σύσταση του εδάφους και την παρουσία (ή μη) υπόγειων υδάτων χαρακτηρίζονται ως Μη στεγανές και Στεγανές.

Μη στεγανές καλούνται οι αντιστηρίξεις οι οποίες δεν αποτελούν φράγμα για το νερό και επιτρέπουν τη ροή εντός της εκσκαφής. Συνηθέστερος τύπος είναι ο **τοίχος Βερολίνου** (Berlin Wall) που αποτελείται από τοίχωμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος εδρασμένο σε κατακόρυφους πασσάλους (soldier-piles), η εγκατάσταση των οποίων πραγματοποιείται προ της εκσκαφής με τη διάνοιξη οπών κατάλληλης διαμέτρου κατά μήκος των υπό αντιστήριξη πλευρών. Οι οπές γίνονται σε καθορισμένες οριζόντιες αποστάσεις ΔL ώστε να είναι εφικτή η θολωτή λειτουργία του εδάφους και η εδαφική ώθηση να μεταφέρεται πρακτικά στους πασσάλους. Οι πάσσαλοι μπορεί να είναι σύνθετες διατομές τύπου 2UPN180-2UPN32, όταν ο χώρος είναι περιορισμένος μικροπάσσαλοι ΗΕΒ140-ΗΕΒ180, ή όταν ο χώρος δεν αποτελεί πρόβλημα φρεατοπάσσαλοι συνήθως Φ800mm. Η ευστάθεια κάθε πασσάλου εξασφαλίζεται αφ' ενός με κατάλληλο μήκος πάκτωσης d, κάτω από την τελική στάθμη εκσκαφής Η, (Συνολικό μήκος πασσάλου =H+d) αφ' ετέρου με την εγκατάσταση μίας ή περισσότερων σειρών αγκυρίων (tie-back) σε επιλεγμένα βάθη από την επιφάνεια του εδάφους. Ο τοίχος Βερολίνου εφαρμόζεται σε εδαφικούς σχηματισμούς μέτριας ως ικανοποιητικής αντοχής, ενώ η παρουσία τοπικού υπόγειου υδροφορέα δεν αποτελεί πρόβλημα. Στην Ελλάδα η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί για βάθη εκσκαφής ως και 35 m.

Στεγανές αντιστηρίξεις καλούνται οι οποίες χρησιμοποιούνται σε παραποτάμιες, παραλίμνιες ή παραθαλάσσιες περιοχές, στις οποίες ο συνδυασμός μαλακών εδαφικών σχηματισμών και υψηλού υδροφόρου ορίζοντα καθιστούν ακόμα και εκσκαφές μικρού βάθους δύσκολες. Τα προβλήματα που προκύπτουν αφορούν στην ανάπτυξη σημαντικών παραμορφώσεων πέριξ του σκάμματος λόγω εδαφορροής, αλλά και στη διαχείριση των υδάτων εντός της εκσκαφής. Επιγραμματικά αναφέρεται ότι οι συνηθέστερες μέθοδοι στεγανών αντιστηρίξεων είναι οι αλληλοτεμνόμενοι

πάσσαλοι, τα διαφράγματα με υδραυλική ή μηχανική αρπαγή και σε σκληρό έδαφος ή βράχο, τα διαφράγματα με τη χρήση φρέζας.

Για εκσκαφές μεγαλύτερες των 6.00-7.00m και σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση όπου ο έλεγχος των παραμορφώσεων είναι κρίσιμος, ο συνηθέστερος τρόπος ελέγχου των παραμορφώσεων είναι η χρήση μίας ή πολλαπλών σειρών προεντεταμένων αγκυρίων. Τα προεντεταμένα αγκύρια, προσωρινά ή μόνιμα, αποτελούν το κρισιμότερο κομμάτι της κατασκευής. Δεν θα αποτελούσε υπερβολή να ειπωθεί ότι στην πλειοψηφία των περιστατικών κατάρρευσης σε διάταξη αντιστήριξης αυτή αποδόθηκε σε πλημμελή σχεδιασμό ή κατασκευή των αγκυρίων. Οι στάθμες κατασκευής των αγκυρίων καθορίζονται με βάση το βάθος θεμελίωσης των παρακείμενων κτιρίων, το βάθος έδρασης των αγωγών ύδρευσης και αποχέτευσης και την απλοποίηση των φάσεων της εκσκαφής. Η συνήθης κλίση είναι 10°-15° από την οριζόντιο.

Η ενόργανη παρακολούθηση (monitoring) κρίνεται απαραίτητη σε εκσκαφές σημαντικού βάθους (συνήθως μεγαλύτερου 8.00-10.00m), διότι παρέχει την δυνατότητα προσαρμογής – τροποποίησης της μελέτης για τυχόν νέα δεδομένα της εκσκαφής. Συνήθως χρησιμοποιούνται μάρτυρες ηλεκτρικού κλισίμετρου υψηλής ακρίβειας (Tilt meters) σε επιλεγμένες θέσεις στους φέροντες οργανισμούς κάθε όμορης οικοδομής. Ακόμα, εγκαθίστανται αποκλισιομετρικοί σωλήνες σε κατάλληλες θέσεις της αντιστήριξης ενώ προτείνεται και η τοποθέτηση στόχων (ανακλαστήρων 3D optical) στα κτίρια και τοπογραφικών καρφιών στους δρόμους ώστε με όργανο υψηλής ακρίβειας (laser) να ελέγχονται οι παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα, σε μόνιμες αντιστηρίξεις ή προσωρινές αντιστηρίξεις μεγάλου βάθους ή μεγάλης διάρκειας, εγκαθίστανται αγκύρια κυψέλες μέτρησης φορτίου. Απαραίτητα πριν την εκσκαφή πρέπει να γίνουν επαρκείς αρχικές (μηδενικές) μετρήσεις.

Επισημαίνεται ακόμα ότι για την αποφυγή προβλημάτων λόγω πιθανών διαφοροποιήσεων των εδαφικών ιδιοτήτων κατά τις διάφορες περιοχές εργασίας απαιτείται η συνεχής και επιμελής επίβλεψη των εργασιών ώστε να επαληθεύεται η εικόνα που σχηματίστηκε στη γεωτεχνική έρευνα ή να τροποποιείται αναλόγως με τη λήψη απαραίτητων μέτρων.

1.2.1 ΑΣΤΟΧΙΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΒΑΘΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 7, πιθανή αστοχία της αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής μπορεί να οφείλεται είτε σε αστοχία του εδάφους είτε των δομικών στοιχείων της αντιστήριξης.

Στα παρακάτω σκαριφήματα παρατίθενται σχηματικά οι κυριότεροι τύποι αστοχίας και για τις δύο περιπτώσεις:

Α. ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ (GEO)

1. Αστοχία κατά μήκος κυλινδρικής επιφάνειας της μάζας εδάφους στην οποία ο τοίχος είναι πακτωμένος.



2. Περιστροφή γύρω από τη στήριξη / αγκύριο.



3. Αστοχία λόγω περιστροφής του τοίχου περί τον πόδα του (πρόβολος).



Β. ΑΣΤΟΧΙΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (STR)

1. Αιφνίδια αστοχία της στήριξης/ αγκυρίου ή περιορισμένη υποχώρηση αγκυρίου.



2. Αστοχία του τοίχου όσον αφορά στις καμπτικές ροπές.



(<u>Σχήμα 6</u>)

Ο ακριβής προσδιορισμός των εδαφικών ωθήσεων είναι θεμελιώδους σημασίας για τον σωστό σχεδιασμό της αντιστήριξης της βαθιάς εκσκαφής.

Στη συνέχεια παρατίθενται σχηματικά οι κλασσικές μέθοδοι ανάλυσης για τον προσδιορισμό των εδαφικών ωθήσεων.

1. ΙΔΕΑΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΑΠΟ ΩΘΗΣΕΙΣ ΓΑΙΩΝ



2. ΣΥΝΗΘΕΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ



(<u>Σχήμα 8</u>)

3. ΑΝΑΔΙΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΩΘΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΕΥΚΑΜΨΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΤΑΣΜΑΤΟΣ



(<u>Σχήμα 9α, 9β</u>)

Ακόμα, οι Terzaghi - Peck έχουν καταστρώσει τα συμβατικά διαγράμματα ωθήσεων για υπολογισμό φορτίου πολλαπλών αγκυρώσεων για την περίπτωση άμμου, μαλακής έως μέσης αργίλου και στιφρής αργίλου.



Παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα:

1.3 ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΑ (inclinometers)

<u>1.3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</u>

Τα κλισιόμετρα είναι όργανα μέτρησης εγκάρσιας μετατόπισης με τη βοήθεια ανιχνευτή ο οποίος προωθείται μέσα σε κατακόρυφο σωλήνα. Ο ανιχνευτής αποτελείται από έναν αισθητήρα βαρύτητας, όπως ο επιταχυνσιογράφος τύπου βαρύτητας (force balance accelerometer). Η τάση του εξερχόμενου ρεύματος στον ανιχνευτή μεταβάλλεται ανάλογα με την κλίση του αισθητήρα από την κατακόρυφο. Η κλίση από την κατακόρυφο μετατρέπεται τριγωνομετρικά σε απόσταση από την κατακόρυφο για συγκεκριμένο μήκος. Ο σωλήνας διέλευσης του ανιχνευτή εγκαθίσταται σε γεώτρηση ή σε επίχωμα σε κατακόρυφη θέση ώστε το κλισιόμετρο να μετρά την οριζόντια μετακίνηση του υπεδάφους.

Το κλισιόμετρο αποτελείται από:

1. Σύστημα Σωλήνωσης από πλαστικό, αλουμίνιο, ινώδες γυαλί ή χάλυβα. Για την μέτρηση οριζόντιας μετακίνησης τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση. Κατά μήκος της σωλήνωσης υπάρχουν ειδικές τροχιές στις οποίες κινείται ο ανιχνευτής σε προκαθορισμένες θέσεις.

2. Κινητό ανιχνευτή με αισθητήρα βαρύτητας ή άλλου τύπου αισθητήρα.

3. Ηλεκτρικό κύκλωμα για ενεργοποίηση του οργάνου και μέτρηση της τάσης εξόδου.

4. Καλώδιο με κωδικό αριθμό το οποίο συνδέει το ηλεκτρικό κύκλωμα με τον ανιχνευτή.

Τα κλισιόμετρα βρίσκουν εφαρμογή αρχικά σε επί τόπου έρευνα για μέτρηση μετακίνησης και επομένως έλεγχο ευστάθειας. Ακόμα, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των παραδοχών σχεδιασμού αφού επιτρέπουν την καταγραφή πραγματικών μετακινήσεων και τη σύγκριση τους με τις τιμές που υπολογίσθηκαν στη φάση σχεδιασμού. Τέλος, κυρίως μόνιμα τοποθετημένα κλισιόμετρα βρίσκουν σημαντική εφαρμογή για τον έλεγχο ασφάλειας αφού προειδοποιούν για καταστροφικές αστοχίες.

1.3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΩΝ

Αρχικά εγκαθίσταται ένας σωλήνας «οδηγός» σε όσο το δυνατόν κατακόρυφη θέση (ή σε οριζόντια σε περίπτωση μέτρησης καθίζησης επιχωμάτων, δεξαμενών κ.ά. σε μαλακά εδάφη). Στη συνέχεια ο ανιχνευτής οδηγείται στο κάτω άκρο του σωλήνα και καταγράφεται η αρχική κλίση. Στη συνέχεια μετρήσεις καταγράφονται σε διάφορα σημεία κατά μήκος του σωλήνα και προσδιορίζεται η ακριβής αρχική θέση. Η μετακίνηση του εδάφους προκαλεί μετακίνηση του σωλήνα από την αρχική θέση. Οι αρχικές μετρήσεις συγκρίνονται με τις επόμενες στις ίδιες θέσεις σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα και προκύπτει έτσι το μέγεθος της μετακίνησης στα διάφορα βάθη.

Η σωλήνωση είναι ειδικά κατασκευασμένη με ραβδώσεις και εξασφαλίζει τις ακόλουθες λειτουργίες:

1. Αποτελεί τον χώρο διέλευσης του ανιχνευτή για την καταγραφή μετρήσεων σε διάφορα βάθη.

 Παραμορφώνεται μαζί με το περιβάλλον έδαφος (ή κατασκευή) ώστε τελικά η αλλαγή κλίσης της σωλήνωσης να δείχνει την μετακίνηση του εδάφους.

3. Οι εσωτερικές ραβδώσεις ελέγχουν τον προσανατολισμό του ανιχνευτή κατά τη μετακίνηση του πάνω σε αυτές.

Η σωλήνωση εγκαθίσταται κυρίως σε κατακόρυφη θέση και περνά από τις εδαφικές στρώσεις όπου είναι πιθανή η μετακίνηση. Επίσης τοποθετείται σε επιχώματα, εντοιχίζεται σε σκυρόδεμα ή προσκολλάται σε κατασκευές.

Ο ανιχνευτής έχει προσαρμοσμένους τροχούς οι οποίοι κινούνται πάνω στις ραβδώσεις. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση ειδικών επιταχυνσιογράφων των οποίων η τάση του ρεύματος εξόδου είναι ανάλογη της κλίσης τους.

Το συχνότερα απαντώμενο κλισιόμετρο είναι το διαξονικό. Αποτελείται από δύο επιταχυνσιογράφους τοποθετημένους ο ένας κάτω από τον άλλον σε δύο επίπεδα κάθετα μεταξύ τους. Το ένα είναι αυτό που προσδιορίζει το σύστημα των τροχών. Το εύρος μέτρησης της κλίσης είναι <u>+</u>30° και η ακρίβεια του οργάνου 1-13mm ανά 30 μέτρα. Οι πιθανότερες πηγές λάθους στις μετρήσεις είναι οι εξής:

βαθμονόμηση: είναι η σχέση μεταξύ του μετρούμενου μεγέθους και της τάσης
 εξόδου του οργάνου. Προσδιορίζει την κλίση της εξίσωσης βαθμονόμησης.

 μηδενική απόκλιση: είναι η τιμή της τάσης εξόδου όταν το όργανο βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση.

 περιστροφή του αζιμούθιου άξονα: το λάθος προέρχεται από τη διαφορά μεταξύ του επιπέδου του άξονα του οργάνου και του επιπέδου που προσδιορίζουν οι τροχοί που είναι προσηρτημένοι στον ανιχνευτή.

Για την δημιουργία ηλεκτρικής ένωσης χρησιμοποιείται καλώδιο για τον έλεγχο του βάθους του ανιχνευτή. Η ηλεκτρική ένωση ενεργοποιεί το όργανο μέτρησης της κλίσης και μεταφέρει το ρεύμα εξόδου στη μονάδα μέτρησης. Το καλώδιο είναι βαθμονομημένο ανά 0,50m.

Η μονάδα μέτρησης συνήθως αποτελείται από μία απλή οθόνη ή σύστημα καταγραφής με μνήμη και επεξεργασία των μετρήσεων για συνεχή παρακολούθηση των μετακινήσεων. Η δεύτερη περίπτωση απαντάται κυρίως σε μόνιμα εγκατεστημένα κλισιόμετρα όπου η μονάδα μέτρησης δύναται να θέσει σε λειτουργία σύστημα συναγερμού όταν ανιχνευθεί αλλαγή στο ρυθμό μεταβολής της μετακίνησης πέρα από ένα καθορισμένο όριο.

<u>1.3.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</u>

Ο ανιχνευτής χρησιμοποιείται για μετρήσεις σε όλο το μήκος του σωλήνα ανά μισό μέτρο ή ανά 1 μέτρο στην περίπτωση μόνιμα εγκατεστημένων οργάνων. Σε κάθε περίπτωση η κλίση συνδέεται με το αντίστοιχο βάθος. Η καταγραφή γίνεται σε κάθε βάθος μετά από αναμονή 10 λεπτών για σταθεροποίηση της ένδειξης του οργάνου. Θερμοκρασιακές μεταβολές είναι δυνατόν να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Όταν οι μετρήσεις γίνονται με τη βοήθεια περίπτου κατακόρυφων σωληνώσεων, οι μετρήσεις σε διάφορα σημεία ενός κατακόρυφου επιπέδου γίνονται με τον ανιχνευτή στη μία κατεύθυνση και στη συνέχεια στα ίδια σημεία μετά από περιστροφή του ανιχνευτή *κατά 180*°. Το άθροισμα των μετρήσεων πριν και μετρήσεις έχουν αντίθετο πρόσημο. Πρακτικά, προκύπτει μη μηδενικό άθροισμα λόγω διαφορών στη θέση των καταγραφών για θεωρητικά ίδιο βάθος, λόγω της μηδενικής απόκλισης του οργάνου

μέτρησης κλίσης κ.ά. Ο έλεγχος του αθροίσματος πρέπει να γίνεται επί τόπου και αποτελεί τρόπο ελέγχου της πιστότητας των μετρήσεων.

Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων η κλίση μετατρέπεται τριγωνομετρικά σε πλευρική μετατόπιση. Η μετατόπιση σε κάθε διάστημα καλείται μερική απόκλιση και το άθροισμα των μερικών αποκλίσεων καλείται συνολική απόκλιση. Η μετακίνηση υπολογίζεται με την αφαίρεση της παρούσας μετατόπισης από την αρχική τιμή της μετατόπισης. Η σταδιακή μετατόπιση αναφέρεται σε συγκεκριμένο διάστημα ενώ η συνολική μετακίνηση είναι το άθροισμα των μετακινήσεων των επί μέρους διαστημάτων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορούν να παρουσιασθούν σε διάφορες μορφές διαγραμμάτων όπως διάγραμμα μερικών μεταβολών (για τις τοπικές μετατοπίσεις), συνολικών μεταβολών (για το πεδίο των παραμορφώσεων).



(Σχήμα 13): Τρόπος υπολογισμού πλευρικής μετατόπισης

1.3.4 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

Η διάμετρος σωλήνωσης επηρεάζει τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Μετακίνηση του εδάφους προκαλεί παραμόρφωση της σωλήνωσης και εμποδίζει πιθανώς την διέλευση του ανιχνευτή. Σωλήνες μεγάλης διαμέτρου έχουν την δυνατότητα απορρόφησης μεγάλων εδαφικών μετατοπίσεων και επιτρέπουν τη διέλευση του ανιχνευτή σε μεγάλα βάθη. Συνίσταται η χρήση της μεγαλύτερης δυνατής διαμέτρου που επιτρέπεται από τις διαστάσεις της γεώτρησης. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται σωλήνες από πλαστικό και σπανιότερα από αλουμίνιο (κίνδυνος διάβρωσης). Η εξωτερική διάμετρος είναι της τάξης των 48-

49mm. Ένα σύστημα τροχιών που οριοθετούν δύο κάθετα επίπεδα στο χώρο χαράσσεται σε κάθε σωλήνα. Οι πλαστικοί σωλήνες συνδέονται μεταξύ τους με ειδικά συνδετήρια τμήματα που επιβάλλουν την ευθυγράμμιση των τροχιών των επί μέρους σωλήνων. Οι συνδέσεις πρέπει να στεγνωθούν για αποφυγή πιθανής εισόδου ενέματος στη σωλήνωση. Τέλος, ένα προστατευτικό κάλυπτρο τοποθετείται στην κορυφή των σωλήνων το οποίο επιτρέπει «επίσκεψη» της σωλήνωσης όταν λαμβάνουν χώρα καθιζήσεις.

Η γεώτρηση πρέπει να είναι κατά το δυνατόν κατακόρυφη. Όταν η σωλήνωση παρουσιάζει κλίση ως προς την κατακόρυφο, το όργανο μέτρησης κλίσης δεν λειτουργεί στην πλέον ευαίσθητη περιοχή του εύρους λειτουργίας η οποία συμπίπτει με τη διατήρηση του άξονα του οργάνου στην κατακόρυφο.

Η σωλήνωση τοποθετείται στο έδαφος ώστε το ένα ζεύγος των τροχιών να βρίσκεται στο επίπεδο κατεύθυνσης των αναμενόμενων μετακινήσεων. Αλλαγή της διεύθυνσης της σωλήνωσης μετά την εγκατάσταση οδηγεί σε περιστροφές στη σωλήνωση.

1.3.5 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Η βάση της γεώτρησης θα πρέπει να μην μετατοπίζεται, συνεπώς η γεώτρηση τοποθετείται σε σταθερό έδαφος. Συνήθως εδαφικά δοκίμια λαμβάνονται για να προσδιορισθεί η στρωματογραφία του εδάφους, να προσδιορισθεί έμμεσα το βέλτιστο βάθος γεώτρησης και να διευκολυνθεί η τελική επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Ένεμα πρέπει να χρησιμοποιείται σαν υλικό πλήρωσης της γεώτρησης. Τα χαρακτηριστικά ακαμψίας και αντοχής του ενέματος πρέπει να προσεγγίζουν αυτά του εδάφους. Η διαδικασία εγκατάστασης της σωλήνωσης περιλαμβάνει τη χρήση ενέματος. Η πλήρωση της γεώτρησης με ένεμα έπεται ή προηγείται της τοποθέτησης της σωλήνωσης μέσα στη γεώτρηση. Το ένεμα δημιουργεί συνθήκες άνωσης που απαιτούν την πλήρωση της σωλήνωσης με νερό και πρόσθετο βάρος, ενώ το ένεμα είναι ακόμα σε υγρή κατάσταση, για να διατηρηθεί η σωλήνωση στη γεώτρηση κατά τη διάρκεια της πήξης του ενέματος. Μία πρόσθετη μεταλλική ράβδος μπορεί να τοποθετηθεί στο κάτω άκρο της σωλήνωσης ή μπορεί να προστεθεί ένα εξωτερικό βάρος προκειμένου να επιτευχθεί βαθύτερη γεώτρηση. Στο παρακάτω σχήμα

αναπαρίστανται τα στάδια εγκατάστασης που περιγράφηκαν προηγουμένως και συγκεκριμένα με την τοποθέτηση του σωλήνα διέλευσης να προηγείται της πλήρωσης με ένεμα. Έχει προφανώς προηγηθεί ο καθαρισμός της γεώτρησης και ο καθορισμός του τρόπου πλήρωσης της με ένεμα. Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει την τοποθέτηση προστατευτικού καλύμματος.



(Σχήμα 14): Στάδια εγκατάστασης κλισιομέτρου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται εκτενώς γενικά στοιχεία για το έργο και για το σύστημα αντιστήριξης που επιλέχθηκε. Ακόμα, παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των κλισιομέτρων που τοποθετήθηκαν στην περιοχή.

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΡΓΟ

Η τεχνική έκθεση του έργου περιλάμβανε την μελέτη προσωρινής αντιστήριξης πρανών εκσκαφής μέγιστου βάθους 22.00 m για την κατασκευή νέου υπόγειου σταθμού αυτοκινήτων με έξι (6) υπόγεια.

Το υπό μελέτη οικόπεδο, βρίσκεται επί των οδών Ανδριανού & Κόκοτα στο Δήμο Κηφισιάς. Είναι πολυγωνικού σχήματος εμβαδού 4626 m², και εμφανίζει μέγιστη υψομετρική διαφορά από ΝΔ—>ΒΑ της τάξης των 7.00 m, με τη νοτιοδυτική γωνία να βρίσκεται χαμηλότερα της βορειοανατολικής. Στο υπό μελέτη οικόπεδο επρόκειτο να κατασκευαστεί νέος υπόγειος σταθμός αυτοκινήτων, με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο οποίος αποτελείται από έξι (6) υπόγεια.

Το τελικό δάπεδο εκσκαφής μετρήθηκε περί τα υψόμετρα +264.20 & +263.00. Σύμφωνα με τη δοθείσα γεωτεχνική έρευνα ο Υπόγειος Υδροφόρος Ορίζοντας, Υ.Υ.Ο. βρέθηκε σε υψόμετρο 266 ~ 267 ήτοι 15.00 m ~ 16.00 m από το σημερινό διαμορφωμένο έδαφος.

Το τοπογραφικό διάγραμμα με την αποτύπωση των ομόρων ιδιοκτησιών και ενδεικτικές θέσεις γεωτρήσεων, με βάση τα οποία εκπονήθηκε η μελέτη αντιστήριξης δίνεται στο Παράρτημα 2.

2. 2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΠΟΥ ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΕ

Η σύσταση του υπεδάφους στην θέση του έργου σε συνδυασμό με το βάθος εκσκαφής, την παρουσία γειτονικών και όμορων κατασκευών, τη παρουσία δρόμων μέτριας έως υψηλής κυκλοφορίας ευνοεί την χρήση συστήματος αντιστήριξης του τύπου "Τοίχος Βερολίνου" (Berlin Wall). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το σύστημα αυτό αποτελείται από τοίχωμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος εδρασμένο σε κατακόρυφους φρεατοπάσσαλους οπλισμένου σκυροδέματος διαμέτρου Φ80 cm (Soldier - piles), η εγκατάσταση των οποίων έχει πραγματοποιηθεί προ της

εκσκαφής με την διάνοιξη οπών διαμέτρου 80 cm κατά μήκος των πλευρών του γηπέδου. Οι οπές γίνονται σε καθορισμένες οριζόντιες αποστάσεις ΔL κατά μήκος των αντιστηριζόμενων πλευρών. Η ευστάθεια κάθε πασσάλου εξασφαλίζεται αφ' ενός, με κατάλληλο μήκος πάκτωσης, d, κάτω από την τελική στάθμη εκσκαφής, H, (Συνολικό μήκος πασσάλου = H + d) και αφ' ετέρου, με την εγκατάσταση τεσσάρων (4) έως έξι (6) σειρών προεντεταμένων αγκυρίων (tie - back) σε επιλεγμένα βάθη από την επιφάνεια του εδάφους.

2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

2.3.1 Φρεατοπάσσαλοι Φ80

Οι κατακόρυφοι φρεατοπάσσαλοι διαμέτρου Φ80 cm οπλίστηκαν με κλωβό διαμέτρου Φ70 cm. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ποιότητας C20/25, και ο χάλυβας ποιότητας S500s. Η μάτιση για τα κατακόρυφα σίδερα, όπου χρειάστηκε ήταν 100Φ.

2.3.2 Κεφαλόδεσμος Πασσάλων

Στην στέψη των πασσάλων, πριν την έναρξη των εκσκαφών, κατασκευάστηκε περιμετρική δοκός από οπλισμένο σκυρόδεμα ποιότητας σκυροδέματος C20/25 και σιδήρου S500s. Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος επιβεβαιώθηκε με βάση τις απαιτήσεις του υπάρχοντος Ελληνικού Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος με την λήψη των απαιτούμενων δοκιμίων, και την εκτέλεση δοκιμών σε αναγνωρισμένο εργαστήριο.

2.3.3 Προεντεταμένα Αγκύρια

Η διάτρηση της οπής των αγκυρίων έγινε με κοπτικό 6 ιντσών (150 mm) ώστε η τελική διάμετρος της οπής να είναι της τάξης των 15~16 εκατοστών. Τα αγκύρια που χρησιμοποιήθηκαν μορφώθηκαν από τέσσερις (4) και πέντε (5) χαλύβδινους τένοντες (συρματόσχοινα, κλώνους) προέντασης ποιότητας 1680/1860 N/mm² και ονομαστικής διαμέτρου 15 mm (0.6"). Η συνολική διατομή κάθε τένοντα είναι Α_T = 140 mm². Τα χαρακτηριστικά των αγκυρίων δίδονται στον Πίνακα Α.

ΠΙΝΑΚΑΣ Α. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΓΚΥΡΙΩΝ

ΑΓΚΥΡΙΑ 5 ΤΕΝΟΝΤΩΝ (ΚΛΩΝΩΝ)

Διάμετρος διατρήματος αγκυρίου, d (m) / in	0.152 / 6
Κλίση από την οριζόντιο, (°)	5 – 27
Πλήθος Τενόντων / Διάμετρος, (in)	5 / 0.6
Εμβαδόν διατομής τενόντων (mm²)	5 x 140 = 700
Ποιότητα Χάλυβα, (N/mm²)	1680/1860
Φορτίο θραύσης (kN)	1680 x 700 x 10 ⁻³ = 1176
Επιτρεπόμενη δύναμη (kN)	1176 / 1.60 (*) = 905
Φορτίο λειτουργίας (kN)	600
Πλάκα Αγκύρωσης (mm x mm x mm)	250 x 250 x 25

(*) BS 8081

Οι στάθμες κατασκευής των αγκυρίων καθορίστηκαν με βάση το βάθος θεμελίωσης των όποιων παρακείμενων κτιρίων, το βάθος έδρασης αγωγών ύδρευσης αποχέτευσης και την απλοποίηση των φάσεων της εκσκαφής.

Η κλίση και το ελεύθερο μήκος Ι_ε, των αγκυρίων καθορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη θέση του επιπέδου αστοχίας κατά Rankine, όσο το βάθος της θεμελίωσης των γειτονικών κατασκευών, καθώς και τον έλεγχο αστοχίας κατά Kranz.

Η κλίση που προτάθηκε στο μεγαλύτερο μέρος των αγκυρίων, (15°) είναι η συνήθης για κατασκευαστικούς λόγους. Κατά την πρόοδο των εργασιών εφόσον διαπιστώθηκε η ύπαρξη εμποδίων στο υπέδαφος της περιοχής που περιβάλλει την εκσκαφή (υπάρχοντα πηγάδια, βόθροι), η κλίση τροποποιήθηκε αναλόγως.

Η απαιτούμενη δύναμη προέντασης προέκυψε από την ανάλυση του συστήματος αντιστήριξης τόσο για ευστάθεια σε ολική ισορροπία, όσο και για έλεγχο παραμορφώσεων στην πέριξ της αντιστήριξης περιοχή.

Το μήκος πάκτωσης Ι_π, των αγκυρίων καθορίστηκε έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανάληψη της απαιτούμενης δύναμης προέντασης από κάθε αγκύριο με παραδεκτό συντελεστή ασφαλείας (F.S. = 1.50, DIN4125 ή F.S. = 2.00, BS8081).

Για τον υπολογισμό του μήκους πάκτωσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις (1) και (2):

$$T_{u} = L x n x f_{s} x \tan \phi$$
⁽¹⁾

$$T_{u} = L \times \pi \times D \times f_{c} \times c_{u}$$
⁽²⁾

όπου η εξίσωση (1) αναφέρεται σε αμμώδεις – χαλικώδεις στρώσεις και η εξίσωση (2) σε αργιλικές στρώσεις :

D : διάμετρος του	βολβού πάκτωσης \cong 0.1m	(συντηρητική παραδοχή)
-------------------	------------------------------	------------------------

- φ, c
 : παράμετροι διατμητικής αντοχής του εδαφικού στρώματος που περιέχει τον βολβό πάκτωσης
- n, f_c, f_s : εμπειρικοί συντελεστές συνάρτηση της εδαφικής στρώσης, του μήκους και της διαμέτρου του βολβού πάκτωσης

Η διαστασιολόγηση του πακτωμένου τμήματος έγινε και με την συντηρητική παραδοχή ότι η οριακή συνάφεια βολβού - οπής διάτρησης, για σκληρές προστερεοποιημένες αργίλους, είναι ίση με τ = 200 kPa, (δηλαδή : δύναμη σχεδιασμού προέντασης P_a = 3.14 x 0.150 m x 200 kPa x (1.0 m) x (1/1.5)= 62 kN/(m πακτωμένου τμήματος)). Η εν λόγω παραδοχή βασίστηκε στην εμπειρία του συντάκτη της τεχνικής έκθεσης από δοκιμαστικές προεντάσεις μόνιμων και προσωρινών αγκυρίων σε εκσκαφές και αντιστηρίξεις στην ευρύτερη του έργου περιοχή, και επιβεβαιώθηκε με δοκιμές εξόλκευσης προ της έναρξης των εργασιών.

Από την διαστασιολόγηση των αγκυρίων προκύπτουν η κλίση από την οριζόντιο, το πλήθος των τενόντων, το ελεύθερο μήκος αγκυρίου Ιε και το πακτωμένο μήκος Ιπ.

2.3.4 Τοιχίο από Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα / Gunite

Το τοιχίο από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατασκευάστηκε από σκυρόδεμα C20/25, χάλυβα ποιότητας S500. Το σκυρόδεμα ήταν εκτοξευόμενο, υγρού ή ξηρού τύπου. Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος επιβεβαιώθηκε με βάση της απαιτήσεις του υπάρχοντος Ελληνικού Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος με την λήψη των απαιτούμενων κυβικών δοκιμίων ή δοκιμίων σε ειδικά τελάρα για Gunite, και την εκτέλεση δοκιμών σε αναγνωρισμένο εργαστήριο.

Η πλάκα σκυροδέματος (τοιχίο) θεωρήθηκε ότι είναι αμφιέρειστη με άνοιγμα το μήκος του φατνώματος και στηρίξεις (αρθρώσεις) στους κατακόρυφους μεταλλικούς πασσάλους. Το ελάχιστο πάχος της πλάκας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ήταν 10 cm.

2.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.4.1 ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ

Πριν την έναρξη των εργασιών, λόγω της έκτασης του οικοπέδου και των υψομετρικών διαφορών, έγινε σήμανση υψομετρικής αφετηρίας <u>+</u>0.00 ή άλλου υψομέτρου (π.χ. +1.00, κλπ) σε όλες τις πλευρές του οικοπέδου.

Το πρώτο βήμα της κατασκευαστικής διαδικασίας περιλάμβανε την διαμόρφωση δαπέδου εργασίας (αφαίρεση παλαιών πέδιλων ή προϊόντων κατεδάφισης, μανδρότοιχων, οριζοντίωση του γηπέδου στην περίμετρό του όπου θα γίνουν οι διατρήσεις, κλπ). Το οριστικό βάθος της προ-εκσκαφής καθορίστηκε επακριβώς μετά τη διάνοιξη ερευνητικών τομών μπροστά σε θέσεις υποστυλωμάτων των όμορων κτιρίων, και τον ακριβή προσδιορισμό του τρόπου και βάθους θεμελίωσης αυτών.

Το επόμενο βήμα περιλάμβανε την χάραξη, σήμανση, και εξάρτηση από σταθερά σημεία, τόσο της οικοδομικής γραμμής (Ο.Γ.), όσο και των θέσεων των πασσάλων.

2.4.2 ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΟΠΩΝ Φ80 cm

Ακολούθησε η διάνοιξη κατακόρυφων γεωτρημάτων με διάμετρο οπών 0.80 m κατά μήκος όλων των πλευρών στις καθορισμένες θέσεις. Τόσο η διάτρηση των οπών των πασσάλων, όσο και η τοποθέτηση των κλωβών φρεατοπάσσαλων έγιναν με την τοποθέτηση ράμματος.

Στην περίπτωση όπου κατά την διάρκεια των εργασιών διάτρησης παρατηρήθηκε κατακρήμνιση των τοιχωμάτων των οπών, το γεώτρημα σωληνωνόταν άμεσα ή έγινε χρήση μπεντονιτικού αιωρήματος.

Εάν η κατακρήμνιση τυχούσας οπής ήταν μεγάλη ή / και πλησίον της θεμελίωσης όμορου κτιρίου, το γεώτρημα πληρωνόταν άμεσα με άοπλο ισχνό σκυρόδεμα και η γεώτρηση επαναλαμβανόταν την επόμενη ημέρα.

Σε όλους τους πασσάλους τηρήθηκε μητρώο στο οποίο καταγράφονται συνοπτικά οι εδαφικές συνθήκες, όπως αυτές προκύπτουν κατά τη διάτρηση, και κυρίως η συμπεριφορά του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα (π.χ. τοπικά αυξημένη ή μειωμένη υδροφορία, καταγραφή της στάθμης ηρεμίας κλπ.).

Η μέγιστη επιτρεπόμενη οριζόντια απόκλιση του κέντρου οπής από τη θεωρητική ήταν μικρότερη ή ίση του 5% της διαμέτρου οπής. Η μέγιστη επιτρεπόμενη συνολική απόκλιση του άξονα της διάτρησης από την κατακόρυφο ήταν ίση με 1% του μήκους της διάτρησης.

2.4.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΛΩΒΩΝ

Οι κλωβοί φρεατοπάσσαλων, δύναται να κατασκευαστούν εντός του εργοταξίου ή να μεταφερθούν έτοιμες προς τοποθέτηση. Για τους κλωβούς απαιτούνταν στεφάνια Φ18 ανά 1.50 m, επί των οποίων συγκολλήθηκαν οι κατακόρυφοι ράβδοι. Το μήκος μάτισης ήταν 100Φ. Ο κλωβός των φρεατοπάσσαλων διέθετε περιμετρικούς αποστάτες (spacers) για την εξασφάλιση της απαραίτητης εξασφάλισης επικάλυψης σιδηρού οπλισμού (t = 5.00 cm). Κατά την εισαγωγή των κλωβών στην οπή, αυτοί θα πρέπει να είναι κατακόρυφοι για να αποφευχθεί απόξεση των τοιχωμάτων και πρόκληση καταπτώσεων στην οπή.

2.4.4 ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ ΟΠΩΝ Φ80 ΜΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Η σκυροδέτηση με σκυρόδεμα C20/25 γίνεται από κάτω προς τα άνω με την χρήση σωλήνας (tremie pipe) και ελαστικής μπάλας ώστε το σκυρόδεμα να γεμίσει την οπή από κάτω προς τα πάνω, εκτοπίζοντας τυχόν νερό εκτός της οπής.

2.4.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΡΕΑΤΙΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

Μετά την εξαγωγή συμπερασμάτων από την παρατήρηση του ΥΥΟ εντός των οπών φρεατοπάσσαλων στο σύνολο της περιμέτρου του οικοπέδου, κατασκευάστηκαν σε
θέσεις με αυξημένη υδροφορία, και εκτός θέσης υποστυλώματος, τρία (3) έως έξι (6) φρεάτια άντλησης.

2.4.6 ΚΑΘΑΙΡΕΣΗ - ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΦΡΕΑΤΟΠΑΣΣΑΛΩΝ

Η καθαίρεση - καθαρισμός της κεφαλής των φρεατοπάσσαλων και η ανάλογη προετοιμασία για την κατασκευή του κεφαλόδεσμου έγινε στις προβλεπόμενες στάθμες και αφού το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει την επιθυμητή αντοχή. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε για να μην προκληθούν βλάβες στο προεξέχον τμήμα του οπλισμού.

2.4.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΟΥ ΚΕΦΑΛΟΔΕΣΜΟΥ.

Ο κεφαλόδεσμος κατασκευάστηκε στην περίμετρο του οικοπέδου από σκυρόδεμα C20/25 και χάλυβα S500.

Η στάθμη κατασκευής του κεφαλόδεσμου καθορίστηκε επακριβώς μετά τη διάνοιξη ερευνητικών τομών μπροστά σε θέσεις υποστυλωμάτων των όμορων κτιρίων, και τον ακριβή προσδιορισμό του τρόπου και βάθους θεμελίωσης αυτών.

Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος επιβεβαιώθηκε με βάση της απαιτήσεις του υπάρχοντος Ελληνικού Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος με την λήψη των απαιτούμενων δοκιμίων, και την εκτέλεση δοκιμών σε αναγνωρισμένο εργαστήριο.

<u>2.4.8 ΕΚΣΚΑΦΗ</u>

Ακολούθησε σταδιακή εκσκαφή μέχρι την πρώτη στάθμη, η αποκάλυψη των πασσάλων και η διάτρηση της πρώτης σειράς των αγκυρίων.

2.4.9 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ

Το διάτρημα των αγκυρίων είχε διάμετρο 0.150 m (χρήση τρίφτερου κοπτικού 6' ή χρήση αερόσφυρας με άκρο > Φ150 mm), την προβλεπόμενη κλίση και μήκος και διέρχεται διαμέσου του κατάλληλα κατασκευασμένου κενού χώρου του κλωβού φρεατοπάσσαλου.

Κατά τη κατασκευή των προεντεταμένων αγκυρώσεων τηρήθηκε μητρώο αγκυρίου, αντίστοιχο με αυτό του μητρώου πασσάλων.

Για τον καθαρισμό του διατρήματος κατά την εργασία διάτρησης απαγορεύεται η χρήση πολυμερικού υγρού. Το διάτρημα σωληνώνεται, εφόσον απαιτηθεί από τις συνθήκες του εδάφους, στη συνέχεια καθαρίζεται με αέρα ή νερό και τοποθετούνται οι τένοντες και πλαστικός σωλήνας για την εισπίεση του ενέματος.

2.4.10 ΠΑΚΤΩΣΗ ΑΓΚΥΡΙΩΝ

Το χρησιμοποιούμενο ένεμα είχε ελάχιστη περιεκτικότητα 1200 kg τσιμέντου ανά m³ και λόγο νερού προς τσιμέντο w/c = 0.35 - 0.45 κατά βάρος.

Н πάκτωση **3VIV**3 αντλίας τσιμεντενέσεων, 3ų χρήση διοχέτευσε δια σωλήνα Φ20 οποία то ένεμα μέσου mm η στον πυθμένα της οπής.

Για το εργάσιμο του ενέματος, προστέθηκε πλαστικοποιητικό -ρευστοποιητικό υλικό (π.χ. SIKAMENT της SIKA Ελβετίας ή παρεμφερές), σε αναλογία της τάξης του 0,5 % έως 1% επί του βάρους του τσιμέντου. Το τσιμέντο ήταν τύπου CEM 32.5. Σε περίπτωση όπου απαιτήθηκε για λόγους επιτάχυνσης χρονοδιαγράμματος η προένταση των αγκυρίων να γίνει σε λιγότερες ημέρες (3 - 4 ημέρες) προτάθηκε η χρήση τσιμέντου CEM 52.5 σε συνδυασμό με επιταχυντή.

Η αντοχή του ενέματος ελέγχθηκε σε εγκεκριμένο εργαστήριο σκυροδέματος, σε ηλικίες 3, 7 και 14 ημερών ως εξής :

- Πρίσματα 40 x 40 x 160 mm, και κάμψη 3 σημείων ή δοκιμή εφελκυσμού "K test"
- Θλίψη κατά τη γενέτειρα (BRAZILIAN TEST) σε κυλινδρικά δοκίμια Φ100mm, h=100mm.

2.4.11 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ - GUNITE

Το πλέγμα που προβλεπόταν στην μελέτη, συγκολλήθηκε με ηλεκτροκόληση στους μεταλλικούς πασσάλους 2UNP και εκτοξεύθηκε το Gunite ελάχιστου πάχους 15cm. Η αντοχή σε θλίψη του Gunite επιβεβαιώθηκε με βάση της απαιτήσεις του υπάρχοντος Ελληνικού Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος με την λήψη των απαιτούμενων κυβικών δοκιμίων ή δοκιμίων σε ειδικά τελάρα για Gunite, και την εκτέλεση δοκιμών σε αναγνωρισμένο εργαστήριο.

2.4.12 ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΑΓΚΥΡΙΩΝ

Μετά την πάροδο επτά (7) ημερών, χρόνος απαραίτητος για την ανάπτυξη της αντοχής του ενέματος των αγκυρίων, έγινε η εφαρμογή της δύναμης προέντασης με παράλληλη μέτρηση της παραμόρφωσης. Εφαρμόστηκε δύναμη προέντασης κατά 20 % μεγαλύτερη της προβλεφθείσας από την μελέτη, με ταυτόχρονη παρακολούθηση φαινόμενων ερπυσμού ή αστοχίας για μικρό χρονικό διάστημα. Στην συνέχεια η δύναμη προέντασης μειώθηκε στο 100 % της προβλεφθείσας τιμής της και το αγκύριο σταθεροποιήθηκε.

Σε κάθε παρειά καθώς και σε κάθε στάθμη εκσκαφής πρέπει να γίνονται σε λειτουργικό ή μη, αγκύριο, τόσες δοκιμαστικές φορτίσεις όσες προβλέπονται κατά DIN4125.

Η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρι την τελική στάθμη εκσκαφής.

2.4.13 ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ - ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ

Εάν κατά την πορεία της εκσκαφής συναντήθηκαν υπόγεια νερά, προτάθηκε η τοποθέτηση ανάμεσα από τα φατνώματα των πασσάλων γεωύφασμα μη υφαντό θερμοσυγκολλημένων ινών τύπου Thermofelt PP/EX/T2 200 gr/m². Στην συνέχεια τοποθετήθηκε αποστραγγιστική μεμβράνη τύπου Tefond με διπλές εξάρσεις κώνων, επί του γεωυφάσματος. Με την παραπάνω διάταξη το νερό ρέει κατακόρυφα, συγκεντρώνεται στην στάθμη της εκάστοτε εκσκαφής, και θα οδηγείται στα φρεάτια άντλησης και από εκεί εκτός του οικοπέδου, κατά προτίμηση απευθείας στο σύστημα αποχέτευσης όμβριων της περιοχής.

Σε περιοχές με αυξημένη υδροφορία, κατασκευάστηκαν οπές αποστράγγισης στα φατνώματα ανάμεσα στους πασσάλους, ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη υδροστατικής πίεσης.

<u>2.4.14 ΑΝΤΛΙΕΣ</u>

Τοποθετήθηκαν τρεις (3) έως έξι (6) ηλεκτρικές αντλίες ακαθάρτων, τριών φάσεων (3x380V, 7,6kW), 2 in έως 4 in, και για μανομετρικό ύψος της τάξης των 25.00 m (χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι τριβές από το όποιο συνολικό μήκος δικτύου), η παροχή δεν ήταν μικρότερη των 15 m³/h.

2.4.15 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

Η ενόργανη παρακολούθηση (monitoring, έλεγχος μετακινήσεων), κρίνεται απαραίτητη σε εκσκαφές σημαντικού βάθους, διότι παρέχει την δυνατότητα προσαρμογής – τροποποίησης της μελέτης σε τυχόν νέα δεδομένα της εκσκαφής, (βλ. Σχέδιο ΕΚΕΦ του ΕC7, περί ενόργανης παρακολούθησης επιλεγμένων θέσεων και σημείων στο έργο και σε παρακείμενες κατασκευές).

Για την παρακολούθηση της εκσκαφής απαιτήθηκε η τοποθέτηση οκτώ (8) μαρτύρων ηλεκτρικού κλισίμετρου υψηλής ακρίβειας (Tilt meter) σε επιλεγμένες θέσεις στους φέροντες οργανισμούς κάθε μίας όμορης οικοδομής, η τοποθέτηση αποκλισιομετρικού σωλήνα σε δώδεκα (12) θέσεις, καθώς και η τοποθέτηση στόχων (ανακλαστήρων) στα κτίρια και τοπογραφικών καρφιών στους δρόμους, ώστε με συστηματική παρακολούθηση με όργανο υψηλής ακρίβειας (lazer), να ελέγχονται οι παραμορφώσεις τόσο στα κτίρια όσο και στους παρακείμενους δρόμους.

Επισημαίνεται πως οποιαδήποτε εκσκαφή, ακόμη και αρχική προς διαμόρφωση του οικοπέδου, δεν επιτρέπεται να ξεκινήσει αν δεν έχει εγκατασταθεί και «λειτουργήσει» το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης με επαρκείς και αξιόπιστες αρχικές - μηδενικές μετρήσεις.

2.5 . ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟ ΠΑΡΟΝ ΕΡΓΟ

2.5.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΩΝ

Οι αποκλισιομετρικοί σωλήνες που εγκαταστάθηκαν, ήταν πλαστικοί, κυκλικής διατομής, διαμέτρου 60 mm, με μήκος του κάθε τμήματος σωλήνα 3.0 m.Η μεταξύ τους σύνδεση έγινε με ειδικούς συνδετήριους δακτυλίους και ο αποκλισιομετρικός σωλήνας τοποθετήθηκε εντός χαλύβδινου σωλήνα διαμέτρου Φ100 mm, ολόσωμα συνδεδεμένου - συγκολλημένου στον οπλισμό συγκεκριμένων πάνελ διαφράγματος.

Ο εγκιβωτισμός των αποκλισιομετρικών σωλήνων πραγματοποιήθηκε με ένεμα νερού και τσιμέντου έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η τέλεια επαφή με τον χαλύβδινο σωλήνα. Το ένεμα αυτό πλήρωσε το κενό μεταξύ αποκλισιομετρικού σωλήνα και χαλύβδινου σωλήνα, με εφαρμογή της διαδικασίας από τον πυθμένα προς την επιφάνεια. Μετά την παραπάνω διαδικασία ακολούθησε πλύση του αποκλισιομετρικού σωλήνα εσωτερικά με καθαρό νερό. Για την προστασία της κορυφής των σωλήνων τοποθετήθηκε στην επιφάνεια τους πλαστικό πώμα.

Οι Θέσεις των αποκλισιομετρικών σωλήνων δίνονται στον παρακάτω Πίνακα Β.

ΠΙΝΑΚΑΣ Β. ΘΕΣΕΙΣ ΑΠΟΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

ΘΕΣΕΙΣ ΑΠΟΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ				
Α/Α ΑΠΟΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΩΛΗΝΑ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΚΕΦΑΛΗΣ (m) (*)	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΑΙΧΜΗΣ (m) (*)	ΜΗΚΟΣ ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (m)	
KL 01	≈ +278.56	≈ +263.06	15.50	
KL 02	≈ +280.80	≈ +260.30	20.50	
KL 03	≈ +281.99	≈ +260.49	21.50	
KL 04	≈ +282.23	≈ +258.73	23.50	
KL 05	≈ +282.58	≈ +259.08	23.50	
KL 06	≈ +284.06	≈ +257.56	26.50	
KL 07	≈ +284.15	≈ +257.65	26.50	
KL 08	≈ +285.97	≈ +256.47	29.50	
KL 09	≈ +284.17	≈ +257.67	26.50	
KL 10	≈ +281.10	≈ +259.10	22.00	
KL 11	≈ +281.13	≈ +258.13	23.00	
KL 12	≈ +279.92	≈ +260.42	19.50	

(*) από υψομετρική αφετηρία Μ.Σ.Θ.

2.5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Για την λήψη μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ειδικός εξοπλισμός για μετρήσεις αποκλίσεων, σε δύο άξονες με τη χρήση διαξονικής βολίδας, της εταιρείας SLOPE INDICATOR. Οι μετρήσεις καταγράφηκαν σε ψηφιακή μορφή στον ηλεκτρονικό καταγραφέα Digitilt Data Mate από όπου μεταφέρθηκαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του προγράμματος DMM for WINDOWS και επεξεργάζονται με τα ειδικά προγράμματα επεξεργασίας μετρήσεων DigiPro for WINDOWS και DMM for WINDOWS.

Η διαδικασία που λαμβάνει χώρα προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μέτρηση στον αποκλισιομετρικό σωλήνα περιλαμβάνει τα εξής στάδια :

Αρχικά, τοποθέτηση της δοκιμαστικής βολίδας (dummy) στο εσωτερικό του αποκλισιομετρικού σωλήνα με σκοπό την διερεύνησή του ως προς το βάθος για

πιθανά εμπόδια που μπορεί να έχουν εισχωρήσει. Αυτό έχει ως σκοπό να αποφεύγονται συγκρούσεις της βολίδας μέτρησης με τα εμπόδια αυτά, ώστε να αποφευχθεί πιθανή φθορά του οργάνου.

Σύνδεση της αποκλισιομετρικής βολίδας με αριθμημένο καλώδιο μήκους εκατό (100) μέτρων και αρίθμησης ανά 0,5 μέτρα. Στη συνέχεια σύνδεση του καλωδίου με τον ηλεκτρονικό καταγραφέα DIGITILT DATA MATE, όπου αποθηκεύεται η κάθε μέτρηση.

Τοποθέτηση κοχλία στην κεφαλή του αποκλισιομετρικού σωλήνα ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η ευθυγράμμιση του αριθμημένου καλωδίου στο οποίο συνδέεται η βολίδα, με την κατακόρυφη διεύθυνση.

Αναμονή 10 min για εξισορρόπηση της θερμοκρασίας και έναρξη καταγραφών ανά 0,5 μέτρο σε όλο το μήκος του αποκλισιομετρικού σωλήνα και με φορά από το μέγιστο βάθος του σωλήνα προς την επιφάνεια του εδάφους.

Οι αποκλισιομετρικοί σωλήνες φέρουν τέσσερις εγκοπές, ανά ζεύγη κάθετες μεταξύ τους, μέσα στις οποίες ολισθαίνει η αποκλισιομετρική βολίδα προκειμένου να καταγράψει την κάθε μέτρηση. Οι μετρήσεις στους αποκλισιομετρικούς σωλήνες πραγματοποιήθηκαν ξεχωριστά στους άξονες Α και Β των σωλήνων, η διάταξη των οποίων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (περιστροφή 180°).



(Σχήμα 15): Συμβολισμός εγκοπών σωλήνα

Η τοποθέτηση των κλισιομετρικών σωλήνων πραγματοποιήθηκε ώστε η διεύθυνση του άξονα Α – Α' να συμπίπτει κατά το δυνατό με τη πιθανή διεύθυνση μετακίνησης, ήτοι κάθετα προς την εκσκαφή.

2.5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΩΝ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής παρατίθενται συνοπτικά τα αποτελέσματα και των 12 κλισιομέτρων, ενώ αναλυτικά διαγράμματα δίνονται μόνο για το κλισιόμετρο ενδιαφέροντος KL-7 (Παράρτημα 1).

Στα Διαγράμματα που προέκυψαν για κάθε κλισιόμετρο, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων, με τη μορφή οριζόντιων αποκλίσεων σε σχέση με την κατακόρυφο κατά τις διευθύνσεις A – A' και B – B'. Οι μετακινήσεις παρουσιάζονται ως επιμέρους αποκλίσεις εκάστου τμήματος μήκους 0.50 m, (Incremental Deviation), και ως αθροιστικές σε σχέση με σταθερό - αμετακίνητο πυθμένα του κλισιομετρικού σωλήνα (Cumulative Deviation). Επίσης, προέκυψαν και οι σχετικές μετακινήσεις, (με βάση τις αρχικές μετρήσεις), με τη μορφή οριζόντιων μετακινήσεων έκαστου τμήματος μήκους 0.50 m, (Incremental Deviation). Επίσης, σε σχέση με σταθερό - αμετακίνητο πυθμένα του κλισιομετρικού σωλήνα (Cumulative Deviation). Επίσης, προέκυψαν και οι σχετικές μετακινήσεις, (με βάση τις αρχικές μετρήσεις), με τη μορφή οριζόντιων μετακινήσεων έκαστου τμήματος μήκους 0.50 m, (Incremental Displacement), και ως αθροιστικές μετακινήσεις σε σχέση με τον πυθμένα του σωλήνα (Cumulative Displacement).

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γίνεται με βάση σχετική βιβλιογραφία (W. P. Hong, J. M. Yun, J. H. Lee, "Horizontal Displacement of Anchored Retention Walls for Underground Excavation", 1997), σύμφωνα με την οποία ορίζεται ότι οριζόντιες μετακινήσεις μικρότερες του 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής είναι αποδεκτές και εξασφαλίζουν την ισορροπία του συστήματος αντιστήριξης – εδάφους, ενώ για μετακινήσεις μεγαλύτερες του 0.25 % του βάθους εκσκαφής, οι εργασίες εκσκαφής πρέπει να σταματήσουν άμεσα και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 01: Παρατηρώντας τα σχετικά διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation") προκύπτει ότι η θέση του κλισιομετρικού σωλήνα, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, παραμένει σταθερή. Σε ότι αφορά τις σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement"), με την πάροδο του χρόνου, οι μέγιστες μετακινήσεις ανέρχονται έως 4mm και αναπτύσσονται κυρίως σε βάθος 0.5 m έως 11.0 m περίπου, από την κεφαλή της βολίδας. Όλες είναι μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 02: Με βάση τα σχετικά διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation"), φαίνεται ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παραμένει σταθερός. Σε ότι αφορά τις σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement"), με την πάροδο του χρόνου, οι μέγιστες μετακινήσεις ανέρχονται έως 5mm και αναπτύσσονται κυρίως σε βάθος 0.5 m έως 10.0 m περίπου, από την κεφαλή της βολίδας. Όλες είναι μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 03: Από τα διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation") προκύπτει ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παραμένει απόλυτα σταθερός. Σε ότι αφορά τις σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement"), με την πάροδο του χρόνου, οι μέγιστες μετακινήσεις ανέρχονται έως 5mm και αναπτύσσονται κυρίως σε βάθος 6.00 m έως 18.0 m περίπου, από την κεφαλή της βολίδας. Όλες είναι μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 04: Με βάση τα σχετικά διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation"), φαίνεται ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παραμένει σταθερός. Οι μέγιστες σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement") αυξάνονται προοδευτικά και ομοιόμορφα καθ' όλο το βάθος του κλισιομετρικού σωλήνα, παίρνουν τιμές έως 5 mm. Οι τιμές είναι μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 05: Από τα διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation") προκύπτει ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παραμένει απόλυτα σταθερός. Οι μέγιστες σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement") αυξάνονται προοδευτικά και ομοιόμορφα καθ' όλο το βάθος του κλισιομετρικού σωλήνα,

παίρνουν τιμές έως 8 mm. Οι τιμές είναι μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 06: Από τα διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation") προκύπτει ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παραμένει απόλυτα σταθερός. Σε ότι αφορά τις μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement"), είναι ελάχιστες και αρκετά μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και δεν θεωρούνται ως ανησυχητικές. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν έως τις 21 Μαΐου λόγω αδυναμίας εισχώρησης της βολίδας στο εσωτερικό του αποκλισιομετρικού σωλήνα.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 07: Από τα διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation") προκύπτει ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παραμένει απόλυτα σταθερός. Σε ότι αφορά τις σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement"), με την πάροδο του χρόνου, οι μέγιστες μετακινήσεις ανέρχονται έως 20 mm και αναπτύσσονται κυρίως σε βάθος 6.00 m έως 23.0 m περίπου, από την κεφαλή της βολίδας. Όλες είναι μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 08: Από τα διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation") προκύπτει ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παρουσιάζει μια σχετική μετακίνηση σε βάθος 10.00 m έως 15.0 m περίπου, από την κεφαλή της βολίδας. Σε ότι αφορά τις σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement"), με την πάροδο του χρόνου, οι μέγιστες μετακινήσεις ανέρχονται έως 20 mm και αναπτύσσονται κυρίως σε βάθος 7.00 m έως 15.0 m περίπου, από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 09: Από τα διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation") προκύπτει ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παραμένει απόλυτα σταθερός. Σε ότι αφορά τις σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement"), με την πάροδο του χρόνου, οι μέγιστες μετακινήσεις ανέρχονται έως 15 mm και αναπτύσσονται κυρίως σε βάθος 5.00 m έως 22.0 m περίπου, από την κεφαλή της βολίδας. Όλες είναι μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 10: Από τα διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation") προκύπτει ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παραμένει απόλυτα σταθερός. Οι μέγιστες σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement") αυξάνονται προοδευτικά και ομοιόμορφα καθ' όλο το βάθος του κλισιομετρικού σωλήνα, παίρνουν τιμές έως 15 mm. Οι τιμές είναι μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ ΚL 11: Από τα διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation") προκύπτει ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παραμένει απόλυτα σταθερός. Οι μέγιστες σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement") αυξάνονται προοδευτικά και ομοιόμορφα καθ' όλο το βάθος του κλισιομετρικού σωλήνα, παίρνουν τιμές έως 5 mm. Οι τιμές είναι μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟ KL 12: Από τα διαγράμματα (διάγραμμα "Incremental Deviation") προκύπτει ότι ο κλισιομετρικός σωλήνας παραμένει απόλυτα σταθερός. Σε ότι αφορά τις σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διάγραμμα "Cumulative Displacement"), με την πάροδο του χρόνου, οι μέγιστες μετακινήσεις ανέρχονται έως 5 mm και αναπτύσσονται κυρίως σε βάθος 5.00 m έως 15.0 m περίπου, από την κεφαλή της βολίδας. Όλες είναι μικρότερες από το 0.15 % του εκάστοτε βάθους εκσκαφής, οπότε και θεωρούνται αποδεκτές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο καταστατικός νόμος Hardening Soil Model του Plaxis 2D 7.2 που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση του προσομοιώματος αρχικά.

3.1. HARDENING SOIL MODEL – ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το Hardening - Soil Model είναι ένα προσομοίωμα της εδαφικής συμπεριφοράς που μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά είδη εδάφους, από μαλακά έως πολύ στιφρά. Υπό αποκλίνουσα φόρτιση, η εδαφική στιβαρότητα μειώνεται ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσονται μη αντιστρεπτές πλαστικές καταπονήσεις. Στην περίπτωση της τριαξονικής δοκιμής υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, η σχέση μεταξύ της αξονικής παραμόρφωσης και της αποκλίνουσας τάσης μπορεί να προσεγγισθεί ικανοποιητικά από μια υπερβολή (hyperbola). Παρόμοια προσέγγιση είχε προταθεί και από τον Konder (1963), η οποία αργότερα εφαρμόστηκε στο γνωστό υπερβολικό μοντέλο (Duncan & Chang,1970). Σε κάθε περίπτωση, το Hardening - Soil Model υπερέχει σε σχέση με το υπερβολικό μοντέλο πρώτον επειδή χρησιμοποιεί πλαστική αντί για ελαστική θεωρία, δεύτερον διότι λαμβάνει υπόψιν την διαστολικότητα του εδάφους και τρίτον διότι εισάγει μια καμπύλη διαρροής (yield cap). Τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται είναι επιγραμματικά:

Ε₅₀ref : τέμνον μέτρο ελαστικότητας στην τριαξονική δοκιμή

E₅₀^{oed}: εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας στην δοκιμή συμπιεσομέτρου

- m: βαθμός κράτυνσης με βάθος
- Eur^{ref}: μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης/ επαναφόρτισης
- vur: λόγος Poisson για αποφόρτιση/επαναφόρτιση
- c ,φ, ψ : παράμετροι αστοχίας Mohr Colomb

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του Hardening - Soil Model είναι η εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους από το τασικό πεδίο. Για συνθήκες συμπιεσόμετρου το μοντέλο εισάγει την σχέση E_{oed}= E₅₀^{oed}(σ/ p^{ref})^m. Για μαλακά εδάφη ισχύει m=1. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται η απλή σχέση μεταξύ του τροποποιημένου δείκτη συμπίεσης λ* και του μέτρου ελαστικότητας συμπιεσομέτρου:

 $E_{oed}^{ref} = p^{ref}/\lambda^*$, όπου $\lambda^* = \lambda/(1+e_o)$ και p^{ref} η σχετική πίεση.

Αντίστοιχα, το μέτρο ελαστικότητας σε αποφόρτιση/επαναφόρτιση συνδεέται με τον τροποποιημένο δείκτη διόγκωσης κ* μέσω της σχέσης:

E_{ur}^{ref}=3 p^{ref}(1-2v_{ur})/ κ^{*} , όπου κ^{*}=κ/(1+e_o)

Ομοίως, και η σχέση αυτή εφαρμόζεται για m=1.

3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ HARDENING SOIL MODEL (ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ)

Ορισμένες παράμετροι του Hardening –Soil Model συμπίπτουν με αυτές του μοντέλου Mohr- Coulomb. Συγκεκριμένα:

ς : (ενεργός) συνοχή	[kN/m²]	
φ: (ενεργός) γωνία εσωτερικής τριβής	[°]	
ψ : γωνία διαστολικότητας	[°]	
Παράμετροι εδαφικής στιβαρότητας:		
Ε₅₀ ^{ref} : τέμνον μέτρο ελαστικότητας στην τριαξονική δοκιμή	[kN/m²]	
E ₅₀ ^{oed} : εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας στην		
δοκιμή συμπιεσομέτρου	[kN/m²]	
m: βαθμός κράτυνσης με βάθος	[-]	
E _{ur} ^{ref} : μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης/ επαναφόρτισης		
$(E_{ur}^{ref}=3^*E_{50}^{ref})$	[kN/m²]	
ν _{ur:} λόγος Poisson για αποφόρτιση/επαναφόρτιση (v _{ur} =0.2)	[-]	
p ^{ref} : σχετική τάση για ελαστικοτήτα (p ^{ref} =100)	[kN/m²]	
K₀ ^{nc} : τιμή Κο για κανονική στερεοποίηση (Ko=1-sinφ)	[-]	
R _f : λόγος q _f /q _a αστοχίας (R _f =0.9)	[-]	
σ _{tension} : εφελκυστική αντοχή (σ _{tension} =0)		
Cincrement: αύξηση συνοχής(Cincrement=0)		

3.2.1 ΜΕΤΡΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Ε₅₀ref & E₅₀oed

Το H.S.M. υπερέχει έναντι του Mohr- Coulomb αρχικά διότι χρησιμοποιεί υπερβολική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης αντί για την διγραμμική, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει υπ' όψιν την εξάρτηση του μέτρου Ελαστικότητας από την τάση. Με το μοντέλο Mohr- Coulomb, ο χρήστης εισάγει μια σταθερή τιμή του μέτρου ελαστικότητας Young , ενώ στην πραγματικότητα το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από το τασικό πεδίο. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν οι ασκούμενες τάσεις στο έδαφος προκειμένου να επιτευχθούν οι κατάλληλες τιμές μέτρων ελαστικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή τιμής για το E₅₀^{ref} προσδιορίζοντας την μικρή κύρια τάση ως σ₃= p^{ref} (συνήθως p^{ref}=100 μονάδες τάσης).

Για το μέτρο ελαστικότητας E_{ur}^{ref} δεχόμαστε ότι ισχύει ο νόμος του Hooke E_{ur}=2(1+v)G_{ur}, αφού στην πραγματικότητα είναι ελαστικό μέγεθος. Όμως, δεν ισχύει η ίδια σχέση για τα E₅₀ και G₅₀, αφού δεν υπακουούν τη θεωρία της ελαστικότητας.



(Σχήμα 16): Ορισμός E50 ref, Eur ref σε τριαξονική δοκιμή

Έχοντας προσδιορίσει το E₅₀ μπορεί να προσδιορισθεί το E_{oed} μέτρο ελαστικότητας στην δοκιμή συμπιεσομέτρου μέσω της σχέσης:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \, \cot \varphi \, - \sigma_{I'}}{c \, \cot \varphi \, + \, p^{ref}} \right)^{m}$$

, όπου E_{oed} είναι εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα. Το μέτρο ελαστικότητας E_{50}^{oed} είναι εφαπτομενικό σε κάθετο επίπεδο τάσης –σ₁'=p^{ref}.



(Σχήμα 17): Ορισμός Ε₅₀^{oed} σε αποτελέσματα δοκιμής συμπιεσομέτρου

<u>3.2.2 ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΠΟΥ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ</u> CAP YIELD

Οι επιφάνειες διατμητικής αστοχίας που περιγράφηκαν στο Σχημα 4.2 δεν εξηγούν επαρκώς την πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση που πραγματοποιείται κατά την δοκιμή ισότροπης συμπίεσης. Για το λόγο αυτό εισάγεται μία νέα επιφάνεια αστοχίας κοντά στην ελαστική περιοχή στην διεύθυνση του άξονα p. Χωρίς την εισαγωγή αυτής της νέας περιοχής διαρροής δεν θα ήταν δυνατόν να δημιουργήσουμε μοντέλο με ανεξάρτητη εισαγωγή τιμών για τα E_{50}^{ref} και E_{50}^{oed} . Πρακτικά, το μέτρο ελαστικότητας E_{50}^{ref} καθορίζει κυρίως το μέγεθος των πλαστικών παραμορφώσεων που σχετίζονται με την επιφάνεια διατμητικής αστοχίας ενώ μέτρο ελαστικότητας την επιφάνεια διατμητικής αστοχίας. Το cap yield surface ορίζεται ως:

$$f^{c} = \frac{\tilde{q}^{2}}{\alpha^{2}} + p^{2} - p_{p}^{2}$$
(*a* = *c* cotφ)
,όπου α είναι μια βοηθητική
παράμετρος που σχετίζεται με το K_o^{nc}. Επίσης, ορίζεται p= - (σ₁+σ₂+σ₃)/3 και
q=σ₁+(δ-1)σ₂-δσ₃, με δ=(3+sinφ)/(3-sinφ). Το μέγεθος της περιοχής yield cap
καθορίζεται από την ισοτροπική τάση προστερεοποίησης p_p. Η ογκομετρική
παραμόρφωση ε_v^{pc} σχετίζεται με την p_p μέσω της σχέσης:

$$\varepsilon_{v}^{pc} = \frac{\beta}{m+l} \left(\frac{p_{p}}{p^{ref}} \right)^{m+l}$$

Η ογκομετρική παραμόρφωση "cap" είναι η πλαστική παραμόρφωση στην ισότροπη συμπίεση . Πέραν των παραμέτρων m και pref χρησιμοποιείται και η σταθερά β. Τα α και β ακολουθούν τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{array}{l} \alpha \leftrightarrow K_0^{nc} & (\text{default: } K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi) \\ \beta \leftrightarrow E_{oed}^{ref} & (\text{default: } E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}) \end{array}$$

Η επιφάνεια που ορίζεται από την καμπύλη διαρροής yield cap έχει σχήμα έλλειψης με άξονες p-q, με μήκος p_p και ap_p αντίστοιχα. Υψηλές τιμές α οδηγούν σε steep caps κάτω από τη γραμμή αστοχίας Mohr- Coulomb ενώ χαμηλές τιμές α δημιουργούν cap συγκεντρωμένα γύρω από τον άξονα p.Η έλλειψη χρησιμοποιείται τόσο ως επιφάνεια διαρροής όσο και ως πιθανή επιφάνεια πλαστικής παραμόρφωσης. Έτσι ορίζεται:

$$\underline{\dot{e}}^{pc} = \lambda \ \frac{\partial f^c}{\partial \underline{\sigma}}$$
 with: $\lambda = \frac{\beta}{2p} \left(\frac{p_p}{p^{ref}}\right)^m \ \frac{\dot{p}_p}{p^{ref}}$

Τελικά προκύπτει η παρακάτω εικόνα της επιφάνειας διαρροής του Hardening Soil Model σε σύστημα αξόνων p-q.



(Σχήμα 18): Επιφάνεια διαρροής του Hardening Soil Model

Πέραν της παρακάνω γραφικής απεικόνισης με απλές γραμμές διαρροής, το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τις επιφάνειες διαρροής σε επίπεδο κύριων τάσεων. Επισημαίνεται ότι τόσο οι επιφάνειες διατμητικής διαρροής όσο και αυτές που ορίζονται από το yield cap έχουν το χαρακτηριστικό εξαγωνικό σχήμα της αστοχίας Mohr-Coulomb. Στην πραγματικότητα οι επιφάνειες διατμητικής αστοχίας μπορούν να επεκταθούν ως την επιφάνεια αστοχίας Mohr-Coulomb. Η επιφάνεια που ορίζεται από την καμπύλη cap yield επεκτείνεται ως συνάρτηση της τάσης προστερεοποίησης p_p.



(Σχήμα 19): Επιφάνεια διαρροής του Hardening Soil Model σε επίπεδο κύριων τάσεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, κύριος στόχος της διερεύνησης ήταν το συνταίριασμα των πραγματικών (μετρηθεισών) καμπύλων οριζόντιας μετατόπισης - βάθους που προέκυψαν από το κλισιόμετρο KL-7, με τις προκύπτουσες από την ανάλυση με Π.Σ. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία διερεύνησης.

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι αρχικές αριθμητικές αναλύσεις έγιναν με την χρήση του λογισμικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D, και συγκεκριμένα Plaxis 2D 7.2.

Ως καταστατικός νόμος για την συσχέτιση της τάσης με την παραμόρφωση σε εδαφικό στοιχείο, χρησιμοποιήθηκε το "Hardening Soil Model" από την βιβλιοθήκη υλικών του PLAXIS. Το εν λόγω προσομοίωμα συμπεριλαμβάνει κριτήριο αστοχίας τύπου Mohr-Coulomb, υπερβολικό νόμο κράτυνσης για την παραμόρφωση, και μη– συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής. Επιπλέον παρέχει τις εξής δυνατότητες: (α) της μη– γραμμικής εξάρτησης του μέτρου ελαστικότητας από την ενεργό τάση και τον δείκτη πόρων, (β) το μέτρο ελαστικότητας κατά την αποφόρτιση– επαναφόρτιση να είναι διάφορο (μεγαλύτερο) του αντίστοιχου μέτρου κατά την φόρτιση – επαναφόρτιση, και (γ) της απόζευξης του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης από το μέτρο διάτμησης, και της εξάρτησης του πρώτου από την ενεργό τάση και τον δείκτη πόρων. Είναι προφανές ότι το συγκεκριμένο καταστατικό προσομοίωμα είναι σε θέση να περιγράψει την συμπεριφορά του εδαφικού στοιχείου με αρκετό ρεαλισμό, σε αντίθεση με το κλασικό και συνήθως εφαρμοζόμενο στην πράξη ελαστικό ποσομοίωμα τύπου Mohr–Coulomb.

Οι αναλύσεις ακολουθούν με ακρίβεια τις φάσεις της κατασκευής. Έτσι, αφού σε μία πρώτη ανάλυση δημιουργηθούν συνθήκες γεωστατικής ισορροπίας, τοποθετούνται στον κάνναβο προσομοίωσης κατακόρυφα δομικά στοιχεία (δοκοί) με τις ιδιότητες των πασσάλων αντιστηρίξεως ("Βερολίνιου" τοίχου). Μετά, σε διαδοχικά στάδια της ανάλυσης, αφαιρούνται στοιχεία εδάφους από τον κάνναβο μέχρι την θέση των αγκυρίων. Ακολουθεί "εγκατάσταση" των αγκυρίων με τα χαρακτηριστικά

που τα αγκύρια έχουν στην πραγματικότητα (συνολικό μήκος αγκυρίου, μήκος προεντεταμένου τμήματος, κλίση και διάμετρος αγκυρίου, φορτίο σχεδιασμού, χαρακτηριστικές αντοχές υλικών, και τάσεις συνάφειας). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το τελικό στάδιο εκσκαφής και την τελευταία τάνυση αγκυρίου.

Η επίτευξη τιμών οριζόντιας μετατόπισης με χρήση προσομοιώματος 2D ικανοποιητικών και κοντινών με αυτές που μετρήθηκαν από το κλισιόμετρο KL-7, έγινε εφικτή σταδιακά. Λαμβάνοντας υπ' όψιν μας τα μόνο τα αντικειμενικά δεδομένα της κατασκευής και συγκεκριμένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τοίχου αντιστήριξης, τη μηχανική συμπεριφορά των δομικών υλικών (πάσσαλοι, αγκύρια), τη στρωματογραφία, τη Στάθμη του Υδροφόρου Ορίζοντα και τέλος τις μετρήσεις από το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης (κλισιόμετρα) προχωρήσαμε στη δημιουργία προσομοιώματος με βασικό μας ζητούμενο τις παραμέτρους παραμορφωσιμότητας του εδάφους. Το προσομοίωμα που κατασκευάστηκε αφορούσε την διατομή στην οποία είχε εγκατασταθεί το κλισιόμετρο ενδιαφέροντος KL-7 στην ανατολική πλευρά του οικοπέδου, προς την πλευρά υπάρχοντος κτιρίου τράπεζας.

Ως ημερομηνίες ενδιαφέροντος για την σύγκριση της υπάρχουσας με την προκύπτουσα καμπύλη οριζόντιων μετατοπίσεων – βάθους επιλέχθηκαν οι κάτωθι:

- 3/6/2013, ημερομηνία κατά την οποία η εκσκαφή είχε προχωρήσει 17.50 m από την επιφάνεια του εδάφους και είχε ολοκληρωθεί η τάνυση της 5^{ης} σειράς αγκυρίων. (Φωτογραφία 1)
- 26/6/2013, ημερομηνία κατά την οποία η εκσκαφή είχε προχωρήσει 19.25 m από την επιφάνεια του εδάφους και είχε ολοκληρωθεί η τάνυση της 6^{ης} σειράς αγκυρίων. (Φωτογραφία 2)
- 24/7/2013, ημερομηνία κατά την οποία η εκσκαφή είχε πρακτικά ολοκληρωθεί (22.00 m). (Φωτογραφία 3)



(Φωτογραφία 1)



(Φωτογραφία 2)



(Φωτογραφία 3)

Για την επίτευξη του στόχου της ανάλυσης ακολουθήθηκε «Θαμιστική Διαδικασία» επανελέγχου και επαναπροσδιορισμού των εδαφικών παραμέτρων παραμορφωσιμότητας του προσομοιώματος.

Κριτήριο εφαρμογής «Θαμιστικής» Διαδικασίας δεν ήταν η ακολούθηση μίας αυστηρά μαθηματικής επίλυσης που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση κάποιας συνάρτησης σφάλματος, αλλά η παρατήρηση της φυσικής συμπεριφοράς του προσομοιώματος και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βάσει της κρίσης του μηχανικού. Συνεχείς επαγωγικές προσεγγίσεις οδήγησαν στα επιθυμητά αποτελέσματα.

4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

4.2.1 ΑΡΧΙΚΗ (ΕΞΙΔΑΝΙΚΕΥΜΕΝΗ) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η πρώτη προσέγγιση περιλάμβανε ομοιόμορφο αλλά ανομοιογενές εδαφικό προφίλ. Η γεωμετρία και ο κάνναβος Π.Σ. που διαμορφώθηκε δίνονται στα παρακάτω σχήματα. Έγινε πύκνωση του καννάβου στην περιοχή του πασσάλου και μπροστά από αυτόν, στο τμήμα εδάφους που αφαιρείται.



90.0 m

(Σχήμα 20): Κύρια γεωμετρικά στοιχεία προσομοιώματος



(Σχήμα 21): Κάνναβος (mesh)

Τα αριθμητικά χαρακτηριστικά του εδάφους ήταν τα παρακάτω:

ειδικό βάρος: γ =21 kN/m³ γωνία εσωτερικής τριβής: φ'=28° γωνία διασταλτικότητας: ψ =5 ° συνοχή: c' =15 kPa μέτρο ελαστικότητας φόρτισης: E'₅₀^{ref} =109 MPa μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης–επαναφόρτισης: E'_{unl,r} ^{ref}=327 MPa μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης: E_{oed} ^{ref} =109 MPa λόγος του Poisson κατά την αποφόρτιση: v_{unl} = 0.2 βαθμός κράτυνσης: m = 0.5 συντελεστής αντοχής: R_f = 0.9 τάση αναφοράς: p_{ref} = 100 kPa αρχικός δείκτης πόρων: e₀ = 0.6 συντελεστής διαπερατότητας: k = 10⁻⁷ m/s, συντελεστής διεπιφάνειας: R_{inter} = 0.8

Οι αναλύσεις έγιναν για στραγγιζόμενες συνθήκες (Drained), καθώς ο συντελεστής διαπερατότητας δικαιολογούσε συνθήκες πλήρους στράγγισης στο χρονικό διάστημα κατασκευής του έργου.

Ο πάσσαλος (pile) προσομοιάστηκε με στοιχείο δοκού (beam) με τα εξής χαρακτηριστκά:

Ποιότητα σκυροδέματος: C20/25 Μέτρο Ελαστικότητας Σκυροδέματος: E=29 GPa Μέτρο Ελαστικότητας Οικοδομικού Χάλυβα: Es= 210 GPa Εμβαδόν: A=πd2/4= π*(0.8)²/4=0.50m² Ροπή αδράνειας κυκλικής διατομής: I= πd²/64=0.0314 ειδικό βάρος σκυροδέματος: W= 5 (kN/m)/m ροπή αντοχής: Mp= 500 kNm

Επιλέχθηκε ελαστοπλαστικός τύπος υλικού (material type) με χαρακτηριστικές τιμές:

EA=6.626*108 kN/m EI=2.650*10⁵ kNm²/m d= 0.069 m w=5 (kN/m)/m v=0.20 Τα αγκύρια προσομοιάστηκαν με την επιλογή αγκύριο από κόμβο σε κόμβο (node to node anchor) με τα εξής χαρακτηριστικά:

EA= 1.4*10⁵ kN Lspacing=2.20 m Fmax=1176 kN

Για το πακτωμένο τμήμα του αγκυρίου χρησιμοποιήθηκε η επιλογή γεωυφάσματος (geotextile) με χαρακτηριστικό: EA=2.008*10⁵ kN/m

Τα αποτελέσματα της αρχικής εξιδανικευμένης προσέγγισης όπως αναμενόταν δεν ήταν ικανοποιητικά. Παρατίθενται τα διαγράμματα στις ημερομηνίες ενδιαφέροντος.

Σημειώνεται ότι στα διαγράμματα που ακολουθούν από εδώ και στο εξής, στον κατακόρυφο άξονα μετράται το βάθος σε μέτρα (m) και στον οριζόντιο η οριζόντια μετακίνηση σε μέτρα (m). Οι πραγματικές μετρήσεις συμβολίζονται με σημεία μπλε χρώματος, ενώ η υπολογιζόμενη καμπύλη συμβολίζεται με συνεχή κόκκινη γραμμή.



(Σχήμα 22): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο πέμπτο στάδιο εκσκαφής (3/6/2013)



(Σχήμα 23): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο έκτο στάδιο εκσκαφής (26/6/2013)



(Σχήμα 24): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο τελικό στάδιο εκσκαφής (24/7/2013)



(Σχήμα 25): Ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων, Umax = 0.034 m



(Σχήμα 26): Διανύσματα Οριζόντιων Μετακινήσεων – Καμπτικών Ροπών





Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της πρώτης ανάλυσης, διαπιστώθηκε η απόκλιση των καμπυλών. Η ανάλυση έδειξε ότι το σύστημα έπρεπε να γίνει πιο δύσκαμπτο. Αυτό επιτεύχθηκε με διπλασιασμό των παραμέτρων εδαφικής παραμορφωσιμότητας.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται σε μορφή διαγραμμάτων σύγκρισης για τις τρεις ημερομηνίες ενδιαφέροντος.





4.2.2 ΠΡΩΤΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ

Όπως είναι φανερό από την εικόνα των αποτελεσμάτων της αρχικής εξιδανικευμένης προσέγγισης για το προσομοίωμα, δεν επιτεύχθηκε το επιθυμητό συνταίριασμα των μετρηθεισών με τις προκύπτουσες καμπύλες. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η επανεξέταση των τιμών των παραμέτρων παραμορφωσιμότητας του εδάφους. Επιπλέον, παρατηρήθηκε η ανάγκη επανεξέτασης των συνοριακών συνθηκών στην κεφαλή του πασσάλου. Με βάση αυτά τα συμπεράσματα το προσομοίωμα οδηγήθηκε στην πρώτη του τροποποίηση. Πρωταρχικός στόχος της πρώτης τροποποίησης ήταν η αναπαράσταση της συμβολής του κεφαλόδεσμου λόγω της ατένειας του στην εκτός επιπέδου διεύθυνση.

Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε προσομοίωμα Π.Σ. σε πρόγραμμα Plaxis 3D για την διατομή του KL-7. Προσομοιάστηκαν τόσο οι συνθήκες άρθρωσης όσο και πλήρους πάκτωσης. Για επιβολή μοναδιαίου φορτίου P=1kN, η δυσκαμψία υπολογίστηκε βάσει της σχέσης *K=P/u* για αμφότερες τις συνθήκες στήριξης. Τελικώς, προέκυψαν οι τιμές δυσκαμψίας K= 900 kN/m για συνθήκες άρθρωσης και K=4200 kN/m για συνθήκες πλήρους πάκτωσης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε Plaxis 3D δίνονται σχηματικά στο Παράρτημα 3. Ο κεφαλόδεσμος προσομοιάστηκε με αγκύριο τύπου fixed-end και δυσκαμψίας EA= 4200 kN ανά απόσταση Lspacing=1.00m.



(Σχήμα 27): Προσθήκη κεφαλόδεσμου στο προσομοίωμα

Στη συνέχεια δίνεται η εικόνα του παραμορφωμένου καννάβου για κάθε ένα από τα στάδια εκσκαφής στις ημερομηνίες ενδιαφέροντος, για επίλυση με παράμετρο κράτυνσης m=0.5.



(Σχήμα 28): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο πέμπτο στάδιο εκσκαφής (3/6/2013)



(Σχήμα 29): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο έκτο στάδιο εκσκαφής (26/6/2013)



(Σχήμα 30): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο τελικό στάδιο εκσκαφής (24/7/2013)





Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της πρώτης τροποποίησης, διαπιστώθηκε η απόκλιση των καμπυλών. Η ανάλυση έδειξε ότι το σύστημα έπρεπε να γίνει πιο δύσκαμπτο. Αυτό επιτεύχθηκε με διπλασιασμό των παραμέτρων εδαφικής παραμορφωσιμότητας.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται διαγραμματικά.





Το προσομοίωμα εξετάστηκε και για τιμή παραμέτρου κράτυνσης m=1.0 . Ενδεικτικά αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω.




Η ανάλυση έδειξε ότι το σύστημα έπρεπε να γίνει πιο δύσκαμπτο. Αυτό επιτεύχθηκε με διπλασιασμό των παραμέτρων εδαφικής παραμορφωσιμότητας.



Τα αποτελέσματα παρατίθενται:



4.2.3 ΔΕΥΤΕΡΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της πρώτης τροποποίησης, έγινε αισθητό ότι μετά την προσθήκη κεφαλόδεσμου στο προσομοίωμα και την παραμετρική διερεύνηση, το συνταίριασμα των καμπυλών δεν έγινε εφικτό. Συνεπώς, συμπεράναμε ότι έπασχε η φυσική του προσομοιώματος. Για το σκοπό αυτό έγινε προσθήκη μιας δεύτερης εδαφικής στρώσης, περίπου στο ύψος της Σ.Υ.Ο. (15.00 m από την επιφάνεια του εδάφους). Το νέο προσομοίωμα διερευνήθηκε παραμετρικά εκ νέου.



(Σχήμα 31): Θεώρηση δεύτερης εδαφικής στρώσης στο προσομοίωμα



(Σχήμα 32): Κάνναβος (mesh)

<u>4.2.3.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΥΣΗΣ</u>

Για τιμή της παραμέτρου κράτυνσης m= 0.5 παρατίθενται οι πιο αντιπροσωπευτικές αναλύσεις:

• ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΩΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

```
Ta αριθμητικά χαρακτηριστικά του εδάφους ήταν τα παρακάτω:
ειδικό βάρος: γ =21 kN/m<sup>3</sup>
γωνία εσωτερικής τριβής: φ'=28°
γωνία διασταλτικότητας: ψ =5 °
συνοχή: c' =15 kPa
μέτρο ελαστικότητας φόρτισης: E'<sub>50</sub><sup>ref</sup> =109 MPa
μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης–επαναφόρτισης: E'<sub>unl,r</sub> <sup>ref</sup>=327 MPa
μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης: E<sub>oed</sub> <sup>ref</sup> =109 MPa
λόγος του Poisson κατά την αποφόρτιση: v<sub>unl</sub> = 0.2
παράμετρος κράτυνσης : m(power) = 0.5
συντελεστής αντοχής: R<sub>f</sub> = 0.9
τάση αναφοράς: p<sub>ref</sub> = 100 kPa
συντελεστής διαπερατότητας: k = 10<sup>-7</sup> m/s,
συντελεστής διεπιφάνειας: Rinter = 0.8
```

Οι αναλύσεις έγιναν για στραγγιζόμενες συνθήκες (Drained).

• ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

```
Τα αριθμητικά χαρακτηριστικά του εδάφους ήταν τα παρακάτω:
ειδικό βάρος: γ =21 kN/m<sup>3</sup>
γωνία εσωτερικής τριβής: φ'=28°
γωνία διασταλτικότητας: ψ =5 °
συνοχή: c' =15 kPa
μέτρο ελαστικότητας φόρτισης: E'<sub>50</sub><sup>ref</sup> =654 MPa
μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης–επαναφόρτισης: E'<sub>unl,r</sub> <sup>ref</sup>=1.962 MPa
μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης: E<sub>oed</sub> <sup>ref</sup> =654 MPa
λόγος του Poisson κατά την αποφόρτιση: v<sub>unl</sub> = 0.2
παράμετρος κράτυνσης : m(power) = 0.5
συντελεστής αντοχής: R<sub>f</sub> = 0.9
τάση αναφοράς: p<sub>ref</sub> = 100 kPa
αρχικός δείκτης πόρων: e<sub>0</sub> = 0.6
συντελεστής διαπερατότητας: k = 10<sup>-7</sup> m/s,
συντελεστής διεπιφάνειας: Rinter = 0.8
```

Οι αναλύσεις έγιναν για στραγγιζόμενες συνθήκες (Drained).

Για το πακτωμένο τμήμα του αγκυρίου χρησιμοποιήθηκε η επιλογή γεωυφάσματος (geotextile) με χαρακτηριστικό:

EA=2.008*10⁵ kN/m

Στη συνέχεια δίνεται η εικόνα του παραμορφωμένου καννάβου για κάθε ένα από τα στάδια εκσκαφής στις ημερομηνίες ενδιαφέροντος καθώς και τα συγκριτικά διαγράμματα που καταστρώθηκαν



(Σχήμα 33): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο πέμπτο στάδιο εκσκαφής (3/6/2013)



(Σχήμα 34): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο έκτο στάδιο εκσκαφής (26/6/2013)



(Σχήμα 35): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο τελικό στάδιο εκσκαφής (24/7/2013)





• ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΩΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Tα αριθμητικά χαρακτηριστικά του εδάφους ήταν τα παρακάτω: ειδικό βάρος: γ =21 kN/m³ γωνία εσωτερικής τριβής: φ'=28° γωνία διασταλτικότητας: ψ =5° συνοχή: c' =15 kPa μέτρο ελαστικότητας φόρτισης: E' $_{50}$ ^{ref} =109 MPa μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης-επαναφόρτισης: E'unl,r ^{ref}=327 MPa μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης: E_{oed} ^{ref} =109 MPa λόγος του Poisson κατά την αποφόρτιση: vunl = 0.2 παράμετρος κράτυνσης : m(power) = 0.5 συντελεστής αντοχής: R_f = 0.9 τάση αναφοράς: p_{ref} = 100 kPa συντελεστής διαπερατότητας: k = 10⁻⁷ m/s, συντελεστής διεπιφάνειας: Rinter = 0.8

Οι αναλύσεις έγιναν για στραγγιζόμενες συνθήκες (Drained).

• ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

```
ειδικό βάρος: γ =21 kN/m<sup>3</sup>
γωνία εσωτερικής τριβής: φ'=28°
γωνία διασταλτικότητας: ψ =5 °
συνοχή: c' =15 kPa
μέτρο ελαστικότητας φόρτισης: E'_{50}<sup>ref</sup> =872 MPa
μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης–επαναφόρτισης: E'_{unl,r} <sup>ref</sup>=2.616 MPa
μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης: E<sub>oed</sub> <sup>ref</sup> =872 MPa,
λόγος του Poisson κατά την αποφόρτιση: v<sub>unl</sub> = 0.2
παράμετρος κράτυνσης : m(power) = 0.5
συντελεστής αντοχής: R<sub>f</sub> = 0.9
τάση αναφοράς: p<sub>ref</sub> = 100 kPa,
αρχικός δείκτης πόρων: e<sub>0</sub> = 0.6
συντελεστής διαπερατότητας: k = 10<sup>-7</sup> m/s,
συντελεστής διεπιφάνειας: Rinter = 0.8
```

Οι αναλύσεις έγιναν για στραγγιζόμενες συνθήκες (Drained).

Για το πακτωμένο τμήμα του αγκυρίου χρησιμοποιήθηκε η επιλογή γεωυφάσματος (geotextile) με χαρακτηριστικό:

EA=2.008*10⁵ kN/m

Στη συνέχεια δίνεται η εικόνα του παραμορφωμένου καννάβου για κάθε ένα από τα στάδια εκσκαφής στις ημερομηνίες ενδιαφέροντος καθώς και τα συγκριτικά διαγράμματα που καταστρώθηκαν

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ & ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ



(Σχήμα 36): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο πέμπτο στάδιο εκσκαφής (3/6/2013)



(Σχήμα 37): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο έκτο στάδιο εκσκαφής (26/6/2013)



(Σχήμα 38): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο τελικό στάδιο εκσκαφής (24/7/2013)



Καμπύλες Βάθους (m) – οριζόντιων μετακινήσεων (m)

Για τιμή της παραμέτρου κράτυνσης m= 1.0 παρατίθεται η πιο αντιπροσωπευτική ανάλυση:

• ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΩΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Τα αριθμητικά χαρακτηριστικά του εδάφους ήταν τα παρακάτω: ειδικό βάρος: γ =21 kN/m³ γωνία εσωτερικής τριβής: φ'=28° γωνία διασταλτικότητας: ψ =5 ° συνοχή: c' =15 kPa μέτρο ελαστικότητας φόρτισης: E' $_{50}$ ^{ref} =218 MPa μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης–επαναφόρτισης: E' $_{unl,r}$ ^{ref}=654 MPa μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης: E $_{oed}$ ^{ref} =218 MPa λόγος του Poisson κατά την αποφόρτιση: Vunl = 0.2 παράμετρος κράτυνσης : m(power) = 1.0 συντελεστής αντοχής: R_f = 0.9 τάση αναφοράς: pref = 100 kPa, συντελεστής διαπερατότητας: k = 10⁻⁷ m/s, συντελεστής διεπιφάνειας: Rinter = 0.8

Οι αναλύσεις έγιναν για στραγγιζόμενες συνθήκες (Drained).

• ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

ειδικό βάρος: γ =21 kN/m³ γωνία εσωτερικής τριβής: φ'=28° γωνία διασταλτικότητας: ψ =5 ° συνοχή: c' =15 kPa μέτρο ελαστικότητας φόρτισης: E' $_{50}$ ^{ref} =872 MPa μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης–επαναφόρτισης: E' $_{unl,r}$ ^{ref}=2.616 MPa μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης: E_{oed} ^{ref} =872 MPa λόγος του Poisson κατά την αποφόρτιση: v_{unl} = 0.2, παράμετρος κράτυνσης : m(power) = 1.0 συντελεστής αντοχής: R_f = 0.9 τάση αναφοράς: p_{ref} = 100 kPa, αρχικός δείκτης πόρων: e₀ = 0,6 συντελεστής διαπερατότητας: k = 10⁻⁷ m/s, συντελεστής διεπιφάνειας: Rinter = 0.8

Οι αναλύσεις έγιναν για στραγγιζόμενες συνθήκες (Drained).

Για το πακτωμένο τμήμα του αγκυρίου χρησιμποιήθηκε η επιλογή γεωυφάσματος (geotextile) με χαρακτηριστικό:

EA=2.008*10⁵ kN/m

Στη συνέχεια δίνεται η εικόνα του παραμορφωμένου καννάβου για κάθε ένα από τα στάδια εκσκαφής στις ημερομηνίες ενδιαφέροντος καθώς και τα συγκριτικά διαγράμματα που καταστρώθηκαν

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ & ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ



(Σχήμα 39): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο πέμπτο στάδιο εκσκαφής (3/6/2013)



(Σχήμα 40): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο έκτο στάδιο εκσκαφής (26/6/2013)



(Σχήμα 41): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο τελικό στάδιο εκσκαφής (24/7/2013)



Καμπύλες Βάθους (m) – οριζόντιων μετακινήσεων (m)

Στη συνέχεια η λύση διερευνήθηκε και για αρκετά μικρότερες τιμές των μέτρων παραμορφωσιμότητας. Τα αποτελέσματα βελτιώθηκαν αισθητά.

Παρατίθενται οι **βέλτιστες λύσεις** όπως προέκυψαν για τιμές του παράγοντα κράτυνσης m = 0.5 και m = 1.0





Καμπύλες Βάθους (m) – οριζόντιων μετακινήσεων (m)

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</u>

Αναλύοντας τα αποτελέσματα του προσομοιώματος με χρήση Hardening Soil Model, και συγκεκριμένα εστιάζοντας στις τιμές των διατμητικών παραμορφώσεων στον τοίχο αντιστήριξης, διαπιστώθηκε ότι αυτές δεν ξεπερνούσαν την τιμή:

 $\gamma_{max}=0.4\%$.

Γνωρίζοντας ότι ο καταστατικός νόμος Hardening Soil χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις παραμορφώσεων γ>1%, δημιουργήθηκε η ανάγκη συσχετισμού του μέτρου διατμήσεως με την παραμόρφωση μέσω ενός καταστατικού νόμου που δίνει ορθά αποτελέσματα σε περίπτωση μικρών παραμορφώσεων (γ <1%).

Ο καταστατικός νόμος αυτός είναι το Hardening Soil Small Model. Το προσομοίωμα σχεδιάστηκε εκ νέου σε Plaxis 2D 8.6 και εξετάστηκε πια σε περιοχή μικρών παραμορφώσεων.



(Σχήμα 42): Διατμητικές παραμορφώσεις ανάλυσης σε Hardening Soil Model,

γmax = 0.4 %

5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ HARDENING SOIL SMALL MODEL

Το καταστατικό προσομοίωμα Hardening Soil Model θεωρεί ελαστική συμπεριφορά του εδάφους κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της αποφόρτισης. Ωστόσο καλύπτει μικρό εύρος παραμορφώσεων στο οποίο το έδαφος θεωρείται ελαστικό. Στην πραγματικότητα, όσο αυξάνονται οι παραμορφώσεις, η δυσκαμψία του εδάφους φθίνει ανελαστικά.



(Σχήμα 43): Συμπεριφορά δυσκαμψίας εδάφους σε σχέση με την διατμητική παραμόρφωση

Στο ανωτέρω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη δυσκαμψίας η οποία μειώνεται με την αύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων. Αποτυπώνονται επίσης οι χαρακτηριστικές διατμητικές παραμορφώσεις οι οποίες μπορούν να μετρηθούν στις γεωτεχνικές κατασκευές και το εύρος των παραμορφώσεων απ' τις Παρατηρείται εργαστηριακές δοκιμές. ÓTI για τις τιμές των εδαφικών παραμορφώσεων που μπορούν να καταγραφούν στις κλασσικές εργαστηριακές δοκιμές η εδαφική δυσκαμψία μειώνεται σε λιγότερο απτό μισό της αρχικής της τιμής. Η δυσκαμψία η οποία τελικά χρησιμοποιείται στην ανάλυση των γεωτεχνικών κατασκευών δεν ανταποκρίνεται στο αντίστοιχο εύρος των παραμορφώσεων σύμφωνα με το διάγραμμα. Αντί αυτού θα έπρεπε να λαμβάνεται υπόψη η δυσκαμψία που οφείλεται στις πολύ μικρές παραμορφώσεις και η μη-γραμμική εξάρτιση της από το εύρος των παραμορφώσεων.

Το καταστατικό μοντέλο Hardening Soil Small Model προσφέρει τη δυνατότητα να συμπεριλάβει όλα αυτά τα χαρακτηριστικά. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο Hardening Soil Model, χρησιμοποιεί τις ίδιες παραμέτρους καθώς επίσης και το αρχικό μέτρο διάτμησης του εδάφους Go και την διατμητική παραμόρφωση γ_{0,7} στην οποία το τέμνον μέτρο διάτμησης Gs μειώνεται στο 70% του Go.

5.1.1 ΑΡΧΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗ-ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΣΗ

Ο Masing (1926) περιέγραψε την υστερητική συμπεριφορά των κύκλων αποφόρτισης-επαναφόρτισης με τους εξής όρους: Το μέτρο διάτμησης κατά την αποφόρτιση ισούται με το εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης που αντιστοιχεί στην καμπύλη της αρχικής φόρτισης .Η μορφή της καμπύλης αποφόρτισηςεπαναφόρτισης είναι ίδια αλλά διπλάσια σε μέγεθος σε σχέση με την καμπύλη που αντιστοιχεί στις αρχικές συνθήκες φόρτισης. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η οριακή διατρητική παραμόρφωση γ0.7 μπορεί να εκφρασθεί με την ακόλουθη σύνθεση από τη σχέση Soil-Drnevich:

 $\gamma_{0.7 \text{ re-loading}} = 2\gamma_{0.7 \text{ virgin-loading}}$ (1)

Το HS small model συνεπώς υιοθετεί τον νόμο του Masing διπλασιάζοντας την οριακή διατμητική παραμόρφωση γ_{0.7} η οποία προέρχεται από τις αρχικές συνθήκες φόρτισης. Αν η πλαστικότητα στο HS model επηρεάζει άμεσα την μείωση της δυσκαμψίας για μικρές παραμορφώσεις στις αρχικές συνθήκες φόρτισης, η οριακή διατμητική παραμόρφωση που ορίζεται απ' τον χρήστη είναι πάντοτε διπλάσια. Έπειτα, οι υπόλοιποι παράμετροι ακαμψίας είναι έτσι ορισμένες ώστε η φθίνουσα καμπύλη δυσκαμψίας για μικρές παραμορφώσεις να προσεγγίζεται αρκετά καλά. Στα ακόλουθα σχήματα απεικονίζεται ο νόμος του Masing και η μείωση της τέμνουσας δυσκαμψίας κατά την αρχική φόρτιση και κατά την αποφόρτισηεπαναφόρτιση.



(Σχήμα 44): Υστερητική συμπεριφορά εδαφικού υλικού σύμφωνα με τον νόμο του Masing



Figure 7.5 Stiffness reduction in initial- or primary loading and in unloading / reloading

(<u>Σχήμα 45</u>):

Μείωση δυσκαμψίας κατά την αρχική φόρτιση και κατά την αποφόρτιση-επαναφόρτιση

5.1.2 OI ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ HS SMALL MODEL

Συγκριτικά με το μοντέλο Hardening Soil, το HS small model χρησιμοποιεί δύο επιπλέον παραμέτρους δυσκαμψίας: το G₀^{ref} και το γ_{0.7}. Όλες οι άλλες παράμετροι συμπεριλαμβανομένου και των εναλλακτικών παραμέτρων δυσκαμψίας παραμένουν ίδιες. Ο λόγος Poisson v_{ur} θεωρείται σταθερός, όπως σε όλα τα καταστατικά μοντέλα του Plaxis, ώστε το μέτρο διάτμησης G₀^{ref} να μπορεί να υπολογιστεί απ' το μέτρο Young για πολύ μικρές παραμορφώσεις από τη σχέση G₀^{ref}=E₀^{ref}/(2(1+vur)). Η οριακή διατμητική παραμόρφωση γ_{0.7} είναι η διατμητική παραμόρφωση στην οποία το τέμνον μέτρο διάτμησης Gs_{ref} μειώνεται σε 0.722G₀^{ref} και η τιμή της προέρχεται από τις αρχικές συνθήκες φόρτισης. Συνοπτικά οι παράμετροι δυσκαμψίας που εισάγονται στο HS small model είναι οι εξής:

m: παράμετρος για την εξάρτηση της δυσκαμψίας από την τάση	[-]
E ₅₀ ref: τέμνον μέτρο ελαστικότητας υπό τριαξονική φόρτιση	[KN/m²]
E _{oed} ref: τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε μονοδιάστατη συμπίεση	[KN/m ²]
E _{ur} ref: μέτρο ελαστικότητας κατά την αποφόρτιση-επαναφόρτιση	[KN/m ²]
v _{ur} : λόγος Poisson κατά την αποφόρτιση-επαναφόρτιση	[-]
G₀ ^{ref} : μέτρο διάτμησης για πολύ μικρές παραμορφώσεις (ε<10⁻ ⁶)	[KN/m ²]
γ₀.ァ: διατμητική παραμόρφωση κατά την οποία Gs=0.722Go	[-]

5.1.3 ΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ G₀ ΚΑΙ γ_{0.7}

Ένα πλήθος παραγόντων επηρεάζουν τις παραμέτρους για μικρές παραμορφώσεις G₀ και γ_{0.7}. Οι πιο σημαντικοί απ' αυτούς είναι οι ενεργές τάσεις του εδάφους και ο λόγος κενών e. Στο HS small model η εξάρτηση των τάσεων από τα μέτρο διάτμησης G₀ λαμβάνεται υπ' όψιν με την ακόλουθη σχέση:

$$G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m$$

Η τιμή της οριακής διατμητικής παραμόρφωσης γ_{0.7} είναι ανεξάρτητη από την μέση τάση. Στο HS small model οι αλλαγές στον υπολογισμό του λόγου κενών θεωρούνται αμελητέες και γι' αυτό δεν επηρεάζουν τις παραμέτρους του υλικού. Παρ' όλα αυτά η γνώση του αρχικού λόγου κενών του υλικού μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη για τον υπολογισμό του μέτρο διάτμησης για πολύ μικρές παραμορφώσεις G₀. Μια καλή εκτίμηση δίνεται από την σχέση των Hardin & Black (1969):

(2)

$$G_0^{ref} = \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} 33 \,[MPa] \quad for \quad p^{ref} = 100 \,[kPa]$$
(3)

Ο Alpan (1970) εμπειρικά συσχέτισε τη δυναμική με την στατική εδαφική δυσκαμψία. Σύμφωνα με το διάγραμμα του Alpan η δυναμική δυσκαμψία ισοδυναμεί είτε με το μέτρο διάτμησης G₀ είτε με το μέτρο ελαστικότητας E0. Θεωρώντας ότι στο HS small model το στατικό μέτρο ελαστικότητας Estatic το οποίο ορίζεται από τον Aplan ισούται σχεδόν με το Eur κατά την αποφόρτιση-επαναφόρτιση , το διάγραμμα του Alpan μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της δυσκαμψίας που αντιστοιχεί σε μικρές παραμορφώσεις βασισμένη εξ' ολοκλήρου στο μέτρο ελαστικότητας κατά αποφόρτισης-επαναφόρτισης Eur. Αν και ο Alpan υποστηρίζει ότι η τιμή του λόγου E0/Eur μπορεί να υπερβεί το 10 για πολύ μαλακές αργίλους, στο HS model η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή για το λόγο E0/Eur ή G₀/Gur είναι 10.









(<u>Σχήμα 47</u>):

Επιρροή δείκτη πλαστικότητας στην μείωση της δυσκαμψίας σύμφωνα με τους Vucetic & Dobry (1991)

Όταν δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ανωτέρω πίνακας για την εύρεση της οριακής διατμητικής παραμόρφωσης γ_{0.7}, το οποίο συσχετίζει τον δείκτη πλαστιμότητας PI με την οριακή διατμητική παραμόρφωση. Χρησιμοποιώντας τη σχέση Hardin Drnevich η γ_{0.7} μπορεί να προκύψει από τις παραμέτρους αστοχίας του μοντέλου. Εφαρμόζοντας το κριτήριο Mohr -Coulomb στις σχέσεις (2) και (3) προκύπτει η σχέση:

$$\gamma_{0.7} \approx \frac{1}{9G_0} [2C'(1 + \cos(2\varphi')) - \sigma'_1(1 + K_0)\sin(2\varphi')]$$

όπου Κ₀ είναι ο λόγος μονοδιάστασης συμπίεσης και σ'1 η κατακόρυφη ενεργός τάση.

(4)

5.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Το προσομοίωμα σχεδιάστηκε εκ νέου σε Plaxis 2D 8.6 και εξετάστηκε πια σε περιοχή μικρών παραμορφώσεων. Αξιολογώντας την προηγούμενη ανάλυση προφανώς επιλέχθηκε δίστρωτο εδαφικό προφίλ με κεφαλόδεσμο (ελατήριο) δυσκαμψίας K=4200 kN/m (πλήρης πάκτωση).



90.0 m

(Σχήμα 48): Κύρια γεωμετρικά στοιχεία προσομοιώματος



(Σχήμα 49): Κάνναβος (mesh)

Τα αριθμητικά χαρακτηριστικά του εδάφους ορίστηκαν ως εξής:

• ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΩΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

```
ειδικό βάρος: γ =21 kN/m<sup>3</sup>
γωνία εσωτερικής τριβής: φ'=28°
γωνία διασταλτικότητας: ψ =5 °
συνοχή: c' =15 kPa
μέτρο ελαστικότητας φόρτισης: E'_{50}<sup>ref</sup> =17.5 MPa
μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης–επαναφόρτισης: E'<sub>unl,r</sub> <sup>ref</sup>=52.5 MPa
μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης: E<sub>oed</sub> <sup>ref</sup> =17.5 MPa,
γ<sub>0.7</sub> =3 *10<sup>-4</sup>
G<sub>o</sub> <sup>ref</sup>=100 MPa
λόγος του Poisson κατά την αποφόρτιση: v<sub>unl</sub> = 0.2
βαθμός ανομοιογένειας: m(power) = 1.0
συντελεστής αντοχής: R<sub>f</sub> = 0.9
τάση αναφοράς: p<sub>ref</sub> = 100 kPa,
συντελεστής διαπερατότητας: k = 10<sup>-7</sup> m/s
Οι αναλύσεις έγιναν για στραγγιζόμενες συνθήκες (Drained).
```

• ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

```
ειδικό βάρος: γ =21 kN/m<sup>3</sup>
γωνία εσωτερικής τριβής: φ'=28°
γωνία διασταλτικότητας: ψ =5 °
συνοχή: c' =15 kPa
μέτρο ελαστικότητας φόρτισης: E'<sub>50</sub><sup>ref</sup> =50 MPa
μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης–επαναφόρτισης: E'<sub>unl,r</sub> <sup>ref</sup>=150 MPa
μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης: E<sub>oed</sub> <sup>ref</sup> =50 MPa
γ<sub>0.7</sub> =3 *10<sup>-4</sup>
G<sub>o</sub> <sup>ref</sup>=40 MPa
λόγος του Poisson κατά την αποφόρτιση: v<sub>unl</sub> = 0.2
βαθμός ανομοιογένειας: m(power) = 1.0
συντελεστής αντοχής: R<sub>f</sub> = 0.9
τάση αναφοράς: p<sub>ref</sub> = 100 kPa,
συντελεστής διαπερατότητας: k = 10<sup>-7</sup> m/s
Οι αναλύσεις έγιναν για στραγγιζόμενες συνθήκες (Drained).
```

Για το πακτωμένο τμήμα του αγκυρίου χρησιμοποιήθηκε η επιλογή γεωυφάσματος (geotextile) με χαρακτηριστικό:

EA=2.008*10⁵ kN/m

Στη συνέχεια δίνεται η εικόνα του παραμορφωμένου καννάβου για κάθε ένα από τα στάδια εκσκαφής στις ημερομηνίες ενδιαφέροντος καθώς και τα συγκριτικά διαγράμματα που καταστρώθηκαν



(Σχήμα 50): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο πέμπτο στάδιο εκσκαφής (3/6/2013)



(Σχήμα 51): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο πέμπτο στάδιο εκσκαφής (26/6/2013)



(Σχήμα 52): Εικόνα παραμορφωμένου καννάβου στο τελικό στάδιο εκσκαφής (24/7/2013)



(Σχήμα 53): Ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων, Umax = 0.017 m



(Σχήμα 54): Διανύσματα Οριζόντιων Μετακινήσεων – Καμπτικών Ροπών



Καμπύλες Βάθους (m) – οριζόντιων μετακινήσεων (m)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας, λαμβάνοντας υπ' όψιν μας ότι στην επιστήμη της γεωτεχνικής μηχανικής υπεισέρχεται ένας μεγάλος βαθμός υποκειμενικότητας για την εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων, βάση για την παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσαν τα αντικειμενικά δεδομένα της κατασκευής και συγκεκριμένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τοίχου αντιστήριξης, η μηχανική συμπεριφορά των δομικών υλικών (πάσσαλοι, αγκύρια), η στρωματογραφία, η Στάθμη του Υδροφόρου Ορίζοντα και τέλος οι μετρήσεις από το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης (κλισιόμετρα).

Εφαρμόστηκε «Θαμιστική Μέθοδος» επαναπροσδιορισμού και επανελέγχου των παραμέτρων εδαφικής παραμορφωσιμότητας, με βασικές παραμέτρους βελτιστοποίησης αρχικά τους καταστατικούς νόμους Hardening Soil Model και Hardening Soil Small Model και τις παραμέτρους εκάστου. Βελτιστοποιήθηκε ακόμα η συμβολή του κεφαλόδεσμου λόγω της ατένειας του στην εκτός επιπέδου διεύθυνση και τέλος η στρωματογραφία.

Κριτήριο αξιολόγησης της ανάλυσης αποτέλεσε το συνταίριασμα των μετρηθεισών καμπύλων οριζόντιων παραμορφώσεων με τις προκύπτουσες από την ανάλυση με Π.Σ.

Η επίλυση με Hardening Soil Model μας απέδειξε ότι στην κατασκευή οι συνολικές διατμητικές παραμορφώσεις δεν ξεπέρασαν την τιμή γ=1%. Συνεπώς έγινε επιτακτική η επίλυση του προσομοιώματος με καταστατικό νόμο Hardening Soil Small Model, που δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε αυτό το εύρος παραμορφώσεων. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να τονιστεί η πολυπλοκότητα επίτευξης λύσης με καταστατικό νόμο Hardening Soil Small Model, λόγω της προσθήκης δύο επιπλέον παραμέτρων (Go, γ_{0.7})

Η επίτευξη συνταιριάσματος των καμπυλών τόσο από άποψη μέγιστης τιμής όσο και κατανομής έγινε εφικτή και με τα δύο καταστατικά προσομοιώματα.

Στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης, έγιναν επιπροσθέτως υπολογισμοί συντελεστών ασφαλείας με υπολογισμό τύπου "phi/c reduction" για τις βέλτιστες λύσεις καθενός από τα καταστατικά προσομοιώματα. Σκοπός ήταν η αποτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης και η πρόβλεψη πιθανών μηχανισμών αστοχίας.

6.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ HARDENING SOIL

Η ανάλυση μέσω διαδικασίας "phi/c reduction" για το προσομοίωμα που έδωσε το βέλτιστο συνταίριασμα καμπυλών κατέληξε σε συντελεστή ασφαλείας **FS=1.25**. Η τιμή αυτή θεωρείται αποδεκτή οριακά από την σκοπιά της γεωτεχνικής προσέγγισης στο πρόβλημα.

Η αστοχία σε αυτό το προσομοίωμα προήλθε από την εξόλκευση αγκυρίων και όχι από ολίσθηση εδαφικού πρίσματος (κατά Kranz) ή καμπτική αστοχία του πασσάλου (Mmax< 500 kNm).



(Σχήμα 55): Επαυξητικές παραμορφώσεις - Καμπτικές ροπές πασσάλου.

6.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ HARDENING SOIL SMALL

Ομοίως, η διαδικασία υπολογισμού συντελεστή ασφαλείας "phi/c reduction" επαναλήφθηκε και για το προσομοίωμα που έδωσε το βέλτιστο συνταίριασμα καμπυλών με καταστατικό νόμο Hardening Soil Small. Ο συντελεστής ασφαλείας ανήλθε σε **FS=1.40**. Η τιμή αυτή θεωρείται αποδεκτή.

Η αστοχία σε αυτό το προσομοίωμα προήλθε από συνδυασμένη ολίσθηση εδαφικού πρίσματος (κατά Kranz) και καμπτική αστοχία του πασσάλου (Mmax> 500kNm).



(Σχήμα 56): Επαυξητικές μετακινήσεις - Καμπτικές ροπές πασσάλου.

<u>6.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>

Με βάση τα παραπάνω αποδείχθηκε ότι η κατασκευαστική λύση που δόθηκε ήταν πραγματικά η βέλτιστη πράγμα που προφανώς επιβεβαιώνεται και από την καλή συμπεριφορά της κατασκευής μετά την ολοκλήρωση των εργασιών έως και σήμερα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γερόλυμος Ν. (2007), «Γεωτεχνικός υπολογισμός της νέας λύσης για την εκσκαφή και προσωρινή αντιστήριξη του κυρίως σταθμού», Τεχνική έκθεση για την AΓΕΚ-IMERGILO S.p.A-ALSTOM Transport S.A, Σταθμός Αγίας Παρασκευής
- Καββαδάς Μ. (2007), «Ανάλυση Βαθιών Εκσκαφών με τον Ευρωκώδικα 7» (Αντιστηρίξεις με εύκαμπτα πετάσματα και προεντεταμένες αγκυρώσεις), Ημερίδα ΣΠΟΛΜΗΚ Τμήμα Λεμεσού
- Λάμαρης Χ. (2011), «Αντιστηρίξεις Πρανών εκσκαφής», Δελτίο ΣΠΜΕ
- W. P. Hong, J. M. Yun, J. H. Lee, (1997) "Horizontal Displacement of Anchored Retention Walls for Underground Excavation"
- Digilit Inclinometer Probe 50302599, Manual
- PLAXIS 2D, 2012. Material models, Tutorial manual
- Γεωργιάννου Β.Ν. (2000), "Χρήση Γεωτεχνικών Οργάνων Οργανομετρήσεις".
 Επιστημονικές Εκδόσεις «Γρ. Παρισιάνος»
- Persson H. & Sigstrom D. (2010), «Staged excavation in soft clay supported by a cantilever sheet pile wall», Master's Thesis in the Geo and Water Engineering. Chalmers University of Technology, Sweden.
- Παπαδοπούλου Κ. (2011), «Παραμετρική ανάλυση αντιστηρίξεων με προεντεταμένες αγκυρώσεις», Μεταπτυχιακή εργασία. Ε.Μ.Π.
- Στάυρου Β. (2010), «Αντιστήριξη βαθειών εκσκαφών με προεντεταμένες αγκυρώσεις: Παραμετρικές αναλύσεις», Μεταπτυχιακή εργασία. Ε.Μ.Π.
- Γιαννακοπούλου Ε. (2014) «Τριδιάστατη ανάλυση εκσκαφής και προσωρινής αντιστήριξης σταθμού μετρό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων», Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
- Γκαζέτας Γ., Μπουκουβάλας Γ., Καββαδάς Μ., Γερόλυμος Ν. (2011), «Υπολογιστική Γεωτεχνική», Σημειώσεις. Ε.Μ.Π.
- Xanthakos P. (1991):"Ground Anchors and Anchored Structures", John Wiley and Sons Publications U.S.A.
- Χριστούλας Σ.(1998): "Επιλογές Εφαρμοσμένης Γεωτεχνικής Μηχανικής", (Κεφ.: Στοιχεία Εύκαμπτων Αντιστηρίξεων και Αγκυρώσεων), Εκδόσεις Συμεών.
- Καββαδάς Μ. (2005), "Στοιχεία Εδαφομηχανικής", Ε.Μ.Π.
- Αναγνωστόπουλος Α., Μιχάλης Η., (2004) «Σημειώσεις αντιστηρίξεων και καθιζήσεων λόγω εκσκαφών», Ε.Μ.Π.
- Κόττα Ν.(2009) « Μελέτη Σταθμού Αυτοκινήτων στην Πλατεία Πλατάνου, Συμπληρωματική Γεωτεχνική Έρευνα& Μελέτη, Τελικές προτάσεις για τη θεμελίωση – Αντιστηρίξεις»
- Λάμαρης Χ. (2013), «Κατασκευή Υπόγειου Σταθμού Αυτοκινήτων πλ. Πλατάνου στην Κηφισία, Ενόργανη Παρακολούθηση Βαθιάς Εκσκαφής – Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων»

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ſ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΟΥ KL-7
ΥΠΟΜΝΗΜΑ	
ncremental Displacement	Μετακινήσεις ανά θέση (ανά 0.50m), θεωρώντας την 1 ^η μέτρηση μηδενική. *
Cumulative Displacement	Συνολικές μετακινήσεις, θεωρώντας την 1 ^η μέτρηση μηδενική. *
Incremental Deviation	Πραγματικό προφίλ κλισιομετρικού σωλήνα.
Cumulative Deviation	Προφίλ κλισιομετρικού σωλήνα ως προς την κατακόρυφο, έχοντας ένα σταθερό σημείο, είτε την αιχμή (bottom – fixed) είτε την κεφαλή του σωλήνα (top – fixed).

* (Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η προβολή των μετακινήσεων ως προς την κατακόρυφο, αγνοώντας το πραγματικό προφίλ του κλισιομετρικού σωλήνα)









101

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΜΗ







ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ Γ2 - Γ3Σ - Γ5



ΑΜΜΩΔΗΣ ΑΡΓΙΛΟΣ

PI = 15%

Εκτός κλίμακας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ PLAXIS 3D

ſ

Συνθήκες πλήρους πάκτωσης





Οριζόντιες Μετατοπίσεις



Υπολογισμός δυσκαμψίας



Συνθήκες άρθρωσης



Εύστρεπτη : στροφή



Οριζόντιες Μετατοπίσεις



Υπολογισμός δυσκαμψίας

K = P / umax ⇒ K = 900 kN/m



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΕΡΓΟΥ

ſ

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ & ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ





ΑΠΟΨΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΟΝ ΜΑΡΤΙΟ 2013





ΑΠΟΨΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΟΝ ΜΑΙΟ 2013





ΑΠΟΨΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΟΝ ΑΥΓΟΥΣΤΟ 2013