ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Θ. ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ
Πτυχιούχος MSc-DIC Γεωλόγος

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2015

ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Θ. ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ
Πτυχιούχος MSc-DIC Γεωλόγος

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας

Τομέας Γεωλογίας

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 30/03/2015

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής Βασίλειος Χρηστάρας, Επιβλέπων

Καθηγητής Γεώργιος Δημόπουλος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Καθηγητής Στέφανος Τσότσος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγήτρια Θεοδώρα Τίκα-Βασιλικού

Καθηγητής Χρήστος Αναγνωστόπουλος

Καθηγητής Γεώργιος Δημόπουλος

Καθηγητής Αδαμάντιος Κίλιας

Καθηγητής Σπυρίδων Παυλίδης

Καθηγητής Στέφανος Τσότσος

Καθηγητής Βασίλειος Χρηστάρας

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

ISBN:

Στην αγαπημένη μου οικογένεια

Περίληψη

Τα υπολειμματικά εδάφη δημιουργούνται από την επί τόπου αποσάθρωση των πετρωμάτων και αποτελούν μία μεγάλη κατηγορία εδαφών των οποίων η μηχανική συμπεριφορά διαφέρει της συμπεριφοράς των ιζηματογενών εδαφών. Οι κλιματολογικές, οι τοπογραφικές και οι γεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής είναι οι παράγοντες που καθορίζουν τις διαδικασίες αποσάθρωσης και τα προϊόντα της, τα οποία εξαρτώνται από την ορυκτολογική σύσταση και τη δομή του μητρικού πετρώματος. Είναι σημαντικό ότι οι θεωρίες που διέπουν τη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών αναπτύχθηκαν βασισμένες στη συμπεριφορά των ιζηματογενών εδαφών και για το λόγο αυτό η εφαρμογή τους στα υπολειμματικά εδάφη οδηγεί σε μη ρεαλιστικές προσεγγίσεις και σε εσφαλμένες εκτιμήσεις.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής διερευνούνται, αξιολογούνται και τελικώς ερμηνεύονται, με την εισαγωγή ενός μοντέλου ανάλυσης ευστάθειας, οι μηχανισμοί αστοχίας που παρατηρήθηκαν σε μια σειρά ανοικτών ορυγμάτων σε υπολειμματικά εδάφη γνευσιακής προέλευσης στην περιοχή της Ασπροβάλτας. Η υπολειμματική δομή του μητρικού πετρώματος, η ορυκτολογική σύσταση των υπολειμματικών εδαφών και οι μεταβολές του βαθμού κορεσμού αποτελούν τους τρεις κύριους παράγοντες με βάση τους οποίους ερμηνεύονται τα αποτελέσματα μιας πλήρους εργαστηριακής έρευνας για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων γεωυλικών.

Στη συνέχεια της εργασίας προτείνεται η εφαρμογή ενός μοντέλου ανάλυσης ευστάθειας πρανών, το οποίο λαμβάνει υπόψη το γεωλογικό μοντέλο αποσάθρωσης, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υπολειμματικών εδαφών όπως προσδιορίστηκαν εργαστηριακά και τη συμπεριφορά τους σε ακόρεστες συνθήκες. Η εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου περιγράφει ικανοποιητικά το ιστορικό και τη μορφή των αστοχιών των ορυγμάτων της περιοχής έρευνας, συμβάλλοντας στην αντιμετώπιση του δύσκολου προβλήματος της επιλογής των παραμέτρων αντοχής για το σχεδιασμό τεχνικών έργων σε υπολειμματικά εδάφη.

Abstract

Residual soils are formed from the *in situ* weathering of rocks, they constitute a big class of soils and their mechanical behavior differs significantly from that of sedimentary soils. The factors that determine the weathering processes are the climatic, the morphological and the geological conditions and their products depend on the structural and mineralogical features of the parent rock. It is important to mention that the theoretical framework on which the research of the mechanical behavior of soils has evolved is based on the behavior of sedimentary soils, and for that reason the application of standard practices in soil mechanics on residual soils may lead to nonrealistic approaches and false estimations.

This thesis investigates, evaluates and finally interprets the failure mechanisms in a series of cut slopes that took place in residual soils of gneisseous origin, by introducing a methodology of slope stability analysis for these soils. A full scale laboratory testing program is implemented for the assessment of the mechanical behavior of the considered soils and the results are interpreted on the basis of the three distinct characteristics of residual soils, the inherited structure of the parent rock, the mineralogical composition and the changes in the degree of saturation.

Based on the *in situ* and laboratory investigation, the application of a slope stability analysis model is proposed, which takes into account the weathering profile and the different types of soils present, as well as the mechanical parameters of them for both saturated and unsaturated conditions, derived from the laboratory investigation. The application of the proposed model simulates accurately the cases and the types of failures of the cut slopes that were investigated, contributing to the difficult task of choosing design strength parameters for construction projects in residual soils.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Βασίλειο Χρηστάρα, επιβλέποντα της παρούσας διατριβής, η συνεχής καθοδήγηση και αδιάκοπη υποστήριξη του οποίου αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες για την ολοκλήρωση αυτής της ερευνητικής προσπάθειας.

Ευχαριστώ θερμά τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής της διατριβής, Καθηγητή κ. Γεώργιο Δημόπουλο και Καθηγητή κ. Στέφανο Τσότσο, των οποίων οι υποδείξεις και συμβουλές ήταν πραγματικά πολύτιμες.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και συναδέλφους μου στο Τμήμα Γεωλογίας για την βοήθεια και την άψογη συνεργασία από την αρχή των ακαδημαϊκών μου χρόνων. Θα ήθελα να κάνω ειδική αναφορά στον κ. Χρήστο Μάττα, τον κ. Δημήτριο Βογιατζή, τον κ. Γεώργιο Παπαθανασίου, τον κ. Θεόδωρο Στιμάρατζη και την κα. Μαρία Παπαχρήστου. Ειδική μνεία θα ήθελα να κάνω στον Επικ. Καθηγητή κ. Νικόλαο Καντηράνη για την βοήθεια και την επιστημονική του καθοδήγηση στην ορυκτολογική διερεύνηση που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή.

Ευχαριστώ πολύ την εταιρία ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε. και ιδιαίτερα τον κ. Γεώργιο Μαυρίδη, που μου παραχώρησε το λογισμικό ανάλυσης ευστάθειας πρανών PcStabl, για την αμέριστη επιστημονική του βοήθεια.

Ευχαριστώ πολύ τον φίλο μου Επικ. Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Γεωργιάδη, του οποίου η βαθιά επιστημονική γνώση αποτέλεσε έμπνευση για μένα.

Ακόμα θα ήθελα να αναφερθώ στη συμβολή των προπτυχιακών φοιτητών κ. Θεοφάνη Ζάχου και κας. Μαρίας Καζίλη, οι οποίοι στα πλαίσια των διπλωματικών τους εργασιών συνέβαλαν στην παρούσα έρευνα.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον φίλο και στενό επιστημονικό και επαγγελματικό μου συνεργάτη κ. Θωμά Μακεδόνα για την αδιάκοπη ηθική και επιστημονική υποστήριξή του.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τη σύζυγό μου για την ανιδιοτελή συμπαράστασή της.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη προς τους γονείς μου για την καθοδήγηση, την ηθική και υλική υποστήριξη σε όλα τα στάδια της ζωής μου και για όλες τις θυσίες που έχουν κάνει ώστε να έχω τη δυνατότητα να ασχοληθώ απερίσπαστα με το ερευνητικό μου έργο.

Λίστα Περιεχομένων

Λίστα Εικόνων

Λίστα Πινάκων

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα υπολειμματικά εδάφη είναι τα προϊόντα της αποσάθρωσης των πετρωμάτων και συνήθως βρίσκονται σε ακόρεστες συνθήκες υγρασίας. Τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά καθορίζονται από το βαθμό αποσάθρωσης. Για το σχεδιασμό τεχνικών έργων και ειδικότερα για τη μελέτη της ευστάθειας πρανών σε αυτά είναι απαραίτητη η πλήρης κατανόηση της συμπεριφοράς τους, από το άρρηκτο πέτρωμα έως το εντελώς αποσαθρωμένο έδαφος. Οι περισσότερες κλασσικές έννοιες που σχετίζονται με τη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών έχουν αναπτυχθεί με βάση τα χαρακτηριστικά των ιζηματογενών εδαφών και η εφαρμογή τους στα υπολειμματικά εδάφη δεν ερμηνεύει με ακρίβεια τις διαδικασίες και τις καταστάσεις στις οποίες υποβάλλονται. Οι συχνές αστοχίες έργων σε υπολειμματικά εδάφη σε όλο τον κόσμο ενισχύουν την ανάγκη υιοθέτησης πρακτικών που να εξασφαλίζουν τον αξιόπιστο σχεδιασμό έργων σε αυτά.

Αφορμή για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής αποτέλεσε μία σειρά αστοχιών σε ανοιχτά ορύγματα κατά μήκος της Εγνατίας Οδού στην περιοχή της Ασπροβάλτας. Στην περιοχή αυτή επικρατούν σύνθετες γεωλογικές συνθήκες που χαρακτηρίζονται από την παρουσία υλικών γνευσιακής προέλευσης και διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης. Το ερώτημα που τέθηκε σχετικά με την εκτίμηση της επικινδυνότητας των ορυγμάτων που δεν είχαν αρχικά αστοχήσει, ανέδειξε τις δυσκολίες εφαρμογής ενός ρεαλιστικού μοντέλου ανάλυσης της ευστάθειας, που να ερμηνεύει τις παρατηρούμενες αστοχίες και να εκτιμά με αξιόπιστο τρόπο την επικινδυνότητα των ευσταθών προς το παρών ορυγμάτων.

Η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη της τα ειδικά χαρακτηριστικά τους που οφείλονται στις διαδικασίες σχηματισμού τους, όπως είναι η επίδραση της παρουσίας υπολειμματικής δομής, η έντονη επιρροή της ορυκτολογικής τους σύστασης, καθώς επίσης και η μηχανική τους συμπεριφορά σε ακόρεστες συνθήκες.

1.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Κύριος στόχος της έρευνας ήταν η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας και η εκτίμηση των μηχανισμών αστοχίας που την καθορίζουν. Για να επιτευχθεί αυτό έπρεπε να γίνει διαχωρισμός των υπολειμματικών εδαφών σε Ενότητες (κατηγορίες) ίδιου βαθμού αποσάθρωσης και να διερευνηθούν εργαστηριακά τα ιδιαίτερα φυσικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους αυτών Ενοτήτων. Τα αποτελέσματα αξιολογούνται και ερμηνεύονται με βάση τα ειδικά χαρακτηριστικά της κάθε Ενότητας, δηλαδή την ανισοτροπία, την επιρροή της δομής και την επιρροή της ορυκτολογικής σύστασης. Η παραπάνω διαδικασία αποσκοπούσε τελικά στο να επιλεγούν ρεαλιστικές παράμετροι σχεδιασμού για τις επιμέρους Ενότητες υπολειμματικών εδαφών στην περιοχή έρευνας.

Ένας εξίσου σημαντικός στόχος της έρευνας ήταν ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση μιας πειραματικής διάταξης για τη διεξαγωγή τριαξονικών δοκιμών αντοχής με δυνατότητα ελέγχου του βαθμού κορεσμού κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής τους. Η ανάπτυξη μιας τέτοιας διάταξης πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του ΑΠΘ και στόχευε στη διερεύνηση της διατμητικής αντοχής των εξεταζόμενων εδαφών σε σχέση με τις μεταβολές της μύζησης καθώς και τον προσδιορισμό της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης Εδάφους. Η τεχνογνωσία που αποκτήθηκε σχετικά με την εκτέλεση δοκιμών σε ακόρεστες συνθήκες δίνει την προοπτική συνέχισης της έρευνας στο γνωστικό αντικείμενο της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών.

Ο τελικός στόχος που τέθηκε ήταν η πρόταση μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας ανάλυσης που να ερμηνεύει τους μηχανισμούς αστοχίας στα υπολειμματικά εδάφη της Ασπροβάλτας, λαμβάνοντας υπόψη ένα ρεαλιστικό γεωλογικό μοντέλο, τις εργαστηριακά προσδιορισμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των παρόντων γεωυλικών, καθώς και τις μεταβολές τους σε σχέση με τις μεταβολές του βαθμού κορεσμού. Η μεθοδολογία αυτή θα μπορεί να εφαρμοστεί σε υπολειμματικά εδάφη που ανήκουν στην ίδια κλιματική ζώνη, αφού οι διαδικασίες σχηματισμού τους και επομένως τα ειδικά χαρακτηριστικά τους και η μηχανική τους συμπεριφορά, ελέγχονται από τις κλιματολογικές συνθήκες σε συνδυασμό βέβαια με το γεωλογικό περιβάλλον και τη μορφολογία.

1.3 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η έρευνα χωρίζεται σε τρεις κύριες ενότητες. Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζεται η υφιστάμενη έρευνα των υπολειμματικών εδαφών. Στη δεύτερη ενότητα παρουσιάζεται η έρευνα σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες. Στην τρίτη ενότητα παρουσιάζεται η μελέτη των μηχανισμών αστοχίας σε υπολειμματικά εδάφη με βάση το θεωρητικό πλαίσιο και τα αποτελέσματα της έρευνας που προκύπτουν από τις δύο αρχικές ενότητες. Πιο συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2, το οποίο χωρίζεται σε πέντε Υποκεφάλαια, παρουσιάζεται η έρευνα των υπολειμματικών εδαφών.

1. Στο πρώτο αναφέρονται η προέλευση και οι διαδικασίες σχηματισμού των υπολειμματικών εδαφών με αναλυτική αναφορά στις διαδικασίες αποσάθρωσης, στο ρόλο του κλίματος και της τοπογραφίας, στα γενικά χαρακτηριστικά των υπολειμματικών εδαφών και στο ρυθμό αποσάθρωσής τους. Τέλος παρουσιάζονται οι συνθήκες σχηματισμού των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας καθώς και το προτεινόμενο μοντέλο αποσάθρωσης της περιοχής.
2. Στο δεύτερο παρουσιάζονται οι γενικές αρχές ταξινόμησης των υπολειμματικών εδαφών και γίνεται η ταξινόμηση των υπολειμματικών εδαφών της περιοχής έρευνας.
3. Στο τρίτο αναλύεται η επίδραση της ορυκτολογικής σύστασης και της μικροδομής στη μηχανική συμπεριφορά των υπολειμματικών εδαφών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντίστοιχης έρευνας στην περιοχή έρευνας.
4. Στο τέταρτο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και τα αποτελέσματα της εργαστηριακής έρευνας των φυσικών ιδιοτήτων των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας και γίνεται η σύγκρισή τους με τιμές φυσικών ιδιοτήτων υπολειμματικών εδαφών του Ελλαδικού χώρου, ανάλογης προέλευσης.
5. Τέλος στο πέμπτο Υποκεφάλαιο παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων των εξεταζόμενων υλικών.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες. Χωρίζεται σε πέντε Υποκεφάλαια.

1. Στο πρώτο αναφέρονται τα εισαγωγικά στοιχεία του κεφαλαίου και η σκοπιμότητα εκπόνησης της έρευνας σε ακόρεστες συνθήκες.
2. Στο δεύτερο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της μηχανικής των ακόρεστων εδαφών με αναλυτική περιγραφή των φάσεων του ακόρεστου εδάφους και των ιδιοτήτων τους, παρουσίαση της θεωρίας της μύζησης και ανάλυση των μεταβλητών εντατικής κατάστασης που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά σε ακόρεστες συνθήκες. Στη συνέχεια περιγράφεται η συμπεριφορά των μεταβολών όγκου και διατμητικής αντοχής των εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες και αναφέρονται οι ανάγκες διεξαγωγής έρευνας σε σχέση με το συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο.

3. Στο τρίτο παρουσιάζονται οι μέθοδοι εργαστηριακής διερεύνησης των μηχανικών παραμέτρων σε ακόρεστες συνθήκες και η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον παραπάνω σκοπό.
4. Στο τέταρτο περιγράφονται οι διαδικασίες εκτέλεσης εργαστηριακών δοκιμών σε ακόρεστες συνθήκες που εφαρμόστηκαν για τις ανάγκες της έρευνας.
5. Τέλος, στο πέμπτο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η αξιολόγηση της εργαστηριακής διερεύνησης των παραμέτρων ακόρεστης συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά, τα προβλήματα και οι προτεινόμενες μέθοδοι ανάλυσης που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την ευστάθεια πρανών σε υπολειμματικά εδάφη.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η έρευνα της ευστάθειας των τεχνητών πρανών σε υπολειμματικά εδάφη στην περιοχή της Ασπροβάλτας, η οποία χωρίζεται σε έξι Υποκεφάλαια.

1. Στο πρώτο παρουσιάζεται το γεωμορφολογικό, το γεωλογικό και το υδρογεωλογικό περιβάλλον της περιοχής μελέτης.
2. Στο δεύτερο περιγράφεται το ιστορικό των κατολισθητικών φαινομένων που έλαβαν χώρα στη συγκεκριμένη περιοχή
3. Στο τρίτο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευστάθειας των θέσεων ενδιαφέροντος ακολουθώντας τη συμβατική προσέγγιση ανάλυσης, δηλαδή με θεώρηση ομοιογενών και ισότροπων εδαφικών υλικών και με την εφαρμογή ανάστροφων αναλύσεων. Η θεώρηση αυτή εξετάζει τις συνθήκες ευστάθειας αποκλειστικά με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ορυγμάτων.
4. Στο τέταρτο γίνεται η εκτίμηση της επικινδυνότητας των ορυγμάτων που δεν αστόχησαν ήδη.
5. Στο πέμπτο αξιολογούνται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της παραπάνω μεθοδολογίας ανάλυσης.
6. Στο έκτο Υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία της ανάλυσης ευστάθειας πρανών σε υπολειμματικά εδάφη. Τα γεωυλικά θεωρούνται ετερογενή με διακριτές ζώνες αδυναμίας, εκτιμώνται οι επί τόπου μηχανισμοί μείωσης των παραμέτρων αντοχής τους και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας στα ορύγματα της περιοχής έρευνας.

Τέλος, τα συμπεράσματα των τριών κύριων ενοτήτων της έρευνας παρατίθενται στο Κεφάλαιο 6 μαζί με τις προοπτικές συνέχισής της.

Κεφάλαιο 2

Υπολειμματικά Εδάφη

2.1 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

2.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Υπολειμματικό έδαφος είναι ένα γεωυλικό εδαφικής μορφής το οποίο δημιουργείται από την επί τόπου αποσάθρωση και αποδόμηση πετρώματος και δεν έχει μετακινηθεί από την αρχική του θέση. Τα υπολειμματικά εδάφη μπορεί να εμφανίζονται είτε ως διακριτά προϊόντα της αποδόμησης του μητρικού πετρώματος, είτε ως έντονα αποσαθρωμένα και εξαλλοιωμένα υλικά που περιέχουν δευτερογενή ορυκτά και δεν έχουν εμφανή ομοιότητα με το μητρικό υλικό. Ο σχηματισμός ενός μανδύα αποσάθρωσης σημαντικού πάχους είναι πολύ συνηθισμένος σε τέτοιου τύπου εδάφη. Το πάχος του μανδύα ποικίλει σημαντικά, ανάλογα με τις διεργασίες αποσάθρωσης και το βάθος μέχρι το οποίο δρουν.

Τα υπολειμματικά εδάφη έχουν χαρακτηριστικά τα οποία είναι σαφώς διαφορετικά από αυτά των εδαφών που δημιουργούνται από μεταφορά και απόθεση. Η συμβατική θεώρηση των εδαφών ως κοκκωδών υλικών ή ως υλικών αποτελούμενων από διαφορετικού μεγέθους σωματίδια δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά υπολειμματικά εδάφη. Τα σωματίδια των υπολειμματικών εδαφών αποτελούνται συνήθως από συσσωματώματα ή κρυστάλλους αποσαθρωμένων ορυκτών, τα οποία αν διαταραχθούν θραύονται και μεταπίπτουν σε μικρότερα σωματίδια. Επιπρόσθετα, τα υπολειμματικά εδάφη κληρονομούν την τεκτονική δομή και υφή του μητρικού πετρώματος, στοιχεία τα οποία επηρεάζουν δραστικά τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητές τους, καθιστώντας αδύνατη τη συσχέτιση αυτών με την κοκκομετρική διαβάθμιση και τη διάταξη των κόκκων, όπως συμβαίνει στη συμβατική θεώρηση της μηχανικής των εδαφών.

Η θεωρητική προσέγγιση της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών έχει βασιστεί στα ιζηματογενή εδάφη, δηλαδή σε εδάφη, τα οποία εξαιτίας των διαδικασιών διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης, θεωρούνται ομοιογενή και οι μηχανικές ιδιότητες αυτών εξαρτώνται σχεδόν αποκλειστικά από την ιστορική τους καταπόνηση (stress history). Οι παραπάνω παραδοχές δεν μπορούν να υιοθετηθούν για τα υπολειμματικά εδάφη. Είναι υλικά με έντονη ανομοιογένεια, χωρίς την επίδραση της ιστορικής καταπόνησης και ιδιότητες που ελέγχονται από τη σύσταση και την παρουσία μακροδομών και/ή μικροδομών. Για το λόγο αυτό στα υπολειμματικά εδάφη πρέπει κάθε φορά να ελέγχεται η ορθότητα της εφαρμογής των βασικών κανόνων εδαφομηχανικής (π.χ. εμπειρικές σχέσεις).

2.1.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ

Οι τρεις βασικοί τύποι αποσάθρωσης των πετρωμάτων είναι η *φυσική* ή *μηχανική*, η *χημική* και η *βιολογική* αποσάθρωση. Κατά τις διεργασίες αποσάθρωσης αποδομείταιι το μητρικό πέτρωμα και τα ορυκτά του απελευθερώνοντας εσωτερική

ενέργεια, μεταπίπτουν έτσι σε υλικά με μικρότερη εσωτερική ενέργεια, και επομένως μεγαλύτερη σταθερότητα.

Οι διαδικασίες μηχανικής αποσάθρωσης, όπως για παράδειγμα η *αποφόρτιση τάσεων* λόγω διάβρωσης, η *διαφορική θερμική παραμόρφωση* και οι *πιέσεις λόγω διόγκωσης από παγετό ή απόθεση άλατος*, επιφέρουν το θρυμματισμό του πετρώματος. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην έκθεση υγιών επιφανειών πετρώματος σε χημικές επιδράσεις και στην αύξηση της διαπερατότητας, διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό την κίνηση δραστικών χημικών διαλυμάτων μέσα σε αυτό. Οι χημικές διαδικασίες, κυρίως η υδρόλυση, η ανταλλαγή ιόντων και η οξείδωση, μετατρέπουν τα αρχικά ορυκτά του πετρώματος σε πιο σταθερά αργιλικά ορυκτά (Mitchel, 1976). Οι βιολογικές διαδικασίες αποσάθρωσης περιλαμβάνουν φυσικές και χημικές διεργασίες, όπως διαμελισμό από διείσδυση ριζών, βακτηριδιακή οξείδωση, μείωση σιδηρούχων και θειικών μειγμάτων κτλ (Pings, 1968). Πιο συγκεκριμένα οι διεργασίες που επιφέρουν τις μεταβολές των αρχικών πετρωμάτων είναι οι εξής:

Μηχανική αποσάθρωση:

Συντελείται με τη διάσπαση του πετρώματος και υποβάθμιση της συνοχής του, χωρίς να μεταβάλλεται η χημική του σύσταση. Κυριαρχεί σε περιοχές μεγάλου υψομέτρου και σε μεγάλο γεωγραφικό πλάτος, όπου η παρουσία του νερού περιορίζεται συνήθως στη στερεή φάση (χιόνι ή πάγος). Είναι ιδιαίτερα δραστική σε κλιματικές περιοχές με σημαντικές ημερήσιες θερμοκρασιακές μεταβολές.

Διαφορική θερμική παραμόρφωση. Οι διαδοχικές φάσεις ψύξης - θέρμανσης προκαλούν αντίστοιχα συστολή και διαστολή στα πετρώματα δημιουργώντας ρωγμές, διαρρήξεις, επιφέροντας τελικά τη χαλάρωση και τον αποχωρισμό τεμαχών. Μικροσκοπικά, οι διαφορετικοί συντελεστές διαστολής των ορυκτών δημιουργούν τάσεις στις επαφές των κόκκων και οδηγούν σε κοκκώδη θρυμματισμό. Επομένως οι διαδοχικές φάσεις ψύξης-θέρμανσης των πετρωμάτων αυξάνουν το πορώδες τους και τα κάνουν περισσότερο επιδεκτικά σε άλλες μορφές αποσάθρωσης. Επιπλέον, λόγω της κακής θερμικής αγωγιμότητάς των γεωυλικών, οι κύκλοι διαστολής και συστολής επιδρούν κυρίως στις εξωτερικές επιφάνειές τους, αναπτύσσοντας επίσης μεγάλες τάσεις. Με αυτόν τον τρόπο λεπιοειδή κομμάτια (φολίδες) απομακρύνονται σταδιακά από την επιφάνεια του μητρικού υλικού, διαδικασία που ονομάζεται αποφλοίωση.

Αποφόρτιση. Αποφλοίωση μπορεί να συμβεί και από αποφόρτιση, όταν σε μια ακολουθία σχηματισμών απομακρύνεται το ανώτερο στρώμα υπό την επίδραση της βαρύτητας σε συνδυασμό με τη δράση μετεωρικού νερού, επιφανειακής απορροής, από τη δράση του ανέμου ή από ανθρωπογενή δράση. Κατά την αποφόρτιση συμβαίνει εκτόνωση της πίεσης του υπερκείμενου τεμάχους με αποτέλεσμα την διαστολή της βραχόμαζας και τελικά την υποπαράλληλη ρωγμάτωση και φολίδωση (αποφλοίωση μεγάλης κλίμακας). Το βάθος της αποφόρτισης περιορίζεται περίπου στα 25 μέτρα όπου η τάση συμπίεσης και η εσωτερική τάση υπερισχύουν της τάσης ελαστικής διόγκωσης. Συνθήκες που ευνοούν την αποφόρτιση εμφανίζονται συνήθως σε μαζώδη, ομογενή πετρώματα (τα πετρώματα που έχουν τις ίδιες

φυσικές και χημικές ιδιότητες σε όλα τα σημεία τους), όπως είναι οι παχυστρωματώδεις ψαμμίτες.

Δράση παγετού. Σημαντικό παράγοντα μηχανικής καταπόνησης αποτελεί και ο παγετός. Η ευπάθεια του πετρώματος σε παγετό εξαρτάται από το βαθμό της διάρρηξής του, το πορώδες του, το μέγεθος και τη συνέχεια των πόρων του και το βαθμό κορεσμού του. Όταν το αποθηκευμένο νερό στους πόρους του πετρώματος παγώνει, αυξάνει σε όγκο μέχρι και 9% με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται πολύ μεγαλύτερες τάσεις στα τοιχώματα των πόρων και στις ρωγμές του. Επαναλαμβανόμενοι κύκλοι τήξης-πήξης του νερού των πόρων συνεισφέρουν στη διεύρυνση των ρωγμών του. Συνήθως χονδρόκοκκοι σχηματισμοί ανθίστανται καλύτερα στη δράση του παγετού σε σχέση με τους λεπτόκοκκους.

Άλλοι παράγοντες που υποβοηθούν τη φυσική αποσύνθεση πετρωμάτων είναι η ***απόθεση αλάτων*** στους πόρους των σχηματισμών (συναντάται κυρίως σε ιζηματογενείς σχηματισμούς π.χ. ασβεστόλιθους και δολομίτες και μάλιστα σε ξηρά κλίματα), η ***διείσδυση των φυτικών ριζών***, όλων των ειδών βλάστησης, σε μεγάλα βάθη ασκώντας πολύ μεγάλες τάσεις και τέλος η ***δράση ζώων*** (π.χ. τερμίτες, τρωκτικά, γαιοσκώληκες), τα οποία καταστρέφουν μεγάλες ποσότητες εδάφους υποβοηθώντας τη μηχανική αποσύνθεσή του.

Χημική – βιολογική αποσύνθεση:

Οδηγεί σε *ορυκτολογική μεταβολή* και *διάλυση των πετρωμάτων* και είναι η κυριότερη διεργασία σχηματισμού των υπολειμματικών εδαφών. Γενικά το νερό συντελεί αποτελεσματικά στη χημική διάβρωση, ενώ διατηρεί σε διάλυση ουσίες που αντιδρούν με τα ορυκτά των σχηματισμών, δηλαδή οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, οργανικά και νιτρικά οξέα. Τα παράγωγα των χημικών αντιδράσεων στην πλειονότητά τους καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο από τα αρχικά ορυκτά των μητρικών πετρωμάτων, εφόσον βρίσκονται σε πιο σταθερή ισορροπία με το περιβάλλον. Οι χημικές διεργασίες που υφίστανται οι διάφοροι σχηματισμοί είναι οι εξής:

***Οξείδωση*:** Αντίδραση των στοιχείων με το οξυγόνο, προς σχηματισμό οξειδίων και υδροξειδίων, ή οποιαδήποτε άλλη διαδικασία που προκαλεί την απώλεια ηλεκτρονίων και οδηγεί σε θετική φόρτιση των στοιχείων. Η οξείδωση επηρεάζει κυρίως πετρώματα που περιέχουν θειικά, ανθρακικά και πυριτικά άλατα του σιδήρου. Τα προϊόντα της οξείδωσης έχουν συνήθως μεγαλύτερο όγκο από τα ορυκτά του μητρικού πετρώματος και επομένως φαινόμενα διόγκωσης λόγω οξείδωσης συμβάλλουν στον κατακερματισμό του πετρώματος (Mason, 1949).
Π.χ. σχηματισμός θειικού οξέος από λεπτόκοκκο σιδυροπυρίτη:

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O = 2FeSO_4 + 2HSO_4$$

***Υδρόλυση*:** Αντίδραση των ορυκτών με το νερό, αντικατάσταση των κατιόντων μετάλλων από κατιόντα υδρογόνου (H^+) και ανιόντα υδροξυλίου (OH^-) που οδηγεί στο σχηματισμό νέων ορυκτών. Η υδρόλυση θεωρείται ο πιο σημαντικός παράγοντας χημικής αποσάθρωσης (Zaruba & Mencl, 1976). Όταν τα αργιλοπυριτικά ορυκτά (π.χ. οι καλιούχοι άστριοι) υφίστανται υδρόλυση σχηματίζονται αργιλικά

ορυκτά (π.χ. καολίνης), κυρίαρχα συστατικά των υπολειμματικών εδαφών. Κατά την αντίδραση αυτή τα αστριούχα ορυκτά διαστέλλονται με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του πετρώματος. Η κοκκώδης αποσύνθεση των αδρομερών πυριγενών πετρωμάτων, π.χ. των γρανιτών, αποδίδεται κατά μεγάλο ποσοστό στην υδρόλυση των αστρίων, ενώ σε αυτή συνεισφέρουν και άλλα γρανιτικά ορυκτά, όπως ο βιοτίτης.

$$2KAlSi_3O_8 \text{ (Μικροκλινής)} + 2H^+ + H_2O \text{ --->> } Al_2Si_2O_5(OH)_4 \text{ (άργιλος)} + 2K^+ + 4SiO_2$$

***Ενυδάτωση(/αφυδάτωση)*:** Σχετίζεται με την απορρόφηση(/αφαίρεση) μορίων νερού από το κρυσταλλικό πλέγμα των ορυκτών με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων ορυκτών. Κατά τη δημιουργία νέων ένυδρων ορυκτών προκαλείται συχνά ογκομετρική αύξηση (π.χ. σε αργιλικά ορυκτά)η οποία και παράγει μεγαλύτερες μηχανικές τάσεις με αποτέλεσμα τη διάσπαση του πετρώματος.

***Διάλυση*:** Το νερό (μετεωρικό ή αποθηκευμένο στο πορώδες του πετρώματος) ως διαλύτης αποσυνθέτει τα ορυκτά, υποβοηθούμενο από το ανθρακικό οξύ (H_2CO_3), το οποίο σχηματίζεται από το υπάρχον διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) . Η αντίδραση αυτή είναι περισσότερο συνηθισμένη σε ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθος).

***Ανθράκωση*:** το CO_2 διαλύεται στο νερό και σχηματίζεται ανθρακικό οξύ (H_2CO_3) το οποίο αντιδρά με τα ορυκτά π.χ. διαλυτοποιεί τον ασβεστίτη ($CaCO_3$) σε ασβέστιο και διττανθρακικά ιόντα.

$$H_2O + CO_2 \text{ -------->> } H_2CO_3$$

Αυτή η χημική αντίδραση εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα σε άνθρακα και την υγρασία ενώ υπερισχύει σε ασβεστολιθικά και δολομιτικά εδάφη. Είναι επίσης υπεύθυνη για τη μετατροπή τέτοιων περιοχών σε καρστ.

Άλλες χημικές αντιδράσεις δευτερεύουσας σημασίας από άποψη συχνότητας εμφάνισης, σημαντικές όμως για τη δημιουργία των υπολειμματικών εδαφών είναι:

Ιοντοανταλλαγή, δηλαδή ανταλλαγή ιόντων α)μεταξύ ιόντων εδαφικών διαλυμάτων και κρυστάλλων, β)ανταλλαγή μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του ίδιου ορυκτού ή με άλλα ορυκτά, διεργασία συνηθισμένη σε αργίλους. Η διαδικασία αυτή δεν οδηγεί σε διαφοροποίηση της βασικής δομής του αργιλικού ορυκτού, επιφέρει όμως αλλαγές στις αποστάσεις των εσωτερικών κρυσταλλικών στρωμάτων, και μπορεί για παράδειγμα να μετατρέψει τον ιλλίτη σε μοντμοριλλονίτη.

Χύλωση, δηλαδή η δημιουργία χυλικής ένωσης, όπου οργανικά παράγωγα φυτών, τα οποία συνδέονται με ιοντικούς και ομοιοπολικούς δεσμούς με μεταλλικά ιόντα έχουν τη δυνατότητα να απομακρύνουν χημικά στοιχεία (κάλιο, νάτριο, πυρίτιο κ.α.) σε ευνοϊκές συνθήκες pH, όπου αυτά είναι διαλυτά. Η διαδικασία αυτή επιταχύνει το ρυθμό της υδρόλυσης (Jackson & Keller, 1970).

Απόπλυση εδαφικού υλικού και μετανάστευση ιόντων από τη διάλυσή τους στο νερό. Η ευκινησία των ιόντων εξαρτάται από το ιοντικό δυναμικό τους (Fe: ανθίσταται περισσότερο, Si: σχετικά δυσκίνητο, Al: σχεδόν στατικό).

Επιπρόσθετα, τα χουμικά οξέα που περιέχονται στους ανώτερους εδαφικούς ορίζοντες, τα νιτρικά οξέα και το επιπλέον CO_2 που σχηματίζονται από την οργανική

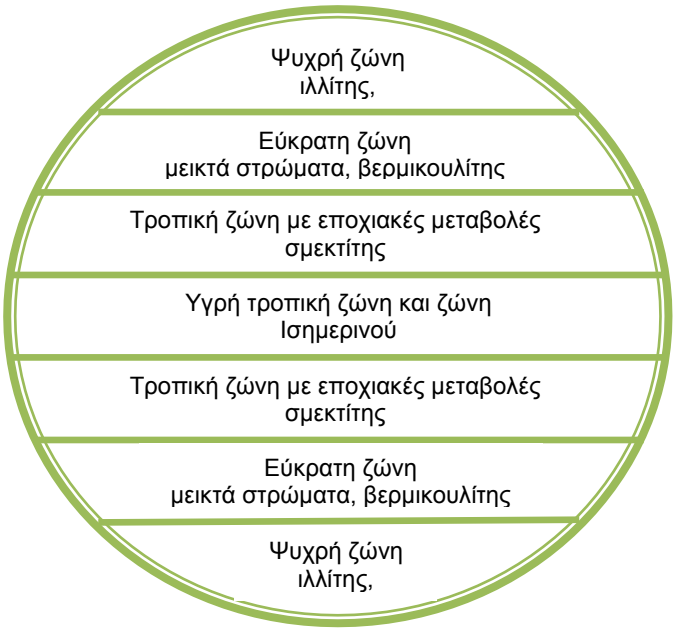
αποσύνθεση συμμετέχουν, αν και όχι σημαντικά, στην αποσύνθεση του εδάφους μειώνοντας το pH του εδαφικού περιβάλλοντος.

Τα αποτελέσματα των μηχανικών και χημικών αντιδράσεων πολλές φορές δεν μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους. Λαμβάνουν χώρα σχεδόν ταυτόχρονα και αλληλεπιδρούν, υποβοηθώντας οι μεν τις δε. Όταν, για παράδειγμα, λόγω της μηχανικής αποσάθρωσης δημιουργούνται ρωγμές ή θρυμματισμός στο μητρικό πέτρωμα, μεγαλώνει η επιφάνεια έκθεσής του ενώ παράλληλα διευκολύνεται η διείσδυση του νερού και άλλων ουσιών που προκαλούν αρχικά διάβρωση σε επιφάνειες διαχωρισμού και μετέπειτα την περαιτέρω έως και ολοκληρωτική αποσύνθεσή του.

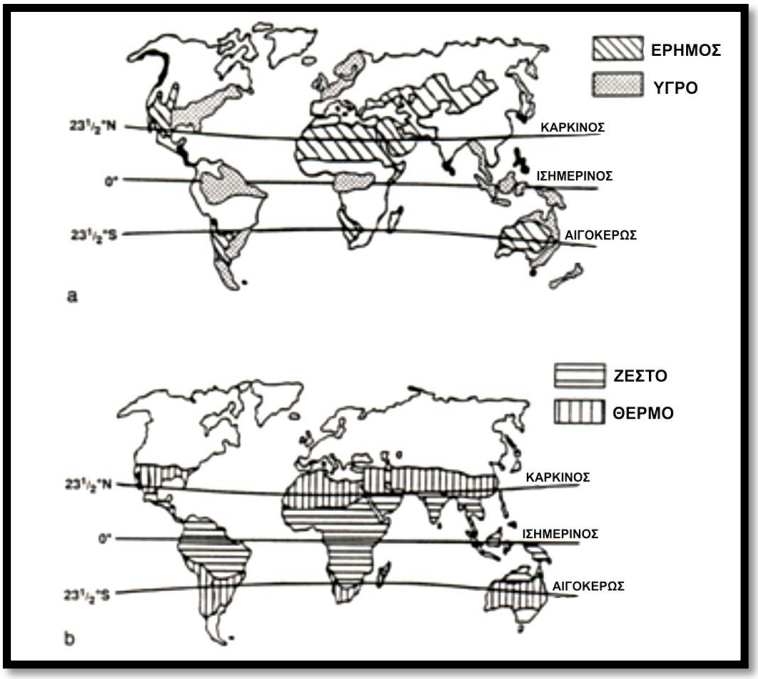
2.1.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ

Το κλίμα έχει σημαντική επίδραση στο είδος και το ρυθμό της αποσάθρωσης (Weinert, 1964), (Weinert, 1974), (Morin & Ayetey, 1971). Η μηχανική αποσάθρωση κυριαρχεί σε ξηρά κλίματα, ενώ η έκταση και ο ρυθμός της χημικής αποσάθρωσης ελέγχεται από τη διαθεσιμότητα σε υγρασία και από τη θερμοκρασία. Ο ρυθμός των χημικών αντιδράσεων επιταχύνεται περίπου στο διπλάσιο για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10° C.

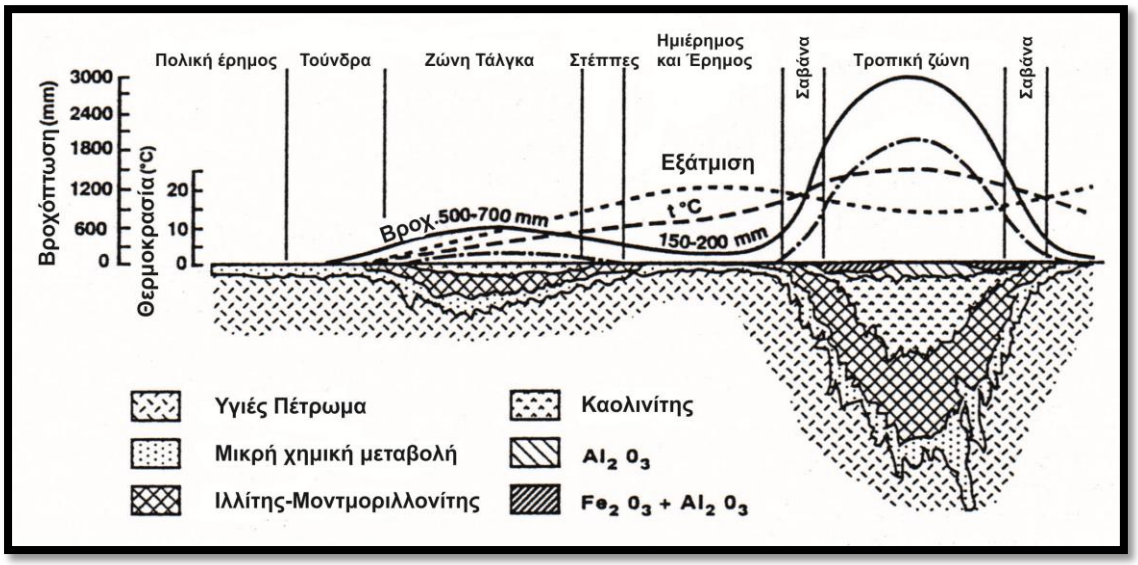
Σύμφωνα με τον Uehara (1982), η μεταβολή της ορυκτολογικής σύνθεσης των αργιλικών υπολειμματικών εδαφών μπορεί να εκτιμηθεί σε παγκόσμια κλίμακα με βάση την απόσταση από τον Ισημερινό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.1 (Uehara, 1982). Αύτη είναι μία απλουστευμένη θεώρηση, διότι όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.2, το κλίμα δε μεταβάλλεται ομοιόμορφα σε σχέση με την απόσταση από τον Ισημερινό, αλλά εξαρτάται και από την τοπογραφία, τα ρεύματα των ωκεανών, κ.λπ. Παρόλα αυτά η Εικόνα 2.1.1 είναι μία ενδεικτική προσέγγιση της επίδρασης του κλίματος στα προϊόντα της αποσάθρωσης. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η βροχόπτωση κοντά στον Ισημερινό ευνοούν το σχηματισμό αργιλικών ορυκτών μικρής ενεργότητας (π.χ. καολίνης), ενώ καθώς μεταβαίνουμε προς την εύκρατη ζώνη όπου η βροχόπτωση ελαττώνεται, κυριαρχούν αργιλικά ορυκτά υψηλής ενεργότητας (π.χ. σμεκτίτης). Η επίδραση του παγκόσμιου κλίματος στην αποσάθρωση των πετρωμάτων και στα εδαφικά προϊόντα αυτών, περιγράφηκε από τον Strakhov (1967) και παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1.3 (Strakhov, 1967).



Εικόνα 2.1.1: Επιρροή του παγκόσμιου κλίματος στην ανάπτυξη αργιλικών ορυκτών (Uehara, 1982)



Εικόνα 2.1.2: Παγκόσμιες κλιματικές ζώνες κατανομής ξηρού-υγρού και ζεστού-ψυχρού κλίματος



Εικόνα 2.1.3: Επιρροή του παγκόσμιου κλίματος στο βάθος και στα προϊόντα αποσάθρωσης (Strakhov, 1967)

Το κλίμα δεν επιδρά μόνο στις διαδικασίες δημιουργίας των υπολειμματικών εδαφών, αλλά και στις ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Στις εύκρατες και στις ημι-τροπικές περιοχές η στάθμη των υπόγειων νερών συναντάται συνήθως βαθύτερα από τα 5-10μ και έχοντας υπ' όψη ότι ο σχηματισμός των υπολειμματικών εδαφών συντελείται από την επιφάνεια του εδάφους και επεκτείνεται βαθύτερα, μπορεί να θεωρηθεί πως η πλειονότητα των υλικών αυτών εντοπίζεται στην ακόρεστη ζώνη. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα υλικά αυτά να υπόκεινται σε κύκλους ξήρανσης και ύγρανσης, λόγω εποχιακών διακυμάνσεων της υπόγειας στάθμης ή εναλλαγής υγρών και ξηρών περιόδων. Τα φαινόμενα της ξήρανσης και ύγρανσης, δηλαδή οι μεταβολές στο βαθμό κορεσμού επηρεάζουν ποικιλοτρόπως τη συμπεριφορά των εδαφών και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο γεωτεχνικό σχεδιασμό (Blight G. E., 1983).

Η ετήσια βροχόπτωση είναι ακόμα ένας σημαντικός παράγοντας επιρροής του κλίματος στις ιδιότητες των υπολειμματικών εδαφών. Έρευνες σε έντονα αποσαθρωμένους γρανίτες έχουν δείξει πως ο δείκτης πόρων των εδαφικών προϊόντων αυξάνεται με αύξηση της ετήσιας βροχόπτωσης, συντελώντας στο σχηματισμό πιο συμπιεστών ζωνών (Brink & Kantey, 1961).

2.1.4 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η τοπογραφία αφορά στοιχεία όπως το *ανάγλυφο*, η *μορφολογική κλίση* του εδάφους, οι *υψομετρικές διαφορές* και η *έκθεση των πρανών*. Η *κλίση*, το *υψόμετρο* και η *γεωμετρία* ενός πρανούς καθορίζουν το *ρυθμό αποσάθρωσης* και την ικανότητα των διαβρωτικών διεργασιών να απομακρύνουν τα παραγόμενα υλικά. Για να είναι δυνατή η δημιουργία ενός *μανδύα αποσάθρωσης* σε βάθος θα πρέπει ο ρυθμός αποσάθρωσης να υπερβαίνει το ρυθμό απομάκρυνσης των παραγόμενων υλικών.

Η τοπογραφία επηρεάζει το ρυθμό αποσάθρωσης κυρίως μέσω της διαθέσιμης ποσότητας νερού και το ρυθμό με τον οποίο αυτό κινείται στη ζώνη αποσάθρωσης. Έντονο ανάγλυφο συνεπάγεται αύξηση της απορροής του νερού της

βροχόπτωσης, ενώ ήπιο ανάγλυφο συνεπάγεται αύξηση της ποσότητας νερού που κατεισδύει. Επίσης οι πλαγιές με μικρότερο υψόμετρο έχουν περισσότερη διαθέσιμη υγρασία λόγω της υψηλότερης στάθμης υπόγειου νερού και περισσότερη βλάστηση (κυρίως σε υγρά και εύκρατα κλίματα). Σε επίπεδες επιφάνειες οι συνθήκες διάβρωσης είναι πιο ομαλές, σε κοίλες επιφάνειες πρανών η αποσάθρωση αυξάνεται στα κατάντη, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε κυρτές επιφάνειες. Γενικότερα το απότομο ανάγλυφο και η μεγάλη μορφολογική κλίση συνεπάγονται και μεγαλύτερο ρυθμό διάβρωσης και επομένως μανδύες αποσάθρωσης με μεγάλο πάχος σχηματίζονται σε κοιλάδες και πρανή με ήπιες κλίσεις (Morin & Ayetey, 1971).

Μελέτες σε τομές πρανών υπολειμματικών εδαφών τα οποία σχηματίστηκαν από πυριγενή πετρώματα έδειξαν πως το βάθος της αποσάθρωσης αυξάνεται προς τα κατάντη αυτών. Τα κυρίαρχα αργιλικά ορυκτά στα ανάντη είναι καολινίτης/αλλοϋσίτης, ενώ στα κατάντη κυριαρχεί ο σμεκτίτης (Fitzpatrick & Le Roux, 1977). Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των αργιλικών ορυκτών, εκτός από το κλίμα, τη βροχόπτωση και την τοπική τοπογραφία, παίζει και η αποστράγγιση στο εσωτερικό ενός μανδύα αποσάθρωσης. Συνθήκες καλής αποστράγγισης και υψηλές τιμές βροχόπτωσης ευνοούν το σχηματισμό καολινίτη, ενώ πρανή με ήπιες κλίσεις και κακή αποστράγγιση ευνοούν το σχηματισμό μοντμοριλονίτη (Van der Merwe, 1965). Συμπερασματικά, όσο ευνοϊκότερες είναι οι συνθήκες αποστράγγισης, οι οποίες ελέγχονται από την τοπογραφία, τόσο εντονότερη είναι η χημική αποσάθρωση, σε σχέση πάντοτε με το διαθέσιμο νερό.

2.1.5 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

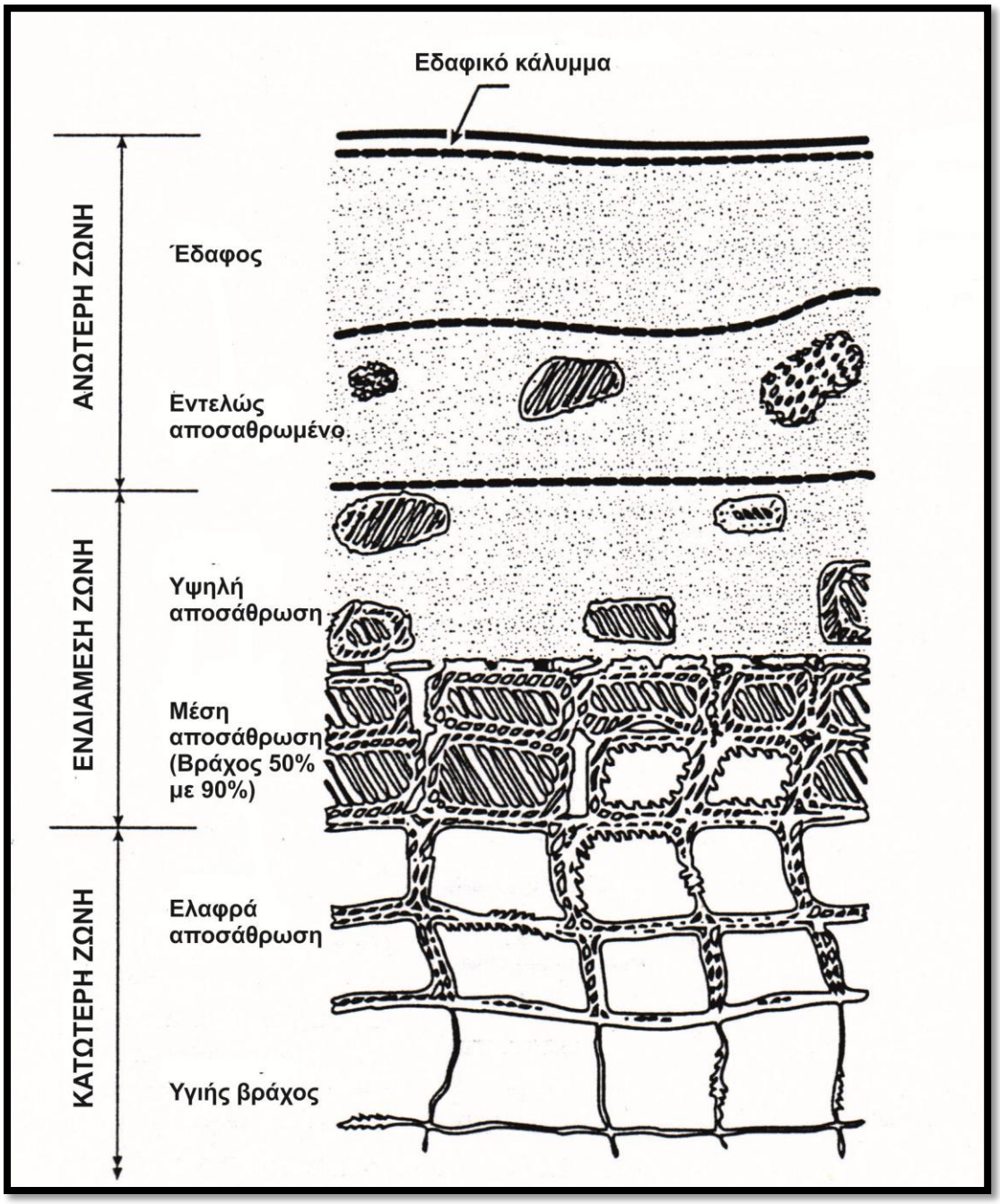
Οι διαδικασίες σχηματισμού ενός προφίλ υπολειμματικού εδάφους είναι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εξαιρετικά πολύπλοκες και είναι λίγες οι θεωρήσεις και παραδοχές που μπορούν να έχουν γενική εφαρμογή. Οι ιδιότητες αυτών των υλικών πρέπει να εξετάζονται κάθε φορά κατά περίπτωση, καθώς είναι επισφαλής η συσχέτιση των ιδιοτήτων τους με αυτές του μητρικού πετρώματος, όπως επίσης είναι επισφαλής και η συσχέτιση των ιδιοτήτων δύο υπολειμματικών εδαφών προερχόμενων από το ίδιο πέτρωμα αλλά σε διαφορετικές περιοχές. Για παράδειγμα υπολειμματικά εδάφη προερχόμενα από αποσάθρωση γρανιτικών πετρωμάτων στο ζεστό και υγρό κλίμα της χερσονήσου της Μαλαισίας αναμένεται να έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες από εδάφη ίδιας προέλευσης, στο ψυχρότερο και λιγότερο υγρό κλίμα του Ελλαδικού χώρου.

Οι χημικές μεταβολές και οι ακολουθίες σχηματισμού ορυκτών κατά τη διαδικασία αποσάθρωσης είναι εξαιρετικά περίπλοκες. Στην Εικόνα 2.1.4 φαίνεται μία ακολουθία αποσάθρωσης που οδηγεί στο σχηματισμό αργιλικών ορυκτών (Van der Merwe, 1965). Μια τέτοια ακολουθία μπορεί να διακοπεί ή και να αντιστραφεί σε συγκεκριμένα στάδια, αν υπάρξουν μεταβολές στο κλίμα ή στις συνθήκες αποστράγγισης.

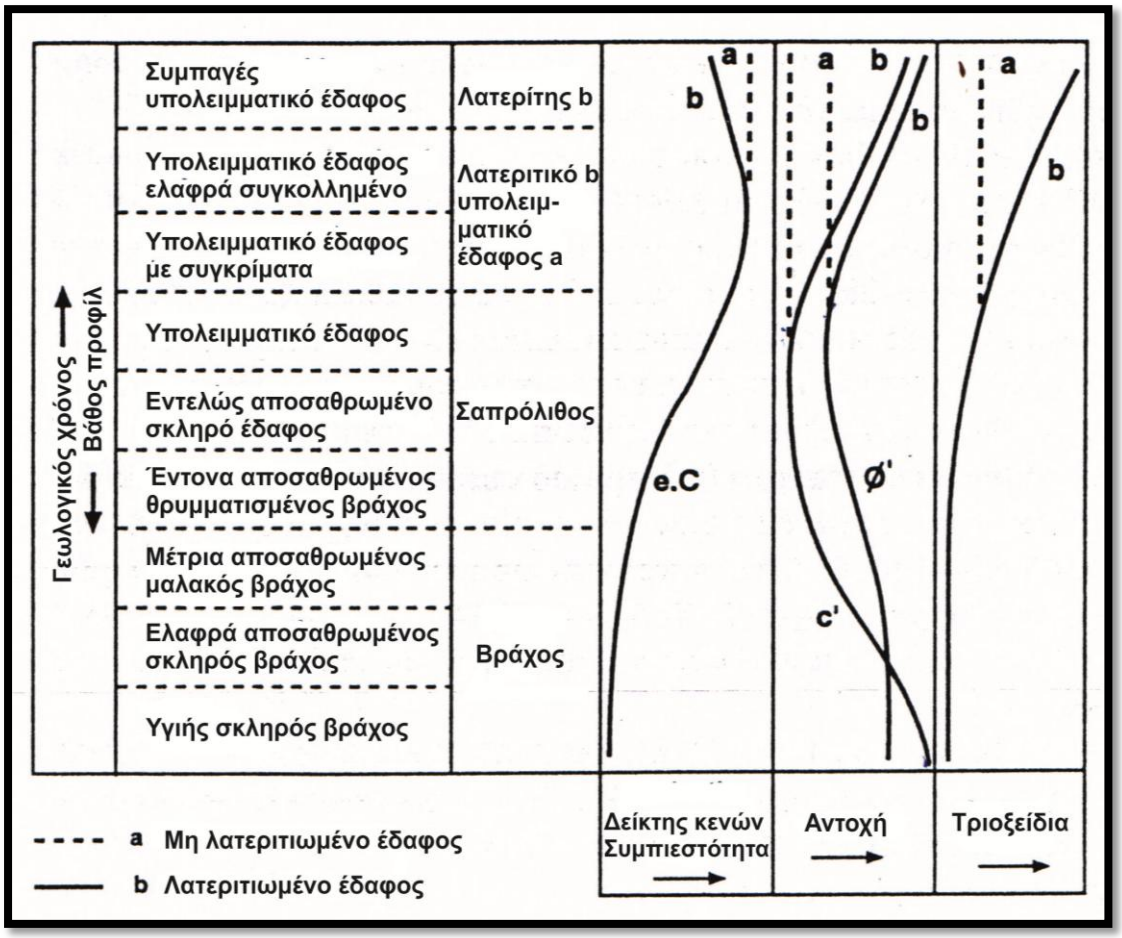
Εικόνα 2.1.4: Προτεινόμενη ακολουθία αποσάθρωσης προς το σχηματισμό αργιλικών ορυκτών (Van der Merwe, 1965)

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των υπολειμματικών εδαφών είναι ο τύπος του προφίλ αποσάθρωσης που δημιουργείται κατά το σχηματισμό τους. Οι διαδικασίες αποσάθρωσης εκδηλώνονται από την επιφάνεια και επιδρούν σε βάθος μέσω των ρωγματώσεων ή άλλων οδών κατείσδυσης στο υλικό ανάμεσα στις επιφάνειες διακλάσεων. Η ένταση της αποσάθρωσης γενικά μειώνεται με το βάθος καθώς μειώνεται η πυκνότητα των ρωγματώσεων. Είναι σύνηθες να εντοπίζονται ογκόλιθοι υγιούς πετρώματος έγκλειστοι σε τεμάχη αποσαθρωμένου υλικού σε τομές υπολειμματικών εδαφών, προερχόμενων από πυριγενή πετρώματα (Lumb P. , 1961). Μία τυπική τομή υπολειμματικού εδάφους αποτελείται από τρεις διακριτές ζώνες όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.5.

Η ανώτερη ζώνη αποτελείται από έντονα αποσαθρωμένο και εκπλυμένο εδαφικό υλικό, το οποίο έχει υποστεί διαταραχή ή μετακίνηση. Η ενδιάμεση ζώνη αποτελείται επίσης από έντονα αποσαθρωμένο υλικό, το οποίο διατηρεί κάποια στοιχεία της δομής του μητρικού πετρώματος. Τα υλικά της ενδιάμεσης ζώνης ονομάζονται σαπρόλιθοι (saprolites). Οι σαπρόλιθοι είναι υλικά με αντοχή ή συνοχή παρόμοια με ενός εδαφικού υλικού που διατηρούν τα φυσικά χαρακτηριστικά και την υφή του πετρώματος προέλευσης. Στην Εικόνα 2.1.6 (Tuncer & Lohnes, 1977) φαίνεται η μεταβολή ενός υγιούς πετρώματος σε σαπρόλιθο με την ακολουθία αποσάθρωσης να καταλήγει στη δημιουργία λατερίτη. Οι λατερίτες είναι έντονα αποσαθρωμένα και μεταλλαγμένα υπολειμματικά εδάφη χαμηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις οξειδίων του σιδήρου και αργιλίου. Η δημιουργία λατεριτών δεν είναι αναπόφευκτη και εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες.



Εικόνα 2.1.5: Τυπικό προφίλ υπολειμματικού εδάφους (Little, 1969)



Εικόνα 2.1.6: Μεταβολές σε προφίλ αποσάθρωσης (Tuncer & Lohnes, 1977)

Ο διαχωρισμός ζωνών αποσάθρωσης σε σχέση με το βάθος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.6 (Tuncer & Lohnes, 1977) δε μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προφίλ αποσάθρωσης. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι διαδικασίες αποσάθρωσης πλήττουν τα πετρώματα μέσω της τεκτονικής τους δομής δημιουργώντας προφίλ μορφής "ψαροκόκαλου". Στις περιπτώσεις αυτές είναι πιθανό να εντοπίζονται ζώνες πλήρως εδαφοποιημένου υλικού βαθύτερα ή σε επαφή με ζώνες υγιούς βράχου. Για το λόγο αυτό προτείνεται να γίνεται βαθμονόμηση της αποσάθρωσης των υλικών που συναντώνται σε ένα μανδύα αποσάθρωσης βάσει του Συστήματος Ταξινόμησης Βαθμού Αποσάθρωσης Υλικών όπως δείχνει ο Πίνακας 2.1.1 (GCO, 1988).

2.1.6 ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ

Ο ρυθμός με τον οποίο εξελίσσεται η αποσάθρωση εξαρτάται εκτός από τη δυναμική των διαβρωτικών παραγόντων και από την αποσαθρωσιμότητα της εξεταζόμενης βραχομάζας. Η τελευταία ελέγχεται από την ορυκτολογική σύσταση, την υφή, το πορώδες, την αντοχή καθώς και την παρουσία και τη συχνότητα εμφάνισης επιφανειών ασυνέχειας, δηλαδή σχιστότητας, στρώσης, διακλάσεων, ρωγμών κάθε είδους και ρηγμάτων. Έχει υιοθετηθεί η άποψη πως οι διαδικασίες σχηματισμού εδαφών συντελούνται σταδιακά κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων, της τάξης των εκατομμυρίων ετών. Η άποψη αυτή ισχύει κατά κύριο λόγο για ενδογενείς διαδικασίες εξαλλοίωσης όπως είναι για παράδειγμα οι υδροθερμικές. Από τη στιγμή της επιφανειακής έκθεσης ενός πετρώματος ευπρόσβλητου σε

διαδικασίες αποσάθρωσης ο ρυθμός αποσάθρωσης αυξάνεται δραματικά σε χρονικές περιόδους της τάξης των ετών ή και των μηνών κατά περίπτωση.

Πίνακας 2.1.1: Σύστημα Ταξινόμησης Βαθμού Αποσάθρωσης Υλικών (GCO, 1988).

Περιγραφή	Βαθμός	Γενικά Χαρακτηριστικά
Υπολειμματικό Έδαφος	VI	▪ Καταστροφή αρχικής δομής ▪ Αναζυμώνεται με πίεση χεριού ή δακτύλου
Εντελώς αποσαθρωμένος	V	▪ Δατήρηση αρχικής δομής ▪ Αναζυμώνεται με πίεση χεριού ή δακτύλου ▪ Εντελώς αποχρωματισμένο σε σχέση με τον υγιή βράχο ▪ Αποφλοίωση κατά τη διαβροχή ▪ Μηδενικές τιμές N Schmidt
Έντονα αποσαθρωμένος	IV	▪ Σπάει σε δύο κομμάτια με το χέρι ▪ Τιμές N σφύρας Schmidt έως 25 ▪ Δείκτης αντοχής πενετρομέτρου χειρός >250 kPa ▪ Δεν αποφλοιώνεται κατά τη διαβροχή ▪ Ξεκόλλημα κόκκων από την επιφάνεια ▪ Κούφιος ήχος σε χτύπημα γεωλογικού σφυριού
Μέτρια αποσαθρωμένος	III	▪ Δεν σπάει με το χέρι αλλά σπάει εύκολα με γεωλογικό σφυρί ▪ Τιμές N σφύρας Schmidt 25-45 ▪ Κούφιος ή ελαφρώς καμπανοειδής ήχος σε χτύπημα γεωλογικού σφυριού ▪ Καθόλου εύθρυπτο υλικό ▪ Παρουσία κηλίδων αποχρωμάτισης
Ελαφρά αποσαθρωμένος	II	▪ Σπάει δύσκολα με γεωλογικό σφυρί ▪ Τιμές N σφύρας Schmidt >45 ▪ Καμπανοειδής ήχος σε χτύπημα γεωλογικού σφυριού ▪ Τιμές αντοχής κοντά σε αυτές του υγιούς βράχου ▪ Διατήρηση αρχικού χρώματος αλλά εμφάνιση κηλίδων κοντά σε επιφάνειες διακλάσεων
Υγιής Βράχος	I	▪ Μη ορατή αποχρωμάτιση ▪ Σπάει δύσκολα με γεωλογικό σφυρί ▪ Καμπανοειδής ήχος σε χτύπημα γεωλογικού σφυριού

2.1.7 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΣΠΡΟΒΑΛΤΑΣ

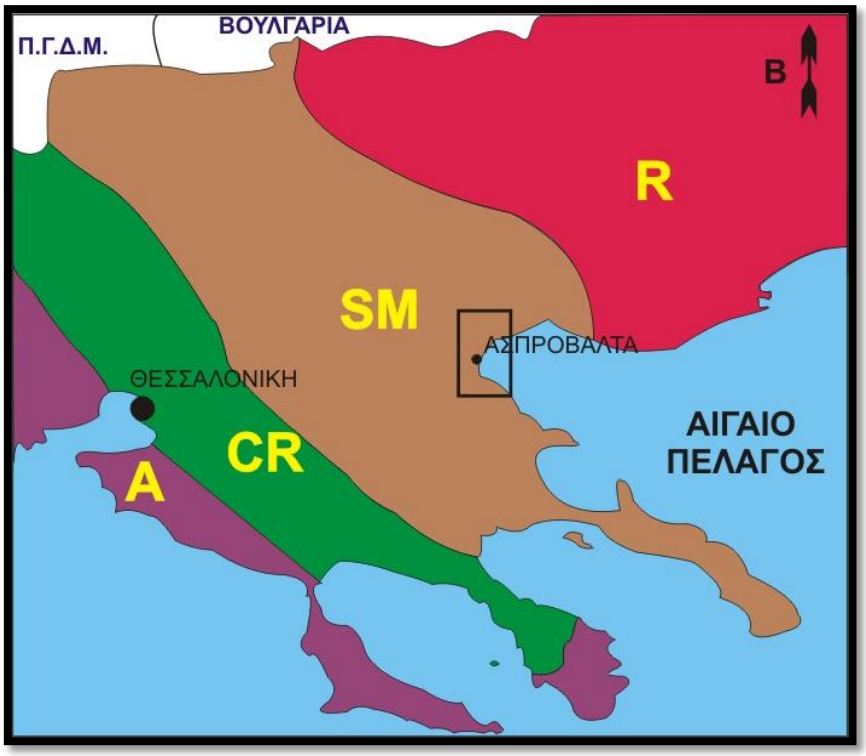
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η προέλευση, η εμφάνιση, οι διαδικασίες αποσάθρωσης και η ορυκτολογία των υπολειμματικών εδαφών που εμφανίζονται στην περιοχή της Ασπροβάλτας και έχουν συνδεθεί με αστοχίες σε τεχνητά πρανή της Εγνατίας Οδού. Το ανάγλυφο της περιοχής παρουσιάζει έντονες κλίσεις πρανών και καλά αναπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο. Σε επόμενα κεφάλαια θα αναλυθούν οι

φυσικές και μηχανικές παράμετροι των υλικών αυτών και θα γίνει συσχέτιση με την προέλευσή τους.

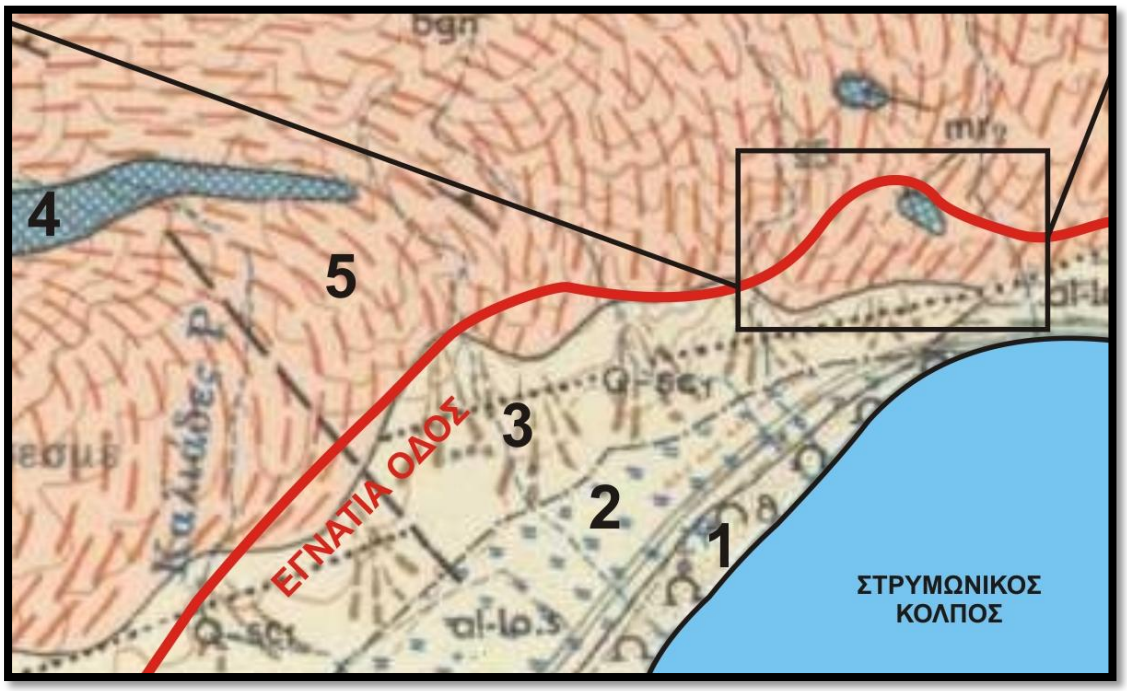
Τα πετρώματα που συγκροτούν την περιοχή των τεχνητών πρανών που μελετήθηκαν ανήκουν στη Σερβομακεδονική μάζα (Εικόνα 2.1.7) και είναι κυρίως βιοτιτικοί και διμαρμαρυγιακοί γνεύσιοι, που διακόπτονται από άφθονες παρεμβολές σχιστοποιημένων απλιτικών και γρανιτικών σωμάτων και φλεβών, καθώς και μικρές ενστρώσεις λευκών μαρμάρων (Εικόνα 2.1.8). Τα πετρώματα αυτής της γεωτεκτονικής ζώνης έχουν υποστεί έντονη καταπόνηση τόσο εξαιτίας των γενικών μεταμορφικών και τεκτονικών φάσεων που έπληξαν τη Σερβομακεδονική, όσο και από τις μαγματικές διεισδύσεις και από τις υδροθερμικές εξαλλοιώσεις που τις συνοδεύουν. Στη συνολική εικόνα της βραχόμαζας συμβάλλουν η μηχανική και η χημική αποσάθρωση, η ένταση των οποίων αυξάνεται δραματικά μετά την εκσκαφή των πρανών και την αποκάλυψη των υπολειμματικών εδαφών στην επιφάνεια, συνδεόμενη με την πετρολογική σύσταση και την τεκτονική δομή των σχηματισμών.

Οι γνεύσιοι της περιοχής είναι αδροκρυσταλλικοί με στρώσεις πάχους 1-2 m και έχουν σκούρο τεφρό χρώμα. Χαρακτηρίζονται από έντονη παρουσία βιοτίτη, και η σύστασή τους περιλαμβάνει επίσης χαλαζία, πλαγιόκλαστο, Κ-αστρίους και σε μικρότερα ποσοστά ασβεστίτη και αμφιβόλους. Τα ορυκτά αυτά έχουν υποστεί χημικές εξαλλοιώσεις ως απόρροια δύο κυρίως διαδικασιών: Αρχικά η κυκλοφορία υδροθερμικών ρευστών συντέλεσε στην έκπλυση του χαλαζία και τη δημιουργία αργιλικών ορυκτών από τις αλλοιώσεις του βιοτίτη και του πλαγιόκλαστου. Η μεταβολή των ορυκτών κατά τη διαδικασία της υδροθερμικής εξαλλοίωσης οδηγεί στην αύξηση του πορώδους των γεωυλικών. Σε δεύτερη φάση, κατά το στάδιο της χημικής αποσάθρωσης, δημιουργήθηκαν διογκούμενα αργιλικά ορυκτά προερχόμενα κυρίως από την υδρόλυση των αστρίων.

Η γεωλογική διερεύνηση της περιοχής μελέτης έδειξε ότι οι γνεύσιοι που συγκροτούν τα εξεταζόμενα πρανή, παρουσιάζουν ζώνες διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης, οι οποίες ακολουθούν συνήθως τις κύριες διευθύνσεις των τεκτονικών ασυνεχειών. Κατά μήκος αυτών των διευθύνσεων αναπτύσσονται είτε ζώνες πλήρως εδαφοποιημένων γνευσιακών υλικών, είτε ζώνες με βαθμό αποσάθρωσης III-V που αποτελούνται από γνευσιακά πετρώματα τα οποία μακροσκοπικά διατηρούν την υφή και τη δομή τους, οι μηχανικές τους ιδιότητες όμως είναι ιδιαίτερα υποβαθμισμένες. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα διακρίθηκαν τρεις ενότητες ή μονάδες γνευσιακών υλικών οι Α, Β και C (Εικόνα 2.1.9). Τα υλικά της ενότητας Α είναι υγιή ή ελαφρά αποσαθρωμένα μέλη των γνευσίων. Τα υλικά της ενότητας Β παρουσιάζουν βαθμό αποσάθρωσης III-V και είναι αυτά που, όπως προαναφέρθηκε, διατηρούν μακροσκοπικά τη δομή τους, αλλά έχουν απολέσει μεγάλο μέρος της αρχικής τους αντοχής. Τέλος στην ενότητα C εντάσσονται τα πλήρως εδαφοποιημένα γνευσιακά υλικά. Η παρουσία στρώσης και σχιστότητας φαίνεται ότι ενυπάρχει ως «παραμένουσα» ανισοτροπία ακόμα και όταν ο βαθμός αποσάθρωσης φθάσει στην κατηγορία V-VI της ενότητας C (Εικόνα 2.1.11). Στην Εικόνα 2.1.12 φαίνεται το μοντέλο του προφίλ αποσάθρωσης των γνευσίων στην περιοχή της Ασπροβάλτας. Τόσο οι υδροθερμικές εξαλλοιώσεις όσο και η αποσάθρωση μέσω του συστήματος διάρρηξης του πετρώματος έχουν δημιουργήσει δακτυλοειδείς δομές αργιλοποιημένου υλικου.



Εικόνα 2.1.7: Οι γεωτεκτονικές ζώνες στο χώρο της Β. Ελλάδας. R: Μάζα Ροδόπης, SM: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιροδοπική, A: Ζώνη Αξιού. Σε τετράγωνο σημειώνεται η περιοχή μελέτης (Μουντράκης, 1985)



Εικόνα 2.1.8: Εικόνα της χάραξης που περιλαμβάνει τα πρανή που μελετήθηκαν, μαζί με απόσπασμα γεωλογικού χάρτη που περιλαμβάνει την περιοχή μελέτης (ΙΓΜΕ). 1-5 Γεωλογικοί σχηματισμοί: 1. Αιολικές αποθέσεις (κυρίως άμμοι) 2. Λιμναίες αποθέσεις 3. Αλουβιακά ριπίδια (Ολόκαινο - Πλειστόκαινο) 4. Κατώτερος ορίζοντας μαρμάρων 5. Βιοτιτικοί γνεύσιοι (Παλαιοζωικό)

Εικόνα 2.1.9: Χαρακτηριστική εικόνα των υλικών των διαφορετικών ενοτήτων που αναπτύσσονται κατά τη διεύθυνση κύριων ασυνεχειών

Εικόνα 2.1.10: Υλικό της ενότητας Β (βιοτιτικός γνεύσιος), με έντονη αποσάθρωση βαθμού III-V αλλά διατηρούμενη δομή και υφή

Εικόνα 2.1.11: Υλικό της ενότητας C πλήρως εδαφοποιημένο-αργιλοποιημένο, στο οποίο διατηρούνται «υπολείμματα» ασυνεχειών της βραχομάζας

Εικόνα 2.1.12: Προφίλ αποσάθρωσης των γνευσίων στην περιοχή της Ασπροβάλτας

2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

2.2.1 ΑΝΑΓΚΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΕΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

Υπάρχουν ειδικά γνωρίσματα και χαρακτηριστικά των υπολειμματικών εδαφών τα οποία δεν μπορούν να καλυφθούν ή να ληφθούν υπόψη από συμβατικά συστήματα ταξινόμησης εδαφών όπως το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (USCS). Τα κυριότερα από αυτά είναι τα παρακάτω:

1. Η ασυνήθιστη ορυκτολογική σύσταση τροπικών ή υποτροπικών αργιλικών εδαφών δημιουργεί μη συμβατά χαρακτηριστικά σε σχέση με αυτά της ομάδας στην οποία ταξινομούνται σύμφωνα με τα υπάρχοντα συστήματα ταξινόμησης.
2. Η επί τόπου εδαφική μάζα εμφανίζει μια ακολουθία υλικών που καλύπτουν μεγάλο εύρος ξεκινώντας από το έδαφος και φτάνοντας μέχρι το μαλακό βράχο ανάλογα με το βαθμό αποσάθρωσης. Αυτά δεν μπορούν να περιγραφούν από συστήματα ταξινόμησης που βασίζονται σε εδάφη που έχουν μεταφερθεί (transported soils).
3. Τα συμβατικά συστήματα ταξινόμησης εδαφών εστιάζουν πρωτίστως στις ιδιότητες των εδαφών σε αναζυμωμένη κατάσταση (διαταραγμένα δείγματα). Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα σε ότι αφορά τα υπολειμματικά εδάφη, τα οποία επηρεάζονται σημαντικά από επί τόπου δομικά χαρακτηριστικά, είτε κληρονομούμενα από το μητρικό πέτρωμα, είτε αναπτυσσόμενα κατά τη διαδικασία της αποσάθρωσης.

Ο όρος *υπολειμματικό έδαφος* είναι δύσκολο να ερμηνευθεί με ακρίβεια. Κατά τη διαδικασία μετατροπής ενός βράχου σε έδαφος συντελείται σταδιακή μετάβαση, χωρίς να μπορεί να εξακριβωθεί το ακριβές σημείο κατά το οποίο το υλικό μεταβαίνει από πέτρωμα σε έδαφος. Στην Εικόνα 2.1.5 οι τρεις ανώτεροι ορίζοντες (IV, V και VI) τείνουν να συμπεριφερθούν σαν εδάφη, ενώ οι τρεις κατώτεροι (I, II και III) τείνουν να συμπεριφερθούν σαν βράχος. Επομένως ο όρος "υπολειμματικό έδαφος" μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει υλικά που ανήκουν στους τρεις ανώτερους ορίζοντες. Ένας άλλος όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή ή την ταξινόμηση υπολειμματικών εδαφών είναι ο όρος *σαπρόλιθος* (saprolite). Ο όρος αυτός έχει επικρατήσει για την περιγραφή υπολειμματικών εδαφών με σαφή δομικά χαρακτηριστικά (Εικόνα 2.1.6).

Προκύπτει επομένως η ανάγκη να δημιουργηθεί ένα ειδικό σύστημα ταξινόμησης τέτοιων εδαφών, το οποίο να καλύπτει την ανεπάρκεια των υφιστάμενων συστημάτων και να τα συμπληρώνει παίρνοντας υπόψη ιδιότητες που επηρεάζουν σημαντικά την μηχανική τους συμπεριφορά.

2.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Ο Wesley (Wesley L. D., 1988) πρότεινε ένα πρακτικό σύστημα ταξινόμησης για όλα τα υπολειμματικά εδάφη βασισμένο στην ορυκτολογική σύσταση και στη μικροδομή και τη μακροδομή. Το σύστημα αυτό κατηγοριοποιεί τα εδάφη σε ομάδες γεωυλικών τα οποία ταξινομούνται μαζί, λόγω της κοινής επίδρασης κατά το σχηματισμό τους και επομένως αναμένεται να έχουν παρόμοια μηχανικά

χαρακτηριστικά. Το προτεινόμενο σύστημα δίνει τη δυνατότητα της τοποθέτησης όλων των υπολειμματικών εδαφών σε κάποια συγκεκριμένη ομάδα με βάση θεμελιώδεις μηχανικές παραμέτρους. Έχει υιοθετηθεί σε τροποποιημένη μορφή και δεν αποτελεί μία ολοκληρωμένη μέθοδο λεπτομερούς και συστηματικής περιγραφής των υπολειμματικών εδαφών *επί τόπου* και στο *εργαστήριο*. Για το λόγο αυτό δεν μπορεί να αντικαταστήσει τα συμβατικά συστήματα ταξινόμησης (π.χ.USCS) αλλά λειτουργεί συμπληρωματικά ως προς αυτά.

Τα ειδικά χαρακτηριστικά των υπολειμματικών εδαφών μπορούν να αποδοθούν είτε στην παρουσία συγκεκριμένων αργιλικών ορυκτών που συναντώνται μόνο σε αυτά, είτε σε συγκεκριμένα δομικά χαρακτηριστικά όπως η παρουσία αποσαθρωμένου ή μερικώς αποσαθρωμένου βράχου, υπολείμματα διακλάσεων και άλλα επίπεδα αδυναμίας, ενδοσωματιδιακοί δεσμοί κ.α. Αυτές οι επιδράσεις μπορούν να ομαδοποιηθούν και να αποδοθούν με βάση δύο γενικές κατηγορίες: τη *σύσταση* και τη *δομή*.

Ο όρος *σύσταση* αναφέρεται στο υλικό από το οποίο αποτελείται το έδαφος και περιλαμβάνει το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων και κυριότερα την ορυκτολογική σύσταση του λεπτόκοκκου κλάσματος. Χωρίζεται σε δύο σκέλη:

1. Φυσική σύσταση, π.χ. ποσοστό % αποσαθρωμένου βράχου, κοκκομετρική διαβάθμιση κ.λπ.
2. Ορυκτολογική σύσταση

Ο όρος *δομή* αναφέρεται στα ειδικά χαρακτηριστικά του εδάφους, στην αδιατάρακτη επί τόπου κατάστασή του και χωρίζεται επίσης σε δύο σκέλη:

1. Μακροδομή ή διακριτή δομή. Περιλαμβάνει όλα τα ευδιάκριτα με γυμνό μάτι δομικά χαρακτηριστικά, όπως στρώση, διακλάσεις, ασυνέχειες, πόρους, παρουσία μη αποσαθρωμένου βράχου και άλλες δομές κληρονομούμενες από το μητρικό πέτρωμα.
2. Μικροδομή ή μη διακριτή δομή. Περιλαμβάνει τον ιστό και την υφή, δεσμούς και συμπαγοποίηση/συγκόλληση μεταξύ των σωματιδίων, συσσωματώματα, σχήμα και μέγεθος πόρων κ.τ.λ.

Το πρώτο βήμα για την ομαδοποίηση των υπολειμματικών εδαφών είναι ο διαχωρισμός τους σε ομάδες με βάση αποκλειστικά την ορυκτολογική σύσταση. Προτείνονται οι παρακάτω ομάδες:

1. *Ομάδα Α:* Εδάφη χωρίς έντονη ορυκτολογική επιρροή.
2. *Ομάδα Β:* Εδάφη με έντονη ορυκτολογική επιρροή προερχόμενη από αργιλικά ορυκτά που συναντώνται συχνά και σε μεταφερθέντα εδάφη.
3. *Ομάδα Γ:* Εδάφη με έντονη ορυκτολογική επιρροή προερχόμενη από αργιλικά ορυκτά που συναντώνται αποκλειστικά σε υπολειμματικά εδάφη.

Ομάδα Α: Εδάφη χωρίς έντονη ορυκτολογική επιρροή

Ο αποκλεισμός των εδαφών με έντονη ορυκτολογική επίδραση μπορεί να οριοθετήσει ομάδες ή υποομάδες εδαφών με όμοια μηχανικά χαρακτηριστικά. Σε αυτήν την ομάδα ανήκουν συνήθως εδάφη που παρουσιάζουν προφίλ

αποσάθρωσης όπως αυτό στην Εικόνα 2.1.5. Μόνο σε σπάνιες περιπτώσεις παρατηρείται στο ανώτερο στρώμα (ζώνη VI) τόσο εκτεταμένη αποσάθρωση και σχηματισμός αργιλικών ορυκτών έντονης επιρροής. Τα υπολειμματικά εδάφη της ομάδας Α μπορούν να χωριστούν σε υποομάδες με βάση την έκταση και τον τρόπο που η συμπεριφορά τους επηρεάζεται από δομικά στοιχεία. Ο κύριος διαχωρισμός γίνεται, όπως έχει αναφερθεί, στις ακόλουθες τρεις υποομάδες, ανάλογα με την παρουσία και την επίδραση μακροδομής και μικροδομής:

Υποομάδα (α)
Σε αυτήν ανήκουν τα εδάφη που η παρουσία μακροδομής παίζει αποφασιστικό ρόλο στη μηχανική τους συμπεριφορά, δηλαδή τα εδάφη των κατώτερων οριζόντων (IV και V) σύμφωνα με την Εικόνα 2.1.5.

Υποομάδα (β)
Εντάσσονται τα εδάφη χωρίς προφανή μακροδομή αλλά με έντονη επίδραση από την παρουσία μικροδομής. Κύριες μορφές μικροδομής θεωρούνται τα κατάλοιπα σωματιδιακών δεσμών ή οι δομές που σχηματίζονται από δευτερογενή συγκόλληση. Παρόλο που οι δομές αυτές δεν μπορούν να εντοπισθούν μακροσκοπικά, η παρουσία τους μπορεί να πιστοποιηθεί από βασικές παραμέτρους συμπεριφοράς των εδαφών. Για παράδειγμα η ευαισθησία (St) αποτελεί ένα χαρακτηριστικό δείκτη παρουσίας και μέτρησης μικροδομής, καθώς οι υψηλές τιμές ευαισθησίας οφείλονται στην παρουσία ειδικών δεσμών, οι οποίοι καταστρέφονται σε αναζυμωμένη κατάσταση. Υπολειμματικά εδάφη τα οποία εμφανίζουν υψηλές τιμές δείκτη υδαρότητας είναι επίσης πιθανό να εμφανίζουν παρόμοιες δομές, οι οποίες επιτρέπουν στο υλικό να εμφανίζεται σε μετά-σταθερή κατάσταση υγρασίας με τιμές κοντά στο όριο υδαρότητας ή και μεγαλύτερες.

Υποομάδα (γ)
Περιλαμβάνει τα υπολειμματικά εδάφη που δεν εμφανίζουν φαινόμενα επιρροής από μακροδομές ή μικροδομές. Η υποομάδα αυτή είναι πολύ περιορισμένη, καθώς σπάνια κάποιο υπολειμματικό έδαφος της ομάδας Α εντάσσεται σε αυτήν την κατηγορία.

Περαιτέρω διαχωρισμός των υποομάδων Α(α) και Α(β)
Είναι παραδεκτό πως οι αναφερόμενες δύο υποομάδες καλύπτουν αρκετά μεγάλο εύρος υλικών ώστε να καθίσταται δυσχερής η ομαδοποίηση όμοιων μηχανικών παραμέτρων. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες με βάση τους οποίους μπορεί να γίνει περαιτέρω ομαδοποίηση εκ των οποίων ο πιο σημαντικός φαίνεται να είναι το μητρικό πέτρωμα. Επομένως προτείνεται, κατά την περιγραφή και ταξινόμηση των υπολειμματικών εδαφών να περιλαμβάνονται πληροφορίες για το πέτρωμα προέλευσης.

Ομάδα Β: Εδάφη με έντονη ορυκτολογική επιρροή από αργιλικά ορυκτά που συναντώνται συχνά και σε μεταφερθέντα εδάφη

Ο κυριότερος εκπρόσωπος αυτής της ομάδας είναι μαύρα αργιλικά εδάφη που αναφέρονται διεθνώς ως black cotton soils ή vertisols. Χαρακτηρίζονται από υψηλή δυνατότητα συρρίκνωσης και διόγκωσης, υψηλή συμπιεστότητα και χαμηλή αντοχή. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνδέονται με την παρουσία του κυρίαρχου

αργιλικού ορυκτού των εδαφών αυτής της ομάδας, του μοντμοριλλονίτη ή όμοιων ορυκτών της ομάδας των σμεκτιτών. Οι μηχανικές παράμετροι των εδαφών αυτών είναι παρόμοιες με αυτές ιζηματογενών εδαφών που αποτελούνται από αργιλικά ορυκτά της ίδιας ομάδας. Σημαντικό ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες αυτής της ομάδας, κυρίως στη διατμητική αντοχή και στη συμπιεστότητα, μπορεί να παίξει η παρουσία δομών. Στη διεθνή βιβλιογραφία δεν εντοπίζονται άλλου τύπου εδάφη που να ανήκουν σε αυτήν την ομάδα. Αναφέρονται κάποια υπολειμματικά εδάφη προερχόμενα από ιζηματογενή πετρώματα με ιδιότητες καθορισμένες από την ορυκτολογική τους σύσταση.

Ομάδα Γ: Εδάφη με έντονη ορυκτολογική επιρροή προερχόμενη από αργιλικά ορυκτά που συναντώνται αποκλειστικά σε υπολειμματικά εδάφη

Τα σημαντικότερα ορυκτά αυτής της ομάδας είναι ο *αλλοϋσίτης* και ο *αλλοφανής*. Ο *αλλοϋσίτης* είναι ένα κρυσταλλικό αργιλό-πυριτικό ορυκτό σωληνοειδούς μορφής που ανήκει στην ομάδα ορυκτών του *καολινίτη*. Ο *αλλοφανής* είναι ένα πολύ χαρακτηριστικό ορυκτό με ασυνήθιστες ιδιότητες που περιγράφεται σαν άμορφο ή κολλοειδές (gel-like), παρόλο που πιο πρόσφατες έρευνες έδειξαν πως μπορεί να αναπτύσσει υποτυπώδη κρυσταλλική δομή. Σε αυτά τα πυριτικά ορυκτά προστίθενται και μη-πυριτικά ορυκτά που περιέχονται σε τροπικά εδάφη, κυρίως ένυδρες μορφές του αλουμινίου και τριοξειδίων σιδήρου (sesquioxides) όπως ο γιββσίτης και ο γκαιτίτης. Είναι πιο πρακτικό η ομάδα Γ να χωριστεί σε υποομάδες ανάλογα με την παρουσία του κυρίαρχου χαρακτηριστικού αργιλικού ορυκτού.

Υποομάδα (α) Αλλοϋσιτικά εδάφη
Οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των εδαφών είναι ικανοποιητικές παρά το υψηλό ποσοστό αργίλου και τις υψηλές τιμές φυσικής υγρασίας σε σχέση με τα όρια Atterberg (δηλ. υψηλές τιμές LI).

Υποομάδα (β) Αλλοφανιτικά εδάφη
Τα εδάφη αυτά είναι τα πιο χαρακτηριστικά και διακριτά υπολειμματικά εδάφη εξαιτίας των ασυνήθιστων ιδιοτήτων του άμορφου ορυκτού αλλοφανή. Τα εδάφη αυτά έχουν υψηλές τιμές φυσικής υγρασίας με εύρος από 80% έως 250% και παρόλα αυτά εμφανίζουν ικανοποιητική μηχανική συμπεριφορά, καλύτερη ακόμα και από εδάφη με μικρές τιμές φυσικής υγρασίας.

Υποομάδα (γ) Εδάφη με παρουσία τριοξειδίων (sesquioxides)
Η παρουσία αυτών των χημικών ενώσεων φαίνεται να λειτουργεί σαν παράγοντας συγκόλλησης των υπόλοιπων ορυκτών προς σχηματισμό συσσωματωμάτων. Μεγάλες συγκεντρώσεις αυτών οδηγούν στο σχηματισμό πολύ σκληρών υλικών, γνωστών και ως *λατερίτες*. Οι λόγοι πυριτίου/αλουμινίου ($SiO_2/Al_2/O_3$) και πυριτίου/ τριοξειδίων έχουν χρησιμοποιηθεί ως δείκτες του *βαθμού λατεριτίωσης* ενός εδάφους (Morin & Todor, 1976). Αυτή η υποομάδα θα μπορούσε να ονομαστεί λατεριτική αλλά ο όρος *λατερίτης* χρησιμοποιείται με την ευρεία έννοια και περιλαμβάνει τον αλλοϋσίτη, τον αλλοφανή και άλλα αργιλικά ορυκτά των οποίων η συμπεριφορά επηρεάζεται από την παρουσία τριοξειδίων.

Οι παραπάνω υποομάδες και ειδικότερα η (α) και (β) μπορούν να διαχωριστούν σε περισσότερες με βάση την επίδραση της δομής. Επίσης πάντοτε θα

πρέπει κατά την ταξινόμηση να περιλαμβάνονται πληροφορίες για το μητρικό πέτρωμα. Για παράδειγμα ο βαθμός επιρροής της μηχανικής συμπεριφοράς των αλλοφανιτικών εδαφών ποικίλλει ανάλογα με το πέτρωμα προέλευσης αυτών.

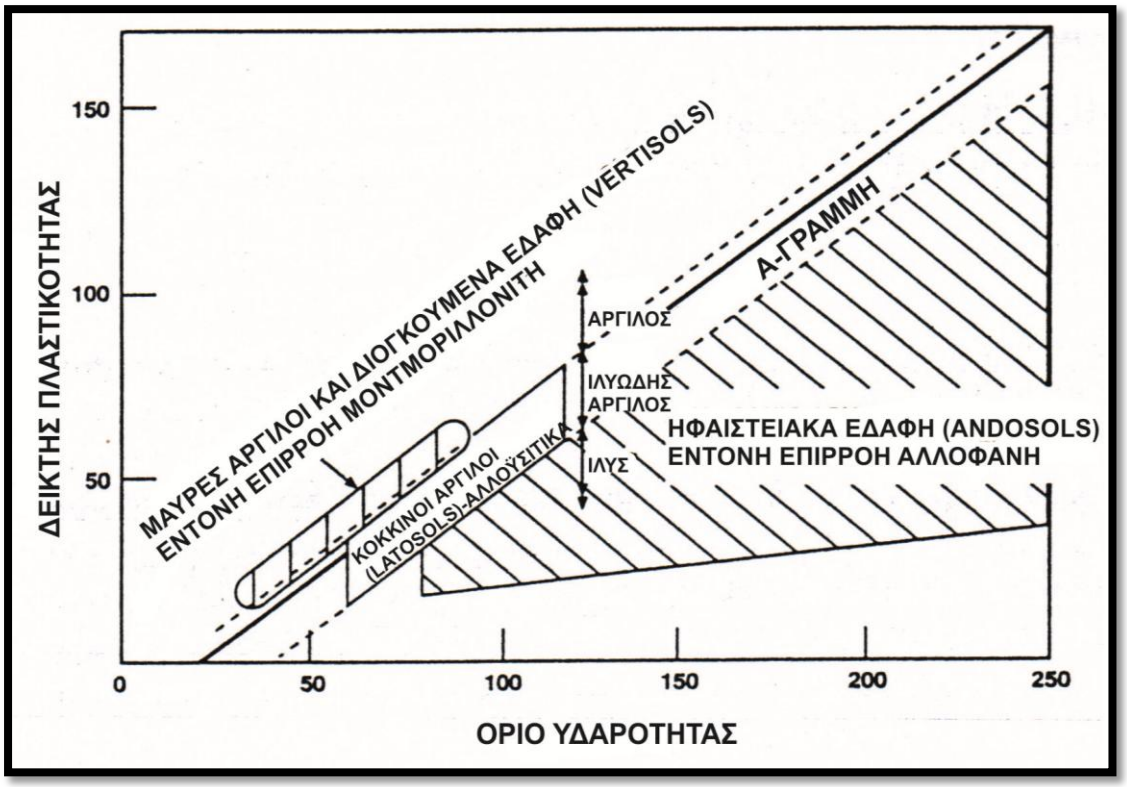
2.2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

Ένα μειονέκτημα του προτεινόμενου συστήματος ταξινόμησης είναι η χρήση της ορυκτολογικής σύστασης με βάση την οποία γίνεται ο αρχικός διαχωρισμός σε κύριες ομάδες. Είναι επομένως απαιτούμενη η γνώση των ορυκτών των εδαφών και των μητρικών πετρωμάτων. Το ζήτημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με τους ακόλουθους τρόπους:

1. Σε πολλές περιοχές του κόσμου υπάρχουν τράπεζες δεδομένων και πληροφοριών για την εμφάνιση και την ορυκτολογική σύσταση των τοπικών εδαφών και πετρωμάτων, δεδομένα τα οποία είναι διαθέσιμα για χρήση και αξιολόγηση στους τεχνικούς γεωλόγους και γεωτεχνικούς μηχανικούς.
2. Οι τράπεζες δεδομένων τροφοδοτούνται με στοιχεία από μελέτες και έρευνες που διεξάγουν πανεπιστημιακά ιδρύματα και άλλα ινστιτούτα. Στην Ελλάδα υπάρχει πλειάδα στοιχείων που αναφέρονται στην ορυκτολογική σύσταση των τοπικών πετρωμάτων, όμως δεν έχει εκτιμηθεί η σημαντικότητα της ορυκτολογικής σύστασης στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα ερευνητικά δεδομένα προς αυτήν την κατεύθυνση.
3. Το κυρίαρχο αργιλικό ορυκτό σε κάποια υπολειμματικά εδάφη μπορεί να εντοπιστεί από την εμφάνιση, το γεωλογικό πλαίσιο και από τιμές φυσικών ιδιοτήτων, όπως η φυσική υγρασία και τα όρια Atterberg.

Η τελευταία παρατήρηση μπορεί να εφαρμοστεί για την ομάδα του μοντμοριλλονίτη (ομάδα Β) και την υποομάδα του αλλοφανή (ομάδα Γα). Εδάφη σκούρου τεφρού ή μαύρου χρώματος με υψηλές τιμές ορίου υδαρότητας και θέση πάνω από την γραμμή-Α στο διάγραμμα πλαστικότητας είναι πολύ πιθανό να ανήκουν στην ομάδα του μοντμοριλλονίτη. Τέτοια εδάφη σχηματίζονται συνήθως σε περιοχές ήπιου ανάγλυφου και κακής αποστράγγισης.

Τα εδάφη που σχηματίζονται από ηφαιστειακά υλικά και ειδικότερα από πρόσφατες αποθέσεις ηφαιστειακής τέφρας, εμφανίζουν υψηλές τιμές ορίων Atterberg και μη αναστρέψιμες αλλαγές στις ιδιότητες τους μετά από ξήρανση, είναι πολύ πιθανό να ανήκουν στην ομάδα του αλλοφανή. Στην Εικόνα 2.2.1 φαίνονται τα προσεγγιστικά όρια των ομάδων του μοντμοριλλονίτη, του αλλοϋσίτη και του αλλοφανή στο διάγραμμα πλαστικότητας (Blight G. E., 1997). Πρέπει να σημειωθεί πως κάποια εδάφη ηφαιστειακής τέφρας μπορεί να τοποθετηθούν πλησιέστερα προς την γραμμή-Α από τη θέση που φαίνεται στην Εικόνα 2.2.1. Αν συμβαίνει αυτό τότε πιθανότατα συμμετέχουν και άλλα ορυκτά εκτός του αλλοφανή. Τα όρια που φαίνονται στην Εικόνα 2.2.1 διαμορφώνουν ομάδες όμοιας συμπεριφοράς εξαιτίας της δραστικής επιρροής του ορυκτού που συμμετέχει. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες των ομάδων ταξινόμησης ξεχωριστά.



Εικόνα 2.2.1: Επιρροή της ορυκτολογικής σύστασης στη θέση ενός εδάφους στο διάγραμμα πλαστικότητας

Ομάδα Α, υποομάδα (α)

Είναι μία μεγάλη ομάδα που περιλαμβάνει τα περισσότερα υπολειμματικά εδάφη που προέρχονται από την αποσάθρωση πετρωμάτων σε συνθήκες αποστράγγισης, δηλαδή σε υψώματα και πρανή. Η συμπεριφορά αυτών των εδαφών κυριαρχείται από την παρουσία των τεκτονικών δομών (διακλάσεις, ασυνέχειες, ρωγμές, κατάλοιπα δομών), ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ευστάθειας πρανών. Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι ασυνεχειών σε αυτήν την ομάδα, οι οποίοι είναι:

1. Η στρώση ή σχιστότητα, που κληρονομείται από μητρικά πετρώματα, όπως ο ψαμμίτης ή ο αργιλικός σχιστόλιθος.
2. Ασυνέχειες, που συμπεριλαμβάνουν σχισμές, ρωγμές και διακλάσεις που προέρχονται από τεκτονικά φαινόμενα ή από τη δράση παγετού.
3. Η παρουσία ζωνών ενδιάμεσου υλικού μεταξύ εδάφους και βράχου, που έχει ήδη αναφερθεί με τον όρο σαπρόλιθος (saprolite).

Η μηχανική συμπεριφορά του υπολειμματικού εδάφους επηρεάζεται ποικιλοτρόπως από την παρουσία υπολειμματικών δομών και ανάλογα με τις απαιτήσεις αντοχής της εκάστοτε κατάστασης (Irfan & Woods, 1988). Η κύρια επίπτωση όμως αυτού του στοιχείου στα εδάφη αυτής της ομάδας, είναι ότι γίνεται αδύνατη η έρευνα και η ανάλυσή τους με συμβατικές μεθόδους εδαφομηχανικής.

Ομάδα Α, υποομάδα (β)

Η ομάδα αυτή αποτελείται από υπολειμματικά εδάφη στα οποία η αποσάθρωση έχει προχωρήσει σε τέτοιο βαθμό ώστε η επίδραση των δομικών

χαρακτηριστικών του πετρώματος προέλευσης να είναι μηδαμινή. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτής της ομάδας είναι η ύπαρξη εσωτερικών σωματιδιακών δεσμών, γνώρισμα χαρακτηριστικό των περισσότερων υπολειμματικών εδαφών. Τα εδάφη αυτά είναι κατάλληλα για πειραματική έρευνα (λόγω της έλλειψης δομής), η οποία θα πρέπει να εστιάζει στην κατανόηση της φύσης και επίδρασης των αναφερόμενων δεσμών στη μηχανική τους συμπεριφορά.

Ομάδα Α, υποομάδα (γ)

Τα εδάφη που εντάσσονται σε αυτήν την υποομάδα είναι ελάχιστα. Εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με ελαφρώς υπερστερεοποιημένα εδάφη που έχουν υποστεί έντονες διαδικασίες μεταφοράς.

Ομάδα Β, υποομάδα (α)

Είναι μία ομάδα εδαφών η οποία έχει αναγνωριστεί και περιγραφεί διεθνώς με τον όρο black cotton soils. Τα εδάφη αυτά προέρχονται από την επί τόπου αποσάθρωση βασικών πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων με κυρίαρχη παρουσία σκουρόχρωμων ορυκτών (π.χ. ολιβίνης, βιοτίτης ή κεροστίλβη) και τα οποία συναντώνται σε περιοχές ήπιου ανάγλυφου και κακής αποστράγγισης. Σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό των υπολειμματικών εδαφών αυτής της κατηγορίας φαίνεται να παίζει η εναλλαγή ξηρού και υγρού κλίματος. Η εναλλαγή αυτή προκαλεί συρρίκνωση, θρυμματισμό και διόγκωση τα οποία οδηγούν σε κατακόρυφη επέκταση της ζώνης του εδάφους στο προφίλ αποσάθρωσης. Για το λόγο αυτό έχει αποδοθεί σε αυτά τα εδάφη ο διεθνής όρος vertisol, (Mitchell & Sitar, 1982), (Geological Society Engineering Working Party Report, 1990).

Τα εδάφη αυτά εμφανίζουν τις τυπικές ιδιότητες ενός εδάφους με υψηλή περιεκτικότητα αργιλικών ορυκτών της ομάδας του σμεκτίτη (μοντμοριλλονίτης). Τέτοια υλικά έχουν κακή μηχανική συμπεριφορά και πιο συγκεκριμένα χαμηλή αντοχή, υψηλή συμιεστότητα και αυξημένη δυνατότητα συρρίκνωσης και διόγκωσης (Lumb W. B., 1982), (Horn, 1982).

Ομάδα Γ, υποομάδα (α)

Η ομάδα των υπολειμματικών εδαφών που κύριο ορυκτό τους είναι ο αλλοφανής είναι η πιο χαρακτηριστική. Τα κυριότερα γνωρίσματά τους είναι:

- Υψηλές τιμές φυσικής υγρασίας και υψηλές τιμές ορίου υδαρότητας (LL) και ορίου πλαστικότητας (PL)
- Μη αναστρέψιμη μείωση της πλαστικότητας και αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων μετά από ξήρανση
- Είναι πιθανό να εμφανίζουν επίπεδες καμπύλες συμπύκνωσης χωρίς να υπάρχουν ευδιάκριτες τιμές βέλτιστης υγρασίας και μέγιστης ξηρής πυκνότητας
- Η εφαρμογή εμπειρικών σχέσεων που έχουν καθιερωθεί στη μελέτη ιζηματογενών εδαφών οδηγεί σε εσφαλμένα συμπεράσματα

Παρά τις ασυνήθιστες ιδιότητες των εδαφών αυτής της ομάδας, η μηχανική τους συμπεριφορά είναι καλή, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που δεν έχουν διαταραχθεί

(Wesley L. D., 1974), (Wesley & Matuschika, 1988). Επιδεικνύουν υψηλή διατμητική αντοχή, μέτρια συμπιεστότητα και ευστάθεια σε φυσικά και τεχνητά πρανή μεγάλων κλίσεων. Παρόλα αυτά είναι πιθανό να συναντηθούν δυσκολίες κατά την κατασκευή κάποιου τεχνικού έργου σε αυτά τα υλικά, πρώτον εξαιτίας του υγρού κλίματος που κυριαρχεί στις περιοχές εμφάνισής τους, και δεύτερον γιατί οι συμβατικές προδιαγραφές συμπύκνωσης και οι μέθοδοι ελέγχου είναι ακατάλληλες. Γενικά η διαχείριση τέτοιων εδαφών είναι απαιτητική εξαιτίας της υψηλής ευαισθησίας (St) τους.

Ομάδα Γ, υποομάδα (β)

Το αργιλικό ορυκτό αλλοϋσίτης χαρακτηρίζεται από μικρού μεγέθους σωματίδια και χαμηλή ενεργότητα (activity). Έχουν αναγνωριστεί δύο μορφές του ορυκτού, ένυδρος αλλοϋσίτης και μετάαλλοϋσίτης (Newill, 1961). Και οι δύο μορφές αποτελούνται από σωματίδια σωληνοειδούς σχήματος, αν και στον άνυδρο μετά-αλλοϋσίτη το σχήμα αυτό μπορεί είτε να έχει διαχωριστεί είτε να έχει εκτυλιχθεί. Η σημαντικότερη ιδιότητα των αλλοϋσιτικών εδαφών είναι η καλή μηχανική συμπεριφορά τους παρά το μικρό μέγεθος των σωματιδίων που τα αποτελούν και τις σχετικά υψηλές τιμές πλαστικότητας που εμφανίζουν (Wesley L. D., 1974), (Matyas, 1969). Το κυριότερο μέλος αυτής της ομάδας είναι οι κόκκινες άργιλοι από υλικό ηφαιστειακής προέλευσης.

Ομάδα Γ, υποομάδα (γ)

Τα εδάφη αυτής της ομάδας έχουν παραδοσιακά περιγραφεί με τον όρο *λατερίτες* ή *λατεριτικά εδάφη*. Στόχος της παρούσας ταξινόμησης είναι ο περιορισμός αυτής της ομάδας στα εδάφη τα οποία έχουν αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις τριοξειδίων, έτσι ώστε να λειτουργούν ως παράγοντες συγκόλλησης των σωματιδίων με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας μόνιμης δομής συσσωματωμάτων. Παλαιότερα υπήρχε η τάση να εντάσσονται σε αυτήν την ομάδα όλα τα αργιλικά εδάφη των τροπικών περιοχών που έχουν κόκκινο χρώμα. Τα εδάφη στα οποία δεν υπάρχουν ενδείξεις συγκόλλησης από την παρουσία τριοξειδίων ή ο βαθμός συγκόλλησης είναι μικρός δεν μπορούν να ενταχθούν σ' αυτήν την ομάδα.

Τα εδάφη που περιλαμβάνονται κυμαίνονται από ιλυώδεις αργίλους χαμηλής πλαστικότητας έως πολύ συνεκτικές αποθέσεις χαλικώδους υλικού. Θα μπορούσε να υπάρχει ειδικό ξεχωριστό σύστημα ταξινόμησης για να καλυφθούν οι ανάγκες ταξινόμησης των εδαφών αυτής της ομάδας (Gidigasu, 1976).

Είναι γενικώς αποδεκτό πως υπάρχει γενετική σύνδεση των εδαφών των υποομάδων της ομάδας Γ. Θεωρείται πως παράγωγο της αποσάθρωσης του αλλοφανή είναι ο αλλοϋσίτης και συνεχιζόμενη αποσάθρωση οδηγεί στην απομάκρυνση του διοξειδίου του πυριτίου και στη δημιουργία συγκεντρώσεων οξειδίων του σιδήρου και του αλουμινίου σχηματίζοντας έτσι λατεριτικά υλικά (Blight G. E., 1997).

2.2.4 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΝΙΑΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ (USCS)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου 2.2, η χρήση του Ενιαίου Συστήματος Ταξινόμησης Εδαφών (USCS) για την ταξινόμηση

υπολειμματικών εδαφών αποδίδει σε αυτά χαρακτηριστικά που δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματική μηχανική τους συμπεριφορά. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα των εδαφών που έχουν μεγάλα ποσοστά αλλοφανή ή καολινίτη στη σύστασή τους και ταξινομούνται στη ζώνη MH του συστήματος ταξινόμησης USCS. Το σύστημα αποδίδει σε αυτήν την ομάδα "φτωχά" μηχανικά χαρακτηριστικά και τα θεωρεί ακατάλληλα για πολλά τεχνικά έργα. Στην πράξη όμως, ειδικά τα αλλοφανιτικά εδάφη, εμφανίζουν ικανοποιητική μηχανική συμπεριφορά.

Παρόλο που θα μπορούσαν να αναθεωρηθούν τα όρια και να διαμορφωθούν νέες ζώνες στο διάγραμμα πλαστικότητας έτσι ώστε να περιλαμβάνουν τις ειδικές ομάδες των υπολειμματικών εδαφών, φαίνεται ότι ο πιο πρακτικός τρόπος είναι η ταξινόμηση κατά USCS να συνοδεύεται και από την ορυκτολογική σύσταση του υπολειμματικού εδάφους (Blight G. E., 1997). Αν δεν είναι διαθέσιμη η ορυκτολογική του σύσταση, τότε θα μπορούσαν να δοθούν πληροφορίες από τις οποίες θα μπορούσε αυτή να εκτιμηθεί, όπως η προέλευση ή η εδαφολογική του περιγραφή. Για παράδειγμα, εδάφη προερχόμενα από ηφαιστειακή τέφρα με υψηλές τιμές ορίου υδαρότητας που βρίσκονται κάτω από την γραμμή-Α του διαγράμματος πλαστικότητας, είναι σχεδόν βέβαιο ότι περιέχουν αλλοφανή.

Η σκοπιμότητα του προτεινόμενου συστήματος ταξινόμησης υπολειμματικών εδαφών είναι να προσφέρει νέες πληροφορίες οι οποίες σε συνδυασμό με τα υπάρχοντα συστήματα ταξινόμησης και κυριότερα το USCS να αποδώσει μία ολοκληρωμένη συστηματική ομαδοποίηση.

2.2.5 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΤΗΣ ΑΣΠΡΟΒΑΛΤΑΣ

Τα υπολειμματικά εδάφη που μελετήθηκαν σε τεχνητά πρανή στην περιοχή της Ασπροβάλτας προέρχονται από την επί τόπου αποσάθρωση βιοτιτικών γνευσίων. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ήπιο ανάγλυφο και το κλίμα της από εποχιακές υγρές και ξηρές περιόδους.

Το τελικό προϊόν της αποσάθρωσης των γνευσίων εντοπίζεται κυρίως κατά μήκος των τεκτονικών δομών της βραχομάζας και περιγράφεται ως μία σκούρα άργιλος υψηλής πλαστικότητας η οποία διατηρεί τις τεκτονικές δομές του πετρώματος προέλευσης ακόμα και σε υψηλούς βαθμούς αποσάθρωσης (V-VI Εικόνα 2.1.11).

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, και ειδικότερα το μεγάλο ποσοστό βιοτίτη του μητρικού πετρώματος, αναμένεται το κυρίαρχο αργιλικό ορυκτό να ανήκει στην ομάδα των σμεκτιτών και επομένως τα υπό μελέτη εδάφη ταξινομούνται στην ομάδα Β (Πίνακας 2.1.1). Αυτά τα εδάφη αναφέρονται διεθνώς ως black cotton soils ή vertisols και θεωρούνται προβληματικά από πλευράς μηχανικής συμπεριφοράς. Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί πολλές αστοχίες, και ειδικότερα αστοχίες πρανών, σε περιοχές που κυριαρχούν γνεύσιοι και οι συνθήκες ευνοούν τη δημιουργία σμεκτιτών, όπως το Χονγκ Κονγκ, η Μαλαισία κ.α. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη συνδυασμένη επίδραση της ορυκτολογικής σύστασης και της δομής και οδηγεί σε υποτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η διατμητική αντοχή, η συμπιεστότητα και η διαπερατότητα.

Πίνακας 2.2.1: Σύστημα ταξινόμησης υπολειμματικών εδαφών (Blight G. E., 1997)

Ομάδα		Παραδείγματα	Μέθοδος Αναγνώρισης	Εκτιμώμενη μηχανική συμπεριφορά
Κύρια Ομάδα	Υπό-ομάδα			
Ομάδα Α Εδάφη χωρίς ορυκτολογική επιρροή	α)Έντονη επίδραση μακροδομής	Έντονα αποσαθρωμένα ιζηματογενή και όξινα πυριγενή πετρώματα	Οπτική εξέταση	Μεγάλη ομάδα εδαφών όπου η συμπεριφορά ελέγχεται από την επίδραση των τεκτονικών δομών
	β)Έντονη επίδραση μικροδομής	Εντελώς αποσαθρωμένα ιζηματογενή και πυριγενή πετρώματα	Οπτική εξέταση, εκτίμηση ευαισθησίας, δείκτη υδαρότητας κτλ.	Μικρή ομάδα ομογενών εδαφών που επιδέχονται καλή εκτίμηση και ανάλυση της συμπεριφοράς τους σε σχέση με την υπό-ομάδα α. Έντονη επίδραση δεσμών
	γ) Μικρή επίδραση δομής	Αποσάθρωση πολύ ομογενών πετρωμάτων	Ελάχιστη έως μηδενική ευαισθησία, ομοιόμορφη εικόνα	Μικρή ομάδα εδαφών που συμπεριφέρονται ως μέτρια υπερστερεοποιημένα εδάφη
Ομάδα Β Εδάφη με έντονη ορυκτολογική επιρροή συνηθισμένων ορυκτών	α) Ομάδα Σμεκτίτη	Εδάφη που δημιουργούνται σε συνθήκες χαμηλής αποστράγγισης	Σκουρόχρωμα, πολύ πλαστικά λεπτόκοκκα εδάφη	Προβληματικά εδάφη πολύ μικρής αντοχής, υψηλής συμπιεστότητας και έντονων χαρακτηριστικών διόγκωσης-συρρίκνωσης
	β) Άλλα ορυκτά			Αποτελεί πολύ μικρή υπό-ομάδα
Ομάδα Γ Εδάφη με έντονη ορυκτολογική επιρροή αργιλικών ορυκτών που συναντώνται μόνο σε υπολειμματικά εδάφη	α) Ομάδα αλλοφανή	Αποσάθρωση ηφαιστειακής στάχτης σε τροπικά κλίματα	Υψηλή φυσική υγρασία, μη αναστρέψιμες μεταβολές ιδιοτήτων κατά την ξήρανση	Καλή μηχανική συμπεριφορά. Δύσκολη διαχείριση λόγω ευαισθησίας
	β) Ομάδα αλλοϋσίτη	Αποσάθρωση ηφαιστειακών πετρωμάτων, τροπικές ερυθρές άργιλοι	Κοκκινόχρωμα εδάφη, καλά αποστραγγιζόμενες τοπογραφίες, ηφαιστειακό μητρικό πέτρωμα	Καλή μηχανική συμπεριφορά. Εδάφη χαμηλής πλαστικότητας και ενεργότητας
	γ) Ομάδα τριοξειδίων	Λατερίτες	Κοκκώδης ή κομβώδης εμφάνιση	Μεγάλη ομάδα εδαφών από ιλυώδεις αργίλους έως χονδρόκοκκες άμμους-χάλικες.

2.3 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

2.3.1 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ

Η ορυκτολογία και η μικροδομή των υπολειμματικών εδαφών σχετίζονται με μοντέλα εμφάνισης και σχηματισμού. Η μικροδομή θα πρέπει να θεωρηθεί σε δύο σχετικές κλίμακες:

1. Συσσωματώματα και εσωτερικά κενά αυτών,
2. Κόκκοι και ενδιάμεσα κενά αυτών.

Τα συσσωματώματα είναι φυσικές δομές αποτελούμενες από κόκκους εδάφους με διαστάσεις από μερικά cm έως μερικά μικρά (μm). Συγκροτούν φυσικές ενότητες μετά από μηχανική αλληλεπίδραση των εδαφικών κόκκων που ενώθηκαν και μπορούν να θρυμματιστούν, να σχηματιστούν με ύγρανση και ξήρανση ή με διαδικασίες μηχανικής διατάραξης.

Οι διαδικασίες αποσάθρωσης που οδηγούν στο σχηματισμό υπολειμματικών εδαφών είναι ο φυσικός θρυμματισμός και οι χημικές αντιδράσεις. Ο ρυθμός θρυμματισμού ελέγχεται από την έκθεση και την ενέργεια που μεταφέρεται στο μητρικό υλικό από το τοπικό περιβάλλον. Οι διαδικασίες χημικών αντιδράσεων μπορούν να διαχωριστούν ως εξής:

- Αποσύνθεση
- Έκπλυση
- Αφυδάτωση

Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να επιδρούν στιγμιαία, κυκλικά ή σε αλληλουχία ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και το χρόνο έκθεσης σε σχέση με το ρυθμό επίδρασης των διαδικασιών. Η ορυκτολογία και η μικροδομή συνδέονται άρρηκτα με αυτές τις διαδικασίες και ανάλογα με τη δράση τους και το βαθμό επιρροής τους σχηματίζεται ένα μεγάλο εύρος παραγόμενων εδαφών.

Η *αποσύνθεση* περιλαμβάνει το φυσικό θρυμματισμό της υφής του βράχου και τη χημική αποσύνθεση των περιεχόμενων ορυκτών που κατά κύριο λόγο σχηματίζονται κατά τη διαδικασία της πετρογένεσης. Τυπικά προϊόντα είναι αργιλικά ορυκτά, οξείδια, υδροξείδια και ελεύθερα οξείδια του πυριτίου. Στα τροπικά κλίματα είναι σχετικά ταχύς ο ρυθμός των χημικών αντιδράσεων με αποτέλεσμα να επιδρούν και σε πρόσφατες εδαφικές αποθέσεις. Κατ' αυτόν τον τρόπο εμφανίζονται μεταφερθέντα εδάφη με χαρακτηριστικά υπολειμματικών εδαφών. Ο ρυθμός των αντιδράσεων ποικίλει επίσης ανάλογα με το προσβαλλόμενο ορυκτό. Κάποια ορυκτά εμφανίζονται εντελώς εξαλλοιωμένα (π.χ. άστριοι), ενώ γειτονικοί τους κόκκοι παραμένουν άθικτοι (π.χ. χαλαζίας). Σε εύκρατα κλίματα οι αντιδράσεις εξελίσσονται με χαμηλότερο ρυθμό και επομένως οι διαδικασίες σχηματισμού υπολειμματικών εδαφών κυριαρχούνται από το φυσικό θρυμματισμό του πετρώματος.

Η *έκπλυση* και *επαναπόθεση* περιλαμβάνει διαδικασίες λατεριτίωσης, με απομάκρυνση συνδυασμού οξειδίων του πυριτίου και αλκαλικών γαιών με αποτέλεσμα τη συσσώρευση οξειδίων και υδροξειδίων, τα οποία αποτίθενται σε άλλα σημεία του εδαφικού προφίλ (Queiroz de Carvalho, Effects of deferation and removal

of amorphous silica and alumina on selected properties of Brazilian lateritic soils, 1985).

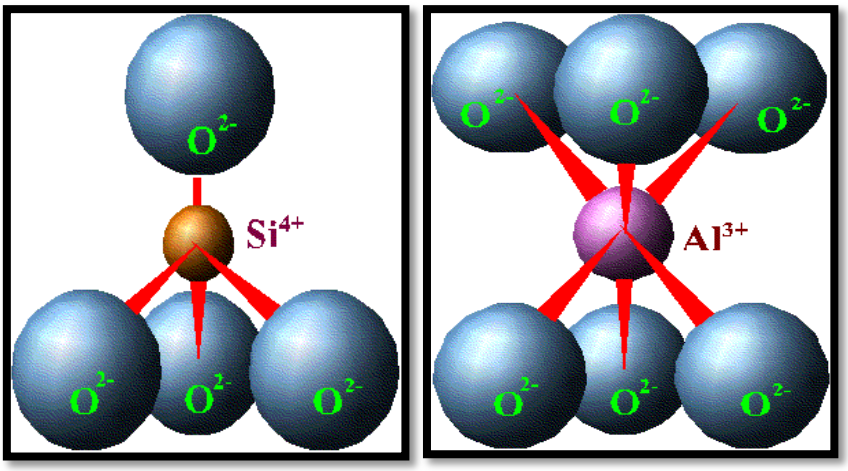
Η *αφυδάτωση* μεταβάλλει τη σύσταση και την κατανομή των πλούσιων σε τριοξείδια ορυκτών με τρόπο μη αναστρέψιμο κατά τη διαβροχή. Η αφυδάτωση επηρεάζει επίσης τις διαδικασίες σχηματισμού των αργιλικών ορυκτών. Στην περίπτωση της ολικής ξήρανσης είναι πιθανό να σχηματιστούν πολύ συνεκτικά ορυκτά με μοναδική κοκκώδη δομή.

2.3.2 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ

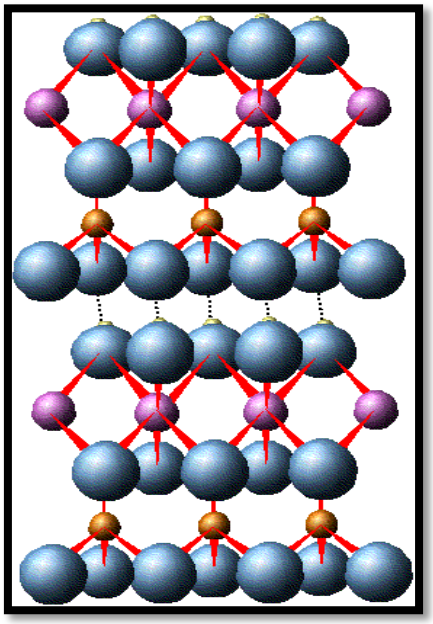
Η αποσύνθεση σε τροπικά κλίματα τείνει να ευνοεί το σχηματισμό του αργιλικού ορυκτού καολινίτη. Κάτω από κατάλληλες συνθήκες υγρασίας θα σχηματιστεί το ορυκτό αλλοϋσίτης. Σε συνθήκες παρατεταμένης αποσύνθεσης είναι δυνατή η απομάκρυνση οξειδίων του πυριτίου σε τέτοια έκταση ώστε να υπάρχει παρουσία ελεύθερων οξειδίων του αργιλίου και να σχηματιστεί γιββσίτης. Συνήθως μεγάλο μέρος του διοξειδίου του πυριτίου που παράγεται στο έδαφος θα βρίσκεται με τη μορφή χαλαζία. Στην περίπτωση που υπάρχουν οξείδια του σιδήρου σε μεγάλη συγκέντρωση θα σχηματιστούν τα ορυκτά γκαιτίτης και αιματίτης ανάλογα με τις επί τόπου συνθήκες. Για παράδειγμα ο αιματίτης σχηματίζεται μόνο σε συνθήκες έντονης οξείδωσης, ενώ ο γκαιτίτης και ο λειμωνίτης θα σχηματιστούν σε συνθήκες συνεχούς υγρασίας. Κάποια ορυκτά αποτελούν χαρακτηριστικά ορυκτά των εδαφών από διάφορες περιοχές του κόσμου. Ο ιλλίτης αναγνωρίζεται συχνά στα λατεριτικά εδάφη της Αφρικής ενώ σε αυτά της Βραζιλίας κυρίαρχο ορυκτό είναι ο καολινίτης. Ο μοντμοριλλονίτης ή σμεκτίτης είναι το κυρίαρχο αργιλικό ορυκτό της ευρέως διαδεδομένης ομάδας των μαύρων αργίλων (βλ. 2.2.5) και μερικών υπολειμματικών εδαφών προερχόμενων από ιζηματογενή πετρώματα (Begonha & Sequeira Braga, 2002).

Τα συνηθέστερα αργιλικά ορυκτά είναι αυτά που προκύπτουν από τη μεταβολή των καλιούχων αστρίων και των μαρμαρυγιών, και είναι ο καολινίτης, ο ιλλίτης, ο μοντμοριλλονίτης, ο σμεκτίτης και ο αλλοϋσίτης. Αυτά τα ορυκτά ανήκουν στη γενική ομάδα των φυλλοπυριτικών ορυκτών γιατί δομούνται από φύλλα με εξαμελείς δακτυλίους πυριτίου (Si) και ορισμένα με τετραμελείς δακτυλίους (Egli, Mirabella, & Fitze, 2003). Συγκεκριμένα οι φυλλοπυριτικοί κρύσταλλοι σχηματίζονται από τη συνένωση τετραεδρικών φύλλων SiO_4 με οκταεδρικά φύλλα αργιλίου (Al3+) και μαγνησίου (Mg_2+), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3.1. Ένα τετραεδρικό φύλλο SiO_4 σχηματίζεται όταν ένα άτομο οξυγόνου (O_2^-) μοιράζεται μεταξύ δύο τετράεδρων. Ομοίως ένα οκταεδρικό φύλλο σχηματίζεται όταν ένα άτομο Al μοιράζεται μεταξύ δύο οκταέδρων Al. Ανάλογα με τη σχέση των τετραεδρικών προς τα οκταεδρικά φύλλα σε μια κρυσταλλική στοιβάδα που επαναλαμβάνεται και τη χημική τους σύσταση, δημιουργούνται οι διάφοροι τύποι και τα μέλη των φυλλοπυριτικών ορυκτών (Εικόνα 2.3.2).

Σε αρκετά από τα τελευταία παρατηρείται ισόμορφη υποκατάσταση ιόντων με αποτέλεσμα η εξωτερική επιφάνεια ενός κρυστάλλου να εμφανίζεται φορτισμένη ηλεκτρικά. Τα εξωτερικά ιόντα εναλλάσσονται με άλλα που βρίσκονται σε εδαφικά διαλύματα. Η πυκνότητα του φορτίου στην επιφάνεια κάθε ηλεκτρικής στοιβάδας προσδίδει στο ορυκτό που προκύπτει διαφορετικές ιδιότητες.



Εικόνα 2.3.1: Τετραεδρικό φύλλο πυριτίου και οκατεδρικό φύλλο αργιλίου



Εικόνα 2.3.2: Σχηματική απεικόνιση δομής καολινίτη

Πολύ σημαντική ιδιότητα των αργιλικών υλικών αποτελεί η απορρόφηση ορισμένων ανιόντων και κατιόντων στην επιφάνεια των κρυστάλλων και η διατήρησή τους σε εναλλασσόμενη μορφή μεταξύ υγρής και στερεής κατάστασης. Τέτοια ιόντα που συναντώνται συχνά στο έδαφος είναι: Ca2+, Mg2+, Na+, K+, H+, NH4+ κ.α.. Η ικανότητα αυτή (Cat ion Exchange Capacity-CEC) των αργιλικών ορυκτών να ανταλλάσσουν ιόντα δεν επηρεάζει τη δομή των τετραέδρων/οκταέδρων και εκφράζεται σε meq ανά 100gr εδάφους. Φαίνεται ότι τα κατιόντα απορροφώνται πιο εύκολα από τα ανιόντα, με συνέπεια οι επιφάνειες των αργιλικών ορυκτών να εμφανίζονται αρνητικά φορτισμένες, προφανώς όμως δεν απορροφούν όλοι οι τύποι αργιλικών ορυκτών με την ίδια ικανότητα. Για παράδειγμα ο μοντμοριλλονίτης είναι 10 φορές πιο ενεργός από τον καολινίτη και εμφανίζει μεγαλύτερη απορρόφηση κατιόντων σε σχέση με τον ιλλίτη και τον καολινίτη λόγω της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειάς του, καθώς και του μεγαλύτερου αρνητικού φορτίου που φέρει. Ο Πίνακας 2.3.1 αναφέρεται ενδεικτικά στο μέγεθος και στην ικανότητα ιοντοανταλλαγής των

κυριότερων αργιλικών ορυκτών που σχηματίζονται από πυριγενή μητρικά πετρώματα.

Πίνακας 2.3.1: Μέγεθος και εύρος της ικανότητας κατιόντο-ανταλλαγής των κύριων αργιλικών ορυκτών

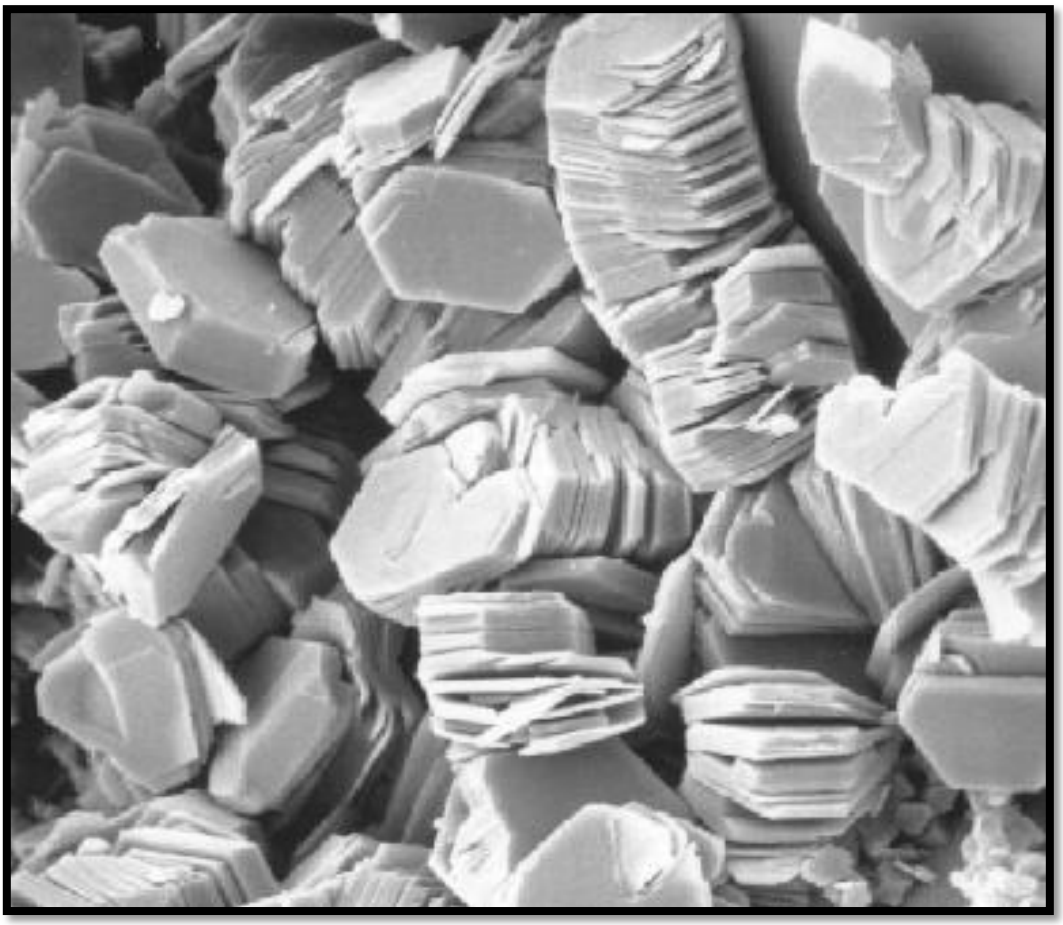
	Καολινίτης	Ιλλίτης	Μοντμοριλλονίτης
Πάχος κόκκου	0.5-2 μικρά	0,003-0,1 μικρά	Λιγότερο από 9.5 Å
Διάμετρος κόκκου	0,5-4 μικρά	0,5-0,1 μικρά	0,05-10 μικρά
Ειδική επιφάνεια (m^2/gram)	10-20	65-80	50-840
Ικανότητα ανταλλαγής Ιόντων (CEC)	3-15	10-40	70-80

Ο καολινίτης (Εικόνα 2.3.3) και ο αλλοϋσίτης ανήκουν στην ομάδα Σερπεντίνη – Καολινίτη, η δομή τους είναι 1:1 και έχουν δι-οκταεδρικό χαρακτήρα (Martin, et al., 1991). Ο καολινίτης προέρχεται από την εξαλλοίωση αστρίων και μαρμαρυγιών. Έντονη βροχόπτωση και απόπλυση (ελεύθερα στραγγιζόμενες συνθήκες) καθώς και όξινο περιβάλλον διευκολύνουν το σχηματισμό του και επομένως εντοπίζεται σε υγρές τροπικές και υποτροπικές συνθήκες, ή και σε ψυχρά εύκρατα κλίματα με μέτρια βροχόπτωση(100-150 cm) και χαμηλή θερμοκρασία (16°-18° C). Απαραίτητη είναι και η ύπαρξη ομαλού σχετικά ανάγλυφου και ήπιων τεκτονικών συνθηκών ώστε η χημική αποσάθρωση να υπερισχύει της διάβρωσης.

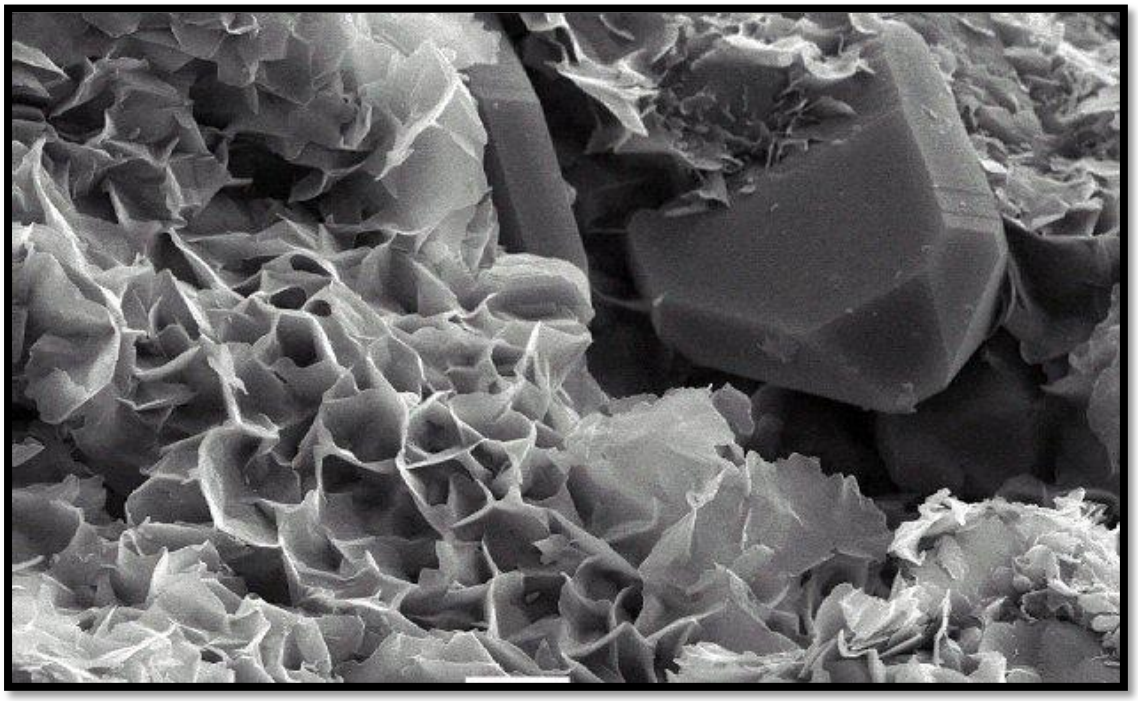
Ο *αλλοϋσίτης* εμφανίζεται συχνά σε τροπικά υπολειμματικά εδάφη, συνήθως προερχόμενα από ηφαιστειακά υλικά (π.χ. ηφαιστειακή τέφρα). Εμφανίζει μικρές μεταβολές όγκου ενώ μπορεί να περιέχει νερό το οποίο όμως δεν επιδρά στη μηχανική του συμπεριφορά.

Ο *ιλλίτης* ανήκει στην ομάδα των εύκαμπτων μαρμαρυγιών (μαζί με το Μοσχοβίτη και το Βιοτίτη), έχει δομή 2:1, δι-οκταεδρικού χαρακτήρα με ενδοστρωματωμένα άνυδρα μονοσθενή κατιόντα (Martin, et al., 1991). Προέρχεται από την εξαλλοίωση αστρίων και μαρμαρυγιών και περιέχει λιγότερο κάλιο (K^+) και περισσότερο νερό από τους μαρμαρυγίες και περισσότερο κάλιο (K^+) από τον μοντμοριλλονίτη με τον οποίο μπορεί να είναι ενδοστρωματωμένος. Τείνει να σχηματίζεται σε αλκαλικό περιβάλλον με ελεύθερα στραγγιζόμενες συνθήκες.

Ο *μοντμοριλλονίτης* (Εικόνα 2.3.4) ανήκει στην ομάδα σμεκτίτη, έχει δομή 2:1, δι-οκταεδρικού χαρακτήρα με ενδοστρωματωμένα ένυδρα ανταλλάξιμα κατιόντα (Martin, et al., 1991). Προέρχεται από την εξαλλοίωση σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών, αστρίων και ηφαιστειακών υλικών. Διογκώνεται πάρα πολύ στο νερό ή στα πολικά υγρά. Απαιτούμενες συνθήκες για το σχηματισμό του αποτελούν έντονος θρυμματισμός, υψηλή ενυδάτωση και περιορισμένη απόπλυση (κακά στραγγιζόμενες συνθήκες). Η παρουσία του νερού είναι απαραίτητη για τη μεταβολή των αρχικών ορυκτών ενώ η περιορισμένη απόπλυση συσσωρεύει τα ιόντα στο σημείο σχηματισμού τους (Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+}). Επομένως τείνει να σχηματίζεται σε αλκαλικό περιβάλλον με παρουσία ιόντων μαγνησίου, σε συνθήκες ημιξηρασίας περιοχών με σχετικά χαμηλή ή εποχιακά μέτρια βροχόπτωση και όπου η εξάτμιση υπερισχύει της βροχόπτωσης.



Εικόνα 2.3.3: Δομή καολινίτη όπως φαίνεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Barnes, 2000)



Εικόνα 2.3.4: Δομή σμεκτίτη όπως φαίνεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Barnes, 2000)

Ο Πίνακας 2.3.2 κατανέμει τα υπολειμματικά εδάφη σε παγκόσμια κλίμακα με βάση την ορυκτολογική τους σύσταση και τη σύνδεση αυτής με την κλιματική ζώνη και τη μέση ετήσια θερμοκρασία και βροχόπτωση.

Πίνακας 2.3.2: Κυριότεροι τύποι εδαφών με βάση την ορυκτολογική τους σύσταση και η κατανομή τους ανάλογα με τις συνθήκες βροχόπτωσης και θερμοκρασίας

Τύπος Εδάφους	Ζώνη	Μέση ετήσια Θερμοκρασία (°C)	Ετήσια βροχόπτωση (μ)	Ξηρή Περίοδος
Φερσιαλιτικά (Fersiallitic soils)	Μεσογειακή Υποτροπική	13-20	0,5 – 1,0	ΝΑΙ
Φερογενή (ferruginous soils) Φεριτικά (μεταβατικά) (Ferrisols)	Υποτροπική	20-25	1,0 – 1,5	Μερικές φορές
Φεραλιτικά (ferallitic soils)	Τροπική	> 25	> 1,5	ΟΧΙ
Εδάφη ηφαιστειακής Τέφρας (andosols)	Ηφαιστειογενείς Περιοχές			
Εδάφη με πολύ μεγάλο ποσοστό διογκούμενων αργιλικών ορυκτών (vertisols, black cotton clays)			> 1,25	ΝΑΙ

Υπάρχουν και άλλα ορυκτολογικά στοιχεία τα οποία αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία, τα οποία είναι είτε σπάνια, είτε δύσκολο να αναγνωριστούν. Στα ορυκτά αυτά περιλαμβάνονται ο *βοημίτης*, ο *ανατάσης*, *μικτά στρώματα καολινίτη-ιλλίτη* ή συγκεντρώσεις *καολινίτη-βερμικουλίτη*. Άλλα ορυκτά είναι πιθανό να σχηματίζονται σε υπολειμματικά εδάφη και να παραμένουν για μικρό χρονικό διάστημα ως μεταβατικά ορυκτά μιας συγκεκριμένης ακολουθίας αποσάθρωσης. Για παράδειγμα υπάρχουν στοιχεία παρουσίας μοντμοριλλονίτη σε λατεριτικά εδάφη.

Η αποσάθρωση ηφαιστειακών τεφρών σε τροπικά κλίματα δίνει συχνά ως προϊόν τον αλλοφανή, ένα άμορφο αργιλικό ορυκτό με ασυνήθιστα υψηλές τιμές φυσικής υγρασίας. Ο αλλοφανής μπορεί να αναγνωριστεί από τη μεγάλη, μη αναστρέψιμη μεταβολή του δείκτη πλαστικότητας μετά από ξήρανση.

Τα αργιλικά ορυκτά τείνουν να συγκεντρώνονται στο λεπτόκοκκο κλάσμα του εδάφους, ενώ τα ορυκτά των οξειδίων του σιδήρου και ο χαλαζίας τείνουν να συγκεντρώνονται στο χονδρόκοκκο κλάσμα αυτού. Ο γιββσίτης και ο βοημίτης συναντώνται συχνά ως υλικό πλήρωσης των πόρων και των κενών των συγκριμάτων του εδάφους. Επίσης έχουν αναγνωριστεί σημαντικές ποσότητες άμορφων στοιχείων σε λατεριτικά και σαπρολιθικά εδάφη (Queiroz de Carvalho, 1991).

Υπάρχει ένα πολύ μεγάλο εύρος διαδικασιών που μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό υπολειμματικών εδαφών. Σε περιοχές όπου παρατηρούνται εποχιακές εναλλαγές υγρών και ξηρών περιόδων και το εδαφικό προφίλ έχει φτάσει σε στάδιο μεγάλης ωρίμανσης διαπιστώνεται τάση δημιουργίας μικτών εδαφών με έντονα δομικά χαρακτηριστικά, όπως συμβαίνει σε περιοχές της Ελλάδας (Chatzigogos, Makedon, & Tsotsos, 2007), της Αυστραλίας (Richards, 1985) και αλλού (Islam, Peuraniemi, Aario, & Rojstaczer, 2002). Το κλασικό προφίλ αποσάθρωσης, από το

ώριμο έδαφος έως το υγιές πέτρωμα έχει συζητηθεί ευρέως και έχει εξεταστεί διεξοδικά σε πολλές περιοχές (Brand E. W., 1988). Παρατηρούνται έντονες ορυκτολογικές διαφοροποιήσεις ακόμα και μέσα στα εντελώς εδαφοποιημένα στρώματα εξαιτίας διαδικασιών όπως η έκπλυση και η αφυδάτωση. Το γεγονός αυτό αυξάνει την ούτως ή άλλως μεγάλη ανομοιογένεια των υπολειμματικών εδαφών κάνοντας ακόμα δυσκολότερη την αποτύπωση των προφίλ τους.

2.3.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ

Η ορυκτολογική σύσταση των εδαφών μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορους τρόπους. Έχουν αναπτυχθεί πολύ εξειδικευμένες τεχνικές και μέθοδοι ορυκτολογικής έρευνας οι κυριότερες των οποίων είναι:

- Περιθλασιμετρία με ακτίνες Χ
- Θερμο-βαρυτομετρία
- Εξέταση με πολωτικό μικροσκόπιο
- Σάρωση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

Η χρήση των παραπάνω μεθόδων για την ορυκτολογική αναγνώριση απαιτεί εξειδικευμένη γνώση και διαδικασίες. Συχνά είναι απαραίτητος ο συνδυασμός τεχνικών για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης. Για την ορυκτολογική διερεύνηση των υπολειμματικών εδαφών προτείνεται ο συνδυασμός χρήσης πολωτικού μικροσκοπίου, για την αναγνώριση της υφής του αποσαθρωμένου υλικού, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται υγιείς και αποσαθρωμένοι κόκκοι ορυκτών, και της περιθλασιμετρίας με ακτίνες Χ, μεθόδου που είναι κατάλληλη για ορυκτά με διακριτή κρυσταλλογραφία.

Η μέθοδος της *περιθλασιμετρίας* με ακτίνες Χ είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την αναγνώριση και το χαρακτηρισμό των λεπτομερών υλικών του εδάφους. Ο διαχωρισμός των ορυκτών συστατικών σε απλούστερες ομάδες δίνει λιγότερες και ευκρινέστερες ανακλάσεις σε κάθε περιθλασιόγραμμα διευκολύνοντας την ημι-ποσοτική και ποιοτική ανάλυσή τους. Οι εντάσεις των ανακλάσεων των αργιλικών ορυκτών ποικίλλουν ανάλογα με τη χημική τους σύσταση και τον τύπο του περιθλασίμετρου ενώ παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε αλλαγές του περιβάλλοντος απόθεσής τους.

Για τον ημι-ποσοτικό προσδιορισμό του ορυκτού μετριέται η ένταση μιας χαρακτηριστικής του ανάκλασης σε γωνία 2θ. Η ένταση της ανάκλασης είναι ανάλογη: α) της περιεκτικότητας του ορυκτού στο υλικό, β) του μεγέθους των κόκκων και της κρυσταλλικής του ακεραιότητας. Οι ανακλάσεις πρώτης τάξης των αργιλικών ορυκτών είναι συχνά οι σπουδαιότερες για τον προσδιορισμό τους και αντιστοιχούν σε πλεγματικές διαστάσεις μέχρι 30 Å ενώ το σχήμα της ανάκλασης μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για το βαθμό κρυσταλλικότητας του αργιλικού ορυκτού. Ένα καλά κρυσταλλωμένο ορυκτό δίνει μεγαλύτερες και οξύτερες εντάσεις από το αντίστοιχό του κακώς κρυσταλλωμένο (π.χ. καολινίτης).

Για να εκτιμήσουμε την εκατοστιαία περιεκτικότητα ενός ορυκτού σε ένα δείγμα υπολειμματικού εδάφους ορισμένου βάθους από την ένταση της χαρακτηριστικής τους ανάκλασης, πρέπει να αναλύσουμε με ακτίνες Χ διάφορα

κλάσματα στενών ορίων των κόκκων του εδάφους αν και πρακτικά ο διαχωρισμός των κόκκων δε μπορεί να είναι τέλειος ώστε να δώσει κλάσματα ενός μόνο ορυκτού.

Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τις πλεγματικές διαστάσεις του ορυκτού είναι η σταθερότητα της χημικής του σύστασης. Έτσι κατά την ετοιμασία των δειγμάτων για την ακτινοσκόπησή τους έτσι ώστε να είναι αξιόπιστο το διάγραμμα θα πρέπει:

1. Τα δείγματα συγκεκριμένου βάθους να είναι αντιπροσωπευτικά του υλικού στο δοσμένο βάθος

2. Να γίνεται προσεκτική κονιοποίηση ούτως ώστε αφενός να ομογενοποιηθεί πλήρως το δείγμα και να αφαιρεθούν ανεπιθύμητα υλικά, και αφετέρου να αποφευχθεί η καταστροφή/διαστροφή του κρυσταλλικού πλέγματος.

Γενικά, όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι τόσο πιο λείες και ομαλές είναι οι κορυφές περίθλασης. Συνήθως παίρνουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα για μέγεθος κόκκων <45 μm για ορυκτά χαμηλής συμμετρίας, ενώ για ορυκτά υψηλής συμμετρίας το μέγεθός τους μπορεί να είναι και μεγαλύτερο. Στους προσδιορισμούς ορυκτών είναι πιθανό να γίνουν σφάλματα που μπορεί να οφείλονται:

- στο διαφορετικό βαθμό ομογενοποίησης των επιμέρους μιγμάτων,
- στο διαφορετικό μέσο μέγεθος των κόκκων κάθε ορυκτού,
- στους υψηλότερους συντελεστές απορρόφησης μάζας ορισμένων στοιχείων (π.χ. ασβεστίου, σιδήρου) και κατ'επέκταση ορισμένων ορυκτών πλούσιων σε αυτά (π.χ. δολομίτη, σιδηροπυρίτη).

Για την ολοκληρωμένη εξέταση της ορυκτολογικής σύστασης ενός υπολειμματικού εδάφους με τη χρήση της περιθλασιμετρίας με ακτίνες Χ χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μορφές παρασκευασμάτων:

i. Τυχαία προσανατολισμένο, όπου σε θήκη αλουμινίου τοποθετείται ποσότητα του κονιοποιημένου και ομογενοποιημένου δείγματος από ορισμένη θέση και γίνεται σάρωση στο περιθλασίμετρο.

ii. Παράλληλα προσανατολισμένο, 10 ml αιωρήματος εκάστου δείγματος τοποθετείται σε αντικειμενοφόρο πλάκα και στεγνώνει σε θερμοκρασία δωματίου. Τα προσανατολισμένα παρασκευάσματα βοηθούν στην ενίσχυση των εντάσεων των ανακλάσεων των φυλλοπυριτικών ορυκτών.

iii. Διαποτισμένο με αιθυλενογλυκόλη (glycolated), παράλληλα προσανατολισμένο παρασκεύασμα αφού έχει ακτινογραφηθεί σε περιθλασίμετρο, τοποθετείται για 12 ώρες σε δοχείο με ατμούς αιθυλενογλυκόλης (ή γλυκερόλη). Μετά το διαποτισμό γίνεται νέα ακτινογράφηση. Η επεξεργασία αυτή προτιμάται για την μελέτη αργιλικών ορυκτών (επειδή συντελούν στην αύξηση των εντάσεων δεύτερης, τρίτης κ.ο.κ. ανάκλασής τους).

iv. δ) Πυρωμένο στους 550°C, παράλληλα προσανατολισμένο παρασκεύασμα πυρώνεται εκ νέου σε φούρνο θερμοκρασίας περίπου 550°C και τοποθετείται στο περιθλασίμετρο για νέα σάρωση. Η επεξεργασία αυτή χρειάζεται για τη διάκριση του χλωρίτη από σμεκτίτη, βερμικουλίτη και ενδοστρωματωμένα ορυκτά ιλλίτη/σμεκτίτη. Με αυτήν τη διαδικασία η ανάκλαση του χλωρίτη αυξάνει σε ένταση (από 2 έως 5 φορές) και μετατοπίζεται στα 13,9 Å, ενώ όλων των υπολοίπων στα 10 Å περίπου και έτσι επιτυγχάνεται διαχωρισμός του χλωρίτη.

Η αναγνώριση των μη-αργιλικών ορυκτών γίνεται με χρήση περιθλασιογραμμάτων των τυχαία προσανατολισμένων παρασκευασμάτων και πινάκων που δίνουν τις πλεγματικές διαστάσεις ορυκτών, ενώ οι υπόλοιποι τύποι παρασκευασμάτων χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση των αργιλικών ορυκτών.

2.3.4 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Η δομή, ο ιστός και η υφή είναι όροι που αναφέρονται στη φυσική διάταξη των κόκκων και σωματιδίων των εδαφών. Η διάταξη σε συνδυασμό με την ορυκτολογική σύσταση καθορίζει τη μηχανική συμπεριφορά αυτών. Η σημαντικότητα του ιστού στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών έχει αναγνωριστεί διεθνώς εδώ και πολλά χρόνια και έχει μελετηθεί επαρκώς (Rowe, 1974). Τα περισσότερα στοιχεία ιστού που σχετίζονται με τη μηχανική συμπεριφορά είναι στοιχεία μακροδομής, δηλαδή μπορούν να παρατηρηθούν χωρίς μεγέθυνση.

Η μικροδομή περιλαμβάνει το μικροϊστό, τη σύσταση και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στα σωματίδια. Η έρευνα της μικροδομής μπορεί να διεξαχθεί με χρήση οπτικού μικροσκοπίου τύπου SEM ή TEM. Η μικρό-δομή των υπολειμματικών εδαφών μπορεί να αποκαλύψει φαινόμενα συγκόλλησης (cementation) ή στοιχειώδεις διατάξεις επαφής σωματιδίων, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν στην καλύτερη κατανόηση της εμφάνισης και της μηχανικής συμπεριφοράς τέτοιων εδαφών.

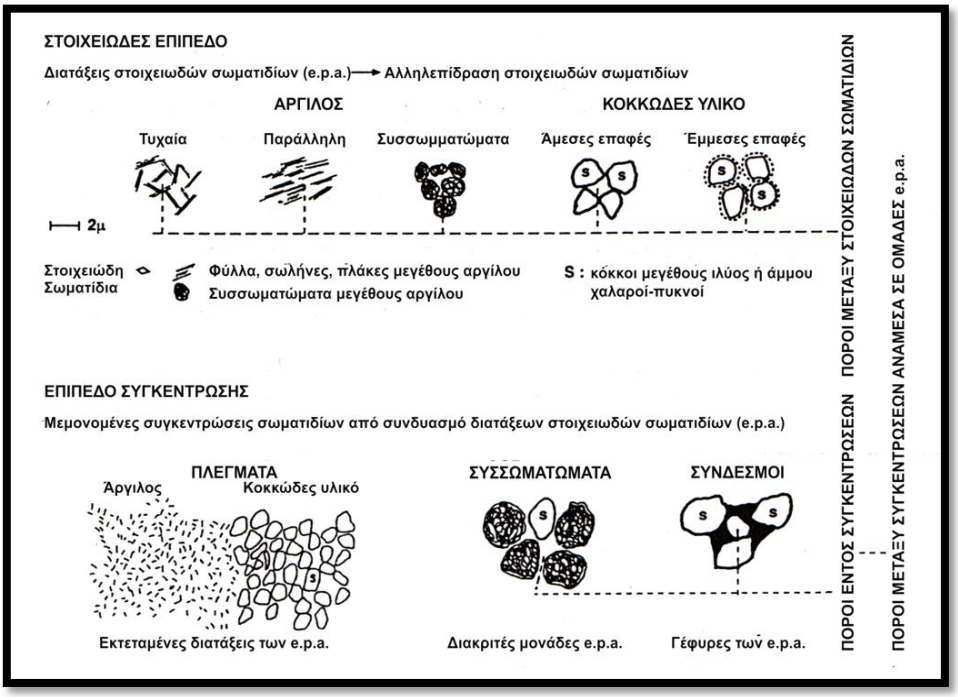
Ο Collins (Collins, 1985) έκανε εκτεταμένες έρευνες στη μικρό-δομή των υπολειμματικών εδαφών και πρότεινε το διαχωρισμό της μικρό-δομής σε τρία επίπεδα:

1. Στοιχειώδες επίπεδο (elementary level)
2. Επίπεδο συναρμογής (Assemblage level)
3. Επίπεδο σύνθεσης (Composite level)

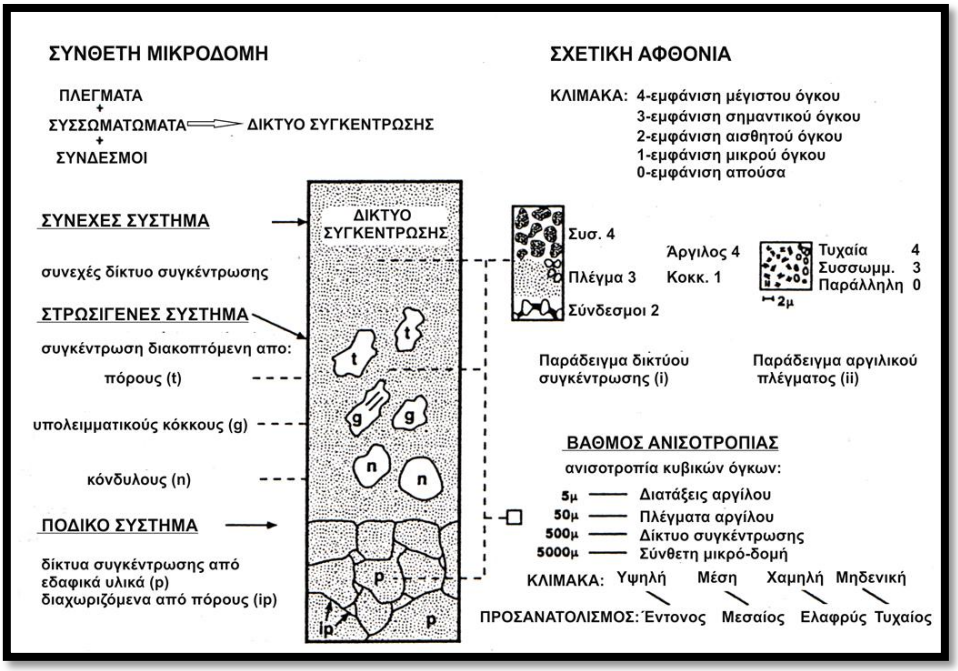
Το *στοιχειώδες επίπεδο* δημιουργείται από έναν αριθμό μεμονωμένων σωματιδίων μεγέθους αργίλου, ιλύος ή και άμμου, μία ομάδα σωματιδίων μεγέθους αργίλου, ή ακόμα από ένα συσσωμάτωμα σωματιδίων μεγέθους αργίλου (Εικόνα 2.3.5). Στο *επίπεδο συναρμογής* περιλαμβάνεται ένας μεγάλος αριθμός αργιλικών ή κοκκωδών σωματιδίων με διακριτά φυσικά όρια (Εικόνα 2.3.5). Σε αυτό το επίπεδο αναγνωρίζονται τρεις τύποι συγκέντρωσης:

- Πλέγματα
- Συσσωματώματα
- Κοκκώδη πλέγματα

Το *επίπεδο σύνθεσης* πρέπει να εξεταστεί σε τρεις βασικές διαστάσεις. Στην ύπαρξη σύνθετων μικροϊστών, στο σχετικό αριθμό εμφάνισης αυτών, που αντικατοπτρίζει την ανομοιογένεια του εδάφους και στο βαθμό ανισοτροπίας (Εικόνα 2.3.6). Είναι σημαντικό να γίνεται σύνδεση της μικροδομής με παρατηρήσεις σε συγκεκριμένα εδάφη έτσι ώστε να γίνεται κατανοητό το πώς είναι πιθανό να συμπεριφερθούν τα εδαφικά σωματίδια και οι κόκκοι.



Εικόνα 2.3.5: Στοιχειώδες επίπεδο και επίπεδο συναρμογής μικροδομής (Collins, 1985)



Εικόνα 2.3.6: Επίπεδο σύνθεσης μικροδομής (Collins, 1985)

2.3.5 ΣΧΕΣΗ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η σχέση της ορυκτολογικής σύστασης με τη μηχανική συμπεριφορά των υπολειμματικών εδαφών είναι αυταπόδεικτη. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.2.3 η παρουσία συγκεκριμένων ορυκτών συνδέεται άρρηκτα με τη μηχανική συμπεριφορά των υπολειμματικών εδαφών, έτσι ώστε να είναι πρακτικά εφικτή αλλά και παραγωγική μία κατάταξή τους με βάση την ορυκτολογική τους σύσταση. Τα σημαντικότερα ορυκτά, η παρουσία των οποίων καθορίζει και τη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών είναι ο καολινίτης, ο μοντμοριλλονίτης, ο αλλοφανής και ο αλλοϋσίτης. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και η παρουσία τριοξειδίων. Η επίδρασή τους σχετίζεται με τον τρόπο παρουσίας τους στο έδαφος. Αν αποτελούν παράγοντα συγκόλλησης (cementation) των σωματιδίων, τότε τείνουν να προκαλέσουν μείωση της πλαστικότητας του εδάφους. Αν η συγκόλληση είναι ασθενής, τότε η αναμόχλευση του υλικού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αλληλεπίδρασης των αργιλικών σωματιδίων και επομένως την αύξηση της πλαστικότητας.

Η ομάδα του σμεκτίτη εμφανίζεται συχνά σε μαύρες τροπικές αργίλους (vertisols) και σε μεγάλες ποσότητες μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες μεταβολές όγκου ως απόκριση σε μικρές εποχιακές αλλαγές των ενεργών τάσεων. Επιπρόσθετα, όταν η επιφάνεια εξάτμισης περιορίζεται οι αλλαγές αυτές μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Ο καολινίτης έχει πλακώδη μορφή με χαμηλό συντελεστή τριβής μεταξύ των κόκκων αν και οι τελευταίοι είναι πολύ μεγαλύτεροι και λιγότερο ενεργοί. Ως εκ τούτου, υπολειμματικά εδάφη που περιέχουν καολινίτη παρουσιάζουν χαμηλότερη συμπιεστότητα, δεν διογκώνονται και έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκριση με άλλο τύπο εδάφους, ο οποίος έχει ίδιο ποσοστό αργίλου αλλά περιέχει σμεκτίτη (διογκούμενο ορυκτό αργίλου).

Γενικά τα πλακώδη αργιλικά ορυκτά με χαμηλό συντελεστή τριβής μπορεί να αποκτήσουν προσανατολισμό σε πιθανή διάτμηση, με αποτέλεσμα την χαμηλή αντοχή λόγω τριβής και το σχηματισμό λειασμένων διατμητικών επιφανειών. Τέτοιες επιφάνειες μπορεί να είναι παρούσες σε υπολειμματικά εδάφη και έχουν δημιουργηθεί ως αποτέλεσμα ανάπτυξης τάσεων που συνοδεύουν τις διεργασίες δημιουργίας εδάφους, συρρίκνωσης και διόγκωσης.

Η μικροδομή είναι επίσης ένας βασικός παράγοντας επίδρασης στα μηχανικά χαρακτηριστικά ενός υπολειμματικού εδάφους. Οι Baynes & Dearman συμπέραναν ότι οι μεταβολές στα μηχανικά χαρακτηριστικά αποσαθρωμένων γρανιτών οφείλονται σε μικρορωγμές και στο πορώδες μεταξύ των κόκκων που παρατηρήθηκαν στη μικροδομή του εξεταζόμενου αποσαθρωμένου υλικού (Baynes & Dearman, 1978). Ο Collins εντόπισε παρόμοια χαρακτηριστικά σε αποσαθρωμένους γρανίτες της Βραζιλίας (Collins, 1985).

Ένα χαρακτηριστικό που εντοπίζεται σε εδάφη που έχουν υποστεί κύκλους ύγρανσης και ξήρανσης που τα αργιλικά τους ορυκτά μετατρέπονται σε ορυκτά στα οποία κυριαρχεί το νάτριο, είναι η συμπεριφορά διεσπειρόμενου εδάφους (dispersive soil behavior). Έχει διαπιστωθεί ότι ο πιο χαρακτηριστικός παράγοντας αναγνώρισης

τέτοιων εδαφών, είναι η παρουσία αργιλικών συσσωματωμάτων της μικροδομής. Τα αργιλικά ορυκτά δημιουργούν συσσωματώματα σε συγκεκριμένες ζώνες που συνδέονται με τις ζώνες εξάτμισης των εποχιακών υπόγειων νερών. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μικροδομή έχει κυρίαρχο ρόλο σε σχέση με την ορυκτολογική σύσταση. Η διαβρωσιμότητα των εξεταζόμενων εδαφών βρέθηκε να είναι μεγαλύτερη σε περιοχές όπου τα συσσωματώματα είχαν το μέγεθος ιλύος (Simmons, 1989).

Συμπερασματικά, τα υπολειμματικά εδάφη αναμένεται να εμφανίζουν μεγάλο εύρος μηχανικών χαρακτηριστικών. Στις περιπτώσεις που αναγνωρίζονται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ορυκτολογίας και μικρό-δομής αναμένονται και οι αντίστοιχες επιδράσεις στη μηχανική συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό, στην έρευνα των υπολειμματικών εδαφών, παίζουν σημαντικό ρόλο οι επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές που στοχεύουν στον προσδιορισμό αυτών των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών.

2.3.6 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΤΗΣ ΑΣΠΡΟΒΑΛΤΑΣ

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναδεικνύεται η σημαντικότητα της ορυκτολογικής σύστασης στην έρευνα υπολειμματικών εδαφών. Είναι χαρακτηριστικό πως σε αυτήν βασίζεται ο αρχικός διαχωρισμός στο προτεινόμενο σύστημα ταξινόμησης υπολειμματικών εδαφών που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.2.2 ακριβώς γιατί καθορίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι τα ορυκτά δεν είναι εξίσου ευπρόσβλητα στη χημική αποσύνθεση και στην ορυκτολογική αλλαγή λόγω της αποσάθρωσης. Για κάθε πέτρωμα υπάρχει μία αλληλουχία στη διαδικασία αποσάθρωσής τους, η οποία εξαρτάται από τα παρόντα ορυκτά και πρέπει να διερευνάται ξεχωριστά.

Για τους παραπάνω λόγους σχεδιάσθηκε ένα στοχευμένο πρόγραμμα ορυκτολογικής διερεύνησης των υπολειμματικών εδαφών της περιοχής της Ασπροβάλτας. Στόχος του ήταν αφενός η διερεύνηση του μοντέλου αποσάθρωσης της εξεταζόμενης βραχομάζας (βιοτιτικός γνεύσιος), και αφετέρου ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης του τελικού προϊόντος που αναφέρεται ως ενότητα C, η παρουσία του οποίου συνδέεται με τις διερευνούμενες αστοχίες. Παράλληλα μελετήθηκαν υπολειμματικά εδάφη στην περιοχή του Νευροκοπίου και γεωυλικά στην περιοχή του Δερβενίου, προερχόμενα από ίδιας σύστασης μητρικό πέτρωμα (διμαρμαρυγιακός γνεύσιος), ώστε να γίνει σύγκριση της ορυκτολογικής σύστασης των προϊόντων αποσάθρωσής τους και να επισημανθούν τυχόν ομοιότητες στους μηχανισμούς αποσάθρωσης και στα τελικά τους προϊόντα.

Σε πρώτο στάδιο επιλέχθηκαν δύο αντιπροσωπευτικά δείγματα των ενοτήτων A και C των γεωυλικών της περιοχής έρευνας, έτσι ώστε να γίνει μία πρώτη αποτύπωση της αρχικής ορυκτολογικής τους σύστασης και της πλήρως αποσαθρωμένης τους κατάστασης. Τα δείγματα εξετάσθηκαν με τις τεχνικές που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2.3.3 με στόχο τον εντοπισμό των υπαρχόντων αργιλικών ορυκτών και τον προσδιορισμό της κατά βάρος κατανομής τους. Ο Πίνακας 2.3.3 παρουσιάζει τα επιμέρους αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων. Τα δείγματα των ενοτήτων C και A, αναφέρονται αντίστοιχα ως Δ1 και Δ2 στο

Παράρτημα Α, όπου και παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών δοκιμών.

Πίνακας 2.3.3: Ορυκτολογική σύσταση των Ενοτήτων Α και C των βιοτιτικών γνευσίων της Ασπροβάλτας

ΟΡΥΚΤΟ	Ενότητα Α %	Ενότητα C %
Χαλαζίας	64	21
Πλαγιόκλαστα	11	2
Κ - Άστριοι	6	-
Μαρμαρυγίες	7	-
Ασβεστίτης	2	11
Αργιλικά ορυκτά	10	66
Διογκούμενα	6	21
Μη-διογκούμενα	4	45

Τα αποτελέσματα της πρωταρχικής ορυκτολογικής διερεύνησης του παραπάνω πίνακα επιβεβαιώνουν την αργιλοποίηση του μητρικού πετρώματος και την ύπαρξη διογκούμενων αργιλικών ορυκτών, κυρίως από την αποσάθρωση του βιοτίτη. Σε δεύτερο στάδιο εξετάσθηκαν επιλεγμένα δείγματα της ενότητας C από τις χιλιομετρικές θέσεις 9+700, 10+300 και 10+500 της Εγνατίας Οδού (Πίνακας 2.3.4), όπου παρατηρήθηκαν αστοχίες των τεχνητών ορυγμάτων. Στις θέσεις αυτές η δειγματοληψία έγινε μετά από τον εντοπισμό του εν λόγω αργιλοποιημένου υπολειμματικού εδάφους σε επιφανειακές εμφανίσεις.

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής έρευνας πιστοποιούν την ύπαρξη πολύ υψηλού ποσοστού διογκούμενων αργιλικών και λεπτόκοκκων μαρμαρυγιακών ορυκτών. Διαπιστώθηκε πως τα διογκούμενα αργιλικά ορυκτά ανήκουν στην ομάδα του σμεκτίτη, και τα μαρμαρυγιακά ορυκτά είναι κυρίως ιλλίτης. Η παρουσία των παραπάνω πολύ ενεργών αργιλικών ορυκτών καθορίζει τις τιμές των φυσικών και των μηχανικών ιδιοτήτων του υπολειμματικού εδάφους, ενώ παράλληλα καθιστά καταλυτική για αυτές οποιαδήποτε μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας τους. Στα μη-διογκούμενα αργιλικά ορυκτά βρέθηκε βερμικουλίτης, σεπιόλιθος και καολινίτης. Επίσης, η παρουσία των υπόλοιπων ορυκτολογικών συστατικών (χαλαζία, αμφιβόλων, αστριών και πλαγιοκλάστων), πιστοποιεί την πετρολογική προέλευση του υπολειμματικού υλικού, δηλαδή ότι δεν πρόκειται για κάποιο αργιλικό υλικό πλήρωσης.

Η ορυκτολογική σύσταση ενός υπολειμματικού εδάφους αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία μπορεί να στηριχθεί η ερμηνεία της μηχανικής συμπεριφοράς. Πέρα όμως από αυτό, συντελεί μαζί με πληροφορίες από τη βιβλιογραφία, στη διασαφήνιση του μοντέλου αποσάθρωσης που έδρασε ή δρα για το σχηματισμό του. Το σύνολο μίας αποσαθρωμένης βραχόμαζας, όπως αυτής της περιοχής της Ασπροβάλτας, διέπεται από έντονη ανισοτροπία και η εφαρμογή τεχνικογεωλογικών μοντέλων μπορεί να γίνει μόνο με γενναίες και συνήθως μη ρεαλιστικές παραδοχές. Η μελέτη του μηχανισμού αποσάθρωσης μιας βραχόμαζας μπορεί να συντελέσει

στον καθορισμό ζωνών ισοτροπίας που θα καθορίζουν τη συνέχειά τους στο χώρο και τη γεωμετρία τους.

Πίνακας 2.3.4: Ορυκτολογική σύσταση ενότητας C. SC: Διογκούμενες άργιλοι, K: Καολινίτης, T: Τάλκης, M: Μαρμαρυγίες (κυρίως ιλλίτης), Kf: K-άστριοι, Pl: Πλαγιόκλαστα, Q: Χαλαζίας, A: Αμφίβολοι, C: Ασβεστίτης

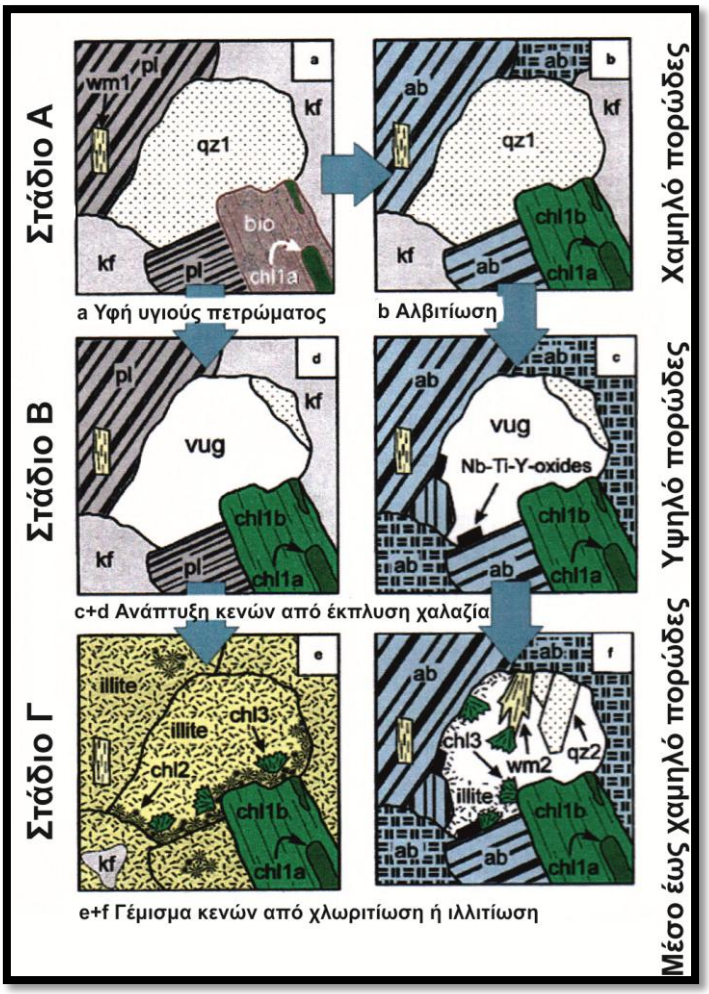
Δείγμα	Αργιλικά			M	Άστριοι		Q	A	C
	SC	K	T		Kf	Pl			
NX1(9+700)	52	2	-	4	3	8	31	-	-
NX2(10+300)	57	2	-	23	2	-	16	-	-
NX3(10+500)	46	4	2	9	2	2	29	2	4

Αναφορικά με τα πετρώματα της περιοχής έρευνας, αυτά τοποθετούνται σε ζώνη πολύ έντονης τεκτονικής καταπόνησης, που σε συνδυασμό με την κυκλοφορία υδροθερμικών ρευστών έχει ως αποτέλεσμα τον κερματισμό και την εξαλλοίωσή τους κατά θέσεις. Η συνδυασμένη δράση των δύο αυτών παραγόντων οδηγεί στη μετατροπή της βραχόμαζας σε υλικό που προσομοιάζει με εδαφικό (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004).

Ο μηχανισμός εξαλλοίωσης λόγω της δράσης υδροθερμικών ρευστών αποτυπώνεται στην Εικόνα 2.3.7., όπου φαίνονται τα στάδια, τα τελικά προϊόντα και οι διαφορετικοί δρόμοι εξαλλοίωσης που μπορεί να ακολουθηθούν. Επίσης δίνεται μία ένδειξη του όγκου των πόρων ανά στάδιο εξαλλοίωσης. Πρέπει να επισημανθεί η αύξηση του πορώδους στο στάδιο B εξαιτίας της έκπλυσης του χαλαζία. Στο στάδιο C οι παραγόμενοι πόροι δεν μπορούν να καλυφθούν εξολοκλήρου από νέα ορυκτά, όπως αργιλικά (Hecht, Thuro, Plinninger, & Cuney, 1999).

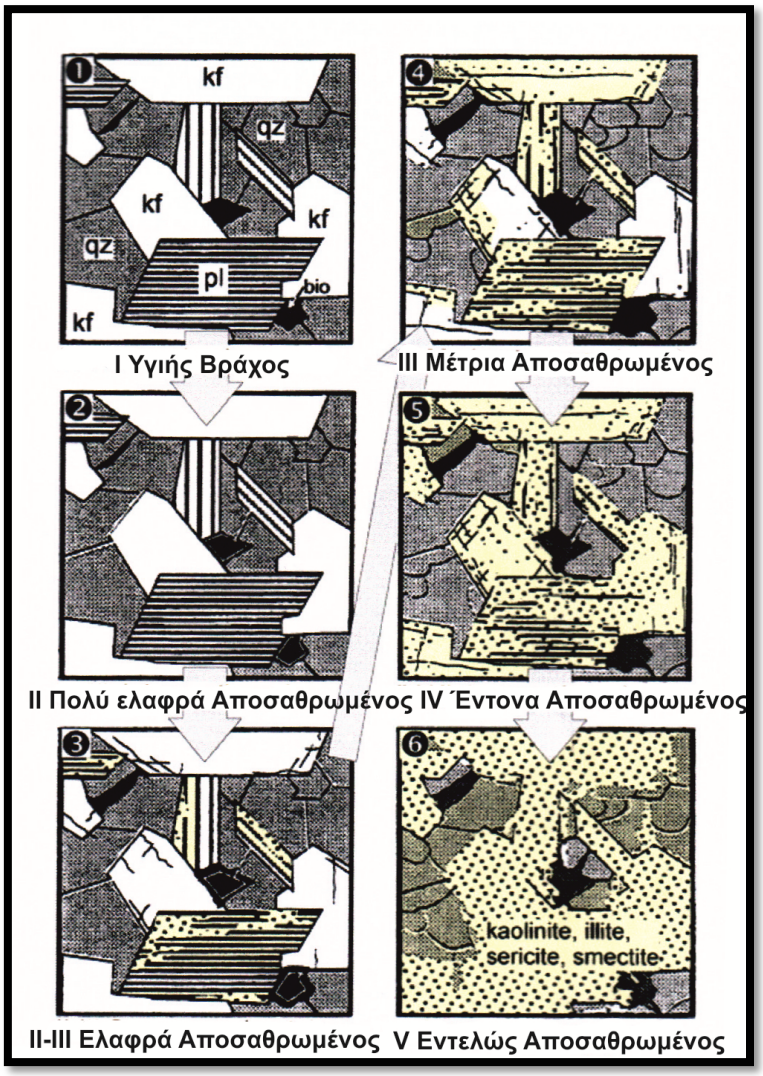
Οι ορυκτολογικές μετατροπές και η αύξηση του πορώδους οδηγούν το αρχικό πέτρωμα σε μία κατάσταση ευνοϊκότερη για τη δράση εξωγενών παραγόντων αποσάθρωσης, δηλαδή ενισχύουν τη δράση της μηχανικής αποδόμησης και της χημικής αποσύνθεσης. Στην Εικόνα 2.3.8 φαίνονται τα στάδια της αποσάθρωσης ενός γνευσιακού πετρώματος έως το τελικό αργιλοϊλυώδες εδαφικό υλικό (Thuro & Scholz, 2003). Οι βαθμοί (I-VI) αναφέρονται στο σύστημα ταξινόμησης βαθμού αποσάθρωσης κατά GCO (GCO, 1988).

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη μηχανική και χημική αποσάθρωση γνευσιακού πετρώματος λαμβάνουν χώρα αλλαγές στην ορυκτολογική του σύσταση που το μετατρέπουν τελικά σε αργιλικό – ιλυώδες εδαφικό υλικό. Ταυτόχρονα αυξάνεται το πορώδες και μειώνεται η ξηρή πυκνότητά του (Price & Velbel, 2003).



Εικόνα 2.3.7: Διαδρομές υδροθερμικής εξαλλοίωσης, στάδια και ένδειξη του πορώδους. kf-K-άστριος, pl-πλαγιόκλαστο, ab-αλβίτης, qz-χαλαζίας, wm-μοσχοβίτης, bio-βιοτίτης, chl-χλωρίτης (Hecht, Thuro, Plinninger, & Cuney, 1999)

Η διαδικασία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3.9 ξεκινά από τον υγιή γνεύσιο (1). Στη συνέχεια δημιουργείται ένας λεπτός φλοιός καστανέρυθρης σκωρίας στα τοιχώματα (3) και μια ζώνη μικροσκοπικά διαβρωμένου γνευσίου (2) οι οποίες μετακινούνται προς το εσωτερικό της βραχομάζας. Μία αποχρωματισμένη ζώνη ανοιχτού καστανού έως λευκοκίτρινου χρώματος σηματοδοτεί το τέλος του υγιή βράχου (4). Η αποδομημένη ζώνη (5) αποτελείται κυρίως από άργιλο και ιλύ, υλικά αποσύνθεσης του γνευσίου. Αυτό το υλικό φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ασθενές λόγω της μικρής γωνίας τριβής του και της τάσης προς διάτμηση κατά μήκος υπολειμματικών δομών του πετρώματος. Στο στάδιο (6) το πέτρωμα διασπάται σε ένα μίγμα αμμώδους / αργιλικού-ιλυώδους υλικού. Στο τελείως αποσαθρωμένο στάδιο τα χρώματα σκουριάς έχουν εξαφανιστεί και το υπολειμματικό έδαφος διατηρεί μόνο ίχνη του θρυμματισμένου γνευσίου (Thuro & Scholz, 2003).

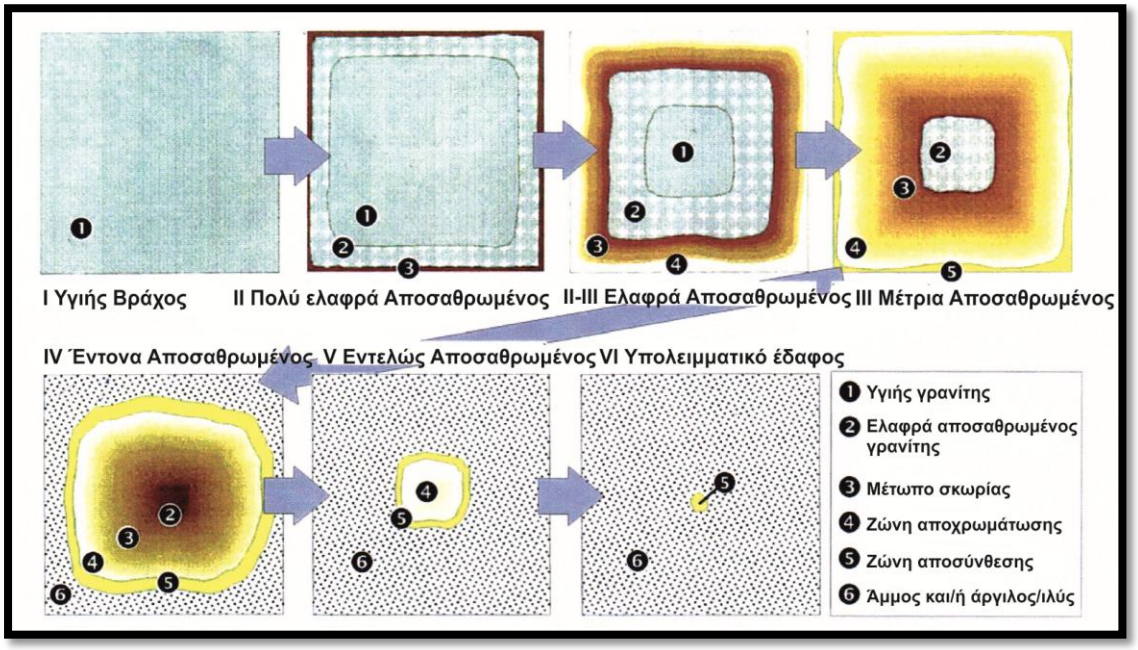


Εικόνα 2.3.8: Στάδια αποσάθρωσης στη μικροδομή γνευσιακού πετρώματος (Thuro & Scholz, 2003)

Τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων σε προϊόντα διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης του βιοτιτικού γνευσίου της εξεταζόμενης περιοχής πιστοποιούν τα προτεινόμενα μοντέλα αποσάθρωσης στην Εικόνα 2.3.7 και στην Εικόνα 2.3.8. Οι διεισδύσεις των υδροθερμικών διαλυμάτων έλαβαν χώρα τόσο παράλληλα προς την κύρια σχιστότητατων μεταμορφωμένων πετρωμάτων, όσο και κατά μήκος των κύριων ρηγμάτων και διακλάσεων. Στις θέσεις αυτές παρατηρούνται οι ζώνες πλήρους αργιλοποίησης των βιοτικών γνευσίων, οι οποίες αναφέρονται ως ενότητα C (Εικόνα 2.1.12).

Πρέπει να σημειωθεί ότι και στην ίδια την ενότητα C παρατηρείται μία μεταβολή στην ορυκτολογική σύσταση. Τόσο το συνολικό ποσοστό των αργιλικών ορυκτών όσο και αυτό των διογκούμενων αργιλικών ορυκτών, είναι μεγαλύτερο στα επιφανειακά δείγματα (ΝΧ1, ΝΧ2, ΝΧ3, Πίνακας 2.3.4) σε σχέση με το δείγμα Δ1 (Πίνακας 2.3.3), το οποίο προέρχεται από γεώτρηση στον πόδα του τεχνητού ορύγματος στη Χ. Θ. 13+600. Εκτιμάται πως αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δράση των εξωγενών παραγόντων αποσάθρωσης εξασθενεί με το βάθος, και επομένως εμφανίζονται προϊόντα ως αποτέλεσμα των υδροθερμικών εξαλλοιώσεων (Εικόνα

2.3.7). Επιφανειακά, και εξαιτίας διαδικασιών επιταχυνόμενης αποσάθρωσης, μετά την εκσκαφή των ορυγμάτων, εντοπίζονται τα ορυκτολογικά προϊόντα του μηχανισμού που περιγράφεται στην Εικόνα 2.3.8.



Εικόνα 2.3.9: Διαδικασία και προϊόντα ανά βαθμό αποσάθρωσης (Thuro & Scholz, 2003)

Συμπερασματικά, γίνεται αντιληπτό πως το κλιματικό και τεκτονικό περιβάλλον του Ελλαδικού χώρου ευνοεί τη δημιουργία διογκούμενων αργιλικών ορυκτών (κυρίως σμεκτίτη) κατά την αποσάθρωση γνευσιακών και γρανιτικών πετρωμάτων πλούσιων σε βιοτίτη. Αυτό πιστοποιείται και από ορυκτολογικές αναλύσεις που διεξήχθησαν σε υπολειμματικό έδαφος του μανδύα αποσάθρωσης γνευσίου στην περιοχή Κ. Νευροκοπίου αλλά και σε προϊόντα αποσάθρωσης του διμαρμαρυγιακού γνευσίου της περιοχής Δερβενίου Θεσσαλονίκης (Πίνακας 2.3.5).

Πίνακας 2.3.5: Ορυκτολογική σύσταση υπολειμματικών εδαφών προερχόμενων από γνευσιακό πέτρωμα στις περιοχές Κ.Νευροκοπίου και Δερβενίου Θεσσαλονίκης (Χατζηγώγος & Τσότσος, 2008), (Χατζηγώγος, 2009)

ΟΡΥΚΤΟ	Κ. Νευροκόπι	Δερβένι
Χαλαζίας	44	44
Πλαγιόκλαστα	7	8
Κ - Άστριοι	5	2
Μαρμαρυγίες	13	10
Δολομίτης	1	-
Ασβεστίτης	-	8
Πυρόξενος	1	2
Αμφίβολος	1	-
Αργιλικά ορυκτά	28	26
Διογκούμενα	26	23
Μη-διογκούμενα	2	3

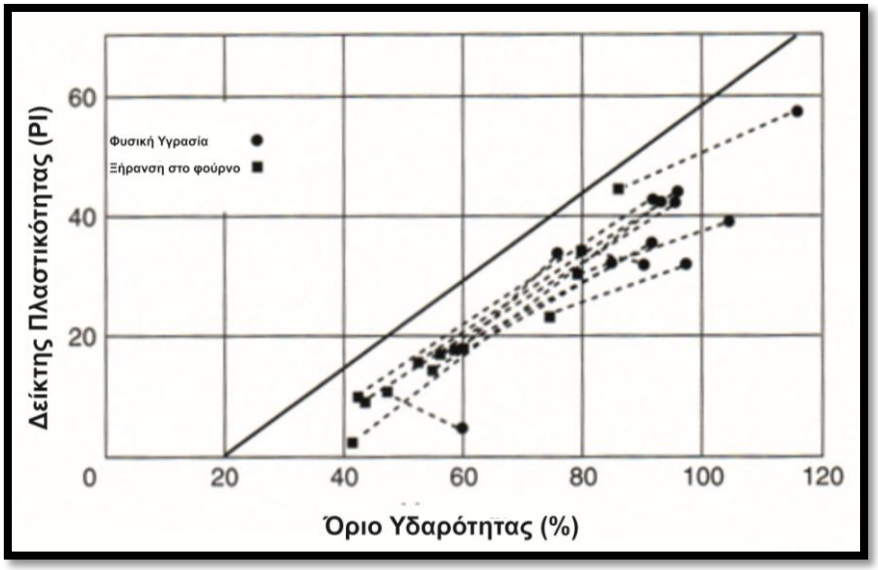
Η έντονη παρουσία διογκούμενων αργιλικών ορυκτών φυλλώδους κυρίως μορφής όπως ο σμεκτίτης καθορίζουν τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες της ενότητας C και κατ' επέκταση τη συνολική μηχανική συμπεριφορά της εξεταζόμενης βραχομάζας (Fityus & Smith, 2004). Η παρουσία του εν λόγω ορυκτού έχει συνδεθεί με πολλές αστοχίες πρανών σε περιοχές αποσαθρωμένων γνευσίων, όπως στο Χόνγκ Κόνγκ και αλλού (Aydin & Egeli, 2001), εξαιτίας των φτωχών μηχανικών του χαρακτηριστικών, τα οποία μελετώνται σε επόμενα Κεφάλαια. Συνιστάται να γίνεται εκτίμηση της παρουσίας αυτών των υλικών, σε γεωτεχνικά προβλήματα που σχετίζονται με υπολειμματικά εδάφη μέσω βιβλιογραφικής αρχικά και ορυκτολογικής διερεύνησης μετέπειτα.

2.4 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

2.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρησιμότητα των συμβατικών δοκιμών ταξινόμησης καθώς και των συμβατικών συστημάτων ταξινόμησης, όπως το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (USCS), έχει αμφισβητηθεί σε πολλές περιπτώσεις στη διεθνή βιβλιογραφία αναφορικά με την εφαρμογή τους στα υπολειμματικά εδάφη (De Graft-Johnson & Bhatia, 1969). Θεωρείται πως κατά τη διαδικασία της προετοιμασίας δειγμάτων για την εκτέλεση δοκιμών καταστρέφεται ο επί τόπου χαρακτήρας του υπολειμματικού εδάφους, και επομένως τα αποτελέσματα δεν μπορούν να αποτελέσουν ασφαλή ένδειξη των ιδιοτήτων αυτού στην επί τόπου (αδιατάρακτη) κατάστασή του.

Είναι γνωστό ότι η ξήρανση σε φούρνο ή ακόμα και στον αέρα επηρεάζει τις ιδιότητες των εδαφών, αν και το φαινόμενο αυτό είναι συνήθως μικρής έκτασης και αμελητέο για τα ιζηματογενή εδάφη. Απεναντίας, τα υπολειμματικά εδάφη είναι εξαιρετικά επιρρεπή σε αλλαγές των ιδιοτήτων τους μετά από ξήρανση ή ελεύθερη έκθεση στον αέρα, κυρίως εξαιτίας του τρόπου σχηματισμού τους, δηλαδή από την αργή, επί τόπου αποσύνθεσή τους σε έντονα αναερόβιο περιβάλλον. Η ξήρανση μπορεί να προκαλέσει μερική ή και ολική αφυδάτωση των αργιλικών ορυκτών προκαλώντας μη αναστρέψιμες αλλαγές σε αυτά και στις ιδιότητές τους. Στην Εικόνα 2.4.1 παρουσιάζονται αποτελέσματα υστέρησης του δείκτη πλαστικότητας ηφαιστειακών τεφρών εξαιτίας ξήρανσής τους σε φούρνο πριν από την εκτέλεση της δοκιμής. Εκτός από τις αλλαγές στις φυσικές τους ιδιότητες, η ξήρανση μπορεί να επηρεάσει τη σύσταση, τη συμπιεστότητα και τη διατμητική αντοχή των υπολειμματικών εδαφών (Frost, 1976).



Εικόνα 2.4.1: Επίδραση της ξήρανσης σε φούρνο σειράς δειγμάτων υπολειμματικών εδαφών ηφαιστειακών πετρωμάτων (Frost, 1976)

Γίνεται αντιληπτό πως τα παραπάνω φαινόμενα δεν αποτελούν λόγο μη εκτέλεσης των συμβατικών δοκιμών κατάταξης, αν ληφθούν υπόψη κατά την προπαρασκευή των δειγμάτων. Η ξήρανση σε φούρνο μπορεί είτε να παραλειφθεί, είτε επειδή η ξήρανση στον αέρα είναι χρονοβόρα, να γίνει ένας αρχικός έλεγχος για

το κατά πόσο διαπιστώνονται τα παραπάνω φαινόμενα στο εξεταζόμενο υπολειμματικό έδαφος. Προτείνεται, η αποφυγή πλήρους ξήρανσης πριν από δοκιμές κοκκομετρικής διαβάθμισης και προσδιορισμού ορίων Atterberg, ειδικά αν πρόκειται για υπολειμματικά εδάφη ηφαιστειακής προέλευσης και ειδικότερα αν περιέχονται στη σύστασή τους τα ορυκτά αλλοϋσίτης ή αλλοφανής. Τα δείγματα θα πρέπει να ξηραίνονται μέχρι την απαιτούμενη, για την εκτέλεση της δοκιμής, περιεχόμενη υγρασία.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών κατάταξης και φυσικών ιδιοτήτων για τα εξεταζόμενα υπολειμματικά εδάφη της Ασπροβάλτας. Εκτελέστηκε ένα πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών ξεχωριστά για τις ενότητες Β και C, ενώ για την ενότητα C εξετάσθηκαν τόσο επιφανειακά δείγματα όσο και από μεγαλύτερο βάθος. Οι δοκιμές κοκκομετρικής διαβάθμισης με αραιόμετρο και προσδιορισμού ορίων Atterberg εκτελέσθηκαν χωρίς να προηγηθεί ξήρανση των δειγμάτων σε φούρνο, παρόλο που αρχικές συγκριτικές δοκιμές προσδιορισμού της φυσικής υγρασίας (ξήρανση στους 105°-ξήρανση στους 50°-ξήρανση στον αέρα) δεν έδειξαν διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα.

2.4.2 ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

Για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας των εξεταζόμενων δειγμάτων πάρθηκαν αρχικά δύο δείγματα της ενότητας C. Το ένα ξηράνθηκε στους 105°C μέχρι τη μη περεταίρω απώλεια μάζας. Στη συνέχεια η φυσική υγρασία υπολογίστηκε με το συμβατικό τρόπο κατά ASTM D2216. Το δεύτερο δείγμα αφέθηκε να ξεραθεί στον αέρα και όταν σταμάτησε να μειώνεται η ολική μάζα του, υπολογίστηκε η φυσική του υγρασία. Οι τιμές υγρασίας των δύο διαδικασιών ξήρανσης δεν επέδειξαν διαφορές (<3%), και επομένως οι υπόλοιπες μετρήσεις διεξήχθησαν κατά τα γνωστά.

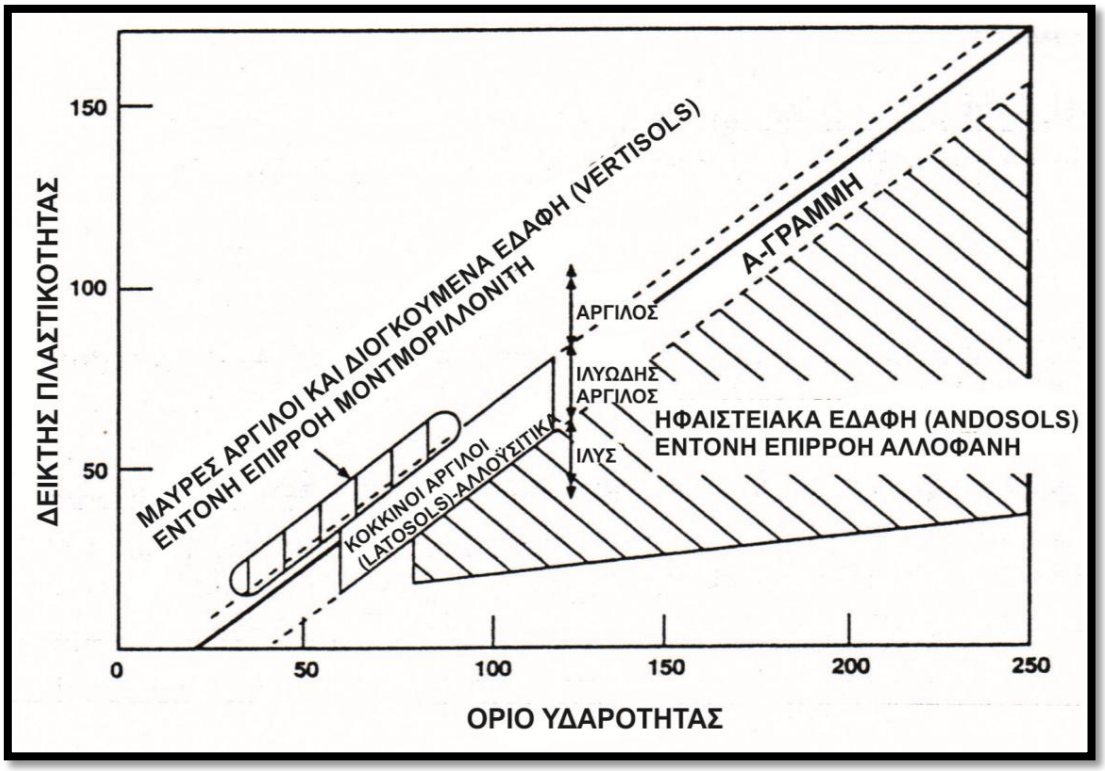
Πίνακας 2.4.1: Αποτελέσματα δοκιμών φυσικής υγρασίας υπολειμματικών εδαφών Ασπροβάλτας

Ημερομηνία	Ενότητα Β	Ενότητα C (επιφάνεια)	Ενότητα C (πόδας)
28/12/2006	6,5%		26,0%
8/11/2007	5,1%	35,6%	32,7%
3/3/2008	3,7%	24,1%	

Ο Πίνακας 2.4.1 παρουσιάζει συνοπτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού της φυσικής υγρασίας (μέσοι όροι). Διεξήχθησαν μετρήσεις σε διαφορετικές χρονικές περιόδους για τα υλικά των ενοτήτων Β και C. Τα επιφανειακά δείγματα της ενότητας C πάρθηκαν από τα τεχνητά ορύγματα στις Χ. Θ. 9+700, 10+300 και 10+800 (δείγματα 1,2 και 3 αντίστοιχα) και ένα δείγμα από γεώτρηση που εκτελέστηκε στον πόδα του ορύγματος στη Χ. Θ. 13+600 (περί τα 3,2m), μετά την παρατηρούμενη αστοχία. Οι αναφερόμενες δοκιμές παρατίθενται στο Παράρτημα Β. Σημειώνεται πως η μελέτη της διακύμανσης της επί τόπου φυσικής υγρασίας των υπολειμματικών εδαφών είναι πολύ σημαντική γιατί συνδέεται με τις μεταβολές των μηχανικών παραμέτρων και συγκεκριμένα των παραμέτρων αντοχής τους.

2.4.3 ΟΡΙΑ ATTERBERG

Ο προσδιορισμός των ορίων Atterberg αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς και το χαρακτηρισμό των υπολειμματικών εδαφών. Παρόλα αυτά, οι μεμονωμένες τιμές των ορίων υδαρότητας, πλαστικότητας και δείκτη πλαστικότητας δεν είναι τόσο σημαντικές όσο η θέση που καταλαμβάνει το έδαφος στο διάγραμμα δείκτη πλαστικότητας-ορίου υδαρότητας. Η θέση αυτή αποτελεί σαφή ένδειξη των μηχανικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν όλα τα εδάφη και ακόμα περισσότερο τα υπολειμματικά. Επομένως το διάγραμμα πλαστικότητας στην Εικόνα 2.4.2 μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο σαν εργαλείο εκτίμησης ή και πρόβλεψης παραμέτρων για τα υπολειμματικά εδάφη, παρά σαν κριτήριο ταξινόμησής τους. Σε γενικές γραμμές, τα εδάφη που τοποθετούνται πάνω από την γραμμή-Α έχουν "φτωχά" μηχανικά χαρακτηριστικά, ενώ αυτά που τοποθετούνται κάτω από αυτήν, παρουσιάζουν σαφώς καλύτερη μηχανική συμπεριφορά (Wesley, 2010).

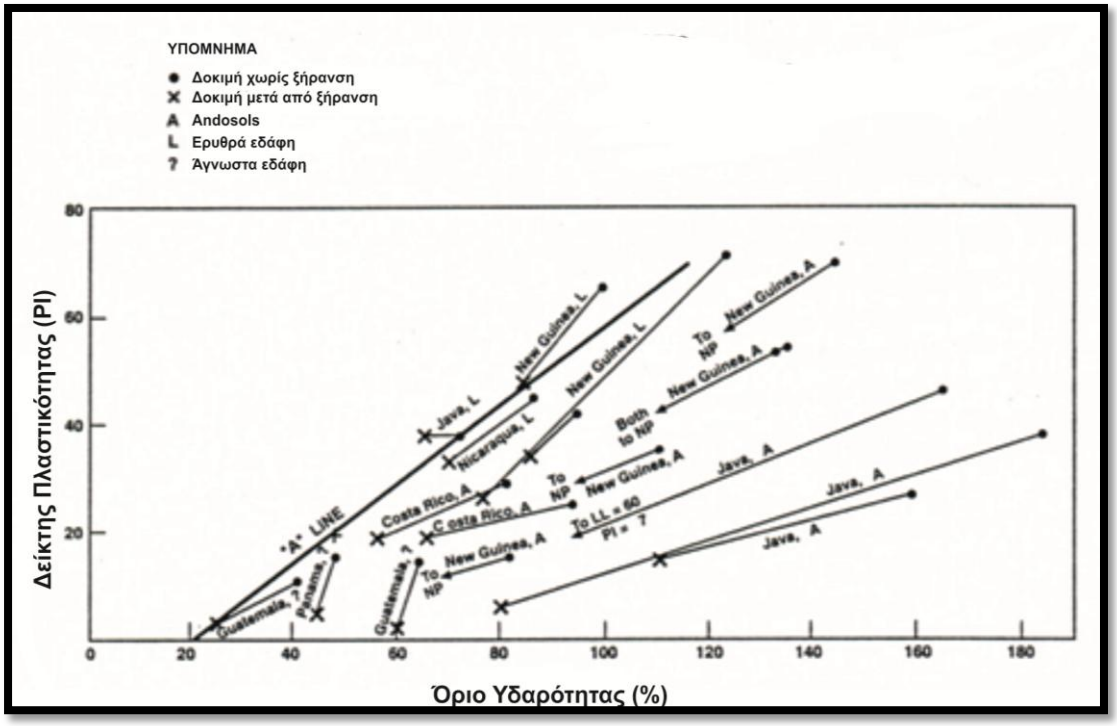


Εικόνα 2.4.2: Τοποθέτηση υπολειμματικών εδαφών στο συμβατικό διάγραμμα δείκτη πλαστικότητας-ορίου υδαρότητας

Εάν το παραπάνω διάγραμμα χρησιμοποιηθεί για λόγους ταξινόμησης υπολειμματικών εδαφών τότε ενδέχεται να προκύψουν κάποια προβλήματα, ειδικά για τις περιπτώσεις εδαφών ηφαιστειακής προέλευσης. Τα εδάφη αυτά τοποθετούνται κάτω από την γραμμή-Α, δηλαδή στην περιοχή της ιλύος, ειδικά αυτά που περιέχουν το ορυκτό αλλοφανή, αλλά δε συμπεριφέρονται σαν ιλύς, εκτός από κάποια ίχνη "ταχείας" συμπεριφοράς ή διασταλτικών χαρακτηριστικών. Την ίδια στιγμή, δεν παρουσιάζουν υψηλές τιμές πλαστικότητας και είναι γενικώς προβληματικό εάν θα ταξινομηθούν ως ιλύς ή ως άργιλος. Επιπλέον, συσχετίσεις ή κατηγοριοποιήσεις εδαφών βασισμένες σε μεμονωμένες τιμές του ορίου υδαρότητας

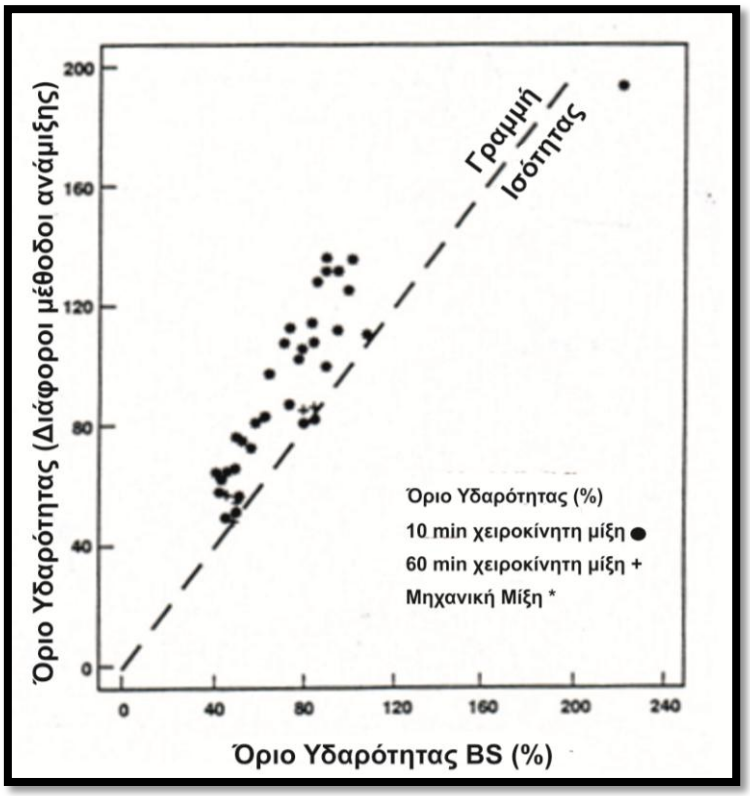
ή πλαστικότητας, όπως η κατηγοριοποίηση κατά BS5930:1981 με βάση την τιμή του ορίου υδαρότητας, θεωρούνται επισφαλείς για τα υπολειμματικά εδάφη. Αυτό που είναι σημαντικό είναι η τοποθέτηση αυτών πάνω ή κάτω από την Α-γραμμή.

Πρέπει να σημειωθεί πως και στην περίπτωση του προσδιορισμού των ορίων Atterberg, όπως και με τον προσδιορισμό της φυσικής υγρασίας, παρατηρούνται φαινόμενα υποβάθμισης των τιμών εξαιτίας της ξήρανσης πριν από την εκτέλεση της δοκιμής, καθώς επίσης και της αναμόχλευσης του δείγματος (Terzaghi, 1958), (Rouse, Reading, & Walsh, 1986) και (Wesley & Matuschika, 1988). Στην Εικόνα 2.4.3 φαίνεται το φαινόμενο της μείωσης της πλαστικότητας εξαιτίας της ξήρανσης και στην Εικόνα 2.4.4 (Morin & Todor, 1976) αποτυπώνεται το φαινόμενο της επίδρασης του τρόπου και της χρονικής διάρκειας της αναμόχλευσης. Τα φαινόμενα αυτά οφείλονται στην έντονη συγκόλληση λόγω οξείδωσης ή στην αφυδάτωση του αλλοϋσίτη και του αλλοφανή, ή και στις δύο παραπάνω αιτίες (Townsend, 1985).



Εικόνα 2.4.3: Επίδραση της ξήρανσης στην πλαστικότητα υπολειμματικών εδαφών ηφαιστειακής προέλευσης (Morin & Todor, 1976)

Για τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας, διεξήχθησαν δοκιμές με τη χρήση πενετρόμετρου πίπτοντος κώνου σε δείγματα που αναμοχλεύθηκαν χωρίς να προηγηθεί ξήρανση. Ο Πίνακας 2.4.2 παρουσιάζει συνοπτικά τα αποτελέσματα. Αυτά τοποθετούν το πλήρως αργιλοποιημένο υπολειμματικό έδαφος της ενότητας C στην κατηγορία των διογκούμενων εδαφών με έντονη την επιρροή του μοντμοριλλονίτη, αποτέλεσμα που συνάδει με τις ορυκτολογικές αναλύσεις (ορυκτό της ομάδας του σμεκτίτη) αλλά και με την αρχική ταξινόμηση που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.2.5.



Εικόνα 2.4.4: Επίδραση του χρόνου και του μέσου αναμόχλευσης στο όριο υδαρότητας (Blight G. E., 1997)

Πίνακας 2.4.2: Αποτελέσματα δοκιμών προσδιορισμού ορίων Atterberg υπολειμματικών εδαφών Ασπροβάλτας

ΔΕΙΓΜΑ	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI	Ic
Ενότητα C επιφανειακά	75-77	25-31	46-50	0-0,16	0,84-1
Ενότητα C πόδας	44	22	22	0,18-0,5	0,82-0,5
Ενότητα B	26	20	6		3,3

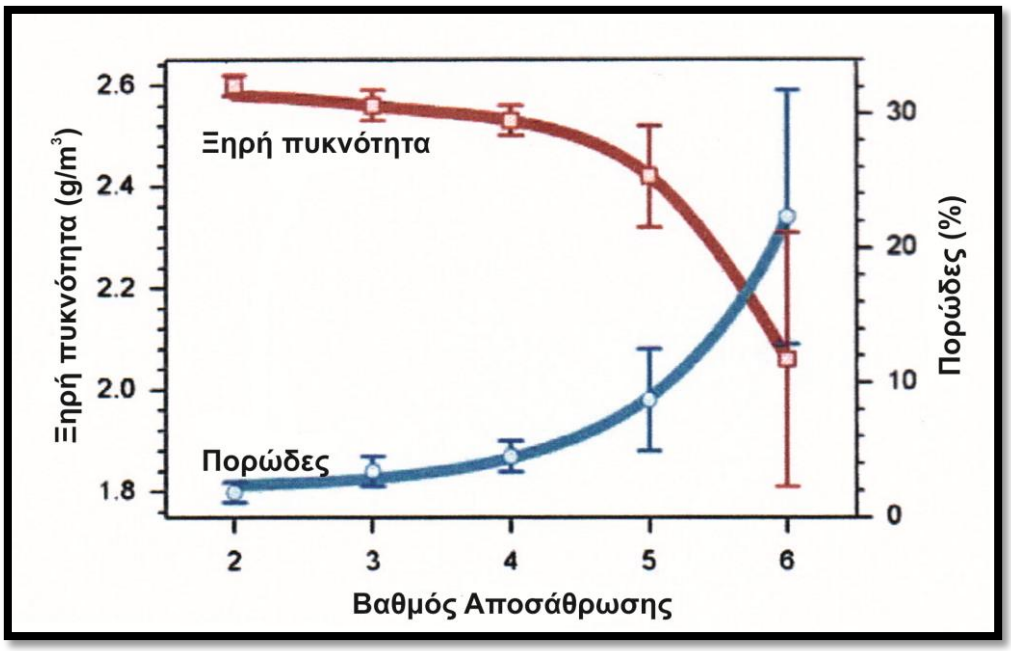
2.4.4 ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΚΑΙ ΞΗΡΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ

Το ειδικό βάρος αποτελεί μία παράμετρο, που πέρα από τη φυσική της σημασία, εμπεριέχεται σχεδόν σε όλους τους υπολογισμούς των φυσικών ιδιοτήτων των εδαφών (δείκτης κενών, βαθμός κορεσμού κλπ). Στα υπολειμματικά εδάφη η τιμή του ειδικού βάρους μπορεί να είναι ασυνήθιστα υψηλή ή χαμηλή και για το λόγο αυτό απαιτείται ο προσδιορισμός της στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας μία αποδεκτή διαδικασία υπολογισμού της. Το δείγμα εδάφους πρέπει να είναι στη φυσική του υγρασία και ο υπολογισμός του ξηρού βάρους να γίνεται μετά το πέρας της δοκιμής, αποφεύγοντας ξήρανση στο φούρνο.

Ο υπολογισμός του ειδικού βάρους των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας έγινε κατά ASTM D854/83 (ASTM, 1983). Διεξήχθησαν πάνω από 8 δοκιμές, τόσο σε ξηρά όσο και σε δείγματα στη φυσική τους υγρασία για τις ενότητες B και C με υπολογισμένες τιμές 2,68 και 2,47 αντίστοιχα.

Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε το ξηρό φαινόμενο βάρος των υπό εξέταση εδαφών (ενοτήτων). Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της αποσάθρωσης, εκτός από τις

ορυκτολογικές αλλαγές, αυξάνεται σημαντικά το πορώδες και μειώνεται αυτόματα το ξηρό φαινόμενο βάρος. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές συσχετίσεις της ξηρής πυκνότητας ή και άλλων ιδιοτήτων με το βαθμό αποσάθρωσης (Εικόνα 2.4.5), που στοχεύουν στον προσδιορισμό ενός αντικειμενικού τρόπου ποσοτικοποίησής του (Thuro & Scholz, 2003).



Εικόνα 2.4.5: Συσχέτιση του βαθμού αποσάθρωσης με την ξηρή πυκνότητα και το πορώδες (Thuro & Scholz, 2003)

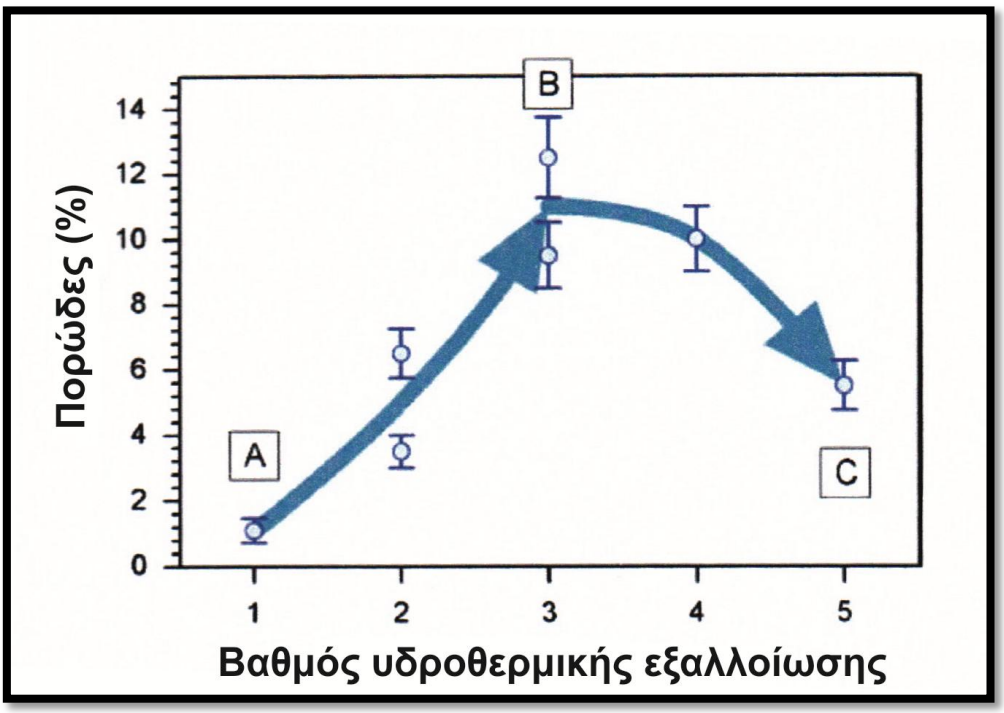
Ο Πίνακας 2.4.3 δείχνει τα αποτελέσματα των υπολογισμών της ξηρής πυκνότητας των υπό εξέταση υλικών. Παρατηρείται πως το υλικό της ενότητας Β, παρότι λιγότερο αποσαθρωμένο από αυτό της ενότητας C στον πόδα των ορυγμάτων, έχει μικρότερη τιμή ξηρής πυκνότητας. Επομένως στην προκειμένη περίπτωση η τιμή της ξηρής πυκνότητας δε θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ποσοτικός δείκτης αποσάθρωσης. Παρόμοιες περιπτώσεις συναντώνται συχνά στη βιβλιογραφία (Kim & Park, 2003). Εναλλακτικά, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες του βαθμού αποσάθρωσης, η τιμή του όγκου των κενών ή η κοκκομετρική διαβάθμιση (Rahardjo, Aung, Leong, & Rezaur, 2004).

Πίνακας 2.4.3: Τιμές ξηρής πυκνότητας των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας

	Ενότητα Β	Ενότητα C (επιφάνεια)	Ενότητα C (πόδας)
γd (t/m^3)	1,51	1,37	1,61

Μια ερμηνεία που μπορεί να δοθεί γι' αυτό είναι ότι τα υπολειμματικά εδάφη της Ασπροβάλτας δεν αποτελούν προϊόντα αποκλειστικά και μόνο της δράσης των διαδικασιών αποσάθρωσης, αλλά για το σχηματισμό τους έχουν λειτουργήσει και άλλοι μηχανισμοί, όπως ο τεκτονισμός και οι υδροθερμικές εξαλλοιώσεις. Τα στάδια των μηχανισμών αυτών δε συνδέονται με αντίστοιχη μείωση της τιμής της ξηρής πυκνότητας. Χαρακτηριστικό αυτού είναι η συσχέτιση των σταδίων υδροθερμικής εξαλλοίωσης με το πορώδες (Εικόνα 2.4.6). Η μέγιστη τιμή πορώδους, και επομένως

η ελάχιστη τιμή ξηρής πυκνότητας εντοπίζεται στο ενδιάμεσο στάδιο της εξαλλοίωσης.



Εικόνα 2.4.6: Ανάπτυξη του πορώδους σε σχέση με το στάδιο υδροθερμικής εξαλλοίωσης. Τα στάδια A, B και C αναφέρονται στην Εικόνα 2.3.7 (Thuro & Scholz, 2003)

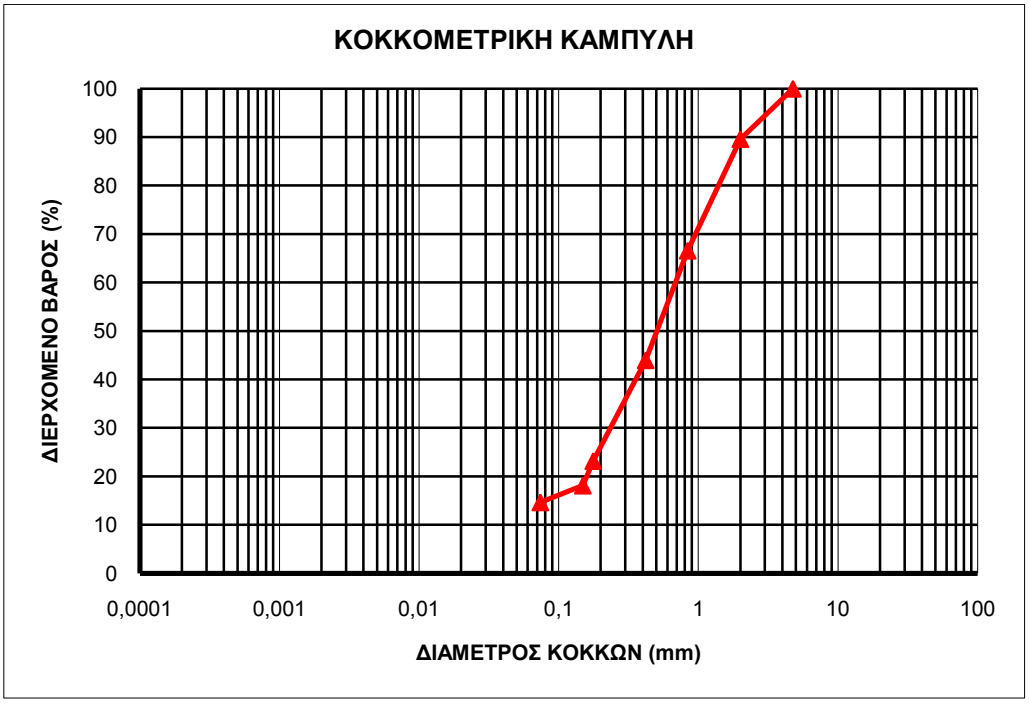
2.4.5 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ

Η κατάσταση αναφορικά με την κοκκομετρική διαβάθμιση των υπολειμματικών εδαφών δε διαφέρει πολύ από αυτήν των ιζηματογενών εδαφών. Για χονδρόκοκκα εδάφη, η κοκκομετρική καμπύλη δίνει μία σαφή ένδειξη των ιδιοτήτων τους, κάτι που δεν ισχύει για τα λεπτόκοκκα. Αυτή είναι μία βασική αρχή και των συμβατικών συστημάτων ταξινόμησης, όπως το USCS, το οποίο δεν απαιτεί τη γνώση των επιμέρους ποσοστών ιλύος και αργίλου αλλά το συνολικό ποσοστό των λεπτόκοκκων συστατικών. Επιπλέον πρέπει να σημειωθούν και τα ακόλουθα:

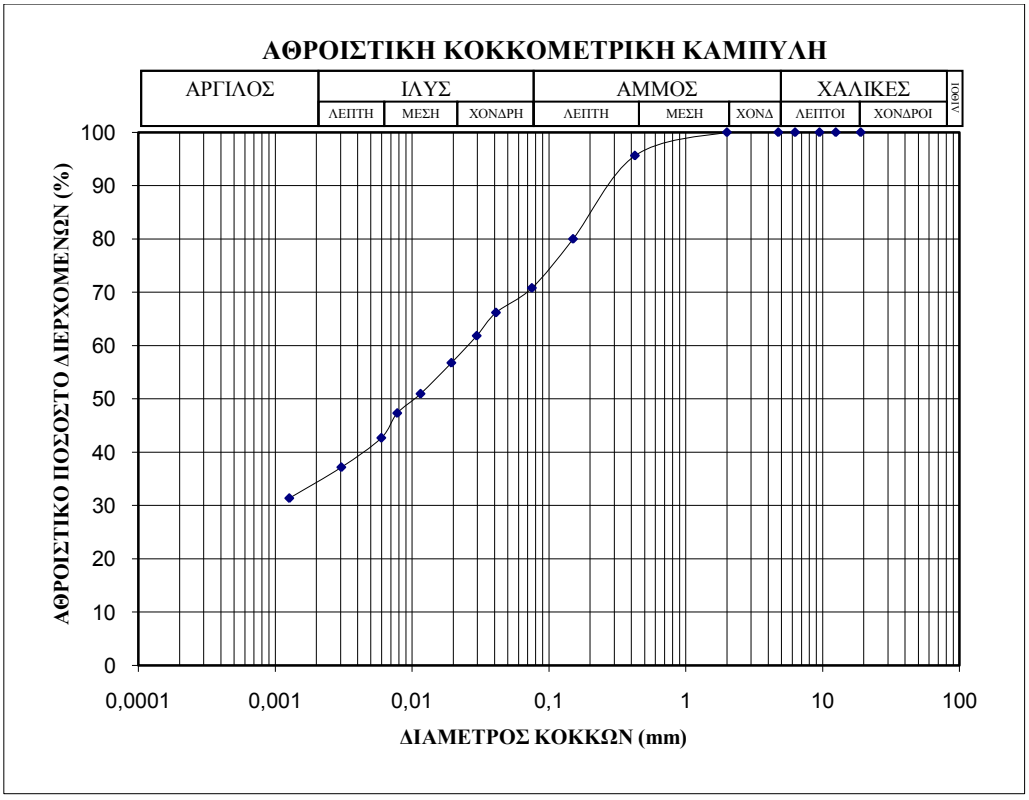
- Συχνά τα υπολειμματικά εδάφη δεν αποτελούνται από διακριτά σωματίδια σε αδιατάρακτη κατάσταση και είναι η διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων στο εργαστήριο αυτή που οδηγεί στο διαχωρισμό διακριτών σωματιδίων.
- Κάποια υπολειμματικά εδάφη, ιδίως αυτά που περιέχουν μεγάλα ποσοστά ορυκτών όπως ο αλλοφανής και ο αλλοϋσίτης, εμφανίζουν πολύ καλά μηχανικά χαρακτηριστικά, παρόλο που είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκα (Wesley, 2010).

Για τους παραπάνω λόγους, ο καθορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης για εδάφη της κατηγορίας της ιλύος και της αργίλου δεν αποτελεί ενδεικτικό στοιχείο πιθανής μηχανικής συμπεριφοράς. Στην Εικόνα 2.4.7 και στην Εικόνα 2.4.8 παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες των ενοτήτων B και C αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα B.

Επίσης ο Πίνακας 2.4.4 αποτελεί μία σύνοψη της έρευνας των φυσικών ιδιοτήτων των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας μαζί με αυτά του Κ. Νευροκοπίου.



Εικόνα 2.4.7: Χαρακτηριστική κοκκομετρική καμπύλη του υλικού της Ενότητας Β



Εικόνα 2.4.8: Χαρακτηριστική κοκκομετρική καμπύλη του υλικού της Ενότητας C

Πίνακας 2.4.4: Φυσικές ιδιότητες και στοιχεία των δοκιμών κατάταξης των υλικών στις διαφορετικές Ενότητες της περιοχής της Ασπροβάλτας και των υπολειμματικών εδαφών στην περιοχή Κ. Νευροκοπίου

Ενότητα υλικού	Βαθμός αποσάθρωσης	γd (t/m^3)	e	m (%)	γs	<No 200 (%)	%<0,002mm	LL	PI
B	IV-V	1,51	0,77	5,1	2,68	9,8		26	6
C πόδας	V-VI	1,61	0,53	32,7	2,47	36,7	15,99	44	22
C επιφανειακό	VI	1,37	0,81	35,6	2,47	70,8	33,75	75	50
Κ. Νευροκόπι	VI	1,62	0,43	22,9	2,32	80,9	45,61	66	42

Από τα αποτελέσματα των συμβατικών δοκιμών κατάταξης φαίνεται πως, για τα πλήρως εδαφοποιημένα υλικά, μόνο το επιφανειακό υλικό της ενότητας C έχει υποστεί με έντονο τρόπο την επίδραση των εξωγενών παραγόντων αποσάθρωσης, μεταπίπτοντας σε ένα λεπτόκοκκο υλικό υψηλής πλαστικότητας λόγω της παρουσίας του μοντμοριλλονίτη. Στα αποτελέσματα αποτυπώνονται οι εγγενείς ιδιότητες των υλικών λόγω της σύστασής τους και είναι καλοί δείκτες της πιθανής συμπεριφοράς τους σε αναζυμωμένη κατάσταση. Παρόλα αυτά η συσχέτισή τους με τη συμπεριφορά των υλικών στην αδιατάρακτη επί τόπου κατάστασή τους είναι προβληματική.

Για τα αργιλικά υπολειμματικά εδάφη υπάρχουν άλλες δύο παράμετροι που θα μπορούσαν να μας δώσουν πληροφορίες για τη φυσική τους κατάσταση:

1. Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή, που είναι μία απλή μέτρηση της αδιατάρακτης αντοχής τους.
2. Μία παράμετρος που να υποδηλώνει την πυκνότητα της διάταξης των σωματιδίων.

Για τα αργιλικά εδάφη η δεύτερη παράμετρος είναι ο δείκτης υδαρότητας (LI).

$$LI = \frac{m - PL}{LL - PL}$$

Ο δείκτης υδαρότητας είναι μια σχετικά παραπλανητική παράμετρος κι αυτό γιατί αποτελεί μία ένδειξη του βαθμού ρευστότητας ενός εδάφους, μόνο όταν αυτό έχει αναζυμωθεί. Για αδιατάρακτα εδάφη θεωρείται περισσότερο ως μία ένδειξη του βαθμού συμπύκνωσής τους. Ένα έδαφος με δείκτη υδαρότητας κοντά στο μηδέν έχει φυσική υγρασία κοντά στο όριο πλαστικότητάς του, και αυτό σημαίνει πως βρίσκεται σε μία πυκνή και στερεή κατάσταση. Αντίστοιχα ένα άλλο με δείκτη υδαρότητας κοντά στη μονάδα έχει υγρασία κοντά στο όριο υδαρότητάς του και βρίσκεται σε μία όχι πυκνή, "ανοιχτή" κατάσταση, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι είναι σχεδόν ρευστό, εκτός εάν έχει αναζυμωθεί. Το γεγονός ότι πολλές φυσικές άργιλοι και ιλύες έχουν δείκτη υδαρότητας μεγαλύτερο της μονάδας και παρά ταύτα είναι στιφρά υλικά, αποτελεί ακόμα ένα παράδειγμα της επίδρασης της δομής στις ιδιότητές τους (Wesley, 2010).

2.5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

2.5.1 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Αν και οι γενικεύσεις στην εδαφομηχανική είναι πάντοτε επισφαλείς, εντούτοις θεωρείται ευρέως αποδεκτό ότι τα υπολειμματικά εδάφη τείνουν να έχουν σαφώς υψηλότερη διαπερατότητα από τα εδάφη μεταφοράς και απόθεσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στην παρουσία των χαρακτηριστικών μικροδομής, όπως η συσσωμάτωση των αργιλικών σωματιδίων και η ικανότητά τους να σχηματίζουν δεσμούς, δημιουργώντας μία πιο "ανοιχτή" δομή. Η παρουσία αυτών των δομών είναι και ο λόγος των πολύ έντονων μεταβολών της διαπερατότητας που παρατηρούνται σε μανδύα αποσάθρωσης υπολειμματικού εδάφους, τόσο σε κατακόρυφο, όσο και σε οριζόντιο επίπεδο. Επομένως, η παρουσίαση τυπικών τιμών διαπερατότητας υπολειμματικών εδαφών πρέπει να γίνεται με επιφύλαξη.

Οι Lumb (1975) και Blight (1988) έχουν υποδείξει πως οι διακυμάνσεις των αποτελεσμάτων δοκιμών διαπερατότητας σε συγκεκριμένα σημεία στο Χονγκ Κονγκ και στη Νότια Αφρική, μπορεί να είναι τάξης μεγέθους τέτοιου, όση η διακύμανση αυτών μεταξύ διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών. Τυπικά προφίλ αποσάθρωσης υπολειμματικών εδαφών που έχουν παρουσιαστεί από τους Lumb (1961), Deere & Patton (1971), Vargas (1974), Blight (1988) και άλλους, παρουσιάζουν σαφείς διακυμάνσεις στην κοκκομετρική διαβάθμιση, στο λόγο κενών, στην ορυκτολογική σύσταση, στο βαθμό και τα χαρακτηριστικά των υπολειμματικών τεκτονικών δομών, οι οποίες επηρεάζουν τις τιμές διαπερατότητας από περίπτωση σε περίπτωση. Τέτοιες διακυμάνσεις παρατηρούνται και στις ιδιότητες των υπολειμματικών εδαφών Ασπροβάλτας και Κ. Νευροκοπίου που διερευνήθηκαν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται σχετικές τιμές διαπερατότητας υπολειμματικών εδαφών από μετρήσεις σε αδιατάρακτα δείγματα επί τόπου αλλά και στο εργαστήριο (Εικόνα 2.5.1, Εικόνα 2.5.2 και Εικόνα 2.5.3).

Ζώνη αποσάθρωσης	Σχετική διαπερατότητα
Οργανικά επιφανειακά εδάφη	Μέση έως υψηλή
Ώριμα υπολειμματικά εδάφη	Χαμηλή(μέση έως υψηλή σε λατερίτες με πόρους ή κοιλότητες)
Νέα υπολειμματικά εδάφη ή σαπρολιτικά εδάφη	Μέση
Σαπρόλιθοι	Υψηλή
Αποσαθρωμένος βράχος	Μέση έως υψηλή
Υγιής βράχος	Χαμηλή έως μέση

Εικόνα 2.5.1: Διαπερατότητα σε μανδύες αποσάθρωσης πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων (Deere & Patton, 1971)

Πέτρωμα	Υπολειμματικό έδαφος	Διαπερατότητα (m/y)	Είδος δοκιμής
Βασάλτης	Ώριμα υπολειμματικά εδάφη	90 - $3x10^3$	Κατείσδυση σε γεωτρήσεις (MAAG)
Βασάλτης	Ώριμα υπολειμματικά εδάφη	0.03 - 30	Κατείσδυση σε γεωτρήσεις και σκάμματα (MAAG)
Γνεύσιος	Πορώδης άργιλος	30 - 150	Κατείσδυση και άντληση σε γεωτρήσεις (MAAG)
Γνεύσιος	Πορώδης άργιλος	1500	Κατείσδυση και άντληση σε γεωτρήσεις (MAAG)
Γνεύσιος	Πορώδης άργιλος	70	Κατείσδυση σε σκάμματα (MAAG)
Γνεύσιος	Σαπρόλθος	30	Κατείσδυση και άντληση σε σκάμματα (MAAG)
Γνεύσιος	Σαπρόλθος	30	Εργαστηριακή δοκιμή διαπερατότητας
Μιγματίτης	Σαπρόλθος	3 - 1000	Κατείσδυση σε γεωτρήσεις (MAAG)

Εικόνα 2.5.2: Τιμές διαπερατότητας υπολειμματικών εδαφών θέσεων θεμελίωσης φραγμάτων στη Βραζιλία (Costa Filho & Vargas, 1985)

Έδαφος	Προέλευση	Διαπερατότητα (m/y)	Σχόλια
Σαπρολιτικό	Γρανίτης	600 - $125x10^3$	Εργαστηριακή δοκιμή
	Γρανίτης	0.15 - 1000	-
	Γρανοδιορίτης	0.15 - 175	Δοκιμή στερεοποίησης
	Γρανοδιορίτης	3	Δοκιμή διαπερατότητας
	Χαλαζιακός διορίτης	3 - 100	Εργαστηριακή και επί τόπου δοκιμή
	Γνεύσιος	60 - 150	Εργαστηριακή δοκιμή παράλληλα στη σχιστότητα
	Γνεύσιος	30 - 60	Εργαστηριακή δοκιμή παράλληλα στη σχιστότητα
Ώριμο υπολειμματικό έδαφος	Γρανίτης	6 - 120	Εργαστηριακή δοκιμή
	Γρανίτης	0.15 - 60	-
	Γρανίτης	30 - 60	-

Εικόνα 2.5.3: Τιμές διαπερατότητας υπολειμματικών εδαφών γρανιτικής και γνευσιακής προέλευσης (Blight G. E., 1997)

Η διαπερατότητα των υπολειμματικών εδαφών ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από την κληρονομημένη από το μητρικό πέτρωμα δομή. Το μεγαλύτερο μέρος της ροής διεξάγεται κατά μήκος υπολειμματικών ασυνεχειών, χαλαζιακών φλεβών και βιοκαναλιών (π.χ. από τη δράση τερμιτών). Οι De Mello (1988) και Blight (1991) έχουν περιγράψει προβλήματα σε τεχνικά έργα από την παρουσία ροών σε τέτοια κανάλια τερμιτών. Εξαιτίας των παραπάνω, μεγάλης κλίμακας επιδράσεων, η τιμή της διαπερατότητας δεν μπορεί να προσδιορισθεί με αξιοπιστία από εργαστηριακές δοκιμές αδιατάρακτων δειγμάτων, διότι η κλίμακά τους είναι σχετικά μικρή. Αντί γι' αυτές προτείνεται η εφαρμογή επί τόπου δοκιμών μεγάλης κλίμακας, όπως δοκιμές διήθησης σε ερευνητικά φρεάτια μεγάλων διαστάσεων.

2.5.2 ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Οι σημαντικότερες διαφορές στη συμπεριφορά των υπολειμματικών εδαφών σε σχέση με τα ιζηματογενή εδάφη εντοπίζονται κυρίως στα χαρακτηριστικά συμπιεστότητας και γενικότερα στα χαρακτηριστικά μεταβολής όγκου. Επισημαίνονται εδώ συνοπτικά τα κυριότερα σημεία διαφοροποίησης της συμπεριφοράς μεταβολής όγκου, στα σημεία που εξυπηρετούν και αφορούν την έρευνα που πραγματοποιήθηκε.

Η συμβατική προσέγγιση στην κατανόηση και ερμηνεία της συμπεριφοράς στερεοποίησης των ιζηματογενών εδαφών, βασίζεται στον τρόπο δημιουργίας τους, δηλαδή στην απόθεσή τους σε συνθήκες κυρίως θαλάσσιας ή λιμναίας φάσης, η οποία ακολουθείται από συμπίεση λόγω του ιδίου βάρους τους. Ο πολύ διαφορετικός τρόπος σχηματισμού των υπολειμματικών εδαφών, όπως αναδεικνύεται στην Εικόνα 2.5.4, υποδηλώνει πως η συμβατική προσέγγιση είναι τελείως άσχετη με τη συμπεριφορά τους. Επιπλέον δεν έχει προταθεί μέχρι σήμερα, ένα εναλλακτικό, ολοκληρωμένο πλαίσιο χαρακτηρισμού της συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών σε στερεοποίηση.

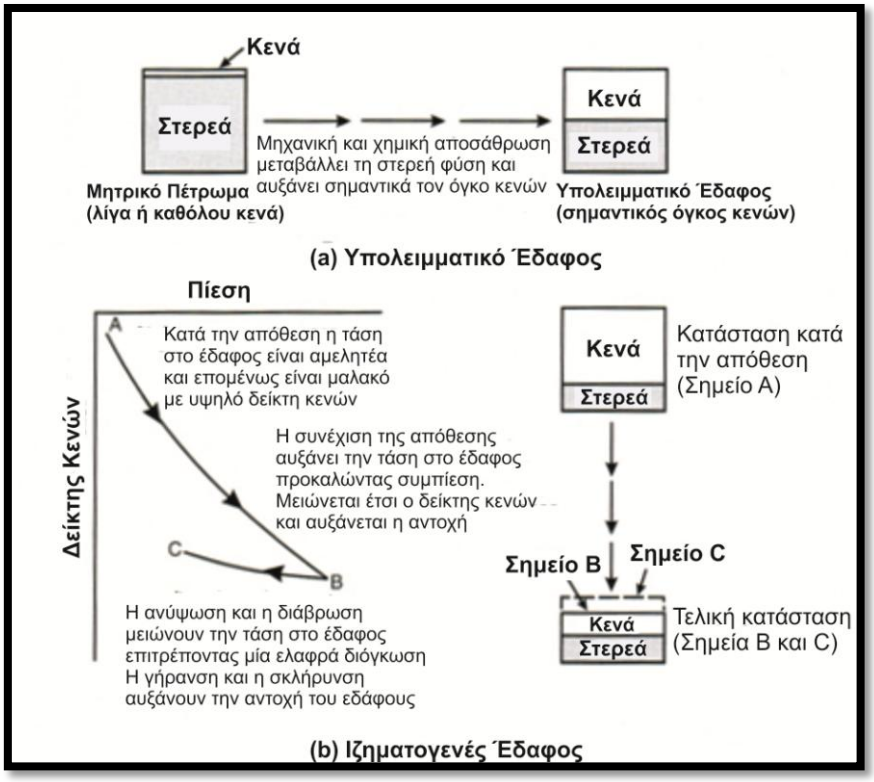
Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της χρήσης του συμβατικού διαγράμματος *δείκτη κενών (e) - λογαρίθμου τάσης (log p)* για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων δοκιμών οιδημέτρου σε υπολειμματικά εδάφη. Η χρήση του διαγράμματος *e-log p* στην εδαφομηχανική επικράτησε λόγω του ότι η αρχική καμπύλη στερεοποίησης (virgin consolidation line) ενός ιζηματογενούς εδάφους σε λογαριθμική κλίμακα είναι σχεδόν ευθεία.

Τα υπολειμματικά εδάφη δεν αποτίθενται, ούτε ακολουθούν διαδικασία στερεοποίησης, δεν έχουν επομένως αρχική καμπύλη στερεοποίησης. Το στοιχείο αυτό καθιστά περιττά τα αποτελέσματα τέτοιων δοκιμών συμπιεστότητας σε διάγραμμα *e-log p*, αλλά ενέχει επίσης και τον κίνδυνο σοβαρών λαθών στην κατανόηση και ερμηνεία των χαρακτηριστικών συμπιεστότητάς τους.

Στην Εικόνα 2.5.5 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες συμπίεσης σχεδιασμένες σε λογαριθμική και σε δεκαδική κλίμακα. Αυτές έχουν ληφθεί από τη σχετική βιβλιογραφία και περιέχουν τον προσδιορισμό της τάσης προστερεοποίησης *p* με τη χρήση της μεθόδου Casagrande., ενώ οι ίδιες καμπύλες έχουν σχεδιαστεί σε

δεκαδική κλίμακα (Wesley, 2010). Από τα διαγράμματα μπορούν να επισημανθούν τα εξής:

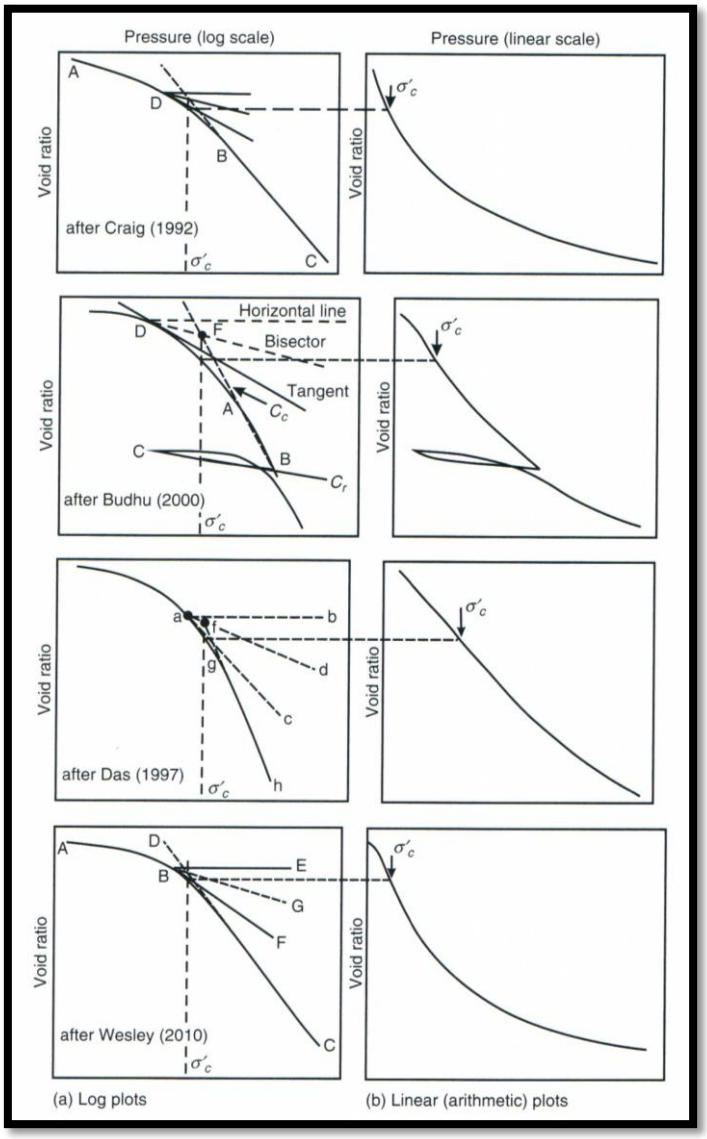
1. Το σχήμα των καμπυλών στα λογαριθμικά διαγράμματα (κοίλο προς τα κάτω) υποδηλώνει ότι το έδαφος έχει μία αρχική ζώνη χαμηλής συμπιεστότητας που μεταβαίνει σταθερά σε ζώνη υψηλότερης συμπιεστότητας.
2. Η παραπάνω συμπεριφορά υποδηλώνει με τη σειρά της, ότι υπάρχει μία τάση προστερεοποίησης *p* η οποία διαχωρίζει τις ζώνες διαφορετικής συμπιεστότητας και επομένως είναι δόκιμη η χρήση της μεθόδου Casagrande για τον υπολογισμό αυτής.
3. Η εξέταση των ίδιων καμπυλών με χρήση δεκαδικής κλίμακας για την τάση δείχνει μία εντελώς διαφορετική εικόνα. Αυτές εμφανίζονται κοίλες προς τα πάνω εξαιρουμένων των περιοχών υψηλών τιμών τάσεων, όπου είναι ευθείες. Δεν παρατηρείται επομένως αύξηση της συμπιεστότητας με αύξηση της τάσης. Αυτή παραμένει σταθερή ή μειώνεται καθώς αυξάνονται τα επίπεδα τάσης.
4. Στα δεκαδικά διαγράμματα δεν υπάρχει ίχνος των τάσεων προστερεοποίησης, όπως αυτές υπολογίστηκαν στα λογαριθμικά. Στα συγκεκριμένα σημεία δεν παρατηρείται αλλαγή της κλίσης των καμπυλών.



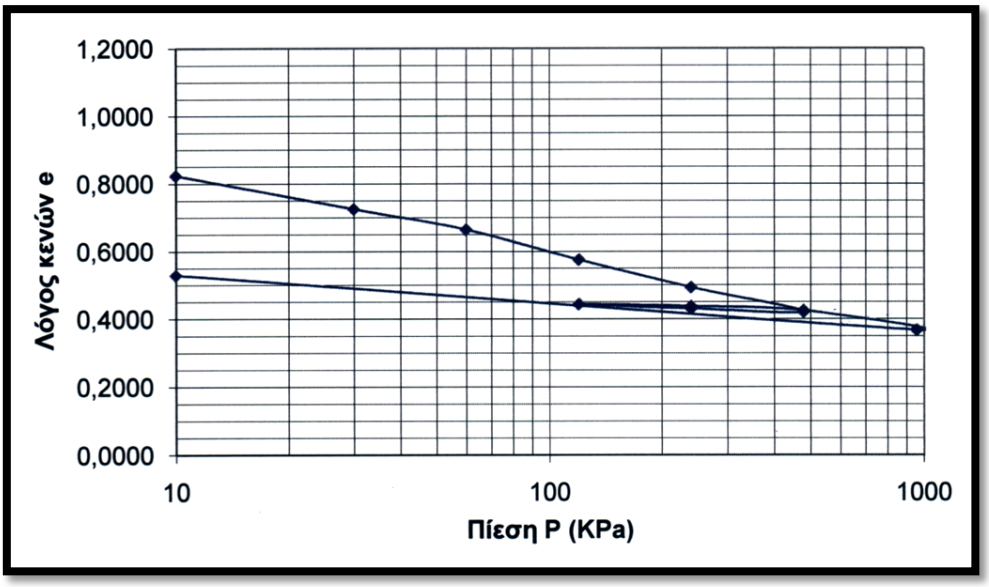
Εικόνα 2.5.4: Τρόπος δημιουργίας υπολειμματικών και ιζηματογενών εδαφών

Με βάση τα προαναφερθέντα, και παρά το γεγονός πως τα υπολειμματικά εδάφη συμπεριφέρονται ως υπερστερεοποιημένα εδάφη, γίνεται αντιληπτό πως η τάση προστερεοποίησης δεν αποτελεί μηχανικό χαρακτηριστικό αυτών, αλλά απλά μία απεικόνιση που οφείλεται καθαρά και μόνο στον τρόπο που παρουσιάζονται τα

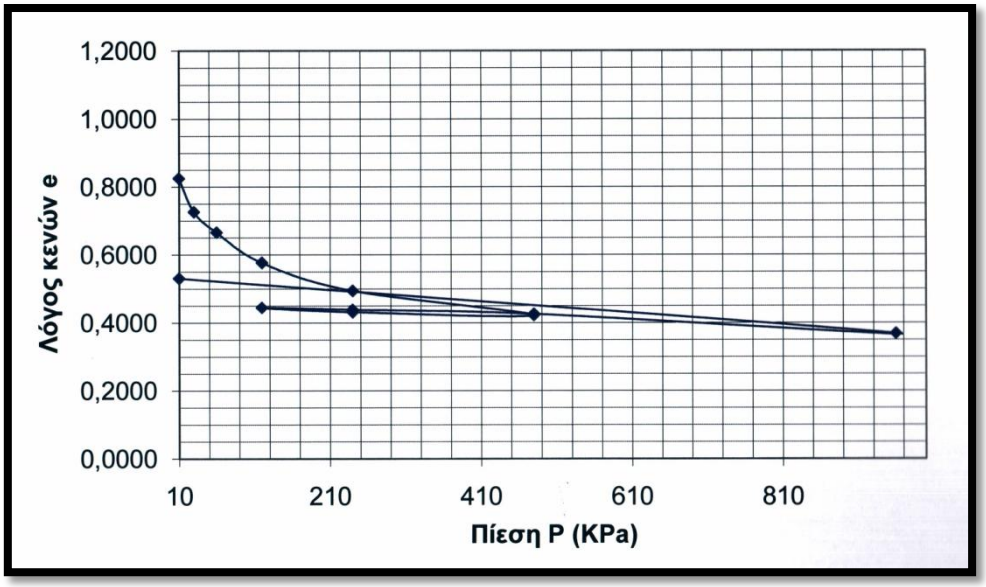
δεδομένα δοκιμών συμπίεσης. Θα μπορούσε να υιοθετηθεί ο όρος του *ισοδύναμου τάσης προστερεοποίησης* ως μία ένδειξη της αντοχής των ενδοσωματιδιακών δεσμών που έχουν απομείνει μετά τη διαδικασία αποσάθρωσης. Θεωρητικά, όταν η τάση ξεπεράσει το ισοδύναμο της τάσης προστερεοποίησης, τότε η συμπιεστότητα αυξάνεται, όμως αυτό συμβαίνει για τα περισσότερα υπολειμματικά εδάφη σε πολύ υψηλές τιμές τάσης, που είναι δύσκολο να φτάσουν οι συμβατικές δοκιμές συμπιεστότητας και προφανώς, κάτι τέτοιο δεν απαιτείται στο σχεδιασμό τεχνικών έργων. Συνήθως το ύψος της τιμής των τάσεων είναι τέτοιο, ώστε το υπολειμματικό έδαφος να παραμένει εντός του εύρους της ψευδό-υπέρστερεοποιημένης συμπεριφοράς (Blight G. E., 1997), εύρος που εξαρτάται από το βαθμό αποσάθρωσης και όχι από το ιστορικό φόρτισης (stress history).



Εικόνα 2.5.5: Αποτελέσματα δοκιμών οιδημέτρου με τη χρήση λογαριθμικής και δεκαδικής κλίμακας για την τάση προστερεοποίησης (Budhu, 2000), (Craig, 1992), (Das, 1998) & (Wesley, 2010)



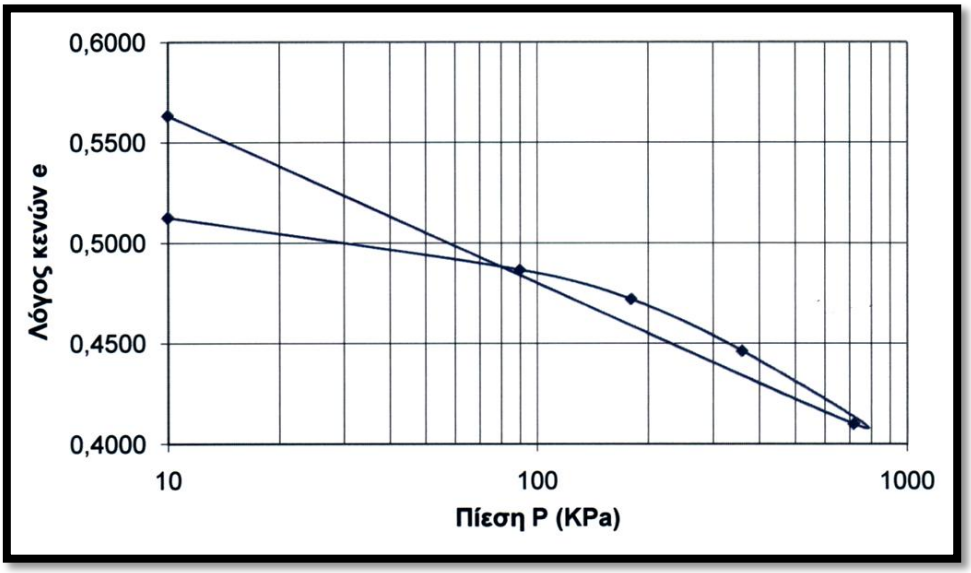
Εικόνα 2.5.6: Αποτελέσματα δοκιμών οιδημέτρου με χρήση λογαριθμικής κλίμακας για την τάση προστερεοποίησης του υλικού της Ενότητας C της περιοχής της Ασπροβάλτας



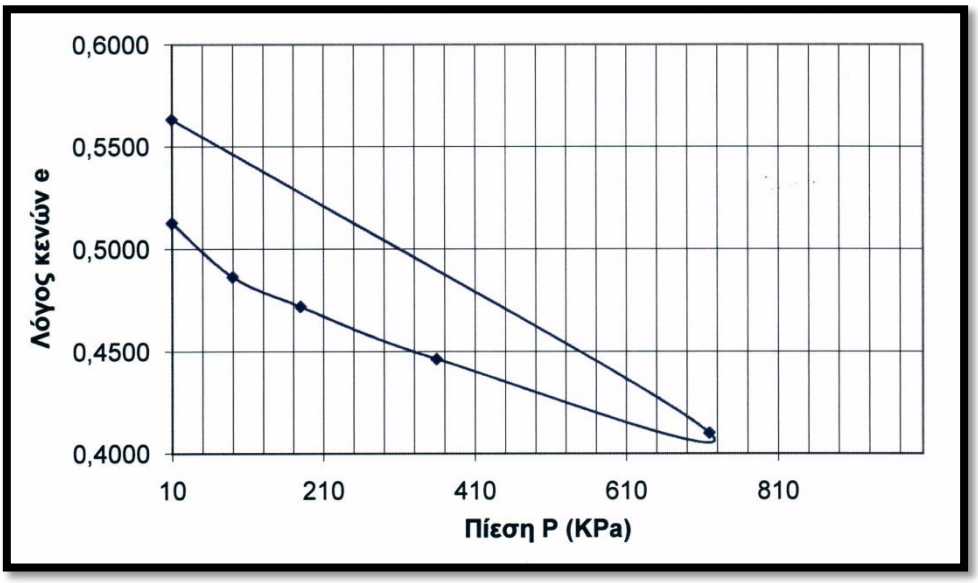
Εικόνα 2.5.7: Αποτελέσματα δοκιμών οιδημέτρου με χρήση δεκαδικής κλίμακας για την τάση προστερεοποίησης του υλικού της Ενότητας C της περιοχής της Ασπροβάλτας

Στην Εικόνα 2.5.6 παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα το διάγραμμα δείκτη κενών *e*-πίεσης *p* από δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης για το υπολειμματικό έδαφος της ενότητας C της περιοχής της Ασπροβάλτας. Στην Εικόνα 2.5.7 απεικονίζεται αντίστοιχο διάγραμμα της ίδιας δοκιμής σε δεκαδική κλίμακα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση σε κανένα από τα δύο διαγράμματα δε διακρίνεται μία διακριτή τιμή που να υποδηλώνει αύξηση της συμπιεστότητας με την αύξηση της τάσης. Αντιθέτως, στην Εικόνα 2.5.7 φαίνεται χαρακτηριστικά μία μείωση της συμπιεστότητας με αύξηση της τάσης, η οποία μάλιστα γίνεται γραμμική για τιμές τάσης μεγαλύτερες από 210 kPa.

Το φαινόμενο της ψευδο-υπερστερεοποιημένης συμπεριφοράς αποτυπώνεται καλύτερα στην Εικόνα 2.5.8 και στην Εικόνα 2.5.9. Σε αυτές παρουσιάζονται τα διαγράμματα λόγου κενών *e*-log*p* από δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης σε δείγμα ίδιας προέλευσης υλικού από την περιοχή Κ. Νευροκοπίου και βάθους 8m, σε λογαριθμική και δεκαδική κλίμακα αντίστοιχα. Στο λογαριθμικό διάγραμμα το υλικό παρουσιάζεται ως υπερστερεοποιημένο, κάτι που, όπως παρατηρείται στο δεκαδικό διάγραμμα δεν ισχύει.



Εικόνα 2.5.8: Αποτελέσματα δοκιμών οιδημέτρου με τη χρήση λογαριθμικής κλίμακας για την τάση προστερεοποίησης του υπολειμματικού υλικού της περιοχής Κ. Νευροκοπίου

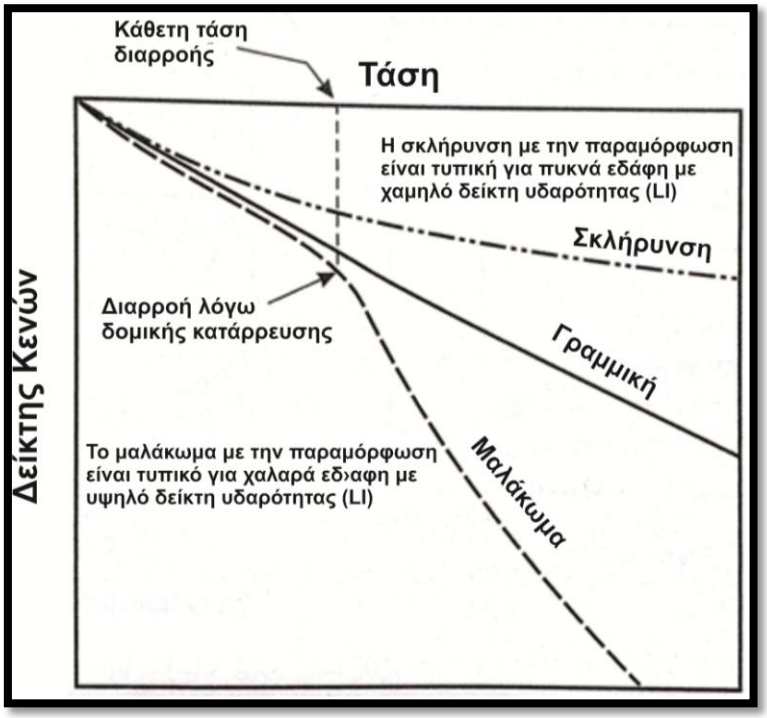


Εικόνα 2.5.9: Αποτελέσματα δοκιμών οιδημέτρου με τη χρήση δεκαδικής κλίμακας για την τάση προστερεοποίησης του υπολειμματικού υλικού της περιοχής Κ. Νευροκοπίου

Προβληματισμό προκαλεί επίσης και ο προσδιορισμός των παραμέτρων συμπιεστότητας κατά την αξιολόγηση αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών

υπολειμματικών εδαφών. Ειδικότερα ο προσδιορισμός του δείκτη συμπιεστότητας C_c και του δείκτη διόγκωσης C_s φαίνεται να είναι περισσότερο ζήτημα κρίσης εξαιτίας της απουσίας διακριτών γραμμικών τμημάτων στα διαγράμματα *e-log p* για μικρές τιμές τάσεων, οι οποίες όμως είναι αυτές που αφορούν περισσότερο το γεωτεχνικό σχεδιασμό. Όπως αρχικά προτάθηκε, ο δείκτης συμπιεστότητας C_c είναι η κλίση της αρχικής καμπύλης στερεοποίησης (virgin consolidation line) ενός αργιλικού υλικού που αποτίθεται στο νερό και συμπιέζεται από το ίδιο βάρος του. Η παραπάνω έκφραση μετεξελίχθηκε στην κλίση της εφαπτόμενης ευθείας στο διάγραμμα e-log p, στη μέγιστη τάση στην οποία διεξήχθη η δοκιμή. Επομένως αποτελεί την κλίση μιας ευθείας που συνήθως τοποθετείται εκτός του εύρους των μετρήσεων της δοκιμής (Janbu, 1988).

Ένας καταλληλότερος τρόπος απεικόνισης της συμπεριφοράς σε συμπίεση των εδαφών παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5.10. Παρουσιάζονται οι τρεις συνήθεις τύποι συμπεριφοράς που συναντώνται στα υπολειμματικά εδάφη, δηλαδή γραμμική μεταβολή, μείωση συμπιεστότητας με αύξηση της παραμόρφωσης (strain-hardening behavior) και αύξηση της συμπιεστότητας με αύξηση της παραμόρφωσης (strain-softening behavior). Και οι τρεις τύποι συμπεριφοράς μπορεί να βρεθούν ακόμα και στο ίδιο υπολειμματικό έδαφος ή στο ίδιο προφίλ. Το σχήμα των καμπυλών συμπίεσης σχετίζεται με το δείκτη υδαρότητας (LI). Εδάφη με μικρή τιμή δείκτη υδαρότητας έχουν συμπεριφορά μείωσης της συμπιεστότητας, ενώ εδάφη με υψηλή τιμή LI εμφανίζουν αύξηση της συμπιεστότητας και ευδιάκριτη τιμή φορτίου (πίεσης) στην οποία διαπιστώνεται μεταβολή κλίσης της καμπύλης συμπίεσης.



Εικόνα 2.5.10: Θεωρητική απεικόνιση της συμπεριφοράς συμπίεσης των υπολειμματικών εδαφών (Wesley, 2010)

Ο Πίνακας 2.5.1 δείχνει τα αποτελέσματα δοκιμής οιδημέτρου του υλικού της ενότητας C της περιοχής της Ασπροβάλτας και ο Πίνακας 2.5.2 τα αντίστοιχα αποτελέσματα δοκιμής οιδημέτρου του υπολειμματικού υλικού της περιοχής Κ. Νευροκοπίου. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται συμπεριφορά μείωσης της συμπιεστότητας με αύξηση της παραμόρφωσης (strain-hardening), αποτέλεσμα αναμενόμενο εφόσον και τα δύο υλικά εμφανίζουν μικρή τιμή LI, και διογκούμενη συμπεριφορά κατά τις φάσεις αποφόρτισης. Ο συντελεστής μεταβολής όγκου m_v φαίνεται να είναι η καταλληλότερη παράμετρος έκφρασης της συμπιεστότητας για τα υπολειμματικά εδάφη. Οι τιμές που παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες αποτυπώνουν την συμπεριφορά συμπίεσης των υλικών που δοκιμάστηκαν.

Πίνακας 2.5.1: Αποτελέσματα δοκιμής οιδημέτρου του υλικού της ενότητας C της περιοχής της Ασπροβάλτας

Πίεση p (kPa)	Δe	Δείκτης Συμπιεστότητας C_C	1+e	α_v (kPa^{-1})	m_v (kPa^{-1})	Μέτρο Συμπίεσης E_s (kPa)	Συν. Διαπερ. k (cm/sec)
0-30	0,099	0,329	1,776	0,003958	0,002229	449	4,43E-06
30-60	0,060	0,200	1,696	0,002413	0,001423	703	8,48E-07
60-120	0,089	0,296	1,621	0,001783	0,0011	909	9,83E-07
120-240	0,082	0,274	1,536	0,000824	0,000537	1863	9,61E-08
240-480	0,072	0,239	1,458	0,000360	0,000247	4048	4,42E-08
480-240	-0,009	-0,031	1,427	0,000024	-1,6E-05	-60633	0,00E+00
240-120	-0,013	-0,043	1,438	0,000033	-2,3E-05	-44035	0,00E+00
120-240	0,006	0,019	1,442	0,000014	9,99E-06	100067	0,00E+00
240-480	0,013	0,043	1,433	0,000032	2,25E-05	44516	0,00E+00
480-960	0,058	0,191	1,397	0,000144	0,000103	9697	4,39E-08
960-0	-0,162	-0,539	1,450	0,000406	-0,00028	-3572	0,00E+00

Πίνακας 2.5.2: Αποτελέσματα δοκιμής οιδημέτρου του υπολειμματικού υλικού της περιοχής Κ. Νευροκοπίου

Πίεση p (kPa)	Δe	Δείκτης Συμπιεστότητας C_C	1+e	α_v (kPa^{-1})	m_v (kPa^{-1})	Μέτρο Συμπίεσης E_s (kPa)	Συν. Διαπερ. k (cm/sec)
0-90	0,026	0,087	1,500	0,000261	0,000174	5743	7,78E-07
90-180	0,015	0,049	1,479	0,000147	9,9E-05	10098	8,05E-08
180-360	0,026	0,085	1,459	0,000256	0,000176	5692	6,27E-08
360-720	0,036	0,121	1,428	0,000182	0,000127	7868	2,05E-08
Αποφόρτ.	-0,153	-0,096	1,428	0,000767	-0,00054	-1863	

Σε ένα προφίλ ιζηματογενούς εδάφους, οι πλευρικές τάσεις σχετίζονται με το λόγο υπερστερεοποίησης (OCR) και αυξάνουν καθώς αυξάνει η τάση

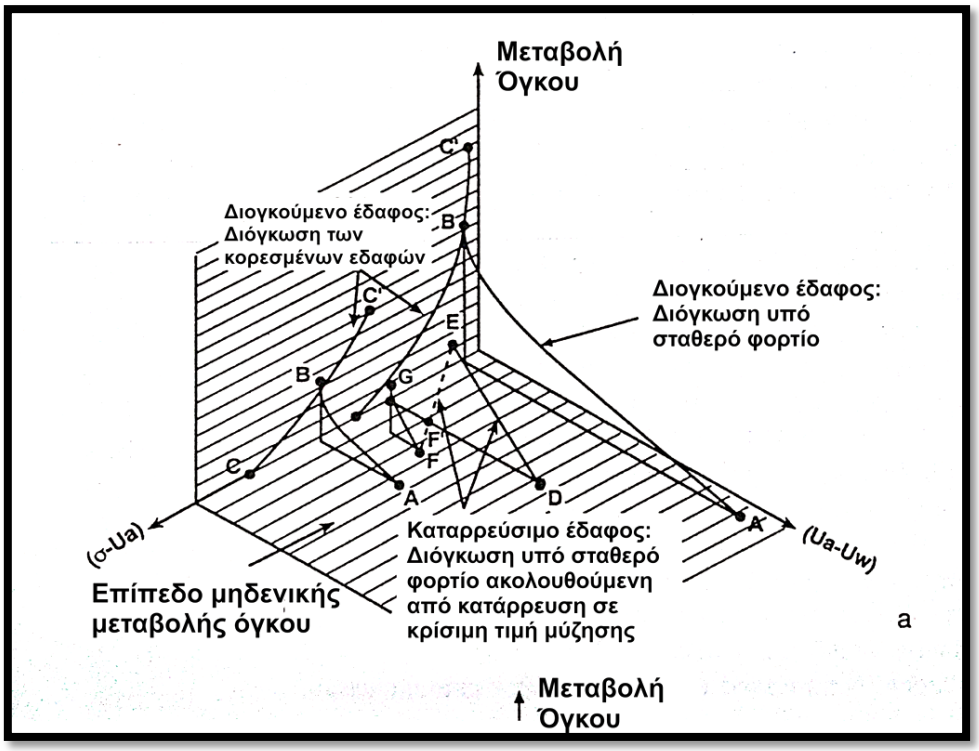
προστερεοποίησης. Κατά την αποσάθρωση ενός προφίλ υπολειμματικού εδάφους, έχουμε από τη μία μεριά διόγκωση των ορυκτών, από την άλλη όμως χάνεται υλικό λόγω έκπλυσης των λεπτών σωματιδίων κ.λπ. από την εσωτερική διάβρωση με αποτέλεσμα, εκτός αν το τελικό προϊόν είναι διογκούμενο, οι πλευρικές τάσεις να είναι μικρότερες από την κατακόρυφη τάση, δηλαδή ο συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία (K_0) να είναι μικρότερος της μονάδας.

2.5.3. ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

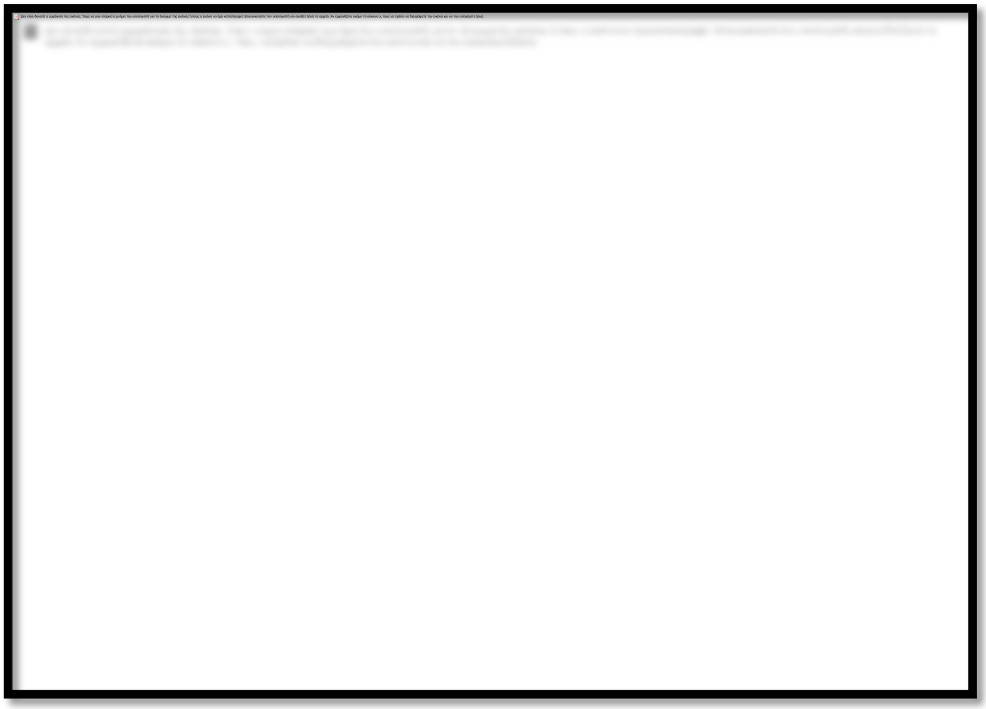
Δύο φαινόμενα τα οποία παρατηρούνται πολύ συχνά στα υπολειμματικά εδάφη και κυρίως στις εύκρατες κλιματικές ζώνες είναι αυτά της *διόγκωσης* και της *κατάρρευσης*. Η διαδικασία της διόγκωσης και της κατάρρευσης περιγράφεται ως μεταβολή όγκου σε σχέση με τις μεταβλητές της ακόρεστης ενεργού τάσης (σ-u_α) και της μύζησης $(u_\alpha-u_w)$ (Blight G. E., 1965). Οι μεταβλητές αυτές περιγράφουν τη συμπεριφορά μεταβολής όγκου ενός μερικώς κορεσμένου εδάφους και θα αναλυθούν διεξοδικά στο Κεφάλαιο 3.

Η σχέση αυτών των μεταβλητών κατά τη διαδικασία διόγκωσης ενός ακόρεστου εδάφους παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5.11. Αν η $(\sigma-u_\alpha)$ διατηρείται σταθερή, και θεωρηθεί ως το ισοδύναμο μιας σταθερής ολικής τάσης στο πεδίο, τότε μείωση της μύζησης $(u_\alpha-u_w)$, εξαιτίας αύξησης της περιεχόμενης υγρασίας θα προκαλέσει διόγκωση του εδάφους κατά την πορεία της καμπύλης AB (Εικόνα 2.5.11). Αν το έδαφος έχει σταθερή κοκκώδη δομή τότε η διόγκωσή του θα συνεχιστεί μέχρι η τιμή της μύζησης να μηδενιστεί, δηλαδή μέχρι να επέλθει κορεσμός του εδάφους (σημείο B). Στη συνέχεια, αν η σ μειωθεί περαιτέρω, η διόγκωση θα συνεχιστεί κατά μήκος της γραμμής BC'. Παρόλα αυτά, αν το εξεταζόμενο έδαφος έχει ασταθή δομή, είναι πιθανό να επέλθει κατάρρευση αυτής της δομής μόλις η τιμή της μύζησης $(u_\alpha-u_w)$ πέσει κάτω από μία κρίσιμη τιμή σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τιμή $(\sigma-u_\alpha)$ (τμήμα DEF). Μόλις η δομή των εδαφικών κόκκων σταθεροποιηθεί τότε θα συνεχιστεί η διόγκωση του εδάφους κατά μήκος του τμήματος FG, και αν η τιμή της μύζησης συνεχίσει να μειώνεται, τότε το εξεταζόμενο έδαφος θα συμπεριφερθεί κανονικά.

Στην Εικόνα 2.5.12 παρουσιάζονται το αποτέλεσμα της διαδικασίας διόγκωσης σε σταθερό όγκο κατά την οποία η ενεργός τάση $(\sigma-u_\alpha)$ προσαρμόζεται στη μείωση της μύζησης $(u_\alpha-u_w)$ λόγω αύξησης της περιεχόμενης υγρασίας, έτσι ώστε να μην υπάρχει ογκομετρική παραμόρφωση. Οι γραμμές που διαγράφονται στο επίπεδο μηδενικής ογκομετρικής παραμόρφωσης αντιπροσωπεύουν διαδρομές για σταθερή τιμή ενεργού τάσης και ισχύουν ανεξάρτητα αν το υλικό είναι διογκούμενο ή επιδεκτικό σε κατάρρευση και ανεξάρτητα από την τιμή $(u_\alpha-u_w)$.



Εικόνα 2.5.11: Τρισδιάστατο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τη διόγκωση μερικώς κορεσμένου εδάφους κάτω από συνεχές ισοτροπικό φορτίο



Εικόνα 2.5.12: Τρισδιάστατο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για σταθερή τιμή ενεργού τάσης σε μερικώς κορεσμένα εδάφη

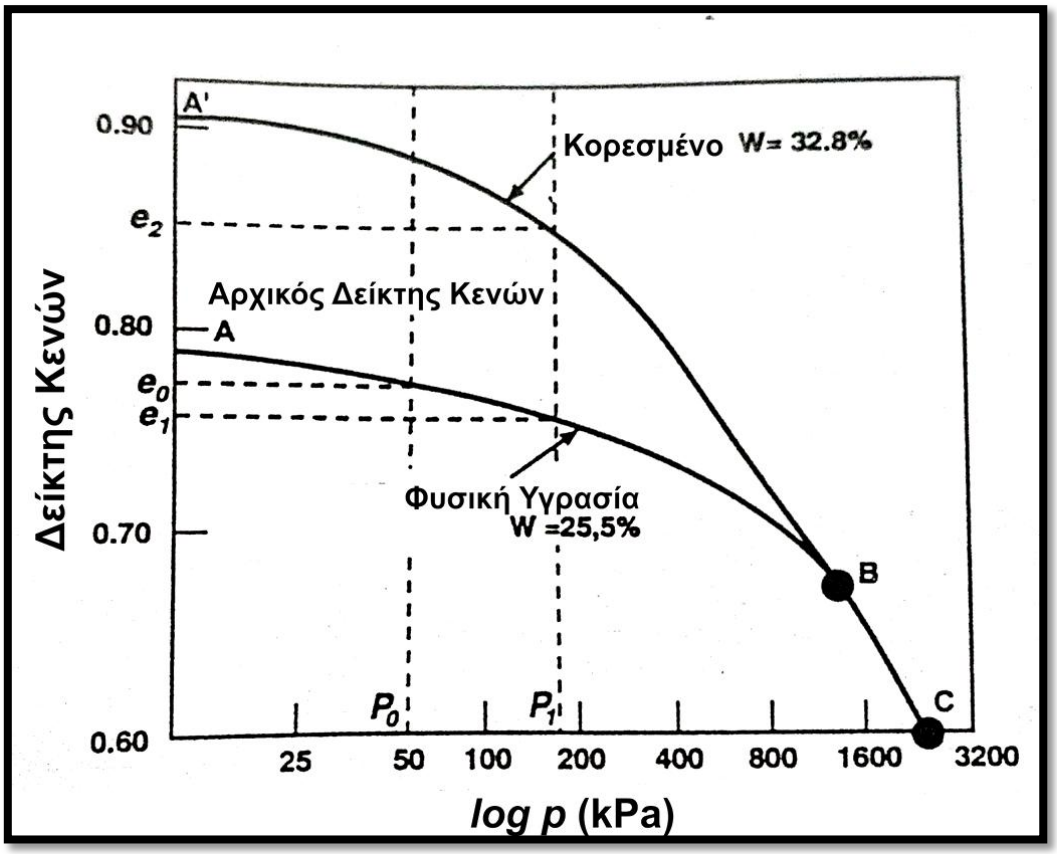
Διόγκωση υπολειμματικών εδαφών

Το φαινόμενο της διόγκωσης συναντάται συνήθως σε εδάφη προερχόμενα από αποσάθρωση αργιλικών σχιστολίθων, ιλυολίθων και πυριγενών πετρωμάτων, δηλαδή σε αργιλικά υπολειμματικά εδάφη, κυρίως σε όσα εμπεριέχουν αργιλικά ορυκτά της ομάδας του σμεκτίτη. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5.11, η διόγκωση είναι αποτέλεσμα της μείωσης της μύζησης λόγω αύξησης της υγρασίας. Συνήθως αυτό συμβαίνει όταν υπάρχουν μεταβολές στη χρήση γης μιας περιοχής που διευκολύνουν την κυκλοφορία και κατείσδυση του νερού (εκσκαφές, επιφανειακές διαμορφώσεις, αποσάθρωση), μειώνοντας τη μύζηση και οδηγώντας σε διόγκωση. Το φαινόμενο της διόγκωσης έχει εποχιακό χαρακτήρα, ειδικά σε εύκρατες περιοχές με διακριτές υγρές και ξηρές περιόδους, όπου το εδαφικό προφίλ υπόκειται σε κύκλους διόγκωσης-συρρίκνωσης για τις αντίστοιχες περιόδους ύγρανσης-ξήρανσης. Η εποχιακή αυτή καταπόνηση οδηγεί σε φαινόμενα επιταχυνόμενης αποσάθρωσης από τη στιγμή που θα υπάρξει παρέμβαση και διατάραξη του καθεστώτος διακύμανσης της περιεχόμενης υγρασίας σε μια περιοχή ενδιαφέροντος, όπως συνέβη και στην περίπτωση των εκσκαφών των ορυγμάτων στην περιοχή της Ασπροβάλτας.

Ένας πρακτικός τρόπος εκτίμησης των παραμέτρων διόγκωσης ενός εδάφους στο εργαστήριο, είναι η εκτέλεση διπλής δοκιμής οιδημέτρου σε όμοια δείγματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5.13. Το ένα δείγμα συμπιέζεται με σταθερή περιεχόμενη υγρασία και ακολουθεί τη διαδρομή ABC. Αν το έδαφος διαβραχεί και αφεθεί σε μικρή ολική τάση, τότε αυτό θα διογκωθεί κατά την AA', και αν στη συνέχεια συμπιεσθεί, θα ακολουθήσει τη διαδρομή A'BC.

Ο βαθμός κατά τον οποίο θα διογκωθεί ένα εδαφικό προφίλ εξαρτάται επίσης και από το βάθος στο οποίο εκτείνεται το διογκούμενο υλικό στο προφίλ. Το πάχος της ακόρεστης ζώνης ή το σημείο αλλαγής εδαφικού υλικού μπορεί να θεωρηθεί ως το μέγιστο βάθος διόγκωσης ενός εδαφικού προφίλ. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις που το διογκούμενο υλικό φτάνει στα 50m βάθος, έχουν παρατηρηθεί επιφανειακές διογκώσεις της τάξης των 5m, και στην ίδια περιοχή διογκώσεις 2m σε βάθος 10m από την επιφάνεια (Williams, 1991). Συνήθως βέβαια οι επιφανειακές διογκώσεις είναι πολύ μικρότερες και σπάνια υπερβαίνουν τα 2m.

Το βάθος μέχρι το οποίο μπορούν να παρατηρηθούν εποχιακές μεταβολές όγκου αναμένεται να είναι μεγάλο σε εύκρατες και ημι-εύκρατες κλιματικές ζώνες, όπου εδαφικά προφίλ μπορεί να ξηρανθούν κατά την ξηρή περίοδο μέχρι βάθη μέχρι 15-20m, βάθη στα οποία μπορεί να φτάσει και η ξήρανση λόγω μύζησης από τις ρίζες των δέντρων (Blight G. E., 1987). Οι βροχές στις αρχές της υγρής περιόδου, που συχνά εκδηλώνονται με τη μορφή καταιγίδων, προκαλούν διήθηση του νερού σε σημαντικά βάθη στο εδαφικό προφίλ μέσω των ρωγμών που προκαλεί η συρρίκνωση της ξηρής περιόδου (Pillissier, 1991).



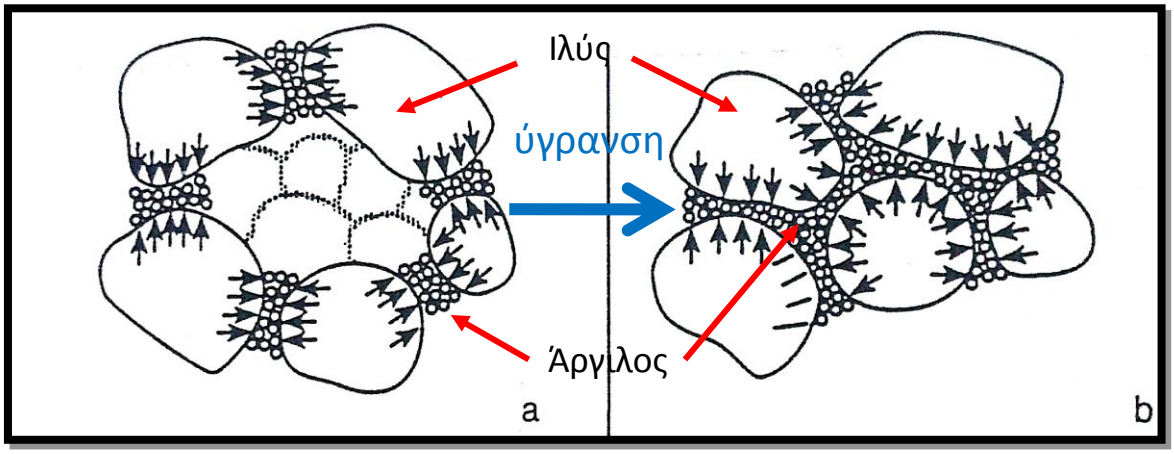
Εικόνα 2.5.13: Διαγράμματα συμπίεσης *e-logp* για διογκούμενο έδαφος (Jennings & Knight, 1975)

Κατάρρευση υπολειμματικών εδαφών

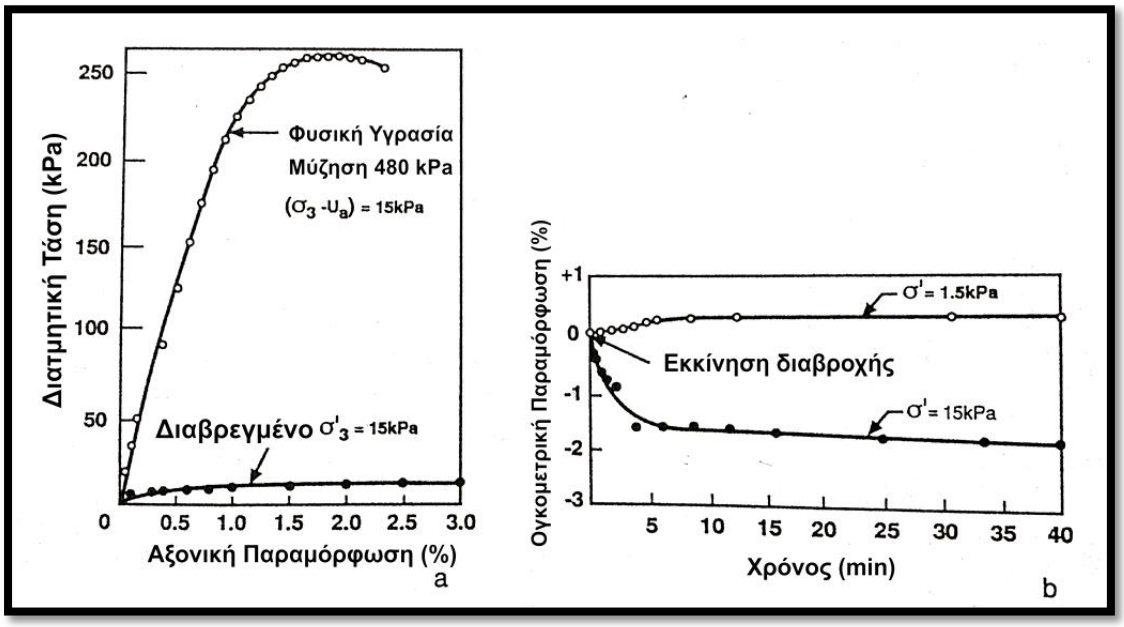
Το φαινόμενο της κατάρρευσης συμβαίνει σε δύο τύπους υπολειμματικών εδαφών. Ο πρώτος είναι εδάφη ασβεστούχου πηλού (loess) προερχόμενα από αιολική διάβρωση (wind-blown soils) και ο δεύτερος υπολειμματικά εδάφη εξαιρετικά έντονης αποσάθρωσης, προερχόμενα από όξινα πυριγενή πετρώματα (γρανιτικά) με υψηλή περιεκτικότητα σε χαλαζία. Το μητρικό πέτρωμα εξαιτίας της αποσάθρωσης και της έκπλυσης ορυκτών μεταπίπτει σε ιλυώδη ή αργιλώδη άμμο με μεγάλο δείκτη πόρων και ασταθή, καταρρεύσιμη κοκκώδη δομή (Εικόνα 2.5.14).

Τα χαρακτηριστικά ενός καταρρεύσιμου εδάφους παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 2.5.11 και αναλύονται περαιτέρω στην Εικόνα 2.5.15. Στο διάγραμμα διατμητικής τάσης-αξονικής παραμόρφωσης (a) φαίνεται ότι το εξεταζόμενο έδαφος έχει ικανοποιητική αντοχή (περίπου 275 kPa) για τιμές (σ_3-u_a)=15 kPa και (u_a-u_w)=480 kPa. Μετά από διαβροχή του ίδιου υλικού, η τιμή της μύζησης μηδενίστηκε και η αντοχή μετρήθηκε μόλις 12 kPa. Στο διάγραμμα μεταβολής όγκου (b) της ίδιας Εικόνας φαίνεται πως το ίδιο έδαφος θα υποστεί μία μικρή διόγκωση εάν υγρανθεί κάτω από μικρή εφαρμοζόμενη τάση (1,5 kPa). Αν όμως η εφαρμοζόμενη τάση είναι μεγαλύτερη (πχ δεκαπλάσια 15 kPa), τότε παρατηρείται απότομη μείωση όγκου της τάξεως του 2%. Επομένως, ένα επιδεκτικό σε κατάρρευση έδαφος μπορεί να έχει υψηλή αντοχή και να είναι σχετικά ασυμπίεστο για μικρές τιμές υγρασίας (δηλαδή

υψηλές τιμές μύζησης) και να χάνει την αντοχή του και να γίνεται συμπιεστό αν μειωθεί η μύζηση λόγω αύξησης της υγρασίας (Knight, 1961).



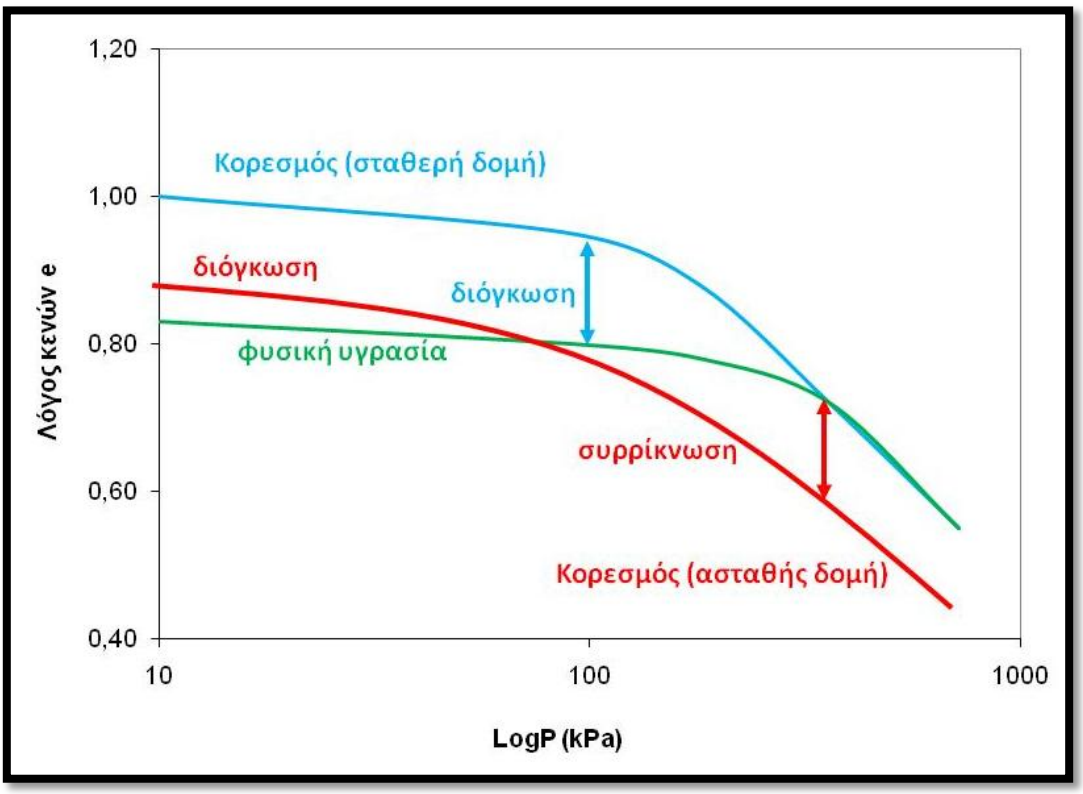
Εικόνα 2.5.14: Μηχανισμός κατάρρευσης αμμώδους εδαφικού υλικού α) Φορτισμένη εδαφική δομή πριν την ύγρανση β) Φορτισμένη εδαφική δομή μετά την ύγρανση (Knight, 1961)



Εικόνα 2.5.15: Αποτελέσματα δοκιμών αντοχής σε καταρρεύσιμο υπολειμματικό έδαφος (Knight, 1961)

Παρόλο που η μηχανική συμπεριφορά ενός εδάφους ελέγχεται από την ενεργό τάση πριν και μετά την κατάρρευσή του, αυτή δεν μπορεί να προβλεφθεί σε αυτήν τη βάση (της ενεργού τάσης) αλλά ελέγχεται από τις μεταβολές της υγρασίας (δηλ. της μύζησης Εικόνα 2.5.11). Το φαινόμενο της κατάρρευσης μπορεί να εξελιχθεί προοδευτικά και να μην εκδηλωθεί ως μία απότομη καθίζηση, ανάλογα με την περιεχόμενη υγρασία του εδάφους και το εύρος της μεταβολής της. Στην Εικόνα 2.5.16 φαίνεται πως αν το έδαφος φορτιστεί σε υψηλή τιμή περιεχόμενης υγρασίας τότε θα στερεοποιηθεί χωρίς να υποστεί κατάρρευση. Αν όμως κατά τη φόρτιση έχει μικρή τιμή περιεχόμενης υγρασίας και στη συνέχεια υγρανθεί, τότε θα διογκωθεί εάν

η τάση είναι μικρότερη από 100 kPa ή θα καταρρεύσει εάν η τάση είναι μεγαλύτερη από 200 kPa.



Εικόνα 2.5.16: Μεταβολές όγκου μετά από φόρτιση σε κατάσταση φυσικής υγρασίας και κορεσμού μιας υπολειμματικής αργιλώδους ιλύος ασταθούς δομής προερχόμενης από αποσάθρωση χαλαζίτη

Το φαινόμενο της προοδευτικής αυτής κατάρρευσης ονομάζεται υδροστερεοποίηση (hydroconsolidation). Συμβαίνει μόνο μία φορά, κατά την ύγρανση του εδάφους, με κατάρρευση της δομής και δημιουργία νέας πιο σταθερής. Το φαινόμενο αυτό συναντάται συνήθως σε περιπτώσεις διατάραξης του περιβάλλοντος υγρασίας σε ένα έδαφος ασταθούς κοκκώδους δομής εξαιτίας κάποιας τεχνικής παρέμβασης και, εκτός από τα υπολειμματικά εδάφη, συναντάται και σε χαλαρές ανθρωπογενείς τεχνητές ή ιστορικές επιχωματώσεις (historical, urban non-engineered fills). Τέτοια φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί και στις ιστορικές επιχωματώσεις της Θεσσαλονίκης κατά την κατασκευή του Μετρό. Συγκεκριμένα, κατά την κατασκευή διαφραγματικών τοίχων σε σταθμό του Μετρό, προκλήθηκε ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα μέσα στο στρώμα των επιχωματώσεων. Στο συγκεκριμένο στρώμα ο υδροφόρος ορίζοντας είναι αποκλεισμένος από μεταβολές λόγω της επιφανειακής οικιστικής ανάπτυξης που αποτρέπει την κατείσδυση. Το αποτέλεσμα της ανύψωσης του υδροφόρου ορίζοντα ήταν να προκληθούν καθιζήσεις σε σημεία του ιστορικού κέντρου της πόλης (Chatzigogos N. T., Makedon, Tsotsos, & Christaras, 2006).

Το μέγεθος των καθιζήσεων λόγω κατάρρευσης της δομής εξαρτάται από το δείκτη κενών του εδάφους καθώς επίσης και από την εφαρμοζόμενη πίεση. Για μικρά

φορτία θεμελιώσεων από 100 kPa έως 300 kPa παρατηρούνται συνήθως μεταβολές όγκου της τάξης του 10% του πάχους του επίμαχου στρώματος, ενώ έχουν παρατηρηθεί και καθιζήσεις μέχρι το 15% αυτού. Εργαστηριακά, ο υπολογισμός της υδροστερεοποίησης προσεγγίζεται με τη δοκιμή του οιδημέτρου (Jennings & Knight, 1975), όπου επιχειρείται η προσομοίωση της διαδικασίας φόρτισης ακολουθούμενης από ύγρανση. Λύσεις θεμελίωσης για την αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων έχουν προταθεί με βάση την υπόθεση ότι τα φαινόμενα κατάρρευσης θα εκδηλωθούν με τη μορφή ενός "μαλακού σημείου" διαμέτρου μέχρι και 2m σε οποιοδήποτε σημείο κάτω από τη θεμελίωση (Tromp, 1985), (Schwartz & Yates, 1980).

2.5.4 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Είναι γενικώς παραδεκτό, πως το κρίσιμο πρόβλημα του γεωτεχνικού σχεδιασμού σε υπολειμματικά εδάφη είναι η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων αντοχής και η πρόβλεψη των παραμορφώσεων και συνοδών αστοχιών σε αυτά. Μέχρι και σήμερα ακολουθείται η συμβατική οδός αναφορικά με τις δοκιμές αντοχής σε υπολειμματικά εδάφη, δηλαδή τριαξονικές δοκιμές και δοκιμές άμεσης διάτμησης στο εργαστήριο και κάποιες μορφές δοκιμών διείσδυσης στο πεδίο (Tsuchida, Athapathu, Kano, & Suga, 2011). Η πλήρης κατανόηση των διαφορών των υπολειμματικών εδαφών από τα υπόλοιπα εδάφη είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής τους. Πιο συγκεκριμένα είναι απαραίτητη για την προετοιμασία και το χειρισμό των δειγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν στις δοκιμές καθώς επίσης και για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δοκιμών αντοχής (Brand & Phillipson, 1985). Η γνώση του μηχανισμού γένεσης των υπολειμματικών εδαφών σε συνδυασμό με τον εντοπισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τη διατμητική τους αντοχή οδηγούν στην εκτίμηση των ιδιαιτεροτήτων στην απόκρισή τους στη διάτμηση και την παραμόρφωση και επομένως στην επιλογή των αντιπροσωπευτικότερων παραμέτρων σχεδιασμού.

Τα υπολειμματικά εδάφη αναπτύσσουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στην υφή, τη δομή κόκκων και τη διαβάθμιση κατά θέσεις, τα οποία τα καθιστούν εξ' αντικειμένου διαφορετικά από τα ιζηματογενή εδάφη, των οποίων η υφή αναπτύσσεται σαν αποτέλεσμα του τρόπου απόθεσης και του ιστορικού των τάσεων. Ο Πίνακας 2.5.3 απαριθμεί τα κυριότερα χαρακτηριστικά που ευθύνονται για τις διαφορές στη συμπεριφορά αντοχής και παραμόρφωσης των δύο τύπων εδάφους, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

Ιστορικό τάσεων

Η επίδραση του ιστορικού μεταβολών των ενεργών τάσεων στα εδάφη μετά την απόθεσή τους είναι καθοριστική και διαμορφώνει την τιμή του δείκτη πόρων και τη διάταξη των σωματιδίων τους. Η διάταξη των σωματιδίων των υπολειμματικών εδαφών όμως, δημιουργείται από ένα ιστορικό αποσάθρωσης που εξελίσσεται ως αποτέλεσμα μηχανικών και χημικών διαδικασιών. Η αποσάθρωση είναι μία διαδικασία αποδυνάμωσης και μπορεί να προκαλέσει αποφόρτιση σε κάθετο και οριζόντιο επίπεδο εξαιτίας της απώλειας ορυκτής ύλης. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μία προοδευτική μεταβολή των επί τόπου τάσεων και τροποποιεί την επίδραση των

προγενέστερων τάσεων στη δομή του αποσαθρωμένου υλικού. Είναι επομένως λογικό η υπάρχουσα δομή των υπολειμματικών εδαφών να είναι σε ισορροπία και σε σύνδεση με την υφιστάμενη κατάσταση τάσεων και ως εκ τούτου η επίδραση του ιστορικού των τάσεων να θεωρείται μικρή (Vaughan, 1988).

Αντοχή κόκκων/σωματιδίων

Η αποσάθρωση ως διαδικασία αποδυνάμωσης προσβάλλει σε διαφορετικό βαθμό τα ορυκτολογικά στοιχεία των πετρωμάτων και δημιουργεί εδαφικά σωματίδια, κόκκους και συσσωματώματα που παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα στην θλιπτική αντοχή τους.

Πίνακας 2.5.3: Συγκριτικός πίνακας υπολειμματικών και λοιπών εδαφών αναφορικά με τα επιμέρους χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την αντοχή (Blight G. E., 1997)

Χαρακτηριστικό επίδρασης στην αντοχή	Επίδραση σε υπολειμματικά εδάφη	Επίδραση σε ιζηματογενή εδάφη
Ιστορικό τάσεων	Συνήθως όχι σημαντική	Πολύ σημαντική, διαφοροποιεί την αρχική διάταξη των κόκκων, προκαλεί το φαινόμενο της υπερστερεοποίησης
Αντοχή κόκκων/σωματιδίων	Πολύ μεταβλητή, ανομοιόμορφη ορυκτολογική σύνθεση, πιθανή παρουσία κόκκων μικρής αντοχής	Πιο σταθερή, ομοιομορφία κόκκων, λιγότεροι κόκκοι μικρής αντοχής διότι αυτοί καταστρέφονται κατά τη διαδικασία της μεταφοράς
Βαθμός συγκόλλησης	Σημαντικός παράγοντας της αντοχής, κυρίως λόγω υπολειμματικών δεσμών και διαδικασιών συγκόλλησης, επιδρά στη συνοχή και δημιουργεί ενδοτικές δυνάμεις. Εκμηδενίζεται με διατάραξη (αναζύμωση)	Συναντάται σε αποθέσεις μεγάλης γεωλογικής ηλικίας, επιδρά στη συνοχή και δημιουργεί ενδοτικές δυνάμεις. Εκμηδενίζεται με διατάραξη (αναζύμωση)
Υπολειμματική δομή και ασυνέχειες	Αναπτύσσεται από προϋπάρχουσες δομές του μητρικού πετρώματος, περιλαμβάνει τη στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις, δομές ροής κτλ.	Αναπτύσσεται από τους κύκλους απόθεσης και το ιστορικό τάσεων, πιθανή δημιουργία λείων επιφανειών
Ανισοτροπία	Προέρχεται από την υπολειμματική υφή του μητρικού πετρώματος	Προέρχεται από τη διαδικασία απόθεσης και το ιστορικό τάσεων
Λόγος κενών/ξηρό φαινόμενο βάρος	Εξαρτάται από το βαθμό αποσάθρωσης, ανεξάρτητα από το ιστορικό τάσεων	Εξαρτάται από το ιστορικό τάσεων

Βαθμός συγκόλλησης (bonding)

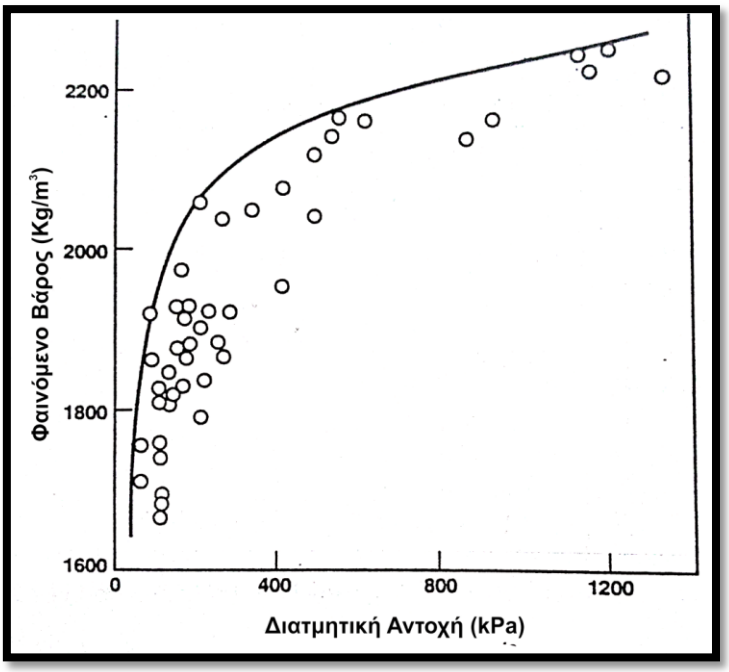
Ένα κύριο χαρακτηριστικό των υπολειμματικών εδαφών είναι η ύπαρξη δεσμών συγκόλλησης ανάμεσα στα σωματίδιά τους. Οι δεσμοί αυτοί αντιπροσωπεύονται από μία συνιστώσα αντοχής και ακαμψίας η οποία είναι ανεξάρτητη από την ενεργό τάση και το δείκτη πόρων ή την πυκνότητα. Δεσμοί συγκόλλησης μπορεί να συναντηθούν και σε ιζηματογενή εδάφη μεγάλης γεωλογικής ηλικίας, σε περιπτώσεις δηλαδή όπου οι δεσμοί έχουν ικανό χρόνο για να αναπτυχθούν. Οι δεσμοί αυτοί συχνά δεν λαμβάνονται υπόψη στην πράξη. Οι κυριότερες αιτίες ανάπτυξης δεσμών συγκόλλησης είναι (Vaughan, 1988):

- Συγκόλληση μέσω της απόθεσης ανθρακικών, υδροξειδίων και οργανικών υλικών
- Διάλυση και επαναπόθεση συγκολλητικών παραγόντων όπως πυριτικών υλικών
- Ανάπτυξη δεσμών κατά την διάρκεια της χημικής εξαλλοίωσης των ορυκτών

Η αντοχή των δεσμών αυτών ποικίλει εξαιτίας των διαφορετικών ορυκτών και των διαφορετικών διαδικασιών αποσάθρωσης. Ακόμα όμως και ένας δεσμός μικρής αντοχής που καταστρέφεται με ελάχιστο βαθμό διατάραξης μπορεί να προσδώσει μία συνιστώσα αντοχής και ακαμψίας που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά μίας μεγάλης μάζας υπολειμματικού εδάφους επί τόπου.

Στην Εικόνα 2.5.17 παρουσιάζεται η διαδικασία προοδευτικής απομείωσης της αστράγγιστης αντοχής ενός υπολειμματικού εδάφους καθώς εξελίσσεται η διαδικασία αποσάθρωσης ακριβώς εξαιτίας της αποδυνάμωσης των δεσμών συγκόλλησης. Η συσχέτιση της μείωσης της αντοχής γίνεται με την αντίστοιχη μείωση του φαινόμενου βάρους του σχηματισμού λόγω αποσάθρωσης. Οι δεσμοί συγκόλλησης φαίνεται να παρέχουν μία σημαντική συνιστώσα αντοχής στο μέτρια αποσαθρωμένο βράχο σε σχέση με τον πλήρως αποσαθρωμένο (Blight G. E., 1997).

Το γεγονός ότι οι ενδο-σωματιδιακοί δεσμοί είναι ευαίσθητοι σε διατάραξη πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη δειγματοληψία, στην προετοιμασία δειγμάτων και στη διαδικασία δοκιμής. Οι εδαφικές δομές που δημιουργούνται εξαιτίας τέτοιων δεσμών συγκόλλησης μπορεί να καταστραφούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κορεσμού, κατά την εφαρμογή τάσεων σε ένα δοκίμιο, αλλά και αν ο τύπος δοκιμής που επιλέγεται οδηγεί σε ανάπτυξη ανομοιόμορφων τάσεων πριν την αστοχία, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό μειωμένης τιμής αντοχής. Επιπρόσθετα, η αναζύμωση δοκιμίων καταστρέφει, συνήθως με μη αναστρέψιμο τρόπο, τους περισσότερους δεσμούς συγκόλλησης.



Εικόνα 2.5.17: Σχέση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και φαινόμενου βάρους υπολειμματικού ανδεσίτη

Υπολειμματική δομή και ασυνέχειες

Το μητρικό πέτρωμα ενός υπολειμματικού εδάφους είναι πιθανό να περιέχει ασυνέχειες μικρής διατμητικής αντοχής, όπως για παράδειγμα αποσαθρωμένες διακλάσεις ή πληρωμένες με χαμηλής αντοχής λεπτόκοκκο υλικό, επιφάνειες σχιστότητας κ.λπ. Όταν οι δομές αυτές υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενες διατμήσεις π.χ. εξαιτίας εποχιακών μεταβολών της περιεχόμενης υγρασίας, τότε αναπτύσσονται λείες στιλβωμένες επιφάνειες πολύ μικρής αντοχής ($\varphi<10^o$). Αυτές οι αδύναμες ζώνες "κληρονομούνται" στο υπολειμματικό έδαφος μετά την αποδόμηση του μητρικού πετρώματος και καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά του, μιας και οι ενδεχόμενες αστοχίες θα συμβούν κατά μήκος των ζωνών αυτών. Επιπρόσθετα, αυτές οι δομές απαιτούν εμπειρία στον εντοπισμό τους επί τόπου και είναι πολύ δύσκολο να αποκαλυφθούν μέσω γεωτρητικής έρευνας (Cowland & Carbray, 1988).

Είναι επομένως γενικά παραδεκτό, ότι η αντοχή των υπολειμματικών εδαφών καθορίζεται από την κληρονομούμενη υφή και τεκτονική δομή. Η αντοχή του υπόλοιπου υλικού που περιέχεται ανάμεσα στα δομικά χαρακτηριστικά εξαρτάται από το βαθμό αποσάθρωσης και επίσης το βαθμό δευτερογενούς συγκόλλησης ή *λατεριτίωσης* (Εικόνα 2.1.6), και καθορίζει περισσότερο τη μακροσκοπική εικόνα της αστοχίας. Αντίθετα, η ολική αντοχή της υπολειμματικής μάζας καθορίζεται από τις κυρίαρχες διευθύνσεις και τη συχνότητα των δομικών χαρακτηριστικών σε σχέση με τη διεύθυνση των εφαρμοζόμενων τάσεων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (Irfan & Woods, 1988), (Lo, Leung, Hayata, & Lee, 1988).

Σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατή η εκτίμηση της αντοχής μιας υπολειμματικής εδαφικής μάζας μέσω προσεκτικής χαρτογράφησης των ασυνεχειών και μέτρησης

της αντοχής τους στο εργαστήριο ή και επί τόπου. Αυτό είναι δυνατό όταν οι ασυνέχειες εμφανίζονται ανελλιπώς, χωρίς μεγάλη συχνότητα και είναι εμφανώς καθορισμένες όπως στην περίπτωση μίας διατμημένης βραχομάζας. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση υπολειμματικής σχιστότητας μεταμορφωμένου πετρώματος, οι δομές αυτές μπορούν να θεωρηθούν ως μία συνολική, συνεχής ανισοτροπία αντοχής ή διαπερατότητας (Florkiewicz & Mroz, 1989).

Ανισοτροπία

Η μηχανική συμπεριφορά ενός ανισότροπου εδάφους εξαιτίας της εφαρμογής μιας διατμητικής τάσης καθορίζεται από τη διεύθυνση εφαρμογής της τάσης. Στα ιζηματογενή εδάφη η ανισοτροπία σχετίζεται άμεσα με τον τρόπο απόθεσης και το ιστορικό των τάσεων. Στα υπολειμματικά εδάφη η ανισοτροπική συμπεριφορά έχει κληρονομηθεί από τη δομή του μητρικού πετρώματος, όμως σε ειδικές περιπτώσεις οι επί τόπου τάσεις μπορούν να παίξουν κάποιο ρόλο. Αυτό έχει εφαρμογή σε περιπτώσεις μεταμορφωμένων πετρωμάτων όπου αφθονούν οι μαρμαρυγίες, όπως στην περίπτωση των πετρωμάτων της περιοχής της Ασπροβάλτας. Τα παραγόμενα από αυτά κατά την αποσάθρωση αργιλικά ορυκτά έχουν μεγάλο πλακοειδές και είναι δυνατόν να προσανατολισθούν κατά τη διαδικασία διάτμησης δίνοντας λείες επιφάνειες μικρής αντοχής. Οι επιφάνειες αυτές μπορεί να αναπτυχθούν επί τόπου από παραμορφώσεις που συνοδεύουν τις διαδικασίες εδαφοποίησης ή από παραμορφώσεις εξαιτίας διογκώσεων και συρρικνώσεων.

Αρχικός (επί τόπου) λόγος κενών/ξηρό φαινόμενο βάρος

Η τιμή του λόγου κενών και του ξηρού φαινόμενου βάρους σε ένα υπολειμματικό έδαφος είναι απόρροια του βαθμού στον οποίο έχει δράσει η διαδικασία αποσάθρωσης, χωρίς να υπάρχει άμεση σύνδεση της τιμής αυτής με το ιστορικό των τάσεων. Ως εκ τούτου αποτελεί μία ποσοτικοποιημένη έκφραση της υπάρχουσας εδαφικής δομής και επομένως παίζει σημαντικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά των υπολειμματικών εδαφών. Η επίδραση της τιμής του λόγου κενών στην αντοχή και στην παραμόρφωση είναι σημαντικότερη σε υπολειμματικά εδάφη με ανοιχτή, μη σταθερή δομή, τα οποία με αύξησή της βελτιώνουν τη μηχανική συμπεριφορά (Howatt, 1988), (Howatt & Cater, 1982).

Μερικώς κορεσμένες ή ακόρεστες συνθήκες

Σε τροπικές και εύκρατες περιοχές όπου συναντώνται διακριτές ξηρές περίοδοι, η εξατμισιοδιαπνοή είναι δυνητικά μεγαλύτερη της διήθησης του νερού στο έδαφος κατά τη διάρκεια αυτών με αποτέλεσμα την απώλεια υγρασίας από το έδαφος και την ταπείνωση των υδροφόρων οριζόντων. Αυτό οδηγεί συχνά το επιφανειακό εδαφικό προφίλ σε αποξήρανση μεγάλου βάθους και για το λόγο αυτόν τα υπολειμματικά εδάφη συχνά βρίσκονται σε μερικώς κορεσμένη ή ακόρεστη κατάσταση με ύπαρξη συνεχούς αέρα στα κενά τους. Η πίεση του αέρα των πόρων προσεγγίζει κατά κανόνα την ατμοσφαιρική πίεση, αλλά η πίεση του νερού των πόρων είναι μικρότερη αυτής, δηλαδή αρνητική εξαιτίας τριχοειδών φαινομένων στους μικρούς πόρους των

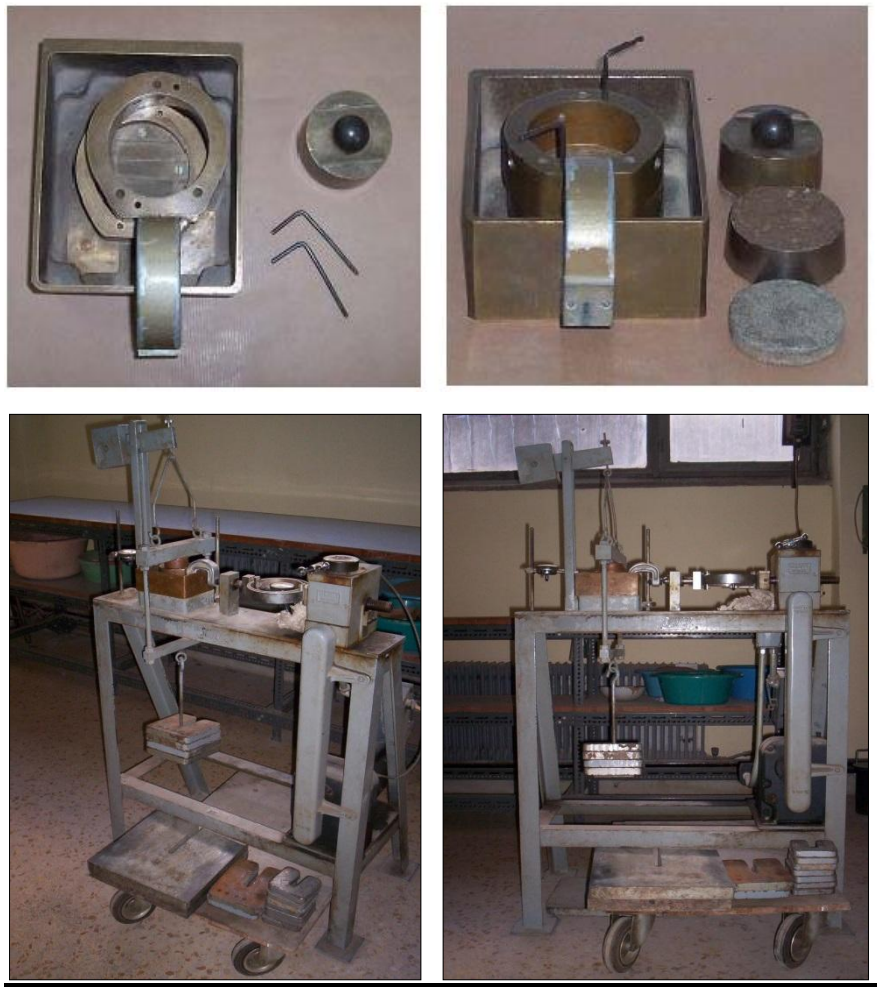
εδαφών. Η αρνητική πίεση του νερού των πόρων ή μύζηση παράγει μία επιπλέον θετική συνιστώσα ενεργού τάσης, δηλαδή η ενεργός τάση γίνεται μεγαλύτερη από την ολική. Επομένως η απώλεια υγρασίας, δηλαδή η μείωση του βαθμού κορεσμού οδηγεί σε αύξηση της διατμητικής αντοχής των εδαφών. Η εκτίμηση της τιμής της μύζησης καθώς και η ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς της στη διατμητική αντοχή των υπολειμματικών εδαφών είναι κρίσιμος παράγοντας για προβλήματα ευστάθειας πρανών σε τέτοια εδάφη. Για το λόγο αυτό θα αναλυθεί σε ξεχωριστό κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3).

Εξαιτίας της πολύπλοκης συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών και των πολλών παραγόντων που επηρεάζουν τη διατμητική τους αντοχή, όπως προκύπτει με βάση τα προαναφερθέντα, δύο είναι οι πιθανές προσεγγίσεις για την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής τους. Η πρώτη προσέγγιση αφορά το σχεδιασμό δοκιμών μεγάλης κλίμακας οι οποίες όμως είναι ακριβές και χρονοβόρες με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η διεξαγωγή πολλών τέτοιων ώστε να καταγραφεί η ανομοιογένεια του δοκιμαζόμενου εδάφους (Chu, Hsu, & Lai, 1988), (Chang & Goh, 1988), (Premchitz, Gray, & Massey, 1988). Η δεύτερη προσέγγιση είναι η εκτέλεση μεγάλου αριθμού εργαστηριακών δοκιμών μικρής κλίμακας. Καταλληλότερες δοκιμές είναι η τριαξονική φόρτιση μη στερεοποιημένου υλικού σε αστράγγιστες συνθήκες (UU) και η δοκιμή άμεσης διάτμησης (direct shear), η οποία με επιλεγμένο προσανατολισμό των δειγμάτων βοηθάει στην εξέταση πιθανής ανισοτροπίας της αντοχής τους. Η δεύτερη προσέγγιση βοηθάει στην εξέταση της ανομοιογένειας ενός υπολειμματικού εδάφους, οδηγεί όμως σε υπερεκτίμηση των παραμέτρων αντοχής ενός σκληρού υλικού με ασυνέχειες σε σχέση με την πραγματική επί τόπου αντοχή του (Burland, Butler, & Dunican, 1966). Παρόλα αυτά η κατώτερη τιμή που προκύπτει από στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων αντοχής δοκιμών μικρής κλίμακας προσεγγίζει ικανοποιητικά την επί τόπου αντοχή ενός γεωυλικού με ασυνέχειες. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η τιμή αυτή αντικατοπτρίζει την αντοχή των ασυνεχειών, οι οποίες και καθορίζουν τη συνολική επί τόπου αντοχή της μάζας του γεωυλικού.

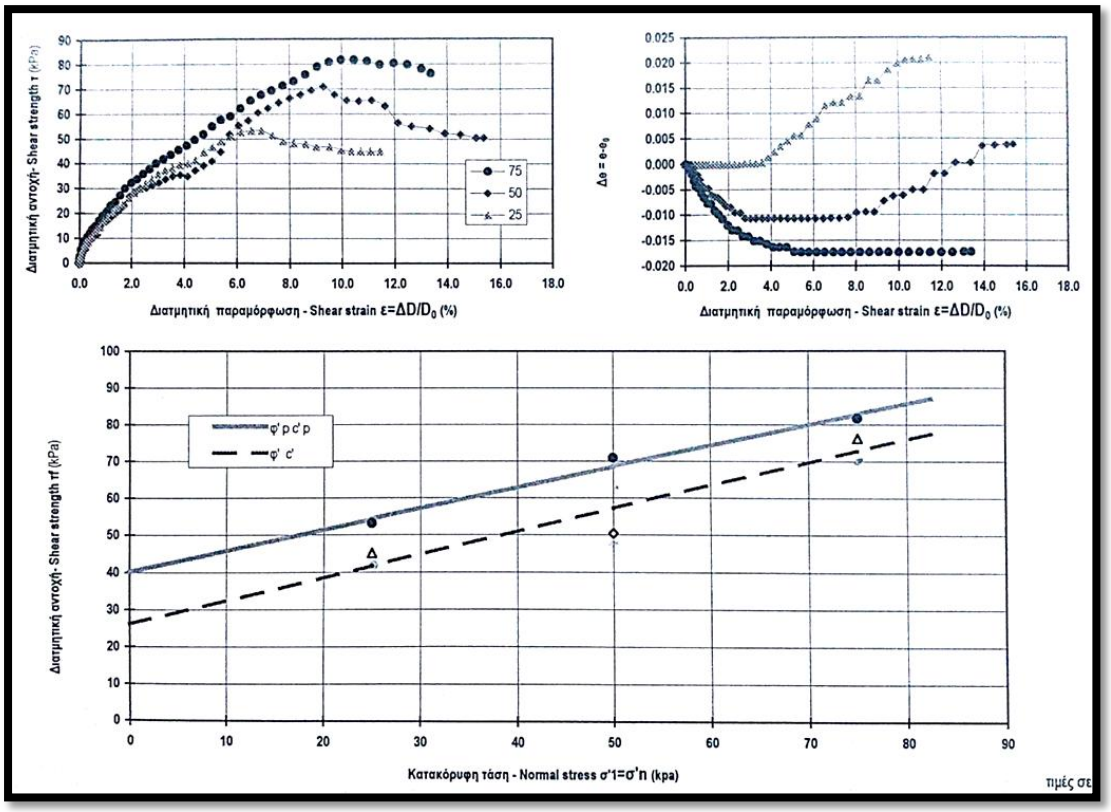
Η προσέγγιση που υιοθετήθηκε για την εργαστηριακή διερεύνηση της διατμητικής αντοχής των υπολειμματικών εδαφών της περιοχής της Ασπροβάλτας βασίστηκε στον αρχικό διαχωρισμό αυτών σε Ενότητες διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης και κατά συνέπεια σχεδιάστηκε διαφορετικό εργαστηριακό πρόγραμμα για καθεμιά από αυτές. Το εργαστηριακό πρόγραμμα για την Ενότητα Β είχε σα στόχο να διερευνήσει την τυχόν επίδραση του παραμένοντος βαθμού συγκόλλησης και της δομής (κυρίως της υφιστάμενης σχιστότητας των γνευσίων της περιοχής) στη διατμητική της αντοχή. Για το αργιλοποιημένο εδαφικό υλικό της Ενότητας C διερευνήθηκε η επίδραση του βαθμού κορεσμού στη διατμητική του αντοχή καθώς και το φαινόμενο της ανισοτροπίας λόγω προσανατολισμού των υφιστάμενων πλακοειδών αργιλικών ορυκτών (αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 3).

Διατμητική αντοχή της Ενότητας Β

Το υλικό της ενότητας Β έχει περιγραφεί και ταξινομηθεί ως μία καλά διαβαθμισμένη άμμος με μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων (SW-SM) όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4.7, το οποίο με την παραμικρή διατάραξη μεταπίπτει επί τόπου σε ένα χαλαρό έδαφος. Η εκτίμηση των χαρακτηριστικών αντοχής του έγινε με εκτέλεση μιας σειράς δοκιμών άμεσης διάτμησης. Το μέγεθος των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαμέτρου 63.5mm, διότι εξαιτίας της κοκκομετρίας του υλικού κρίθηκε ότι δεν απαιτούνταν η χρήση μεγαλύτερου κιβωτίου διάτμησης (Εικόνα 2.5.18). Σε πρώτο στάδιο εκτελέστηκαν δύο δοκιμές με διαφορετικό εύρος εφαρμοζόμενης κάθετης τάσης. Η πρώτη για τιμές σ_n 25, 50 και 75 KPa που εκτελέσθηκε στο εργαστήριο της εταιρίας ΓΕΩΓΝΩΣΗ ΑΕ και η δεύτερη για τιμές σ_n 50, 100 και 200 KPa που εκτελέστηκε στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ.



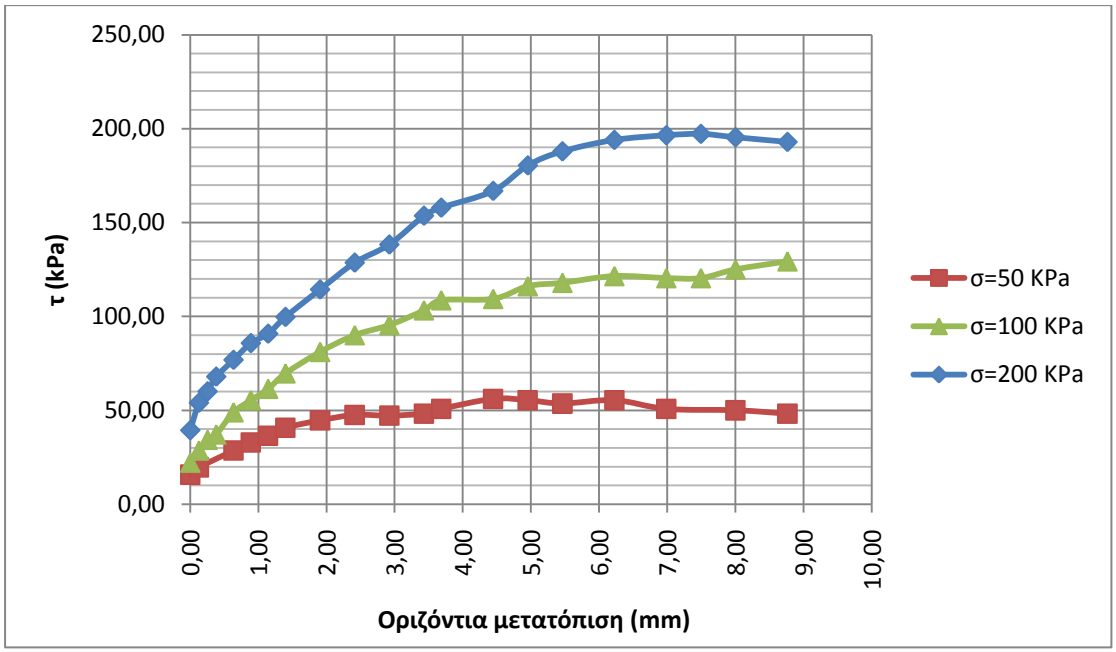
Εικόνα 2.5.18: Συσκευή άμεσης διάτμησης του Τμ. Πολ. Μηχανικών του Α.Π.Θ.

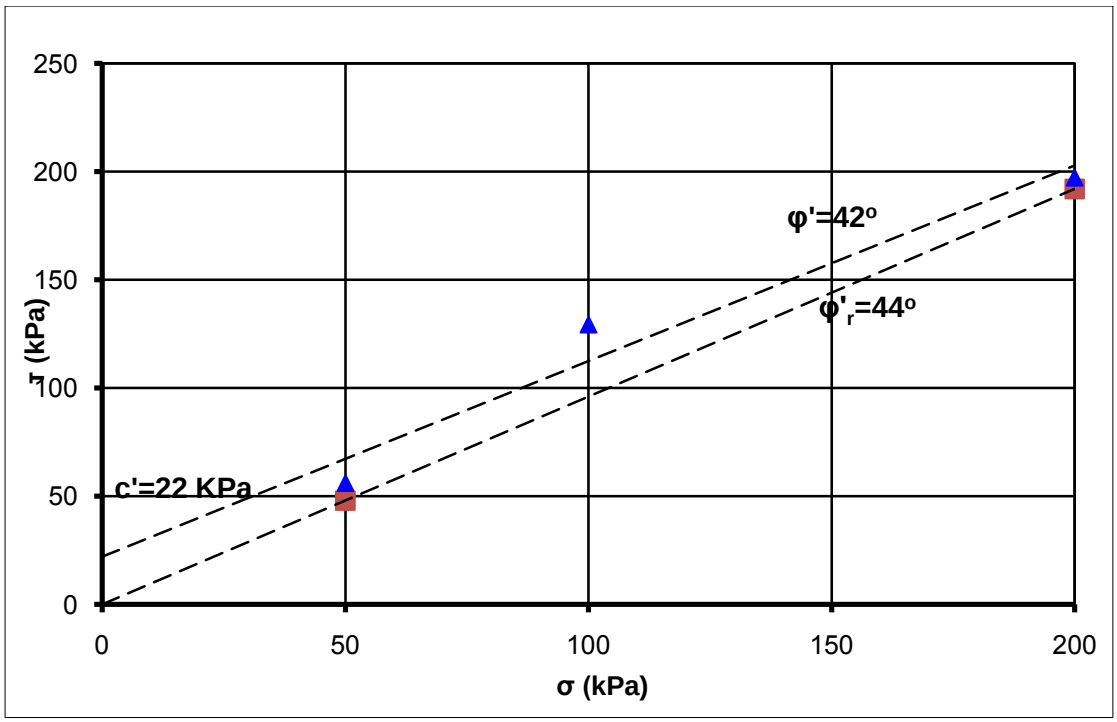


Εικόνα 2.5.19: Δοκιμή άμεσης διάτμησης του υλικού της Ενότητας Β για σ_n 25,50 και 75KPa

Τα αποτελέσματα της πρώτης δοκιμής έδωσαν χαρακτηριστικά αντοχής c'=40 KPa, φ'=30° και c'_r=26 KPa και φ'_r=32° (Εικόνα 2.5.19). Τα αποτελέσματα της δεύτερης δοκιμής έδωσαν χαρακτηριστικά αντοχής c'=22 KPa, φ'=42° και c'_r=0 KPa και φ'_r=44° (Εικόνα 2.5.20). Υπό κανονικές συνθήκες το υλικό αυτό θα έπρεπε να εμφανίζει μηδενική συνοχή. Φαίνεται όμως να διατηρείται μία δομή δεσμών ανάμεσα στους κόκκους του εδάφους, η οποία εκφράζεται με μία σημαντική τιμή συνοχής. Η δομή αυτή καταστρέφεται με αύξηση της εφαρμοζόμενης κάθετης δύναμης κατά τη διάρκεια της δοκιμής και επομένως η δοκιμή θα πρέπει να εκτελείται με μικρές τιμές κάθετης δύναμης, ακριβώς για να προσδιορίζεται ακριβέστερα αυτός ο παράγοντας (Tan & Gue, 2001).

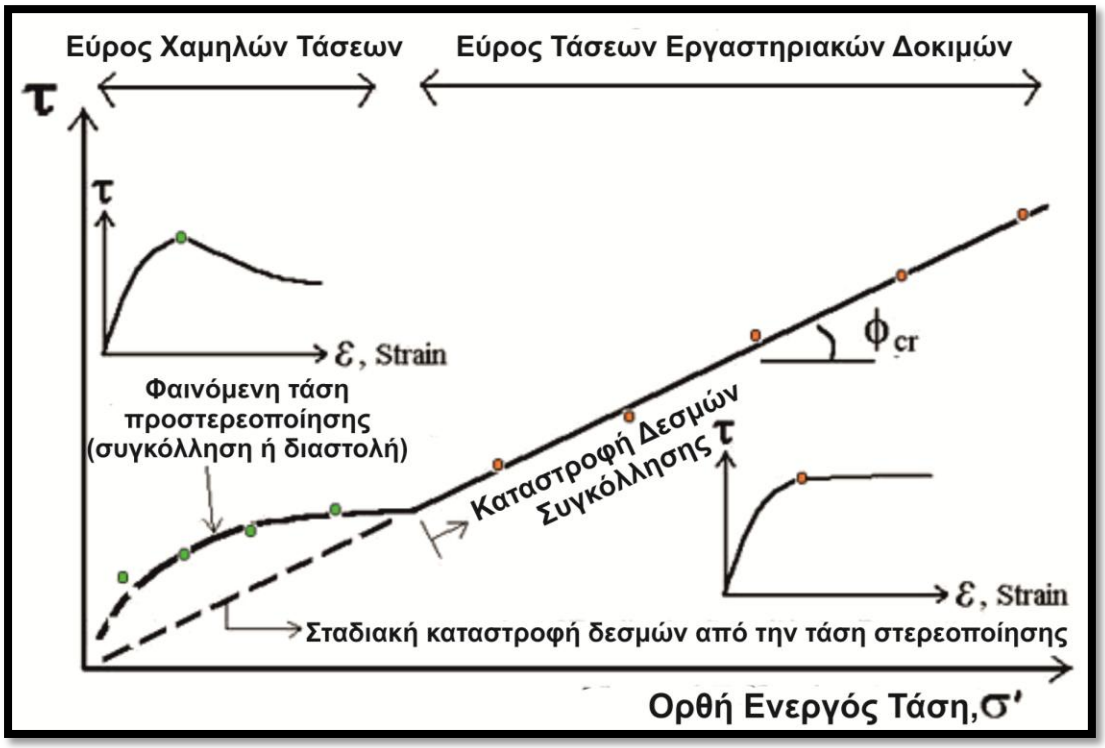
Για το λόγο αυτό η πρώτη δοκιμή δίνει μεγαλύτερη τιμή συνοχής και θεωρείται πως προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική κατάσταση. Εξαιτίας της παρουσίας δεσμών οι οποίοι καταστρέφονται στην πορεία της δοκιμής εμφανίζεται στα αποτελέσματα το εντυπωσιακό φαινόμενο, η τιμή της υπολειμματικής γωνίας τριβής (φ'_r) να είναι μεγαλύτερη αυτής κατά την αστοχία (φ'). Η περιβάλλουσα αστοχίας που υπολογίζεται περιλαμβάνει σημεία πριν και μετά την καταστροφή των υπαρχόντων δεσμών με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται η τιμή της συνοχής και να υποτιμάται αυτή της γωνίας τριβής. Η επίδραση της παρουσίας δεσμών στον υπολογισμό της συνοχής από μία περιβάλλουσα αστοχίας σε συνθήκες αποστράγγισης φαίνεται στην Εικόνα 2.5.21 (Vargas, 1974).





Εικόνα 2.5.20: Δοκιμή άμεσης διάτμησης του υλικού της Ενότητας Β για σ_n 50,100 και 200 kPa

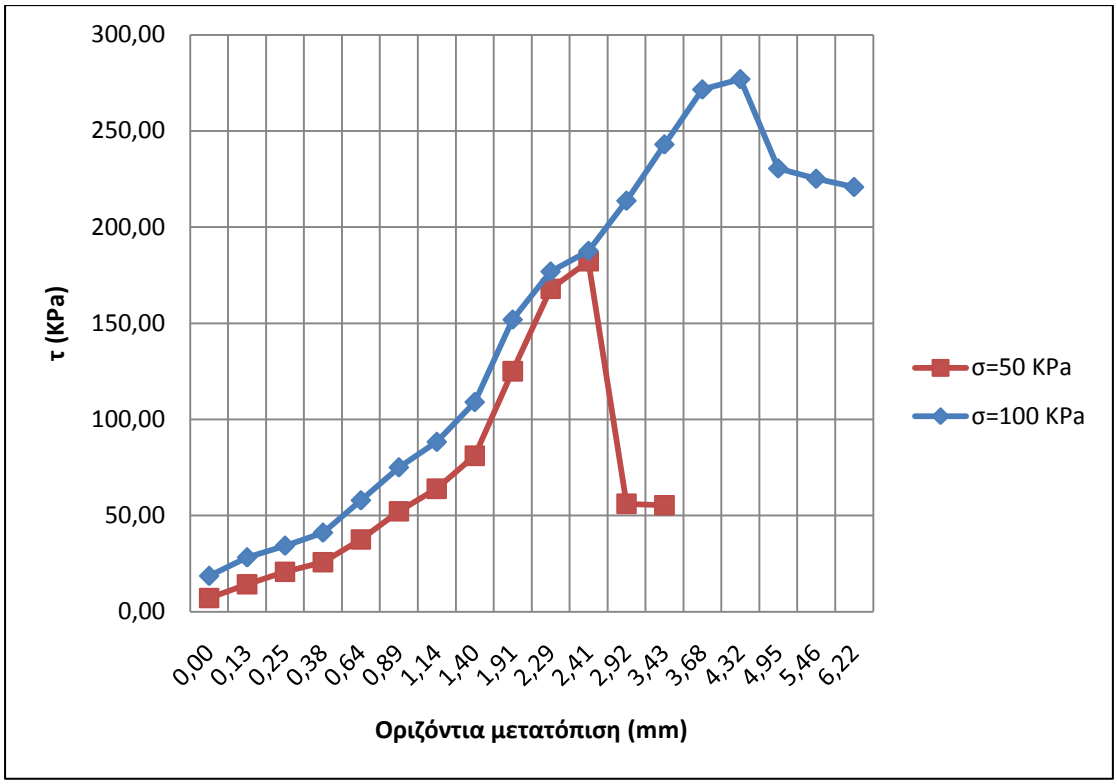
Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο πρέπει να υπάρχει συσχέτιση των επί τόπου συνθηκών με τις εφαρμοζόμενες κάθετες τάσεις κατά την εκτέλεση δοκιμών αντοχής είναι η εξάρτιση που φαίνεται να έχει από αυτές η συμπεριφορά της παραμόρφωσης. Έχει αποδειχθεί ότι για υψηλές τιμές περιοριστικών τάσεων παρατηρείται μόνο συστολή στον όγκο του δείγματος, ενώ όσο αυτές μειώνονται, η κλίση της καμπύλης αναλογίας τάσης (stress ratio)-παραμόρφωσης αυξάνει (Sun, et al., 2004).

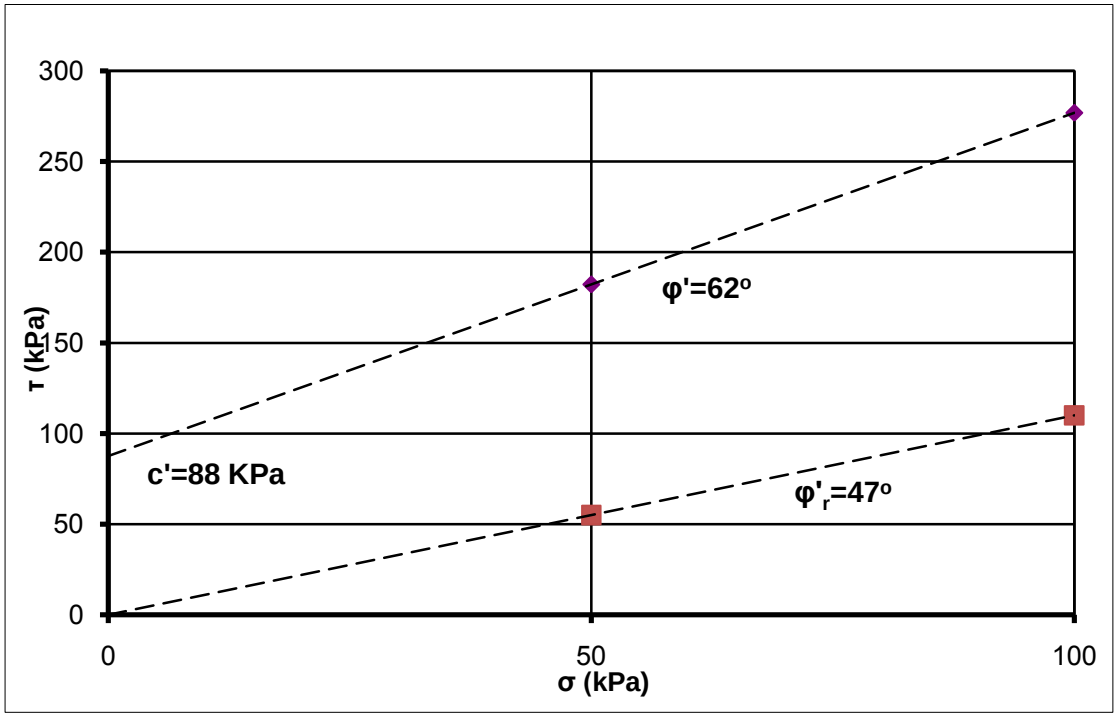


Εικόνα 2.5.21: Επίδραση της ύπαρξης δεσμών στον υπολογισμό της συνοχής από μία περιβάλλουσα αστοχίας σε συνθήκες αποστράγγισης (Vargas, 1974)

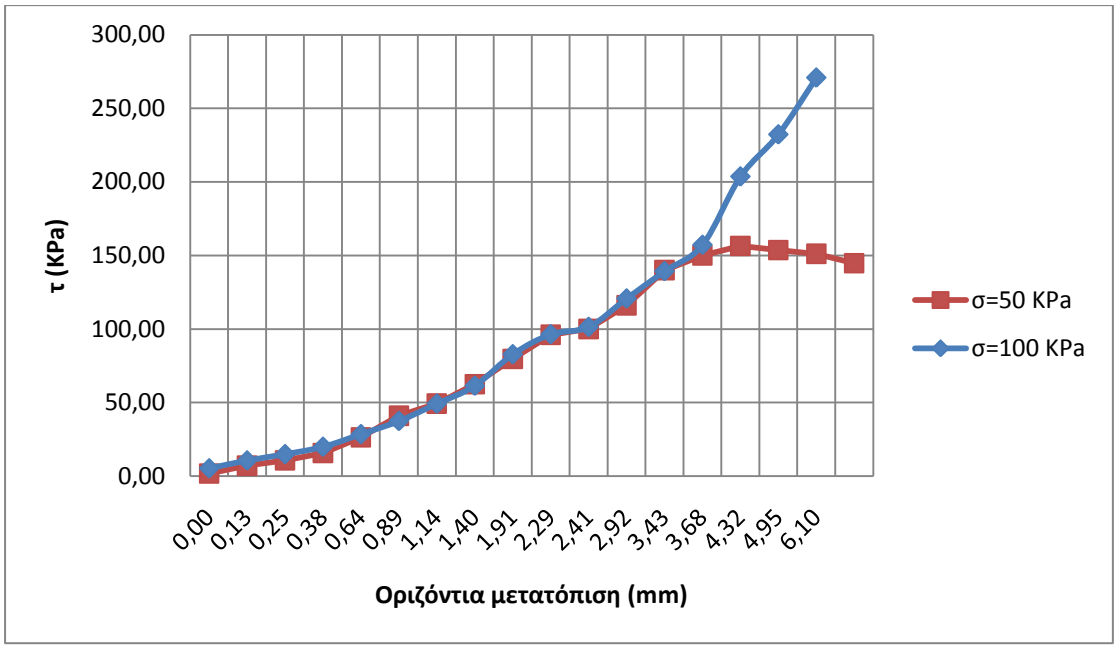
Επιπρόσθετα έγινε προσπάθεια διερεύνησης της επίδρασης της σχιστότητας στη διατμητική αντοχή συνεκτικών δειγμάτων γνευσιακού υλικού μικρότερου βαθμού αποσάθρωσης. Εκτελέστηκε μία δοκιμή άμεσης διάτμησης με τη διεύθυνση σχιστότητας παράλληλη προς τη διεύθυνση διάτμησης (Εικόνα 2.5.22) και μία με τη διεύθυνση σχιστότητας κάθετη προς τη διεύθυνση διάτμησης (Εικόνα 2.5.23). Τα αποτελέσματα αυτά εμφανίζουν ασυνήθιστη μορφή καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης και ιδιαίτερα υψηλές τιμές αντοχής και κρίθηκαν ως μη αξιοποιήσιμα. Κύριος λόγος είναι πιθανότατα η χρήση του μικρού κιβωτίου διάτμησης για τη φύση του υλικού γεγονός που προκάλεσε εκτεταμένα σπασίματα και ανακατανομές των κόκκων κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Επίσης σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν μόνο δύο δείγματα για κάθε δοκιμή διότι δε στάθηκε δυνατή η διαμόρφωση περισσότερων πανομοιότυπων δειγμάτων.

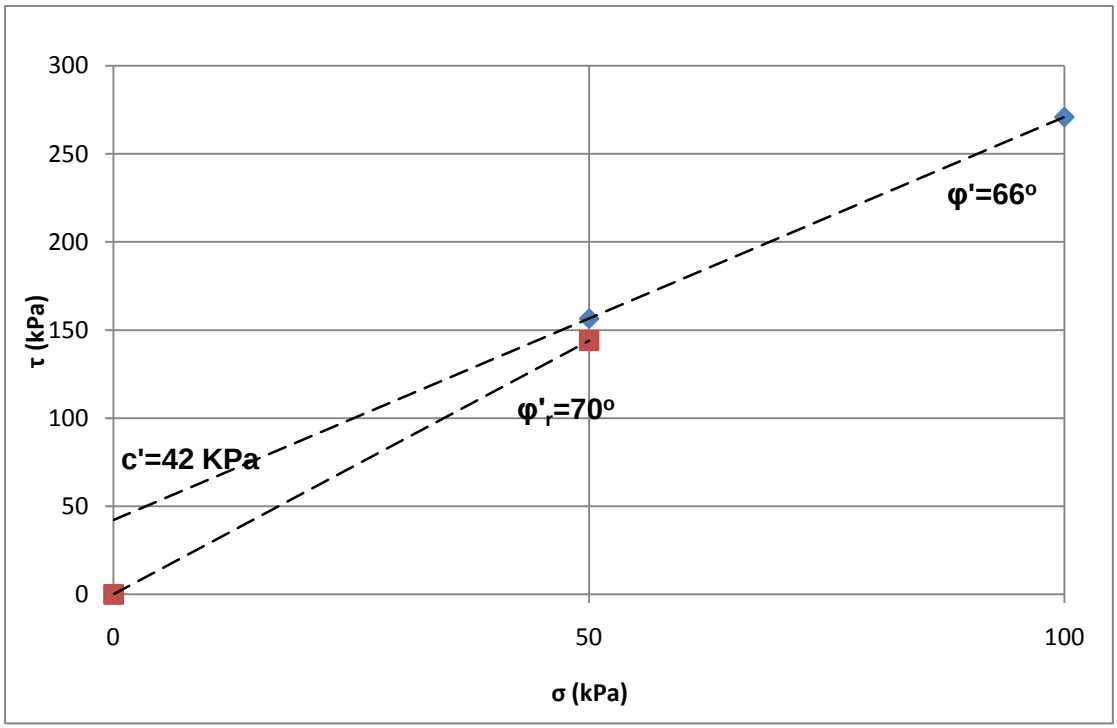
Υπάρχουν, παρόλα αυτά, βιβλιογραφικές αναφορές για την επίδρασης της κληρονομούμενης ανισοτροπίας στη διατμητική αντοχή υπολειμματικών εδαφών. Από αυτές προκύπτει ότι αυτή δεν παίζει καθοριστικό ρόλο, κάτι που ερμηνεύεται με την υπόθεση ότι η επίδρασή της εκμηδενίζεται προοδευτικά κατά τη διαδικασία της διάτμησης. Επίσης σημειώνεται ότι μεγαλύτερη επίδραση μπορεί να έχει η περιστροφή των κυρίων τάσεων, η οποία δημιουργεί μία επιβαλλόμενη ανισοτροπία στην αντοχή (Meng & Chu, 2011).





Εικόνα 2.5.22: Δοκιμή άμεσης διάτμησης του υλικού της Ενότητας Β με σχιστότητα παράλληλη προς τη διεύθυνση διάτμησης





Εικόνα 2.5.23: Δοκιμή άμεσης διάτμησης του υλικού της Ενότητας Β με σχιστότητα κάθετη προς τη διεύθυνση διάτμησης

Επιχειρήθηκε εναλλακτικά, η εκτέλεση δοκιμών σημειακής φόρτισης για τα παραπάνω δείγματα με την ίδια ακριβώς λογική, οι δύο πρώτες κάθετα προς τη διεύθυνση της σχιστότητας και η τρίτη παράλληλα ως προς αυτήν (Εικόνα 2.5.24). Τα αποτελέσματά τους κατατάσσουν το υλικό και στις δύο περιπτώσεις ως πολύ μικρής αντοχής με τιμές για τις οποίες δεν συνιστάται η συγκεκριμένη δοκιμή (Πίνακας 2.5.4).

Εικόνα 2.5.24: Δείγματα δοκιμών σημειακής φόρτισης

Πίνακας 2.5.4: Αποτελέσματα δοκιμών σημειακής φόρτισης του υλικού της Ενότητας Β

					θα πρέπει L>D	
Στοιχεία Δοκιμίου						
1. Πάχος D_e	55,5	mm		Μήκος L	131	mm
2. Πάχος D_e	40	mm		Μήκος L	122	mm
3. Πάχος D_e	48,6	mm		Μήκος L	73,7	mm

Δοκιμή	Φορτίο θραύσης P (KN)	Συντελ. Διόρθωσης F	I_s (Mpa)	$I_{s(50)}$ (Mpa)	Μονοαξονική αντοχή σ_c (Mpa)	Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t (Gpa)
1	3,8	1,048	0,340	0,357	7,846	2,841
2	3	0,904	0,565	0,511	11,248	4,164
3	2,5	0,987	0,418	0,413	9,079	3,298
Μ.Ο				0,427	9,391	3,434

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

$I_s = P/De^2$

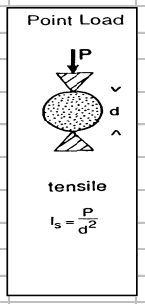
$I_{s(50)} = F \cdot Is$, όπου $F = (De/50)^{0.45}$

Τα σ_c και E_t υπολογίζονται βάσει του $I_{s(50)}$

$\sigma_c = 22 \cdot I_{s(50)}$

$E_t = (0.588 \cdot I_s + 0.084) \cdot 10^4$

Χαρακτηρισμός αντοχής: Πολύ χαμηλής αντοχής



Χαρακτηρισμός αντοχής	$I_{s(50)}$
Πολύ υψηλής αντοχής	> 8
Υψηλής αντοχής	4-8
Μέσης αντοχής	2-4
Χαμηλής αντοχής	1-2
Πολύ χαμηλής αντοχής	Δε συνιστάται η δοκιμή

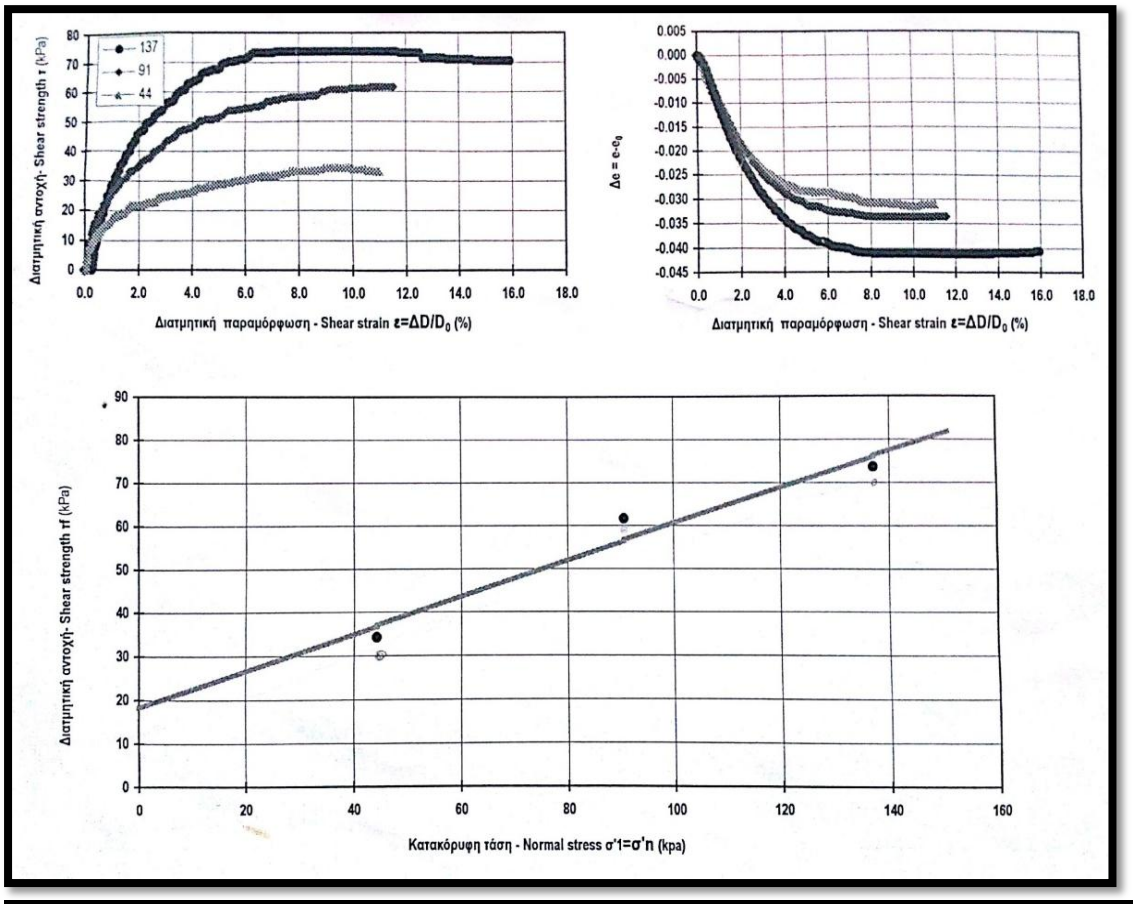
Αντοχή υπολειμματικών εδαφών της Ενότητας C

Το υπολειμματικό έδαφος της Ενότητας C είναι ένα πλήρως αποσαθρωμένο, αργιλοποιημένο εδαφικό υλικό με παρουσία πλακοειδών και πολύ ενεργών αργιλικών ορυκτών, υψηλή πλαστικότητα και μεγάλο δείκτη πόρων, γεγονός που υποδηλώνει "ανοικτή" δομή, όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Η διατμητική αντοχή του υλικού αυτής της Ενότητας καθορίζει τη συνολική μηχανική συμπεριφορά των ορυγμάτων της Ασπροβάλτας και για το λόγο αυτό σχεδιάσθηκε το παρακάτω, αναλυτικό πρόγραμμα εργαστηριακής έρευνας:

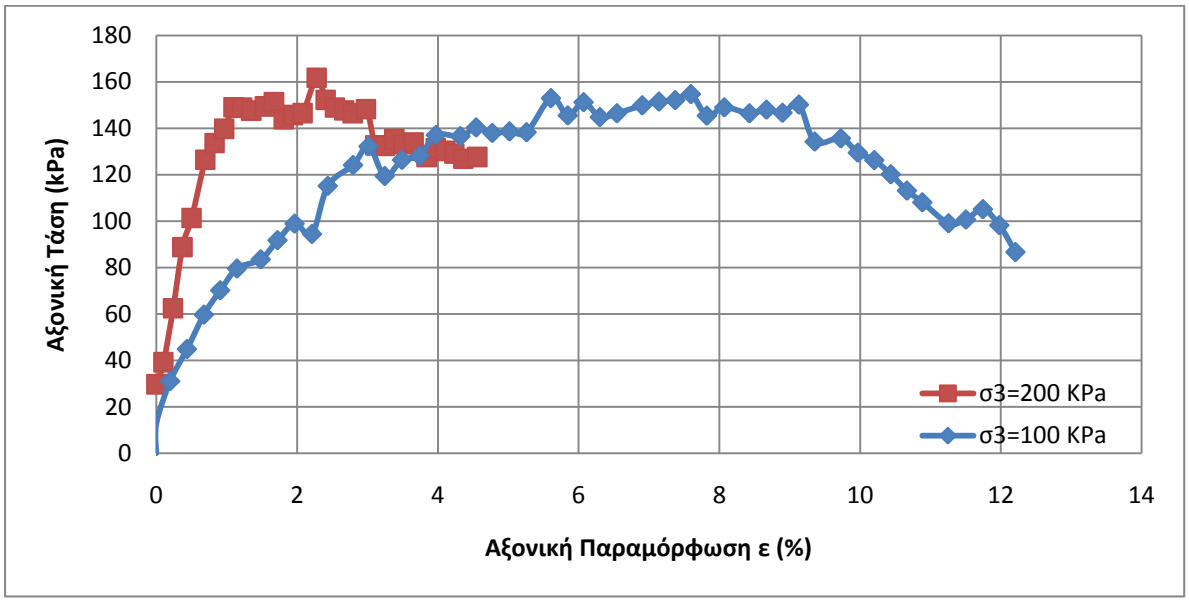
- Δοκιμές αντοχής στερεοποιημένων δειγμάτων με αποστράγγιση, CD (ASTM D3080/90) για τον προσδιορισμό των c' και φ' σε αδιατάρακτα δείγματα
- Δοκιμές αστράγγιστης αντοχής σε μη στερεοποιημένα αδιατάρακτα δείγματα, UU για να προσδιοριστεί η αστράγγιστη αντοχή του υλικού και να εντοπισθούν τυχόν επιφάνειες υπολειμματικής δομής με μειωμένη αντοχή
- Δοκιμές CD 4D, με πολύ αργή ταχύτητα διάτμησης και ελεγχόμενο βαθμό κορεσμού κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε αναζυμωμένα δείγματα, για να διασαφηνισθεί η ποσοτική επίδραση του βαθμού κορεσμού στον παράγοντα της συνοχής και να ερευνηθεί η ανισοτροπία του υλικού λόγω προσανατολισμού των υφιστάμενων πλακοειδών αργιλικών ορυκτών. Τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων δοκιμών παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Οι αρχικές δοκιμές CD διεξήχθησαν στο εργαστήριο της εταιρίας ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε. και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.5.25 με χαρακτηριστικά αντοχής c'=18 kPa και $\varphi'=23^o$.

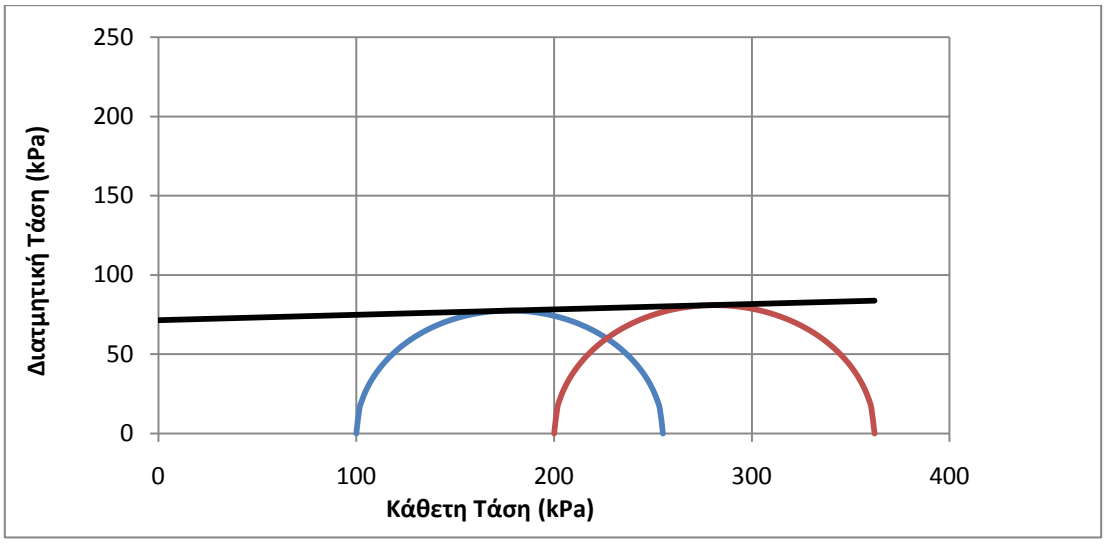
Οι δοκιμές UU διεξήχθησαν για τιμές κύριας οριζόντιας τάσης σ_3= 100, 150 και 200 kPa αντίστοιχα. Το πρώτο και το τρίτο δείγμα έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.5.26. Η αστράγγιστη αντοχή είναι ανεξάρτητη της πλευρικής πίεσης σ_3 για περιπτώσεις μη παρουσίας ασθενών ζωνών και η περιβάλλουσα αστοχίας σε επίπεδο ολικών τάσεων είναι φυσιολογικά σχεδόν οριζόντια (Εικόνα 2.5.27). Υπολογίστηκαν C_u=72 kPa και $\varphi_u=2^o$. Στην ανάλυση δεν συνυπολογίστηκε το αποτέλεσμα της δεύτερης δοκιμής, όπου αμέσως μετά την επιβολή φορτίου αποκαλύφθηκε προϋπάρχουσα ασθενής ζώνη κατά μήκος της οποίας προκλήθηκε αστοχία με C_u=22,5 kPa (Εικόνα 2.5.28). Η εν λόγω υπολειμματική δομή φαίνεται στην Εικόνα 2.5.29.



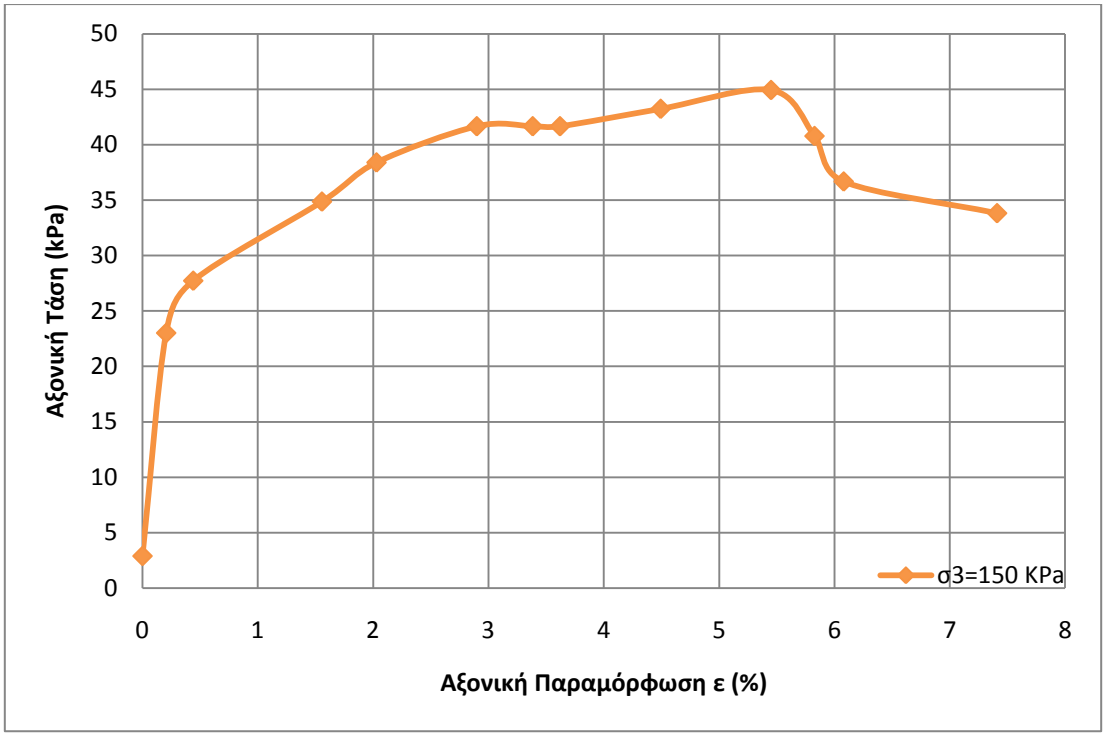
Εικόνα 2.5.25: Δοκιμή άμεσης διάτμησης του υλικού της Ενότητας C για σ_n 44,91 και 137 kPa



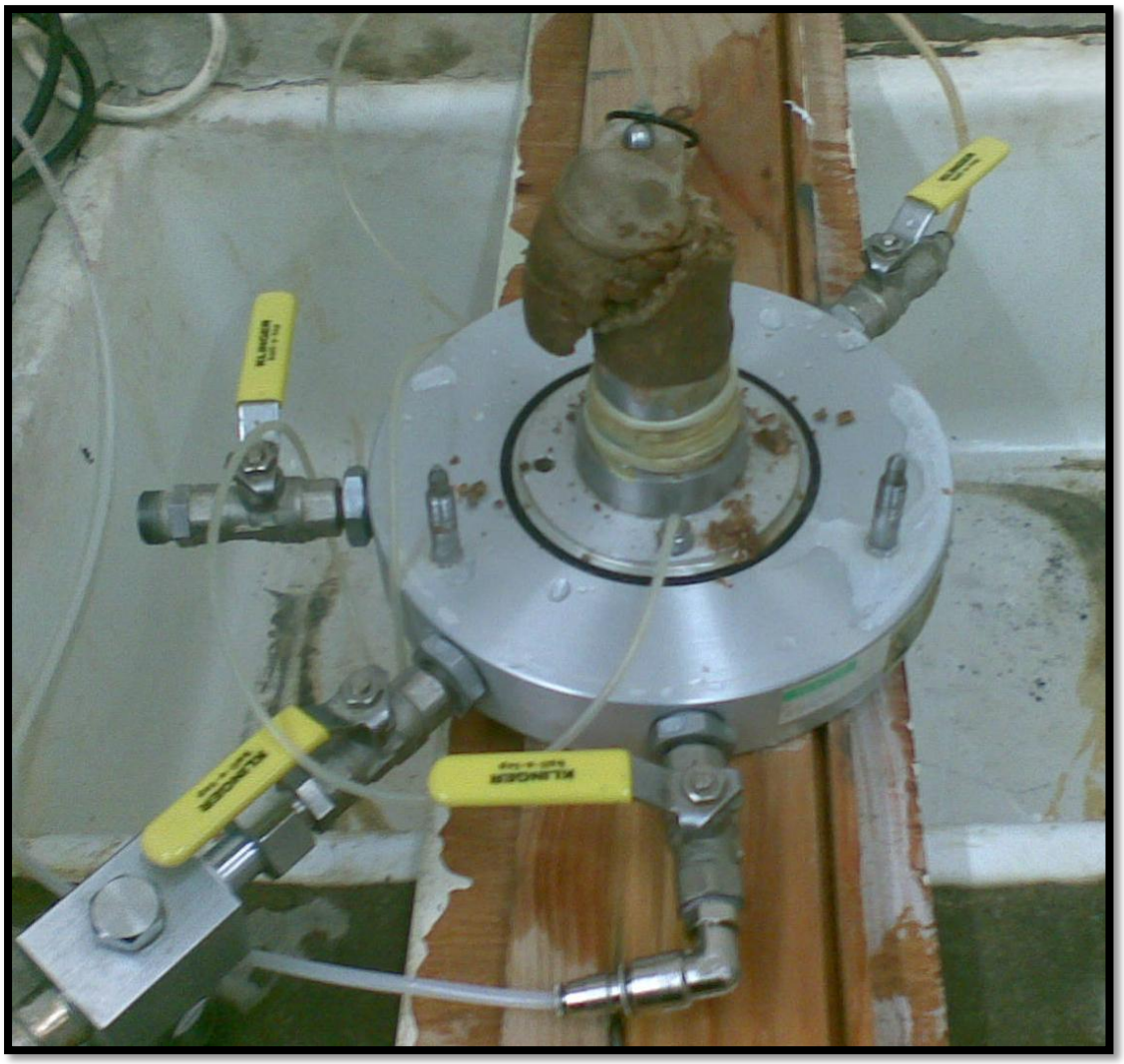
Εικόνα 2.5.26: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμών UU του υλικού της Ενότητας C



Εικόνα 2.5.27: Περιβάλλουσα αστοχίας δοκιμών UU του υλικού της Ενότητας C, C_u=72 kPa, φ_u=2°



Εικόνα 2.5.28: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής UU του υλικού της Ενότητας C με αστοχία προϋπάρχουσας ζώνης αδυναμίας, C_u=22,5 kPa



Εικόνα 2.5.29: Αστοχία προϋπάρχουσας ασθενούς ζώνης

Κεφάλαιο 3

Μηχανική των μερικώς κορεσμένων εδαφών

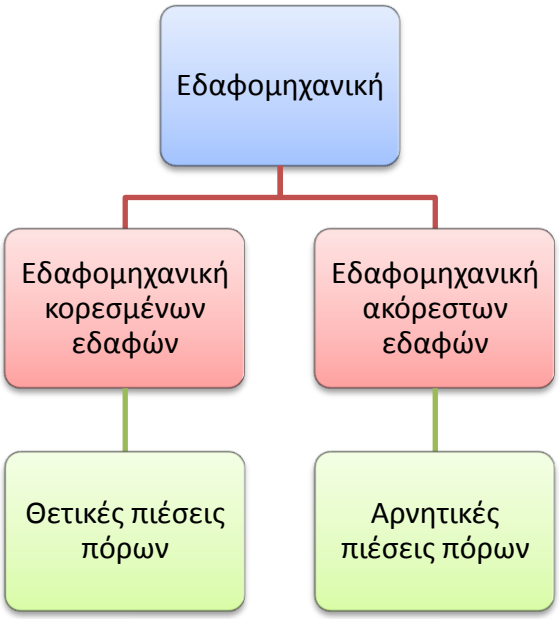
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μηχανική των εδαφών περιλαμβάνει ένα συνδυασμό προσομοιωμάτων μηχανικής συμπεριφοράς και χαρακτηριστικών παραμέτρων των εδαφών, με τον οποίο περιγράφεται ένα μεγάλο εύρος εδαφικών τύπων. Τα εδάφη αυτά μπορούν να είναι κορεσμένα είτε με νερό, είτε να έχουν άλλα ρευστά στα κενά τους (π.χ. αέρα). Η ανάπτυξη της κλασσικής εδαφομηχανικής έδωσε έμφαση στην έρευνα συγκεκριμένων τύπων εδάφους και ειδικότερα σε κορεσμένες άμμους, ιλύες και αργίλους, καθώς επίσης και σε ξηρές άμμους. Τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται αντιληπτό, πως πρέπει να δοθεί προσοχή σε ένα ευρύτερο φάσμα γεωυλικών, των οποίων η συμπεριφορά δε συμβαδίζει πάντα με τις βασικές αρχές και έννοιες της κλασσικής εδαφομηχανικής των κορεσμένων εδαφών. Το γεγονός αυτό πιστοποιείται από τον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό ερευνητικών συνεδρίων με θεματολογία προσανατολισμένη σε ειδικούς τύπους εδαφών και στα γεωτεχνικά προβλήματα με τα οποία αυτά σχετίζονται.

Η μεγαλύτερη ομάδα εδαφών που δεν ακολουθεί τη συμπεριφορά των εδαφών όπως αυτή περιγράφεται από την κλασσική εδαφομηχανική, είναι τα ακόρεστα ή μερικώς κορεσμένα εδάφη. Η εδαφομηχανική επομένως, ως γενικό πεδίο έρευνας μπορεί να χωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες. Την εδαφομηχανική κορεσμένων εδαφών και την εδαφομηχανική ακόρεστων ή μερικώς κορεσμένων εδαφών. Η διαφοροποίησή αυτών των δύο κατηγοριών εδάφους είναι αναγκαία, εξαιτίας των βασικών διαφορών τους στη φύση, αλλά και στη μηχανική τους συμπεριφορά. Τα ακόρεστα εδάφη έχουν περισσότερες από δύο φάσεις και η πίεση των πόρων τους είναι αρνητική σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση (Εικόνα 3.1.1). Η ορολογία ακόρεστο και κορεσμένο έδαφος υποδηλώνει πως το βασικό κριτήριο διαχωρισμού των δύο επιμέρους κατηγοριών των εδαφών είναι ο βαθμός κορεσμού, γεγονός που είναι βέβαια αληθές, από την άλλη όμως αυτός είναι δύσκολο να μετρηθεί όπως επίσης και να ορισθεί κάποιο διακριτό όριο. Για το λόγο αυτό ως δείκτης ταξινόμησης χρησιμοποιείται η κατάσταση των τάσεων στην υγρή φάση του εδάφους. Κάθε έδαφος με αρνητική πίεση πόρων θεωρείται αντικείμενο της μηχανικής ακόρεστων εδαφών. Παράλληλα φαίνεται πως η ανάγκη θεώρησης της εδαφομηχανικής σε ένα ευρύτερο πλαίσιο ώστε να περιγραφούν και τα ακόρεστα εδάφη, οδήγησε στην ανάπτυξη ενός θεωρητικού υποβάθρου με βάση το οποίο μπορούν να περιγραφούν τα κορεσμένα εδάφη ως υποομάδα ή ειδική κατηγορία των ακόρεστων εδαφών.

Ένα ακόρεστο έδαφος περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο τρεις φάσεις, τη στερεή, την υγρή και την αέρια φάση, ενώ έχει αναγνωριστεί και μία τέταρτη, αυτή της διεπαφής υγρής-αέριας φάσης που αναφέρεται διεθνώς ως *contractile skin* (Fredlund

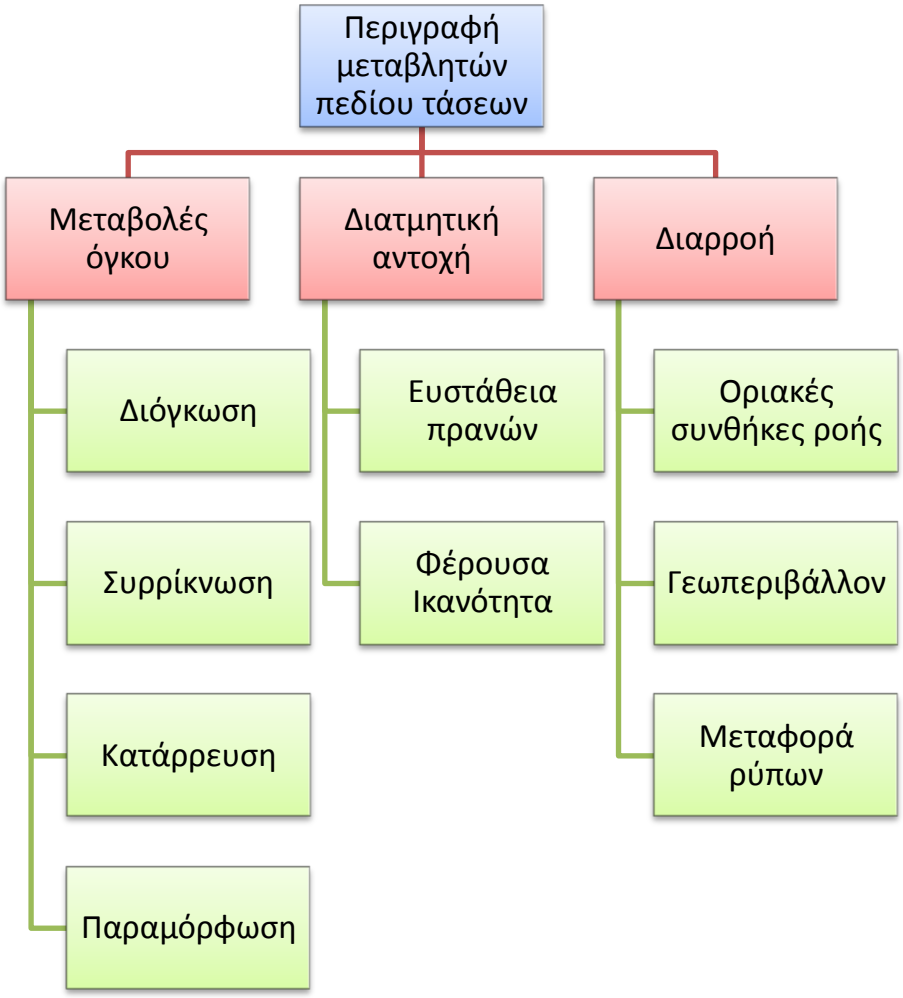
& Morgenstern, 1977). Η παρουσία έστω και της μικρότερης ποσότητας αέρα μέσα σε ένα έδαφος το καθιστά ακόρεστο και αυτό γιατί η ελάχιστη ποσότητα αέρα που υπάρχει συνήθως με τη μορφή φυσαλίδων καθιστά το ρευστό των πόρων συμπιεστό. Η αέρια φάση γίνεται συνεχής στο ακόρεστο έδαφος για μεγαλύτερες ποσότητες αέρα και την ίδια στιγμή, η πίεση του αέρα των πόρων και η πίεση του νερού των πόρων αρχίζουν να διαφοροποιούνται σημαντικά.



Εικόνα 3.1.1: Γενική κατηγοριοποίηση της Εδαφομηχανικής με βάση τις συνθήκες τάσης στο νερό των πόρων

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ακόρεστων εδαφών είναι οι διογκούμενες άργιλοι, τα επιδεκτικά σε κατάρρευση εδάφη και τα υπολειμματικά εδάφη. Αυτά αναφέρονται και ως "προβληματικά εδάφη" και έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό την ύπαρξη αρνητικών πιέσεων στο νερό των πόρων, γεγονός το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά τους και καθιστά δύσκολη την εργαστηριακή διερεύνησή τους. Γίνεται αντιληπτό πως είναι αναγκαία η κατανόηση της ακόρεστης συμπεριφοράς των παραπάνω εδαφών, καθώς αυτά εμφανίζονται πολύ συχνά στα επιφανειακά εδαφικά στρώματα, σε περιοχές με εύκρατο ή ημιεύκρατο κλίμα και σχετίζονται με πολλές αστοχίες τεχνικών έργων.

Μία άλλη κατηγοριοποίηση της μηχανικής των ακόρεστων εδαφών μπορεί να γίνει με βάση το μηχανικό πρόβλημα που διερευνάται. Στην παρούσα διατριβή αναφέρονται οι μεταβλητές του πεδίου των τάσεων που περιγράφουν προβλήματα διατμητικής αντοχής και μεταβολών όγκου (Εικόνα 3.1.2). Αναφέρονται τα θέματα των διογκώσεων, καταρρεύσεων και ευστάθειας πρανών που συναντώνται ευρέως στα υπολειμματικά εδάφη και τα οποία είναι αναγκαίο για τον ορθό γεωτεχνικό σχεδιασμό, να αναλυθούν με μεταβλητές της μηχανικής των ακόρεστων εδαφών.



Εικόνα 3.1.2: Κατηγοριοποίηση της μηχανικής των ακόρεστων εδαφών με βάση τα προβλήματα μηχανικής συμπεριφοράς

3.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

3.2.1 ΟΙ ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΚΟΡΕΣΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ένα ακόρεστο έδαφος είναι ένα μείγμα πολλών φάσεων και είναι σημαντικό να καθορίσουμε τον αριθμό των φάσεων που συμμετέχουν σε αυτό, διότι αυτός καθορίζει τον τρόπο που ορίζεται το καθεστώς των τάσεων αυτού του μίγματος. Για να μπορέσει μία ποσότητα ενός μείγματος να ορισθεί ως ανεξάρτητη φάση θα πρέπει να έχει διαφορετικές ιδιότητες από τα συνεχόμενα υλικά και καθορισμένες επιφάνειες οριοθέτησης. Οι παραπάνω δύο συνθήκες πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα για να αναγνωριστεί μία ανεξάρτητη φάση. Επομένως, ένα κορεσμένο έδαφος αποτελείται από δύο φάσεις, τη στερεά φάση του εδάφους και την υγρή του νερού, και ο αέρας σε ένα ακόρεστο έδαφος αποτελεί μία τρίτη ανεξάρτητη φάση. Είναι πιθανό μία φάση να αλλάξει κατάσταση, όπως για παράδειγμα να παγώσει το νερό. Ο πάγος σε αυτήν την περίπτωση γίνεται μία φάση ανεξάρτητη από την υγρή του νερού. Παρόλα αυτά, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την Εδαφομηχανική βρίσκεται στην εξέταση της έκτασης και των ιδιοτήτων της διεπαφής αέρα-νερού (Fredlund & Rahardjo, 1993).

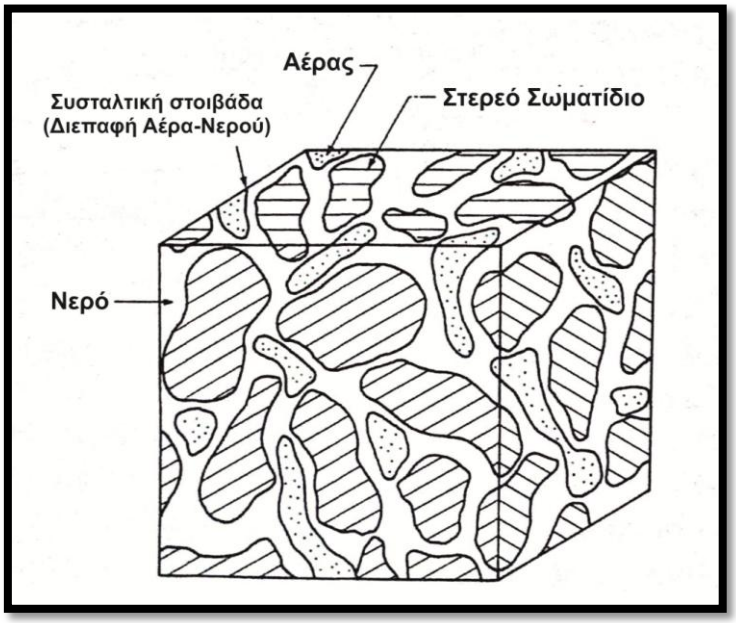
Η διεπαφή αέρα-νερού αναφέρεται διεθνώς ως "contractile skin" και στα Ελληνικά θα μπορούσε να αποδοθεί ως συσταλτική στοιβάδα. Η πιο χαρακτηριστική ιδιότητά της είναι ότι συμπεριφέρεται σα μία μεμβράνη σε εφελκυστική εντατική κατάσταση σε όλη την έκταση της εδαφικής δομής. Φαίνεται πως οι ιδιότητές της είναι διαφορετικές από αυτές της συνεχούς υγρής φάσης. Η πυκνότητά της είναι μειωμένη και η θερμική της αγωγιμότητα αυξημένη (Davies & Rideal, 1963). Έχει επίσης αποδειχτεί πως η μετάβαση από το νερό της υγρής φάσης στη συσταλτική στοιβάδα είναι διακριτή (Derjaguin, 1965).

Για τη διεξαγωγή της ανάλυσης των τάσεων, το ακόρεστο έδαφος θεωρείται ως ένα σύστημα τεσσάρων φάσεων (Fredlund & Morgenstern, 1977). Από τις τέσσερις φάσεις θεωρείται ότι οι δύο (στερεή φάση και συσταλτική στοιβάδα) έρχονται σε κατάσταση ισορροπίας κάτω από την εφαρμοζόμενη τάση και οι άλλες δύο (υγρή και αέρια φάση) βρίσκονται σε κατάσταση ροής. Αναφορικά με τη σχέση μάζας-όγκου σε ένα ακόρεστο έδαφος, αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα τριών φάσεων διότι ο όγκος της συσταλτικής στοιβάδας είναι μικρός και η μάζα της μπορεί να θεωρηθεί σαν μέρος της μάζας του νερού. Παρόλα αυτά, κατά την ανάλυση των τάσεων ενός πολυφασικού συνεχούς μέσου, η διεπαφή αέρα-νερού συμπεριφέρεται ως μία ανεξάρτητη φάση.

Ένα χαρακτηριστικό πείραμα που επισημαίνει την επίδραση της συσταλτικής στοιβάδας είναι η ελεύθερη ξήρανση ενός μικρού δείγματος εδάφους στον ατμοσφαιρικό αέρα. Ενώ η ολική τάση στο δείγμα παραμένει αμετάβλητη στο μηδέν, ο όγκος του δείγματος μειώνεται. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η πίεση των πόρων παίρνει υψηλές αρνητικές τιμές, η συσταλτική στοιβάδα όμως συμπεριφέρεται ως μία λεπτή ελαστική μεμβράνη, μέσα στο επίπεδο της οποίας τα εδαφικά σωματίδια έλκονται μεταξύ τους.

3.2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΚΟΡΕΣΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ένα ακόρεστο έδαφος αναφερόταν συνήθως ως ένα σύστημα τριών φάσεων. Τα τελευταία χρόνια όμως έχει αποδειχθεί η σημαντική επίδραση της διεπαφής αέρα-νερού στους φυσικούς μηχανισμούς και έχει καθιερωθεί η συσταλτική στοιβάδα ως μία τέταρτη ανεξάρτητη φάση του ακόρεστου εδάφους. Όταν η αέρια φάση είναι συνεχής, τότε η συσταλτική στοιβάδα αλληλεπιδρά με τα εδαφικά σωματίδια και επιδρά στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους. Το μοντέλο ενός στοιχείου μοναδιαίου όγκου ακόρεστου εδάφους με συνεχή αέρια φάση φαίνεται στην Εικόνα 3.2.1.Όταν η αέρια φάση αποτελείται από εγκλωβισμένες φυσαλίδες, τότε το ρευστό γίνεται έντονα συμπιεστό.



Εικόνα 3.2.1: Στοιχείο ακόρεστου εδάφους με εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα

Η μάζα και ο όγκος της κάθε φάσης παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.2.2. Το πάχος της συσταλτικής στοιβάδας είναι της τάξης μερικών μοριακών στρωμάτων και γι' αυτό δε θεωρείται απαραίτητος ο φυσικός διαχωρισμός της για τον καθορισμό των σχέσεων όγκου-μάζας ενός ακόρεστου εδάφους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα απλοποιημένο τριφασικό διάγραμμα με τη συσταλτική στοιβάδα να συμπεριλαμβάνεται στη φάση του νερού.

Ο αέρας συμπεριφέρεται σα μία μείξη αερίων και υδρατμών. Η μείξη διαχωρίζεται σε ξηρό και υγρό αέρα ανάλογα με την παρουσία ή όχι υδρατμών. Ο ξηρός και ο υγρός αέρας θεωρείται ότι συμπεριφέρονται ως ιδανικά αέρια κάτω από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που συναντώνται στην κλασική μηχανική. Η συγκέντρωση των υδρατμών στον αέρα εκφράζεται ως σχετική υγρασία:

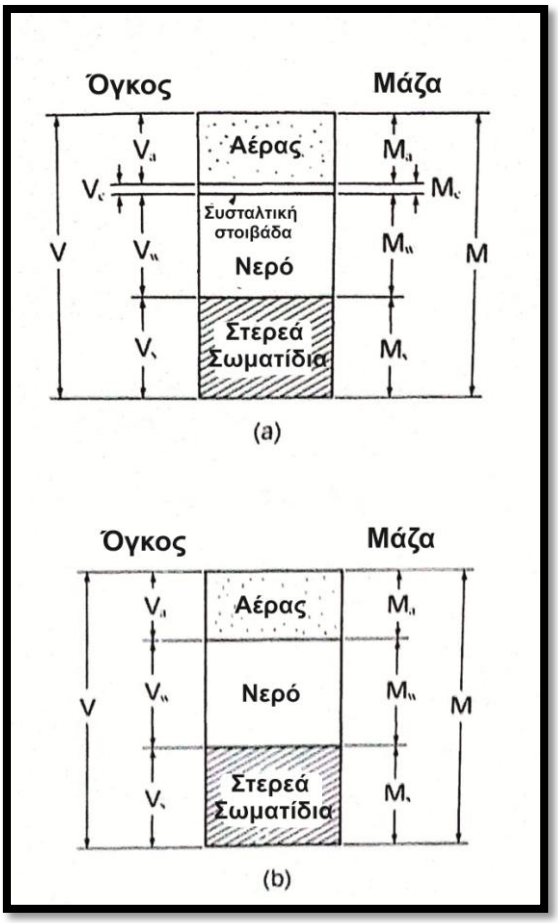
$$\boldsymbol{RH} = \frac{\overline{u}_v(100)}{\overline{u}_{v0}}, \text{ (1)}$$

όπου:

RH = σχετική υγρασία (%)
$\overline{u}_v$ = μερική πίεση υδρατμών στον αέρα (kPa)
$\overline{u}_{v0}$ = κορεσμένη πίεση υδρατμών στον αέρα (kPa)

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πυκνότητα του αέρα μειώνεται με την αύξηση της σχετικής υγρασίας και επομένως ο υγρός αέρας είναι ελαφρύτερος από τον ξηρό.

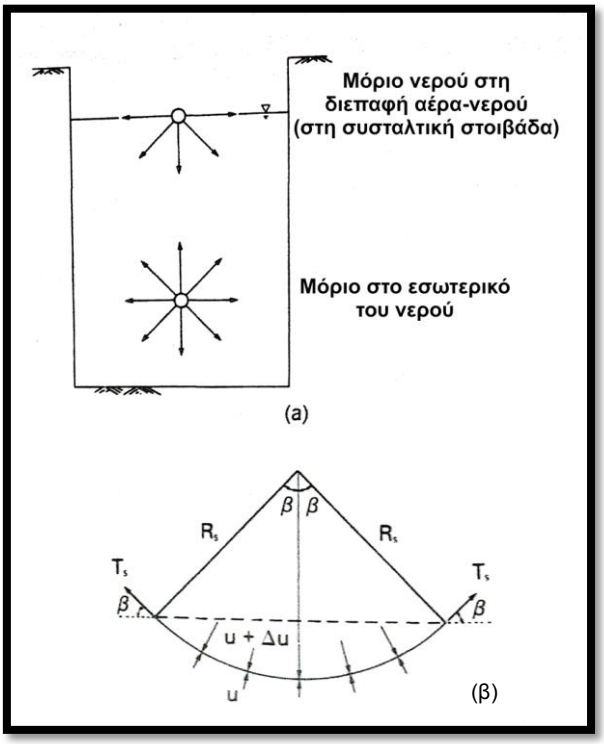
Επιπρόσθετα, όλα τα ρευστά αντιστέκονται στη διάτμηση. Η αντίσταση αυτή εκφράζεται με την ιδιότητα του ιξώδους. Απόλυτο (δυναμικό) ιξώδες, *μ*, ενός ρευστού ονομάζεται η αντίσταση του ρευστού σε μία διατμητική τάση που αναπτύσσεται κατά την ολίσθηση δύο πλακών με το ρευστό να βρίσκεται ανάμεσά τους. Η τιμή του ιξώδους εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία. Τα υγρά εμφανίζουν μείωση της τιμής του ιξώδους με αύξηση της θερμοκρασίας και τα αέρια αντίστοιχα αύξηση. Η επίδραση της πίεσης είναι μηδαμινή στο ιξώδες των ρευστών για το εύρος των πιέσεων που συναντάται στις εφαρμογές γεωτεχνικών προβλημάτων (Fredlund & Rahardjo, 1993).



Εικόνα 3.2.2: α) Διάγραμμα συστήματος ακόρεστου εδάφους τεσσάρων φάσεων, β) Απλοποιημένο διάγραμμα τριών φάσεων

Μία σημαντική ιδιότητα της διεπαφής αέρα-νερού είναι η επιφανειακή έλξη ή επιφανειακή τάση. Το φαινόμενο είναι αποτέλεσμα των ενδομοριακών δυνάμεων που ασκούνται στα μόρια της συσταλτικής στοιβάδας. Οι δυνάμεις αυτές διαφέρουν από

αυτές που δρουν ανάμεσα στα μόρια στο εσωτερικό της φάσης του νερού (Εικόνα 3.2.3). Ένα μόριο στο εσωτερικό του νερού ασκεί ίσες δυνάμεις προς όλες τις κατευθύνσεις με αποτέλεσμα να αλληλοαναιρούνται οι δυνάμεις σε κατάσταση ισορροπίας. Τα μόρια της συσταλτικής στοιβάδας δέχονται δυνάμεις προς το εσωτερικό του νερού και για να επέλθει ισορροπία προκαλείται εφελκυσμός της. Η ιδιότητα αυτή της συσταλτικής στοιβάδας ονομάζεται επιφανειακή έλξη T_s και μετριέται σε μονάδες εφελκυστικής δύναμης ανά μέτρο μήκους της συσταλτικής στοιβάδας (N/m). Η T_s εφάπτεται στην επιφάνεια της συσταλτικής στοιβάδας και την κάνει να συμπεριφέρεται σα μία ελαστική μεμβράνη. Η συμπεριφορά αυτή είναι ίδια με αυτήν ενός φουσκωμένου μπαλονιού, το οποίο έχει μεγαλύτερη πίεση εσωτερικά από ότι εξωτερικά.



Εικόνα 3.2.3: Φαινόμενο επιφανειακής έλξης στη διεπαφή αέρα-νερού. α) Ενδομοριακές δυνάμεις στη συσταλτική στοιβάδα και στο νερό, β) Πιέσεις και επιφανειακή έλξη σε καμπυλωμένη δισδιάστατη μεμβράνη

Στην περίπτωση μιας δισδιάστατης μεμβράνης στην οποία θα εφαρμοστούν διαφορετικές πιέσεις σε κάθε πλευρά, αυτή θα αποκτήσει μία καμπυλότητα κοίλη προς το μέρος της μεγαλύτερης πίεσης και για να επέλθει ισορροπία θα ασκηθεί πάνω της μία εφελκυστική δύναμη. Η διαφορά πίεσης κατά μήκος της κοίλης επιφάνειας σχετίζεται με της επιφανειακή έλξη T_s και την ακτίνα καμπυλότητας R_s. Οι πιέσεις που δρουν στη μεμβράνη είναι η u και η $(u+\Delta u)$ και οι οριζόντιες δυνάμεις εξισορροπούν η μία την άλλη. Για να έχουμε ισορροπία δυνάμεων στην κάθετη διεύθυνση θα πρέπει να ισχύει:

$$\boldsymbol{2T_s \eta\mu\beta = 2\Delta u R_s \eta\mu\beta}, \text{ (2)}$$

όπου:

$2R_s$ ημβ = μήκος της μεμβράνης προβαλλόμενο στο οριζόντιο επίπεδο

Η Εξίσωση (2) δίνει:

$$\boldsymbol{\Delta u = \frac{T_s}{R_s}}, \text{ (3)}$$

Για μία μεμβράνη τριών διαστάσεων η Εξίσωση (3) μπορεί να επεκταθεί με την εφαρμογή της Εξίσωσης Laplace (Εικόνα 3.2.4):

$$\boldsymbol{\Delta u = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}, \text{ (4)}$$

όπου:

R_1 και R_2 = οι ακτίνες της καμπυλότητας μίας κυρτής μεμβράνης σε δύο ορθογώνια κύρια επίπεδα.

Αν οι ακτίνες της καμπυλότητας της μεμβράνης είναι ίδιου μήκους προς όλες τις κατευθύνσεις, δηλαδή ισχύει R_1=R_2=R_s, τότε η εξίσωση (4) μετατρέπεται σε:

$$\boldsymbol{\Delta u = \frac{2T_S}{R_s}}, \text{ (5)}$$

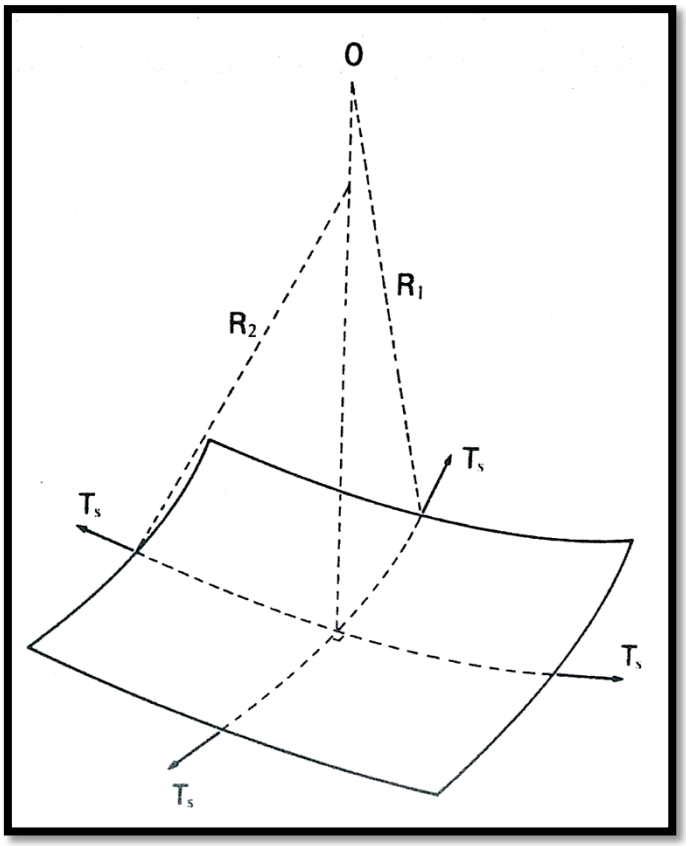
Στη συσταλτική στοιβάδα ενός ακόρεστου εδάφους θα αναπτυχθεί μία πίεση αέρα u_a, η οποία θα είναι μεγαλύτερη της πίεσης του νερού u_w. Η διαφορά της πίεσης (u_a-u_w) προκαλεί την καμπύλωση της συσταλτικής στοιβάδας με βάση την Εξίσωση (5):

$$\boldsymbol{(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s}}, \text{ (6)}$$

όπου:

(u_a-u_w) = Η διαφορά μεταξύ της πίεσης του αέρα των πόρων και της πίεσης του νερού των πόρων ενός ακόρεστου εδάφους που εφαρμόζονται στη συσταλτική στοιβάδα, η οποία αναφέρεται ως *μύζηση*.

Η Εξίσωση (6) αναφέρεται ως η Εξίσωση του τριχοειδούς μοντέλου του Kelvin (Fredlund & Rahardjo, 1993). Καθώς αυξάνεται η μύζηση ενός εδάφους μειώνεται η ακτίνα της καμπυλότητας της συσταλτικής μεμβράνης. Η καμπυλωμένη συσταλτική μεμβράνη αναφέρεται με τον όρο *μηνίσκος*. Με μείωση της μύζησης προς το μηδέν, η ακτίνα καμπυλότητας R_s τείνει στο άπειρο και η διεπαφή αέρα-νερού γίνεται επίπεδη.



Εικόνα 3.2.4: Επιφανειακές τάσεις σε καμπυλωμένη μεμβράνη (Fredlund & Rahardjo, 1993)

3.2.3 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η θεωρητική έννοια της μύζησης του εδάφους αναπτύχθηκε στις αρχές του 20ου αιώνα. Η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε αρχικά σε σχέση με το σύστημα εδάφους-νερού-φυτών. Η σπουδαιότητα της εδαφικής μύζησης στο να ερμηνεύσει τη μηχανική συμπεριφορά των ακόρεστων εδαφών σε σχέση με τεχνικά προβλήματα τονίσθηκε από τον οργανισμό Road Research Laboratory στην Αγγλία (Croney, 1952), (Croney & Coleman, 1954) και το 1965 ο Aitchison δημοσίευσε ποσοτικές ερμηνείες της εδαφικής μύζησης και των συνιστωσών της σε θεωρητικά θερμοδυναμικό πλαίσιο (Aitchison, 1965). Οι ερμηνείες αυτές είναι σήμερα αποδεκτές έννοιες της μηχανικής των εδαφών (Krahn & Fredlund, 1972).

Η εδαφική μύζηση ψ αναφέρεται συχνά ως η συνθήκη ελεύθερης ενέργειας του νερού του εδάφους (Edlefsen & Anderson, 1943). Η ενέργεια αυτή μπορεί να μετρηθεί σε σχέση με την πίεση των υδρατμών του εδαφικού νερού με την ακόλουθη σχέση (Richards B. G., 1965):

$$\boldsymbol{\psi} = -\frac{\boldsymbol{RT}}{\boldsymbol{u_w \omega_v}} \boldsymbol{ln}\left(\frac{\overline{\boldsymbol{u}}_{\boldsymbol{v}}}{\overline{\boldsymbol{u}}_{\boldsymbol{v0}}}\right), \text{(7)}$$

όπου:

ψ = Εδαφική ή ολική μύζηση (kPa)

R = Παγκόσμια σταθερά αερίων [8.31432 J/(mol K)]
T = Απόλυτη θερμοκρασία [T=(273,16+t^o)K]
t^o = Θερμοκρασία (^{o}C)
u_w = Ειδικός όγκος νερού (1/ρ_w) (m^3/kg)
ρ_w = Πυκνότητα νερού (998 kg/m^3 σε to = 20 ^{o}C)
ω_v = Μοριακή μάζα υδρατμού (18.016 kg/kmol)
$\overline{u}_v$ = Μερική πίεση υδρατμών νερού των πόρων (kPa)
$\overline{u}_{v0}$ = Κορεσμένη πίεση υδρατμών σε μία επίπεδη επιφάνεια νερού στην ίδια θερμοκρασία (kPa)

Στην εξίσωση (7) ο όρος $\overline{u}_v/\overline{u}_{v0}$ είναι η σχετική υγρασία *RH* (%). Η εδαφική μύζηση *ψ* για σχετική υγρασία 100% είναι μηδέν και επομένως οποιαδήποτε τιμή της RH κάτω από το 100% υποδηλώνει την παρουσία εδαφικής μύζησης. Η εδαφική μύζηση, όπως ποσοτικοποιείται σε σχέση με τη σχετική υγρασία ονομάζεται ολική μύζηση (total suction) και έχει δύο συνιστώσες, την "οσμωτική" μύζηση (osmotic suction) και την "ελκτική" μύζηση (matric suction). Ο όρος μύζηση στην Εδαφομηχανική αναφέρεται στη δεύτερη συνιστώσα της ολικής μύζησης (δηλ. στη matric suction), καθώς αυτή επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά των ακόρεστων εδαφών. Οι συνιστώσες της μύζησης μπορούν να ορισθούν ως εξής (Aitchison, 1965):

- *Ελκτική ή τριχοειδής* συνιστώσα της ελεύθερης ενέργειας: Είναι η ισοδύναμη μύζηση που προκύπτει από τη μερική πίεση των υδρατμών σε ισορροπία με το εδαφικό νερό, σε σχέση με αυτήν που προκύπτει από τη μερική πίεση των υδρατμών σε ισορροπία με διάλυμα ίδιας σύστασης με το εδαφικό νερό.

- *Οσμωτική* συνιστώσα της ελεύθερης ενέργειας: Είναι η ισοδύναμη μύζηση που προκύπτει από τη μέτρηση της μερικής πίεσης των υδρατμών σε ισορροπία με διάλυμα ίδιας σύστασης με το εδαφικό νερό, σε σχέση με τη μερική πίεση των υδρατμών σε ισορροπία με το ελεύθερο νερό.

- Ολική μύζηση ή ελεύθερη ενέργεια του εδαφικού νερού: Είναι η ισοδύναμη μύζηση που προκύπτει από τη μέτρηση της μερικής πίεσης των υδρατμών σε ισορροπία με το εδαφικό νερό, σε σχέση με τη μερική πίεση των υδρατμών σε ισορροπία με το ελεύθερο νερό.

Οι παραπάνω ορισμοί υποδηλώνουν πως η ολική μύζηση αντιστοιχεί στην ελεύθερη ενέργεια του εδαφικού νερού, ενώ η ελκτική και η οσμωτική μύζηση είναι συνιστώσες αυτής της ενέργειας και μπορούν να εκφρασθούν ως εξής:

$$\boldsymbol{\psi = (u_a - u_w) + \pi,} \quad \textbf{(8)}$$

όπου:

(u_a-u_w) = Ελκτική μύζηση ή μύζηση
u_a = πίεση του αέρα των πόρων
u_w = πίεση του νερού των πόρων

π = Οσμωτική μύζηση

3.2.4 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΚΟΡΕΣΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους είναι αναγκαία η χρήση κάποιων μεταβλητών εντατικής κατάστασης (stress state variables), οι οποίες θα πρέπει να είναι ανεξάρτητες από τις φυσικές του ιδιότητες. Ο αριθμός των μεταβλητών που απαιτούνται για την περιγραφή της εντατικής κατάστασης του εδάφους βασίζεται στον αριθμό των φάσεων που παίρνουν μέρος. Η ενεργός τάση $(\sigma-u_w)$ είναι μία τέτοια μεταβλητή που μπορεί να περιγράψει τη συμπεριφορά των κορεσμένων εδαφών. Παρόλο που η εξίσωση της ενεργού τάσης δεν αποτελεί φυσικό νόμο, έχει αποδειχθεί πως η ενεργός τάση είναι η μοναδική μεταβλητή που ελέγχει τη συμπεριφορά των κορεσμένων εδαφών.

Οι Fredlund και Morgenstern (1977) παρουσίασαν μία θεωρητική ανάλυση τάσεων ενός ακόρεστου εδάφους στη βάση της πολυφασικής μηχανικής συνεχούς μέσου. Το ακόρεστο έδαφος θεωρήθηκε ως ένα χημικά αδρανές σύστημα τεσσάρων φάσεων και οι εδαφικοί κόκκοι ασυμπίεστοι. Οι παραπάνω υποθέσεις είναι σε συμφωνία με αυτές που χρησιμοποιούνται στην Εδαφομηχανική κορεσμένων εδαφών. Στην ανάλυση αυτή προτείνεται η περιγραφή της εντατικής κατάστασης ενός ακόρεστου εδάφους με τη χρήση δύο τανυστών τάσης με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές ορθής τάσης. Τρεις είναι οι δυνατοί συνδυασμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές εντατικής κατάστασης: 1) $(\sigma-u_a)$ και (u_a-u_w), 2) $(\sigma-u_w)$ και (u_a-u_w) και 3) $(\sigma-u_a)$ και $(\sigma-u_w)$ και από αυτούς έχει επικρατήσει ο πρώτος. Οι δύο μεταβλητές αποτελούν μία λογική επέκταση της ενεργού τάσης που χρησιμοποιείται στα κορεσμένα εδάφη και παρουσιάζονται στην Εξίσωση (9).

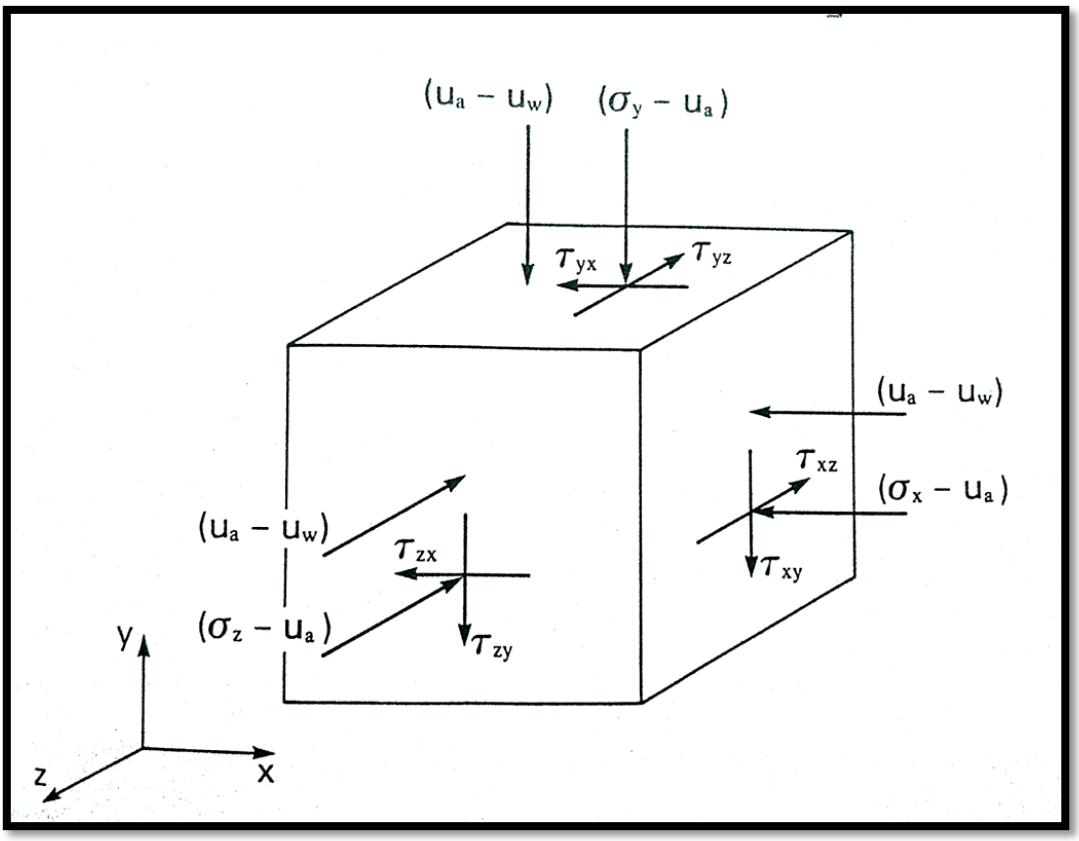
$$\begin{bmatrix} \sigma_\chi - u_a & \tau_{y\chi} & \tau_{z\chi} \\ \tau_{\chi y} & \sigma_y - u_a & \tau_{zy} \\ \tau_{\chi z} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix}$$

και **(9)**

$$\begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{bmatrix}$$

Ο όρος $(\sigma-u_a)$ ονομάζεται καθαρή ορθή τάση (net normal stress) και ο όρος (u_a-u_w) είναι η μύζηση. Στην Εικόνα 3.2.5 παρουσιάζεται ο τρόπος που οι δύο παραπάνω μεταβλητές ορίζουν την εντατική κατάσταση σε ένα σημείο. Γίνεται αντιληπτό ότι στα ακόρεστα εδάφη, οι μεταβολές της ολικής τάσης και οι μεταβολές της πίεσης του νερού των πόρων δεν παράγουν ισοδύναμες αντιδράσεις, γεγονός που διαχωρίζει τη συμπεριφορά τους από τα κορεσμένα εδάφη, τόσο σε σχέση με τη διατμητική αντοχή, όσο και σε σχέση με τη συμπεριφορά μεταβολής όγκου. Επίσης επιβάλλεται η ανεξάρτητη αναφορά της ολικής τάσης και της πίεσης του νερού των πόρων u_w σε σχέση με την πίεση του αέρα των πόρων u_a, καθώς η u_a είναι σταθερή (ατμοσφαιρική) για τα περισσότερα πρακτικά γεωτεχνικά προβλήματα. Η χρήση των

δύο παραπάνω μεταβλητών είναι πρακτική διότι έτσι γίνεται ομαλά η μετάβαση από την ακόρεστη κατάσταση στην κορεσμένη. Αυτό συμβαίνει διότι η πίεση του αέρα των πόρων εξισώνεται με αυτήν του νερού των πόρων καθώς επέρχεται κορεσμός, η τιμή της μύζησης μηδενίζεται και η εντατική κατάσταση περιγράφεται με την κλασσική μεταβλητή της ενεργού τάσης *(σ-u_w)*.



Εικόνα 3.2.5: Περιγραφή της εντατικής κατάστασης στοιχείου ενός ακόρεστου εδάφους σε ένα σημείο (Fredlund & Morgenstern, 1977)

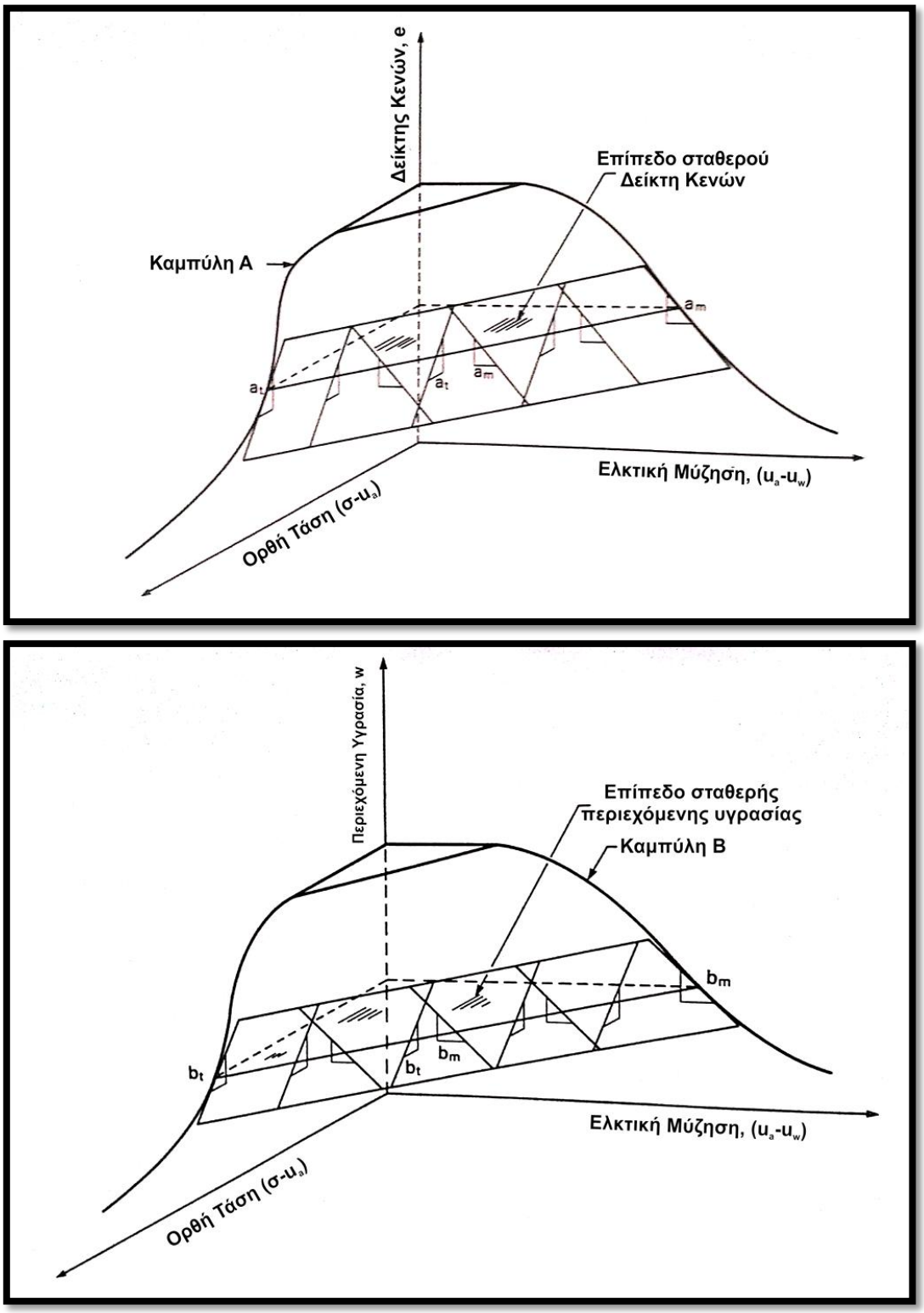
3.2.5 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές της εντατικής κατάστασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διατύπωση καταστατικών σχέσεων για ένα ακόρεστο έδαφος. Η εξίσωση για την περιγραφή μεταβολών όγκου κάτω από ισοτροπική φόρτιση μπορεί να διατυπωθεί σε σχέση με τις μεταβολές του δείκτη κενών ως εξης:

$$\boldsymbol{\Delta e = a_t * d(\sigma_c - u_a) + a_m * d(u_a - u_w)}, \textbf{(10)}$$

Οι μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας ή του βαθμού κορεσμού είναι ανεξάρτητες από τις μεταβολές του δείκτη κενών και επομένως απαιτείται η χρήση μίας ακόμα καταστατικής εξίσωσης για να περιγραφεί πλήρως η σχέση όγκου-μάζας ενός ακόρεστου εδάφους:

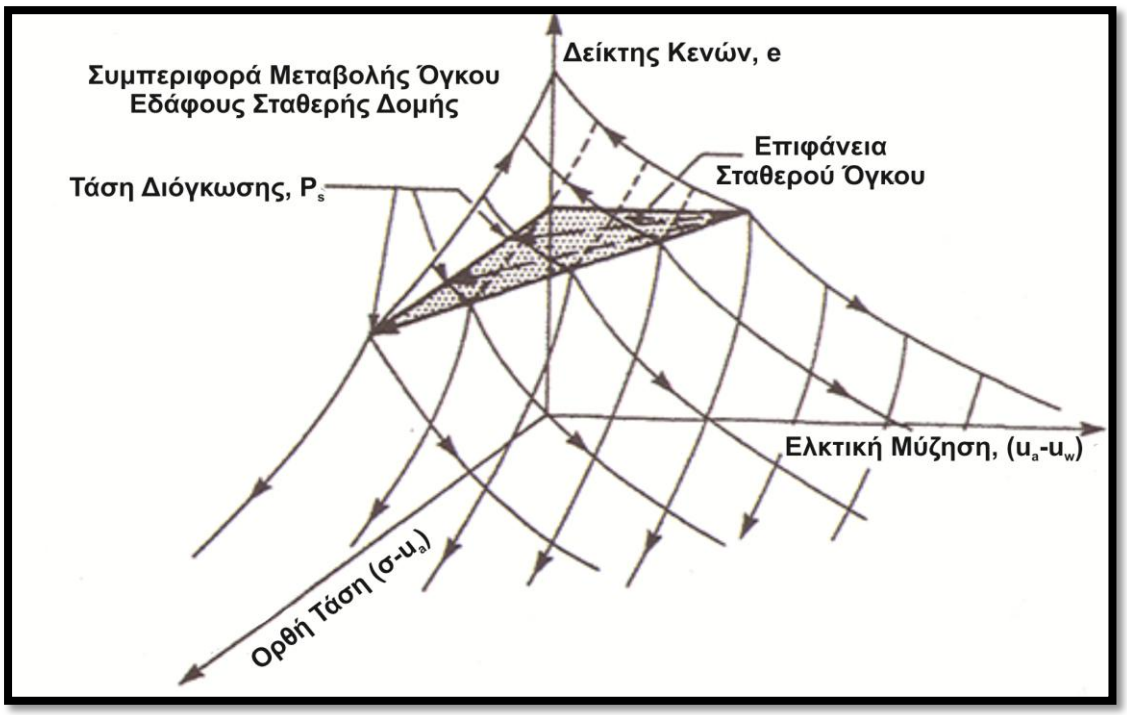
$$\Delta w = b_t * d(\sigma_c - u_a) + b_m * d(u_a - u_w), \quad (11)$$



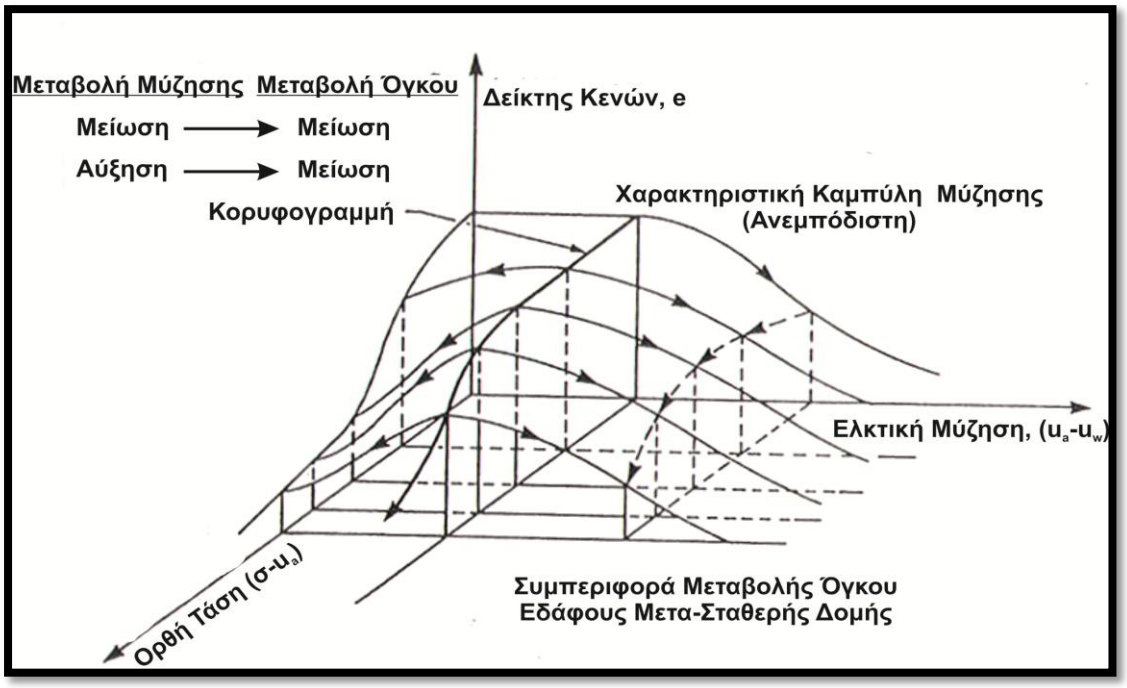
Εικόνα 3.2.6: Καταστατικές επιφάνειες του δείκτη κενών και της περιεχόμενης υγρασίας ακόρεστου εδάφους (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Οι Εξισώσεις 10 και 11 ισχύουν για ισοτροπικές συνθήκες φόρτισης όμως παρόμοιες μπορούν να διατυπωθούν και για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Η Εικόνα 3.2.6 αποτελεί μία τρισδιάστατη γραφική παρουσίαση των καταστατικών επιφανειών του δείκτη κενών (e) και της περιεχόμενης υγρασίας (m). Όταν η μύζηση του εδάφους είναι μηδέν, τότε οι μεταβολές του δείκτη κενών είναι ισοδύναμες με τις μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας σε σχέση με την απόκρισή τους σε μεταβολές της ολικής τάσης.

Στην Εικόνα 3.2.7 παρουσιάζονται οι καταστατικές επιφάνειες του δείκτη κενών για συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης ενός εδάφους με σταθερή δομή. Οι αντίστοιχες επιφάνειες ενός εδάφους με μετά-σταθερή δομή φαίνονται στην Εικόνα 3.2.8. Παρατηρείται πως η συμπεριφορά της μεταβολής όγκου του εδάφους μετά-σταθερής δομής διαφέρει σημαντικά στο γεγονός ότι τόσο η αύξηση όσο και η μείωση της μύζησης οδηγούν σε μείωση του όγκου με την εμφάνιση μιας "κορυφογραμμής" κατά μήκος των καταστατικών επιφανειών. Απαιτείται περισσότερη έρευνα για να διασαφηνισθεί πλήρως ο χαρακτήρας των καταστατικών επιφανειών για τα ακόρεστα εδάφη. Επίσης στα πλαίσια τέτοιων ερευνών μεταβολής όγκου πρέπει να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ εδαφών σταθερής και μετά-σταθερής δομής.



Εικόνα 3.2.7: Καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου σε συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης για ακόρεστο έδαφος σταθερής δομής (Fredlund & Rahardjo, 1993)



Εικόνα 3.2.8: Καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου σε συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης για ακόρεστο έδαφος μετά-σταθερής δομής (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω γραφήματα, ότι εκτός από τις μεταβλητές της εντατικής κατάστασης είναι απαραίτητη η χρήση άλλης μίας σχέσης για την ποσοτικοποίηση της συμπεριφοράς του εδάφους σε ακόρεστες συνθήκες. Αυτή είναι η σχέση που περιγράφει τη μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του εδάφους με τη μύζηση, σχέση η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε έδαφος και αναφέρεται ως Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους-Νερου (Soil-Water Characteristic Curve) ή Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους, ΧΚΜΕ (Εικόνα 3.2.9). Ο προσδιορισμός της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης είναι πολύ σημαντικός στην ποσοτικοποίηση της ακόρεστης συμπεριφοράς, αφού συσχετίζει την περιεχόμενη υγρασία του εδάφους με την τιμή της μύζησης. Επίσης από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του κορεσμένου εδάφους και τη Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης είναι δυνατόν να εκτιμηθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ακόρεστου εδάφους. Για το λόγο αυτό διεξάγεται σημαντική έρευνα, ώστε να προταθούν τέτοιες συσχετίσεις αλλά και μέθοδοι εργαστηριακού υπολογισμού της ΧΚΜΕ (Leong, Rahardjo, & Fredlund, 2001).

Στα πλαίσια αυτών των ερευνών έχουν προταθεί αρκετές μαθηματικές προσεγγίσεις της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης, οι οποίες είναι της μορφής:

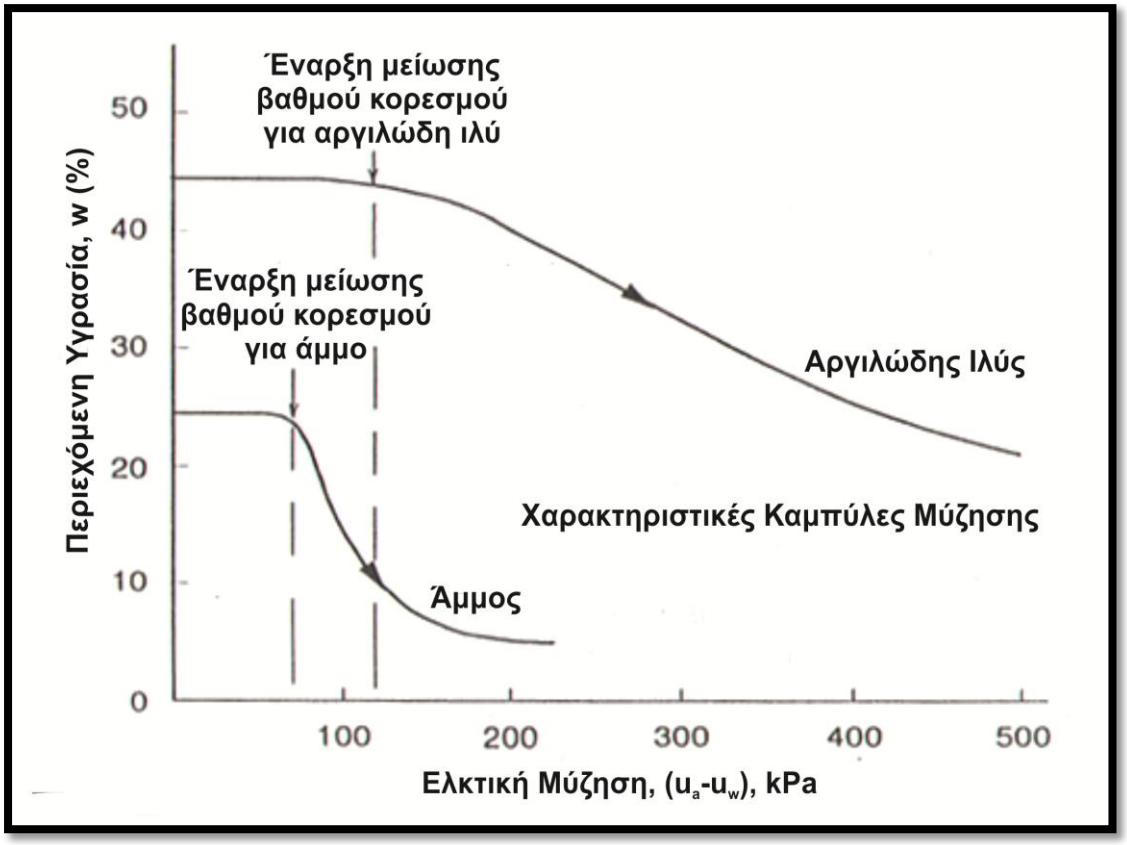
$$\boldsymbol{\theta_w = \{1/(1+\alpha|u_a - u_w|^n)\}^m}, \quad (12)$$

όπου

θ_w= ο όγκος της περιεχόμενης υγρασίας στο έδαφος.
α= Μία εδαφική παράμετρος που σχετίζεται με την τιμή πίεσης εισόδου αέρα στο έδαφος.

m και *n*= Εδαφικές παράμετροι που σχετίζονται με το ρυθμό εξαγωγής του νερού από τους πόρους του εδάφους.

Η τιμή της παραμέτρου *m* έχει ορισθεί σε πολλές έρευνες ως μονάδα (Gardner, 1958), ενώ άλλες έρευνες έχουν προτείνει σχέσεις που συνδέουν τις παραμέτρους *m* και *n* όπως: *m* = 1-2/*n*, (Burdine, 1953) και *m* = 1-1/*n*, (Mualem, 1976). Σε κάθε περίπτωση, φαίνεται πως μπορούν να γίνουν προσεγγιστικές εκτιμήσεις των ακόρεστων εδαφικών παραμέτρων με βάση τη φύση της ΧΚΜΕ.



Εικόνα 3.2.9: Τυπικές Χαρακτηριστικές Καμπύλες Μύζησης Εδάφους (Fredlund & Rahardjo, 1993)

3.2.6 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής των ακόρεστων εδαφών είναι ένα δύσκολο πρόβλημα με το οποίο έχουν ασχοληθεί πολλοί ερευνητές, στην προσπάθεια να βρεθεί μία ικανοποιητική της έκφραση σε σχέση με την ενεργό τάση ή καλύτερα σε σχέση με τις προτεινόμενες μεταβλητές της εντατικής κατάστασης. Μία από τις πρώτες προσεγγίσεις είναι αυτή των Bishop *et al* (Bishop, Alpan, Blight, & Donald, 1960)*:*

$$\boldsymbol{\tau = c' + [\sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)]tan\varphi'}, \text{ (13)}$$

όπου

τ = Διατμητική αντοχή (kPa)
c' = Ενεργός συνοχή (kPa)
φ' = Ενεργός γωνία τριβής (^{o})
σ = Ολική ορθή τάση στην επιφάνεια αστοχίας(kPa)
u_a = Πίεση αέρα των πόρων (kPa)
u_w = Πίεση νερού των πόρων (kPa)
χ = Εδαφική παράμετρος με εύρος τιμών 0-1, που εξαρτάται από το βαθμό κορεσμού, το είδος του εδάφους, την εντατική κατάσταση και την υστερητική κατάσταση υγρασίας

Για ένα τελείως ξηρό έδαφος χ=0 και για συνθήκες κορεσμού χ=1, οπότε η Εξίσωση (13) συμφωνεί με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για κορεσμένα εδάφη:

$$\boldsymbol{\tau = c' + (\sigma - u_w)\varepsilon\varphi\varphi'}, \text{ (14)}$$

Μία πιο πρόσφατη διατύπωση της διατμητικής αντοχής είναι αυτή των Fredlund, Morgenstern και Widger (Fredlund, Morgenstern, & Widger, 1978):

$$\boldsymbol{\tau = c' + (\sigma - u_a)\,\varepsilon\varphi\,\varphi' + (u_a - u_w)\varepsilon\varphi\varphi^b}, \text{ (15)}$$

όπου φ^b είναι η κλίση της επιφάνειας αστοχίας στο επίπεδο διατμητικής τάσης-μύζησης (*τ-s* επίπεδο) και αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο του εδάφους (Εικόνα 3.2.10). Αρχικά θεωρήθηκε ότι οι φ' και φ^b είναι ανεξάρτητες της μύζησης . Επομένως η επίδραση της μύζησης στη διατμητική αντοχή είναι ισοδύναμη με μία αύξηση της ενεργού συνοχής:

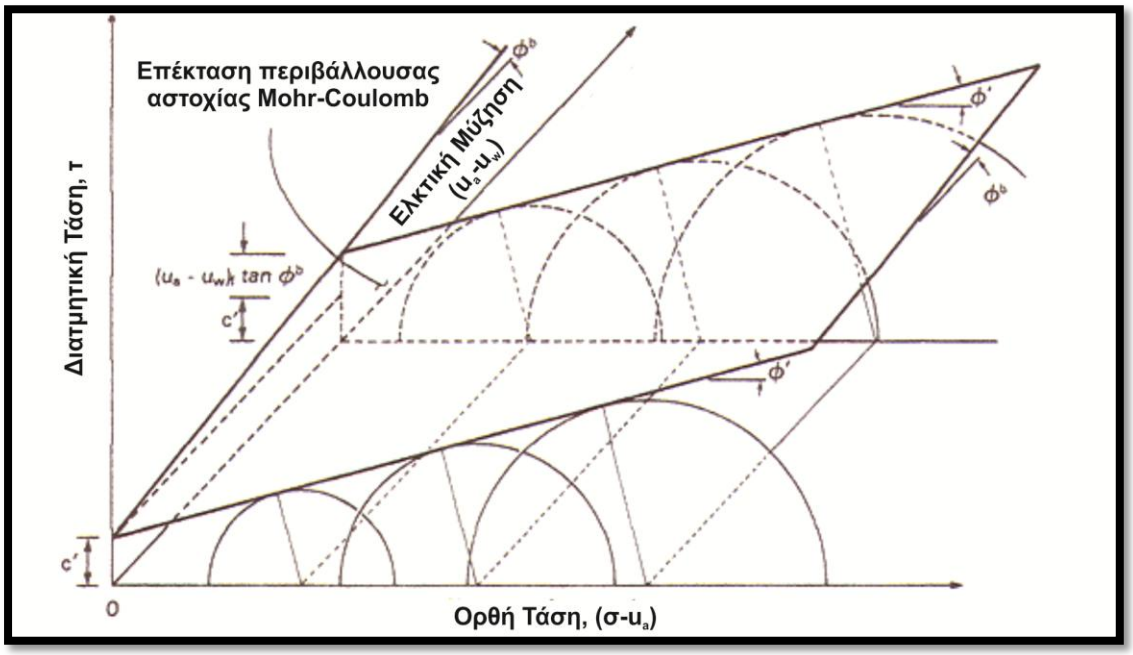
$$\boldsymbol{C = c' + (u_a - u_w)\varepsilon\varphi\varphi^b}, \text{ (16)}$$

όπου *C* είναι η Ολική συνοχή. Η Εξίσωση (16) μεταβάλλεται σε διατύπωση περιγραφής της κορεσμένης κατάστασης όταν $u_a = u_w = 0$.

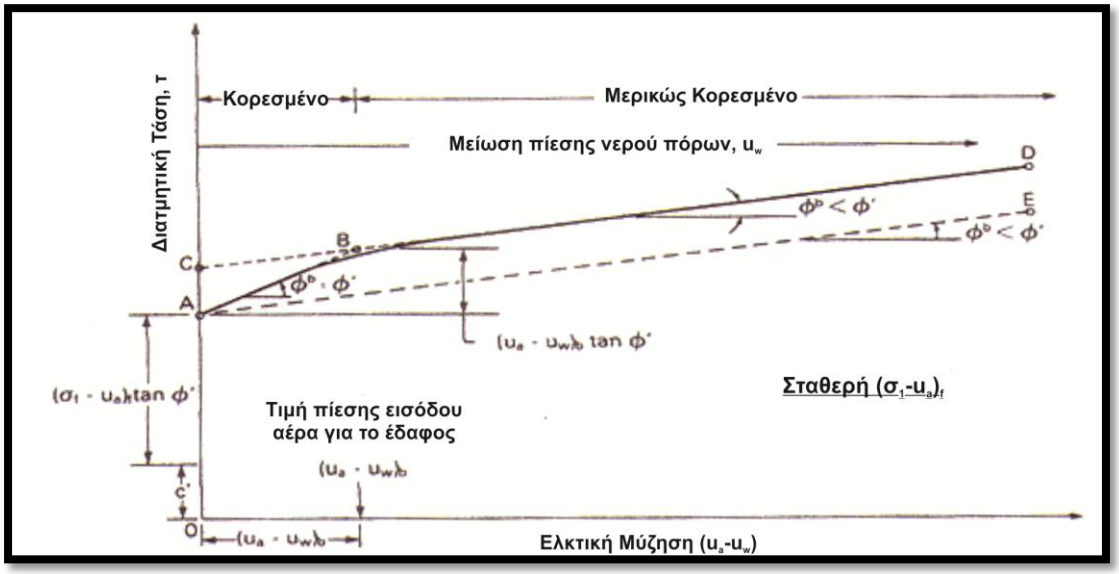
Οι Escario και Saez (Escario & Saez, 1986) παρουσίασαν αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης που έδειξαν πως η υπόθεση ότι η τιμή της φ^b είναι σταθερή δεν είναι ρεαλιστική. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από άλλους ερευνητές (Fredlund, Rahardjo, & Gan, 1987), που πρότειναν ότι η τιμή της φ^b είναι ίση με αυτήν της φ' σε μικρές τιμές μύζησης και στη συνέχεια μειώνεται σημαντικά σε μία σταθερή, μικρή τιμή για μεγάλες τιμές μύζησης (Εικόνα 3.2.11).

Οι Escario και Juca (Escario, Juca, & Coppe, 1989)πρότειναν ότι σε υψηλές τιμές μύζησης η τιμή φ^b γίνεται αρνητική, αναφέροντας ότι σε τέτοιες τιμές μύζησης η φαινόμενη συνοχή λόγω της μύζησης τείνει προς το μηδέν, καθώς το έδαφος ξηραίνεται εντελώς. Συγκρίνοντας τις Εξισώσεις (13) και (15) και υποθέτοντας πως οι τιμές της διατμητικής αντοχής για τις δύο σχέσεις είναι ίσες, μπορούμε να καταλήξουμε στη σχέση:

$$\chi = \frac{\varepsilon\varphi\,\varphi^b}{\varepsilon\varphi\varphi'}\,, \quad (17)$$



Εικόνα 3.2.10: Επέκταση της περιβάλλουσας αστοχίας κατά Mohr-Coulomb για ακόρεστα εδάφη (Fredlund, Morgenstern, & Widger, 1978)



Εικόνα 3.2.11: Μη γραμμικότητα της περιβάλλουσας αστοχίας στο τ-s επίπεδο (Escario & Saez, 1986)

Με βάση τα παραπάνω, ο υπολογισμός της διατμητικής αντοχής ενός ακόρεστου εδάφους είναι δυνατόν να γίνει με τον προσδιορισμό των παραγόντων φ^b και $(u_a\text{-}u_w)$. Ο όρος φ^b θεωρείται πως έχει χαρακτηριστική τιμή για κάθε εδαφικό σχηματισμό, η οποία είναι σταθερή μόνο για ένα εύρος τιμών της μύζησης, που καλύπτει όμως τα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα. Μπορεί να υπολογιστεί

πειραματικά όπως δείχνει η Εικόνα 3.2.10. Η τιμή της μύζησης μπορεί να υπολογιστεί επίσης πειραματικά ή και έμμεσα με τη χρήση της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης.

3.2.7 ΟΙ ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΤΩΝ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Ακόμα και σήμερα, το πεδίο της έρευνας των ακόρεστων εδαφών είναι πολύ ανοιχτό και υπάρχει σημαντικό έλλειμμα πληροφοριών σχετικά με τις δυσκολίες προβλημάτων σε ακόρεστα εδάφη. Οι κυριότερες ανάγκες έρευνας είναι οι ακόλουθες:

1. Η μέτρηση των αρνητικών πιέσεων πόρων. Πρέπει να αναπτυχθούν εργαστηριακές και επί τόπου διατάξεις μέτρησης της εδαφικής μύζησης. Ήδη οι περισσότερες εταιρίες εργαστηριακού εξοπλισμού κατασκευάζουν διατάξεις με δυνατότητα άμεσης ή έμμεσης μέτρησης της μύζησης.

2. Απαιτούνται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους. Εκτός από τη δημοσίευση ΧΚΜΕ για όσο το δυνατόν περισσότερα είδη γεωυλικών, πρέπει να αναπτυχθεί περισσότερο και το κομμάτι των πληροφοριών που μπορεί κανείς να αντλήσει από αυτές. Με άλλα λόγια, να προσανατολισθεί η έρευνα στη συσχέτιση των ΧΚΜΕ με τις παραμέτρους της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών. Τα τελευταία χρόνια, αρκετά προγράμματα γεωτεχνικών υπολογισμών συνοδεύονται από βάσεις δεδομένων εδαφικών παραμέτρων, οι οποίες περιλαμβάνουν και Χαρακτηριστικές Καμπύλες Μύζησης Εδάφους.

3. Υπάρχει ανάγκη απλοποίησης των μαθηματικών διατυπώσεων για τα διάφορα προβλήματα γεωτεχνικής μηχανικής που αφορούν και ακόρεστα εδάφη.

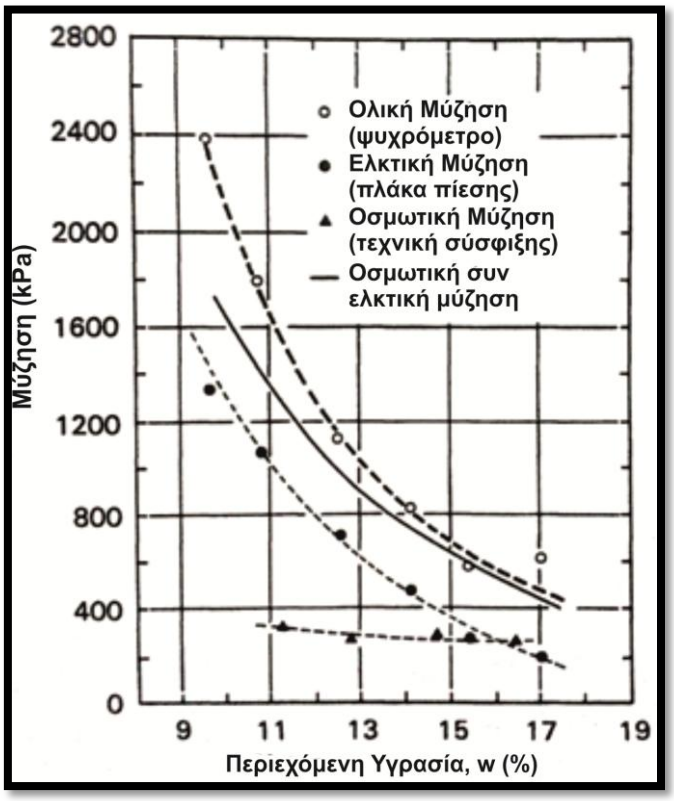
4. Η έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες πρέπει να επεκταθεί και σε ειδικές κατηγορίες εδαφών. Τέτοια είναι τα υπολειμματικά εδάφη, μια κατηγορία εδαφών που διέπεται εξορισμού από τις αρχές της ακόρεστης μηχανικής συμπεριφοράς. Στην παρούσα διατριβή γίνεται μια προσπάθεια συνεισφοράς τέτοιων χαρακτηριστικών παραμέτρων ακόρεστης μηχανικής συμπεριφοράς σε σχέση με τα υπολειμματικά εδάφη.

5. Ολοκληρωμένες περιπτώσεις έρευνας. Υπάρχει ανάγκη για ολοκληρωμένη καταγραφή πληροφοριών τάσεων, εδαφικών παραμέτρων και συμπεριφοράς σε περιπτώσεις που σχετίζονται με προβλήματα διαρροής, μεταβολής όγκου και διατμητικής αντοχής σε ακόρεστα εδάφη. Σε αυτόν τον τομέα επιχειρεί να συμβάλλει η μελέτη των γεωυλικών της περιοχής της Ασπροβάλτας, των οποίων η μηχανική συμπεριφορά επηρεάζεται τόσο από τα ειδικά χαρακτηριστικά των υπολειμματικών εδαφών, όσο και από τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς σε ακόρεστες συνθήκες.

3.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΟΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Η εργαστηριακή διερεύνηση των εδαφικών παραμέτρων ακόρεστης συμπεριφοράς βασίζεται στη μέτρηση και τον έλεγχο των μεταβλητών εντατικής κατάστασης. Η ακόρεστη συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί από ένα από τα ζεύγη μεταβλητών που έχουν ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3.2.4. Ως κατάλληλο ζεύγος θεωρείται αυτό το οποίο δεν προκαλεί διατάραξη ή μεταβολές όγκου στο έδαφος όταν μεταβάλλονται μεν οι ανεξάρτητες συνιστώσες τους αλλά οι καθαυτές τιμές των μεταβλητών παραμένουν σταθερές (Fredlund & Morgenstern, 1977). Με βάση τα παραπάνω η εργαστηριακή διερεύνηση των ακόρεστων εδαφών προαπαιτεί έλεγχο ή μέτρηση της μύζησης.

Οι περιβαλλοντικές αλλαγές και οι μεταβολές του εντατικού πεδίου προκαλούν μεταβολές στην περιεχόμενη υγρασία του εδάφους. Η περιεχόμενη υγρασία εξάλλου έχει άμεση σχέση με την ελκτική μύζηση (matric suction), ενώ η οσμωτική μύζηση δε φαίνεται να είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγές της περιεχόμενης υγρασίας (Εικόνα 3.3.1). Άρα, οι μεταβολές της ολικής μύζησης είναι αντιπροσωπευτικές των μεταβολών της ελκτικής μύζησης και επομένως οι εργαστηριακές μετρήσεις της ολικής μύζησης είναι πολύ σημαντικές. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε υψηλά εύρη τιμών, όπου είναι δύσκολη η μέτρηση της ελκτικής μύζησης.



Εικόνα 3.3.1: Ολική, εδαφική και οσμωτική μύζηση ενός λιθώνα (Krahn & Fredlund, 1972)

3.3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι και εργαστηριακές διατάξεις για τη μέτρηση κυρίως της ολικής αλλά και της ελκτικής μύζησης. Έχουν αναπτυχθεί άμεσες και έμμεσες μέθοδοι μέτρησης, με τις άμεσες να αφορούν τη μέτρηση της ολικής μύζησης και τις έμμεσες να αφορούν τη μέτρηση της ελκτικής. Η δυσκολία άμεσων μετρήσεων της ελκτικής μύζησης έγκειται στο γεγονός ότι πρέπει να γίνουν μετρήσεις αρνητικών πιέσεων πόρων. Όταν οι τιμές αυτών πλησιάζουν την -1atm (δηλαδή μηδενική απόλυτη πίεση), τότε προκαλείται αποσυμπίεση με αποτέλεσμα την είσοδο αέρα στο σύστημα μέτρησης και αντίστοιχα την είσοδο του νερού του συστήματος μέτρησης στο εδαφικό δείγμα. Για να αποφευχθεί το παραπάνω φαινόμενο γίνεται μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων αναφορικά με μία γνωστή, θετική τιμή πίεσης αέρα, έτσι ώστε να γίνεται μέτρηση θετικών τιμών πίεσης πόρων και να υπολογίζεται η τιμή της εδαφικής μύζησης έμμεσα με βάση τη σχέση $s=u_a-u_w$.

Πίνακας 3.3.1: Συσκευές μέτρησης της εδαφικής μύζησης (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Όνομα Συσκευής	Μετρούμενη συνιστώσα μύζησης	Εύρος Μέτρησης (kPa)	Σχόλια
Ψυχρόμετρο	Ολική	100-8000	Απαιτείται περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας
Διηθητικό χαρτί	Ολική	Όλο το εύρος	Μπορεί να μετρήσει και την ελκτική μύζηση όταν το διηθητικό χαρτί είναι σε καλή επαφή με υγρό έδαφος
Τενσιόμετρο	Αρνητικές πιέσεις πόρων ή ελκτική όταν η πίεση αέρα πόρων είναι 1 atm	0-90	Δυσκολίες λόγω σπηλαίωσης και διάχυσης του αέρα
Πλάκα Πίεσης	Ελκτική	0-1500	Το εύρος μέτρησης εξαρτάται από τις ιδιότητες του κεραμικού δίσκου υψηλής τιμής πίεσης εισόδου αέρα
Αισθητήρες Θερμικής αγωγιμότητας	Ελκτική	0-400+	Έμμεση μέτρηση με τη χρήση διαφορετικού μεγέθους πόρων κεραμικού αισθητήρα
Σφικτήρας ρευστών πόρου	Οσμωτική	Όλο το εύρος	Χρήση σε συνδυασμό με ψυχρόμετρο ή μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Στο θέμα της μέτρησης της μύζησης είναι πολύ σημαντική η γνώση της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης Εδάφους, διότι έτσι μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές μύζησης ενός εδάφους από συμβατικές μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας. Ο

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι και εργαστηριακές διατάξεις για τη μέτρηση κυρίως της ολικής αλλά και της ελκτικής μύζησης. Έχουν αναπτυχθεί άμεσες και έμμεσες μέθοδοι μέτρησης, με τις άμεσες να αφορούν τη μέτρηση της ολικής μύζησης και τις έμμεσες να αφορούν τη μέτρηση της ελκτικής. Η δυσκολία άμεσων μετρήσεων της ελκτικής μύζησης έγκειται στο γεγονός ότι πρέπει να γίνουν μετρήσεις αρνητικών πιέσεων πόρων. Όταν οι τιμές αυτών πλησιάζουν την -1atm (δηλαδή μηδενική απόλυτη πίεση), τότε προκαλείται αποσυμπίεση με αποτέλεσμα την είσοδο αέρα στο σύστημα μέτρησης και αντίστοιχα την είσοδο του νερού του συστήματος μέτρησης στο εδαφικό δείγμα. Για να αποφευχθεί το παραπάνω φαινόμενο γίνεται μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων αναφορικά με μία γνωστή, θετική τιμή πίεσης αέρα, έτσι ώστε να γίνεται μέτρηση θετικών τιμών πίεσης πόρων και να υπολογίζεται η τιμή της εδαφικής μύζησης έμμεσα με βάση τη σχέση $s=u_a-u_w$.

Πίνακας 3.3.1 περιγράφει συνοπτικά τις μεθόδους μέτρησης της μύζησης, οι κυριότερες των οποίων περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Μέθοδος διηθητικού χαρτιού

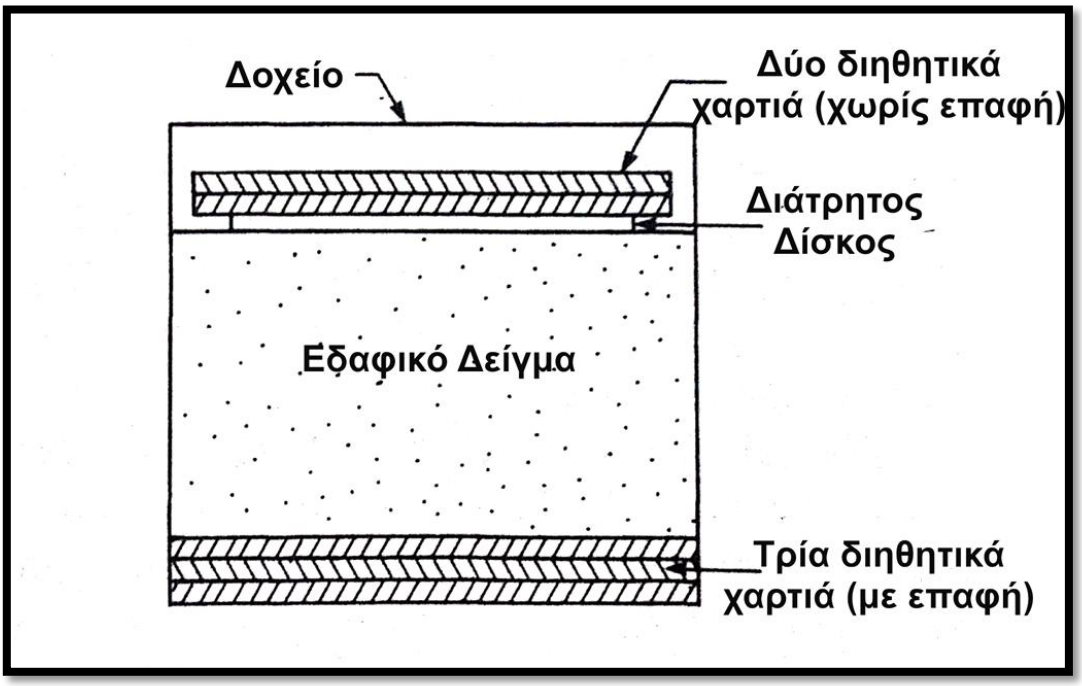
Η μέθοδος του διηθητικού χαρτιού (filter paper method) είναι η πιο διαδεδομένη τυποποιημένη τεχνική για τη μέτρηση της εδαφικής μύζησης. Κάτω από σωστές συνθήκες είναι μία αποτελεσματική και προσιτή μέθοδος προσδιορισμού της μύζησης ενός ανεμπόδιστου ακόρεστου εδαφικού δείγματος. Η χρήση της μεθόδου στη γεωτεχνική μηχανική έχει προταθεί και εφαρμοστεί από πολλούς ερευνητές (Ho, 1979), (Tang, 1978), (Ching & Fredlund, 1984), (Chandler & Gutierrez, 1986) και (McKeen, 1985).

Αν σε ένα, αρχικά ξηρό, διηθητικό χαρτί επιτραπεί να απορροφήσει υγρασία από εδαφικό δείγμα και η ποσότητα υγρασίας είναι αρκετά μικρή, έτσι ώστε να μην επηρεασθεί η εδαφική μύζηση, τότε θα επέλθει ισορροπία και το διηθητικό χαρτί θα έχει ίση ελκτική δυνατότητα υγρασίας με αυτήν του εδάφους και επομένως, η μύζηση στο διηθητικό χαρτί θα ισούται με τη μύζηση στο έδαφος. Ένα διηθητικό χαρτί που τοποθετείται σε απευθείας επαφή με το εδαφικό δείγμα απορροφά νερό μέσω της υγρής φάσης δίνοντας μέτρηση της ελκτικής μύζησης (matric suction), ενώ αν τοποθετηθεί σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του δείγματος απορροφά υγρασία μέσω μεταφοράς υδρατμών, δίνοντας μετρήσεις ολικής μύζησης (Εικόνα 3.3.2). Στη συνέχεια, η περιεχόμενη υγρασία του διηθητικού χαρτιού μπορεί να συσχετισθεί με τιμές μύζησης μέσω κατάλληλων βαθμονομήσεων. Μια τυπική καμπύλη βαθμονόμησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3.3.

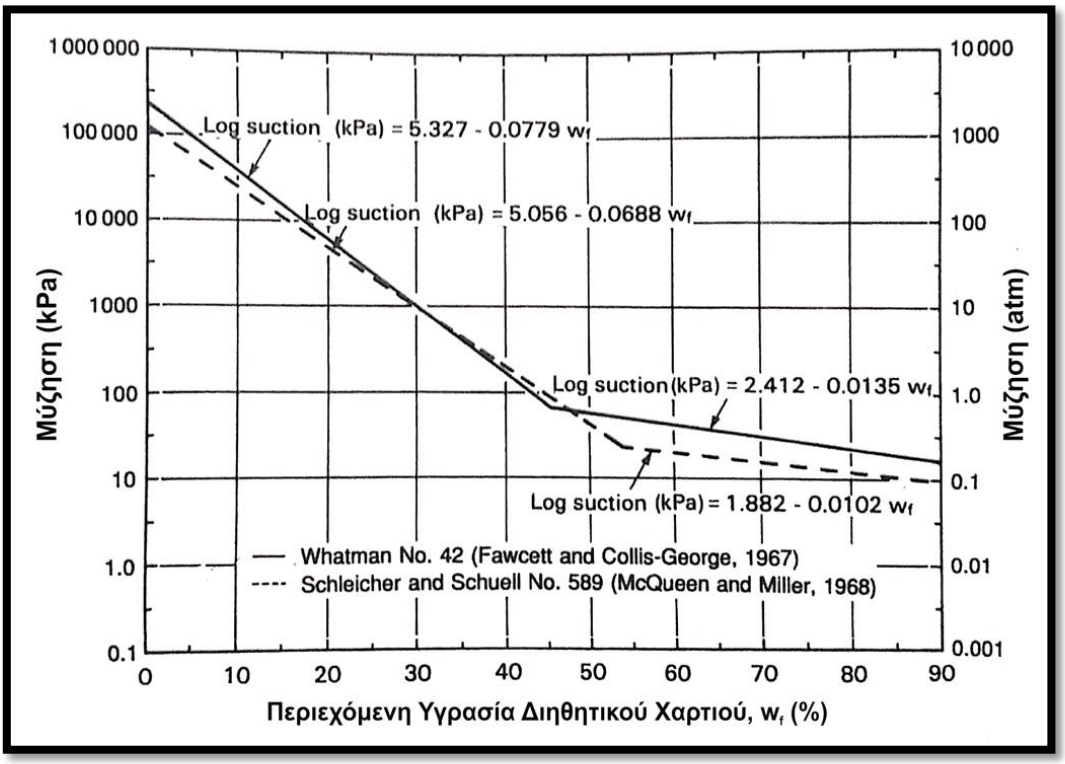
Για την επίτευξη αξιόπιστων μετρήσεων μύζησης είναι απαραίτητα τα παρακάτω:

- Καλή επαφή διηθητικού χαρτιού και εδαφικού δείγματος
- Σφράγισμα του εδαφικού δείγματος και του διηθητικού χαρτιού για την αποφυγή εξάτμισης
- Αποθήκευση σε περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας (+/- 1°C)
- Διαδικασία ζυγίσματος του διηθητικού χαρτιού με ακρίβεια 0.0001g

Τα αποτελέσματα της μεθόδου έχουν πολλές εφαρμογές, όπως τον προσδιορισμό της αποξήρανσης και κυρίως τον προσδιορισμό της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης.



Εικόνα 3.3.2: Διάταξη μέτρησης της ελκτικής μύζησης με τη μέθοδο του διηθητικού χαρτιού



Εικόνα 3.3.3: Καμπύλες βαθμονόμησης διηθητικών χαρτιών

Μέθοδος μεταβολής της αξονικής αναφοράς των πιέσεων (axis-translation technique)

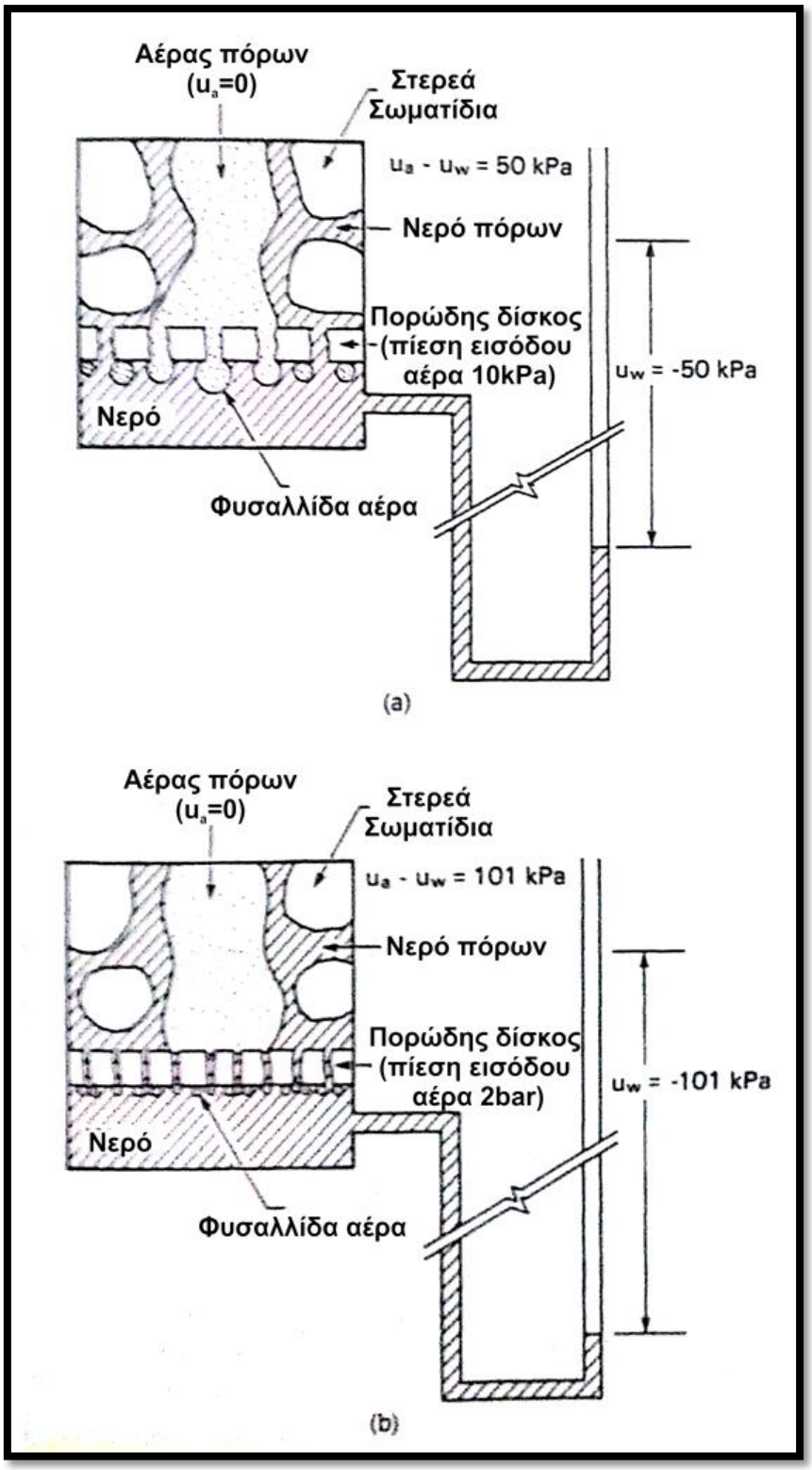
Με βάση αυτήν τη μέθοδο, οι πιέσεις αέρα και νερού των πόρων μεταφράζονται σε θετικό εύρος τιμών για την αποφυγή μετρήσεων αρνητικών πιέσεων πόρων αναφερόμενων στην ατμοσφαιρική πίεση. Συντελείται τεχνητή αύξηση της πίεσης του αέρα των πόρων, κάτω από την οποία διεξάγεται η εκάστοτε εργαστηριακή δοκιμή, με αποτέλεσμα την αύξηση των αρνητικών πιέσεων νερού των πόρων σε ισόποση θετική τιμή. Με την παραπάνω τεχνική, η ελκτική μύζηση $(u_a\text{-}u_w)$ παραμένει σταθερή στο εδαφικό δοκίμιο ανεξάρτητα από την τιμή της επιβαλλόμενης πίεσης αέρα στους πόρους και είναι δυνατός ο έλεγχος της ελκτικής μύζησης στο εξεταζόμενο δοκίμιο με τη χρήση ενός λεπτού πορώδους κεραμικού δίσκου με τιμή πίεσης εισόδου αέρα μεγαλύτερη από την τιμή μύζησης που εφαρμόζεται στη δοκιμή (Bishop, Alpan, Blight, & Donald, 1960). Μία εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3.4. Σε αυτό το παράδειγμα εδάφους με τιμή μύζησης $u_a\text{-}u_w$=101 kPa, η πίεση του αέρα των πόρων έχει μετατραπεί από 0 σε 202 kPa, με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων σε θετική τιμή 101 kPa, χωρίς να μεταβάλλεται η τιμή της μύζησης.

Ο πορώδης δίσκος υψηλής τιμής πίεσης εισόδου αέρα (High Air Entry Porous Disk) έχει μικρούς και σχετικά ομοιόμορφους πόρους και συμπεριφέρεται σαν μεμβράνη ανάμεσα στον αέρα και το νερό. Οι δίσκοι που χρησιμοποιούνται στις εργαστηριακές δοκιμές είναι κεραμικοί και φτιάχνονται από πορώδη καολίνη. Όταν ο δίσκος είναι κορεσμένος με νερό, τότε δεν μπορεί να περάσει αέρας μέσα στο δίσκο εξαιτίας της ικανότητας της συσταλτικής στοιβάδας να αντιστέκεται στη ροή του αέρα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της επιφανειακής τάσης T_s που αναπτύσσει η συσταλτική στοιβάδα, ενώνοντας τους μικρούς πόρους του δίσκου ακτίνας R_s στην επιφάνεια αυτού. Η διαφορά της πίεσης του αέρα επάνω από τη συσταλτική στοιβάδα και της πίεσης του νερού κάτω από αυτήν αντιπροσωπεύει την τιμή μύζησης στο εδαφικό δοκίμιο (Εικόνα 3.3.5). Η μέγιστη τιμή μύζησης που μπορεί να διατηρηθεί στην επιφάνεια του κεραμικού δίσκου ονομάζεται τιμή πίεσης εισόδου αέρα του δίσκου και περιγράφεται από την Εξίσωση του Kelvin:

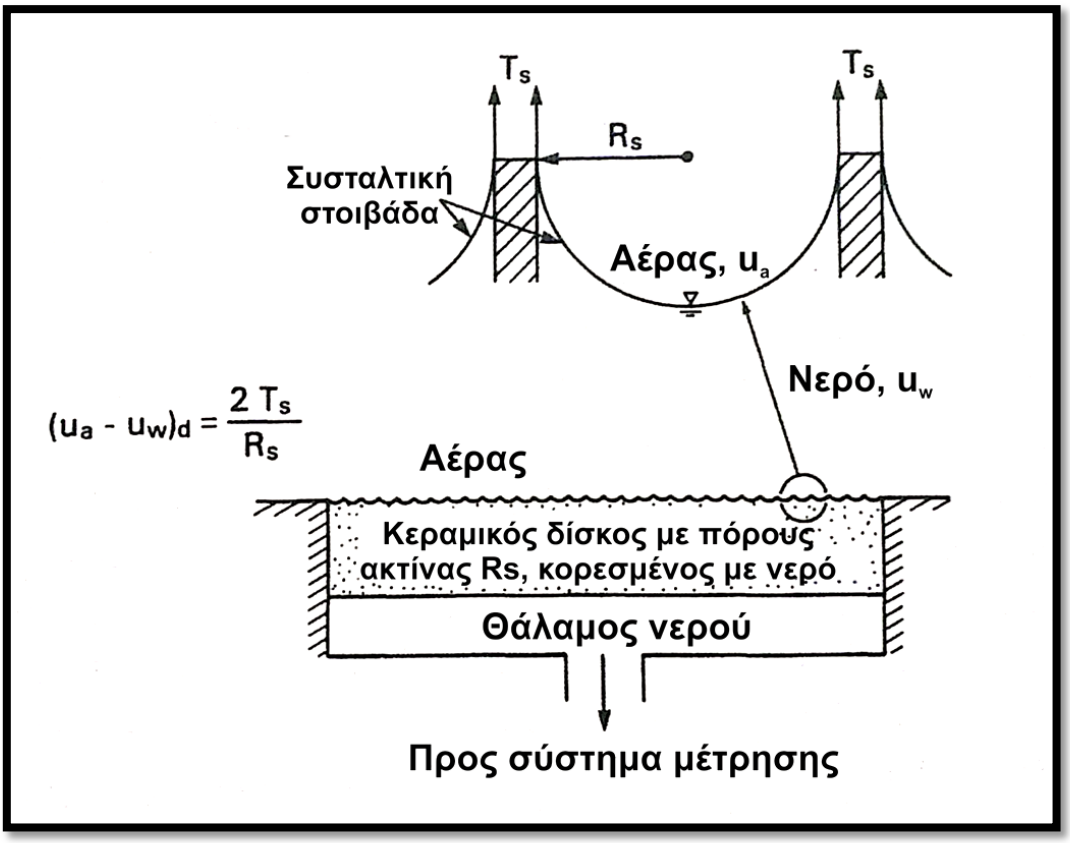
$$(\boldsymbol{u_a} - \boldsymbol{u_w})_{\boldsymbol{d}} = \frac{\boldsymbol{2T_s}}{\boldsymbol{R_s}}, \quad \textbf{(18)}$$

όπου

$(u_a\text{-}u_w)_d$ = Τιμή πίεσης εισόδου αέρα στον κεραμικό δίσκο



Εικόνα 3.3.4: Μέτρηση των πιέσεων του νερού των πόρων με την εφαρμογή της μεθόδου μεταβολής της αξονικής αναφοράς των πιέσεων (Fredlund & Rahardjo, 1993)



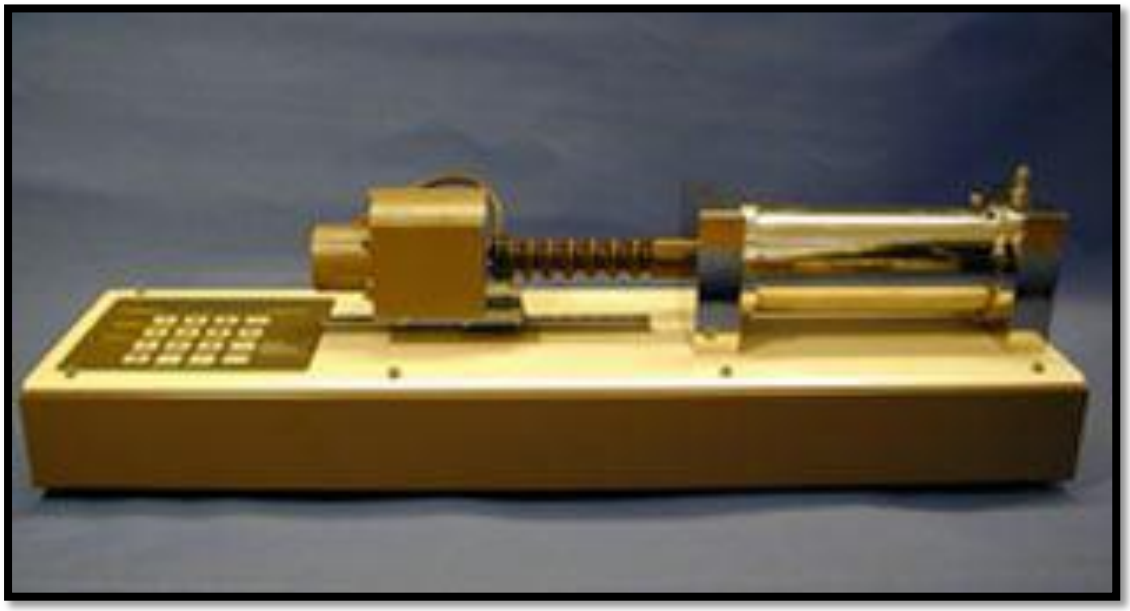
Εικόνα 3.3.5: Αρχή λειτουργίας του δίσκου υψηλής τιμής πίεσης εισόδου αέρα (Fredlund & Rahardjo, 1993)

3.3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Στα πλαίσια της έρευνας της μηχανικής συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών και πιο συγκεκριμένα της διατμητικής αντοχής αυτών για την ανάλυση της ευστάθειας πρανών, είναι απαραίτητη η διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών σε ακόρεστες συνθήκες, εφόσον τα υπολειμματικά εδάφη βρίσκονται κατά κύριο λόγο στην ακόρεστη ζώνη. Κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε η αναβαθμισμένη αυτοματοποιημένη συσκευή τριαξονικών δοκιμών της εταιρίας GDS που διαθέτει το Εργαστήριο Τεχν. Γεωλογίας και Υδρ/γιας του Α.Π.Θ., που επιτρέπει τον έλεγχο της ελκτικής μύζησης *(u_a-u_w)* κατά τη διάρκεια εκτέλεσης τριαξονικών δοκιμών. Ένα σημαντικό κομμάτι της ερευνητικής προσπάθειας αποτέλεσε και η προετοιμασία, εγκατάσταση και βαθμονόμηση της πειραματικής διάταξης τριαξονικής δοκιμής με έλεγχο της μύζησης. Αυτό ήταν απαραίτητο τόσο στο να εκτελεστεί το απαιτούμενο για την έρευνα πειραματικό πρόγραμμα, αλλά επίσης στο να είναι δυνατή η συνέχιση της εργαστηριακής αυτής έρευνας με στόχο την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση-έλεγχο της μύζησης στο δοκίμιο είναι η μέθοδος μεταβολής της αξονικής αναφοράς των πιέσεων. Με βάση τη μέθοδο αυτή, ο έλεγχος της πίεσης του αέρα των πόρων που εφαρμόζεται στο

επάνω μέρος του εξεταζόμενου δείγματος ελέγχεται με έναν ελεγκτή (controller) πίεσης-όγκου αέρα, ο οποίος αποτελεί τη βασική αναβάθμιση της τριαξονικής συσκευής (Εικόνα 3.3.6). Με τη χρήση του ελεγκτή γίνεται άμεση μέτρηση της μεταβολής του όγκου του αέρα στο δοκίμιο ΔV_{air} και ελέγχεται η πίεση του αέρα u_a. Ο συγκεκριμένος ελεγκτής έχει εύρος εφαρμογής-μέτρησης πίεσης 2MPa και ογκομετρικό εύρος 1000cm^3 με ακρίβεια μέτρησης της πίεσης <0,1% και του όγκου 0,25%.

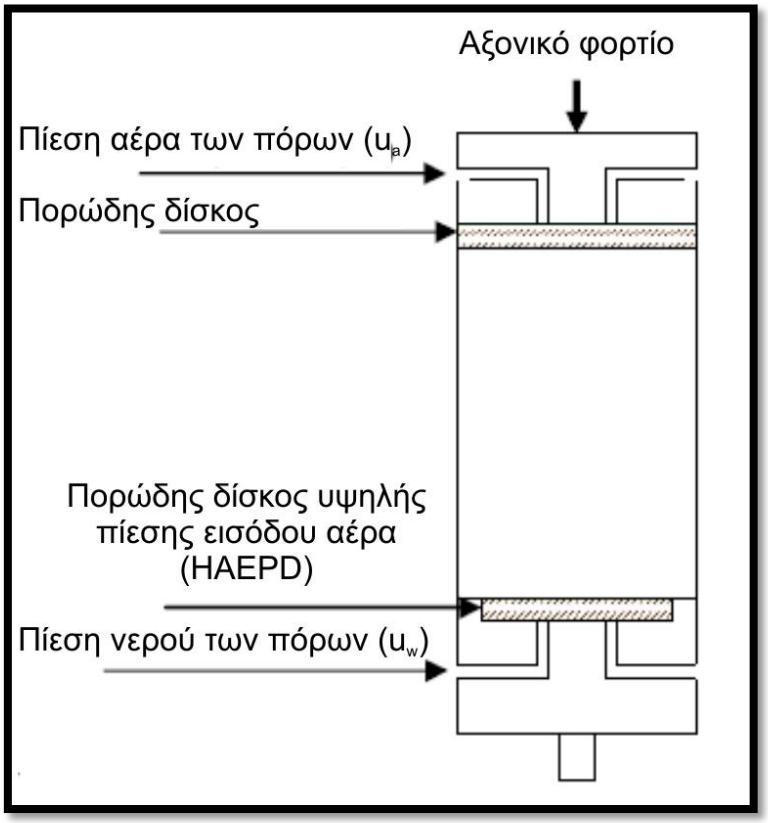


Εικόνα 3.3.6: Ελεγκτής πίεσης-όγκου αέρα, 2MPa/1000cc

Επιπρόσθετα χρησιμοποιείται και ένας ελεγκτής πίεσης-όγκου του νερού των πόρων u_w (αντιπίεσης πόρων), με τον οποίο ελέγχεται η πίεση του νερού των πόρων στο κάτω μέρος του δοκιμίου και γίνεται άμεση μέτρηση της μεταβολής του όγκου του νερού στο δοκίμιο ΔV_{water}. Η πίεση του αέρα είναι πάντα υψηλότερη από την αντιπίεση του νερού έτσι ώστε να μην μπορεί το νερό να εισχωρήσει στο μετρητή αέρα. Η διαφορά των πιέσεων, δηλαδή η μύζηση στο δοκίμιο u_a-u_w εξασφαλίζεται με τη χρήση του κεραμικού δίσκου υψηλής πίεσης εισόδου αέρα (HAEPD) στη βάση της διάταξης (Εικόνα 3.3.7). Ο HAEPD που χρησιμοποιήθηκε έχει τιμή πίεσης εισόδου αέρα 15bar και επομένως μπορεί, όταν είναι κορεσμένος, να συγκρατήσει μέγιστη τιμή μύζησης στο δοκίμιο 1500 kPa, χωρίς να εισχωρήσει ο αέρας στο δίσκο.

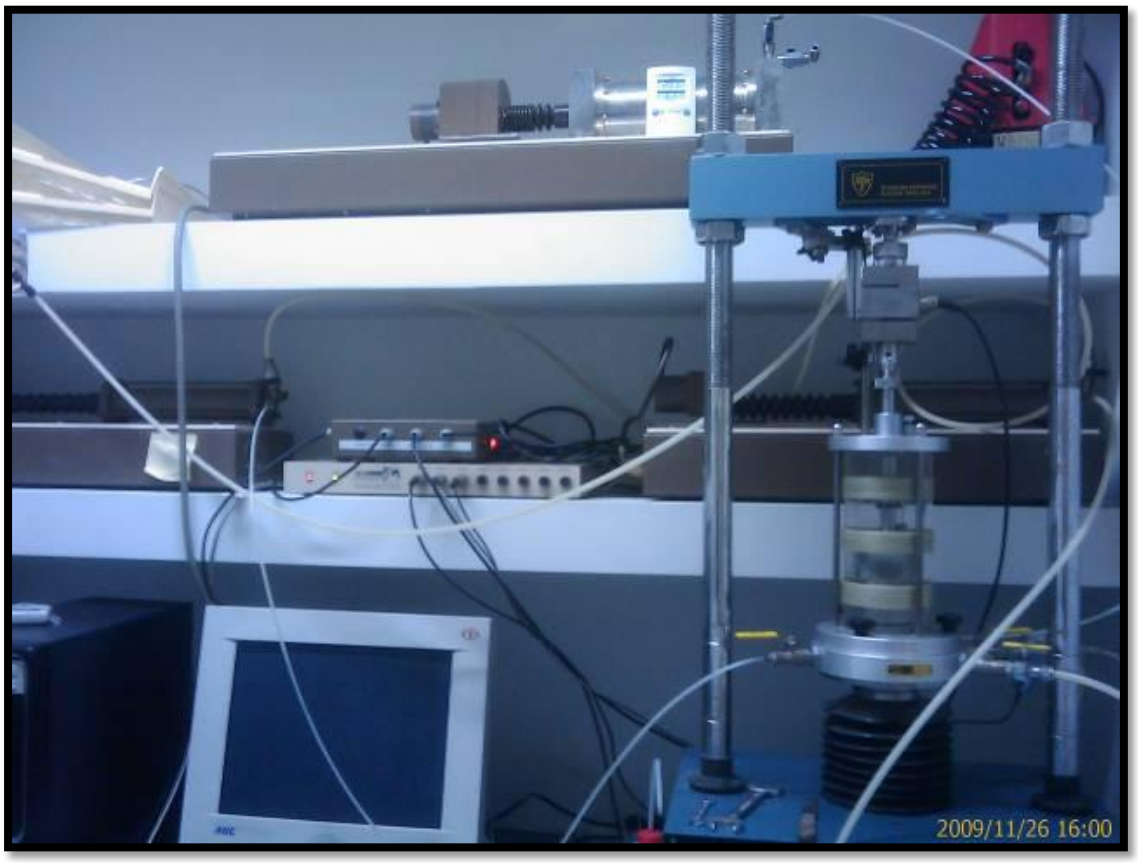
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των τριαξονικών δοκιμών της παρούσας έρευνας παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.3.8. Με αυτήν τη διάταξη επιτυγχάνεται η εφαρμογή της επιθυμητής τιμής μύζησης στο δοκίμιο και η άμεση μέτρηση των μεταβολών όγκου του δοκιμίου $\Delta V = \Delta V_{air} + \Delta V_{water}$.

Εικόνα 3.3.7: Κεραμικός δίσκος υψηλής πίεσης εισόδου αέρα (15bar) συνδεδεμένος στη συμβατική βάση τριαξονικής δοκιμής



Εικόνα 3.3.8: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του δοκιμίου

Στα πλαίσια της αναβάθμισης της τριαξονικής διάταξης εγκαταστάθηκε και το αντίστοιχο λογισμικό ελέγχου GDSLAB 4D UNSAT, το οποίο επιτρέπει τον έλεγχο των διαδρομών τάσεων τεσσάρων διαστάσεων, δηλαδή παράλληλο αυτόματο έλεγχο των κατακόρυφων και οριζόντιων τάσεων, καθώς και των πιέσεων αέρα και νερού των πόρων. Η πειραματική διάταξη εγκαταστάθηκε σε απομονωμένο θάλαμο με έλεγχο της εσωτερικής του θερμοκρασίας με ακρίβεια ±0.5^{o}C για να ελαχιστοποιείται η επίδραση των μεταβολών της εξωτερικής θερμοκρασίας στις μετρήσεις μεταβολών του όγκου αέρα από τον αντίστοιχο ελεγκτή. Η ακρίβεια των μετρήσεων των μεταβολών όγκου από τον ελεγκτή πίεσης-όγκου αέρα της GDS έχει μελετηθεί (Adams, Wulfsohn, & Fredlund, 1996) και είναι πολύ ικανοποιητική αν ληφθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις, όπως η διατήρηση ισοθερμικών συνθηκών, η αποφυγή διαρροών από τα σημεία συναρμογής της διάταξης και η εισαγωγή πεπιεσμένου αέρα στον ελεγκτή. Η χρονική απόκριση του ελεγκτή στις μεταβολές όγκου είναι αποδεκτή για δοκιμές αργού ρυθμού παραμόρφωσης. Η πειραματική διάταξη δοκιμών ακόρεστης μηχανικής του Εργαστηρίου Τεχν. Γεωλογίας και Υδρ/γιας του Α.Π.Θ. φαίνεται στην Εικόνα 3.3.9.



Εικόνα 3.3.9: Η πειραματική διάταξη δοκιμών ακόρεστης μηχανικής του Εργαστηρίου Τεχν. Γεωλογίας και Υδρ/γιας του Τμ. Γεωλογίας του Α.Π.Θ.

3.4 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΣΠΡΟΒΑΛΤΑΣ

Κύριος στόχος της εργαστηριακής διερεύνησης της διατμητικής αντοχής των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας σε ακόρεστες συνθήκες ήταν η εκτέλεση δοκιμών στα γεωυλικά της Ενότητας C, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του βαθμού κορεσμού στον παράγοντα της συνοχής τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι το εργαστηριακό πρόγραμμα επικεντρώθηκε στην Ενότητα C, επειδή αποτελεί εδαφικό υλικό μικρής αντοχής, το οποίο φαίνεται να ελέγχει την ευστάθεια των εξεταζόμενων τεχνητών πρανών. Επιπρόσθετα, το εξεταζόμενο υλικό αποτελεί γεωυλικό ειδικής κατηγορίας (special case), για το οποίο ο προσδιορισμός και μόνον των ακόρεστων μηχανικών του παραμέτρων αποτελεί σημαντική συμβολή στην έρευνα των ακόρεστων εδαφών και της μηχανικής συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών. Τελικός στόχος της πειραματικής διερεύνησης είναι ο προσδιορισμός της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης Εδάφους της Ενότητας C και ο προσδιορισμός της γωνίας φ^b. Επιπρόσθετα, γίνεται εκτίμηση της συμπεριφοράς μεταβολής του όγκου του εξεταζόμενου εδάφους σε σχέση με τις μεταβολές στο βαθμό κορεσμού (Χατζηγώγος Ν. Θ., Μακεδών, Δημόπουλος, Τσότσος, & Χρηστάρας, 2010).

3.4.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Για την εργαστηριακή διερεύνηση του προβλήματος σχεδιάστηκε πρόγραμμα δοκιμών τριαξονικής αντοχής CD δηλαδή βραδείας δοκιμής σε στερεοποιημένα δοκίμια με αποστράγγιση. Διαμορφώθηκαν 10 κυλινδρικά δοκίμια από αναζυμωμένο υλικό το οποίο είχε προηγουμένως συμπυκνωθεί στην επί τόπου υπολογισμένη ξηρή του πυκνότητα (γ_d = 1,37 gr/cm^3). Το ένα δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης Εδάφους (Soil-Water Characteristic Curve). Στα υπόλοιπα 9 εκτελέστηκαν ισάριθμες δοκιμές CD για τρεις διαφορετικές τιμές πλευρικής τάσης σ_3, σε τρεις διαφορετικές τιμές μύζησης, όπως δείχνει ο Πίνακας 3.4.1.

Πίνακας 3.4.1: Πρόγραμμα τριαξονικών δοκιμών CD για το υπολειμματικό έδαφος της Ενότητας C

u_a-u_w (kPa)	σ_3-u_a (kPa)		
200	50	100	150
400	50	100	150
800	50	100	150

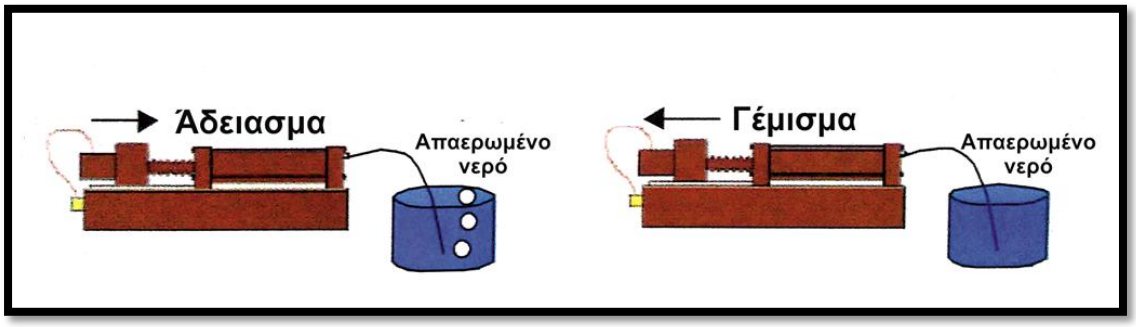
Κατά την εκτέλεση των δοκιμών το δοκίμιο στερεοποιείται σε μια τάση αντιπροσωπευτική της επί τόπου εντατικής κατάστασης. Στις συγκεκριμένες δοκιμές η τάση στερεοποίησης ήταν σ_3-u_a =70 kPa. Το έδαφος στερεοποιείται σε ισοτροπική

τάση σ_3-u_a ενώ παράλληλα η πίεση του νερού και του αέρα των πόρων διατηρούνται σε θετικές τιμές u_a και u_w αντίστοιχα, τέτοιες ώστε να επιτευχθεί εργαστηριακά μία τιμή μύζησης μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση (101,3 kPa).

Η επιλογή της χρήσης αναζυμωμένων δοκιμίων έγινε για να εξαιρεθεί από τη διερεύνηση η πιθανή ύπαρξη υπολειμματικής δομής. Είναι σημαντικό να προσδιορισθούν τα ακόρεστα μηχανικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου εδάφους τα οποία ελέγχονται από τη φύση του υλικού και ο ρόλος της υπολειμματικής δομής να διερευνηθεί ξεχωριστά σε διαφορετικό κύκλο δοκιμών. Επίσης, εξαιτίας της ιδιότητας αναπροσανατολισμού των πλακοειδών αργιλικών ορυκτών της Ενότητας C αναμένεται κατά τη διάρκεια των δοκιμών η δημιουργία εσωτερικής ανισοτροπίας. Η ανισοτροπία αυτή περιγράφεται από την παραμένουσα, υπολογιζόμενη από τις εργαστηριακές δοκιμές, αντοχή και προσεγγίζει την αντοχή πιθανών ζωνών αδυναμίας λόγω υπολειμματικής δομής.

3.4.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥ ΔΙΣΚΟΥ (HAEPD)

Για να έχει τη δυνατότητα ο HAEPD στη βάση της πειραματικής διάταξης να διατηρήσει τη διαφορά πιέσεων u_a-u_w στο εξεταζόμενο δοκίμιο θα πρέπει αρχικά να κορεσθεί με νερό. Η διαδικασία κορεσμού εκτελείται σε τρία στάδια και για ένα δίσκο 15bar, όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε, διαρκεί περίπου μία εβδομάδα. Ο κορεσμός γίνεται σε τρία στάδια με εφαρμογή μίας αντιπίεσης u_w (backpressuring) από τον ελεγκτή πίεσης νερού που είναι συνδεδεμένος στη βάση της συσκευής. Σε πρώτο στάδιο πρέπει να διασφαλισθεί η μη ύπαρξη αέρα στον ελεγκτή και στο σωλήνα σύνδεσης του ελεγκτή με το δίσκο. Η εξαέρωση του ελεγκτή γίνεται με την εκκένωση και επαναπλήρωσή του με εξαερωμένο νερό. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μία πίεση της τάξης των 25kPa για να επιτευχθεί ροή νερού από τον ελεγκτή στη σωλήνωση και μόλις σταματήσουν να βγαίνουν φυσαλίδες αέρα γίνεται αμέσως σύνδεση της σωλήνωσης με το δίσκο.



Εικόνα 3.4.1: Διαδικασία εξαέρωσης του ελεγκτή πίεσης-όγκου νερού

Κατά το δεύτερο στάδιο εφαρμόζεται στο κάτω μέρος του δίσκου μία μκρή θετική πίεση νερού η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 50kPa, έτσι ώστε να επιτευχθεί σταδιακή απομάκρυνση του αέρα από τους πόρους του δίσκου χωρίς να υποστούν οποιαδήποτε διόγκωση οι πόροι του. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να εμφανισθεί νερό στην επάνω επιφάνεια του δίσκου και διαρκεί περίπου 24 ώρες. Κατά το τρίτο στάδιο στο δίσκο εφαρμόζεται μία κανονική πίεση κυψέλης και μπορεί

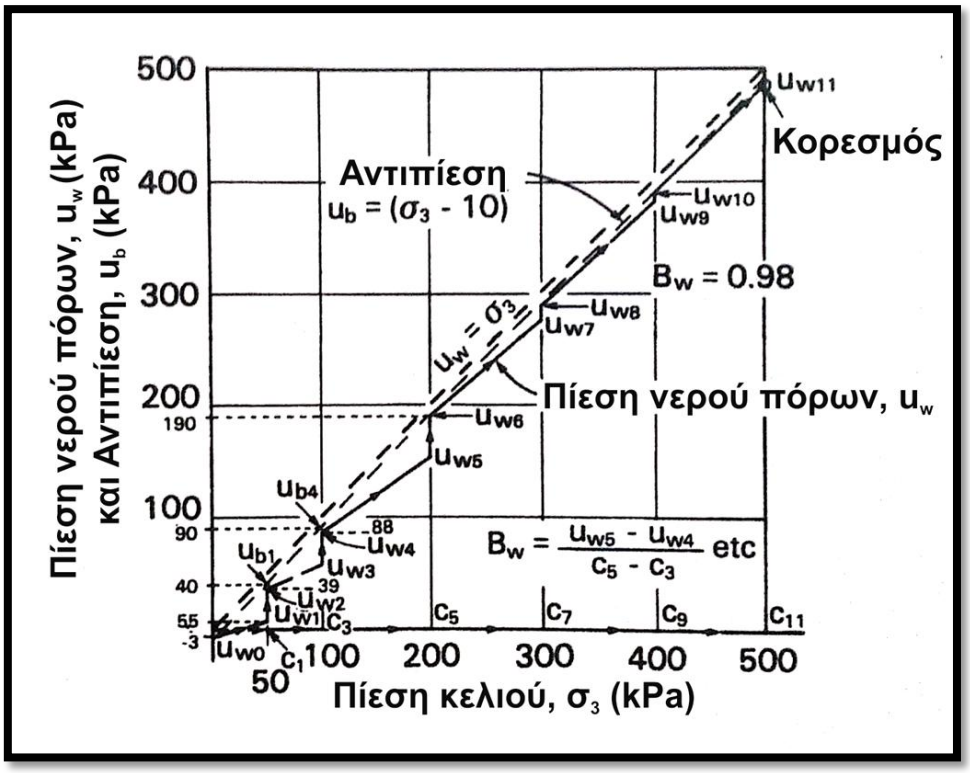
το νερό να κινηθεί προς την κανονική διεύθυνση, δηλαδή από την κυψέλη προς τον ελεγκτή. Εφαρμόζεται πίεση κελιού (σ_3=100kPa), αντίστοιχη με αυτήν των σχεδιαζόμενων δοκιμών, αφήνοντας ανοικτή την αναμονή σύνδεσης με τον ελεγκτή μέχρις ότου εξέλθει από αυτήν νερό. Η παραπάνω διαδικασία διαρκεί περίπου δύο ημέρες.

3.4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

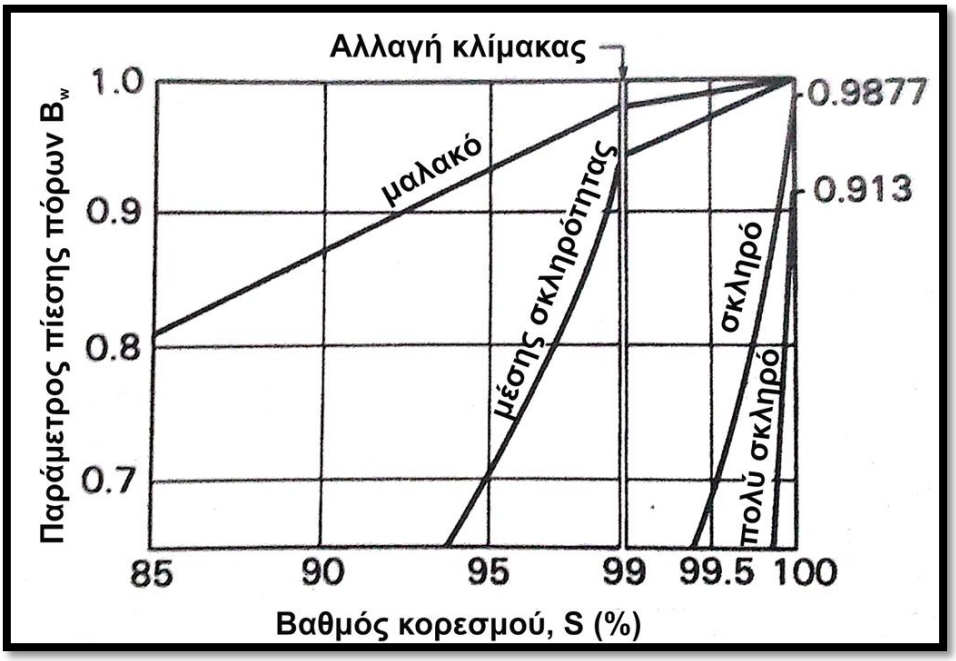
Για την εκτέλεση δοκιμών σε ακόρεστες συνθήκες η αρχική κατάσταση των δοκιμίων είναι συνήθως με βαθμό κορεσμού 100%. Κατά τη διαδικασία των δοκιμών, πρέπει πρώτα το δοκίμιο να φτάσει σε κατάσταση κορεσμού και στη συνέχεια να εφαρμοσθεί τεχνητά η επιθυμητή τιμή μύζησης μέσω των πιέσεων u_a και u_w, η οποία να αντιστοιχεί στον επιθυμητό βαθμό κορεσμού για την εκτέλεση της δοκιμής διάτμησης. Η αναγωγή της εφαρμοζόμενης τιμής μύζησης σε μία τιμή βαθμού κορεσμού γίνεται μέσω της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης του εξεταζόμενου υλικού.

Η διαδικασία κορεσμού που ακολουθείται είναι η κλασσική διαδικασία σταδιακής αύξησης της αντιπίεσης u_w στη βάση του δοκιμίου, η οποία εφαρμόζεται μετά από μία αντίστοιχη προσαύξηση της πίεσης κελιού σ_3. Γίνεται υπολογισμός της τιμής $B_w = u_w/\sigma_3$ που αντιπροσωπεύει την απόκριση της πίεσης των πόρων σε αύξηση της ολόπλευρης πίεσης στο κελί (Head, 1986). Κορεσμός επιτυγχάνεται για τιμή B_w=1 (Εικόνα 3.4.2). Για συμπυκνωμένα δείγματα, ο κορεσμός επιτυγχάνεται συνήθως για τιμές αντιπιέσεων της τάξης των 400-750 kPa (Bishop & Henkel, 1692), ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις εδαφών που κορεννύονται σε τιμές B_w<1 όταν η συμπιεστότητα της εδαφικής δομής τους είναι πολύ μικρή. Στη βιβλιογραφία δίνονται θεωρητικές τιμές B_w εδαφών για διαφορετικές τιμές βαθμού κορεσμού και για διαφορετικές τιμές συμπιεστότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4.3 (Black & Lee, 1973).

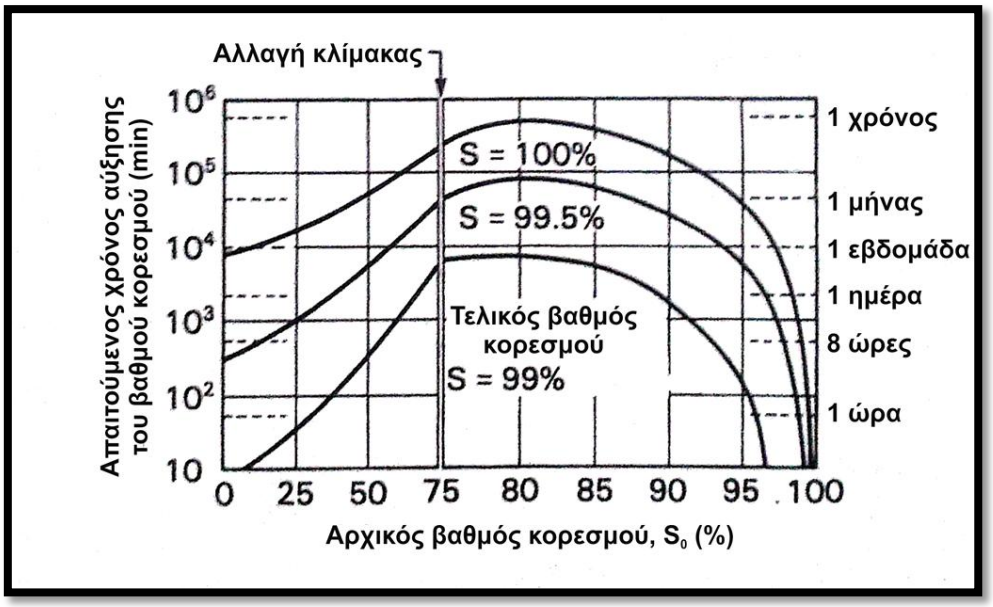
Η εφαρμογή αντιπίεσης στη βάση του δοκιμίου προκαλεί συμπίεση του αέρα των πόρων σύμφωνα με το νόμο του Boyle και διάλυση αυτού στο νερό των πόρων σύμφωνα με το νόμο του Henry. Η συμπίεση του αέρα των πόρων είναι στην ουσία στιγμιαία, προκαλώντας αύξηση του βαθμού κορεσμού, ενώ η διαδικασία της διάλυσης απαιτεί περισσότερο χρόνο. Επομένως, απαιτείται αρκετός χρόνος εφαρμογής κάθε σταδίου αύξησης της αντιπίεσης για να επέλθει ισορροπία. Θεωρητικές τιμές απαιτούμενου χρόνου για αύξηση του βαθμού κορεσμού δίνονται στην Εικόνα 3.4.4 (Black & Lee, 1973).



Εικόνα 3.4.2: Εφαρμογή σταδιακών αυξήσεων της πίεσης κυψέλης και της αντιπίεσης και το αποτέλεσμα της απόκρισης της πίεσης πόρων κατά τη διαδικασία κορεσμού δοκιμίου (Head, 1986)

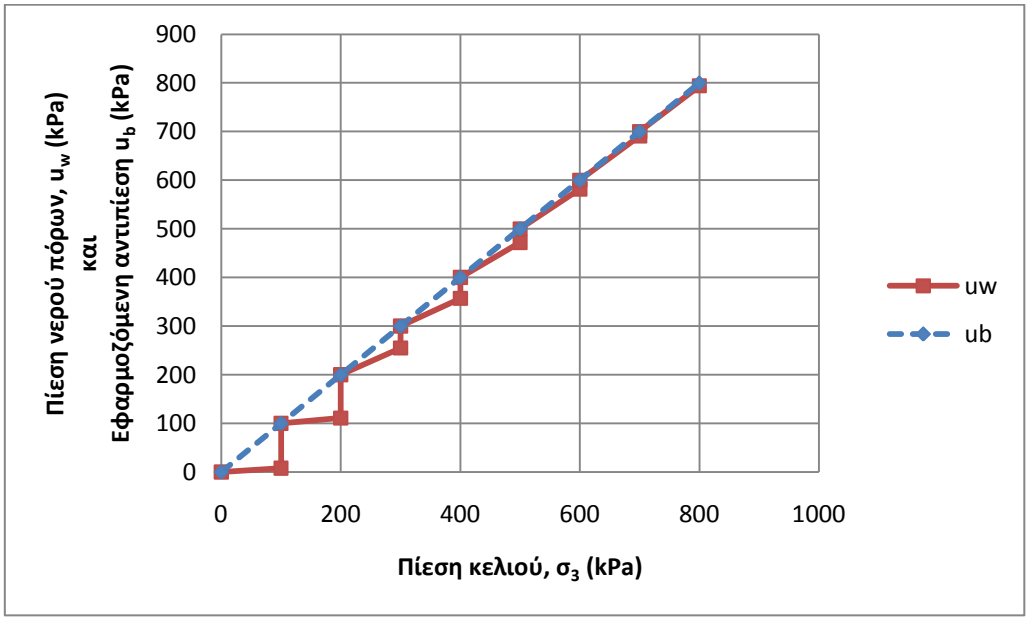


Εικόνα 3.4.3: Θεωρητικές τιμές του δείκτη *B_w* για διαφορετικούς βαθμούς κορεσμού και συμπιεστότητας (Black & Lee, 1973)



Εικόνα 3.4.4: Θεωρητικές τιμές του απαιτούμενου χρόνου αύξησης του βαθμού κορεσμού σε σχέση με την αρχική τιμή του (Black & Lee, 1973)

Η εφαρμογή σταδιακών προσαυξήσεων αντιπίεσης κατά τη διαδικασία κορεσμού των δοκιμίων του εξεταζόμενου υπολειμματικού εδάφους της Ενότητας C της Ασπροβάλτας παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4.5. Ο αρχικός βαθμός κορεσμού ήταν περίπου 97% και η διαδικασία κορεσμού διήρκησε κατά μέσο όρο μία εβδομάδα.



Εικόνα 3.4.5: Εφαρμογή σταδιακών προσαυξήσεων αντιπίεσης κατά τη διαδικασία κορεσμού των δοκιμίων του εξεταζόμενου υπολειμματικού εδάφους της Ασπροβάλτας

3.4.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η διαδικασία εργαστηριακού υπολογισμού της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης ενός εδάφους είναι μία βασική διαδικασία που πρέπει να ακολουθείται πριν από την εκτέλεση οποιουδήποτε πειράματος σε ακόρεστες συνθήκες. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εφαρμογή μίας σταθερής ολόπλευρης πίεσης σ_3 και μίας μικρής σταθερής εκτροπικής τάσης σ_1-σ_3 για να διασφαλίζεται η καλή επαφή του δοκιμίου με τη βάση της τριαξονικής συσκευής. Το δοκίμιο ξεκινά από κορεσμένη κατάσταση και εφαρμόζονται αρχικά ισοδύναμες πιέσεις αέρα και νερού στους πόρους του. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής απαραίτητες προϋποθέσεις είναι οι εξής:

- Η σ_3 να είναι μεγαλύτερη από την πίεση αέρα u_a και την πίεση νερού u_wτων πόρων
- Η πίεση του αέρα των πόρων u_a να είναι μεγαλύτερη από την πίεση νερού των πόρων u_w
- Η διαφορά μεταξύ των πιέσεων αέρα u_a και νερού των πόρων u_w να μην ξεπερνά την πίεση εισόδου αέρα του κεραμικού δίσκου (HAEPD) στη βάση της συσκευής
- Ο κεραμικός δίσκος θα πρέπει να είναι κορεσμένος

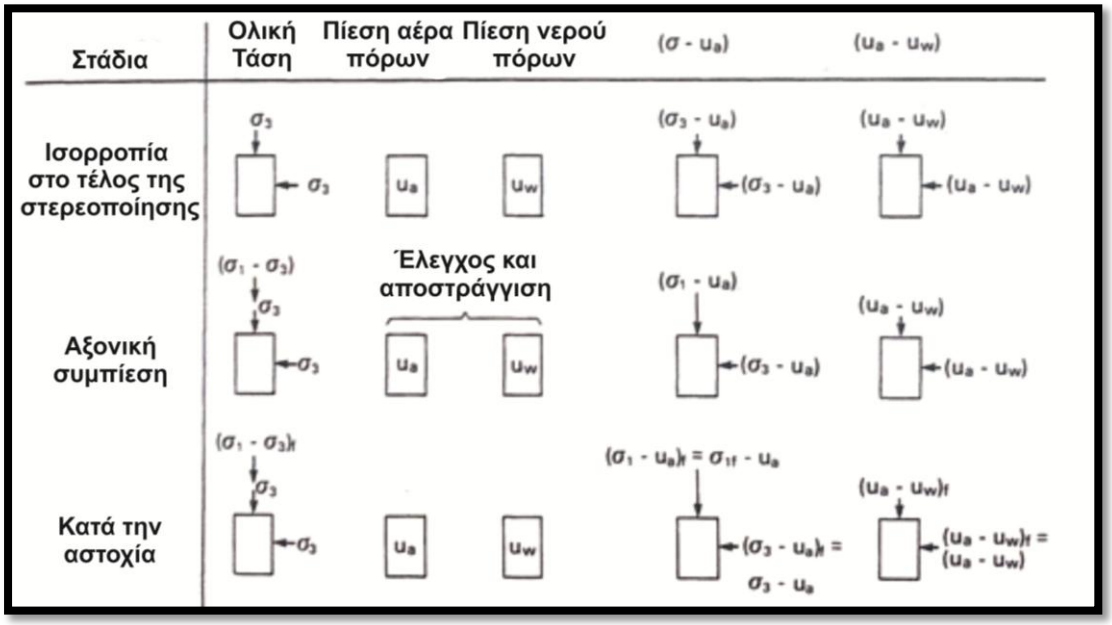
Στη συνέχεια, εφαρμόζεται σταδιακή μείωση της εφαρμοζόμενης αντιπίεσης u_w και μέτρηση της μεταβολής του όγκου του νερού στον αντίστοιχο ελεγκτή. Το κάθε στάδιο μείωσης, που αντιπροσωπεύει διαφορετική τιμή μύζησης, εφαρμόζεται όταν επέλθει ισορροπία στη μεταβολή του όγκου του νερού. Η απόφαση για τον τερματισμό του κάθε σταδίου απομείωσης της u_w μπορεί να ληφθεί με βάση την καμπύλη της μεταβολής του όγκου του νερού με το χρόνο, η οποία εμφανίζεται σε αληθινό χρόνο από το λογισμικό χρήσης της δοκιμής (Ray & Morris, 1995). Παρακάτω δίνονται οι τιμές εφαρμογής της διαδικασίας υπολογισμού της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης της εξεταζόμενης Ενότητας C (Πίνακας 3.4.2).

Πίνακας 3.4.2: Τιμές εφαρμογής της διαδικασίας υπολογισμού της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης Εδάφους της εξεταζόμενης Ενότητας C

Στάδιο	σ_3(kPa)	σ_1-σ_3(kPa)	u_a(kPa)	u_w(kPa)
1	1200	10	1160	1150
2	1200	10	1160	1050
3	1200	10	1160	950
4	1200	10	1160	850
5	1200	10	1160	750
6	1200	10	1160	650
7	1200	10	1160	550
8	1200	10	1160	450
9	1200	10	1160	350
10	1200	10	1160	250
11	1200	10	1160	150
12	1200	10	1160	50

3.4.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ CD

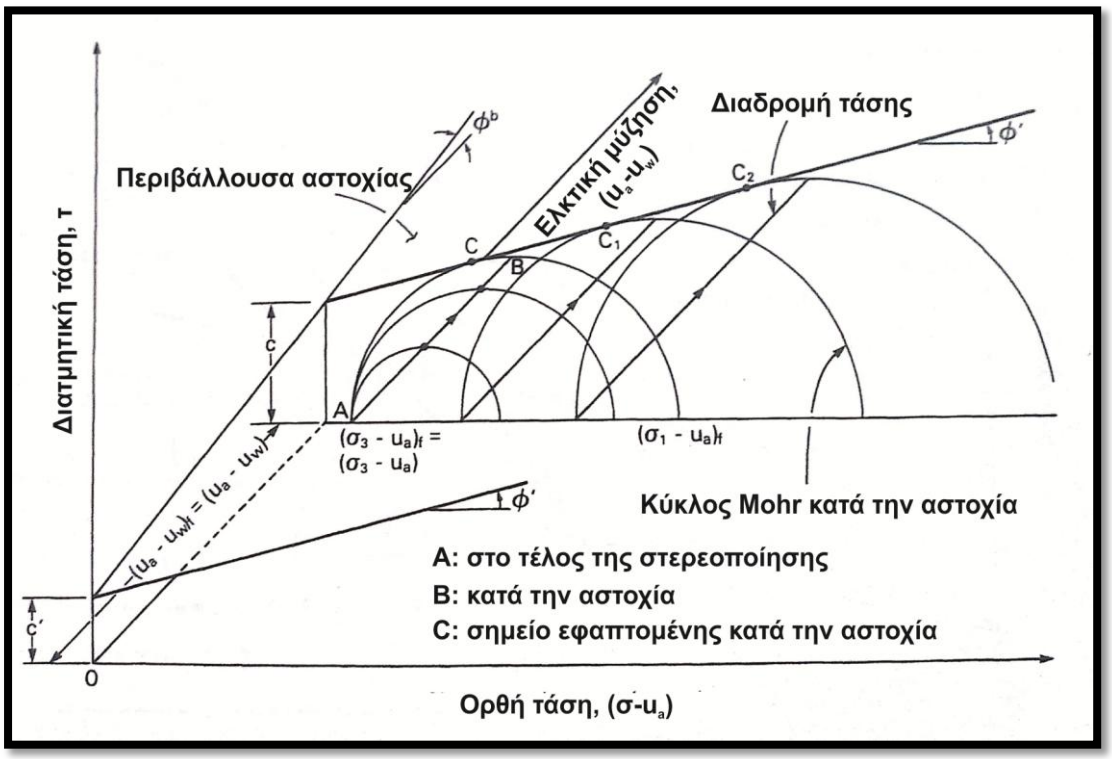
Η διαδικασία εκτέλεσης των τριοαξονικών δοκιμών CD αναφέρεται σε δοκιμές, όπου τα δοκίμια αρχικά στερεοποιούνται και στη συνέχεια φορτίζονται σε συνθήκες αποστράγγισης, τόσο της αέριας όσο και της υγρής φάσης (Εικόνα 3.4.6). Τα δοκίμια στερεοποιούνται σε τάση αντιστοιχη με αυτήν που συναντάται επί τόπου ή υπολογίζεται στο σχεδιασμό. Για την περίπτωση των ορυγμάτων της Ασπροβάλτας εκτιμήθηκε σ_3-u_a=70 kPa. Οι πιέσεις αέρα και νερού των πόρων ελέγχονται σε θετικές τιμές και παραμένουν σταθερές έτσι ώστε να διατηρηθεί σταθερή η τιμή μύζησης στα δοκίμια. Στο τέλος της διαδικασίας στερεοποίησης το κάθε εδαφικό δοκίμιο έχει ολόπλευρη τάση σ_3-u_a και τιμή μύζησης u_a-u_w, η οποία έχει επιλεγεί για την εκάστοτε δοκιμή.



Εικόνα 3.4.6: Εντατική κατάσταση κατά τη διάρκεια τριαξονικής δοκιμής με στερεοποίηση και αποστράγγιση CD (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Το εδαφικό δοκίμιο συμπιέζεται αξονικά κατά τη διάρκεια της φόρτισης με εφαρμογή εκτροπικής τάσης σ_1-σ_3, με αποστράγγιση του αέρα και του νερού των πόρων, ενώ οι ελεγκτές διατηρούν σταθερές τις πιέσεις μετά το τέλος της διαδικασίας στερεοποίησης. Η αξονική φόρτιση εφαρμόζεται με αργό ρυθμό για την αποφυγή ανάπτυξης πιέσεων νερού των πόρων και αυξάνεται έως ότου φτάσει στην κρίσιμη τιμή αστοχίας $(\sigma_1\text{-}u_a)_f$. Τυπικές διαδρομές τάσεων που ακολουθούνται κατά την εκτέλεση της δοκιμής για σταθερή τιμή μύζησης παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.4.7. Η δοκιμή διεξάγεται για διαφορετικές τιμές οριζόντιας κύριας τάσης σ_3-u_a. Το σημείο Α αντιπροσωπεύει την εντατική κατάσταση στο τέλος της στερεοποίησης και το σημείο Β την εντατική κατάσταση κατά την αστοχία. Κατά τη μετάβαση από το σημείο Α στο σημείο Β η τιμή της μύζησης παραμένει σταθερή και αυξάνεται μόνο η εκτροπική τάση. Η εφαπτομένη στους παραγόμενους κύκλους Mohr (σημεία C,C_1 και C_2) αντιπροσωπεύει την περιβάλλουσα αστοχίας για την τιμή μύζησης που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή, η οποία έχει κλίση φ' στο επίπεδο σ-u_a. Η

υπολογιζόμενη γωνία τριβής *φ'* έχει ίδια τιμή με την ενεργό γωνία τριβής που υπολογίζεται από δοκιμές διάτμησης σε κορεσμένες συνθήκες.

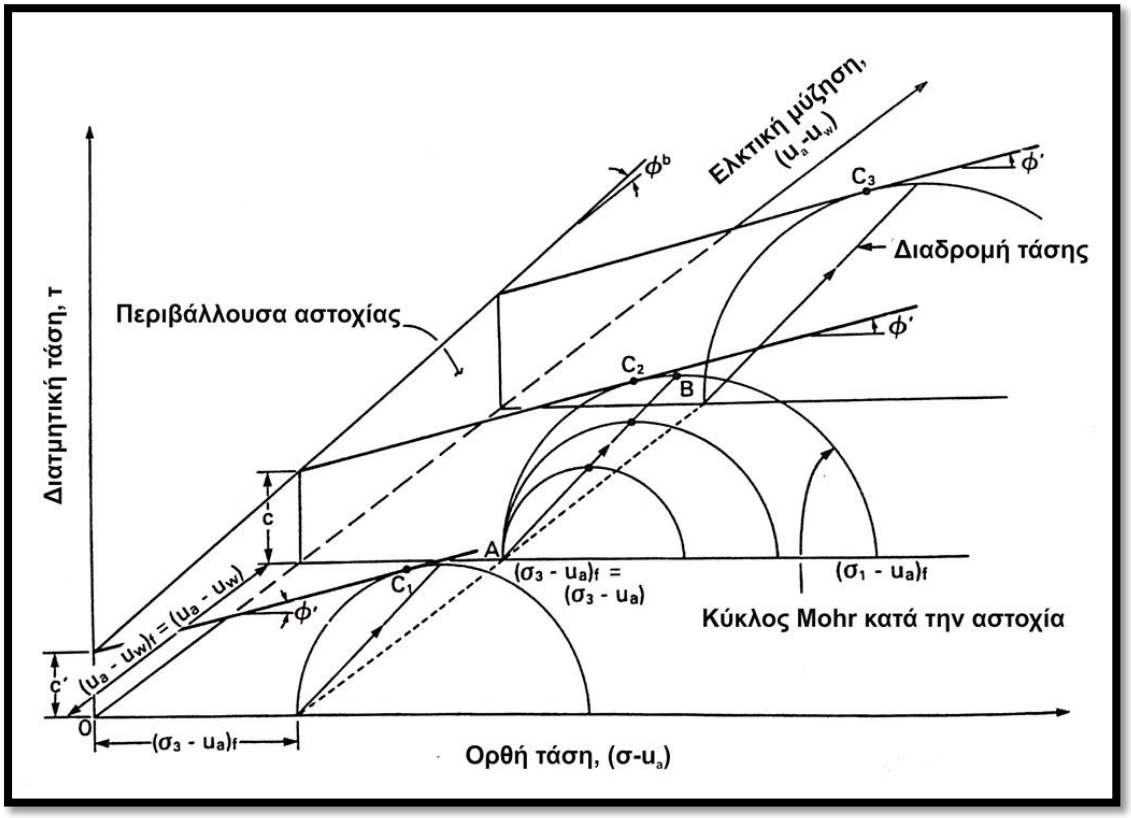


Εικόνα 3.4.7: Διαδρομές τάσεων κατά τη διάρκεια δοκιμής CD για διαφορετικές τιμές οριζόντιας τάσης υπό σταθερή μύζηση (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Τυπικές διαδρομές τάσεων που ακολουθούνται κατά την εκτέλεση της δοκιμής για διαφορετικές τιμές μύζησης παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.4.8. Οι κύκλοι Mohr αυξάνουν τη διάμετρό τους με αύξηση της μύζησης. Η εφαπτομένη στους κύκλους Mohr στα σημεία αστοχίας (σημεία C_1,C_2 και C_3) δεν αντιπροσωπεύει τη γωνία φ^b, διότι τα σημεία αυτά δεν βρίσκονται σε καθεστώς ίδιας οριζόντιας τάσης σ_3-u_a. Η περιβάλλουσα αστοχίας θα πρέπει να επεκταθεί στο επίπεδο διατμητικής τάσης-μύζησης για να δώσει τιμές συνοχής για διαφορετικές τιμές μύζησης και η κλίση της γραμμής που ενώνει τις τιμές αυτές δίνει τη γωνία φ^b.

Ένας σημαντικός παράγοντας επιρροής των αποτελεσμάτων των τριαξονικών δοκιμών είναι η επιλογή του ρυθμού παραμόρφωσης κατά την εκτέλεσή τους. Για την επιλογή αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η φύση του υπό εξέταση υλικού, το μήκος του δοκιμίου και η δυνατότητα αποστράγγισης του νερού μέσω του κεραμικού δίσκου μικρής διαπερατότητας. Έχουν προταθεί στο παρελθόν τυπικές τιμές ρυθμού παραμόρφωσης από αρκετούς ερευνητές (Bishop, Alpan, Blight, & Donald, 1960), (Bishop & Donald, 1961), (Donald, 1963), (Satija & Gulhati, 1979), (Ho & Fredlund, 1982) και (Chatawarangul, 1983). Στην περίπτωση της Ενότητας C των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας επιλέχθηκε ο μικρότερος δυνατός ρυθμός που μπορούσε να εφαρμοστεί από τις προδιαγραφές της διαθέσιμης τριαξονικής συσκευής, $1{,}6*10^{-5}$ mm/sec. Ο ρυθμός αυτός είναι ελαφρά μικρότερος από αντίστοιχους προτεινόμενους στη βιβλιογραφία και επιλέχθηκε έτσι ώστε να

μπορέσουν να εξετασθούν και δομικά χαρακτηριστικά του υλικού, δηλαδή να υπάρχει διαθέσιμος χρόνος ώστε να επιτευχθεί αναπροσανατολισμός των υφιστάμενων πλακοειδών ορυκτών και να διερευνηθεί η δυσμενέστερη περίπτωση.



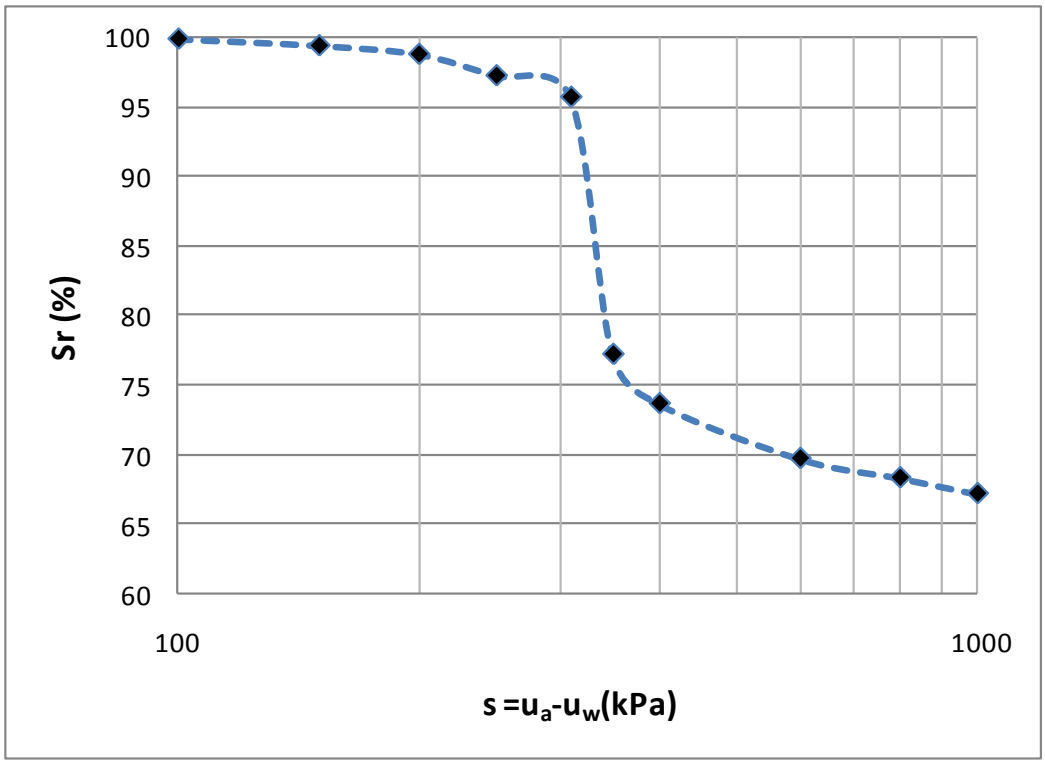
Εικόνα 3.4.8: Διαδρομές τάσεων κατά τη διάρκεια δοκιμής CD για διαφορετικές τιμές μύζησης υπό σταθερή οριζόντια τάση (Fredlund & Rahardjo, 1993)

3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

3.5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΥΖΗΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ C

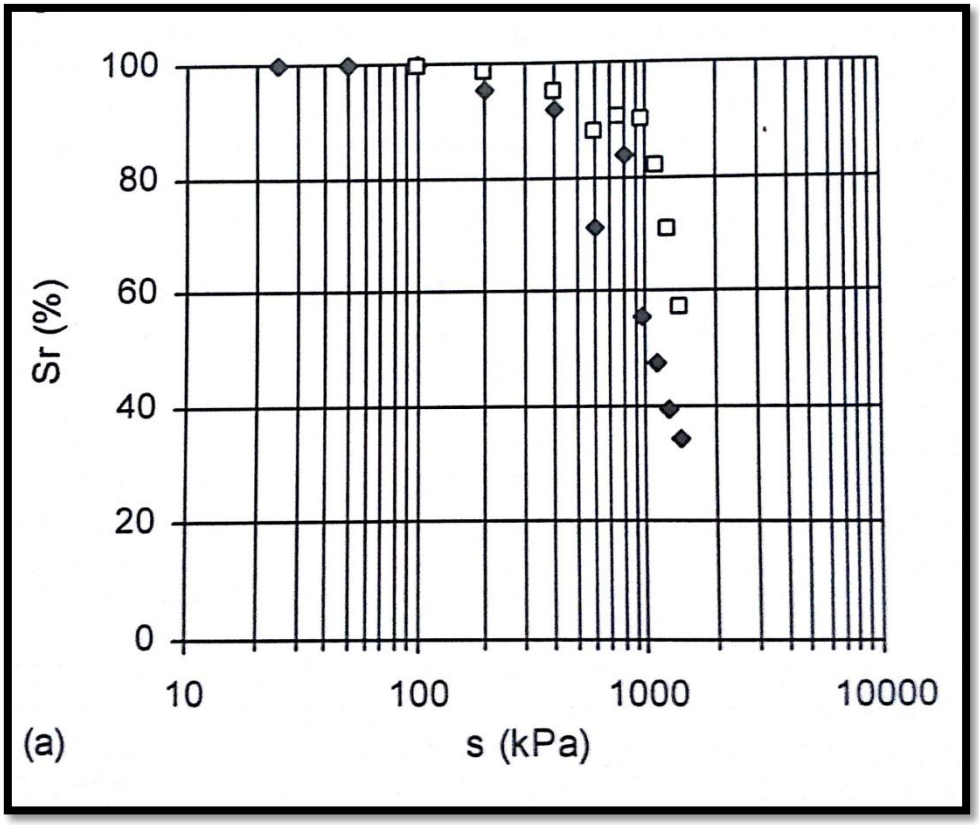
Η Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους προέκυψε με αρχική εφαρμογή πίεσης αέρα u_a=1160 kPa, πίεσης νερού u_w=1050 kPa και σταδιακή μείωση της τιμής της u_w, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5.1. Στην καμπύλη αυτή φαίνεται η τιμή μύζησης για την οποία επέρχεται εισαγωγή αέρα στο δοκίμιο (air entry value) και κατά συνέπεια αρχίζει η μείωση του βαθμού κορεσμού S_r. Για το συγκεκριμένο υλικό η τιμή αυτή είναι περίπου 300 kPa. Η σχετικά υψηλή αυτή τιμή αποδίδεται στη φύση του υλικού το οποίο είναι ιδιαίτερα λεπτόκοκκο όπως ήδη περιγράφηκε. Η τιμή της μύζησης για την οποία μεταβάλλεται η κλίση της Χ.Κ.Μ.Ε. είναι περίπου 400 kPa και αντιστοιχεί σε βαθμό κορεσμού 74% περίπου.

Συγκρίνοντας την Χ.Κ.Μ.Ε με τις μετρήσεις φυσικής υγρασίας του υλικού της Ενότητας C (Πίνακας 2.4.1), φαίνεται πως το υλικό σε βάθος βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού, ενώ στην επιφανειακή ζώνη έχουν μετρηθεί τιμές φυσικής υγρασίας που αντιστοιχούν σε βαθμό κορεσμού μεταξύ 73%-100%. Οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν σε τιμές μύζησης 0-400 kPa. Σημειώνεται πως επιφανειακά και σε ξηρές περιόδους έχουν μετρηθεί τιμές βαθμού κορεσμού που αντιστοιχούν σε τιμές μύζησης υψηλότερες των 800 kPa.



Εικόνα 3.5.1: Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους της Ενότητας C των υπολειμματικών εδαφών Ασπροβάλτας

Αναφορικά με τη χρήση αναζυμωμένων ή αδιατάρακτων δοκιμίων για τον προσδιορισμό της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης και με βάση αποτελέσματα Χ.Κ.Μ.Ε σε εδάφη του Ελληνικού χώρου (Εικόνα 3.5.2), φαίνεται πως τα αδιατάρακτα δείγματα έχουν ελαφρά μεγαλύτερη τιμή πίεσης εισόδου αέρα. Επίσης διατηρούν υψηλότερη τιμή βαθμού κορεσμού για την ίδια τιμή μύζησης παρόλο που και τα δύο είδη δειγμάτων του ίδιου εδάφους έχουν ίση τιμή δείκτη πόρων κατά την έναρξη της διαδικασίας ξήρανσης. Το φαινόμενο αυτό πιθανότατα να οφείλεται στο βαθμό συγκόλλησης που κάποια εδάφη διατηρούν σε αδιατάρακτη κατάσταση, χαρακτηριστικό που συναντάται συχνά και στα υπολειμματικά εδάφη (Bardanis & Kavvadas, 2008).



Εικόνα 3.5.2: Χαρακτηριστικές καμπύλες μύζησης για αναζυμωμένα και αδιατάρακτα δείγματα μάργας Κορίνθου (Bardanis & Kavvadas, 2008)

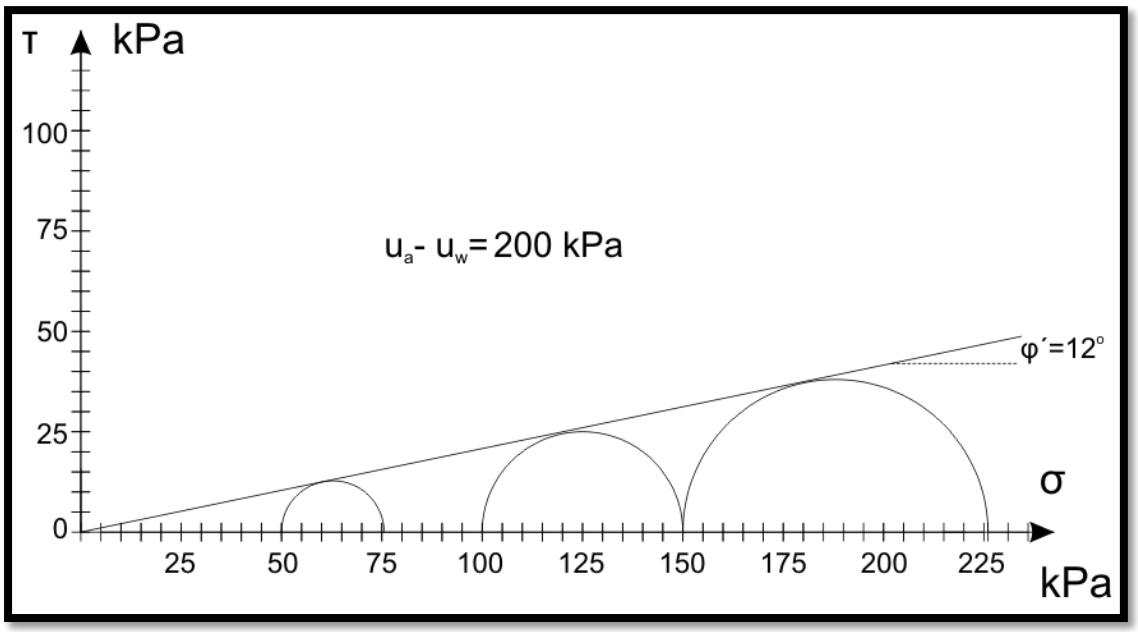
Με βάση τα στοιχεία της καμπύλης καθώς και τις επί τόπου τιμές υγρασίας του υλικού, για την εκτέλεση των δοκιμών θραύσης επελέγησαν οι τρεις τιμές μύζησης που παρουσιάζει ο Πίνακας 3.4.1. Η τιμή μύζησης u_a-u_w=200 kPa , όπως φαίνεται και από τη Χ.Κ.Μ.Ε. αντιστοιχεί πρακτικά σε συνθήκες κορεσμού (< 250 kPa), η τιμή μύζησης u_a-u_w=400 kPa βρίσκεται κοντά στην τιμή πίεσης εισόδου αέρα και αντιστοιχεί στον επί τόπου βαθμό κορεσμού που υπολογίστηκε κατά τη φάση εκδήλωσης των αστοχιών, ενώ τέλος η τιμή μύζησης u_a-u_w=800 kPa εισάγεται για να εκτιμηθεί η μεταβολή της διατμητικής αντοχής σε υψηλές τιμές μύζησης.

3.5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ CD ΤΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ C

Τα αποτελέσματα των δοκιμών CD που εκτελέστηκαν με βάση το πρόγραμμα δίνονται με τη μορφή διαγραμμάτων Mohr στην Εικόνα 3.5.3, την Εικόνα 3.5.4 και την Εικόνα 3.5.5 για τις διαφορετικές τιμές μύζησης που εφαρμόσθηκαν, ενώ ο Πίνακας 3.5.1 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των χαρακτηριστικών αντοχής.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι οι εργαστηριακές τιμές γωνίας τριβής φ' που προέκυψαν μπορούν να θεωρηθούν μικρές και παρατηρείται μικρή αύξησή τους με την αύξηση της μύζησης. Οι τιμές γωνίας τριβής φ'_r που αντιστοιχούν στην παραμένουσα αντοχή του υλικού είναι σταθερές και παρουσιάζουν μικρή απόκλιση από τις τιμές φ' σε σχέση με τη θεωρητικά αναμενόμενη. Για τιμή μύζησης u_a-u_w=200 kPa η τιμή της φ'_r δεν διαφοροποιείται από την τιμή της φ'.

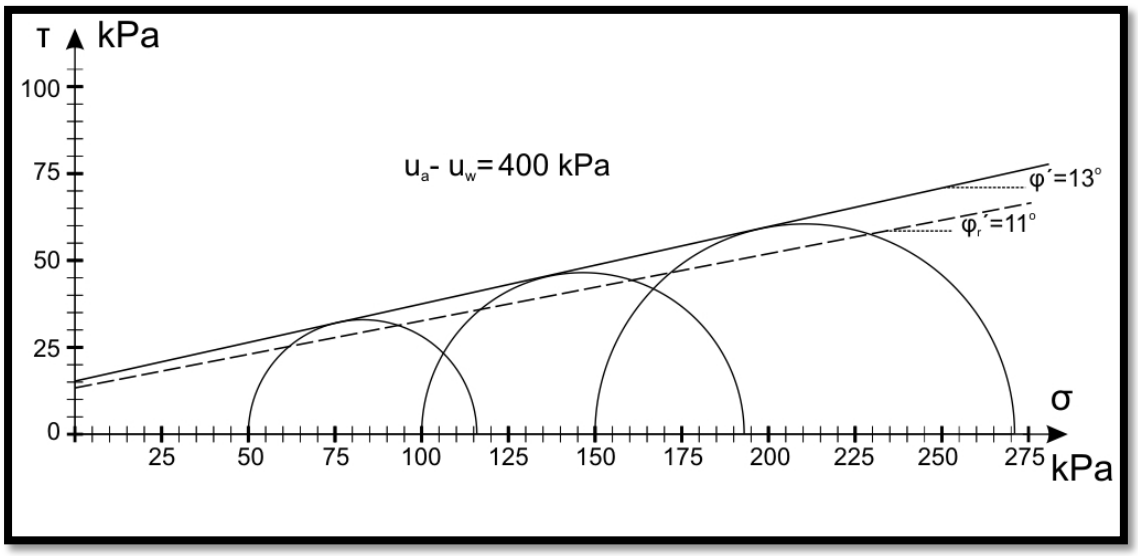
Οι τιμές φαινόμενης συνοχής *C* που υπολογίστηκαν, όπως φαίνεται στον Πίνακας 3.5.1, παρουσιάζουν μια γραμμική αύξηση σε σχέση με την τιμή της μύζησης, όπως προβλέπει η Εξίσωση (16).



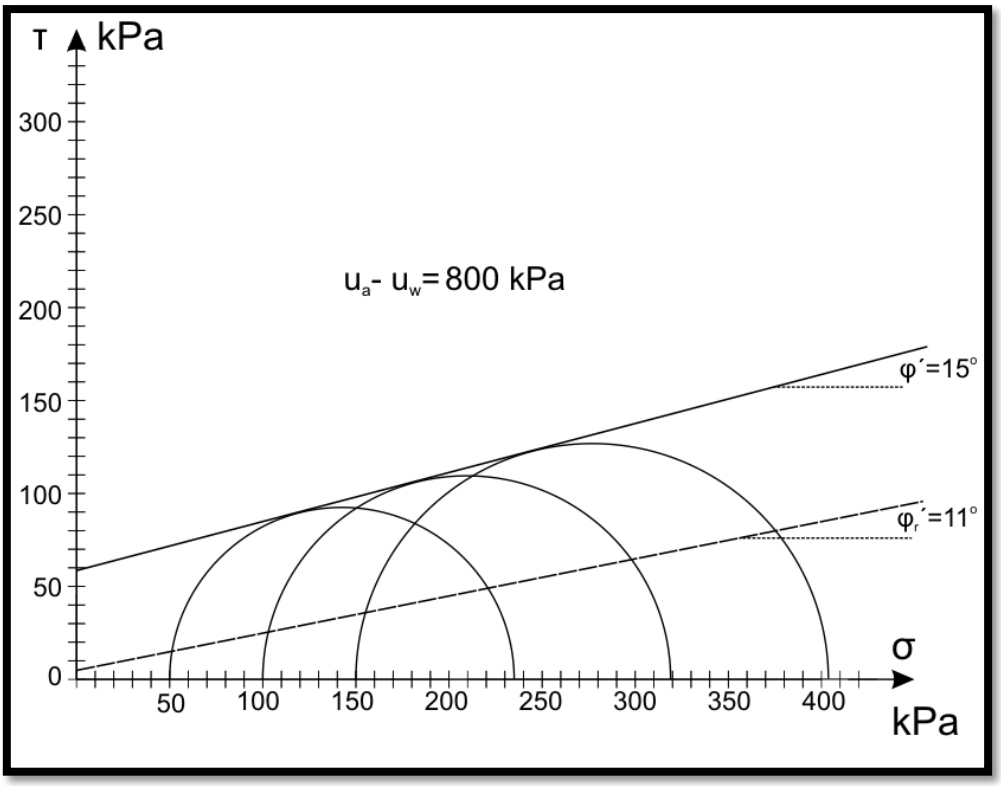
Εικόνα 3.5.3: Δοκιμές CD για u_a-u_w=200 kPa

Η μεταβολή της αξονικής παραμόρφωσης ε (%) με τη μεταβολή της εκτροπικής τάσης σ_1-σ_3 δίνεται στην Εικόνα 3.5.6 για τις διαφορετικές τιμές μύζησης. Σύμφωνα με τους Rahardjo et al., (2004) η αύξηση της μύζησης συνεισφέρει στην αύξηση της στιφρότητας, θραυσιμότητας και διογκωσιμότητας του υλικού, ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές πλευρικής τάσης. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 3.5.6 που αναφέρεται σε τιμή σ_3-u_a=100 kPa, παρατηρείται πράγματι μια αύξηση της στιφρότητας των δοκιμίων, η οποία είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η τιμή της μύζησης και φαίνεται από τη μεταβολή της κλίσης των σχετικών καμπυλών (Rahardjo, Heng, & Choon, 2004). Επίσης από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει ότι οι τιμές αξονικής παραμόρφωσης για τις οποίες επέρχεται θραύση των δοκιμίων είναι

γενικά αυξημένες (ε>20%) ενώ η αύξηση της μύζησης επιφέρει και εντονότερη θραυσιγενή συμπεριφορά. Γενικά η συμπεριφορά του υλικού για υψηλές τιμές μύζησης προσομοιάζει με αυτήν ενός υπερστερεοποιημένου υλικού και για χαμηλές τιμές μύζησης με αυτήν ενός κανονικά στερεοποιημένου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5.7 (Murray & Sivakumar, 2010).



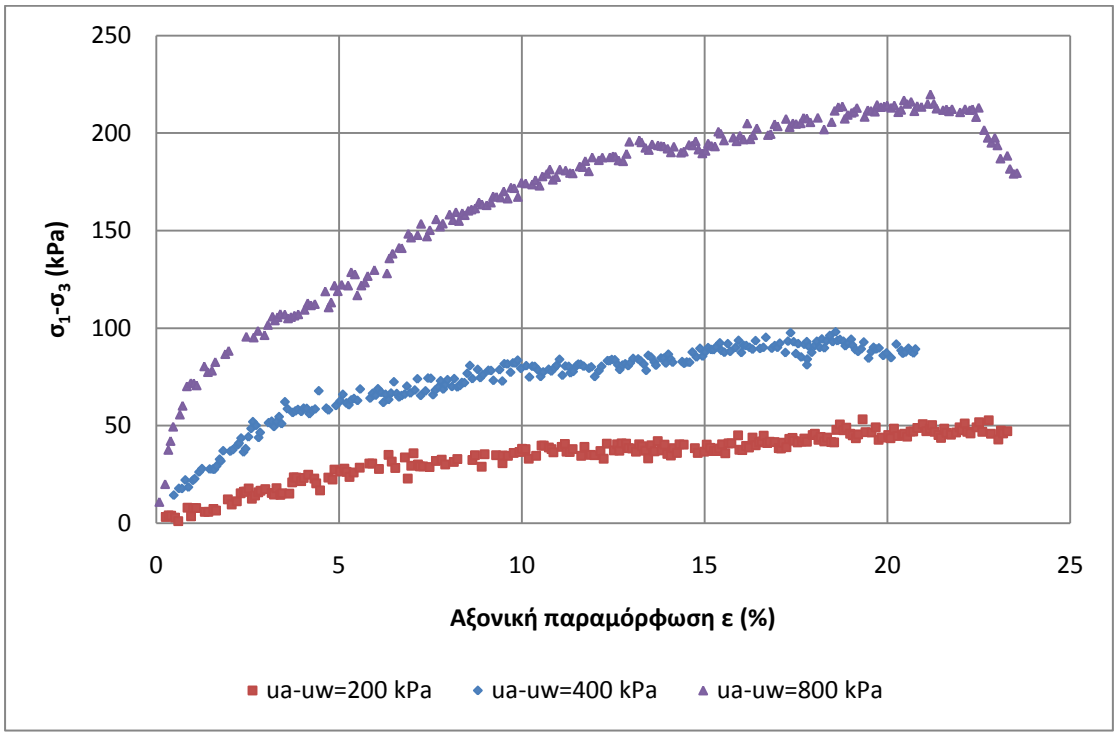
Εικόνα 3.5.4: Δοκιμές CD για ua-uw=400 kPa



Εικόνα 3.5.5: Δοκιμές CD για u_a-u_w=800 kPa

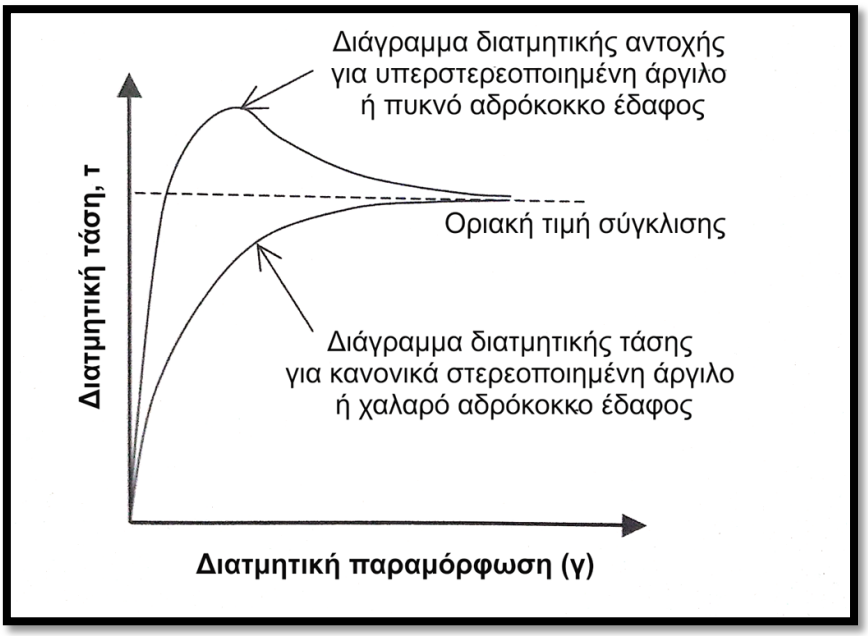
Πίνακας 3.5.1: Αποτελέσματα των δοκιμών CD

u_a-u_w	200	400	800
σ_1-u_a kPa	76 150 223	116 193 271	235 319 404
σ_3-u_a kPa	50 100 150	50 100 150	50 100 150
c´ kPa	0	15,28	58,5
c´$_r$ kPa	0	13,31	4,81
φ´	12°	13°	15°
φ´$_r$	12°	11°	11°
φ´$_b$	8,1°		

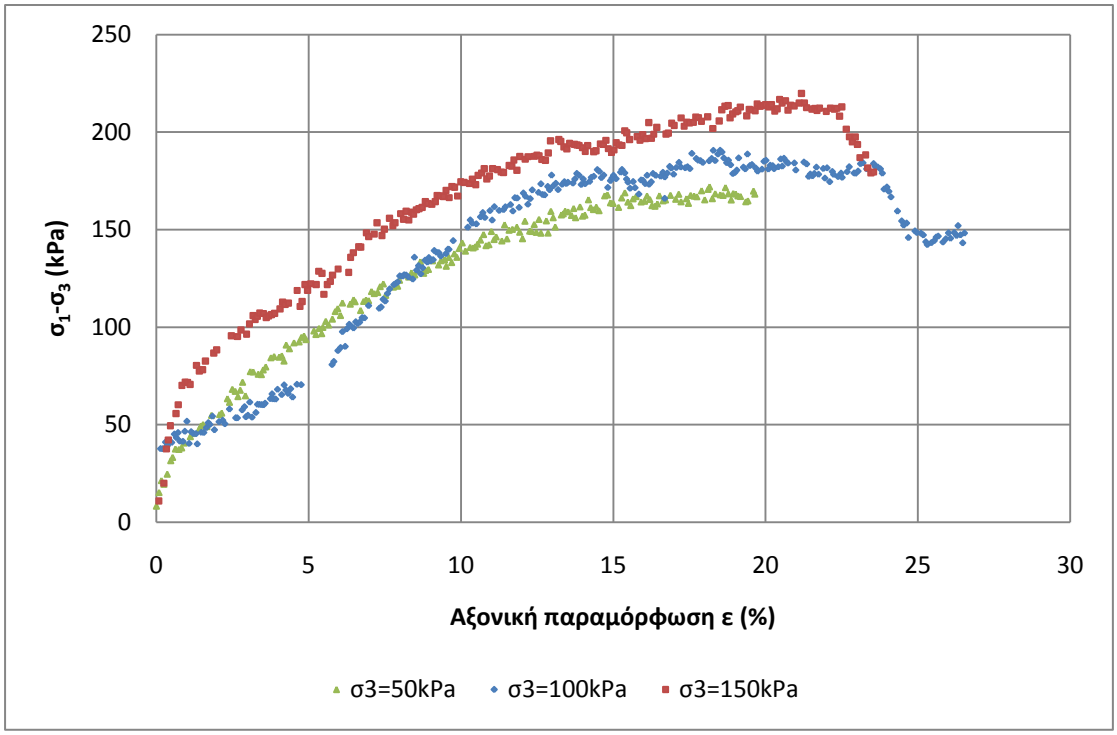


Εικόνα 3.5.6: Διάγραμμα εκτροπικής τάσης (σ_1-σ_3) - αξονικής παραμόρφωσης (ε) για σ_3-u_a=100 kPa και διαφορετικές τιμές μύζησης.

Στην Εικόνα 3.5.8 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα εκτροπικής τάσης (σ_1-σ_3) - αξονικής παραμόρφωσης (ε) για u_a-u_w=800 kPa και διαφορετικές τιμές οριζόντιας τάσης.



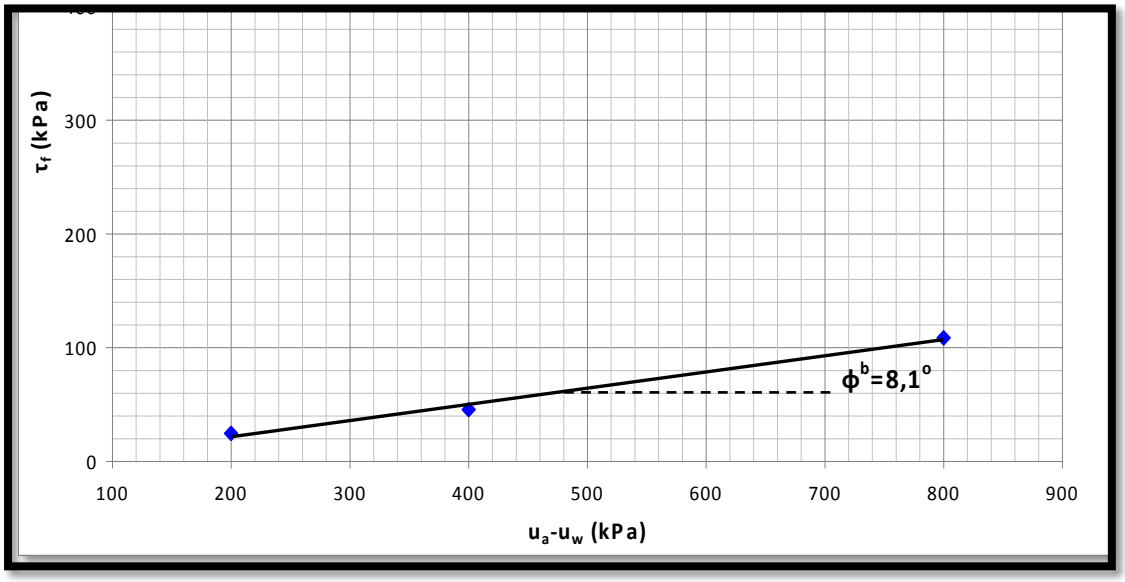
Εικόνα 3.5.7: Συμπεριφορά δειγμάτων σε δοκιμές διάτμησης με συνθήκες αποστράγγισης (Murray & Sivakumar, 2010)



Εικόνα 3.5.8: Διάγραμμα εκτροπικής τάσης (σ_1-σ_3) - αξονικής παραμόρφωσης (ε) για u_a-u_w=800 kPa και διαφορετικές τιμές οριζόντιας τάσης.

Η μεταβολή της διατμητικής αντοχής του υλικού με τη μεταβολή της μύζησης φαίνεται στην Εικόνα 3.4.8, στο οποίο διακρίνεται η επέκταση της προβλεπόμενης από το κριτήριο Mohr-Coulomb περιβάλλουσας αστοχίας για την περίπτωση των ακόρεστων εδαφών (Fredlund & Rahardjo, 1993). Η κλίση της γραμμής τομής που προκύπτει από την τομή του επιπέδου αστοχίας με το επίπεδο τ - $(u_a$-$u_w)$,

αντιπροσωπεύει τη γωνία φ^b. Η γωνία αυτή είναι αντιπροσωπευτική του κάθε υλικού και πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι, για μικρές τιμές μύζησης (κορεσμένες συνθήκες) ισούται με την φ' ενώ για μεγάλες τιμές μύζησης (πάνω από την τιμή air entry value) παρουσιάζεται σταθερή και πάντα μικρότερη ή ίση με την φ' (Gan, 1986). Για το εξεταζόμενο υλικό υπολογίστηκε σε φ^b =8,1° όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5.9. Στην Εικόνα 3.5.10 παρουσιάζονται πειραματικές τιμές της γωνίας φ^b, οι οποίες είναι σταθερά ίσες ή μικρότερες της γωνίας φ' (Fredlund & Rahardjo, 1993).



Εικόνα 3.5.9: Πειραματική ευθεία τομής της περιβάλλουσας αστοχίας με το επίπεδο *τ - (u_a-u_w)*

Soil Type	c' (kPa)	ϕ' (degrees)	ϕ^b (degrees)	Test Procedure	Reference
Compacted shale; w = 18.6%	15.8	24.8	18.1	Constant water content triaxial	Bishop *et al.* (1960)
Boulder clay; w = 11.6%	9.6	27.3	21.7	Constant water content triaxial	Bishop *et al.* (1960)
Dhanauri clay; w = 22.2%, ρ_d = 1580 kg/m^3	37.3	28.5	16.2	Consolidated drained triaxial	Satija, (1978)
Dhanauri clay; w = 22.2%, ρ_d = 1478 kg/m^3	20.3	29.0	12.6	Constant drained triaxial	Satija, (1978)
Dhanauri clay; w = 22.2%, ρ_d = 1580 kg/m^3	15.5	28.5	22.6	Consolidated water content triaxial	Satija, (1978)
Dhanauri clay; w = 22.2%, ρ_d = 1478 kg/m^3	11.3	29.0	16.5	Constant water content triaxial	Satija, (1978)
Madrid grey clay; w = 29%,	23.7	22.5[a]	16.1	Consolidated drained direct shear	Escario (1980)
Undisturbed decomposed granite; Hong Kong	28.9	33.4	15.3	Consolidated drained multistage triaxial	Ho and Fredlund (1982a)
Undisturbed decomposed rhyolite; Hong Kong	7.4	35.3	13.8	Consolidated drained multistage triaxial	Ho and Fredlund (1982a)
Tappen–Notch Hill silt; w = 21.5%, ρ_d = 1590 kg/m^3	0.0	35.0	16.0	Consolidated drained multistage triaxial	Krahn *et al.* (1989)
Compacted glacial till; w = 12.2%, ρ_d = 1810 kg/m^3	10	25.3	7–25.5	Consolidated drained multistage direct shear	Gan *et al.* (1988)

Εικόνα 3.5.10: Πειραματικές τιμές της γωνίας φ^b (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Με βάση τα αποτελέσματα της εργαστηριακής έρευνας, το συγκεκριμένο γεωυλικό παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλή τιμή γωνίας τριβής φ' (≈ 13°) και τιμή της παραμένουσας γωνίας φ'_r (≈ 11°) η οποία είναι υψηλή σε σχέση με τη φ'. Η χαμηλή τιμή της φ' μπορεί να αποδοθεί στην ορυκτολογική σύσταση του γεωυλικού και πιο συγκεκριμένα στην παρουσία διογκούμενων αργιλικών ορυκτών που μπορεί να εμφανίζουν μεγάλο πλακοειδές (σμεκτίτες). Σύμφωνα με τους Mesri & Cepeda-Diaz, (1986) η παρουσία τέτοιων ορυκτών δικαιολογεί πολύ μικρές τιμές φ' και φ'_r οι οποίες μάλιστα παρουσιάζουν μικρή απόκλιση μεταξύ τους (Mesri & Cepeda-Diaz, 1986). Φαίνεται πως η εκτιμώμενες τιμές αντοχής αποτελούν την αντοχή δομικού χαρακτήρα του εξεταζόμενου υπολειμματικού εδάφους (Lupini, Skinner, & Vaughan, 1981), καθώς σχεδόν συμπίπτουν η γωνία τριβής με την παραμένουσα γωνία τριβής και παρατηρείται σαφής διαφορά των τιμών των δοκιμών βραδείας διάτμησης με αυτές των δοκιμών άμεσης διάτμησης (c'=18 kPa, φ'=23°). Επισημαίνεται πως το ζεύγος αυτό σύμφωνα με τον Πίνακα προσεγγίζει πολύ τα δεδομένα του Escario για το σχηματισμό Madrid Clay.

Επιπρόσθετα, είναι ανάγκη να σχολιασθούν τα αποτελέσματα των υπολειμματικών αντοχών σε σχέση με την τιμή της μύζησης. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται πως η αύξηση της μύζησης προκαλεί σημαντική αύξηση της υπολειμματικής αντοχής σε σχετικά χαμηλές τιμές ορθών τάσεων (>300 kPa) και ότι η αύξηση αυτή οφείλεται αποκλειστικά σε αύξηση της υπολειμματικής γωνίας τριβής φ'_r και όχι της υπολειμματικής συνοχής. Η αύξηση αυτή οφείλεται στη διαδικασία συσσωμάτωσης αργιλικών ορυκτών κατά την ξήρανση των αργιλικών εδαφών και είναι μεγαλύτερη όταν η πλαστικότητά τους έχει υψηλή τιμή (Merchan, Vaunat, Romero, & Meca, 2008). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των υπολειμματικών αντοχών της εργαστηριακής έρευνας για τιμές μύζησης 400 kPa και 800 kPa (Πίνακας 3.5.1) παρατηρείται το αντίθετο αποτέλεσμα, δηλαδή μείωση της υπολειμματικής αντοχής με αύξηση της μύζησης. Κατά τον υπολογισμό της αντοχής, η δομικού χαρακτήρα αστοχία εκμηδενίζει το φαινόμενο ενίσχυσης λόγω συσσωμάτωσης (aggregation stiffening) διατηρώντας ίσες της τιμές φ_r', ενώ παράλληλα η τιμή της παραμένουσας συνοχής c'_r μειώνεται σημαντικά.

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να ειπωθεί πως εάν επέλθει επί τόπου προσανατολισμός των αργιλικών ορυκτών του εξεταζόμενου υπολειμματικού εδάφους σε συνθήκες τιμών μύζησης 400 kPa, τότε οποιαδήποτε μεταβολή της υγρασίας (είτε ξήρανση είτε ύγρανση) οδηγεί σε μείωση της επί τόπου αντοχής.

Οι τιμές c' και φ' για u_a-u_w=400 kPa που υπολογίστηκαν συμφωνούν απόλυτα με τα αποτελέσματα ανάδρομων αναλύσεων που έγιναν για τις αστοχίες των τεχνητών πρανών στην περιοχή της Ασπροβάλτας (Χατζηγώγος & Μακεδών, 2008). Η τιμή της φ^b=8,1^o που υπολογίστηκε είναι χαρακτηριστική του γεωυλικού που εξετάστηκε και καθορίζει την αύξηση της διατμητικής αντοχής του με την αύξηση της τιμής της μύζησης..

Κεφάλαιο 4

Ευστάθεια πρανών σε υπολειμματικά εδάφη

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε γενικές γραμμές, οι βασικές αρχές που εφαρμόζονται για την ευστάθεια πρανών σε ιζηματογενή εδάφη ισχύουν εξίσου και για τα υπολειμματικά εδάφη. Επιπρόσθετα όμως, υπάρχουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στη συμπεριφορά ευστάθειας τέτοιων πρανών τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια:

1. Τα πρανή που περιέχουν υπολειμματικά εδάφη παραμένουν ευσταθή σε πολύ μεγαλύτερες κλίσεις από αυτά συμβατικών εδαφών εκτός από κάποιες ειδικές περιπτώσεις (black cotton soils). Τεχνητά ορύγματα με γωνίες κλίσης 60° και ύψος τουλάχιστον 10m θεωρούνται ασφαλή, χωρίς να υφίσταται κίνδυνος αστοχίας.

2. Οι τύποι αστοχιών που εκδηλώνονται σε τέτοια πρανή, ειδικά αν έχουμε μεγάλες κλίσεις, σπάνια είναι κλασικού κυκλικού τύπου. Παρατηρούνται κυρίως ρηχές ολισθήσεις κατά μήκος επίπεδων ή ελαφρά καμπύλων επιφανειών αστοχίας. Παρόλα αυτά, ο όγκος των υλικών αστοχίας είναι συνήθως πολύ μεγάλος.

3. Η τιμή της συνοχής c' παίζει αποφασιστικό ρόλο στη διατήρηση της ευστάθειας. Ο τρόπος δημιουργίας των υπολειμματικών εδαφών επιτρέπει τη διατήρηση κάποιων αδύναμων ενδοσωματιδιακών δεσμών που λειτουργούν αυξητικά στην τιμή της.

4. Η τιμή της υπολειμματικής αντοχής είναι σε γενικές γραμμές πολύ κοντά σε αυτή της μέγιστης αντοχής, γεγονός που δε συμβαίνει με τα ιζηματογενή εδάφη. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο όταν στο υπολειμματικό έδαφος εμπεριέχονται αργιλικά ορυκτά με μεγάλο πλακοειδές.

5. Η παρουσία της ακόρεστης ζώνης πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα με την ανάπτυξη αρνητικών πιέσεων πόρων, συνεισφέρει σημαντικά στην αντοχή και κατ 'επέκταση στην ευστάθεια πολλών πρανών σε υπολειμματικά εδάφη.

6. Η παρουσία ασυνεχειών και υπολειμματικών δομών καθορίζει, για τα περισσότερα υπολειμματικά εδάφη, τη συμπεριφορά της ευστάθειάς τους.

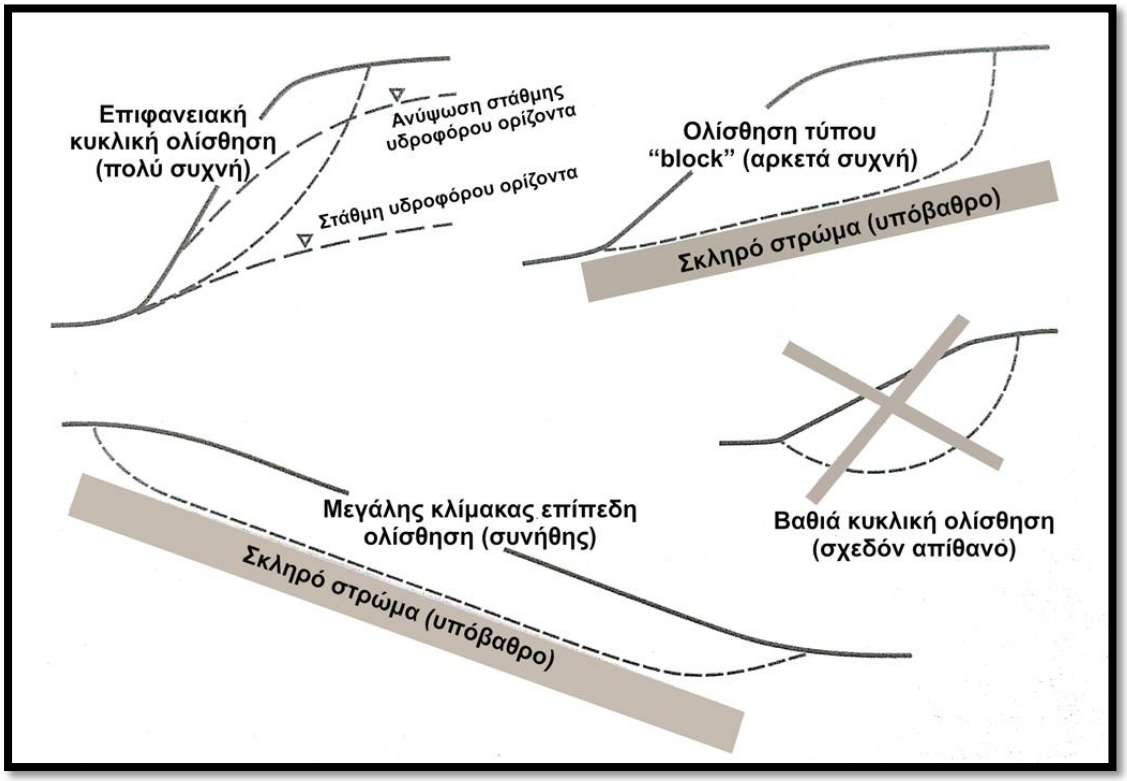
7. Για τα υπολειμματικά εδάφη υπάρχουν πολλοί περιορισμοί στην εκτίμηση της ευστάθειας πρανών με αναλυτικές μεθόδους, κυρίως εξαιτίας της δυσκολίας υπολογισμού ή επιλογής των παραμέτρων αντοχής και των συνθηκών διαρροής.

8. Οι αστοχίες σε υπολειμματικά εδάφη ενεργοποιούνται ως επί το πλείστον από ισχυρές βροχοπτώσεις, που οδηγούν στην ανάπτυξη παροδικών αυξήσεων των πιέσεων πόρων, παρά από ήπια εποχιακά φαινόμενα.

9. Η κύρια αιτία των αστοχιών σε πρανή υπολειμματικών εδαφών είναι οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, κυρίως εκσκαφές τεχνητών ορυγμάτων, επιχώσεις και μεταβολές στο καθεστώς αποστράγγισης, διαρροής και εποχιακής διακύμανσης της υγρασίας.

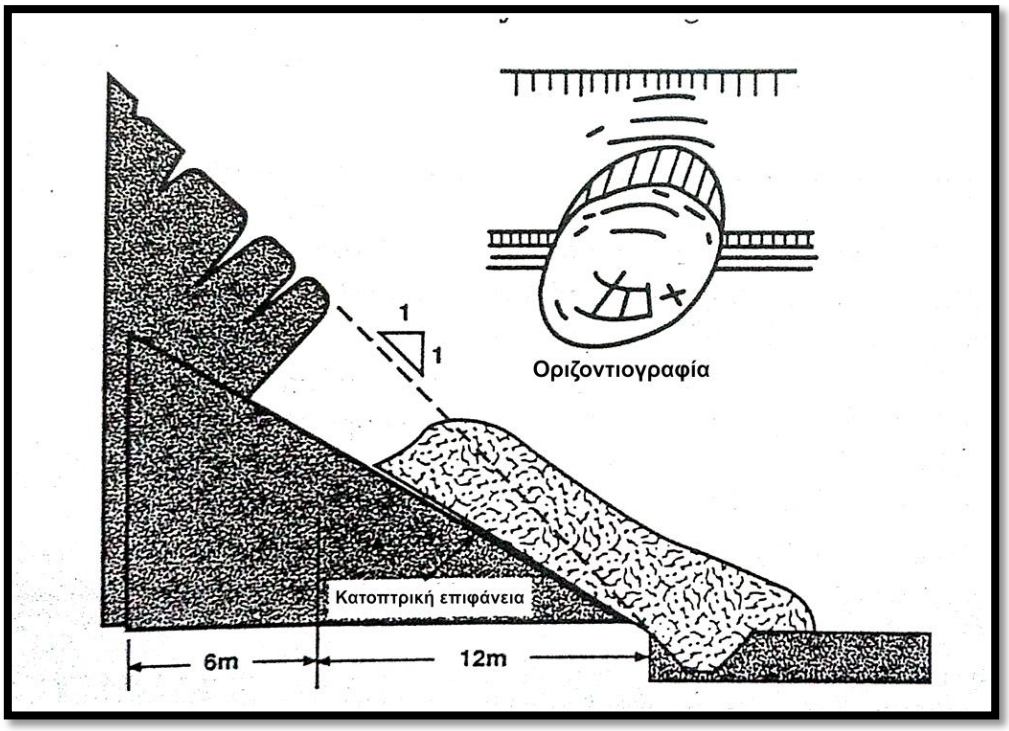
4.2 ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι αστοχίες πρανών σε υπολειμματικά εδάφη, ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλων κλίσεων, σπάνια είναι βαθιές αστοχίες κυκλικού τύπου που συναντώνται κατεξοχήν σε εδαφικά υλικά. Είναι πιθανότερο να συναντήσουμε μικρού βάθους αστοχίες σε επίπεδες επιφάνειες. Χαρακτηριστικό είναι το μοντέλο αστοχίας κατά μήκος της διεπιφάνειας που σχηματίζει υπολειμματικό έδαφος περιορισμένου πάχους με τον υποκείμενο, μικρότερου βαθμού αποσάθρωσης και επομένως σκληρότερο, μητρικό σχηματισμό (Εικόνα 4.2.1).

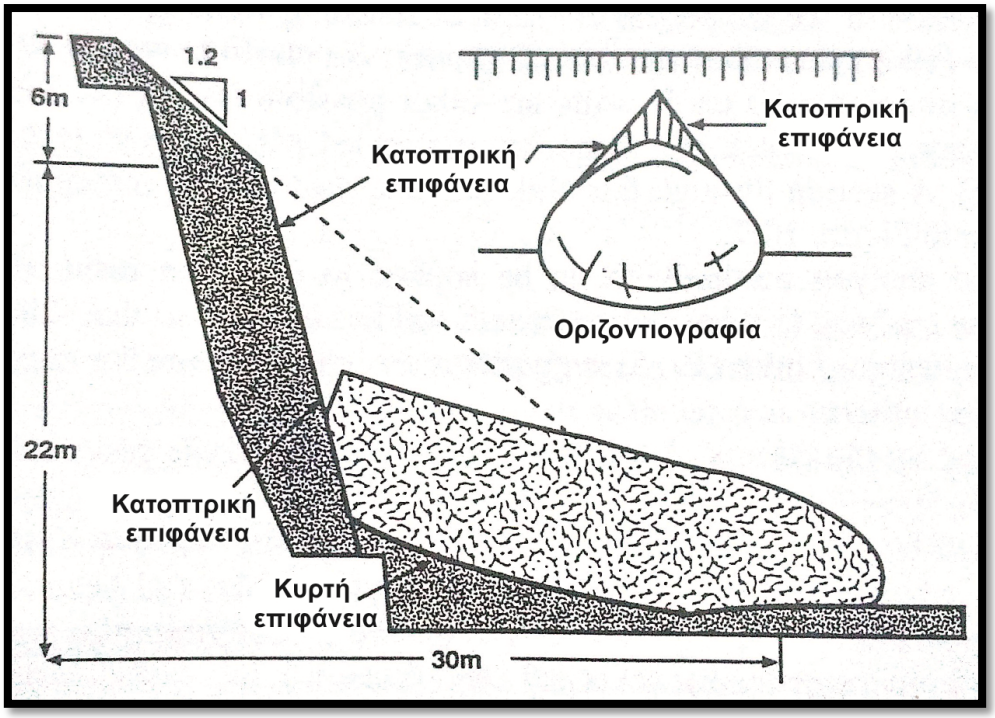


Εικόνα 4.2.1: Μοντέλα αστοχιών σε υπολειμματικά εδάφη (Wesley, 2010)

Μία άλλη χαρακτηριστική ομάδα αστοχιών των υπολειμματικών εδαφών είναι αυτή που σχετίζεται με την παρουσία επιφανειών αδυναμίας τεκτονικής προέλευσης εντός της υπολειμματικής μάζας. Υπάρχουν παραδείγματα αστοχιών κατά μήκος στιλβωμένων επιφανειών ηπιότερης κλίσης από αυτή του τεχνητού πρανούς (Εικόνα 4.2.2) ή και κατά μήκος συνδυασμού τέτοιων επιφανειών εντονότερης και ηπιότερης κλίσης (Εικόνα 4.2.3). Στις περιπτώσεις τεχνητών ορυγμάτων προκαλείται ανακούφιση των τάσεων λόγω της εκσκαφής, η οποία επιτρέπει τη διεύρυνση των κληρονομούμενων ασυνεχειών. Οι περισσότερες αστοχίες ενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων στις οποίες οι ασυνέχειες γεμίζουν με νερό και είναι τρισδιάστατες οριζόμενες από επιφάνειες διαχωρισμού της υφιστάμενης τεκτονικής δομής (St John, Sowers, & Weaver, 1969).

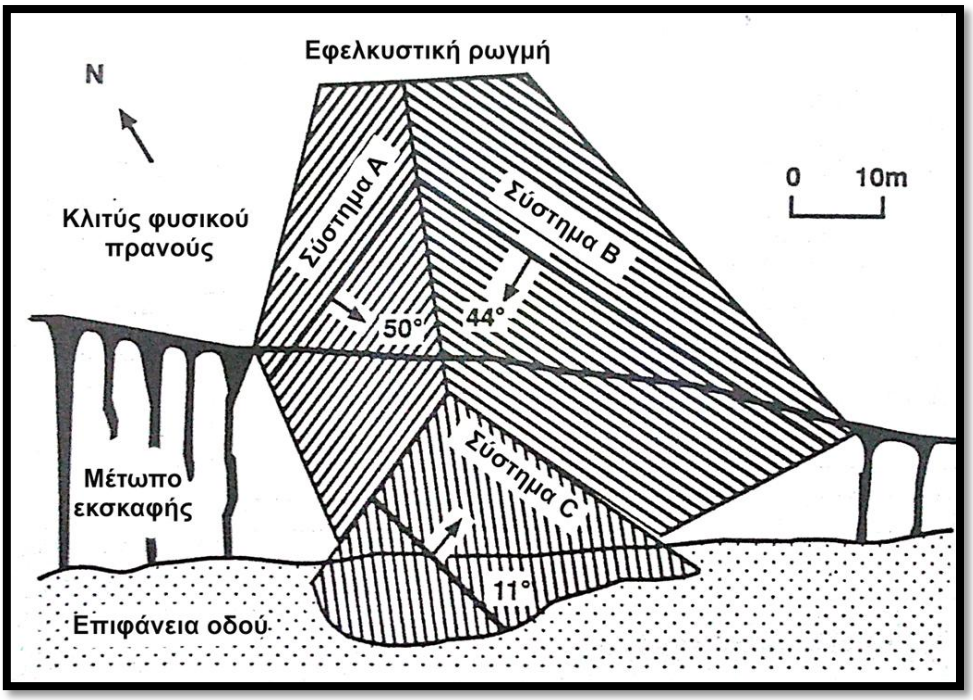


Εικόνα 4.2.2: Ολίσθηση κατά μήκος στιλβωμένης διατμητικής επιφάνειας (St John, Sowers, & Weaver, 1969)

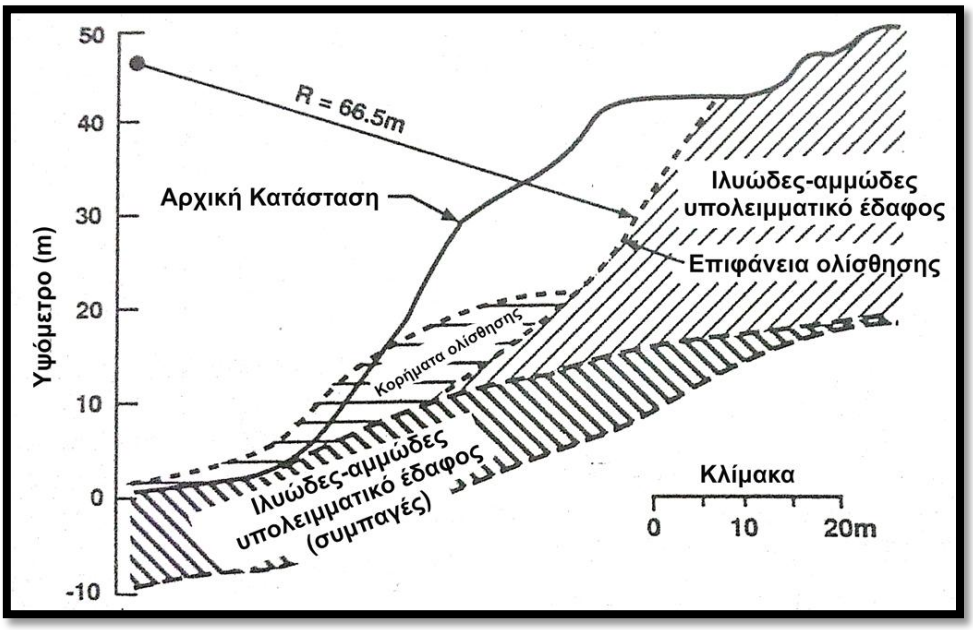


Εικόνα 4.2.3: Ολίσθηση κατά μήκος τεμνόμενων διατμητικών επιφανειών (St John, Sowers, & Weaver, 1969)

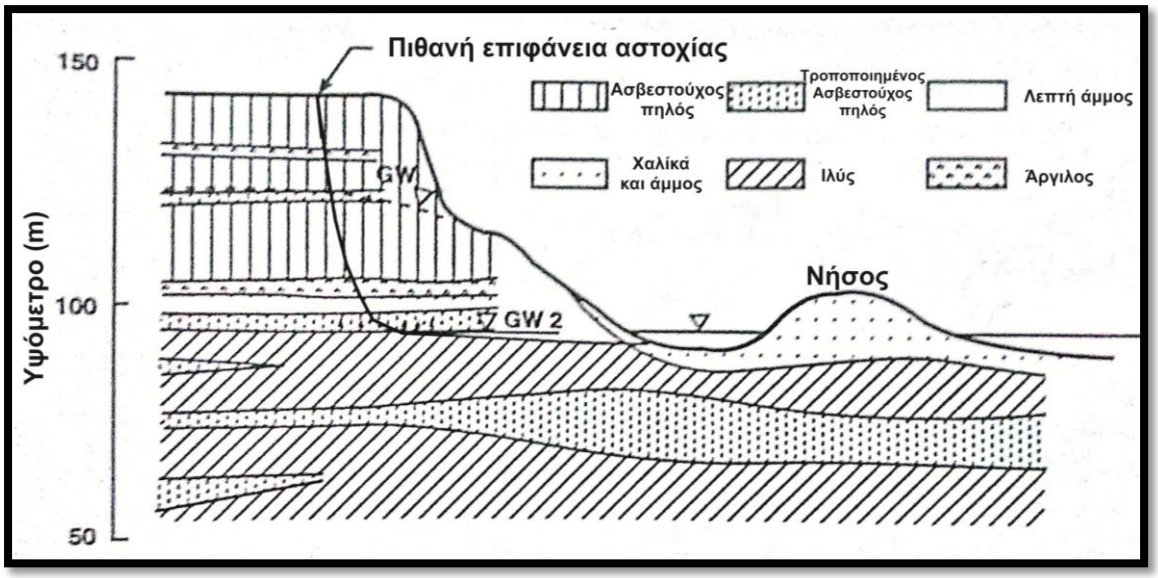
Άλλο ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2.4 όπου υπολειμματικό έδαφος αστοχεί με τη μορφή σφηνοειδούς αστοχίας. Η αστοχία έλαβε χώρα σε ξηρές συνθήκες κατά μήκος επιφανειών ολίσθησης πάνω στις οποίες αποκαλύφθηκε στρώμα δευτερογενούς κεροστίλβης (Pells & Maurenbrecher, 1974).



Εικόνα 4.2.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση σφηνοειδούς ολίσθησης (Pells & Maurenbrecher, 1974)



Εικόνα 4.2.5: Τυπική ολίσθηση περιστροφικού τύπου σε υπολειμματικό έδαφος (Morgenstern & Matos, 1975)



Εικόνα 4.2.6: Ολίσθηση κυβοειδούς γεωμετρίας (Kezdi, 1969)

Στις περιπτώσεις που ο μανδύας αποσάθρωσης έχει μεγάλο βάθος, τότε είναι πιθανό να παρατηρηθούν βαθιές ολισθήσεις κυκλικής (Εικόνα 4.2.5) ή κυβοειδούς γεωμετρίας (Εικόνα 4.2.6). Ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις οι ολισθήσεις ελέγχονται από δομικά ή στρωματογραφικά χαρακτηριστικά, παρά το γεγονός ότι φαίνονται επιφανειακά ως συμβατικού εδαφικού τύπου.

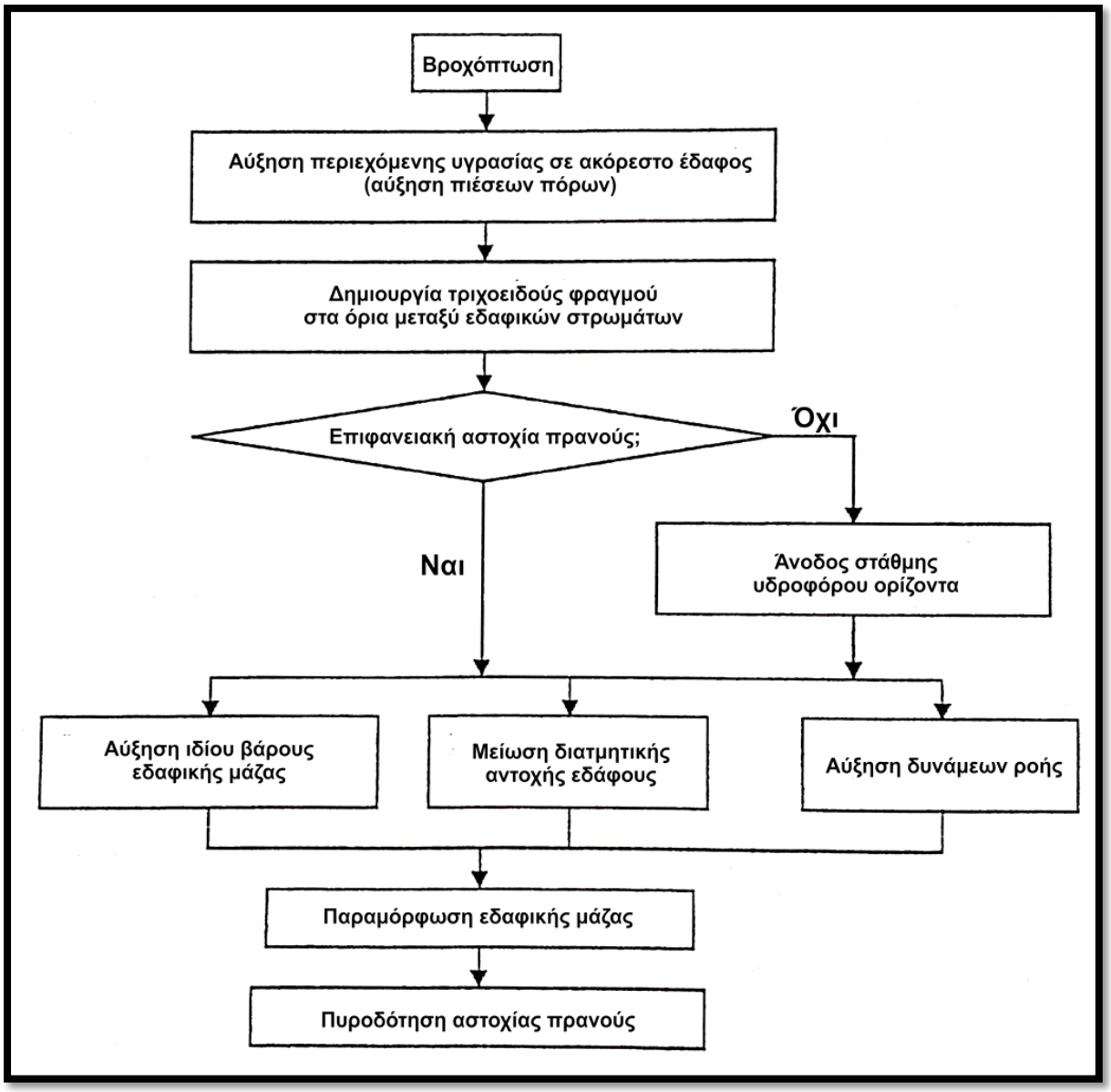
4.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Η επίδραση της βροχόπτωσης στην ευστάθεια πρανών σε υπολειμματικά εδάφη είναι καθοριστική και για το λόγο αυτό έχει εξετασθεί και εξετάζεται από πολλούς ερευνητές. Ενδεικτικά (Affendi & Faisal, 1996), (Lim, Rahardjo, & Change, 1996) και (Pradel & Raad, 1993). Πιο συγκεκριμένα, τα φαινόμενα παρατεταμένης ή έντονης βροχόπτωσης αποτελούν τον κύριο παράγοντα ενεργοποίησης αστοχιών εξαιτίας της προσωρινής αύξησης των πιέσεων πόρων στα πρανή. Τα περισσότερα πρανή σε υπολειμματικά εδάφη παραμένουν ευσταθή σε μεγάλες γωνίες κλίσης και αυτό συμβαίνει εξαιτίας των ακόρεστων συνθηκών (ή συνθηκών μερικού κορεσμού) στις οποίες συνήθως βρίσκονται. Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα είναι συνήθως σε μεγάλο βάθος και οι πιέσεις πόρων επάνω από αυτό το επίπεδο είναι αρνητικές. Η ακόρεστη ζώνη ενός πρανούς, στην οποία συνήθως τοποθετούνται οι πιθανές επιφάνειες αστοχίας, χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη έντονων τριχοειδών πιέσεων του νερού των πόρων, που αυξάνουν την ενεργό ορθή τάση και επομένως τη διατμητική αντοχή και το συντελεστή ασφάλειας του πρανούς, προσδίδοντας μία "φαινόμενη" συνοχή. Η επίδραση της βροχόπτωσης εντοπίζεται ακριβώς στο ότι αυξάνει τις τιμές πιέσεων πόρων από αρνητικές σε μηδενικές ή και θετικές (Brand E. W., 1982).

Στην Εικόνα 4.3.1 παρουσιάζεται ο μηχανισμός αστοχίας πρανών λόγω βροχόπτωσης, όπου και υπογραμμίζεται η εδαφική παραμόρφωση και η επακόλουθη αστοχία, είτε εξαιτίας αύξησης της περιεχόμενης υγρασίας ενός ακόρεστου εδάφους, είτε εξαιτίας της ανύψωσης του υδροφόρου ορίζοντα. Είναι επομένως αντιληπτό πως η κατανόηση του μηχανισμού αυτού προϋποθέτει την έρευνα των μηχανικών παραμέτρων ακόρεστων εδαφών (Kitamura & Sako, 2010).

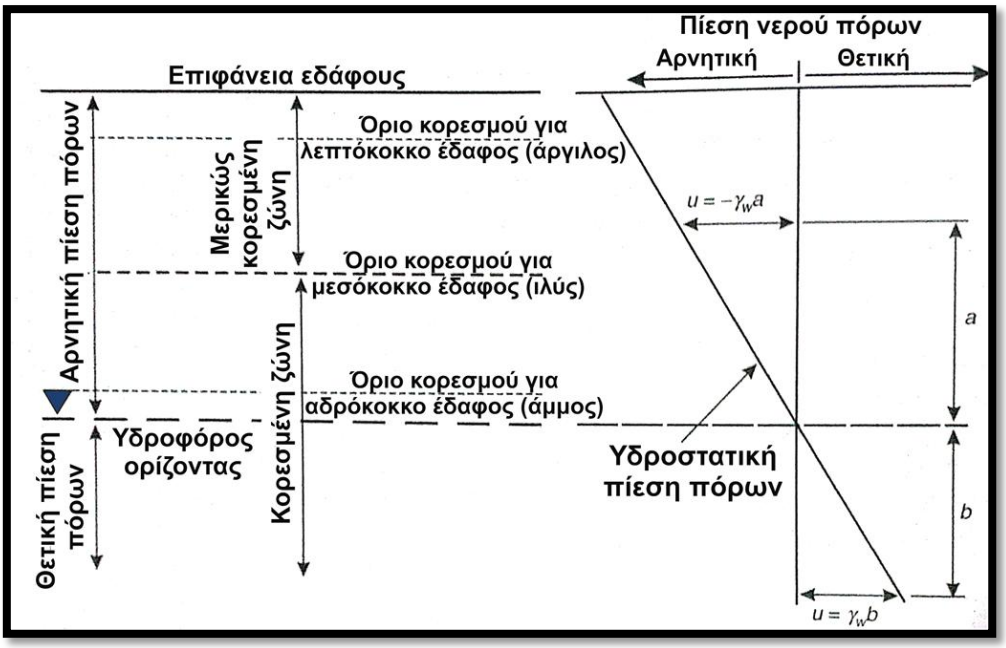
Είναι γενικώς αποδεκτό, πως κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης ο μέγιστος ρυθμός κατείσδυσης του νερού σε ένα ομογενές έδαφος ισούται με τη διαπερατότητά του σε κορεσμένες συνθήκες (Bujang, Faisal, & Rajoo, 2006). Η ελεύθερη επιφάνεια του νερού ανυψώνεται μέσα στο πρανές σαν ένα υδάτινο μέτωπο με ταχύτητα που εξαρτάται από τη διαπερατότητα, το πορώδες και το βαθμό κορεσμού του εδάφους, φτάνοντας σε μία κρίσιμη στάθμη για την ευστάθεια του πρανούς μέσα σε λίγες ώρες. Η ύπαρξη ανοιχτών ασυνεχειών και διακλάσεων επιταχύνει την άνοδο ενός τέτοιου μετώπου (Lumb P. , 1975).

Παρόλα αυτά, η άνοδος του υδάτινου μετώπου σε ένα πρανές δεν αποτελεί βασική προϋπόθεση για να επέλθει αστοχία από τη βροχόπτωση. Η αύξηση των πιέσεων πόρων που συντελείται ειδικά σε μικρό βάθος κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης μπορεί να ενεργοποιήσει αστοχία, χωρίς να υπάρξει μεταβολή στο επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα (Li, Yue, Tham, Lee, & Law, 2005). Επίσης πρέπει να σημειωθεί, ειδικά για αργιλικά υπολειμματικά εδάφη, ότι η παρουσία υψηλών αρνητικών πιέσεων πόρων στην ακόρεστη ζώνη (επάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα) δε σημαίνει απαραίτητα πως το έδαφος δεν είναι σε κατάσταση κορεσμού (Wesley L. D., 2010). Φυσικά κάτι τέτοιο δεν ισχύει για χονδρόκοκκα υπολειμματικά εδάφη από τα οποία το νερό αποστραγγίζεται λόγω βαρύτητας κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων (Εικόνα 4.3.2).

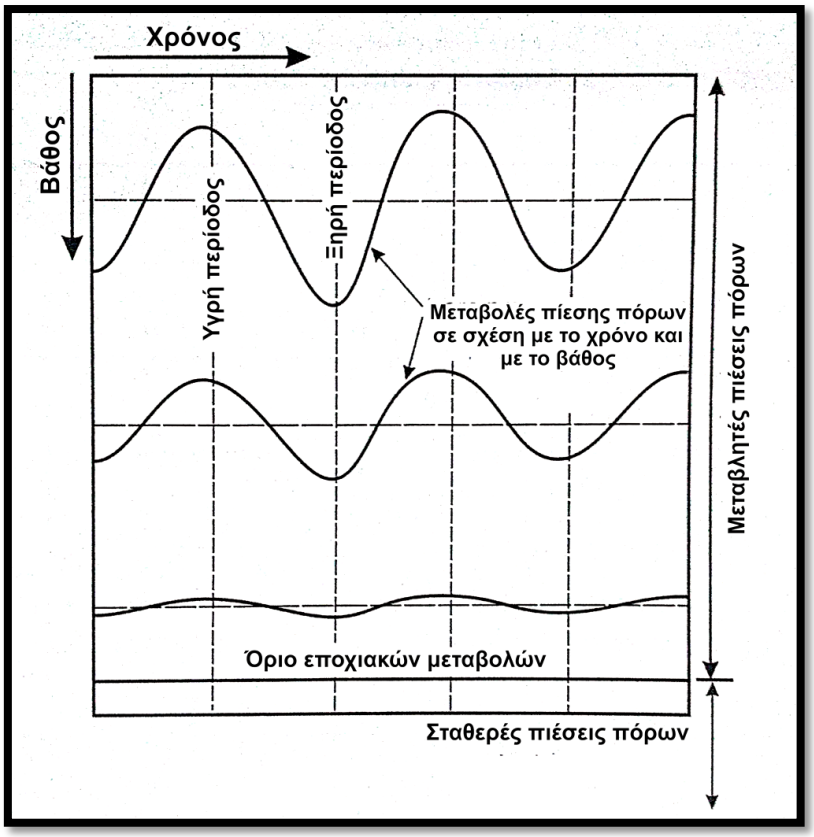


Εικόνα 4.3.1: Μηχανισμός αστοχίας πρανών εξαιτίας της βροχόπτωσης (Kitamura & Sako, 2010)

Η επίδραση της βροχόπτωσης στον υδροφόρο ορίζοντα και στις συνθήκες πιέσεων πόρων ανακύπτει από δύο διαφορετικά καιρικά φαινόμενα: Από τις εποχιακές μεταβολές, οι οποίες είναι επαναλαμβανόμενες στη φύση και γενικώς προβλέψιμες και από μεμονωμένα καιρικά επεισόδια, τα οποία είναι απρόβλεπτα σε χρόνο εμφάνισης, διάρκεια και ένταση και είναι πιθανότερο να προκαλέσουν απευθείας αστοχίες από ότι τα εποχιακά (Εικόνα 4.3.3) (Pun & Urciuoli, 2008).



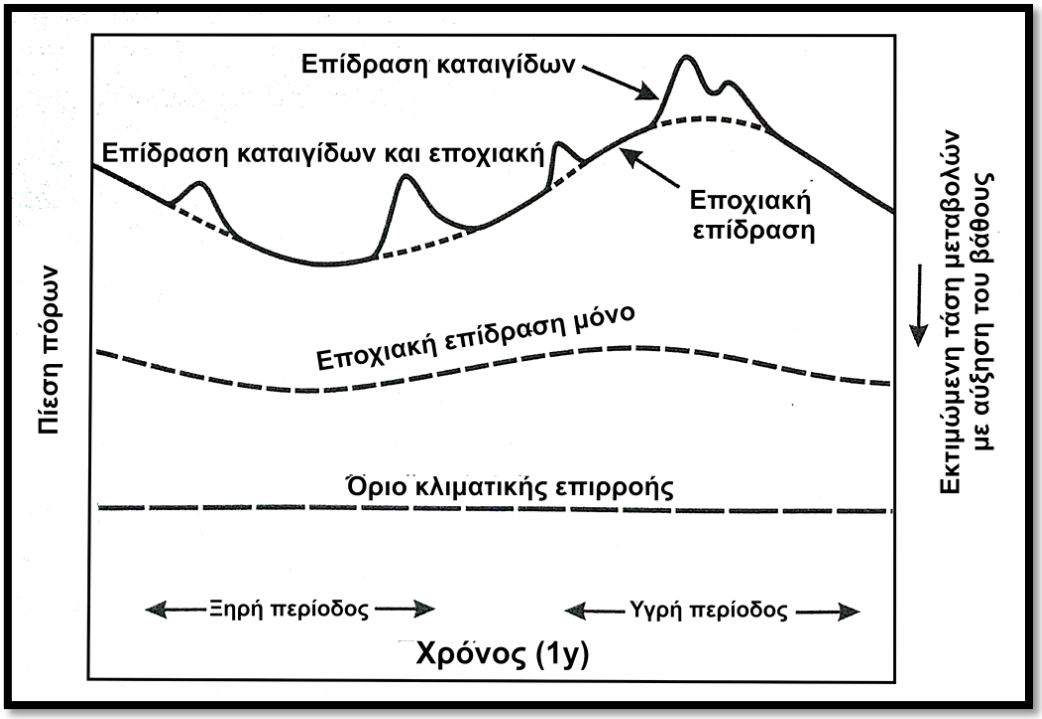
Εικόνα 4.3.2: Πίεση πόρων και συνθήκες κορεσμού σε σχέση με τον υδροφόρο ορίζοντα (Wesley, 2010)



Εικόνα 4.3.3: Μείωση της εποχιακής διακύμανσης των τιμών της πίεσης πόρων με το βάθος (Pun & Urciuoli, 2008)

Ο μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο μεταβάλλεται τόσο το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα όσο και οι πιέσεις πόρων κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης εξαρτάται από τη φύση του υπολειμματικού εδάφους. Στα χονδρόκοκκα εδάφη, με σχετικά υψηλές τιμές διαπερατότητας, το νερό διαρρέει μέσω των κενών αντικαθιστώντας τον αέρα. Ο βαθμός κορεσμού μεταβάλλεται με ταχύ ρυθμό από σχεδόν μηδενική τιμή μέχρι τον πλήρη κορεσμό και οι μεταβολές όγκου στο καθαυτό εδάφους θεωρούνται αμελητέες και δεν αποτελούν μέρος του μηχανισμού (Rahardjo, Santoso, Leong, Ng, & Hua, 2011). Από την άλλη μεριά, στα λεπτόκοκκα εδάφη μικρής διαπερατότητας ο μηχανισμός αυτός λαμβάνει χώρα σε συνθήκες κορεσμού, με εξαίρεση μία επιφανειακή ζώνη που επηρεάζεται από φαινόμενα εξάτμισης στις ξηρές περιόδους. Οι μεταβολές στις πιέσεις πόρων συνοδεύονται από μεταβολές στον όγκο του εδάφους μηχανισμός που είναι ίδιος με αυτόν της στερεοποίησης ή της διόγκωσης αργιλικών εδαφών.

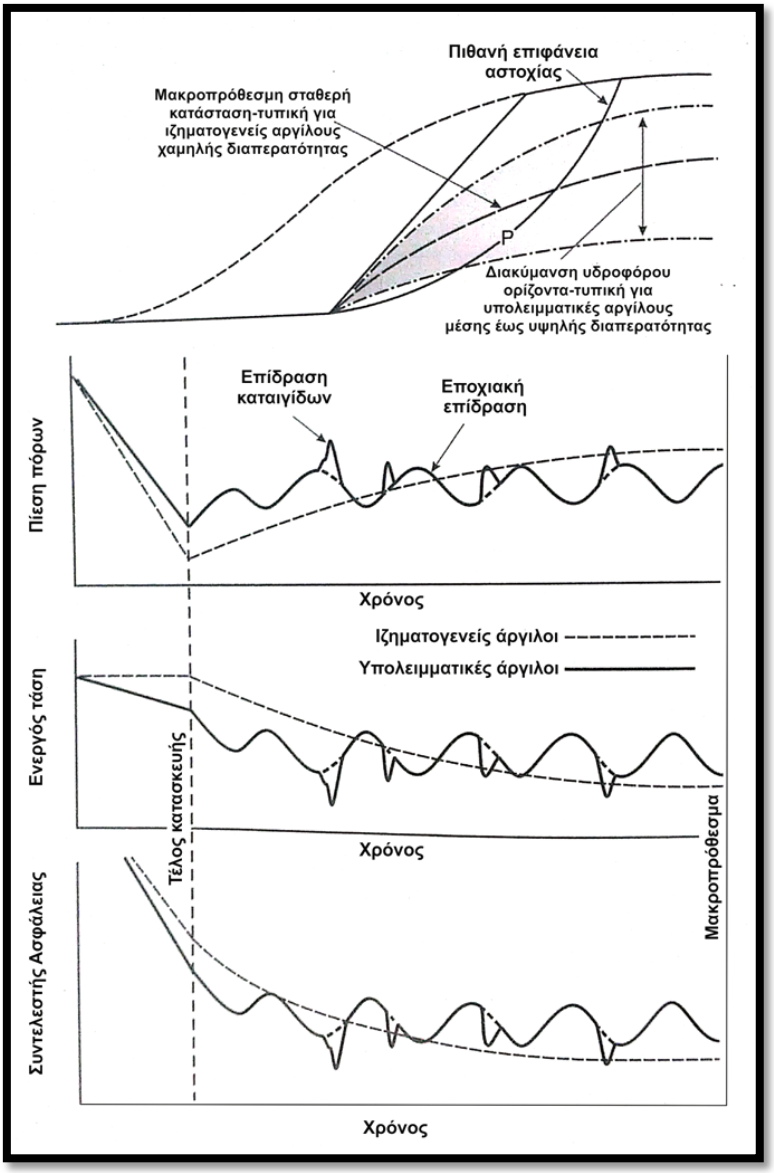
Στην Εικόνα 4.3.4 παρουσιάζεται η επίδραση των εποχιακών αλλαγών και των καταιγίδων στις μεταβολές της πίεσης πόρων σε λεπτόκοκκα εδάφη. Παρατηρείται πως τα εποχιακά φαινόμενα έχουν επίδραση στις μεταβολές των πιέσεων πόρων σε μεγαλύτερα βάθη, ενώ λειτουργούν προσθετικά σε μικρά βάθη, όπου η επίδραση των έντονων μη εποχιακών φαινομένων είναι μεγάλη.



Εικόνα 4.3.4: Μεταβολές πιέσεων πόρων εξαιτίας της επίδρασης κλιματικών φαινομένων σε πρανή αργιλικού εδάφους

Αυτό που γίνεται αντιληπτό, είναι ότι η εκτίμηση της μακροπρόθεσμης ευστάθειας σε τεχνητά πρανή υπολειμματικών αργίλων είναι προβληματική και πιο σύνθετη σε σχέση με τις ιζηματογενείς αργίλους. Αυτές έχουν πολύ μικρή διαπερατότητα και οι πιέσεις πόρων θα ισορροπήσουν σε βάθος χρόνου από την εκσκαφή ενός ορύγματος. Μόλις επέλθει ισορροπία είναι απίθανο η μακροπρόθεσμη

ευστάθεια να επηρεαστεί σημαντικά από εποχιακές ή έντονες κλιματικές μεταβολές. Από την άλλη μεριά, η διαπερατότητα στα υπολειμματικά εδάφη είναι σχετικά υψηλότερη, οι συνθήκες κατά τη φάση της εκσκαφής δε θα είναι εντελώς αστράγγιστες, ενώ και οι μακροπρόθεσμες πιέσεις πόρων θα επηρεάζονται σημαντικά από κλιματικά γεγονότα. Στην Εικόνα 4.3.5 παρουσιάζεται ενδεικτικά η μεταβολή των πιέσεων πόρων και της ενεργού τάσης σε σχέση με το χρόνο για ένα σημείο σε μία πιθανή επιφάνεια αστοχίας, καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφάλειας για τους δύο τύπους εδαφών που περιγράφονται. Για το όρυγμα σε υπολειμματικό έδαφος, η δυσμενέστερη συνθήκη πιέσεων πόρων είναι αυτή που προκύπτει από την εντονότερη βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου.



Εικόνα 4.3.5: Βραχείας και μακράς διάρκειας ευστάθεια τεχνητών πρανών σε ιζηματογενή και υπολειμματικά εδάφη (Wesley, 2010)

4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ

Η επιλογή των παραμέτρων αντοχής στην ανάλυση της ευστάθειας πρανών σε υπολειμματικά εδάφη είναι μία σύνθετη διαδικασία που εμπεριέχει μεγάλη πρόκληση για το μελετητή - ερευνητή. Σε πολλές περιπτώσεις είναι πρακτικά ανέφικτη η επιλογή αντιπροσωπευτικών παραμέτρων αντοχής για την εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού της ασφάλειας ενός πρανούς. Το γεγονός αυτό δημιουργεί περιορισμούς στη χρήση των μεθόδων αυτών και καθιστά αναγκαστικές τις ποιοτικού χαρακτήρα μη-αναλυτικές ή και εμπειρικές μεθόδους εκτίμησης της ευστάθειας. Επιπλέον πρέπει να συνυπολογίζεται πάντα ότι οι διαδικασίες αποσάθρωσης δε σταματούν και επομένως τα μηχανικά χαρακτηριστικά υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου (Durgin, 1977). Για τους παραπάνω λόγους είναι χρήσιμος ο αρχικός διαχωρισμός των πρανών υπολειμματικών εδαφών σε τρεις κατηγορίες:

1. Πρανή με ομοιόμορφη, ομοιογενή σύσταση
2. Πρανή που περιέχουν διακριτές, συνεχείς ασθενείς ζώνες
3. Πρανή ετερογενούς σύστασης με ανισοτροπία στην αντοχή χωρίς την ύπαρξη διακριτών ασθενών ζωνών

4.4.1 ΠΡΑΝΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΟΜΟΙΟΓΕΝΟΥΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ

Η πιο ορθολογική προσέγγιση για την εκτίμηση συντελεστών ασφάλειας για αυτήν την κατηγορία πρανών φαίνεται να είναι η συμβατική ανάλυση αστοχίας κυκλικού (περιστροφικού) τύπου. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες αβεβαιότητες και σε αυτήν την προσέγγιση που σχετίζονται με τη διατμητική αντοχή του υπολειμματικού εδάφους και τις συνθήκες πιέσεων πόρων και διαρροής στο έδαφος. Αναφορικά με τη διατμητική αντοχή σημειώνονται τα ακόλουθα:

- Η τιμή της φ' μπορεί συνήθως να εκτιμηθεί με σχετική ακρίβεια χρησιμοποιώντας συμβατικές εργαστηριακές μεθόδους, όπως τριαξονικές δοκιμές.

- Η τιμή της c' η οποία είναι καθοριστική για την ασφάλεια ενός πρανούς δε μπορεί να εκτιμηθεί με την ίδια ακρίβεια όπως η φ'. Απαιτείται η εκτέλεση στοχευμένων τριαξονικών δοκιμών με εφαρμογή μικρών ολόπλευρων τάσεων για τον ακριβή προσδιορισμό της, έτσι ώστε να προσμετρηθούν οι αδύναμοι σωματιδιακοί δεσμοί που συνεισφέρουν στη συνολική τιμή της c'. Επιπρόσθετα η τιμή της c' επηρεάζεται και από το βαθμό κορεσμού με μηχανισμό που πρέπει και αυτός να ερευνηθεί.

- Η υπολειμματική αντοχή είναι πιθανό να μην έχει μεγάλη διαφορά από τη μέγιστη αντοχή, ειδικά σε περιπτώσεις αργιλικών ορυκτών με μεγάλο πλακοειδές.

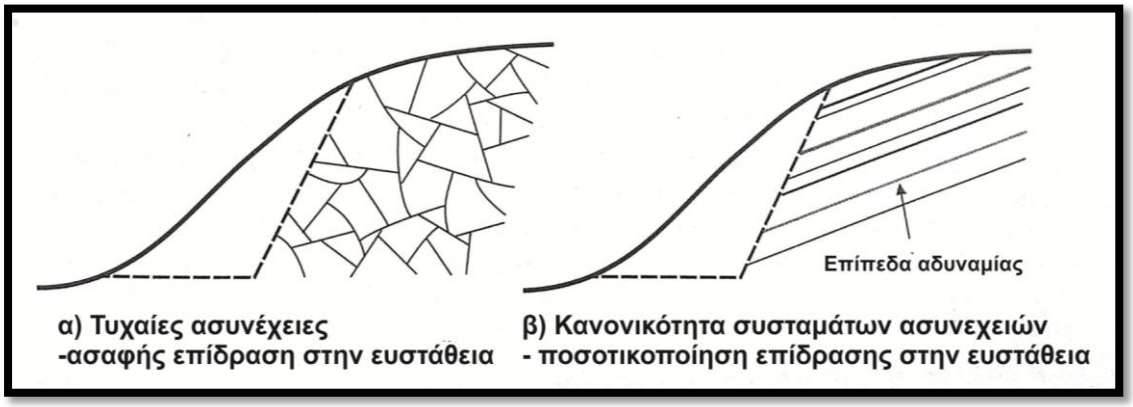
Οι γραμμές ροής αλλά και οι συνθήκες ανάπτυξης πιέσεων πόρων στο κάθε πρανές, είναι πιθανό να υπόκεινται σε συνεχείς αλλαγές ανάλογα με τις καιρικές

συνθήκες εξαιτίας των υψηλών τιμών διαπερατότητας. Για το λόγο αυτό είναι δύσκολο να εκτιμηθούν με βεβαιότητα οι δυσμενέστερες συνθήκες που θα επικρατήσουν στο πρανές, οι οποίες και καθορίζουν την ευστάθειά του σε βάθος χρόνου.

4.4.2 ΠΡΑΝΗ ΜΕ ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΑΣΘΕΝΕΙΣ ΖΩΝΕΣ

Η ευστάθεια πολλών πρανών υπολειμματικών εδαφών καθορίζεται από την παρουσία ασυνεχειών με τη μορφή διακριτών ασθενών επιφανειών (Εικόνα 4.4.1). Αυτό συμβαίνει όταν τα εδάφη αυτά ή τα μητρικά πετρώματά τους έχουν υποστεί στο παρελθόν τεκτονικές παραμορφώσεις ή μεταμορφικές διαδικασίες. Η παρουσία των ασυνεχειών δυσχεραίνει τόσο την επιλογή παραμέτρων αντοχής, όσο και την πρόβλεψη του τύπου της αστοχίας που είναι πιθανό να εκδηλωθεί και επομένως η χρήση αναλυτικών μεθόδων για την εκτίμηση της ευστάθειας είναι πιθανό να μη δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για να μπορούν να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να εκτιμηθεί η θέση, ο προσανατολισμός και η αντοχή των υπαρχουσών ασυνεχειών. Μια τέτοια εργασία είναι αρκετά επίπονη και απαιτεί εμπειρία, αφού προϋποθέτει τον προσδιορισμό του προσανατολισμού τέτοιων ασυνεχειών σε υπολειμματικά εδάφη, εφόσον υπάρχει (Εικόνα 4.4.1). Για παράδειγμα, σε υπολειμματικά εδάφη προερχόμενα από ιζηματογενή-στρωσιγενή πετρώματα, επειδή οι ασθενείς ζώνες αντιστοιχούν σε αυτές του μητρικού πετρώματος, είναι ευκολότερος ο προσδιορισμός της αντοχής τους και κατ' επέκταση ο υπολογισμός συντελεστών ασφαλείας.



Εικόνα 4.4.1: Μοντέλα ασυνεχειών και η επίδρασή τους στην ευστάθεια πρανών

4.4.3 ΠΡΑΝΗ ΕΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΑΣΘΕΝΕΙΣ ΖΩΝΕΣ

Η αποσάθρωση κάποιων πυριγενών πετρωμάτων, όπως για παράδειγμα των γρανιτών, δε δημιουργεί συνήθως διακριτές ασθενείς ζώνες. Το εδαφικό προφίλ αποτελείται από ζώνες διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης, δηλαδή ζώνες με υλικά που διατηρούνται από το μητρικό πέτρωμα και ζώνες εντελώς εξαλλοιωμένων υλικών. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι σχεδόν αδύνατος ο προσδιορισμός ενιαίων

χαρακτηριστικών αντοχής, αντιπροσωπευτικών για το σύνολο του εδαφικού προφίλ. Έτσι η επιλογή των χαρακτηριστικών αντοχής μπορεί να γίνει είτε με τη βοήθεια ανάστροφων αναλύσεων σε υπάρχουσες επιφάνειες αστοχίας, είτε με τον προσδιορισμό της αντοχής ξεχωριστά για κάθε ζώνη διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης (όπως ο διαχωρισμός των ενοτήτων Α, Β και C που εισάγεται στην περίπτωση της Ασπροβάλτας).

4.5 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΧΟΝΓΚ ΚΟΝΓΚ

Για την καλύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών στην ευστάθεια των πρανών κρίθηκε σκόπιμο στην παρούσα διατριβή να γίνει ειδική αναφορά στην περίπτωση του Χονγκ Κονγκ γιατί είναι μία περιοχή που καλύπτεται ως επί το πλείστον από υπολειμματικά εδάφη και έχουν παρατηρηθεί σε αυτήν πολλές μεγάλες και καταστροφικές αστοχίες πρανών που έχουν οδηγήσει σε απώλειες ζωών και σε τεράστιες υλικές ζημιές. Για το λόγο αυτό, υπάρχει εδώ και δεκαετίες ειδική ομάδα επιστημόνων που ερευνά τις αστοχίες πρανών στο Χονγκ Κονγκ παρέχοντας δεδομένα που έχουν βοηθήσει στην κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών.

Τα δεδομένα των περιπτώσεων αστοχιών του Χονγκ Κονγκ αφορούν κυρίως αμμώδη υπολειμματικά εδάφη γρανιτικής προέλευσης με υψηλές τιμές διαπερατότητας, τα οποία διαφέρουν σημαντικά από τις τροπικές αργίλους υψηλής πλαστικότητας που συναντώνται γενικά στη Νοτιοανατολική Ασία. Επιπρόσθετα, οι αποσαθρωμένοι γρανίτες του Χονγκ Κονγκ βρίσκονται σε συνθήκες μερικού κορεσμού, εξαιτίας της αποστράγγισης του νερού λόγω βαρύτητας, σε αντίθεση με τις τροπικές αργίλους, οι οποίες βρίσκονται σε συνθήκες πλήρους κορεσμού, εκτός από μία επιφανειακή ζώνη τους που επηρεάζεται από την εξάτμιση. Η διαφορά στα υπολειμματικά εδάφη του Χονγκ Κονγκ εντοπίζεται στο κλίμα που επικρατεί στην περιοχή αυτή, κλίμα λιγότερο τροπικό σε σχέση με το κλίμα της Νοτιοανατολικής Ασίας (Μαλαισία, Ινδονησία κλπ).

4.5.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ

Στην περιοχή του Χονγκ Κονγκ έχει διεξαχθεί ένας μεγάλος όγκος μετρήσεων της μεταβολής των πιέσεων πόρων, οι οποίες εμφανίζουν ποικίλη συμπεριφορά, που αποδίδονται στις διαφορετικού τύπου κλιματικές επιδράσεις. Σε αυτές των κανονικών εποχιακών κύκλων (ξηρές και υγρές περίοδοι) και σ' αυτές των μικρής διάρκειας έντονων βροχοπτώσεων. Οι μεταβολές των πιέσεων πόρων παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.5.1 για πέντε διαφορετικά συστήματα υπόγειου νερού και φαίνεται ότι το κάθε σύστημα ανταποκρίνεται διαφορετικά στο ίδιο κλιματικό γεγονός (Geotechnical Manual for Slopes, 2000).

Παρατηρείται ότι κάποια πιεζόμετρα ανταποκρίνονται μόνο σε εποχιακές μεταβολές, κάποια μόνο σε καταιγίδες, κάποια δεν ανταποκρίνονται καθόλου ενώ υπάρχουν και διάφοροι συνδυασμοί των παραπάνω συμπεριφορών. Πιθανές αιτίες που συμβάλλουν σε αυτές τις συμπεριφορές είναι οι ακόλουθες:

- Η φύση των υπολειμματικών εδαφών του Χονγκ Κονγκ, ή οποία προκαλεί ένα συνδυασμό των μηχανισμών μεταβολής των πιέσεων πόρων που περιγράφηκαν στην Ενότητα 4.3.

- Τα πιεζόμετρα που δεν εμφανίζουν καμία απόκριση είναι πιθανό να βρίσκονται σε σημεία σταθερής στάθμης υδροφόρου ορίζοντα, εξαιτίας

γειτονικών οριακών συνθηκών ή ύπαρξης ζωνών πολύ χαμηλής διαπερατότητας.

- Τα πιεζόμετρα που εμφανίζουν μόνο εποχιακές μεταβολές είναι πιθανό να βρίσκονται σε στρώματα χαμηλής διαπερατότητας, όπου απαιτείται η παρουσία υγρών περιόδων μεγάλης διάρκειας, για να προκαλέσουν μεταβολές στο σύστημα του υπόγειου νερού.

- Τα πιεζόμετρα που εμφανίζουν μεταβολές μόνο σε ακραία καιρικά φαινόμενα είναι πιθανό να βρίσκονται σε εδάφη σχετικά υψηλής διαπερατότητας, που να επιτρέπουν την ανάλογα ταχεία αποστράγγιση του νερού που εισέρχεται στο πρανές κατά την υγρή περίοδο. Σε αυτά τα υλικά, ο ρυθμός εισόδου του νερού μπορεί να ξεπεράσει το ρυθμό αποστράγγισης αυτού μόνο σε περιπτώσεις πολύ έντονων καταιγίδων, οπότε και παρατηρείται αύξηση των πιέσεων πόρων και ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα.

Ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας, που έχει ερευνηθεί για την ευστάθεια πρανών στην περίπτωση του Χονγκ Κονγκ, είναι η ύπαρξη αρνητικών πιέσεων πόρων που, όπως αναφέρθηκε, αντιστοιχεί στη μύζηση. Έχουν γίνει μετρήσεις της μύζησης σε πολλά πρανή της περιοχής (Sweeney, 1982) και έχει ερευνηθεί η συνεισφορά της στην ευστάθεια των πρανών (Ching, Sweeney, & Fredlund, 1984). Στην Εικόνα 4.5.2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις μύζησης σε πρανή δύο διαφορετικών τύπων υπολειμματικών εδαφών, σε ένα πρανές αποσαθρωμένου ηφαιστειακού υλικού και σε ένα αντίστοιχο αποσαθρωμένου γρανίτη. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορούν να σημειωθούν τα παρακάτω:

- Παρατηρούνται ασυνήθιστα μικρές μεταβολές πιέσεων πόρων για την περίοδο που εκτελέστηκαν οι μετρήσεις.

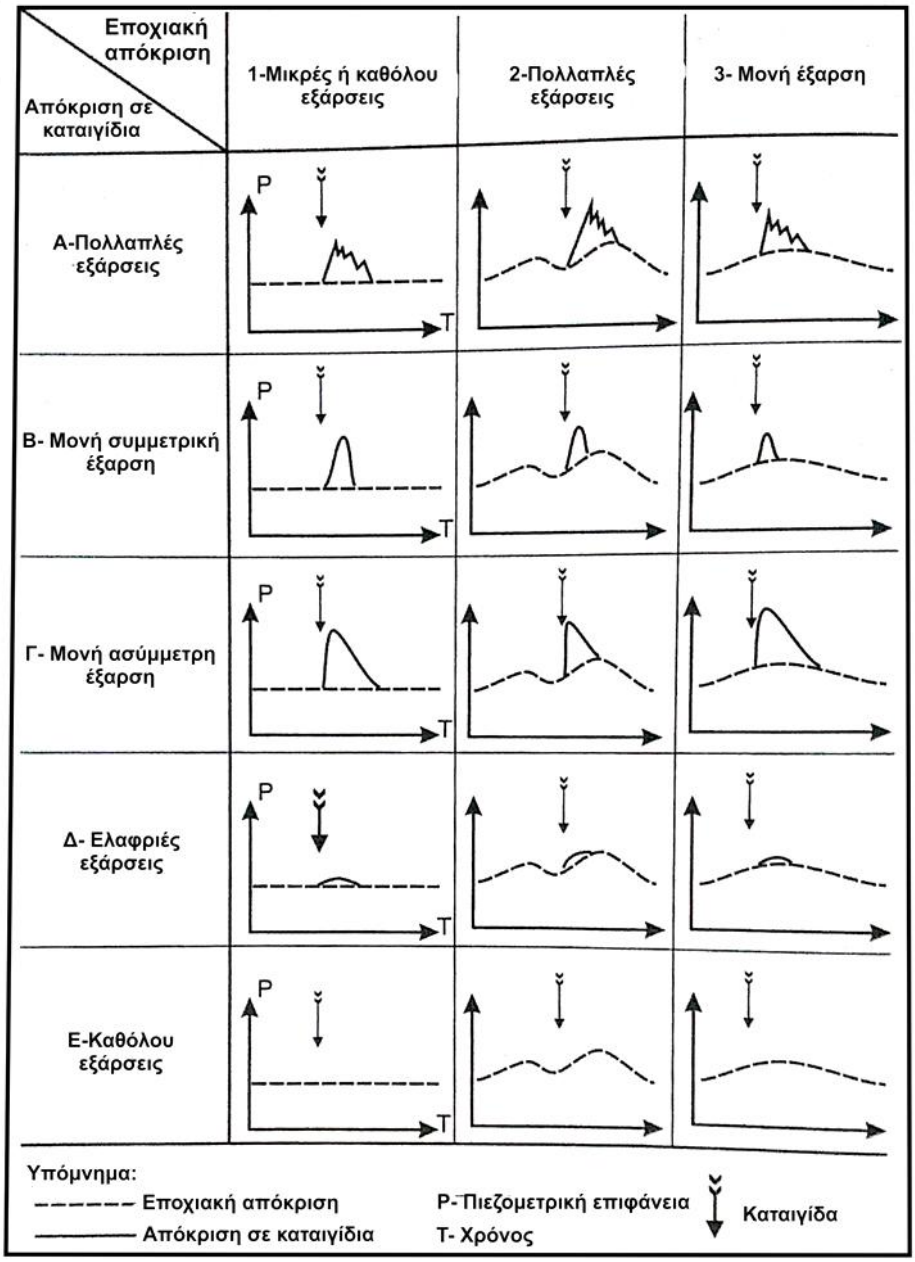
- Οι πιέσεις πόρων μετρήθηκαν αρνητικές και στα δύο υπολειμματικά εδάφη και σε καμία στιγμή δεν αυξήθηκαν στο μηδέν, εκτός από μία πολύ επιφανειακή ζώνη στο υλικό ηφαιστειακής προέλευσης.

- Εκτός από τα πρώτα 5 μέτρα, παρατηρήθηκαν στο ηφαιστειακό υλικό υψηλές τιμές μύζησης μέχρι και τα 90 kPa, ενώ στο γρανιτικό υλικό τιμές μύζησης μέχρι τα 40 kPa.

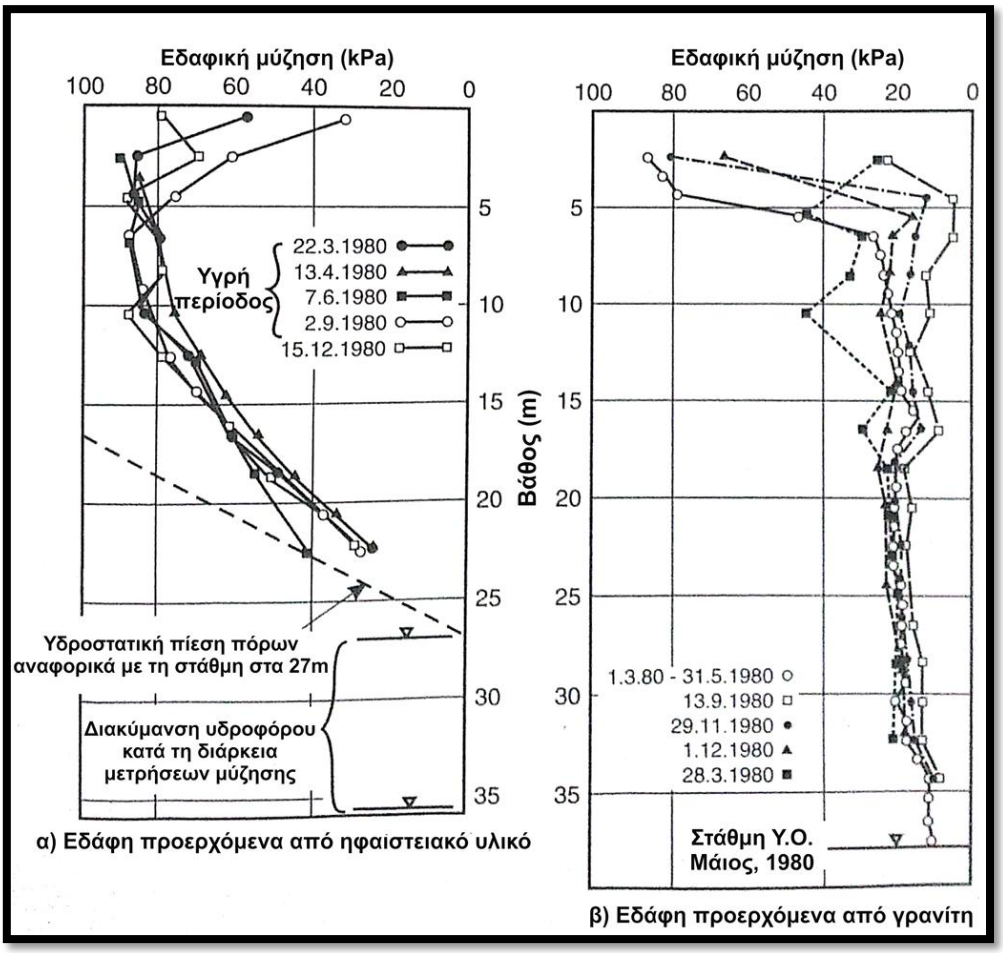
- Η μορφή των καμπυλών των μετρήσεων υποδηλώνει, ότι το ηφαιστειακό υλικό συμπεριφέρεται ως αργιλικό, ενώ το γρανιτικό σαν άμμος ελεύθερης αποστράγγισης. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την κοκκομετρία των υλικών, αφού το πρώτο έχει λεπτόκοκκο κλάσμα 60% και το δεύτερο 30% αντίστοιχα.

- Το ηφαιστειακό έδαφος παρουσιάζει μία ανωμαλία στη σχέση των μεταβολών των πιέσεων πόρων σε σχέση με τις μεταβολές της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Όπως έχει προαναφερθεί, οι μεταβολές της στάθμης του

υδροφόρου ορίζοντα είναι απόρροια των μεταβολών των πιέσεων πόρων. Παρόλα αυτά, στην Εικόνα 4.5.2 παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές του υδροφόρου ορίζοντα (σε βάθη από 27m έως 36m), οι οποίες δε συνοδεύονται από αντίστοιχες μεταβολές των πιέσεων πόρων. Η συμπεριφορά αυτή πιθανώς οφείλεται στην παρουσία τοπικών μεταβολών ή ασυνεχειών στο έδαφος, αλλά σε κάθε περίπτωση, τα υπολειμματικά εδάφη σπάνια συμπεριφέρονται με βάση τα θεωρητικώς προβλεπόμενα.



Εικόνα 4.5.1: Απόκριση μετρήσεων πιεζομέτρων στο Χονκ Κονγκ σε σχέση με εποχιακές και σημειακές καιρικές μεταβολές (Geotechnical Manual for Slopes, 2000)

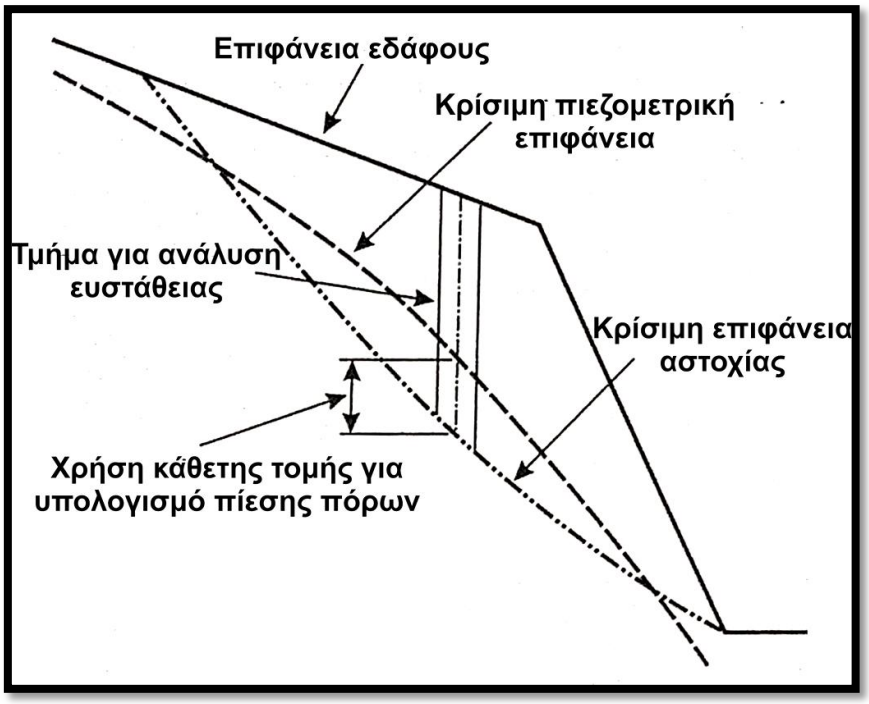


Εικόνα 4.5.2: Μετρήσεις της μύζησης σε δύο διαφορετικές περιοχές του Χονγκ Κονγκ (Ching, Sweeney, & Fredlund, 1984)

4.5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Σύμφωνα με τον Brand (Brand E. W., 1995), η πλειονότητα των τεχνητών πρανών σε υπολειμματικά εδάφη δεν έχουν σχεδιαστεί με βάση αποτελέσματα ορθολογικών κλασικών αναλύσεων ευστάθειας. Παρατηρείται ότι παλιά τεχνητά ορύγματα στο Χονγκ Κονγκ, παραμένουν ευσταθή κάτω από συνθήκες έντονων βροχοπτώσεων, παρά το γεγονός ότι ο υπολογισμένος θεωρητικός συντελεστής ασφάλειάς τους είναι μικρότερος της μονάδας.

Οι υπολογισμοί των θεωρητικών συντελεστών ασφάλειας έγιναν με τη μέθοδο της κάθετης τομής, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.5.3, που επιτρέπει την εκτίμηση της επίδρασης των πιέσεων πόρων (Beattie & Attewill, 1977) σε μία τυπική τομή πρανούς της περιοχής του Χονγκ Κονγκ με πρανή μεγάλων κλίσεων και αντίστοιχων κλίσεων πιεζομετρικές επιφάνειες. Σε αυτήν την κατάσταση η παραπάνω μέθοδος έχει μεγάλη επιρροή στους συντελεστές ασφάλειας και η ανακολουθία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν σε σχέση με την πραγματική κατάσταση αποδεικνύει ότι τα πρανή ανταποκρίνονται στη συμβατική ορθολογική ανάλυση.



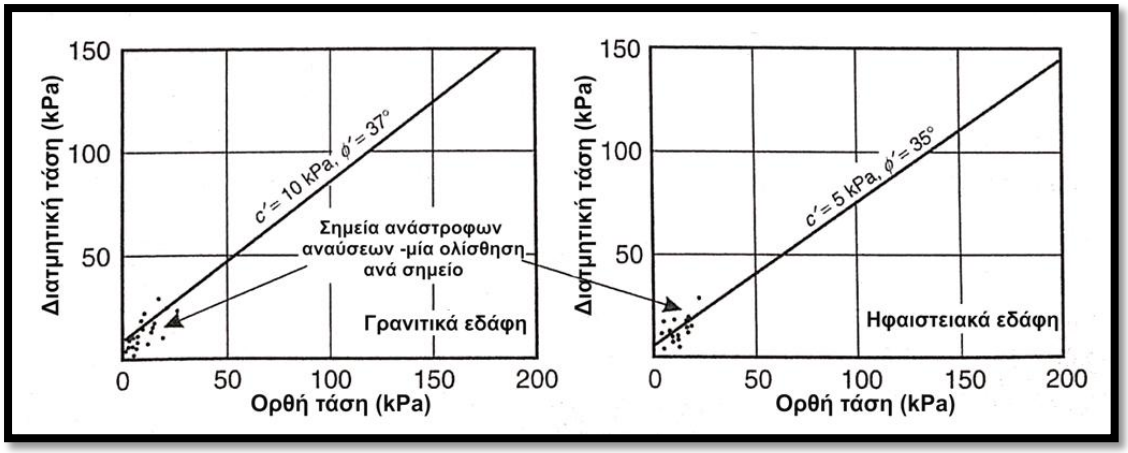
Εικόνα 4.5.3: Τυπική τομή πρανών στην περιοχή του Χονγκ Κονγκ. Προσδιορισμός της πίεσης πόρων από τη χάραξη της πιεζομετρικής επιφάνειας και την επιφάνεια αστοχίας (Beattie & Attewill, 1977)

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς των συντελεστών ασφάλειας, προτείνονται τιμές συντελεστών ασφάλειας σε σχέση με την ένταση βροχόπτωσης και την αποδεκτή διακινδύνευση (Εικόνα 4.5.4). Οι τιμές που παρουσιάζονται είναι εξαιρετικά χαμηλές δεδομένου ότι στις αναλύσεις για την εκτίμηση της πίεσης πόρων υιοθετήθηκε η συντηρητική προσέγγιση της μεθόδου κάθετης τομής (Geotechnical Manual for Slopes, 2000).

Σχεδιασμός νέων πρανών				
Οικονομικό ρίσκο \ Ρίσκο απώλειας ζωών		Προτεινόμενος Συντελεστής Ασφάλειας εναντίον απώλειας ζωών για καταιγίδα περιόδου εμφάνισης 10 ετών		
		Αμελητέο	Χαμηλό	Υψηλό
Προτεινόμενος Σ. Α. εναντίον οικονομικών ζημιών για καταιγίδα περιόδου εμφάνισης 10 ετών	Αμελητέο	>1.0	1.2	1.4
	Χαμηλό	1.2	1.2	1.4
	Υψηλό	1.4	1.4	1.4

Εικόνα 4.5.4: Προτεινόμενοι συντελεστές ασφάλειας σχεδιασμού των πρανών στο Χονγκ Κονγκ (Geotechnical Manual for Slopes, 2000)

Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών της περιοχής ήταν η διενέργεια ανάστροφων αναλύσεων και η αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων με αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.5.5 (Malone & Shelton, 1982) όπου οι περιβάλλουσες αστοχίας για ηφαιστειακά και γρανιτικά εδάφη αντίστοιχα έχουν προκύψει με βάση μεγάλο αριθμό τριαξονικών δοκιμών σε διάφορα σημεία, τα οποία δεν αντιπροσωπεύουν αποκλειστικά θέσεις αστοχιών. Παρατηρείται ότι οι αστοχίες εκδηλώνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα τάσεων και είναι απαραίτητο να διεξάγονται οι εργαστηριακές δοκιμές σε μικρές τάσεις αντίστοιχες με το πεδίο.



Εικόνα 4.5.5: Αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων πρανών του Χονγκ Κονγκ σε σχέση με τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών (Malone & Shelton, 1982)

4.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΣΤΡΟΦΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

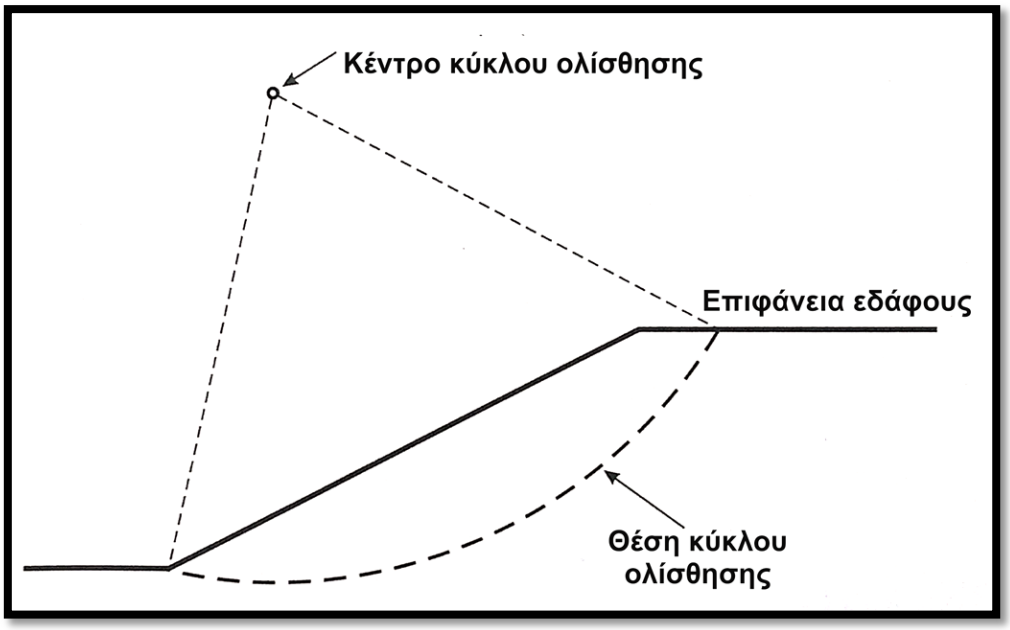
Το μεγαλύτερο πρόβλημα στις αναλύσεις ευστάθειας πρανών σε υπολειμματικά εδάφη είναι ο προσδιορισμός ή η επιλογή παραμέτρων διατμητικής αντοχής κατά το σχεδιασμό. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι αφενός είναι πρακτικά αδύνατο να ληφθεί αδιατάρακτο δείγμα, ειδικά στις περιπτώσεις υπολειμματικών εδαφών με κομμάτια μη αποσαθρωμένου μητρικού πετρώματος, αφετέρου είναι αμφίβολο κατά πόσον τα δείγματα αυτά θα είναι αντιπροσωπευτικά των επί τόπου συνθηκών. Επομένως υπάρχουν σοβαροί περιορισμοί στη συμβολή των εργαστηριακών δοκιμών για την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής.

Ένας τρόπος να ξεπερασθούν τα προβλήματα άμεσου προσδιορισμού των παραμέτρων c' και φ' στα υπολειμματικά εδάφη είναι η εφαρμογή διάφορων μεθόδων ανάστροφων αναλύσεων. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί, ότι αυτές οι μέθοδοι έχουν ικανοποιητική εφαρμογή μόνο σε ομογενή υλικά, ενώ έχουν αντίστοιχα περιορισμένη εφαρμογή στα υπολειμματικά υλικά λόγω των αβεβαιοτήτων που πάντα υπάρχουν σε αυτά σχετικά με τις συνθήκες διαρροής, των πιέσεων πόρων, τη γεωμετρία ή ακόμη και το φαινόμενο βάρος τους.

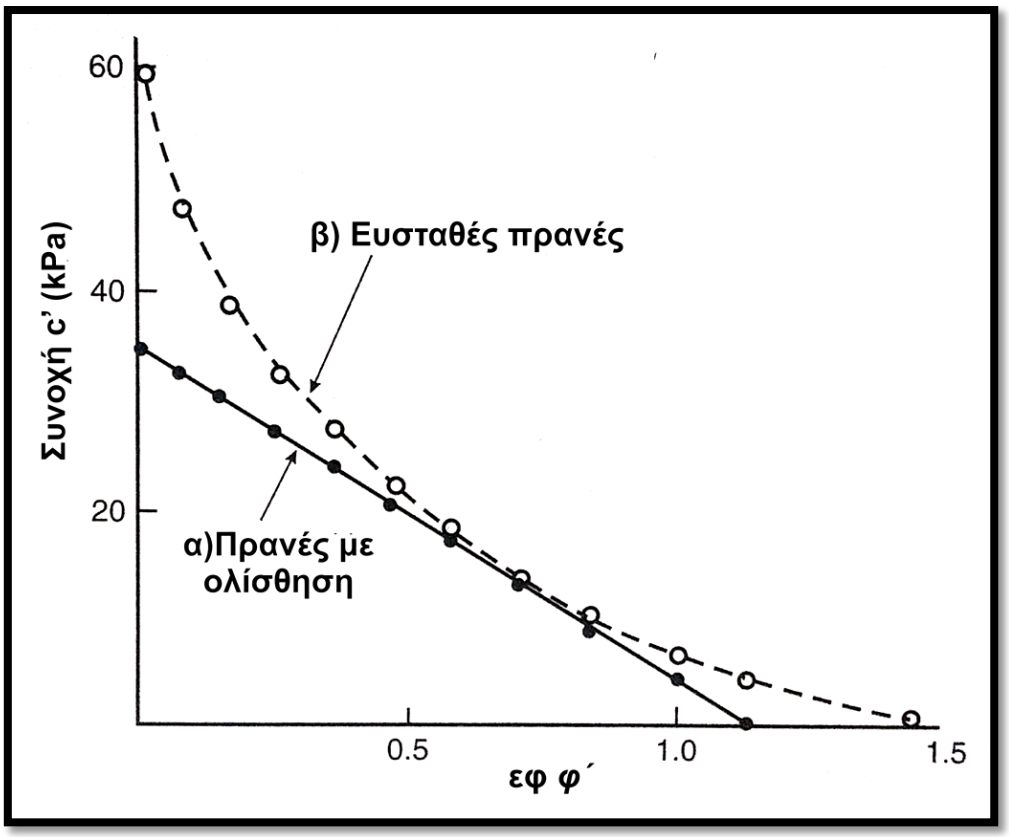
4.6.1 ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ Ή ΔΕΔΟΜΕΝΟΥ ΕΥΣΤΑΘΟΥΣ ΠΡΑΝΟΥΣ

Στην Εικόνα 4.6.1 παρουσιάζεται μία δεδομένη επιφάνεια αστοχίας σε ένα πρανές και μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο συντελεστής ασφάλειας είναι ίσος με τη μονάδα, δηλαδή το πρανές βρίσκεται σε οριακή ισορροπία. Μέσω ανάστροφης ανάλυσης μπορούν να προσδιορισθούν οι παράμετροι c' και φ' που ικανοποιούν αυτήν τη συνθήκη. Υπάρχουν όμως πολλά ζεύγη τιμών που ικανοποιούν την παραπάνω συνθήκη.

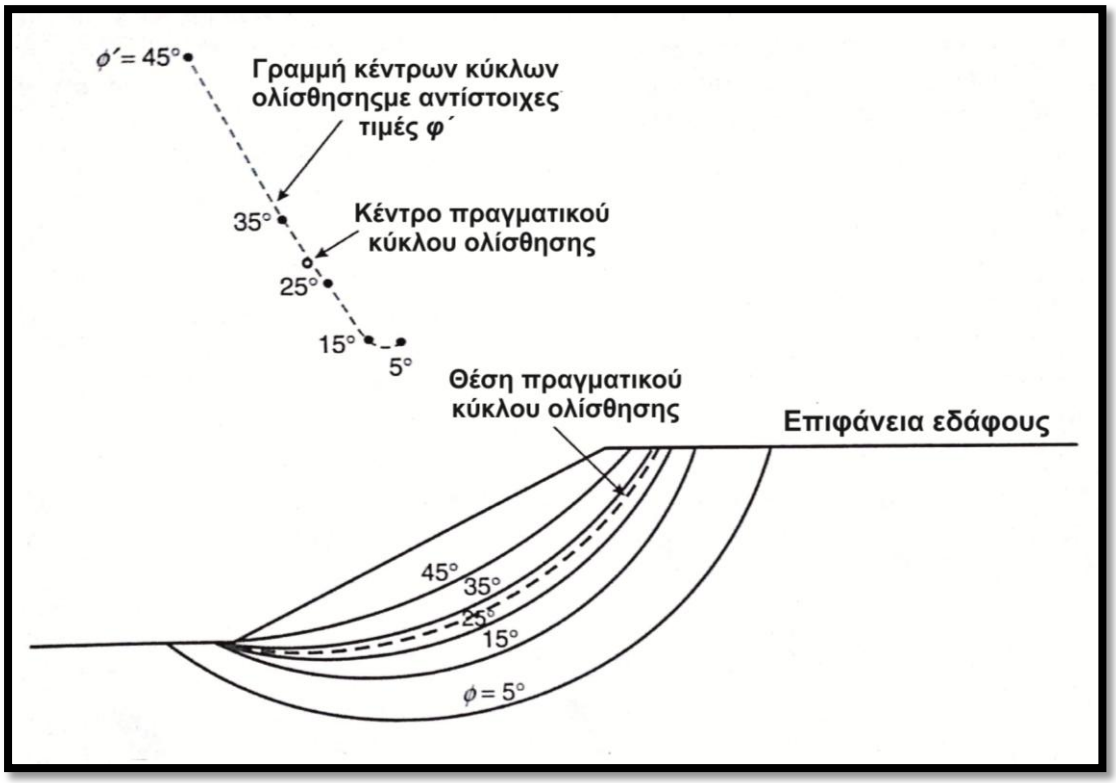
Αν η παραπάνω ανάλυση διεξαχθεί χωρίς περιορισμούς στη χωροθέτηση της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας τότε δεν αναμένεται να πάρουμε τα ίδια ζεύγη τιμών που να ικανοποιούν τη συνθήκη SF=1 (Safety Factor), γιατί αυτά θα αντιπροσωπεύουν διαφορετικές επιφάνειες κάθε φορά, και όχι μία συγκεκριμένη. Στην Εικόνα 4.6.2 φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων αντοχής που προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις για μία δεδομένη και για τυχαίες επιφάνειες ολίσθησης. Αν πάρουμε τα ζεύγη τιμών που υπολογίσθηκαν από τις αναλύσεις με δεδομένη επιφάνεια αστοχίας και επαναλάβουμε με αυτές την ανάλυση του πρανούς χωρίς δεδομένη επιφάνεια, τότε το ζεύγος τιμών που θα δώσει την υπάρχουσα επιφάνεια θα είναι και το αντιπροσωπευτικό για τη συγκεκριμένη ανάλυση. Το ζεύγος τιμών αντοχής που υπολογίστηκε στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι c'=18 kPa και φ'=30° (Εικόνα 4.6.3). Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού ενός ζεύγους τιμών παραμέτρων αντοχής είναι η εκτίμηση του σημείου τομής των δύο καμπυλών στην Εικόνα 4.6.2 (Wesley & Lelaratnam, 2001).



Εικόνα 4.6.1: Ανάστροφη ανάλυση της ευστάθειας πρανούς για τον προσδιορισμό παραμέτρων c' και φ'



Εικόνα 4.6.2: Εύρος τιμών c' και φ' από ανάστροφες αναλύσεις σε ευσταθές και ολισθαίνον πρανές (Wesley & Lelaratnam, 2001)

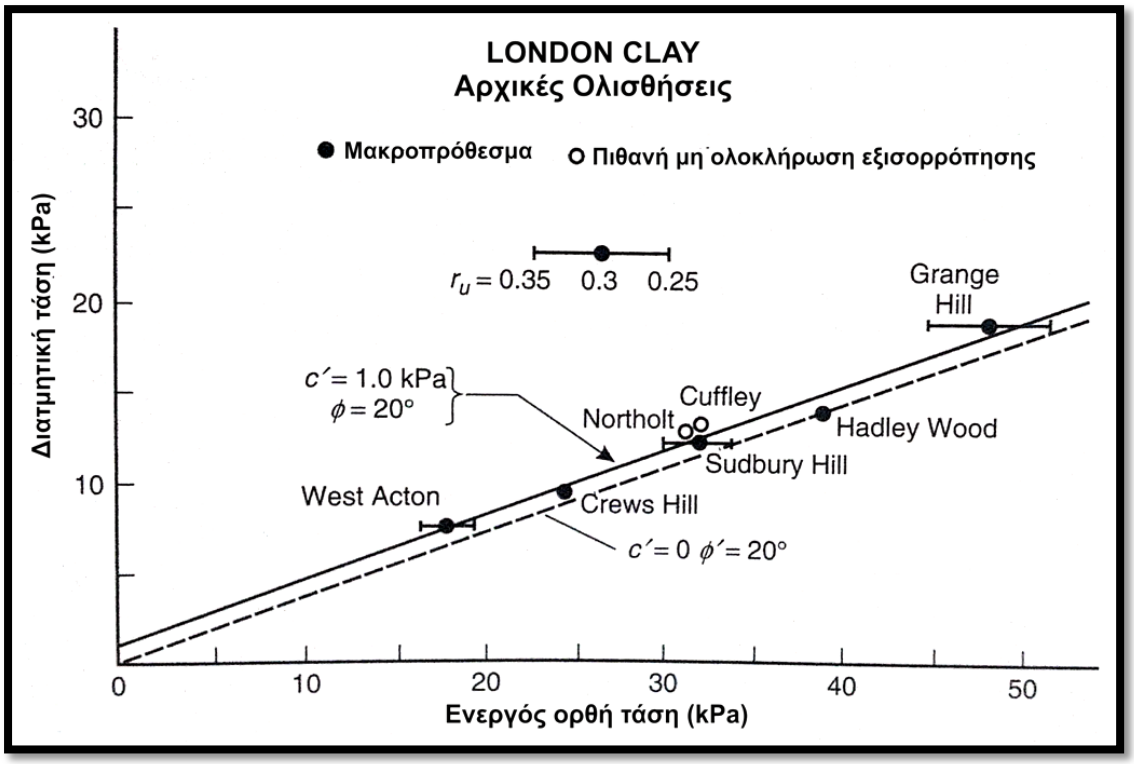


Εικόνα 4.6.3: Επιφάνειες αστοχίας που αντιστοιχούν σε συνδυασμούς παραμέτρων c' και φ' (Wesley & Lelaratnam, 2001)

4.6.2 ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΙΔΙΟ ΥΛΙΚΟ

Η παρουσία πολλών αστοχιών στο ίδιο υλικό υπολειμματικού εδάφους αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής μέσω ανάστροφων αναλύσεων. Εφαρμόζεται η μέθοδος που περιγράφεται στην Ενότητα 4.6.1 για κάθε αστοχία ξεχωριστά και στη συνέχεια ακολουθείται μία μέθοδος επεξεργασίας για να επιλεγούν οι πιο αντιπροσωπευτικές τιμές διατμητικής αντοχής.

Μία τέτοια μέθοδος επεξεργασίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.6.4 για ανάστροφες αναλύσεις σε αργιλικό σχηματισμό. Ο σχηματισμός αυτός δεν είναι υπολειμματικό έδαφος, όμως η μέθοδος είναι εξίσου εφαρμόσιμη σε αυτά (Chandler & Skempton, 1974). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αναφέρονται αποτελέσματα από επτά διαφορετικές θέσεις αστοχιών στο ίδιο υλικό, όπου υπολογίζονται η μέση διατμητική τάση και η μέση ενεργός ορθή τάση στις επιφάνειες ολίσθησης, έτσι ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη της οριακής ισορροπίας (SF=1). Οι παραπάνω υπολογισμένες τιμές σχεδιάζονται σε διάγραμμα "διατμητικής τάσης-ενεργού ορθής τάσης" και ορίζουν την περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb και κατ' επέκταση τις τιμές c' και φ'.

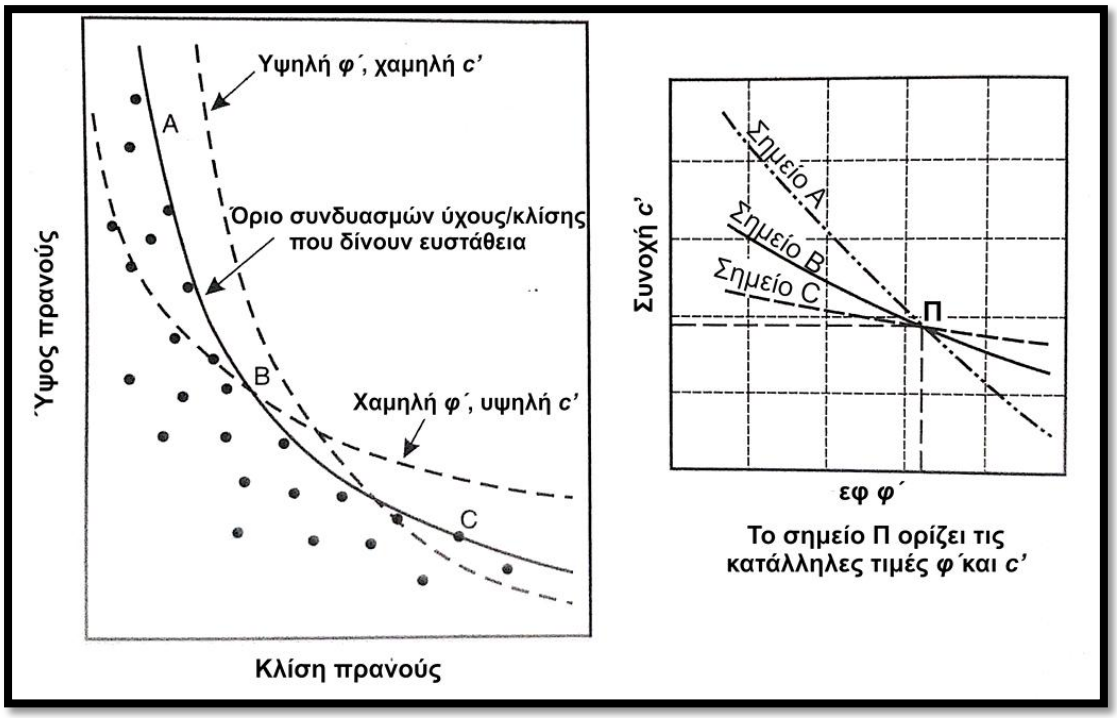


Εικόνα 4.6.4: Τιμές c' και φ' από ανάστροφες αναλύσεις σε περιπτώσεις ολισθήσεων του αργιλικού σχηματισμού του Λονδίνου (Chandler & Skempton, 1974)

4.6.3 ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΟ ΑΡΙΘΜΟ ΕΥΣΤΑΘΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Ένας εναλλακτικός τρόπος να προσδιορισθούν οι παράμετροι αντοχής ενός σχετικά ομοιογενούς υπολειμματικού εδαφικού σχηματισμού είναι η συλλογή δεδομένων για τις κλίσεις και τα ύψη πρανών στο σχηματισμό αυτό που βρίσκονται στις δυσμενέστερες συνθήκες ισορροπίας. Τα δεδομένα αυτά αντιπαραβάλλονται σε διάγραμμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6.5 και σχεδιάζεται η καμπύλη που ορίζει το άνω όριο των συνδυασμών ύψους-κλίσης που διατηρούν ευστάθεια.

Επιπλέον, στην Εικόνα 4.6.5 παρουσιάζονται ακόμα δύο καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τη συσχέτιση ύψους-κλίσης σε σχέση με το μέγεθος των παραμέτρων αντοχής c' και φ'. Για κάθε συνδυασμό των τιμών c' και φ' και για σταθερές συνθήκες διαρροής υπάρχει ένας μοναδικός συνδυασμός ύψους-κλίσης πρανούς για τον οποίο θα διατηρείται ευσταθές στο εξεταζόμενο υπολειμματικό έδαφος. Επιλέγονται τρία σημεία στην προκύπτουσα καμπύλη (π.χ. A, B και C), και ακολουθείται η διαδικασία της Ενότητας 4.6.1 για τον προσδιορισμό συνδυασμών τιμών c' και φ', οπότε η τομή των παραγόμενων γραφημάτων αντιστοιχεί στο κοινό ζεύγος τιμών c' και φ' και επομένως στις πιο αντιπροσωπευτικές τιμές σχεδιασμού.

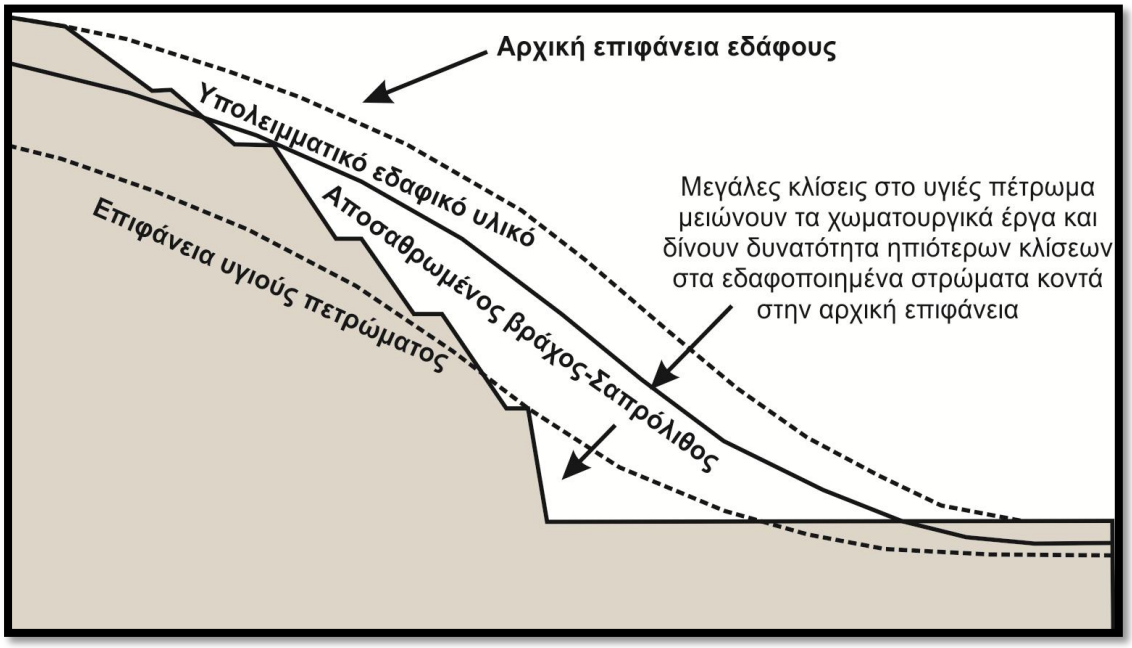


Εικόνα 4.6.5: Καμπύλη συσχετισμού δεδομένων ύψους-κλίσης πρανών για τον υπολογισμό των παραμέτρων c' και φ' (Wesley L. D., 2010)

4.7 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Η επιλογή της γεωμετρίας στο σχεδιασμό ενός τεχνητού ορύγματος σε υπολειμματικά εδάφη φαίνεται να είναι περισσότερο ζήτημα κρίσης βασισμένης πιο πολύ σε μη αναλυτικές προσεγγίσεις παρά το αποτέλεσμα αναλυτικών υπολογισμών. Φυσικά η γνώση των θεωρητικών μηχανισμών από τους οποίους επηρεάζεται η ευστάθεια ορυγμάτων σε υπολειμματικά εδάφη, κυρίως αυτών που σχετίζονται με την επίδραση του κλίματος και των βροχοπτώσεων, αποτελεί βασικό στοιχείο στη διαμόρφωση της τελικής απόφασης του σχεδιασμού.

Πρέπει επίσης να τονισθεί ότι μία πιο εμπειρική προσέγγιση στο σχεδιασμό δε θα πρέπει να υποβαθμίζει τη σημασία της επί τόπου έρευνας και ειδικότερα αυτής που στοχεύει στη διασαφήνιση των γεωλογικών συνθηκών. Πρωταρχικός στόχος της θα πρέπει να είναι ο επακριβής προσδιορισμός ενός εδαφικού προφίλ με μεγάλη ακρίβεια στις θέσεις των σχεδιαζόμενων εκσκαφών, κυρίως σε περιπτώσεις αποσαθρωμένων υλικών πυριγενούς προέλευσης, όπως των γρανιτών. Στην Εικόνα 4.7.1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της σημασίας της γνώσης του εδαφικού προφίλ.



Εικόνα 4.7.1: Τομή τεχνητού πρανούς σε αποσαθρωμένο γρανιτικό πέτρωμα

Σε αυτοκινητοδρόμους, όπου είναι αναπόφευκτος ο σχεδιασμός ορυγμάτων μεγάλων κλίσεων και μικρών συντελεστών ασφάλειας, μπορεί να γίνει εκμετάλλευση των ζωνών μικρής αποσάθρωσης, αν φυσικά εντοπιστούν. Έτσι μπορούν να δοθούν μεγάλες κλίσεις στα πιο υγιή σημεία του εδαφικού προφίλ και ηπιότερες κλίσεις στις θέσεις εκσκαφής εξαλλοιωμένων υλικών. Εδαφικά προφίλ παρόμοια με αυτό στην Εικόνα 4.7.1 συναντώνται πολύ συχνά στο Χονγκ Κονγκ και στη Μαλαισία αλλά δεν αποτυπώνουν πάντοτε με ακρίβεια το γεωλογικό μοντέλο υπολειμματικών εδαφών του Ελλαδικού χώρου. Είναι πρακτικότερο να προσδιορισθεί το εδαφικό προφίλ πριν

και όχι κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, αφού αυτή πραγματοποιείται από τα υψηλότερα προς τα χαμηλότερα σημεία.

Επιγραμματικά, ο προσδιορισμός του προφίλ του μανδύα αποσάθρωσης ενός υπολειμματικού εδάφους είναι πολύ σημαντικός γιατί καθορίζει:

1. Τις πιθανές επιφάνειες και τον τύπο της αστοχίας
2. Τις συνθήκες του υπόγειου νερού και τις κρίσιμες διακυμάνσεις των πιέσεων πόρων στο πρανές
3. Τα χαρακτηριστικά διάβρωσης των υφιστάμενων υλικών (Tan & Gue, 2001)

Ένα σημαντικό ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί στο σχεδιασμό τεχνητών πρανών είναι η κατασκευή ή όχι αναβαθμών. Αναφορικά με το παραπάνω ερώτημα μπορούν να σημειωθούν τα εξής:

- Οι αναβαθμοί δεν επηρεάζουν τη συνολική ευστάθεια ενός ορύγματος. Αν ένα όρυγμα διανοιχθεί με την ίδια μέση κλίση τότε η ευστάθεια αναμένεται να είναι η ίδια. Είναι μάλιστα πιθανό να έχουμε ακόμα και δυσμενέστερες συνθήκες σε σχέση με την εισροή του νερού στο τεχνητό πρανές, αφού οι αναβαθμοί διαμορφώνουν μεγαλύτερες επιφάνειες εισροής (Εικόνα 4.7.2).

- Η χρησιμότητα των αναβαθμών περιορίζεται στον έλεγχο της διάβρωσης και στην προσβασιμότητα του πρανούς. Ο έλεγχος της διάβρωσης εξαρτάται και από την εγκατάσταση επαρκούς συστήματος αποστράγγισης, το οποίο πρέπει να είναι λειτουργικό και να συντηρείται (Rahardjo, Santoro, Leong, Ng, & Hua, 2011).

- Σε πολλές περιπτώσεις παρατηρούνται επιφανειακές αστοχίες των αναβαθμών, οι οποίες φράσσουν τα αποστραγγιστικά συστήματα με αποτέλεσμα συγκεντρώσεις επιφανειακών απορροών και επομένως επιτάχυνση των ρυθμών διάβρωσης.

- Ο σχεδιασμός των αναβαθμών είναι πολύ πρακτικός για έντονα διαβρώσιμα υπολειμματικά εδάφη, όπως αυτά γρανιτικής προέλευσης με την προϋπόθεση της επιμελούς συντήρησής τους (Wesley L. D., 2010).

Εικόνα 4.7.2: Σχεδιασμός πρανούς με και χωρίς αναβαθμούς (Wesley L. D., 2010)

Κεφάλαιο 5

Ευστάθεια τεχνητών πρανών σε υπολειμματικά εδάφη στην περιοχή της Ασπροβάλτας

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσομοίωση του πιθανού μηχανισμού γένεσης της αστοχίας είναι ένα από τα κρισιμότερα ζητήματα στις αναλύσεις ευστάθειας τεχνητών πρανών. Αυτό καθίσταται ακόμη πιο σημαντικό στις περιπτώσεις βραχομάζας σε περιοχές σύνθετων γεωλογικών και τεκτονικών συνθηκών. Η προσομοίωση αυτή είναι τόσο αποτελεσματικότερη όσο απαντά με βέλτιστο τρόπο σε δύο βασικά ερωτήματα:

- Ποιος είναι ο τύπος της πιθανής αστοχίας.
- Ποια μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας πρέπει να επιλέγονται στην ανάλυση.

Τελικός στόχος της προσομοίωσης είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων σχεδιασμού τεχνητών πρανών με ρεαλιστικό τρόπο. Είναι φανερό ότι τα δύο παραπάνω ζητήματα αλληλεπιδρούν στο τελικό αποτέλεσμα της κάθε ανάλυσης. Ειδικότερα οι παράμετροι αντοχής των σχηματισμών επιδρούν καθοριστικά στον πιθανό τύπο της αστοχίας που θα επιλεγεί για να αναλύθεί, ενώ και η επιλογή ενός τύπου αστοχίας είναι καθοριστική για τη σωστή προσομοίωση της κατάστασης της βραχομάζας.

Στις περιπτώσεις ανάλυσης ευστάθειας σε έντονα αποσαθρωμένα και ρηγματωμένα πετρώματα που παρουσιάζουν μια «χαοτική» εικόνα βραχόμαζας, η συνήθης μορφή προσομοίωσης της πιθανής αστοχίας είναι αυτή ενός ισότροπου υλικού. Τα χαρακτηριστικά αντοχής του υλικού αυτού προκύπτουν από ανάδρομη ανάλυση μιας πιθανής ή υπαρκτής εδαφικής αστοχίας περιστροφικού τύπου ή από την εφαρμογή κάποιου συστήματος ταξινόμησης της βραχόμαζας. Τέτοιες προσομοιώσεις δίνουν συνήθως μη ρεαλιστικά αποτελέσματα όταν η βραχόμαζα δε συγκροτείται αποκλειστικά από υπολειμματικά «εδαφοποιημένα» υλικά, αλλά περιέχει και συμπαγέστερα βραχώδη μέλη διαφορετικού βαθμού καταπόνησης και αποσάθρωσης(Χατζηγώγος & Μακεδών, 2008).

Επιπλέον η επιλογή των μηχανικών χαρακτηριστικών τέτοιων υλικών είναι αντικείμενο εργαστηριακού προσδιορισμού αλλά και έμμεσου υπολογισμού με βάση άλλες φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Έχουν προταθεί σειρές τέτοιων ιδιοτήτων που επηρεάζουν την παραμένουσα αντοχή εδαφικών υλικών (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996) και μπορούν να δώσουν ποσοτικές σχέσεις ανάμεσα στην αντοχή και τις φυσικές ιδιότητες (κοκκομετρία, όρια Atterberg, ορυκτολογική σύσταση). Τέτοιες σχέσεις έχουν προταθεί για αργιλικά υλικά (Skempton, 1985) αλλά και για ποικιλία άλλων υλικών, εδαφικών και μη, από πολλούς ερευνητές (Wesley L. D., 2003),

(Tsiambaos, 1991). Γενικά όμως στις περιπτώσεις όπου τα υλικά δεν είναι αμιγώς αργιλικά ή ανήκουν στην κατηγορία της αργίλου αλλά περιέχουν και χονδρότερα κλάσματα, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των εδαφοποιημένων γνευσιακών υλικών της περιοχής έρευνας, δεν μπορεί να προκύψει μια γενική σχέση ανάμεσα στην αντοχή τους και τις παραπάνω φυσικομηχανικές ιδιότητες (Wen, Aydin, Duzgoren-Aydin, Li, Chen, & Xiao, 2007). Παράλληλα η μηχανική συμπεριφορά τέτοιων υλικών ενώ επηρεάζεται σαφώς από την περιεκτικότητα της αργίλου, εντούτοις είναι έντονα μεταβαλλόμενη ανάλογα με τον τύπο των κυρίαρχων αργιλικών ορυκτών (Kenny, 1977).

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έγινε προσπάθεια εκτίμησης της επικινδυνότητας που παρουσιάζουν τα πρανή των ορυγμάτων στα τμήματα 11.2 και 11.3 της Ε. Ο. από τη Χ. Θ. 9+000 έως και την 15+000 περίπου, στην περιοχή της Ασπροβάλτας. Στα τμήματα αυτά κατά την εκτέλεση αλλά και μετά την ολοκλήρωση των εργασιών εκσκαφής, παρατηρήθηκαν εκτεταμένες αστοχίες (κατολισθήσεις), σε ασυνήθιστα μεγάλο αριθμό θέσεων. Το γεγονός αυτό εύλογα και αιτιολογημένα προκάλεσε προβληματισμό στους μελετητές. Ο προβληματισμός αυτός αφορούσε τόσο τον αρχικό σχεδιασμό όσο και την πιθανότητα, με την πάροδο του χρόνου, να παρουσιαστούν ανάλογα προβλήματα και σε κάποια από τα υπόλοιπα πρανή, δηλαδή την πιθανότητα εκδήλωσης αστοχιών μετά την έναρξη χρήσης της οδού. Τα αίτια που φαίνεται να δημιουργούν τέτοιες συνθήκες υψηλής επικινδυνότητας είναι συνήθως η υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών με το χρόνο και η συγκυριακή αύξηση των δυνάμεων ανατροπής. Σημείο αναφοράς της έρευνας ήταν αυτά τα γενικά αίτια να εξετασθούν, να μελετηθούν και να προσδιορισθούν όσο το δυνατόν πιο συγκεκριμένα.

Πρέπει να σημειωθεί, πως στην περιοχή της Ασπροβάλτας, και με αφορμή τις εν λόγω αστοχίες, έχουν διεξαχθεί πολλές εργασίες τόσο μελετητικού όσο και ερευνητικού χαρακτήρα. Το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρ/γιας του Α.Π.Θ. με επικεφαλής τον Καθηγητή κ. Β. Χρηστάρα έχει εκπονήσει ένα σημαντικό, στοχευμένο ερευνητικό έργο στην περιοχή μελέτης που περιλαμβάνει μία διδακτορική διατριβή (Χατζηαγγέλου, 2008), διπλωματικές εργασίες ειδίκευσης, προπτυχιακές εργασίες και σημαντικές δημοσιεύσεις εργασιών (Στιμάραντζης, Δημόπουλος, Κίλιας, Χατζηαγγέλου, Χατζηγώγος, & Χρηστάρας, 2004), (Chatziaggelou & Christaras, 2005), (Chatziaggelou & Christaras, 2006), (Chatzigogos, Makedon, & Tsotsos, 2007). Επιπρόσθετα υπήρχαν οι μελέτες σχεδιασμού και αποκατάστασης των κατολισθήσεων των ορυγμάτων της περιοχής της Ασπροβάλτας (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004), (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.- Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004), (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε., 2004), καθώς και τεχνικές εκθέσεις συμβούλων-εμπειρογνωμόνων (Μαρίνος, 2004), (Τσότσος & Καββαδάς, 2004) που περιλαμβάνουν λεπτομερή γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα και αντίστοιχα αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας.

Πίνακας 5.1.1: Πίνακας των ορυγμάτων που συναντώνται από τη Χ. Θ. 9+000 έως τη Χ. Θ. 15+000 περίπου, των τμημάτων 11.2 και 11.3 της Εγνατίας Οδού (Περιοχή Ασπροβάλτας)

α/α	Χ.Θ. Κρίσιμης διατομής	Αρχή και τέλος	Χαρακτηρισμός της κατάστασης
1		9+000.00-9+620.00	Δεν εξετάσθηκε. Δεν παρατηρήθηκε αστοχία.
2	9+780.00	9+640.00-9+900.00	Εκδηλώθηκε σημαντική κατολίσθηση. Έγινε μελέτη και επέμβαση.
3	10+312.86	10+292.86-10+372.86	Εκδηλώθηκε σημαντική κατολίσθηση. Έγινε μελέτη και επέμβαση.
3a	10+500.00	10+400.00-10+700.00	Εκδηλώθηκε σημαντική κατολίσθηση. Έγινε μελέτη και επέμβαση.
3b	10+812.86	10+712.86-10+892.86	Εκτιμήθηκε ως οριακή η ευστάθεια του ορύγματος. Έγινε μελέτη και επέμβαση.
4	11+012.86	10+912.86-11+107.00	Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.
5	11+452.86	11+312.86-11+552.86	Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.
6	11+572.86	11+572.86-11+672.86	Παρατηρήθηκαν τοπικές αστοχίες επιφανειακού χαρακτήρα. Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.
7	11+697.94	11+692.86-11+832.86	Παρατηρήθηκαν καταπτώσεις τεμαχών. Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.
8	11+912.86	11+852.86-12+012.86	Παρατηρήθηκαν τοπικές αστοχίες επιφανειακού χαρακτήρα και αστοχία της άνω αναβαθμίδας. Έγινε επέμβαση.
9	12+872.86	12+732.86-12+932.86	Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.
10	13+083.29	12+952.86-13+103.29	Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.
11	13+243.29	13+183.29-13+271.43	Παρατηρήθηκαν αστοχίες τοπικού χαρακτήρα. Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.
12	13+483.29	13+283.29-13+580.01	Παρατηρήθηκαν αστοχίες τοπικού χαρακτήρα. Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.
13	13+598.30	13+598.30-13+723.29	Εκδηλώθηκε σημαντική κατολίσθηση. Έγινε μελέτη και επέμβαση.
14	14+003.29	13+953.29-14+243.29	Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.
15	14+443.29	14+442.29-14+563.29	Παρατηρήθηκαν καταπτώσεις τεμαχών. Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.
16		14+583.29-15+000.00	Δεν εξετάσθηκε. Δεν παρατηρήθηκε κατολίσθηση.

Ο Πίνακας 5.1.1 περιλαμβάνει τα ορύγματα των τμημάτων 11.2 και 11.3 της Ε.Ο., των οποίων εξετάσθηκε η συμπεριφορά ευστάθειας. Επιπλέον στο Παραρτήμα Δ παρατίθεται η αλληλουχία των διατομών των διαφόρων ορυγμάτων κατά σειρά χιλιομετρικής θέσης (υποδεικνύεται η ιδιαίτερης σημασίας κρίσιμη διατομή), καθώς επίσης και χαρακτηριστικές φωτογραφίες.

5.1.1 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η περιοχή έρευνας αποτελεί τμήμα των νοτίων απολήξεων του ορεινού όγκου των Κερδυλίων λίγο πριν την κατάληξή τους στη στενή παράκτια περιοχή της Ασπροβάλτας. Το μορφολογικό ανάγλυφο είναι τραχύ αποτελούμενο από αλλεπάλληλους λόφους, οι οποίοι χωρίζονται μεταξύ τους με χαραδρώσεις και βαθιές μορφολογικές γραμμές μικρών γενικά ρεμάτων. Το υδρογραφικό δίκτυο είναι δενδριτικής μορφής και αποστραγγίζει τον ορεινό όγκο.

Στο τμήμα αυτό, ο αυτοκινητόδρομος διέρχεται λίγο πάνω από την πεδινή περιοχή που τέμνει τα φυσικά πρανή των ορεινών απολήξεων. Τα φυσικά πρανή αναπτύσσονται με κλίσεις που κυμαίνονται από 20°-33°. Οι λοφοειδείς απολήξεις είναι επιμήκεις με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ μέχρι τη Χ.Θ. 13+000 και στη συνέχεια με διεύθυνση Β-Ν. Μεταξύ του ορεινού όγκου και της θάλασσας μεσολαβεί στενή πεδινή περιοχή. Παλαιότερα στην παράκτια αυτή ζώνη αναπτύσσονταν κατά θέσεις μικρές λίμνες και λιμνοθάλασσες καθώς και αμμόλοφοι, πολλοί από τους οποίους έχουν σήμερα διαβρωθεί (Εικόνα 5.1.1).

Εικόνα 5.1.1: Δορυφορική εικόνα περιοχής έρευνας

Η γεωμορφολογία της περιοχής φαίνεται πως ευνοεί το σχηματισμό υπολειμματικών εδαφών με υψηλό ποσοστό ενεργών αργιλικών ορυκτών (σμεκτίτες) στην περιοχή των απολήξεων των λόφων, στις θέσεις δηλαδή όπου διανοίχθηκαν τα ορύγματα. Όπως αναφέρεται και στην Ενότητα 2.1.4, τα συγκεκριμένα ορυκτά παράγονται όταν οι συνθήκες προς τα κατάντη περιορίζουν την επιφανειακή και την κατακόρυφη αποστράγγιση της περιοχής και οι μετακινήσεις της υγρασίας καθορίζονται αποκλειστικά από τις εποχιακές μεταβολές,. Στα ανάντη της περιοχής

αναμένεται η παρουσία μικρής ενεργότητας αργιλικών ορυκτών και επομένως καλύτερη μηχανική συμπεριφορά των υπολειμματικών εδαφών.

5.1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Σε αυτήν την ενότητα περιγράφονται αναλυτικά οι σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή έρευνας, όπως αναφέρονται στις οριστικές γεωλογικές μελέτες που εκπονήθηκαν στις θέσεις ενδιαφέροντος και τα συμπεράσματα με βάση τα οποία εκτελέσθηκαν οι αναλύσεις ευστάθειας για την αποκατάσταση των ορυγμάτων που αστόχησαν. Σημειώνεται πως το παραγόμενο γεωλογικό μοντέλο με βάση τα γεωλογικά ευρήματα των προαναφερόμενων μελετών είναι απλουστευμένο σε σχέση με το προτεινόμενο στην παρούσα έρευνα που περιγράφεται στην ενότητα 2.1.7 και παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1.12.

Οι σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή των υπό εξέταση ορυγμάτων και φαίνονται σε μία ενδεικτική διατομή στην Εικόνα 5.1.2 είναι οι παρακάτω (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004):

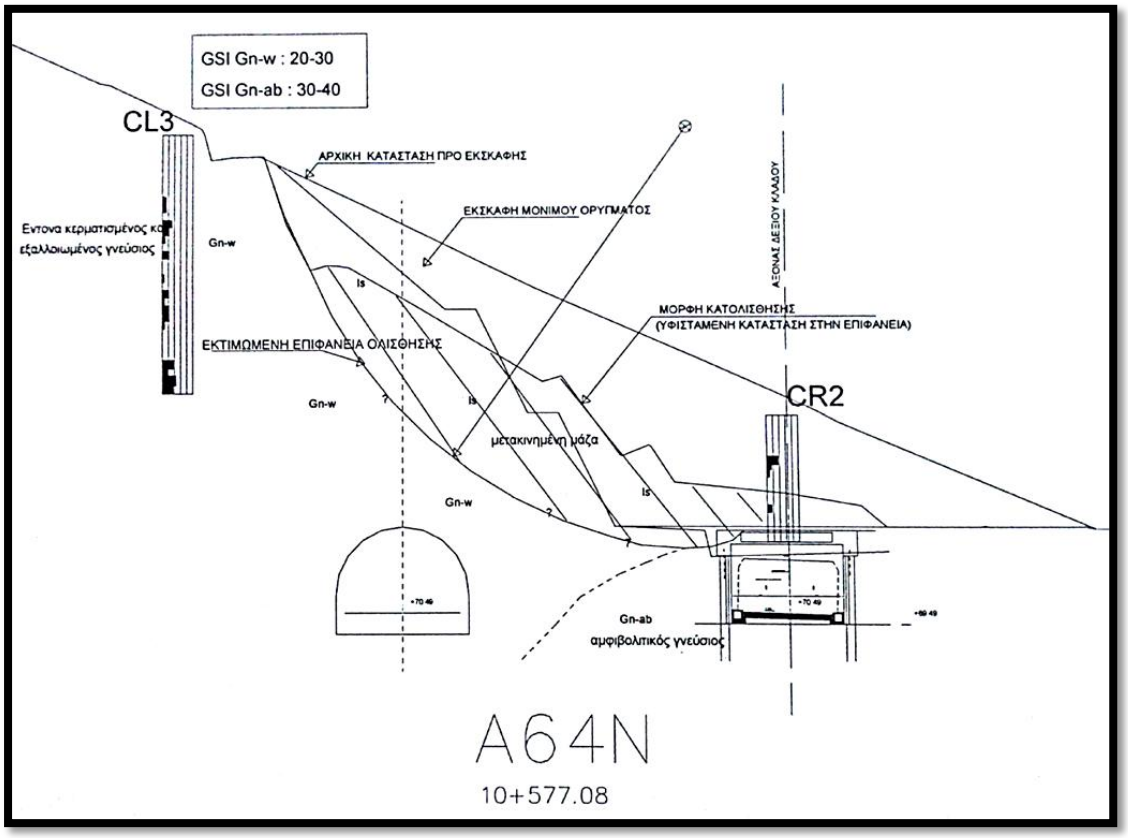
- Βιοτιτικοί γνεύσιοι-γνευσιοσχιστόλιθοι **(Gn-sh)** σκοτεινότεφροι με παρεμβολές αμφιβολιτών **(ab)**.
- Πυκνές πηγματιτικές και απλητικές φλεβικές διεισδύσεις **(Gn-pyg)** που διακόπτουν τους βιοτιτικούς γνεύσιους.
- Λευκά παχυστρωματώδη αδροκρυσταλλικά μάρμαρα **(mr)** που παρεμβάλλονται μέσα στους γνεύσιους.
- Ελουβιακός μανδύας αποσάθρωσης **(el-gn)** που καλύπτει τα γνευσιακά πετρώματα στο μεγαλύτερο τμήμα τους.
- Υλικά κατολισθήσεων **(LS)**: Χαλαρά υλικά που περιλαμβάνουν άμμους, λατύπες, χαλίκια και αργίλους, προερχόμενα από τον κερματισμό και την εδαφοποίηση των γνευσιακών πετρωμάτων.

Η ευρύτερη περιοχή βρίσκεται σε ζώνη πολύ έντονης τεκτονικής καταπόνησης που σε συνδυασμό με την κυκλοφορία υδροθερμικών ρευστών έχουν συντελέσει τόσο στον κερματισμό της γνευσιακής βραχόμαζας, όπως και στην κατά θέσεις εξαλλοίωσή της. Η συνδυασμένη δράση των δύο αυτών παραγόντων οδηγεί στη μετατροπή της βραχόμαζας σε υλικό που προσομοιάζει με εδαφικό (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.- Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004).

Οι διεισδύσεις των πηγματιτικών και απλητικών φλεβών όπως επίσης και των υδροθερμικών διαλυμάτων έλαβαν χώρα αφενός παράλληλα προς τις ασυνέχειες του κύριου συστήματος ασυνεχειών των μεταμορφωμένων πετρωμάτων (σχιστότητα) και αφετέρου κατά μήκος των κύριων ρηγμάτων και των διακλάσεων. Στις θέσεις αυτές παρατηρούνται:

- Εκτεταμένες ζώνες έντονης καταπόνησης με την παρουσία προϊόντων κερματισμού (άμμοι και ιλύες) και εξαλλοίωσης (άργιλοι) των ορυκτών του γνευσίου. Οι ζώνες αυτές είναι πλήρως εδαφοποιημένες και στην περίμετρό τους εντοπίζεται πυκνό δίκτυο πηγματιτικών και χαλαζιακών φλεβών..

- Ζώνες αργιλικών ορυκτών (καστανοπράσινες πλαστικές άργιλοι), πάχους έως και 30cm κυρίως κατά μήκος ρηγμάτων και μεγάλων διακλάσεων (Εικόνα 5.1.3). Προέρχονται από την πλήρη αργιλοποίηση των βιοτιτικών γνευσίων (Ενότητα C).



Εικόνα 5.1.2: Τυπική διατομή ορύγματος με αναφορά στους γεωλογικούς σχηματισμούς και στις θέσεις γεωτεχνικής έρευνας (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004)

Στα βασικά συμπεράσματα των γεωλογικών και γεωτεχνικών μελετών που εκπονήθηκαν αναφέρεται, ότι η γεωμετρία και η συνέχεια στο χώρο των παραπάνω ζωνών δε μπορεί να προβλεφθεί και ότι οι ολισθήσεις που έχουν εκδηλωθεί αφορούν εδαφικού τύπου και γεωμετρίας μετακινήσεις των αποδιοργανωμένων-εξαλλοιωμένων γνευσιακών πετρωμάτων. Με βάση τα παραπάνω, εκτιμήθηκε ότι η ευστάθεια των ορυγμάτων καθορίζεται ουσιαστικά από τη γεωμετρία των εκσκαφών

Εικόνα 5.1.3: Χαρακτηριστική εικόνα αργιλοποιημένης ζώνης της Ενότητας C στο όρυγμα περί τη Χ.Θ. 9+700

5.1.3 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η τεκτονική καταπόνηση και η υδροθερμική δράση έχουν συντελέσει στον έντονο κερματισμό των γνευσίων - γνευσιοσχιστολίθων και στη δημιουργία ενός δικτύου κενών που επιτρέπει τη μετακίνηση των επιφανειακών νερών κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Τα κενά στη βραχόμαζα είναι αυξημένα επιφανειακά και μειώνονται με το βάθος, καθιστώντας το πέτρωμα λιγότερο διαπερατό. Οι ποσότητες νερού που κατεισδύουν στα ορύγματα, φαίνεται ότι αποστραγγίζονται με ταχύ ρυθμό, μέσω της βραχόμαζας λόγω βαρύτητας αλλά και επιφανειακά μέσω του υδρογραφικού δικτύου. Στις γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν δε συναντήθηκε υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας μέχρι το βάθος των 30m, επιτρέποντας τη διαπίστωση ότι τα διαμορφωμένα τεχνητά πρανή βρίσκονται στην ακόρεστη ζώνη.

Η κυκλοφορία του υπόγειου νερού στη μάζα του πετρώματος ελέγχεται τοπικά από την παρουσία των αργιλικών ζωνών κατά θέσεις. Κατά τη διάρκεια των εκσκαφών συναντήθηκαν μικρές ποσότητες "εγκλωβισμένου" υπόγειου νερού στις ζώνες εξαλλοίωσης αργιλικής σύστασης, που δεν επέτρεπε την αποστράγγισή του σε βαθύτερα επίπεδα. Το παραπάνω καθεστώς συνηγορεί υπέρ της άποψης ότι κατά τη διάρκεια των υγρών περιόδων δεν υπάρχει ανάπτυξη πιέσεων πόρων στο σώμα των ορυγμάτων, ούτε μηχανισμός ανύψωσης του υδροφόρου ορίζοντα με τη λογική του μετώπου. Υπάρχει μόνο επίδραση του νερού στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των

ζωνών εξαλλοίωσης (γεωυλικά της Ενότητας C) με την αύξηση του βαθμού κορεσμού τους (Εικόνα 5.1.4).

Εικόνα 5.1.4: Αργιλοποιημένη ζώνη εξαλλοίωσης που ελέγχει τη ροή στο σώμα του ορύγματος πίσω από το μέτωπο εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Χ.Θ. 10+500)

5.1.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό η περιοχή έρευνας βρίσκεται στο όριο των ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας I και II. Προτείνεται η χρήση του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης της ζώνης II που είναι α=0,24. Ο Πίνακας 5.1.2 παρουσιάζει την αξιολόγηση των γεωλογικών σχηματισμών που συναντώνται στην περιοχή έρευνας ως προς τη σεισμική τους επικινδυνότητα.

Πίνακας 5.1.2: Σεισμική επικινδυνότητα των σχηματισμών της περιοχής έρευνας

Α/Α	ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΣΥΝΤ. ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ β_o	ΧΑΡ. ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ T_2 (sec)
1	Τεχνητές επιχώσεις	TE	X	-	
2	Υλικά κατολισθήσεων	Ls	X	-	
3	Γνεύσιοι	Gn	A	2.5	0.4
4	Μάρμαρα	Mr	A	2.5	0.4
5	Εξαλλ. Γνεύσιοι	Gn-w	Β-Γ	2.5	0.4
6	Πηγματήτες	pyg	A	2.5	0.4

5.2 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΣΠΡΟΒΑΛΤΑΣ

Για τον προσδιορισμό και την προσομοίωση των μηχανισμών γένεσης των αστοχιών στα ορύγματα της περιοχής έρευνας αλλά και για την επέκταση της προσομοίωσης στην εκτίμηση της επικινδυνότητας των ορυγμάτων που δεν αστόχησαν, μελετήθηκε το ιστορικό των φαινομένων αστοχιών. Το μοντέλο ανάλυσης που θα επιλεγεί θα πρέπει να είναι ενιαίο για όλα τα ορύγματα και να ερμηνεύει τις γεωμετρικές, γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες καθενός από αυτά. Στις επόμενες Ενότητες παρουσιάζεται ένα σύντομο ιστορικό των κατολισθητικών φαινομένων της περιοχής έρευνας συνοδευόμενο από τα κύρια γεωμετρικά, γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία των ορυγμάτων στα οποία σημειώθηκαν. Οι έλεγχοι ευστάθειας έγιναν με ανάστροφες αναλύσεις για Συντελεστή Ασφάλειας 1 με τη χρήση του προγράμματος Winstabl (μέθοδος Bishop).

5.2.1 ΥΨΗΛΟ ΟΡΥΓΜΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ Χ.Θ. 9+500 - 9+800

Στο συγκεκριμένο μεγάλων διαστάσεων όρυγμα έχουν εκδηλωθεί μέχρι σήμερα τρία περιστατικά κατολισθήσεων, όλα μετά από περιόδους βροχοπτώσεων. Η πρώτη κατολίσθηση ήταν εκτεταμένη και εκδηλώθηκε κατά τη διάρκεια της αρχικής εκσκαφής (Μάρτιος 2001). Αυτή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη γεωμετρία που προτάθηκε και χρησιμοποιήθηκε γενικά στην περιοχή δηλαδή με κλίση υ:β=2:1, ύψος αναβαθμού h=8m και πλάτος αναβαθμού d=5m. Μετά την πρώτη κατολίσθηση ακολούθησε αναδιαμόρφωση και απάλυνση της γεωμετρίας της εκσκαφής με νέους ηπιότερους γεωμετρικούς κανόνες, υ:β=1:1, ύψος αναβαθμού h=12m και πλάτος αναβαθμού B=5m. Στη συνέχεια εκδηλώθηκε νέα αστοχία (Νοέμβριος 2002) περί τη Χ.Θ. 9+780, η οποία επεκτάθηκε προς τα ανατολικά με την παρατήρηση νέων επιφανειών ολίσθησης. Τέλος, νέα κατολίσθηση εκδηλώθηκε μετά την απομάκρυνση των υλικών που είχαν προηγουμένως ολισθήσει, σε ένα τμήμα της υψηλότερης περιοχής του πρανούς όπου αναπτύσσονται έντονα εξαλλοιωμένοι γνεύσιοι (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.- Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004).

Οι σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή του ορύγματος είναι έντονα κατακερματισμένοι βιοτιτικοί γνεύσιοι γνευσιοσχιστόλιθοι με παρεμβολές αμφιβολιτών, που διακόπτονται τοπικά από πυκνές πηγματιτικές φλεβικές διεισδύσεις. Τέλος, κατά θέσεις παρατηρούνται φακοί χονδρόκοκκων γρανιτογνευσίων και λευκά παχυστρωματώδη αδροκρυσταλλικά μάρμαρα, που παρεμβάλλονται εντός των γνευσίων (Εικόνα 5.2.1).

Οι παραπάνω σχηματισμοί παρουσιάζουν έντονη κατά θέσεις εξαλλοίωση, αποσάθρωση και κατακερματισμό, έχουν απωλέσει το βραχώδη χαρακτήρα τους και μοιάζουν με εδαφικά - κορηματικά υλικά. Στο μεγαλύτερο τμήμα τους τα γνευσιακά πετρώματα καλύπτονται από μανδύα αποσάθρωσης και τα παραγόμενα, από τον κερματισμό και την εδαφοποίηση των γνευσιακών πετρωμάτων, υλικά κατολισθήσεων που περιλαμβάνουν άμμους, λατύπες, χαλίκια και αργίλους. Οι θέσεις των ζωνών εξαλλοίωσης και εδαφοποίησης συνδέονται με παλιές ρηξιγενείς ζώνες μέσα στις οποίες διείσδυσαν υδροθερμικά ρευστά και υποβάθμισαν ακόμη

περισσότερο την ποιότητα της βραχόμαζας. Η συνέχεια αυτών των ασθενών ζωνών, όπως και η γεωμετρία τους δεν μπορεί να προβλεφθεί (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004).

Εικόνα 5.2.1: Άποψη του ορύγματος περί τη Χ.Θ. 9+700 τον Απρίλιο του 2006

Με βάση τις κατατάξεις βραχόμαζας στα μέτωπα εκσκαφής, η βραχόμαζα είναι στο σύνολό της πολύ φτωχή έως φτωχή (κατηγορία V & VI, Εικόνα 5.2.2). Το γεγονός ότι ο προσανατολισμός της σχιστότητας των πετρωμάτων είναι ευνοϊκός ως προς την ευστάθεια ενισχύει την άποψη ότι αυτή καθορίζεται από τον κατακερματισμό της βραχόμαζας και τις εξαλλοιωμένες ζώνες του γνευσίου. Το προερχόμενο από μηχανική και χημική αποσάθρωση εδαφικό υλικό αποτελείται από μείγμα χαλαρών υλικών με κυμαινόμενη σχετική αναλογία (άμμος + χάλικες :46-86%, ιλύς: 12-37%, άργιλος: 2-20%). Χαρακτηριστική είναι η παρουσία δευτερογενών αργιλικών ορυκτών (μοντμοριλονίτης 35% και ιλλίτης 11%). Ο ιστός του αρχικού πετρώματος είναι συχνά εμφανής σε υπολειμματική μορφή (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004). Οι έλεγχοι ευστάθειας του ορύγματος στη φάση αποκατάστασης των αστοχιών έγιναν με τη θεώρηση ενιαίου ισοδύναμου υλικού για το σύνολο του πρανούς με παραμέτρους c'=10 kPa και φ'=35°.

Εικόνα 5.2.2: Χαρακτηριστική εικόνα εδαφοποιημένης βραχομάζας περί τη Χ.Θ. 9+700

5.2.2 ΥΨΗΛΟ ΟΡΥΓΜΑ ΣΤΗ Χ.Θ. 10+300

Στη θέση που έχει διανοιχθεί το συγκεκριμένο όρυγμα έχουν εκδηλωθεί μέχρι σήμερα δύο κατολισθητικά γεγονότα. Αρχικά εκδηλώθηκε το Φεβρουάριο του 2003 μικρή αστοχία των άνω αναβαθμών στο ανατολικό τμήμα του πρανούς (περί τη Χ. Θ. 10+350) κατά τη διάρκεια της εκσκαφής τους. και Προτάθηκε η αφαίρεση φορτίου από τα ανώτερα τμήματα του ορύγματος, η μείωση των κλίσεων εκσκαφών και η δημιουργία μεγάλου ενδιάμεσου αναβαθμού (Μαρίνος, 2004). Στη συνέχεια αναδιαμορφώθηκε η γεωμετρία της εκσκαφής με ηπιότερες κλίσεις στο άνω τμήμα του ορύγματος (h=8m, d=4m) και κλίση υ:β=2:1 στον κάτω αναβαθμό, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των εκσκαφών, που δόθηκαν λόγω της παρουσίας χωματόδρομου ανάντη του πρανούς με τις υπάρχουσες δεσμεύσεις (ύπαρξη αγωγού). Μετά το τέλος της αναδιαμόρφωσης της γεωμετρίας του πρανούς, εκδηλώθηκε κατολίσθηση στο κεντρικό του τμήμα, όπου ένα μεγάλο τέμαχος υγιούς βραχόμαζας μετακινήθηκε περί τα 3m κατακόρυφα και 4m οριζόντια. Το υγιές αυτό τέμαχος περιβαλλόταν από εξαλλοιωμένο υλικό άμμων και αργίλων με μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα την αποκόλληση και μετακίνησή του κατά την εκσκαφή και την αφαίρεση υλικού από τη βάση του πρανούς (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004). Η εκδήλωση της κατολίσθησης έλαβε χώρα μετά την

ολοκλήρωση των εκσκαφών, σε ιδιαίτερα ξηρή περίοδο χωρίς βροχοπτώσεις (Εικόνα 5.2.3).

Εικόνα 5.2.3: Ολίσθηση τύπου "block" στο κεντρικό τμήμα του ορύγματος περί τη 10+300

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή του ορύγματος είναι όμοιοι με αυτούς που περιγράφονται στη θέση Χ. Θ. 9+700. Η αποδιοργάνωση και εξαλλοίωση της βραχομάζας σχετίζεται άμεσα, αφενός με την τεκτονική και αφετέρου με τη δράση υδροθερμικών διαλυμάτων και των συνοδών διεισδύσεων, οι οποίες κινήθηκαν τόσο παράλληλα προς τις κύριες ασυνέχειες των πετρωμάτων (σχιστότητα), όσο και κατά μήκος των ρηγμάτων και των διακλάσεων. Η διαδικασία αυτή δε διέπεται από σαφή γεωμετρία και είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εκτεταμένων ζωνών έντονου κερματισμού και εξαλλοίωσης, οι οποίες αποτελούνται από άμμους και ιλύες (θρυμματισμός) και ζώνες καστανοπράσινων πλαστικών αργίλων πάχους έως και 30cm (αργιλοποίηση των έντονα βιοτιτικών γνευσίων). Στις ζώνες αυτές λείπει ο χαρακτήρας βραχόμαζας (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004).

Η κατολίσθηση στην περιοχή του ορύγματος οριοθετείται δυτικά από ένα ρήγμα διεύθυνσης ΝΔ-ΒΑ και ανατολικά από ασθενή ζώνη που δε διακρίνεται μέσα στην αποδιοργανωμένη βραχομάζα. Στη ζώνη του ρήγματος αναπτύσσεται κοκκώδες υλικό προερχόμενο από την καταπόνηση των γνευσίων και εντοπίζονται γραμμώσεις που δημιουργήθηκαν κατά την ολίσθηση. Εκτός από την κύρια ολίσθηση παρατηρούνται τοπικές ολισθήσεις κατά μήκος επιφανειών διακλάσεων. Με βάση τις

κατατάξεις βραχομάζας στα μέτωπα εκσκαφής, η βραχόμαζα χαρακτηρίζεται στο σύνολό της πολύ φτωχή έως φτωχή (κατηγορία V&IV) (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004). Οι έλεγχοι ευστάθειας του ορύγματος στη φάση αποκατάστασης των αστοχιών έγιναν με τη θεώρηση ενιαίου ισοδύναμου υλικού για το σύνολο του πρανούς με παραμέτρους c'=10 kPa και φ'=35°. Συμπληρωματικά εκτελέσθηκαν αναλύσεις τύπου "block" με τον ορισμό μιας περιοχής ασθενούς ζώνης κοντά στη διαπιστωμένη επιφάνεια αστοχίας για να εξετασθεί η αξιοπιστία της προσομοίωσης του συνόλου του πρανούς ως ένα ενιαίο ισοδύναμο υλικό. Επιλέχθηκε ζεύγος παραμέτρων αντοχής από ανάστροφες αναλύσεις c'=70 kPa και φ'=35° για τη βραχόμαζα συνολικά και c'=0 kPa και φ'=25° για την ασθενή ζώνη. Εκτιμήθηκε ότι οι παραγόμενες επιφάνειες από τις δύο αναλύσεις ευστάθειας σχεδόν ταυτίζονται και ότι η υπόθεση του ενιαίου υλικού θεωρείται ικανοποιητική για τις ανάγκες του σχεδιασμού.

5.2.3 ΥΨΗΛΟ ΟΡΥΓΜΑ ΣΤΗ Χ.Θ. 10+500

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συνθέτουν την περιοχή του ορύγματος μπορούν να περιγραφούν συνοπτικά ως εδαφοποιημένα αποδιοργανωμένα-εξαλλοιωμένα γνευσιακά υλικά χωρίς δομή βραχομάζας. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούνται κερματισμένοι γνεύσιοι με μορφή βραχομάζας σχετικά υγιείς στη ζώνη του δεξιού κλάδου στο επίπεδο των εκσκαφών και έντονα αποδιοργανωμένο γνευσιακό υλικό χωρίς δομή βραχομάζας ανάντη του επιπέδου των εκσκαφών, όπου και εκδηλώθηκε η ολίσθηση (Εικόνα 5.2.4). Η γεωμετρία της αποδιοργανωμένης-εξαλλοιωμένης βραχόμαζας, με βάση τον τρόπο σχηματισμού της, δεν είναι σαφής στο χώρο (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε., 2004).

Η αποδιοργάνωση αυτή του υλικού συνδέεται με την έντονη τεκτονική καταπόνηση της περιοχής σε συνδυασμό με την κυκλοφορία υδροθερμικών διαλυμάτων. Η συνδυασμένη δράση των δύο αυτών παραγόντων έχει οδηγήσει στη μετατροπή, κατά ζώνες, της βραχόμαζας σε υλικό που προσομοιάζει με εδαφικό. Παρουσιάζεται εκτεταμένη εμφάνιση του υλικού αυτού στο κεντρικό τμήμα του πρανούς, όπως προέκυψε από επιφανειακή χαρτογράφηση και από τα στοιχεία παλαιότερων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Το έντονα διαταραγμένο αυτό υλικό, που αναπτύσσεται στην κύρια μάζα του ορύγματος εκτιμάται ότι λαμβάνει τιμές GSI =20-30 (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε., 2004). Στο πρανές και στον ανάντη δρόμο συναντώνται εκτεταμένες ζώνες θρυμματισμένου υλικού (άμμοι, ιλύες) και αργιλικών ορυκτών (καστανοπράσινες πλαστικές άργιλοι).

Οι εκσκαφές στο εξεταζόμενο όρυγμα ολοκληρώθηκαν με τη διαμόρφωση των κλίσεων υ:β=2:1 και ύψος αναβαθμού 8m. Οι έλεγχοι ευστάθειας του ορύγματος στη φάση της αποκατάστασης των αστοχιών έγιναν με τη θεώρηση ενιαίου ισοδύναμου υλικού για το σύνολο του πρανούς με παραμέτρους c'=10 kPa και φ'=35°.

Εικόνα 5.2.4: Ολίσθηση στο κεντρικό τμήμα του ορύγματος περί τη Χ.Θ. 10+500 και εικόνα σχετικά υγιούς βραχομάζας στο δεξί κλάδο του ορύγματος

5.2.4 ΥΨΗΛΟ ΟΡΥΓΜΑ ΣΤΗ Χ.Θ. 10+800

Οι εκσκαφές στο όρυγμα αυτό ολοκληρώθηκαν το καλοκαίρι του 2003 με τη διαμόρφωση των κλίσεων υ:β=2:1 και ύψος αναβαθμού 8-11m. Παρόλο που δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αστοχίες, ήταν ιδιαίτερα εμφανής η παρουσία διακριτών ζωνών βραχόμαζας με ιδιαίτερα φτωχά χαρακτηριστικά στο ανάπτυγμα του ορύγματος, σε αλληλουχία με ζώνες υγιούς γνευσίου και κατακερματισμένων μαρμάρων (Εικόνα 5.2.5). Γι' αυτόν το λόγο εκτιμήθηκε ότι η ευστάθεια του ορύγματος είναι οριακή κατά θέσεις και θεωρήθηκε αναγκαία η λήψη μέτρων ενίσχυσης-αποκατάστασης (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004). Η εκτίμηση αυτή ενισχύθηκε κι από τις θέσεις σε ορύγματα με παρόμοια γεωμετρία και γεωλογικές συνθήκες (Χ. Θ. 9+700, Χ. Θ. 10+300).

Στη Χ. Θ. 10+800 διακρίνονται δύο κύρια συστήματα ρηγμάτων με διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ και δύο συστήματα κατά θέσεις με διευθύνσεις Β-Ν και Α-Δ. Ο εντοπισμός των ρηξιγενών ζωνών, εκτός αυτών που παρατηρούνται στα ορύγματα του δρόμου, δεν είναι εύκολος εξαιτίας της έντονης φυτοκάλυψης και της κάλυψης των πετρωμάτων από ελουβιακό μανδύα αποσάθρωσης. Παρόλα αυτά οι διευθύνσεις που παρατηρήθηκαν συμπίπτουν με τις κύριες διευθύνσεις ρηγμάτων που έχουν εντοπιστεί στα πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας και τις νεότερες εφελκυστικές κινήσεις (κανονικά ρήγματα) του Τεταρτογενούς με τα οποία σχετίζεται

η ταφρογένεση του Αιγαίου. Τις διευθύνσεις αυτές ακολουθούν και οι διευθύνσεις ανάπτυξης των ρεμάτων της περιοχής, γεγονός που επιτρέπει να δεχτούμε ότι οι κοίτες αυτές συμπίπτουν στις περισσότερες των περιπτώσεων με τις παραπάνω αναφερθείσες ρηξιγενείς ζώνες (ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ, 2004). Τα ρήγματα αυτά αποτέλεσαν τις κύριες διόδους κυκλοφορίας των υδροθερμικών διαλυμάτων κατά τη μαγματική διείσδυση που εντοπίζεται στην ευρύτερη περιοχή, γεγονός που πιστοποιείται και από τις αναβλύσεις θερμών νερών ανατολικότερα του ορύγματος.

Εικόνα 5.2.5: Όρυγμα περί τη Χ.Θ. 10+800

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ορύγματος αυτού είναι η παρουσία ζωνών πράσινων αργίλων προερχόμενων από την εξαλλοίωση των αμφιβολιτικών και βιοτιτικών γνευσίων. Στις ζώνες αυτές έχουν παρατηρηθεί μικρές αστοχίες και στο σύνολό τους αποτελούν εν δυνάμει επιφάνειες αστοχίας. Επίσης παρατηρούνται ζώνες λευκοκρυσταλλικών μαρμάρων έντονα κερματισμένων, γεγονός που είναι δυνατό να προκαλέσει καταπτώσεις σχετικά μεγάλων ογκόλιθων.

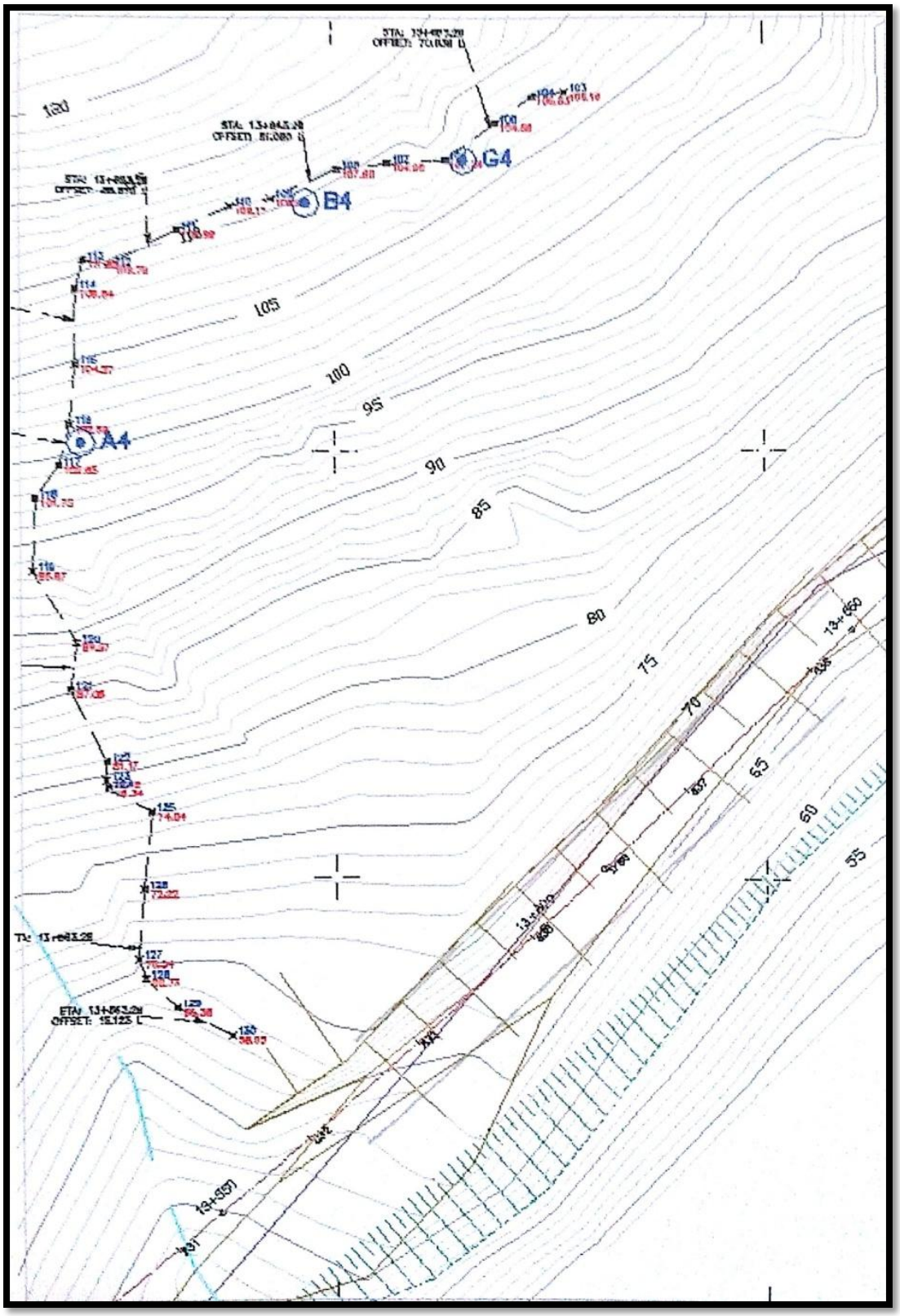
Οι μελέτες θεωρούσαν πιθανό να συναντηθούν κατά τις εκσκαφές μικρές ποσότητες υπόγειου νερού εγκλωβισμένου στις ζώνες εξαλλοίωσης των γνευσίων, αφού η σύσταση των ζωνών αυτών δεν επιτρέπει την απομάκρυνσή του σε βαθύτερα επίπεδα (λόγω της παρουσίας αργίλων). Όμοια διαπίστωση έγινε κατά τις εκσκαφές του ορύγματος στη Χ. Θ. 10+750, στη βάση του οποίου παρατηρήθηκε υγρασία και εκδηλώθηκε μικρής έκτασης κατολίσθηση.

Οι έλεγχοι ευστάθειας του ορύγματος στη φάση της αποκατάστασης των αστοχιών έγιναν με τη θεώρηση ενιαίου ισοδύναμου υλικού για το σύνολο του πρανούς με παραμέτρους c'=10 kPa και φ'=35°.

5.2.5 ΥΨΗΛΟ ΟΡΥΓΜΑ ΣΤΗ Χ.Θ. 13+600

Η εκσκαφή του ορύγματος αυτού ολοκληρώθηκε το καλοκαίρι του 2001. Το συνολικό του μήκος φτάνει τα 200 μέτρα (διατομή 832: Χ.Θ. 13+563 έως διατομή 845: Χ.Θ. 13+763) με μέγιστο ύψος 36 m περίπου, σχεδόν σταθερό, σε ένα μήκος περίπου 100 m. Το όρυγμα διαμορφώθηκε με τέσσερις βαθμίδες ύψους 8-10 μέτρων η κάθε μία, με κλίση πρανών υ:β=2:1, και πλάτος αναβαθμών 5 μέτρα περίπου μεταξύ των βαθμίδων, δίνοντας μια μέση κλίση πρανούς κοντά στο 1:1 (στέψη – βάση). Πίσω από το φρύδι του πρανούς και σε μικρή σχετικά απόσταση ήταν εγκατεστημένος ο αγωγός καυσίμων του ΓΕΑ, ο οποίος τελικώς μεταφέρθηκε, προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν επηρεασμός του από την εκσκαφή του ορύγματος.

Τον Οκτώβριο του 2003 παρουσιάστηκαν αστοχίες στο όρυγμα που αφορούσαν κάποιους ενδιάμεσους αναβαθμούς σε περιορισμένο μήκος (της τάξης των 10-20 m). Η αστοχία βαθμιαία επεκτάθηκε, και το Φεβρουάριο του 2004 υπερκάλυψε τον τοίχο της βραχοπαγίδας στον πόδα του πρανούς σε μήκος περίπου 40 m (από τη διατομή 835 έως τη διατομή 838), χωρίς να προκαλέσει εμφανείς ζημιές στο τοιχείο. Λόγω των αστοχιών αυτών καθώς και άλλων αστοχιών σε ορύγματα του ίδιου τμήματος (π.χ. Χ.Θ. 9+700, 10+300 κτλ.) υπήρξε προβληματισμός για τη συνολική ευστάθεια του ορύγματος. Έτσι αποφασίστηκε η μετακίνηση του αγωγού καυσίμων ανάντη της υφιστάμενης θέσης του και η μείωση της κλίσης του πρανούς σε υ:β=1:1. Στις αρχές Απριλίου 2004 (6/4/04), μετά από έντονες βροχοπτώσεις και ενώ βρίσκονταν σε εξέλιξη οι εργασίες εκσκαφής ανάντη του ορύγματος για τη μετακίνηση του αγωγού στη νέα του θέση, εκδηλώθηκε εκτεταμένη ολίσθηση με επέκταση της προηγούμενης προς τα δυτικά και τα ανάντη, και εμφανείς ρωγμές στη στέψη του ορύγματος. Στον πόδα του εμφανίσθηκε παραμόρφωση του ασφαλτικού τάπητα σε μήκος 35 μέτρων περίπου (διατομή 832 έως 835) και της τριγωνικής αποστραγγιστικής τάφρου, με εμφανή ανύψωση έως και 19 cm και ρηγμάτωση του τοίχου-βραχοπαγίδας με μετακίνησή του προς τα κατάντη και ελαφρά περιστροφή του (Εικόνα 5.2.7). Η ολίσθηση είχε σημαντική έκταση προς τα δυτικά και πέρα από το διαμορφωμένο μέτωπο, χωρίς ωστόσο να επηρεάζει το αμέσως προηγούμενο κατά μήκος της χάραξης όρυγμα.



Εικόνα 5.2.6: Οριζοντιογραφία ορύγματος στη Χ.Θ. 13+600

Εικόνα 5.2.7: Παραμόρφωση ασφαλτικού τάπητα και ρηγμάτωση τοίχου-βραχοπαγίδας στον πόδα του ορύγματος στη θέση 13+600

Κατά την επί τόπου έρευνα διαπιστώθηκε στο πρανές, στις διατομές 835 - 832, ζώνη ρήγματος με έντονα αποδιοργανωμένο υλικό. Η ίδια αποδιοργανωμένη εικόνα παρατηρείται και στο ανάντη τμήμα του πρανούς στους δρόμους που χρησιμοποιήθηκαν για τη μεταφορά του αγωγού. Η ζώνη αυτή συμπίπτει με τη μικρής έκτασης μισγάγγεια λεκάνη που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο μεγάλων ορυγμάτων. Στην περιοχή αυτή, στις 24-6-2004 παρατηρήθηκαν και νέες ρωγμές που υποδήλωναν πιθανή επέκταση της κατολίσθησης προς τα δυτικά. Στο δυτικό τμήμα του ορύγματος εντοπίστηκε δεύτερο ρήγμα στη διατομή 840, στη θέση του οποίου όπως και σε όλο το ανάπτυγμα του πρανούς συναντώνται έντονα αποδιοργανωμένοι – εξαλλοιωμένοι γνεύσιοι με μεγάλες εμφανίσεις πηγματιτών. Στο τμήμα αυτό, που παραμένει ακόμη σταθερό σήμερα, παρατηρούνται θύλακες από μεγάλα τεμάχη σχετικά υγιών γνευσίων μέσα στην έντονα αποδιοργανωμένη και εξαλλοιωμένη βραχόμαζα. Στο δεύτερο αυτό τμήμα παρατηρούνται και άλλες γραμμώσεις ολίσθησης που συνδέονται με παλαιότερα ρήγματα.

Μετά την εκδήλωση της αστοχίας, εγκαταστάθηκαν μάρτυρες τόσο στο φρύδι του πρανούς (εκατέρωθεν της εφελκυστικής ρωγμής) όσο και στον πόδα της αστοχίας (στο ασφαλτικό του αριστερού κλάδου και πάνω στο στηθαίο τύπου New Jersey) και άρχισαν να καταγράφονται οι μετρήσεις των μαρτύρων αυτών από τις

19/4/04 σχεδόν σε καθημερινή βάση με σκοπό την παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου (Εικόνα 5.2.8).

Εικόνα 5.2.8: Μάρτυρες μετακινήσεων στο φρύδι του πρανούς εκατέρωθεν της εφελκυστικής ρωγμής

Παράλληλα ανατέθηκε η γεωλογική–γεωτεχνική μελέτη διερεύνησης της αστοχίας και η μελέτη αποκατάστασής της στο γραφείο «ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε-ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΠΕΡΛΕΡΟΣ» και στα πλαίσια αυτής, σε συνεργασία με την ΕΟΑΕ, καθορίστηκε και εκτελέστηκε γεωτεχνική έρευνα. Η γεωτεχνική έρευνα περιέλαβε 4 γεωτρήσεις, 2 ανάντη του ορίου της κατολίσθησης (ΓΚ-3 και ΓΚ-4), 1 στον πόδα αυτής (ΓΚ-2) και 1 στο έρεισμα του δεξιού κλάδου (ΓΚ-1). Στη γεώτρηση ΓΚ-1 τοποθετήθηκε αποκλισιόμετρο ώστε μακροπρόθεσμα να παρακολουθείται και η ευστάθεια του δεξιού κλάδου. Δεν έγιναν γεωτρήσεις στο σώμα της κατολίσθησης επειδή υπήρχε θέμα ασφάλειας του προσωπικού και των μηχανημάτων λόγω της συνεχούς εξέλιξής της (όπως καταγράφονταν στις μετρήσεις των επιφανειακών μαρτύρων). Με τη γεωτεχνική έρευνα διερευνήθηκαν οι γεωτεχνικές συνθήκες σε βάθος, μέσα στην περιβάλλουσα μάζα της κατολίσθησης.

Στις 24/6/2004 παρατηρήθηκαν νέες ρωγμές μήκους αρκετών μέτρων και εύρους αρκετών εκατοστών στο ανάντη όριο της κατολίσθησης (κυρίως στο δυτικό του άκρο) και επιπλέον, τα εγκατεστημένα σημεία παρακολούθησης των μετακινήσεων έδειξαν εξελισσόμενες μετακινήσεις (με μειωμένο βέβαια ρυθμό σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρήσεις του Μαΐου 2004). Όλα τα παραπάνω αποτέλεσαν ενδείξεις περαιτέρω εξέλιξης της κατολίσθησης προς τα ανάντη και δυτικά, με κύρια

διεύθυνση των μετακινήσεων προς τα νοτιο-δυτικά (δηλαδή παράλληλα προς την παρακείμενη μισγάγγεια). Στη συνέχεια επιβεβαιώθηκε η θέση της επιφάνειας αστοχίας σε βάθος 1,8 m περίπου στη γεώτρηση ΓΚ-2 στον πόδα του πρανούς, όπου και έσπασε η σωλήνωση του αποκλισιομέτρου. Στη θέση αυτή εντοπίσθηκε το έντονα πλαστικό αργιλικό υπολειμματικό έδαφος της Ενότητας C.

Οι έλεγχοι ευστάθειας του ορύγματος στη φάση αποκατάστασης των αστοχιών έγιναν με τη θεώρηση ενιαίου ισοδύναμου υλικού για το σύνολο του πρανούς με παραμέτρους c'=10 kPa και φ'=35°.

5.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟΥ ΚΑΙ ΟΜΟΙΟΓΕΝΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ ΤΩΝ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ

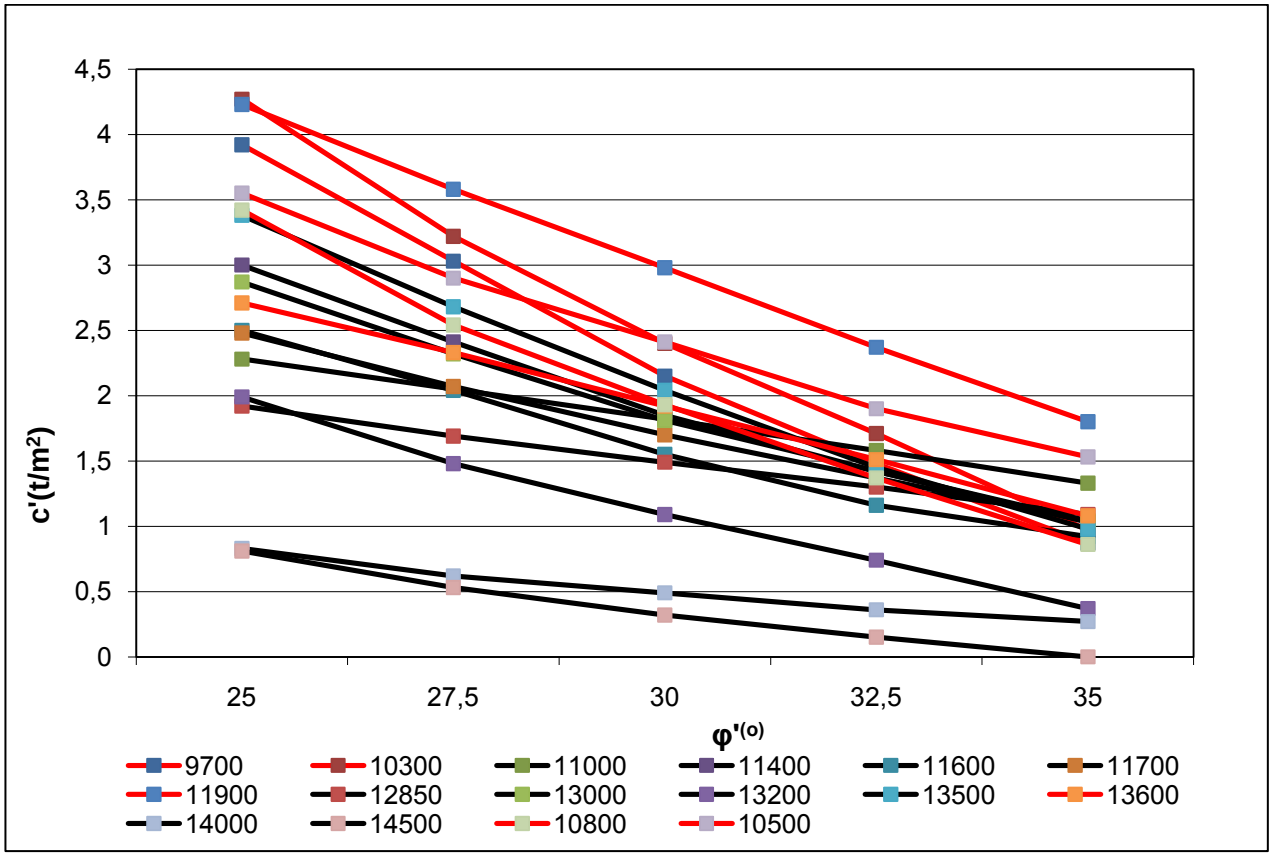
Σε αυτήν την Ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευστάθειας που εκτελέστηκαν για τη βαθμονόμηση της "Γεωμετρικής Επικινδυνότητας" των ορυγμάτων της περιοχής έρευνας που δεν αστόχησαν. Στις αναλύσεις αυτές υιοθετήθηκαν οι παραδοχές των μελετών αποκατάστασης για τα ορύγματα που αστόχησαν, δηλαδή τα υπολειμματικά υλικά θεωρήθηκαν ως ομοιόμορφα και ομοιογενή και η ευστάθειά τους θεωρήθηκε ότι ελέγχεται αποκλειστικά από τη γεωμετρία της εκσκαφής.

Όπως είναι γνωστό, η επικινδυνότητα των πρανών εξαρτάται γενικά από δύο ομάδες δεδομένων, τα γεωμετρικά και τα γεωλογικά-γεωτεχνικά. Τα δεδομένα όμως αυτά είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα και σύνθετα. Για παράδειγμα, τα γεωμετρικά δεδομένα δεν περιορίζονται μόνο στη δυσμενέστερη διατομή που εξετάζεται ως κρίσιμη, αλλά επειδή οι κατολισθήσεις είναι πάντοτε τρισδιάστατες (3D), και σε ένα μεγάλο τμήμα του διαφοροποιούμενου κατά την πορεία του δρόμου πρανούς, που η έκτασή του εξαρτάται και από τη γεωτεχνική ανομοιομορφία αλλά και τις ιδιαιτερότητες του φυσικού ανάγλυφου. Τα γεωτεχνικά δεδομένα επίσης είναι εξαιρετικά σύνθετα, καθώς εμπλέκονται η χωρική ανομοιομορφία και στις τρεις διαστάσεις, η ανισοτροπία και η κατάσταση των γεωυλικών, η οποία παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις, όχι μόνο στο μέγεθος της αντοχής τους αλλά και στα χαρακτηριστικά της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Λόγου χάρη είναι έντονες οι διαφορές της συμπεριφοράς μεταξύ της κερματισμένης - ρηγματωμένης βραχόμαζας και της μαλακής - κορεσμένης αργίλου. Τα στοιχεία αυτά επιβάλλουν την απλοποίηση των πραγματικών δεδομένων και την υιοθέτηση ενός απλουστευμένου προσεγγιστικού μοντέλου.

Ένα πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση προσέγγισης της προσομοίωσης είναι η υιοθέτηση του μοντέλου Mohr-Coulomb και ο υπολογισμός του ζεύγους των τιμών των παραμέτρων αντοχής φ' και c' που οδηγούν την κρίσιμη διατομή καθενός πρανούς ορύγματος σε τιμές SF=1,00 και SF=1,10 αντίστοιχα. Τα επιμέρους αποτελέσματα των υπολογισμών για καθένα από τα εξεταζόμενα πρανή για την περίπτωση της τιμής του SF=1 δίνονται στο Παράρτημα Δ. Για κάθε πρανές δεν προσδιορίστηκε ένα μόνο ζεύγος τιμών φ' και c' αλλά θεωρήθηκαν τιμές της γωνίας τριβής φ' που καλύπτουν όλο το εύρος των πιθανών τιμών $25° \leq \varphi' \leq 35°$ και για κάθε τιμή της γωνίας τριβής υπολογίστηκε η αντίστοιχη απαιτούμενη τιμή της συνοχής. Από τα επιμέρους αποτελέσματα προέκυψαν, για την τιμή SF=1 το σύνθετο διάγραμμα στην Εικόνα 5.3.1 για όλα τα πρανή, ενώ σχεδιάστηκαν και ξεχωριστά διαγράμματα για κάθε πρανές (Εικόνα 5.3.2). Η θέση των αντίστοιχων για κάθε πρανές γραμμών, στην Εικόνα 5.3.1, αποτελεί κατά κάποιο τρόπο έκφραση και εικόνα της Γεωμετρικής Επικινδυνότητάς του. Η διαφορά μεταξύ των δύο γραμμών στην Εικόνα 5.3.2, που αντιστοιχούν στις περιπτώσεις Σ.Α.=1.00 και Σ.Α.=1.10, απεικονίζει την ευαισθησία της ευστάθειας κάθε πρανούς στην αυξομείωση της συνοχής κοντά στην κρίσιμη κατάσταση. Όλες οι αναλύσεις ευστάθειας έγιναν με το πρόγραμμα Η/Υ PcStabl που παραχωρήθηκε από την εταιρία ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3.1, η Γεωμετρική Επικινδυνότητα των ορυγμάτων συνδέεται με τα κατολισθητικά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν. Οι κόκκινες διαγραμμίσεις υποδηλώνουν αστοχία του ορύγματος που φανερώνουν πως τελικά αστόχησαν τα γεωμετρικώς πιο επικίνδυνα. Εξαιρέσεις αποτελούν τα ορύγματα στις Χ.Θ. 11+000, 11+400 και 13+500, τα οποία αν και είναι γεωμετρικά πιο επικίνδυνα για ολίσθηση από το όρυγμα στη Χ.Θ. 13+600, εντούτοις δεν έχουν αστοχήσει. Επίσης το όρυγμα στη Χ.Θ. 11+900 αν και παρουσίασε μία τοπική αστοχία του άνω αναβαθμού, δεν παρουσίασε γενικευμένη αστοχία, όπως αναμενόταν βάσει των αποτελεσμάτων που παρατίθενται στην Εικόνα 5.3.1.

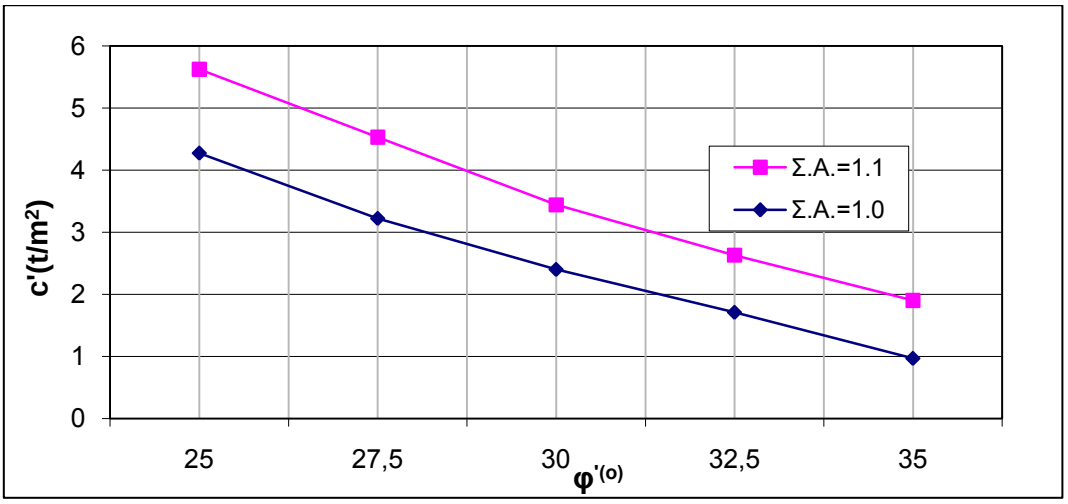
Από την ίδια εικόνα φαίνεται ότι το ζεύγος τιμών c'=10kPa και φ'=35° που επιλέχθηκε στις μελέτες αποκατάστασης, περιγράφει ικανοποιητικά την οριακή ευστάθεια των περισσότερων ορυγμάτων αν και κάτι τέτοιο είναι λογικό αφού αναφερόμαστε σε ορύγματα με την ίδια, τεχνητά εφαρμοσμένη, γεωμετρία εκσκαφής.



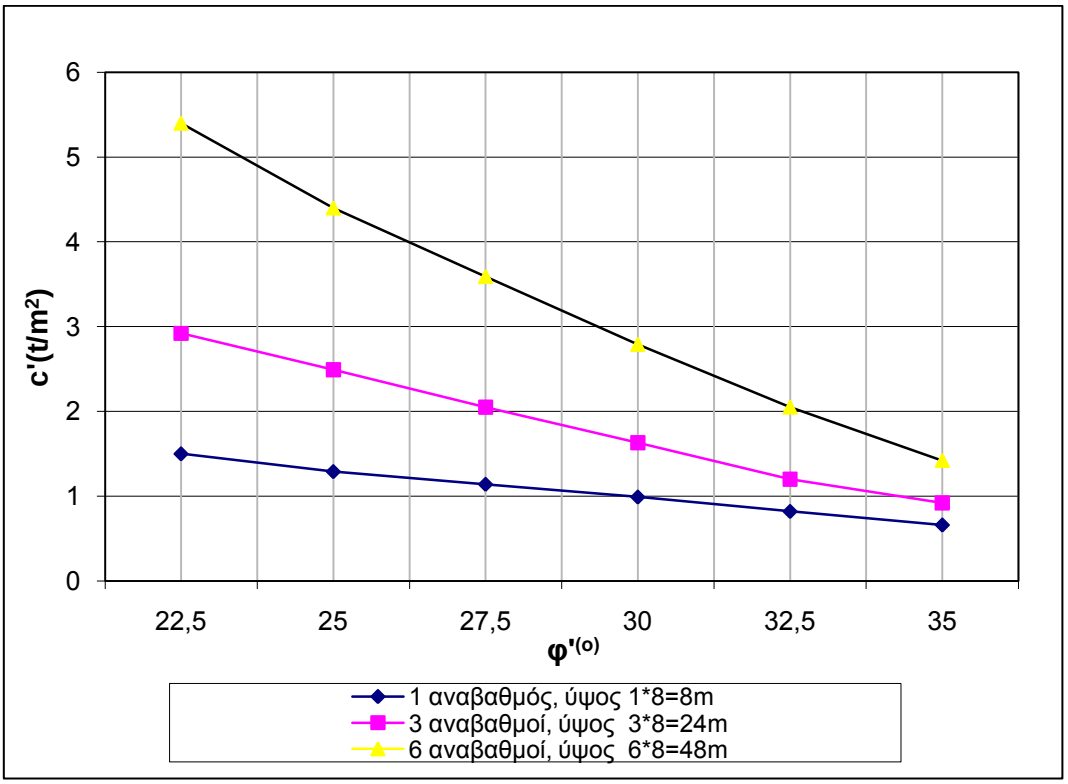
Εικόνα 5.3.1: Οριακές τιμές ευστάθειας (S.F.=1) των χαρακτηριστικών αντοχής (c' και φ') για τα υπό εξέταση ορύγματα από τη Χ.Θ. 9+000 έως και τη Χ.Θ. 15+000

Εκτός από αυτές τις αναλύσεις εξετάσθηκε η ευστάθεια τριών ορυγμάτων με 1, 3 και 6 αναβαθμούς αντίστοιχα και με γεωμετρία κάθε αναβαθμού εκείνη που φαίνεται ότι εφαρμόσθηκε γενικά στα ορύγματα της περιοχής (κλίση 63,5^o ή υ:β=2:1, ύψος 8m και πλάτος αναβαθμού 5m με τροποποιήσεις κατά θέσεις). Τα αποτελέσματα δίνονται στην Εικόνα 5.3.3 και δείχνουν ότι όσο ο αριθμός των

αναβαθμών και το ύψος του πρανούς αυξάνουν, η απαιτούμενη τιμή της συνοχής αυξάνεται επίσης. Η απαίτηση αύξησης της συνοχής μεγαλώνει όσο μικρότερη λαμβάνεται η γωνία τριβής.



Εικόνα 5.3.2: Οριακές τιμές αντοχής ορύγματος περί τη Χ.Θ. 10+300



Εικόνα 5.3.3: Απαιτούμενες τιμές χαρακτηριστικών αντοχής c' και φ' ($22.5^o<\varphi<35^o$) για ορύγματα με τυπική γεωμετρία (κλίση υ:β=2:1, ύψος και πλάτος αναβαθμών 8m και 5m αντίστοιχα) για S.F.=1

Από τις καμπύλες στην Εικόνα 5.3.1 και στην Εικόνα 5.3.2 προέκυψε η ανάγκη εκτέλεσης ορισμένων συμπληρωματικών υπολογισμών και εκτιμήσεων με επισήμανση και διατύπωση των παρακάτω σημείων:

Πίνακας 5.3.1: Δείκτης γεωμετρικής επικινδυνότητας για τα υπό εξέταση ορύγματα, ο οποίος ορίζεται ως η τιμή της συνοχής (t/m^2) που για γωνία τριβής φ'=27,5° οδηγεί την τιμή του S.F. στην οριακή τιμή 1

Χ.Θ. ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	
11+900	3,58*	Παρατηρήθηκαν κατολισθητικά φανιόμενα (*)
10+300	3,22*	
9+700	3,03*	
10+500	2,90*	
13+500	2,68	
10+800	2,54*	
11+400	2,41	
13+600	2,33*	
13+000	2,32	Δεν παρατηρήθηκαν κατολισθητικά φαινόμενα
11+700	2,07	
11+000	2,05	
11+600	2,04	
12+850	1,69	
13+200	1,48	
14+000	0,62	
14+500	0,53	

1. Την κατάταξη των πρανών με κριτήριο τη μειούμενη τιμή του σχετικού δείκτη γεωμετρικής επικινδυνότητας, όπως δείχνει ο Πίνακας 5.3.1. Ως Δείκτης Γεωμετρικής Επικινδυνότητας ορίζεται η τιμή της συνοχής που αντιστοιχεί σε τιμή της γωνίας τριβής 27,5°. Η τιμή αυτή της γωνίας τριβής επιλέχθηκε γιατί και με βάση βιβλιογραφικές υποδείξεις, θεωρήθηκε ως η πιο πιθανή και αντιπροσωπευτική για τη θεώρηση του εδαφικού υλικού ως ομοιογενούς.

2. Την παρατήρηση, που ενισχύει την ορθότητα της προτεινόμενης διαδικασίας, ότι σε σημαντικό ποσοστό (75%), τα πρανή που τελικά αστόχησαν μέχρι σήμερα, είναι και τα γεωμετρικώς περισσότερο επικίνδυνα

3. Τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας για καθένα από τα ευσταθή, έως σήμερα, ορύγματα με τιμές των *φ'* και *c'* που προέκυψαν ως δυσμενέστερες (χαμηλότερες) από τις αναλύσεις των 6 ορυγμάτων που αστόχησαν. Οι τιμές αυτές όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3.1 αντιστοιχούν στο πρανές του ορύγματος στη Χ. Θ. 13+600. Ο Πίνακας 5.3.2 αναφέρει τους συντελεστές ασφάλειας, των οποίων οι τιμές και η σειρά κατάταξης των ορυγμάτων, δίνουν κατά κάποιον τρόπο μία πρώτη εικόνα βαθμονόμησης της επικινδυνότητας των υπόλοιπων πρανών (δηλαδή εκείνων που δεν αστόχησαν ή στα οποία δεν εκτελέσθηκαν έργα σταθεροποίησης). Η αξιοπιστία των στοιχείων του διαγράμματος είναι σχετικά μικρή, εξαιτίας των πολλών και σοβαρών απλοποιήσεων και θα πρέπει να θεωρηθεί ενδεικτική.

Πίνακας 5.3.2: Τιμές των συντελεστών ασφάλειας για καθένα από τα σταθερά έως σήμερα ορύγματα με τιμές φ'=27.5^0 και c'=2.33t/m^2, εκείνες δηλαδή που προέκυψαν ως χαμηλότερες από τις αναλύσεις των ορυγμάτων που αστόχησαν και αντιστοιχούν στο όρυγμα Χ. Θ. 13+600

Χ. Θ. Κρίσιμης Διατομής (Συμβολική ονομασία ορύγματος)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ (Σ.Α)
13+500	0.958
11+400	0.988
13+000	1.000
11+700	1.042
11+600	1.043
11+000	1.065
13+200	1.123
12+850	1.162
14+500	1.503
14+000	1.581

Από το σύνολο των 10 πρανών που αναφέρει ο Την κατάταξη των πρανών με κριτήριο τη μειούμενη τιμή του σχετικού δείκτη γεωμετρικής επικινδυνότητας, όπως δείχνει ο Πίνακας 5.3.1. Ως Δείκτης Γεωμετρικής Επικινδυνότητας ορίζεται η τιμή της συνοχής που αντιστοιχεί σε τιμή της γωνίας τριβής 27,5°. Η τιμή αυτή της γωνίας τριβής επιλέχθηκε γιατί και με βάση βιβλιογραφικές υποδείξεις, θεωρήθηκε ως η πιο πιθανή και αντιπροσωπευτική για τη θεώρηση του εδαφικού υλικού ως ομοιογενούς.

4. Την παρατήρηση, που ενισχύει την ορθότητα της προτεινόμενης διαδικασίας, ότι σε σημαντικό ποσοστό (75%), τα πρανή που τελικά αστόχησαν μέχρι σήμερα, είναι και τα γεωμετρικώς περισσότερο επικίνδυνα

5. Τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας για καθένα από τα ευσταθή, έως σήμερα, ορύγματα με τιμές των φ' και c' που προέκυψαν ως δυσμενέστερες (χαμηλότερες) από τις αναλύσεις των 6 ορυγμάτων που αστόχησαν. Οι τιμές αυτές όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3.1 αντιστοιχούν στο πρανές του ορύγματος στη Χ. Θ. 13+600. Ο Πίνακας 5.3.2 αναφέρει τους συντελεστές ασφάλειας, των οποίων οι τιμές και η σειρά κατάταξης των ορυγμάτων, δίνουν κατά κάποιον τρόπο μία πρώτη εικόνα βαθμονόμησης της επικινδυνότητας των υπόλοιπων πρανών (δηλαδή εκείνων που δεν αστόχησαν ή στα οποία δεν εκτελέσθηκαν έργα σταθεροποίησης). Η αξιοπιστία των στοιχείων του διαγράμματος είναι σχετικά μικρή, εξαιτίας των πολλών και σοβαρών απλοποιήσεων και θα πρέπει να θεωρηθεί ενδεικτική.

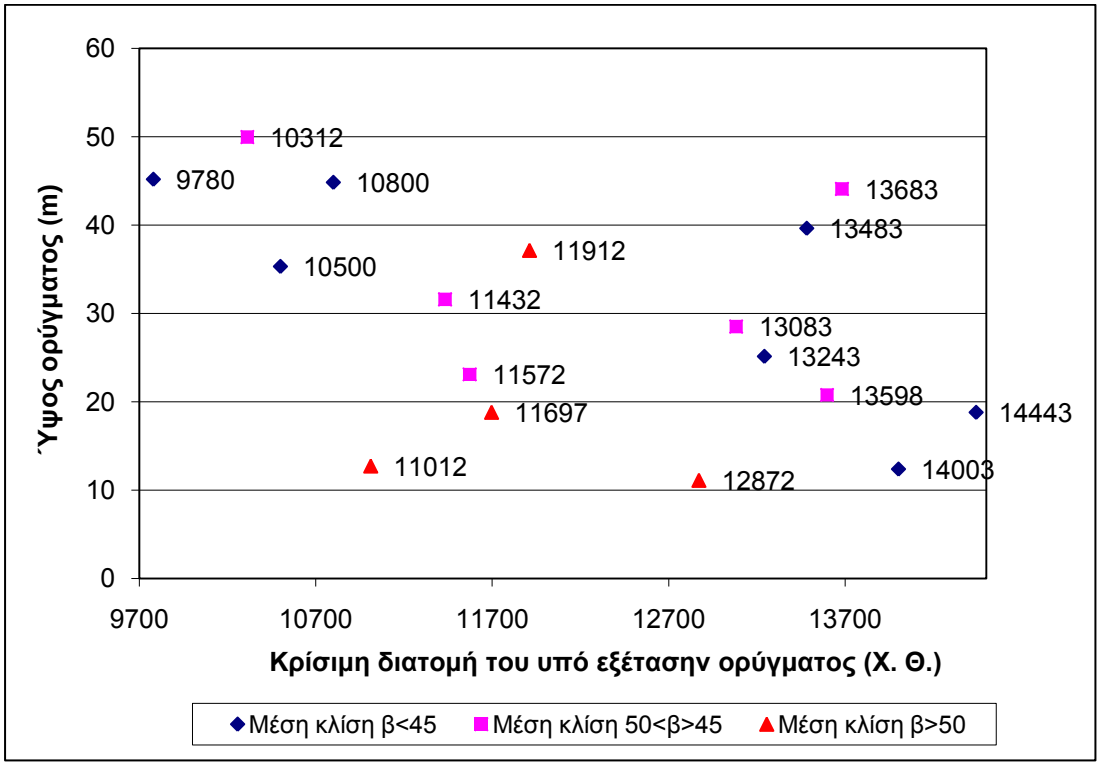
Πίνακας 5.3.2 μόνον τα 2, αυτά που έχουν κρίσιμες διατομές στις Χ. Θ. 14+500 και 14+000, χαρακτηρίζονται (για τις χρησιμοποιηθείσες τιμές των φ' και c'), από τιμές SF>1,40. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηρίζονται από τιμές του SF<1,16 και μάλιστα δύο, αυτά των Χ. Θ. 13+500 και 11+400, από τιμές του SF< 1,0. Οι παρατηρήσεις αυτές είναι συμβατές και με τη γενικότερη εικόνα που δίνουν οι αντίστοιχες καμπύλες στην Εικόνα 5.3.1. Πέρα από αυτά, όπως φαίνεται στην ίδια εικόνα, το όρυγμα στη θέση 11+900, στο οποίο παρότι παρουσιάσθηκε περιορισμένης έκτασης αστοχία δεν εκτελέσθηκαν σταθεροποιητικές εργασίες, παρουσιάζει την υψηλότερη γεωμετρική επικινδυνότητα. Πιο συγκεκριμένα στο όρυγμα αυτό για τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν προκύπτει τιμή του SF=0,8 (Πίνακας 5.3.2).

Επιπρόσθετα, στις αναλύσεις ευστάθειας έγινε μία προσπάθεια διερεύνησης εκείνων των στοιχείων της γεωμετρίας των ορυγμάτων, δηλαδή του ύψους, μήκους και κλίσης ορύγματος, που είναι κρίσιμα για την ευστάθειά τους. Ο Πίνακας 5.3.3 παρουσιάζει τα γεωμετρικά στοιχεία των υπό εξέταση ορυγμάτων με βάση τα οποία έγιναν συσχετίσεις των στοιχείων αυτών μεταξύ τους. Στην Εικόνα 5.3.4 παρουσιάζεται διάγραμμα του ύψους κάθε ορύγματος σε σχέση με τη μέση γωνία κλίσης του. Παρατηρείται ότι το ύψος παίζει καθοριστικό ρόλο στην ευστάθεια, ενώ η κλίση όχι τόσο, όπως πιστοποιείται και από τα διαγράμματα στην Εικόνα 5.3.5 και στην Εικόνα 5.3.6. Τέλος το διάγραμμα ύψους-μήκους ορυγμάτων (Εικόνα 5.3.7) φαίνεται να δίνει μια σαφή ερμηνεία στα κατολισθητικά φαινόμενα που εκδηλώθηκαν.

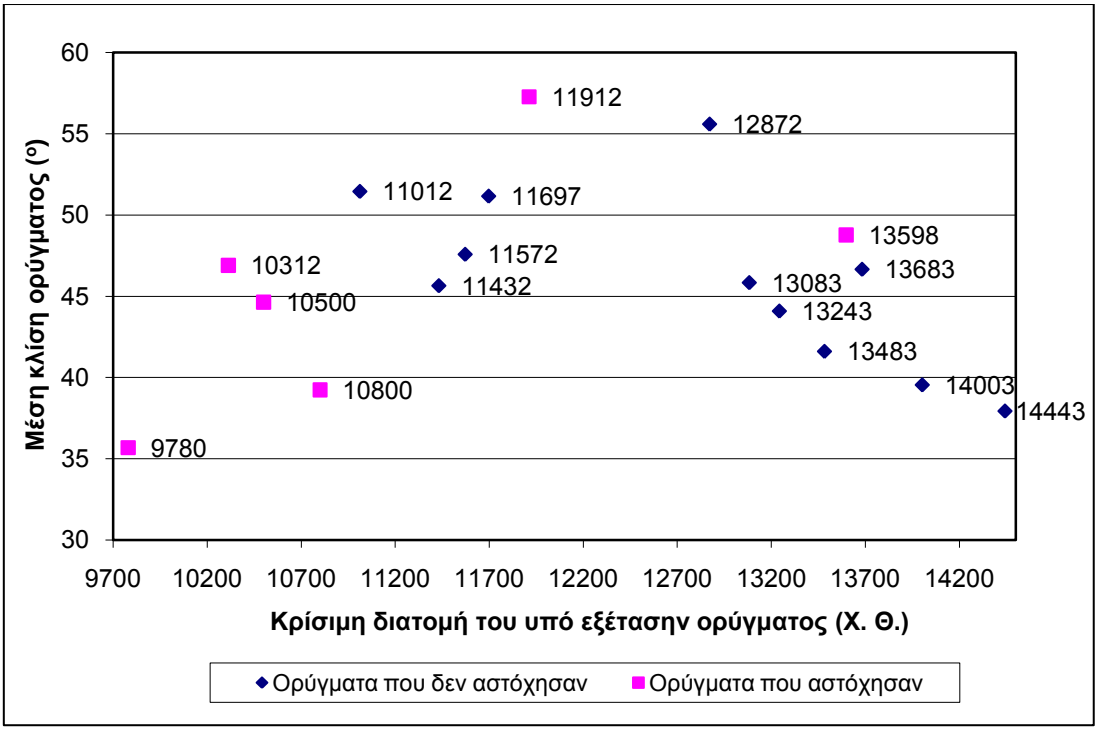
Πίνακας 5.3.3: Γεωμετρικά στοιχεία διανοιχθέντων ορυγμάτων στο κομμάτι 11.2 της ΕΓΝΑΤΙΑΣ οδού

Κρίσιμη Διατομή	Ύψος(m)	Μήκος(m)	Μέση γωνία κλίσης(°)
9+780	45.19	48.97	42.74
10+312	48.41	49.96	46.90
10+500	35.32	35.55	44.64
10+800	44.84	54.82	39.24
11+012	12.75	10.16	51.45

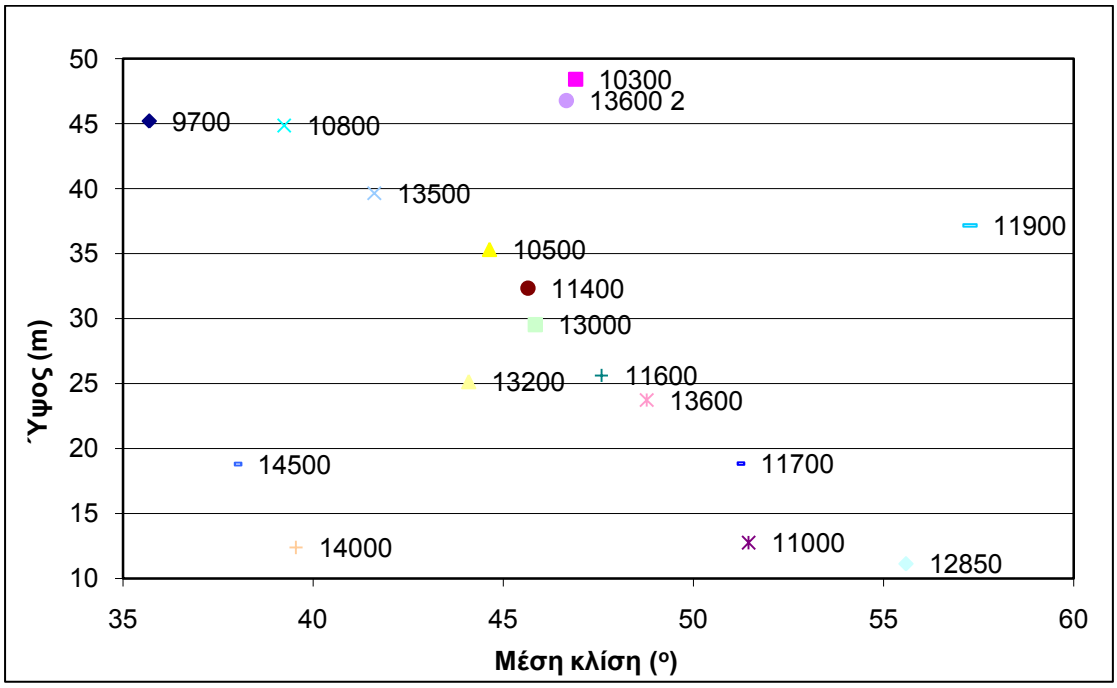
11+432	32.33	31.61	45.65
11+572	25.62	23.1	47.58
11+697	18.83	15.16	51.16
11+912	37.16	23.88	57.24
12+872	11.13	7.64	55.59
13+083	29.52	28.52	45.84
13+243	25.14	25.94	44.09
13+483	39.64	44.66	41.61
13+598	23.72	20.70	48.40
14+003	12.38	15.1	39.55
14+443	18.8	24.11	37.55



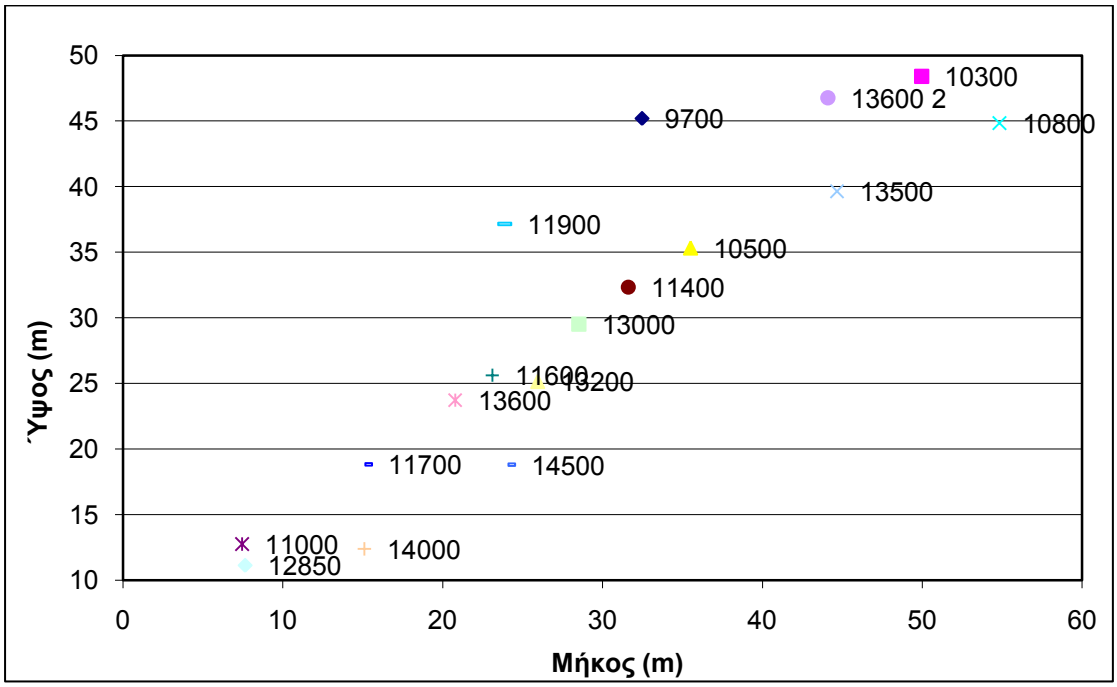
Εικόνα 5.3.4: Διάγραμμα του ύψους κάθε υπό εξέταση ορύγματος σε σχέση με τη μέση γωνία κλίσης του



Εικόνα 5.3.5: Διάγραμμα της μέσης κλίσης κάθε υπό εξέταση ορύγματος



Εικόνα 5.3.6: Διάγραμμα ύψους-μέσης κλίσης των εξεταζόμενων ορυγμάτων της Ασπροβάλτας



Εικόνα 5.3.7: Διάγραμμα ύψους-μήκους των εξεταζόμενων ορυγμάτων της Ασπροβάλτας

5.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΔΕΝ ΑΣΤΟΧΗΣΑΝ

Με βάση τα αποτελέσματα της Ενότητας 5.3 έγινε κατάταξη των ορυγμάτων της περιοχής της Ασπροβάλτας που δεν αστόχησαν, ως προς την επικινδυνότητά τους να παρουσιάσουν μελλοντικές αστοχίες:

ΟΡΥΓΜΑ ΠΕΡΙ ΤΗ Χ. Θ. 11+000

Εικόνα 5.4.1: Όρυγμα περί τη Χ.Θ. 11+000

Το όρυγμα έχει διανοιχθεί σε εδαφοποιημένο-εξαλλοιωμένο γνευσιακό υλικό χωρίς δομή βραχόμαζας μέσα στο οποίο περιέχονται νησίδες κατακερματισμένου βιοτιτικού γνευσίου. Η αποσάθρωση του γνευσίου είναι πλήρης και το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως υπολειμματικό έδαφος. Σε όλο το μέτωπο του ορύγματος παρατηρούνται πολλές, περιορισμένης έκτασης, αστοχίες με μορφή ροής γεωυλικών. Είναι εμφανής η έκπλυση εδαφικού υλικού που συγκεντρώνεται στον πόδα του ορύγματος με τη μορφή κορημάτων, με αποτέλεσμα να παρατηρείται αύξηση της γωνίας κλίσης του πάνω τμήματος του ορύγματος. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αντοχής *c'* και *φ'* που οδηγούν σε SF= 1.00 υπολογίστηκαν c'=2,05 t/m^2 και φ'=27,5°, όμως φαίνεται ότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ των αρχικών διατομών εκσκαφής και της σημερινής κατάστασης.

Το υπό εξέταση όρυγμα χαρακτηρίζεται ως μέσης επικινδυνότητας, κυρίως λόγω του μικρού ύψους του και της απουσίας γενικευμένων αστοχιών αλλά και δυσμενών, γεωμετρικά και μηχανικά, τεκτονικών δομών. Εξαιτίας της παρουσίας των κορημάτων είναι εμφανής η ανάγκη κατασκευής τοιχείου συγκράτησης των καταπτώσεων.

ΟΡΥΓΜΑ ΠΕΡΙ ΤΗ Χ. Θ. 11+400

Το όρυγμα αποτελείται από 4 αναβαθμούς και σύμφωνα με τις διατομές εκσκαφής έχει ύψος 25,62m και μέση κλίση 45,65°. Στη θέση αυτή η βραχόμαζα δομείται από έντονα κερματισμένους-αποσαρθρωμένους βιοτιτικούς γνευσίους με παρουσία πηγματιτικών όγκων και φλεβών και ανάπτυξη αποδιοργανωμένου - εδαφοποιημένου υλικού, που διατηρεί υπολειμματική βραχώδη δομή, κατά μήκος των υφιστάμενων τεκτονικών δομών. Παρατηρούνται τοπικές ολισθήσεις κατά μήκος επιφανειών διακλάσεων, ορισμένες από τις οποίες εκτείνονται σε όλο το ύψος του πρώτου και δεύτερου αναβαθμού καθώς επίσης και νεροφαγώματα, κυρίως στον

άνω αναβαθμό (Εικόνα 5.4.2). Δεν παρατηρήθηκε γενικά συγκέντρωση υλικού πίσω από το τοιχίο συγκράτησης με εξαίρεση τις θέσεις των προαναφερθέντων αστοχιών. Το υλικό στο σημείο αυτό είναι πλήρως αποσαρθρωμένο και τρίβεται - σκάβεται με το χέρι. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αντοχής *c'* και *φ'* που οδηγούν σε οριακή τιμή SF=1,00 υπολογίστηκαν c'=2,41 t/m^2 και φ'=27,5°. Το όρυγμα χαρακτηρίζεται ως σημαντικής επικινδυνότητας.

Εικόνα 5.4.2: Όρυγμα περί τη Χ.Θ. 11+400

ΟΡΥΓΜΑ ΠΕΡΙ ΤΗ Χ. Θ. 11+700

Εικόνα 5.4.3: Όρυγμα περί τη Χ.Θ. 11+700

Το όρυγμα αποτελείται από 2 αναβαθμούς και έχει, σύμφωνα με τα αρχικά σχέδια, μέγιστο ύψος 18,83m και μέση κλίση 51,16°. Στη θέση αυτή η βραχόμαζα παρουσιάζει την εικόνα έντονα κατακερματισμένου βιοτιτικού γνευσίου που κατά θέσεις εμφανίζεται σχετικά υγιής με εμφανίσεις πηγματιτικών φλεβών. Υπάρχουν επιφάνειες σχιστότητας με μικρή κλίση αντίρροπη προς την κλίση του ορύγματος, κατά μήκος των οποίων εμφανίζεται εδαφοποιημένο-εξαλλοιωμένο υλικό (σημεία με αραιή βλάστηση). Οι μικροαστοχίες που εκδηλώθηκαν στον πρώτο αναβαθμό είναι τοπικού χαρακτήρα κι έχουν τη μορφή βραχοπτώσεων τεμαχών μικρού σχετικά όγκου. Στους τοίχους συγκράτησης συγκεντρώνεται τοπικά υλικό στα σημεία των βραχοπτώσεων. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αντοχής *c* και *φ* που οδηγούν σε οριακή τιμή SF=1,00 υπολογίστηκαν c'=2,07 t/m^2 και φ'=27,5°. Το όρυγμα χαρακτηρίζεται ως μέσης επικινδυνότητας.

ΟΡΥΓΜΑ ΠΕΡΙ ΤΗ Χ. Θ. 11+900

Εικόνα 5.4.4: Όρυγμα περί τη Χ.Θ. 11+900

Το όρυγμα αποτελείται από 4 αναβαθμούς και έχει σύμφωνα με τα αρχικά σχέδια μέγιστο ύψος 37,16m και μέση κλίση 57,27°. Η βραχόμαζα στην περιοχή του ορύγματος δομείται από έντονα κερματισμένους-αποσαρθρωμένους βιοτιτικούς γνευσίους με πηγματιτικές διεισδύσεις, οι οποίοι κατά θέσεις είναι πλήρως αποσαθρωμένοι σε υπολειμματικό έδαφος (κυρίως στα άκρα του ορύγματος). Υπάρχει επιφανειακός μανδύας αποσάθρωσης και επιφάνειες ασυνεχειών μεγάλου μήκους με αποδιοργανωμένο εδαφικό υλικό καστανοκίτρινου χρώματος, μεγάλης πλαστικότητας (μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο). Οι αστοχίες που εκδηλώθηκαν στο όρυγμα είναι τοπικού χαρακτήρα και εκδηλώνονται είτε ως μικρο-ολισθήσεις κατά μήκος επιφανειών διακλάσεων, είτε με τη μορφή καταρρεύσεων του επιφανειακού μανδύα αποσάθρωσης. Επιπρόσθετα, μετά το τέλος της εκσκαφής, εκδηλώθηκε αστοχία στον άνω αναβαθμό και κρίθηκε απαραίτητη η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως σταθεροποιητικού μέσου. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αντοχής *c'* και *φ'* που οδηγούν σε οριακή τιμή SF=1,00 υπολογίστηκαν c'=3,58 t/m^2 και φ'=27,5°. Το όρυγμα χαρακτηρίζεται ως μεγάλης επικινδυνότητας.

ΟΡΥΓΜΑ ΠΕΡΙ ΤΗ Χ. Θ. 13+000

Η γεωμετρία του ορύγματος προς το ανατολικό όριό του έχει γίνει ηπιότερη από εκείνη που προβλέπεται στις αρχικές διατομές (3 αναβαθμοί, μέγιστο ύψος 29,52m και μέση κλίση 45,84°). Η εικόνα της βραχόμαζας δείχνει έντονα κατακερματισμένους και αποσαθρωμένους βιοτιτικούς γνευσίους με πηγματιτικές διεισδύσεις. Οι γνεύσιοι εμφανίζονται με σχετικά υγιή δομή αλλά κατά θέσεις όμως είναι πλήρως αποσαθρωμένοι με τη μορφή ζωνών υπολειμματικού εδάφους. Οι αστοχίες που παρατηρούνται στο όρυγμα είναι τοπικού χαρακτήρα και εκδηλώνονται ως ολισθήσεις μικροσφηνών κατά μήκος επιφανειών διακλάσεων. Εντοπίζονται επιφάνειες ασυνεχειών ομόρροπες με την κλίση του ορύγματος. Οι τοίχοι συγκράτησης σε τμήματα μεγάλου μήκους συγκρατούν κυρίως προϊόντα απόσπασης μικρών τεμαχών από το μέτωπο του ορύγματος. Στο δυτικό όριο του ορύγματος αποκαλύπτεται πρόβολος ενός σχετικά μεγάλου βραχώδους τεμάχους το οποίο, τουλάχιστον οπτικά, προκαλεί ανησυχία. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αντοχής *c'* και *φ'* που σε οριακή τιμή SF=1,00 υπολογίστηκαν c'=2,32 t/m^2 και φ'=27,5°.Το όρυγμα με γεωτεχνικά κριτήρια χαρακτηρίζεται ως μέσης επικινδυνότητας.

Εικόνα 5.4.5: Όρυγμα περί τη Χ.Θ. 13+000

ΟΡΥΓΜΑ ΠΕΡΙ ΤΗ Χ. Θ. 13+200

Εικόνα 5.4.6: Όρυγμα περί τη Χ.Θ. 13+200

Το όρυγμα περί τη Χ. Θ. 13+200 αποτελείται από 3 αναβαθμούς και έχει μέγιστο ύψος 25,14m και μέση κλίση 44,09°. Τη βραχόμαζα δομεί έντονα κερματισμένος-αποσαθρωμένος βιοτιτικός γνεύσιος με πηγματιτικούς όγκους και φλέβες καθώς επίσης και ενδιάστρωση κατακερματισμένων αδροκρυσταλλικών μαρμάρων. Οι σχηματισμοί εμφανίζουν κατά θέσεις εικόνα αποδιοργανωμένου-εδαφοποιημένου υλικού. Στο μέτωπο της εκσκαφής παρατηρούνται τοπικού χαρακτήρα αστοχίες κατά μήκος γεωμετρικά σύνθετων συστημάτων διακλάσεων. Δεν παρατηρήθηκαν επιφάνειες ασυνεχειών ομόρροπες προς το μέτωπο του ορύγματος. Κατά την υπαίθρια έρευνα δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές ποσότητες καταπτώσεων πίσω από το τοιχίο συγκράτησης. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αντοχής *c′* και *φ′* που οδηγούν σε οριακή τιμή SF=1,00 υπολογίστηκαν c'=1,48 t/m^2 και φ'=27,5°. Το όρυγμα με γεωτεχνικά κριτήρια χαρακτηρίζεται ως μέσης επικινδυνότητας.

ΟΡΥΓΜΑ ΠΕΡΙ ΤΗ Χ. Θ. 13+500

Το όρυγμα αποτελείται από 4 αναβαθμούς και έχει μέγιστο ύψος 39,64m και μέση κλίση 41,61°. Τη βραχόμαζα δομούν κυρίως βιοτιτικοί γνεύσιοι που διακόπτονται από μικρού πάχους διεισδύσεις πηγματιτικών και χαλαζιακών φλεβών, με ενδιαστρώσεις μαρμάρων. Έχουν παρατηρηθεί μικροκαταπτώσεις μεταξύ των αναβαθμών που σχετίζονται με τον έντονο κερματισμό της βραχόμαζας. Κατά την επιφανειακή παρατήρηση του μετώπου δεν εντοπίστηκαν ζώνες εξαλλοίωσης με δυσμενή γεωμετρία, καθώς επίσης και σημαντικές ποσότητες καταπτώσεων πίσω από τον τοίχο συγκράτησης. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αντοχής *c′* και *φ′* που οδηγούν σε οριακή τιμή SF=1,00 υπολογίσθηκαν c'=2.,8 t/m^2 και φ'=27,5°. Το όρυγμα που με γεωμετρικά κριτήρια κρίνεται ως πολύ δυσμενές, με γεωτεχνικά

κριτήρια κρίνεται ως μέσης επικινδυνότητας, η ευστάθειά του όμως σε βάθος χρόνου κρίνεται προβληματική.

Εικόνα 5.4.7: Όρυγμα περί τη Χ.Θ. 13+500

5.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Η ικανοποιητική αντιστοιχία μεταξύ των θέσεων εκδήλωσης αστοχιών και των θέσεων όπου υπολογίστηκαν υψηλές τιμές του δείκτη γεωμετρικής επικινδυνότητας αποτελεί ένδειξη ότι η επιρροή της γεωμετρίας στη γενική επικινδυνότητα φαίνεται να είναι σημαντική. Επιπλέον, η χρήση του μοντέλου Mohr - Coulomb ως μοντέλου μηχανικής συμπεριφοράς (θραύσης) στους ελέγχους της ευστάθειας, φαίνεται να οδηγεί σε ερμηνεύσιμα αποτελέσματα, γεγονός που ενισχύει την εφαρμοσιμότητά του.

Η προσομοίωση των υπολειμματικών εδαφών της περιοχής της Ασπροβάλτας με τη θεώρηση ενός "ισοδύναμου" ομογενούς υλικού φαίνεται ότι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνον όταν το πρόβλημα της ευστάθειας προσεγγίζεται με τη λογική της αποκατάστασης μιας υφιστάμενης αστοχίας. Γίνεται δηλαδή μία παραδοχή σκοπιμότητας και με εργαλείο την ανάστροφη ανάλυση επιτυγχάνεται μία ικανοποιητική προσομοίωση των συνθηκών ευστάθειας. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας δε συμβάλλει στον αρχικό σχεδιασμό, όπου το κρίσιμο πρόβλημα παραμένει κυρίως η επιλογή των χαρακτηριστικών αντοχής.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας σε σχέση με το ιστορικό και τη μορφή των αστοχιών στα ορύγματα της Ασπροβάλτας οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι τα γεωμετρικά στοιχεία παίζουν βέβαια καθοριστικό ρόλο, αλλά δεν ελέγχουν τους μηχανισμούς αστοχίας τους. Εύλογα λοιπόν μπορούν να διατυπωθούν οι παρακάτω παρατηρήσεις σε σχέση με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία ανάλυσης:

1. Δε λαμβάνεται υπόψη ο δομικός χαρακτήρας των υπολειμματικών εδαφών, ο οποίος κληρονομείται από το μητρικό πέτρωμα ακόμα και στον τελικό βαθμό αποσάθρωσης (VI), δημιουργώντας συνθήκες ανισοτροπίας στα μηχανικά του χαρακτηριστικά.

2. Δε λαμβάνεται υπόψη το πραγματικό γεωλογικό μοντέλο της περιοχής όπως έχει περιγραφεί (Εικόνα 2.1.12), αλλά ένα πιο απλουστευμένο, που προϋποθέτει την παρουσία ζωνών διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης, που μειώνεται με το βάθος (Εικόνα 2.1.5).

3. Δε λαμβάνεται υπόψη ο ρόλος της βροχόπτωσης και γενικότερα ο ρόλος των μεταβολών της υγρασίας, ως παράγοντα ενεργοποίησης των αστοχιών. Επιπρόσθετα, η χρονική στιγμή της εκδήλωσης των αστοχιών δε συνδέεται σε όλες τις περιπτώσεις με βροχόπτωση. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του ορύγματος στη Χ.Θ. 10+300, όπου η αστοχία έλαβε χώρα σε περίοδο έντονης ξηρασίας.

4. Η ερμηνεία των αστοχιών έγινε με την επιλογή ενιαίου ζεύγους τιμών c' και φ' για τα ορύγματα που αστόχησαν, κάτι που δεν είναι ρεαλιστικό με βάση την εικόνα των γεωυλικών σε αυτά.

5. Δεν ερμηνεύεται η λειτουργία ενός μηχανισμού απομείωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωυλικών μετά το τέλος των εκσκαφών. Μετά τις αρχικές αστοχίες που παρουσιάστηκαν κατά θέσεις στη φάση της διάνοιξης των ορυγμάτων και μετά τις νέες διαμορφώσεις της γεωμετρίας σε ευνοϊκότερες κλίσεις, έλαβαν χώρα νέες αστοχίες σε διαφορετικούς χρόνους. Το στοιχείο αυτό υποδηλώνει σαφώς την παρουσία ενός τέτοιου μηχανισμού.

6. Δεν ερμηνεύεται το γεγονός ότι έλαβαν χώρα διαφορετικού τύπου αστοχίες, δηλαδή δομικού χαρακτήρα αστοχίες (Χ.Θ.10+300) και φαινομενικά περιστροφικού-εδαφικού τύπου αστοχίες (Χ.Θ. 9+700, 10+500, 13+600).

7. Δεν ερμηνεύεται το γεγονός ότι οι αστοχίες δεν εκδηλώθηκαν πάντα στη γεωμετρικά δυσμενέστερη θέση. Επίσης, η φαινομενικά περιστροφικού τύπου ολίσθηση στη Χ.Θ. 13+600, δεν είχε διεύθυνση κίνησης κάθετα στη διεύθυνση κλίσης του μετώπου του πρανούς (δυσμενέστερη διεύθυνση) αλλά παράλληλα προς την παρακείμενη μισγάγγεια.

8. Δεν υπάρχει σύνδεση των επιλεγμένων στις αναλύσεις τιμών αντοχής με αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών, έτσι ώστε να βγουν συμπεράσματα για τον τρόπο διερεύνησης και επιλογής των μηχανικών παραμέτρων σχεδιασμού.

9. Η τελική βαθμονόμηση της επικινδυνότητας των ορυγμάτων που δεν αστόχησαν έγινε περισσότερο με ποιοτικά παρά με ποσοτικά κριτήρια. Η εφαρμογή των κρίσιμων παραμέτρων αντοχής που υπολογίστηκαν από την εφαρμοζόμενη μεθοδολογία θα οδηγούσε σε υπερσχεδιασμό των ορυγμάτων.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις είναι αναγκαία η πρόταση μίας νέας μεθοδολογίας η οποία να ερμηνεύει ικανοποιητικά τους μηχανισμούς ελέγχου της ευστάθειας των πρανών σε υπολειμματικά εδάφη, απαντώντας στους σχετικούς προβληματισμούς.

5.6 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΑΣΘΕΝΕΙΣ ΖΩΝΕΣ

5.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρουσία «υπολειμματικών» υλικών σε έντονα αποσαθρωμένα και τεκτονισμένα μεταμορφωμένα πετρώματα ακολουθεί υφιστάμενες τεκτονικές δομές (σχιστότητα, διαρρήξεις), μετατρέποντας τις διευθύνσεις των δομών αυτών σε ζώνες έντονης ανισοτροπίας μέσα στη μάζα του πετρώματος. Οι ζώνες αυτές καθορίζουν την ευστάθεια τεχνητών πρανών δίνοντας μορφές αστοχίας που προσομοιάζουν μακροσκοπικά με αστοχία εδαφικών υλικών σε κυκλική επιφάνεια ολίσθησης. Αυτή η συμπεριφορά έχει άμεση συνάρτηση με το βαθμό αποσάθρωσης και καταπόνησης των πετρωμάτων.

Εικόνα 5.6.1: Εικόνα αστοχίας στο πρανές της Χ.Θ. 10+500. Διακρίνονται αγκύρια βράχου που παραμένουν στη θέση αγκύρωσης έχοντας αστοχήσει

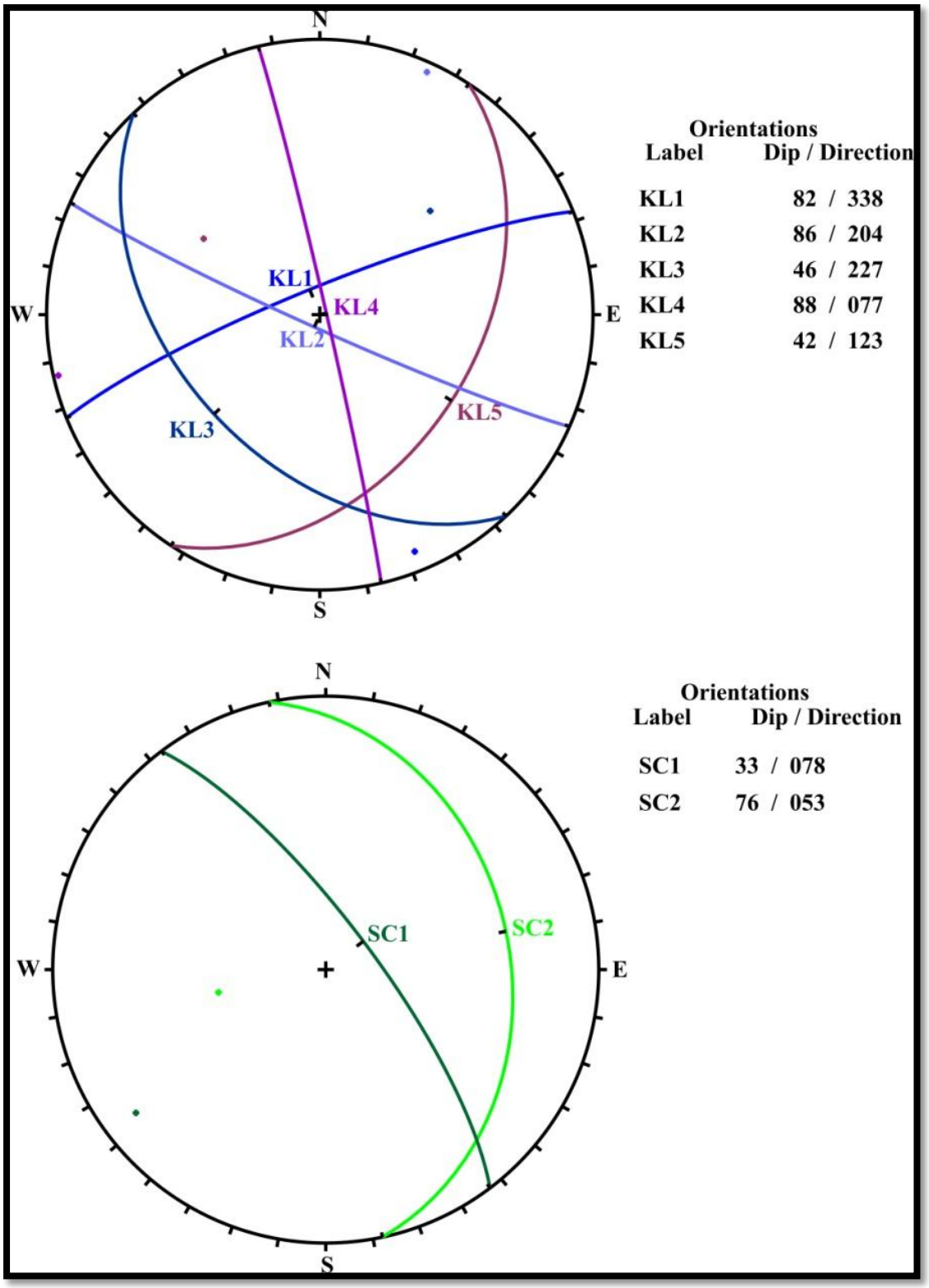
Η ανισοτροπία σε περιπτώσεις μεταμορφωμένων πετρωμάτων όπως οι γνεύσιοι στην περιοχή της Ασπροβάλτας, γίνεται ακόμα εντονότερη τόσο εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης και της αποσάθρωσης, όσο και της παρουσίας στρώσης και σχιστότητας. Οι δομές αυτές φαίνεται ότι ενυπάρχουν ως «παραμένουσα» ανισοτροπία, ακόμα και όταν ο βαθμός αποσάθρωσης φτάσει στην κατηγορία του υπολειμματικού εδάφους (Tan & Gue, 2001). Είναι συνηθισμένο τέτοια γρανιτικής σύστασης υλικά να εμφανίζουν κατάρρευση της εσωτερικής δομής τους, όταν

φτάνουν στην κατηγορία του υπολειμματικού εδάφους, όπου και εμφανίζουν μεγάλες τιμές δείκτη πόρων (Brink & Kantey, 1961), (Lumb P. , 1961). Παρόλα αυτά διατηρούν στη μάζα τους, ακόμα και σε αυτήν την κατάσταση, «ασθενείς διευθύνσεις» κατά μήκος μικροδομών της βραχόμαζας, παρουσιάζοντας μια «κληρονομούμενη» εσωτερική ανισοτροπία. Οι διευθύνσεις αυτές και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών κατά μήκος αυτών των διευθύνσεων, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη γένεση δομικά ελεγχόμενων αστοχιών σε μικροκλίμακα. Αυτές οι αστοχίες μπορούν να ενεργοποιήσουν μεγαλύτερης κλίμακας αστοχίες, οι οποίες μακροσκοπικά δίνουν την εντύπωση μιας κλασικής αστοχίας ενός «εδαφικού» υλικού περιστροφικού τύπου (Εικόνα 5.6.1).

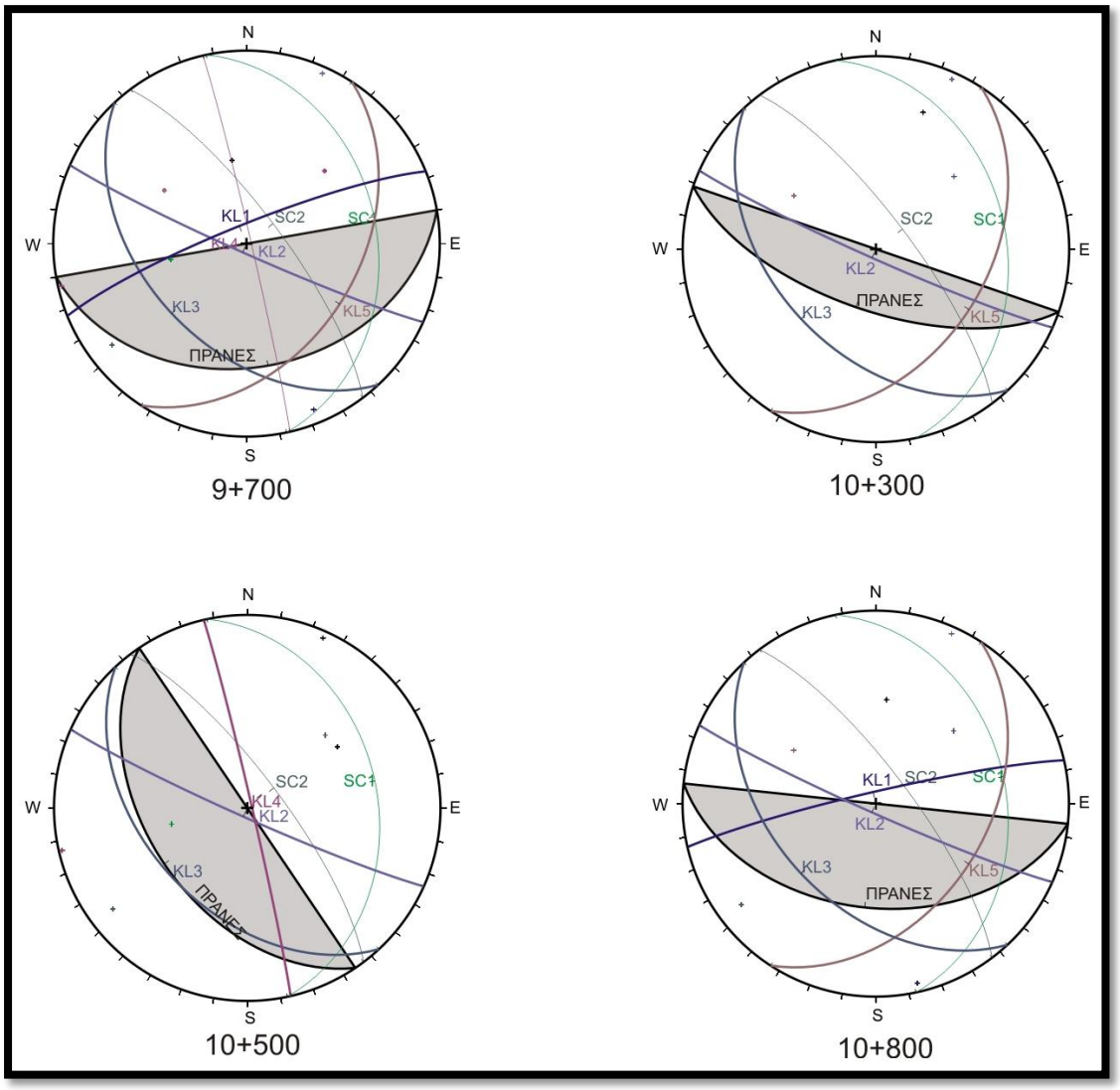
5.6.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Τα τεχνητά πρανή που εξετάστηκαν ανήκουν στο τμήμα 11.2 της Εγνατίας Οδού στην Ανατολική Μακεδονία μεταξύ των Χ.Θ. 9+700 και 10+800. Το ιστορικό των παρατηρούμενων αστοχιών σε αυτά καθώς επίσης και τα κύρια γεωμετρικά και γεωλογικά τους χαρακτηριστικά περιγράφηκαν αναλυτικά στην Ενότητα 5.3. Για την περιοχή έρευνας έγινε αρχικά ανάλυση των τεκτονικών μετρήσεων ασυνεχειών και σχιστότητας που έδωσε τις κύριες διευθύνσεις των αντίστοιχων επιφανειών (Εικόνα 5.6.2). Για κάθε πρανές έγινε ανάλυση των δομικών ασυνεχειών (διακλάσεων, σχιστότητας) σε σχέση με τη γεωμετρία του, που απεικονίζεται με στερεογραφικές προβολές Schmidt στην Εικόνα 5.6.3. Σε κάθε στερεογραφική προβολή στο σχήμα αυτό απεικονίζονται με έντονη γραμμή τα κύρια συστήματα διακλάσεων (KL-1 έως KL-3) και των επιφανειών σχιστότητας (SC1- SC2), ο συνδυασμός των οποίων τους δημιουργεί πιθανές, δομικά ελεγχόμενες, ολισθήσεις (κατά επίπεδο ή αποκοπτόμενα κατατμητικά σώματα).

Η γεωλογική διερεύνηση της περιοχής έδειξε ότι οι γνεύσιοι που συγκροτούν τα εξεταζόμενα πρανή, παρουσιάζουν ζώνες διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης, οι οποίες ακολουθούν συνήθως και τις κύριες διευθύνσεις των τεκτονικών ασυνεχειών. Κατά μήκος αυτών των διευθύνσεων αναπτύσσονται είτε ζώνες εδαφοποιημένων γνευσιακών υλικών στην κατηγορία υπολειμματικών εδαφών, είτε ζώνες με βαθμό αποσάθρωσης III-V που αποτελούνται από γνευσιακά πετρώματα, τα οποία μακροσκοπικά διατηρούν την υφή και τη δομή τους, οι μηχανικές τους ιδιότητες όμως είναι ιδιαίτερα υποβαθμισμένες. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα διακρίθηκαν τρεις ενότητες ή μονάδες γνευσιακών υλικών A, B και C, όπως περιγράφηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Τα υλικά της ενότητας A είναι υγιή ή ελαφρά αποσαθρωμένα μέλη των γνευσίων και οι παράμετροι αντοχής τους εισάγονται από προτεινόμενες τιμές για το συγκεκριμένο τύπο πετρωμάτων . Τα υλικά της ενότητας B παρουσιάζουν βαθμό αποσάθρωσης III-V και είναι αυτά που, όπως προαναφέρθηκε, διατηρούν μακροσκοπικά τη δομή τους, αλλά έχουν απολέσει μεγάλο μέρος της αρχικής τους αντοχής. Τέλος στην ενότητα C εντάσσονται τα γνευσιακά υλικά που αντιστοιχούν στην κατηγορία υπολειμματικών εδαφών.



Εικόνα 5.6.2: Εκτίμηση μέσου όρου τιμών των τεκτονικών στοιχείων της περιοχής έρευνας



Εικόνα 5.6.3: Στερεοδιαγράμματα Schmidt με την ανάλυση των τεκτονικών στοιχείων για κάθε πρανές (KL1-KL5: συστήματα διακλάσεων, SC1-SC2: επιφάνειες σχιστότητας)

Οι εργαστηριακές δοκιμές στις οποίες υποβλήθηκαν τα υλικά για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών τους περιγράφηκαν αναλυτικά στα Κεφάλαια 2 και 3. Οι τιμές όλων των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων που προσδιορίστηκαν παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω (Πίνακας 5.6.1 και Πίνακας 5.6.2).

Το υλικό της Ενότητας C παρουσιάζεται ως ένα εδαφοποιημένο αργιλικό υλικό ψηλής πλαστικότητας. Οι φυσικές του ιδιότητες παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ανομοιομορφία και κατά USCS κατατάσσεται σαν CH. Οι μηχανικές του ιδιότητες εξαρτώνται από το περιεχόμενο υγρασίας του και αν συγκριθούν με τα υλικά των A και B είναι πολύ υποβαθμισμένες. Το εύρος τιμών του φαινόμενου βάρους και του δείκτη πόρων του υλικού της ενότητας C, υποδηλώνει την επιρροή του βαθμού αποσάθρωσης πάνω σ' αυτές τις ιδιότητες, ο οποίος μεταβάλλεται ακόμα και μέσα στην ίδια την ενότητα (Thuro & Scholz, 2003). Σημαντικό ενδιαφέρον για το υλικό της ενότητας C παρουσιάζει ο προσδιορισμός του τρόπου μεταβολής της ορυκτολογικής

σύστασης των γνευσίων της περιοχής λόγω της αποσάθρωσης. Για το σκοπό αυτό δείγματα του υλικού υποβλήθηκαν σε ορυκτολογικές αναλύσεις XRD ενώ επιπλέον εξετάστηκε ορυκτολογικά και το αργιλικό τους περιεχόμενο. Διαπιστώθηκε ότι υπάρχει συμφωνία των φυσικών ιδιοτήτων που προσδιορίστηκαν παραπάνω με την ορυκτολογική τους σύσταση.

Πίνακας 5.6.1: Φυσικές ιδιότητες και στοιχεία δοκιμών κατάταξης των υλικών στις διαφορετικές ενότητες

Ενότητα υλικού	Βαθμός αποσάθρωσης	Φαινόμενο βάρος γ (t/m^3)	Δείκτης πόρων e	Υγρασία m (%)	<No 200 (%)	LL	PI
A	I-II	2,6-2,9					
B	IV-V	2,1	0,373	6,5	9,77		7
C	V-VI	1,61-2,09	0,620 – 1	17,4 -35,0	70,8	75	50

Πίνακας 5.6.2: Παράμετροι αντοχής των υλικών των διαφορετικών ενοτήτων

Ενότητα υλικού	Συνοχή c' (t/m^2)	Γωνία τριβής φ' (^{0})	Δείκτης συμπίεσης Cc
A	19,5-39	30-40	
B	4,1 (μέγιστη) 2,7 (παραμένουσα)	29,7 (μέγιστη) 32 (παραμένουσα)	
C	1,83	23 (άμεση διάτμηση)	0,239-0,274

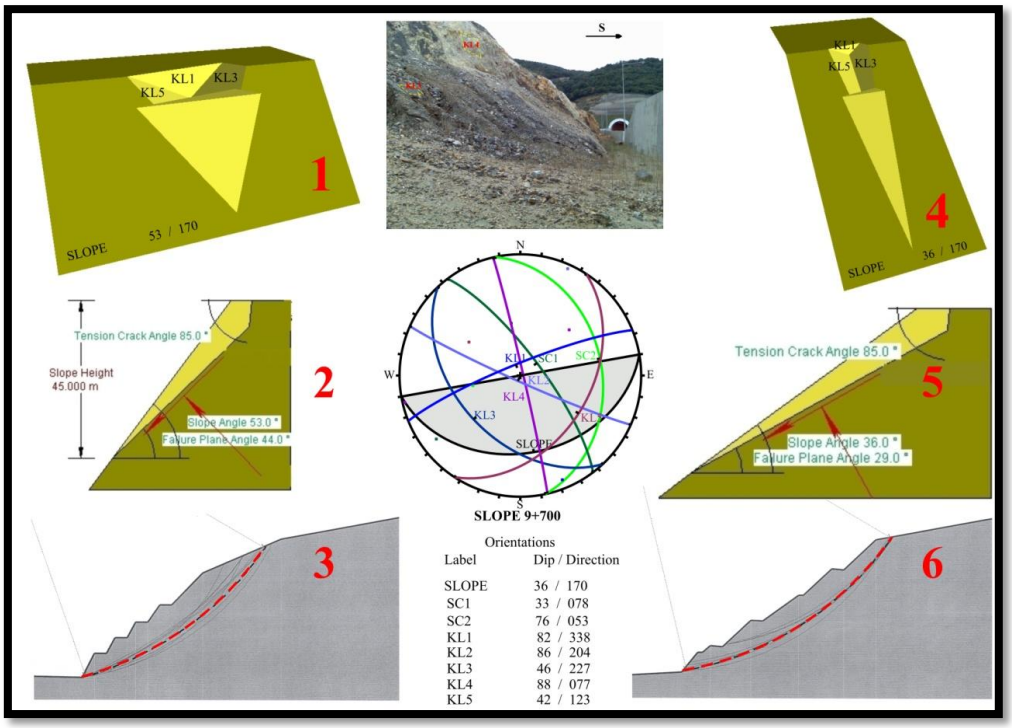
5.6.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

Κατά την ανάλυση αστοχίας εξετάσθηκαν τα τέσσερα τεχνητά ορύγματα που εντοπίζονται στις θέσεις 9+700, 10+300, 10+500 και 10+800, στα οποία παρατηρήθηκαν αστοχίες. Οι αστοχίες που παρατηρήθηκαν επί τόπου είναι φαινομενικά διαφορετικής μορφής, ελεγχόμενες άλλοτε από τη δομή και άλλοτε σε άλλες θέσεις χαρακτηριζόμενες ως αστοχίες περιστροφικού τύπου (Πίνακας 5.6.3). Στόχος της έρευνας είναι να προτείνει έναν ενιαίο μηχανισμό αστοχίας και την αντίστοιχη μεθοδολογία ανάλυσής του, ο οποίος να ερμηνεύει όλες τις αστοχίες που παρατηρήθηκαν, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοσθεί στην ανάλυση ευστάθειας πρανών σε παρόμοια υλικά. Στο αρχικό στάδιο της ανάλυσης των εξεταζόμενων αστοχιών θεωρήθηκε πως η αντοχή των υλικών μπορεί να περιγραφεί με μία ενιαία τιμή αντοχής (*c', φ'*) και διεξήχθησαν ανάστροφες αναλύσεις για τον προσδιορισμό της. Οι ανάστροφες αναλύσεις διεξήχθησαν για όλους τους τύπους πιθανών αστοχιών (ολίσθηση σφηνοειδών κατατμητικών σωμάτων, επίπεδη ολίσθηση και αστοχία κυκλικού τύπου) σε καθένα από τα τέσσερα εξεταζόμενα πρανή ξεχωριστά.

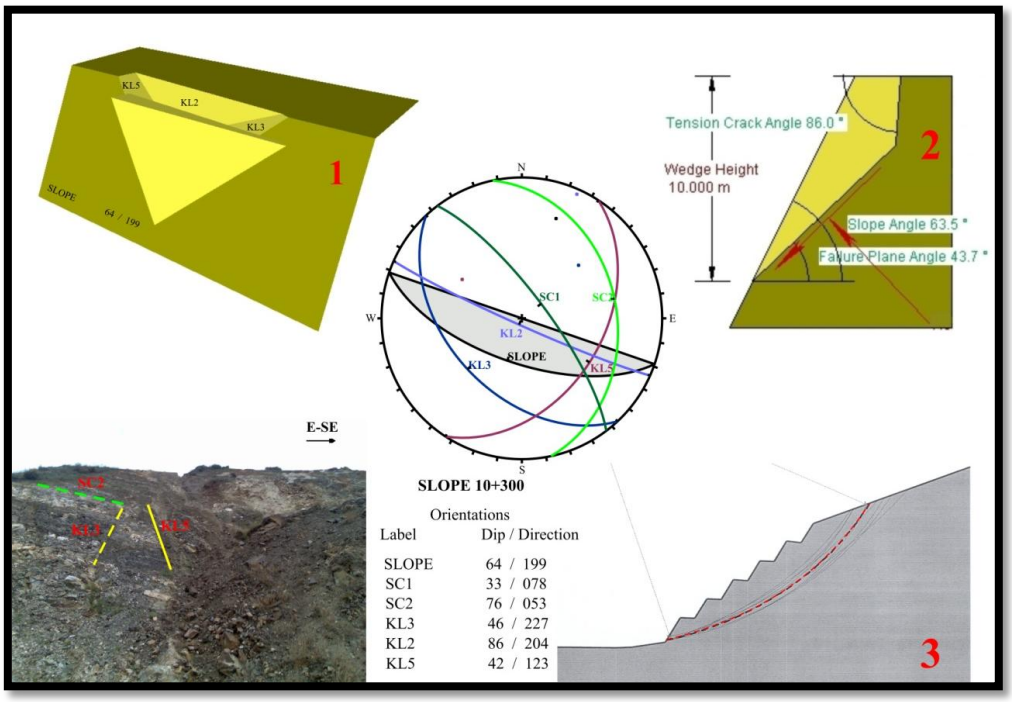
Για τις αναλύσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Η/Υ Swedge 3.0 και Rocplane 2.0 από τη Rocsience και για τις εδαφικού τύπου αστοχίες το PCStabl5 (modified Bishop method, Purdue University τροποποιημένο από τη ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στις ακόλουθες εικόνες και τα συνοψίζει ο Πίνακας 5.6.3.

Τα αποτελέσματα των ανάστροφων αναλύσεων τα οποία παρουσιάζουν την καλύτερη συσχέτιση με τις τιμές αντοχής που υπολογίστηκαν εργαστηριακά εμφανίζονται με έντονους αριθμούς (Πίνακας 5.6.3). Η συσχέτιση αυτή δείχνει πως για τις περιπτώσεις των ορυγμάτων 10+300 και 10+800, ο τύπος της αστοχίας τους όπως αναγνωρίστηκε επί τόπου (επίπεδη), μπορεί να προσομοιάσει μία ολίσθηση κατά μήκος του συστήματος διακλάσεων KL3, με παραμέτρους αντοχής αυτές που υπολογίστηκαν εργαστηριακά για την ενότητα C. Η συσχέτιση αυτή δεν επιβεβαιώνεται για τις υπόλοιπες περιπτώσεις, στις οποίες παρατηρήθηκαν επί τόπου κυκλικού τύπου αστοχίες, παρόλο που οι συντελεστές ασφάλειας που υπολογίσθηκαν για αστοχία επίπεδης ολίσθησης στις ίδιες περιπτώσεις, έχουν μικρότερη τιμή.

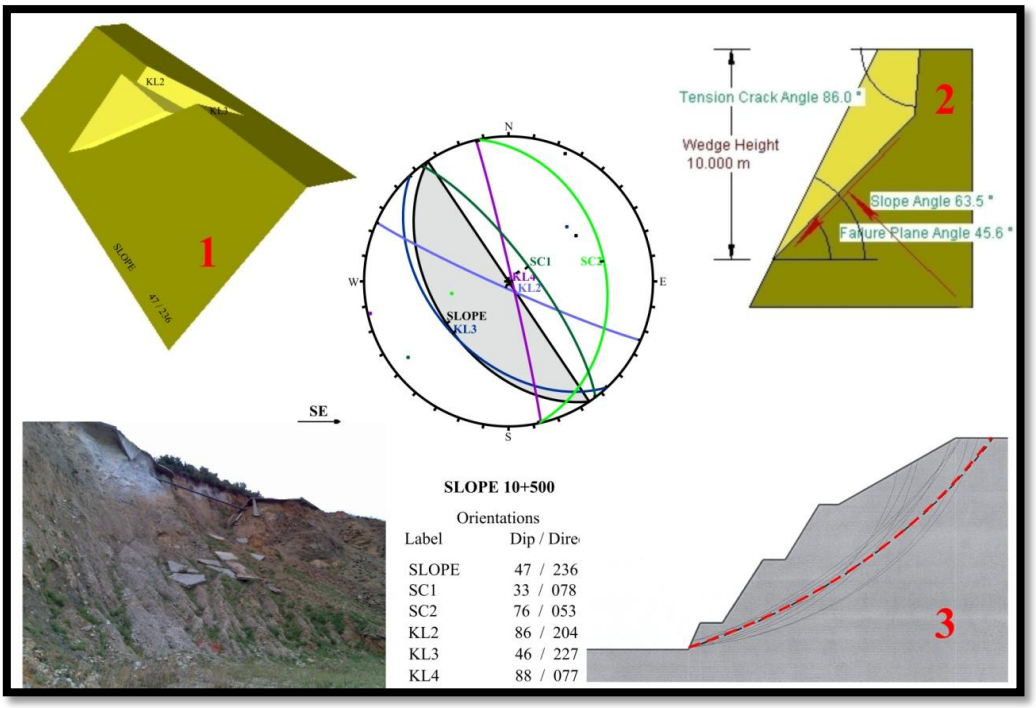
Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση επίπεδης ολίσθησης για το όρυγμα 9+700 (κατά μήκος του συστήματος KL3 με υλικό της ενότητας C) έδωσε χαμηλότερες παραμέτρους αντοχής και επομένως αυτός θα ήταν και ο αναμενόμενος τύπος αστοχίας και όχι η φαινομενικά κυκλικού τύπου, η οποία και αναγνωρίσθηκε επί τόπου. Από την παρατήρηση αυτή και από τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των ανάστροφων αναλύσεων με τα εργαστηριακά δεδομένα, φαίνεται ότι ο κύριος μηχανισμός ολίσθησης όλων των εξεταζόμενων ορυγμάτων είναι ελεγχόμενος από την παραμένουσα τεκτονική δομή. Συγκεκριμένα προκύπτει ολίσθηση κατά μήκος του συστήματος KL3 με επίπεδα αποχωρισμού τις ασυνέχειες του συστήματος KL1, μηχανισμός ο οποίος, για κάποιους λόγους, παράγει μακροσκοπικά αστοχίες φαινομενικά κυκλικού τύπου.



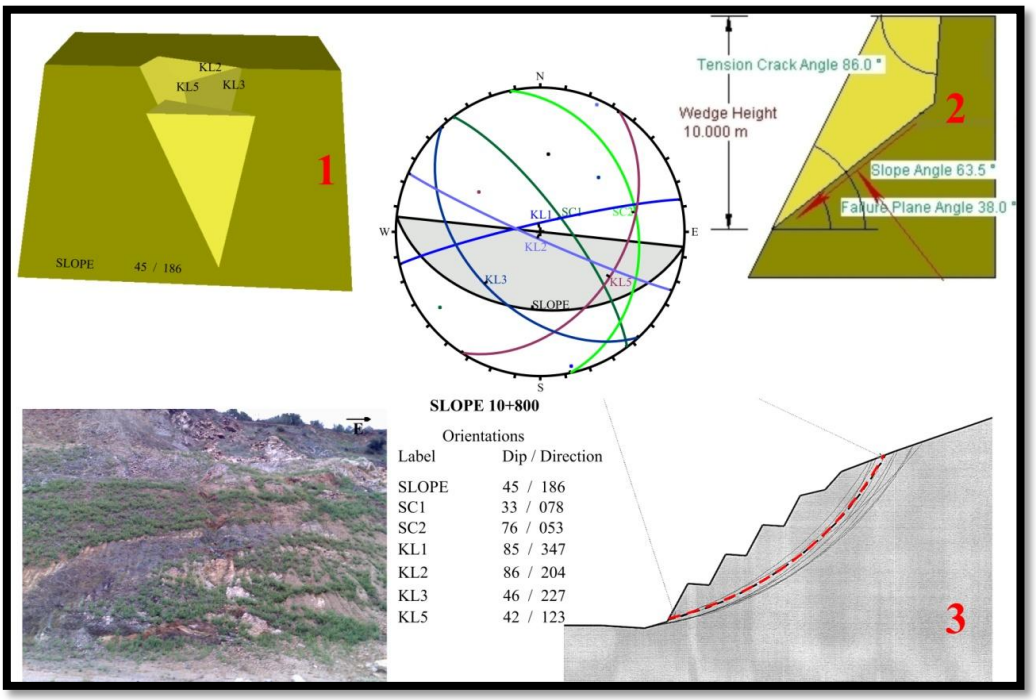
Εικόνα 5.6.4: Γραφική απεικόνιση ανάστροφων αναλύσεων για τους πιθανούς τύπους αστοχιών που διεξήχθησαν για το όρυγμα 9+700 (ανάλυση επίπεδης 2-5, κυκλικής 3-6 και σφηνοειδούς αστοχίας 1-4) για την αρχική γεωμετριά και για τη γεωμετρία μετά την πρώτη επέμβαση



Εικόνα 5.6.5: Γραφική απεικόνιση ανάστροφων αναλύσεων για τους πιθανούς τύπους αστοχιών που διεξήχθησαν για το όρυγμα 10+300 (ανάλυση επίπεδης 2, κυκλικής 3 και σφηνοειδούς αστοχίας 1)



Εικόνα 5.6.6: Γραφική απεικόνιση ανάστροφων αναλύσεων για τους πιθανούς τύπους αστοχιών που διεξήχθησαν για το όρυγμα 10+500 (ανάλυση επίπεδης 2, κυκλικής 3 και σφηνοειδούς αστοχίας 1)



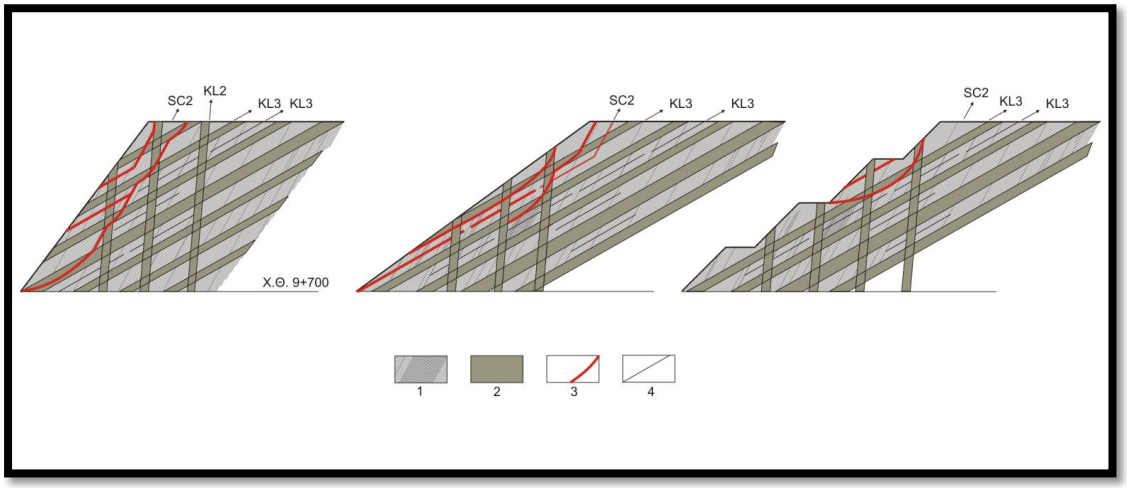
Εικόνα 5.6.7: Γραφική απεικόνιση ανάστροφων αναλύσεων για τους πιθανούς τύπους αστοχιών που διεξήχθησαν για το όρυγμα 10+800 (ανάλυση επίπεδης 2, κυκλικής 3 και σφηνοειδούς αστοχίας 1)

Πίνακας 5.6.3: Παράμετροι αντοχής αποσαθρωμένου γνευσιακού πετρώματος, όπως υπολογίσθηκαν από ανάστροφες αναλύσεις πιθανών τύπων αστοχιών.

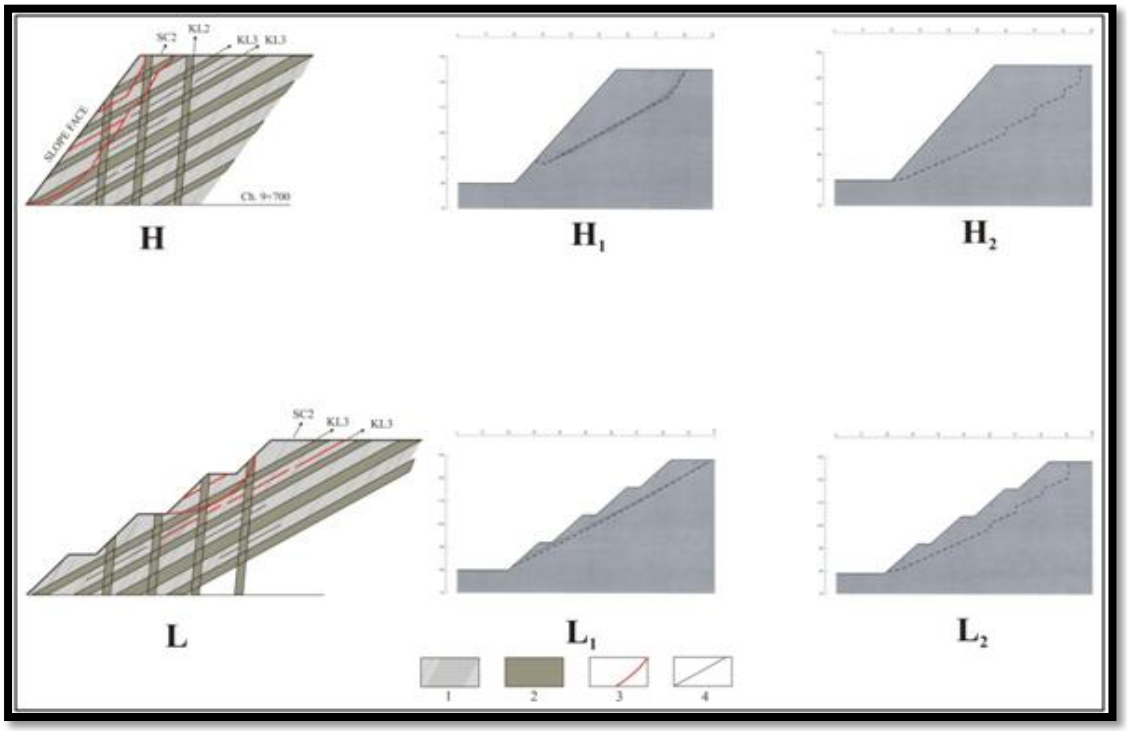
Χιλιομετρική Θέση (km)	Γεωμετρία	Ανάλυση Βραχοσφήνας		Επίπεδη Ανάλυση		Κυκλική Ανάλυση		Τύπος αστοχίας που παρατηρήθηκε επί τόπου
		c'(t/m^2)	φ'(^{o})	c'(t/m^2)	φ'(^{o})	c'(t/m^2)	φ'(^{o})	
9+700	v:h 2:1 d=5m h=8m	1.05	23.0	2.92	23.0	2.40 3.05 4.80	29.0 27.5 23.0	Κυκλική (πρανές)
9+700	v:h 1:1 d=5m h=12m	0.32	23.0	1.03	23.0	2.00 3.00	26.0 23.0	Κυκλική (πρανές)
10+300	v:h 2:1 d=5m h=8m	0.24	23.0	**1.79**	**23.0**	1.80 3.20 4.80	31.5 27.5 23.0	Επίπεδη (αναβαθμός)
10+500	v:h 2:1 d=5m h=8m	0.02	11.6	0.51	23.0	2.30 2.90 4.00	30.0 27.5 23.0	Κυκλική (πρανές)
10+800	v:h 2:1 d=5m h=8m	0.16	23.0	**1.69**	**23.0**	1.80 2.54 4.00	30.5 27.5 23.0	Επίπεδη (αναβαθμός)

Στην Εικόνα 5.6.8 παρουσιάζονται οι αναμενόμενες μορφές των επιφανειών αστοχίας με βάση τον προτεινόμενο μηχανισμό. Υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφάλειας αυτών για δύο περιπτώσεις με το πρόγραμμα Η/Υ PcStabl. Στην πρώτη περίπτωση υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφάλειας συγκεκριμένων επιφανειών με βάση το τεκτονικό μοντέλο της βαχομάζας. Στις αναλύσεις αυτές η εξεταζόμενη βραχομάζα προσομοιάζεται ως ένα εδαφικό υλικό με ανισότροπη αντοχή η οποία περιγράφεται με την εφαρμογή των παραμέτρων αντοχής των ενοτήτων Α, Β και C σε διακριτό εύρος διευθύνσεων. Χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι αντοχής που υπολογίστηκαν εργαστηριακά (Πίνακας 5.6.2) και ένα εύρος διευθύνσεων που προέκυψε από τη γεωλογική ερμηνεία. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές αντοχής για την ενότητα Α (c'=19,5 t/m^2, φ'=30°) εφαρμόστηκαν για εύρος διευθύνσεων 0°-25°, 35°-

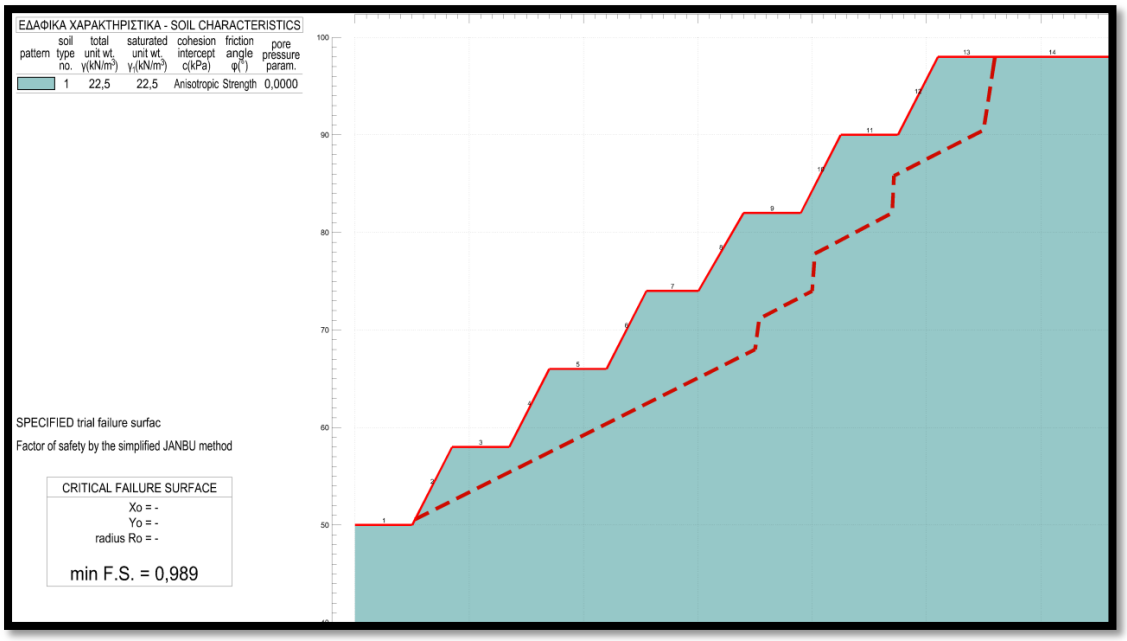
55° και 65°-80°. Οι τιμές αντοχής για την ενότητα Β (c'=2,7 t/m^2, φ'=32°) εφαρμόστηκαν για εύρος διευθύνσεων 55°-65° και αυτές της ενότητας C για εύρος διευθύνσεων 25°-35° και 80°– 90° (Εικόνα 5.6.9 και Εικόνα 5.6.10).



Εικόνα 5.6.8: Σχηματική απεικόνιση των αναμενόμενων μορφών επιφανειών αστοχίας. 1: Επίπεδα σχιστότητας 2: Υλικό της ενότητας C κατά μήκος των ασυνεχειών KL2 and KL3, 3: Προτεινόμενες επιφάνειες αστοχίας, 4: Κύριες διευθύνσεις ασυνεχειών

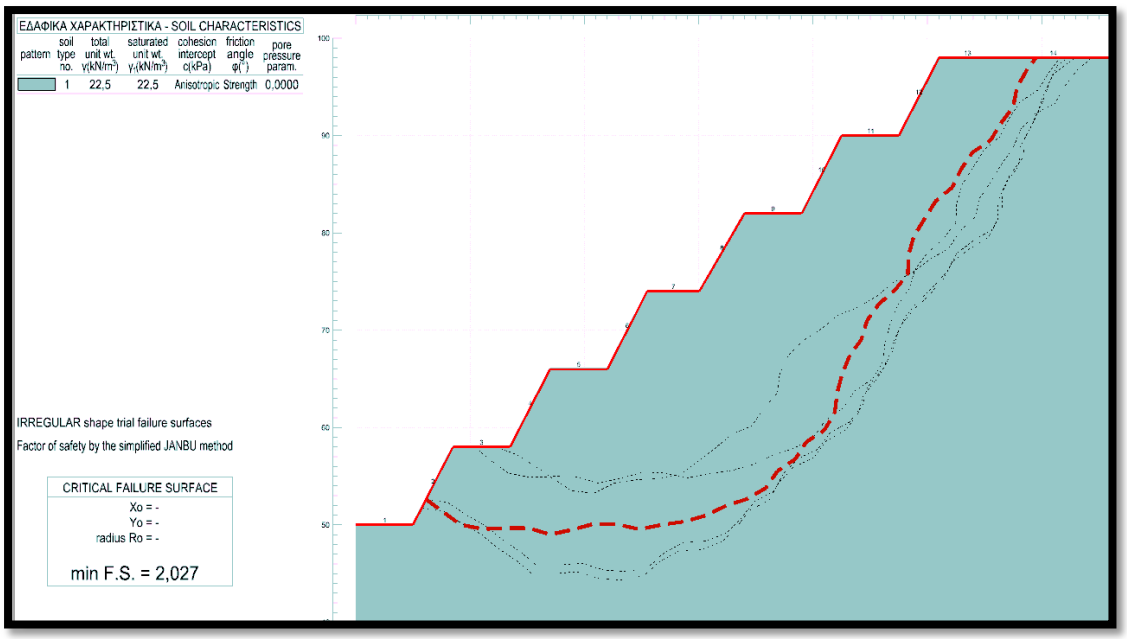


Εικόνα 5.6.9: Σχηματική απεικόνιση των αναμενόμενων μορφών επιφανειών αστοχίας (παράδειγμα του πρανούς 9+700 για αρχική μέση κλίση Η και γεωμετρία μετά την απάλυνση L) και αντίστοιχες καθοριζόμενες επιφάνειες ανάλυσης ευστάθειας. 1: Επίπεδα σχιστότητας, 2: Υλικό της ενότητας C κατά μήκος των ασυνεχειών KL2 and KL3, 3: Προτεινόμενες επιφάνειες αστοχίας, 4: Κύριες διευθύνσεις ασυνεχειών

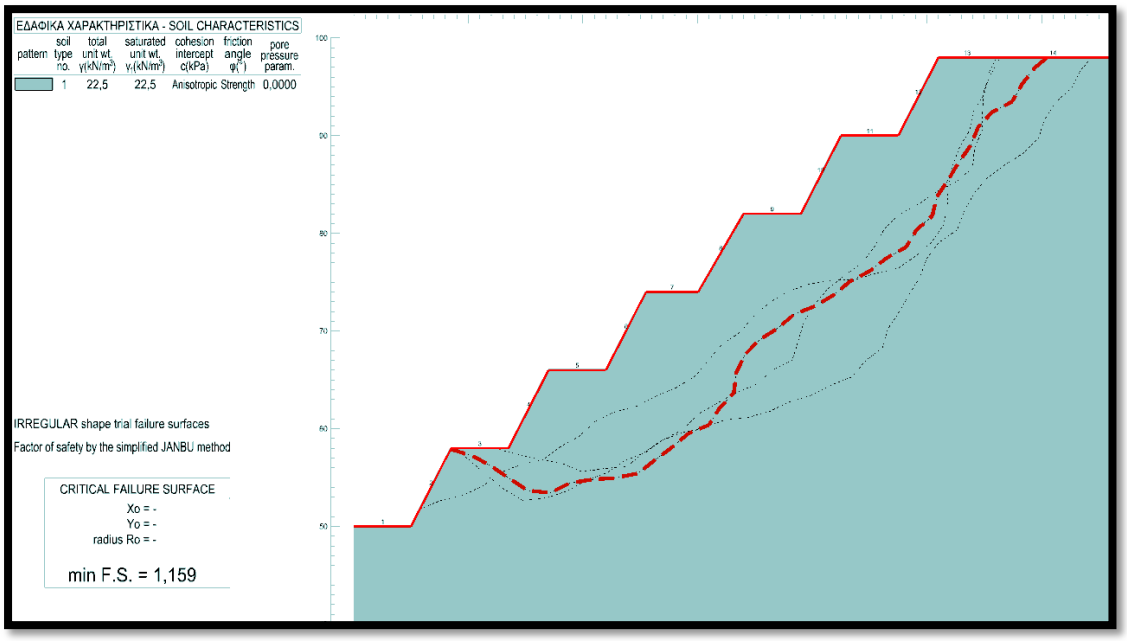


Εικόνα 5.6.10: Ανάλυση για συγκεκριμένη επιφάνεια με ανισοτροπία αντοχής και παραμέτρους αντοχής για την ενότητα C (c'=1,8 t/m2, φ'=23°)

Στη δεύτερη περίπτωση (Εικόνα 5.6.11 και Εικόνα 5.6.12) υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφάλειας τυχαίων επιφανειών αστοχίας για το ίδιο μοντέλο ανισοτροπίας της αντοχής. Και οι δύο περιπτώσεις αναλύσεων έγιναν σε ένα θεωρητικό πρανές έξι αναβαθμών με γεωμετρία αυτήν που εφαρμόσθηκε για το σχεδιασμό των τεχνητών ορυγμάτων της περιοχής (v:h 2:1, d=5m, h=8m).



Εικόνα 5.6.11: Ανάλυση αστοχίας για τυχαία επιφάνεια με ανισοτροπία αντοχής, παρουσία ενοτήτων A, B, C και παραμέτρους αντοχής για την ενότητα C (c'=1,8 t/m^2, φ'=23°)



Εικόνα 5.6.12: Ανάλυση αστοχίας για τυχαία επιφάνεια με ανισοτροπία αντοχής, παρουσία ενοτήτων B, C και παραμέτρους αντοχής για την ενότητα C (c'=1,8 t/m^2, φ'=23°)

Στις παραπάνω Εικόνες δίνεται η ανάλυση αστοχίας για τη δεύτερη περίπτωση (τυχαία επιφάνεια) όπου γίνεται εμφανής η επίδραση της παρουσίας των διαφορετικών ενοτήτων υλικού, τόσο στις τιμές του συντελεστή ασφάλειας όσο και στη μορφή των επιφανειών αστοχίας που προκύπτουν. Μεταβάλλοντας την παρουσία των ενοτήτων υλικού από A, B και C σε B και C, διαπιστώνεται σημαντική μείωση του συντελεστή ασφάλειας και μεγαλύτερη σύμπτωση των παραγόμενων επιφανειών με τις παρατηρούμενες επί τόπου αστοχίες. Είναι χαρακτηριστικό ότι, με βάση το προτεινόμενο μοντέλο ανάλυσης, οι σύνθετες, δομικού χαρακτήρα επιφάνειες αστοχίας δίνουν αστοχία μόνο για περιπτώσεις ορυγμάτων, όπου η βραχόμαζα έχει αποσαθρωθεί σε όλη της την έκταση και έχει μεταπέσει σε βαθμό αποσάθρωσης αντίστοιχο με αυτόν της Ενότητας B. Αυτήν την εικόνα έχουν επί τόπου τα ορύγματα στις Χ.Θ. 9+700, 10+500 και 13+600, όπου και παρατηρήθηκαν αυτής της μορφής αστοχίες. Το σύνολο των αναλύσεων ευστάθειας με ανισοτροπία αντοχής παρατίθεται στο Παράρτημα Ε.

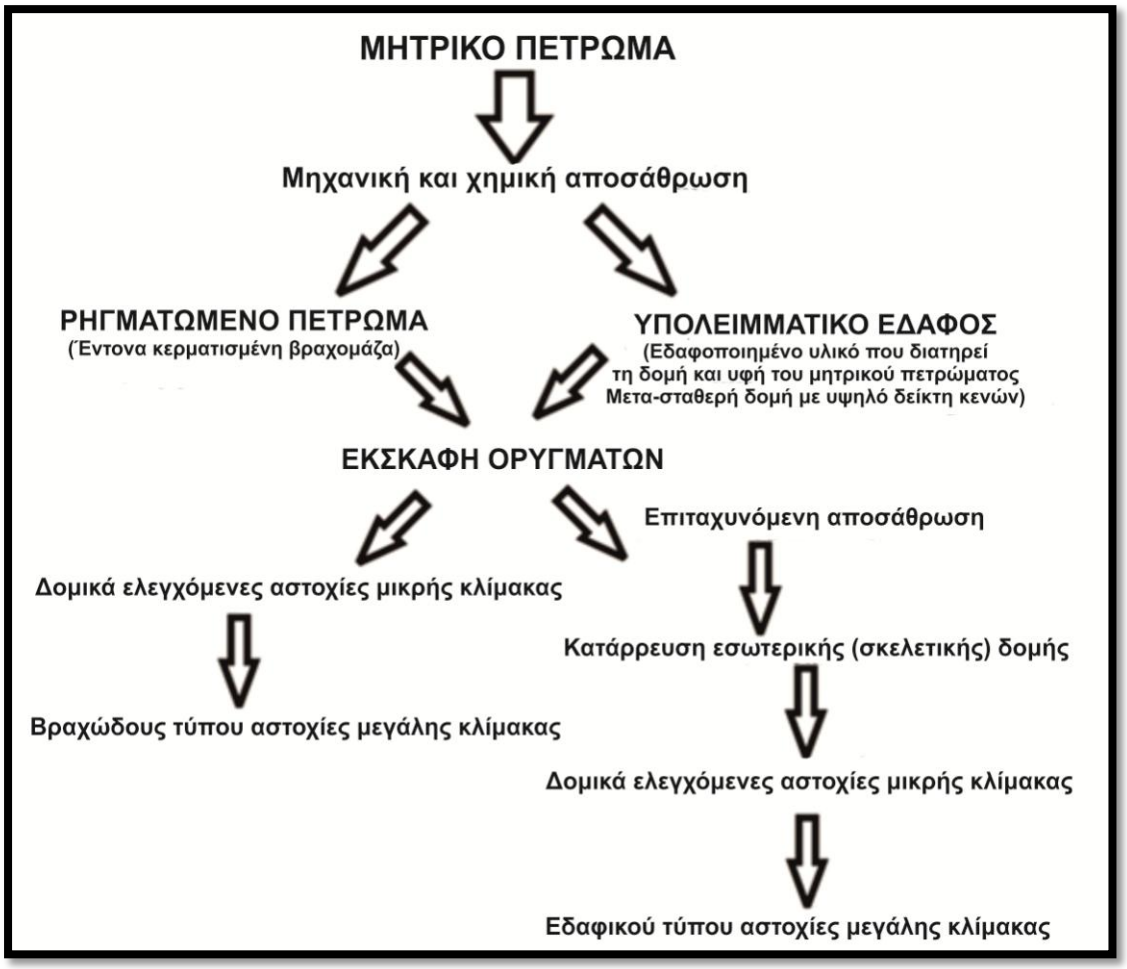
5.6.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί, οι αστοχίες στα ορύγματα της περιοχής της Ασπροβάλτας έλαβαν χώρα σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους. Σε κάποια ορύγματα κατά τη φάση της εκσκαφής (βλέπε ιστορικό αστοχιών στις Χ.Θ. 9+700 και 10+300), οπότε και ακολούθησε εκσκαφή ηπιότερης γεωμετρίας και σε αυτές που έλαβαν χώρα σε χρονικές περιόδους μετά το πέρας των εκσκαφών. Οι στιγμές εκδήλωσης των αστοχιών απέχουν μερικά χρόνια από το πέρας των εκσκαφών (2-3 χρόνια) και συνδέονται με περιόδους βροχοπτώσεων (9+700, 10+500, 13+600) αλλά και με περιόδους ξηρασίας (10+300). Επίσης, εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι αστόχησαν και ορύγματα που είχαν ήδη παρουσιάσει αστοχίες κατά τη φάση της εκσκαφής και είχαν διαμορφωθεί με ηπιότερες κλίσεις.

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι η διάνοιξη των ορυγμάτων ενεργοποίησε ή και επιτάχυνε κάποιους μηχανισμούς μείωσης των παραμέτρων αντοχής αυτών των γεωυλικών, υποβαθμίζοντας τις συνθήκες ευστάθειάς τους. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον και κύριος στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ερμηνεία αλλά και η ποσοτικοποίηση τους. Οι κύριοι μηχανισμοί μείωσης των παραμέτρων αντοχής που δρουν στην περιοχή έρευνας είναι:

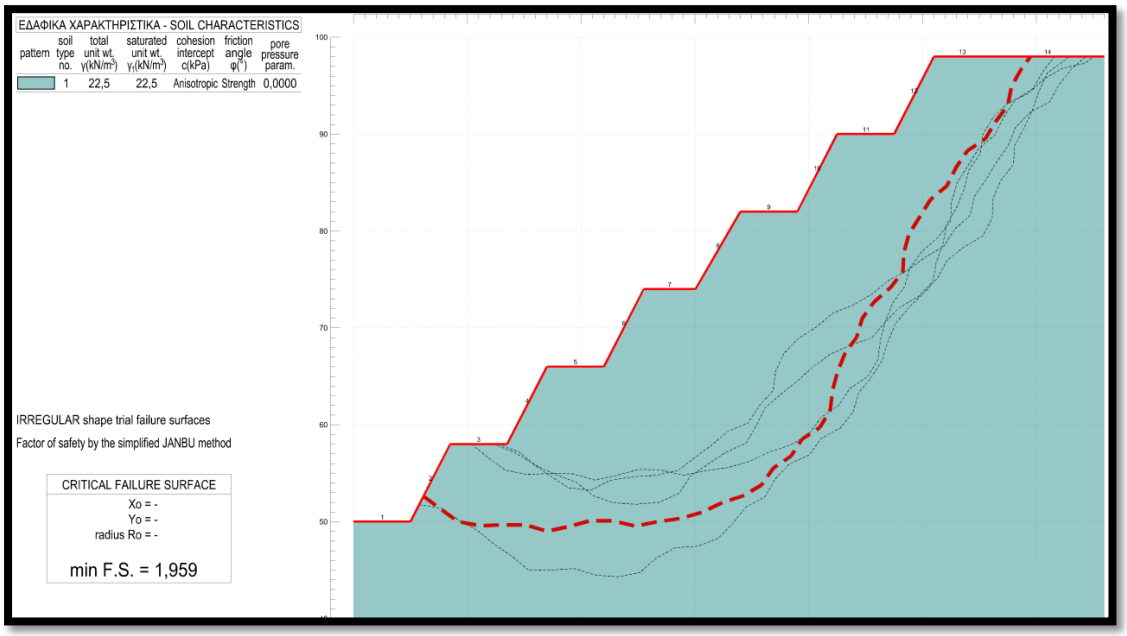
1. **Η αύξηση του ρυθμού αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης μετά τις εκσκαφές.** Παρατηρείται σταδιακή εξασθένιση των γεωυλικών με το χρόνο λόγω της εκσκαφής, της αφαίρεσης του βάρους των υπερκείμενων και της μείωσης των ορθών τάσεων, γεγονός που γενικά προκαλεί διόγκωση της βραχόμαζας προς τη νέα ελεύθερη επιφάνεια και ευνοεί τη ρηγμάτωσή της κάθετα αλλά και παράλληλα ως προς αυτήν. Η παραπάνω διαδικασία σε συνδυασμό με την ύγρανση (διαστολή) και ξήρανση (συστολή) των γεωυλικών, κυρίως κοντά στην επιφάνεια, αλλά και από την κατείσδυση του νερού διαμέσου προϋπαρχουσών ασυνεχειών ή ρηγματώσεων που προκλήθηκαν από τις εκσκαφές, επιταχύνουν το ρυθμό αποσάθρωσης, προκαλούν εδαφοποίησή και κατάρρευσή τους και τελικά δομικού χαρακτήρα αστοχίες. Ο μηχανισμός περιγράφεται στην Εικόνα 5.6.13. Τα αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου ανάλυσης ευστάθειας στο Κεφ. 5.6.3, δείχνουν μια εμφανή υποβάθμιση των γεωυλικών της Ενότητας Α σε Ενότητα Β, τόσο σε σχέση με το συντελεστή ασφάλειας όσο και με την αναμενόμενη μορφή αστοχίας.

2. **Η μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών της Ενότητας C λόγω προσανατολισμού των αργιλικών ορυκτών.** Οι μεταβολές της εντατικής κατάστασης των ορυγμάτων εξαιτίας των εκσκαφών και των διαδοχικών διογκώσεων και συρρικνώσεων από μεταβολές της υγρασίας που ακολούθησαν προκαλούν τον προσανατολισμό των φυλλόμορφων αργιλικών ορυκτών της Ενότητας C με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής από φ'=23° στη φάση των εκσκαφών σε φ'=13° περίπου, μετά από την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος, το οποίο μάλιστα μειώνεται εξαιτίας του μηχανισμού 1. Στην Εικόνα 5.6.14 και στην Εικόνα 5.6.15 παρουσιάζονται οι ίδιες αναλύσεις του Κεφ. 5.6.3 με αντικατάσταση των παραμέτρων αντοχής της Ενότητας C σε c'=1,5t/m^2 και φ'=12,7^o. Ειδικότερα η Εικόνα 5.6.15 που δεν περιλαμβάνει στην ανάλυση την Ενότητα Α (θεωρείται όλη η βραχόμαζα αποσαθρωμένη σε Ενότητα Β), ερμηνεύει τις αστοχίες που έλαβαν χώρα μετά το πέρας των εκσκαφών, αλλά και τις διαφορετικές μορφές αυτών (φαινομενικά αστοχίες κυκλικού τύπου και τύπου "block").

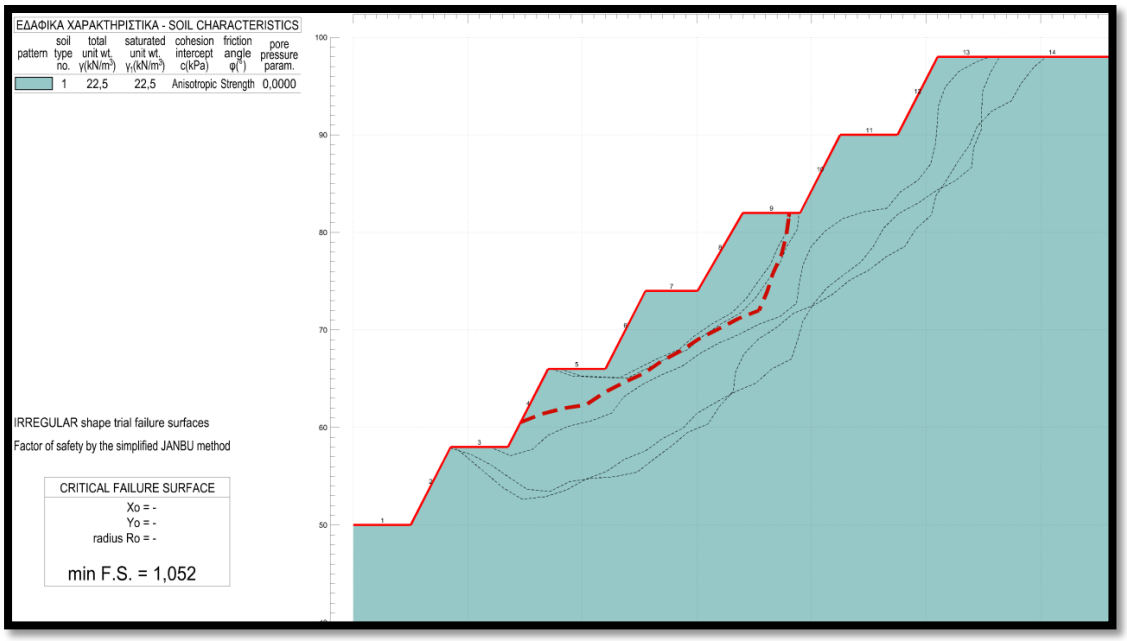


Εικόνα 5.6.13: Σχηματική παρουσίαση των προτεινόμενων μηχανισμών αστοχίας στην περιοχή έρευνας

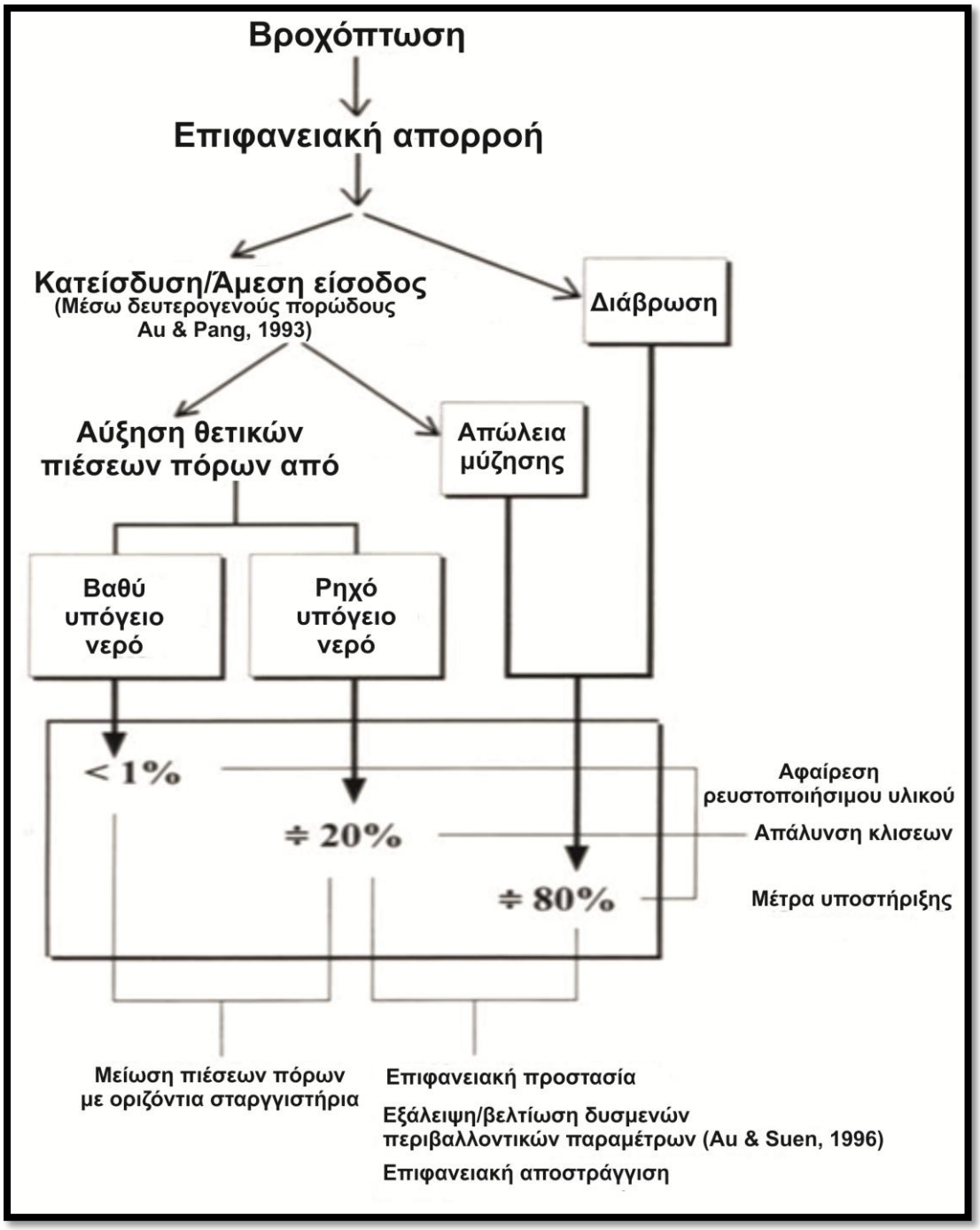
3. **Η μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών της Ενότητας C λόγω των μεταβολών της τιμής της μύζησης** (Εικόνα 5.6.16). Στο Κεφάλαιο 3 αναλύθηκε το πώς και πόσο επιδρά η τιμή της μύζησης στη διατμητική αντοχή της Ενότητας C. Διαφαίνεται πως κύριος παράγοντας ενεργοποίησης των αστοχιών είναι η απώλεια της μύζησης λόγω βροχόπτωσης με συνέπεια τη μείωση της ολικής συνοχής σε μία κρίσιμη τιμή αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα, η περιεχόμενη υγρασία της Ενότητας C κατά τις αστοχίες αντιστοιχεί σε τιμή μύζησης 400 kPa και αντίστοιχη τιμή συνοχής c'=1,5t/m^2, τιμή που χρησιμοποιήθηκε στη διεξαγωγή των αναλύσεων (Εικόνα 5.6.15) δίνοντας πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα προσομοίωσης (SF=1,05). Επισημαίνεται ότι σε περιπτώσεις προϋπάρχουσας αστοχίας, όπως στην περίπτωση της Χ.Θ. 10+300, η ευστάθεια ελέγχεται από την υπολειμματική αντοχή που, όπως αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο 3, μειώνεται με αύξηση της μύζησης, γεγονός που ερμηνεύει την αστοχία κατά τη διάρκεια παρατεταμένης ξηρής περιόδου.



Εικόνα 5.6.14: Ανάλυση για τυχαία επιφάνεια με ανισοτροπία αντοχής, παρουσία ενοτήτων A, B, C και παραμέτρους αντοχής για την ενότητα C (c'=1,5 t/m^2, φ'=12,7^o)



Εικόνα 5.6.15: Ανάλυση για τυχαία επιφάνεια με ανισοτροπία αντοχής, παρουσία ενοτήτων B, C και παραμέτρους αντοχής για την ενότητα C (c'=1,5 t/m^2, φ'=12,7^o)



Εικόνα 5.6.16: Μοντέλο αστοχίας κατά τη διαβροχή πρανών με ακόρεστα υλικά

5.6.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Οι αστοχίες που προκαλούνται σε βραχόμαζες με έντονη αποσάθρωση και τεκτονισμό μπορούν να ερμηνευθούν ικανοποιητικά με την παραδοχή ανισότροπης αντοχής που καθορίζεται από τις διευθύνσεις κύριων δομικών ασυνεχειών στο εσωτερικό των πετρωμάτων. Οι μηχανικές παράμετροι των υλικών που κατανέμονται σε τέτοιες ζώνες στο εσωτερικό της βραχόμαζας ελέγχονται από το βαθμό

αποσάθρωσής τους αλλά και από την «κληρονομούμενη» εσωτερική ανισοτροπία εξαιτίας των δομικών ασυνεχειών (στρώσης, σχιστότητας). Οι ενυπάρχουσες αυτές ασθενείς διευθύνσεις στη μάζα των πετρωμάτων προκαλούν δομικές αστοχίες σε μικρή κλίμακα, οι οποίες σε μεγάλη κλίμακα προσομοιάζουν με εδαφικού τύπου κυκλικές (περιστροφικές) αστοχίες. Η προσεκτικότερη εξέτασή τους όμως δείχνει ότι στην πραγματικότητα η επιφάνεια αστοχίας είναι μια σύνθετη επιφάνεια που ακολουθεί τις δομικές αυτές διευθύνσεις ανισοτροπίας.

Το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμογής είναι αυτό της ανισότροπης κατανομής εργαστηριακά προσδιορισμένων παραμέτρων αντοχής, σε συγκεκριμένες διευθύνσεις στο εσωτερικό του τεχνητού πρανούς με σκοπό τον προσδιορισμό της σύνθετης εκείνης επιφάνειας που δίνει τον ελάχιστο συντελεστή ασφάλειας.

Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των αναλύσεων αστοχίας, η επιλογή της αναζήτησης τυχαίας επιφάνειας με βάση το μοντέλο της ανισότροπης αντοχής, δίνει καλή προσομοίωση της μορφής της αναμενόμενης αστοχίας σε αντίθεση με την αναζήτηση κλασικού τύπου κυκλικής αστοχίας, η οποία για τις περιπτώσεις των συγκεκριμένων υλικών δίνει μια μη ρεαλιστική προσομοίωση. Η προσομοίωση αυτή, ακόμα και αν γίνει με τις ελάχιστες τιμές των παραμέτρων αντοχής για ισότροπο υλικό, δίνει αυξημένες τιμές του συντελεστή ασφάλειας συγκριτικά με την περίπτωση του προτεινόμενου, δομικά ελεγχόμενου, μοντέλου αστοχίας. Επομένως η εφαρμογή ενός τέτοιου κλασικού μοντέλου δεν μπορεί να χρησιμεύσει ως μια απευθείας εφαρμοζόμενη μέθοδο ανάλυσης στην οποία θα εισάγονται παράμετροι αντοχής που έχουν προσδιοριστεί εργαστηριακά.

Η επιλογή της διερεύνησης του συντελεστή ασφάλειας μιας προκαθορισμένης, με βάση το προτεινόμενο μοντέλο επιφάνειας, έδωσε πολύ ικανοποιητική προσομοίωση σε συνδυασμό με την ποσοτικοποίηση των μηχανισμών μείωσης της προ των εκσκαφών διατμητικής αντοχής. Δηλαδή προέβλεψε την αστοχία στις περιπτώσεις και με τη μορφή που αυτή διαπιστώθηκε πραγματικά και στις οποίες η κλασική ανάλυση με βάση τις πραγματικές εργαστηριακές τιμές αντοχής των υλικών δεν την προέβλεψε. Επιπρόσθετα ερμηνεύει ικανοποιητικά τους λογικούς προβληματισμούς που προκύπτουν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων ευστάθειας με τη θεώρηση των γεωυλικών των ορυγμάτων ως ομοιόμορφων και ομοιογενών.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα-Συζήτηση

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα υπολειμματικά εδάφη είναι μία μεγάλη ομάδα εδαφών τα οποία αντιμετωπίζονται συνήθως ως ιζηματογενή εδάφη. Η πρακτική αυτή έχει οδηγήσει σε πολλές περιπτώσεις σε μεγάλες αστοχίες στο σχεδιασμό των έργων με αποτέλεσμα να αναδεικνύονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Το πόσο διαφέρουν τα υπολειμματικά εδάφη από τα ιζηματογενή, ειδικά στην προσέγγιση έρευνας και ανάλυσής τους αποτελεί μέχρι σήμερα θέμα συζήτησης. Παρά το γεγονός ότι οι βασικές αρχές της Εδαφομηχανικής (όπως η αρχή της ενεργού τάσης και το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb) είναι εξίσου εφαρμόσιμες τόσο στα υπολειμματικά όσο και στα ιζηματογενή εδάφη, μπορεί να ειπωθεί πως τα υπολειμματικά εδάφη αποτελούν μία ξεχωριστή τάξη εδαφών που πρέπει να τύχει διαφορετικής διαχείρισης εξαιτίας των βασικών διαφορών που παρουσιάζουν στον τρόπο σχηματισμού τους.

Η ανάπτυξη των βασικών εννοιών της Εδαφομηχανικής στηρίζεται στη συσχέτιση και ταξινόμηση των παραμέτρων του εδάφους με βάση τις φυσικές ιδιότητες, την πλαστικότητα και το ιστορικό των τάσεων και βασίστηκε αποκλειστικά στην έρευνα ιζηματογενών αποθέσεων μη αποσαθρωμένων εδαφών. Όπως αναδεικνύει η έρευνα στα υπολειμματικά εδάφη της περιοχής της Ασπροβάλτας, η εφαρμογή των παραπάνω αρχών στη διερεύνηση της συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών δεν προτείνεται, γιατί οδηγεί σε παραπλανητικά συμπεράσματα ως προς τη μηχανική τους συμπεριφορά. Επιπλέον υπογραμμίζεται η σημαντικότητα της διερεύνησης των μηχανισμών σχηματισμού των υπολειμματικών εδαφών. Η εκτίμηση του μοντέλου αποσάθρωσης-σχηματισμού των υπολειμματικών εδαφών με βάση τα γεωλογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής αποτελεί τη βάση για την αξιολόγηση των συνθηκών που αναμένονται, το σχεδιασμό της έρευνας και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στις παρατηρούμενες αστοχίες στην περιοχή της Ασπροβάλτας κατέδειξε, πως οι μηχανισμοί τους ελέγχονται από το γεωλογικό μοντέλο αποσάθρωσης και την τεκτονική δομή, ενώ οι αντοχές των παρόντων υπολειμματικών εδαφών που εξετάστηκαν καθορίζονται από την επίδραση της υπολειμματικής δομής και την ορυκτολογική σύσταση. Αυτοί είναι και οι βασικοί πυλώνες ταξινόμησης των υπολειμματικών εδαφών γενικότερα.

Είναι αναγκαίο να τονισθεί ιδιαίτερα η επίδραση των μεταβολών του βαθμού κορεσμού στη μηχανική συμπεριφορά των υπολειμματικών εδαφών. Τα υπολειμματικά εδάφη βρίσκονται σε ακόρεστες συνθήκες, ειδικά στην επιφανειακή ζώνη και σε κλίματα με διακριτές υγρές και ξηρές περιόδους, όπως το Μεσογειακό, όπου η εξάτμιση κατά την ξηρή περίοδο επιδρά έντονα στη μείωση του βαθμού κορεσμού. Για το λόγο αυτό είναι ευσταθή σε πρανή μεγάλων κλίσεων και αστοχούν συνήθως με τη μείωση της αντοχής τους λόγω αύξησης του βαθμού κορεσμού

προτού καν αρχίσουν να αναπτύσσονται θετικές πιέσεις πόρων. **Η θεώρηση αστοχιών εξαιτίας ανάπτυξης θετικών πιέσεων πόρων κρίνεται συντηρητική προσέγγιση για τα υπολειμματικά εδάφη.**

Η μεταβολή της διατμητικής αντοχής των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας σε σχέση με την τιμή της μύζησης δείχνει πως η γενική θεώρηση της κορεσμένης κατάστασης ως δυσμενέστερης για την αντοχή τους δεν ισχύει για τα συγκεκριμένα υπολειμματικά εδάφη. Οι μεταβολές της διατμητικής και της υπολειμματικής αντοχής σε σχέση με τη μύζηση ερμηνεύουν τις συνθήκες αστοχίας των ορυγμάτων της Ασπροβάλτας και την ευστάθειά τους για κάποιο χρονικό διάστημα. Επιπλέον οι διαδοχικές εποχιακές μεταβολές της εντατικής κατάστασης λόγω ύγρανσης και ξήρανσης ερμηνεύουν τον μηχανισμό μείωσης της αντοχής των παρόντων γεωυλικών με το χρόνο. Συμπερασματικά, **η διερεύνηση της επίδρασης του βαθμού κορεσμού στη μηχανική συμπεριφορά των υπολειμματικών εδαφών θα πρέπει να αποτελεί πάγια πρακτική.**

6.2 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Οι μηχανισμοί σχηματισμού των υπολειμματικών εδαφών καθορίζονται από το κλίμα, την τοπογραφία και τις υφιστάμενες γεωλογικές συνθήκες. Πρέπει να σημειωθεί πως η έρευνα στα υπολειμματικά εδάφη αναπτύχθηκε στην περιοχή της Νοτιοανατολικής Ασίας, όπου ευνοείται ο σχηματισμός στρωμάτων υπολειμματικών εδαφών μεγάλου πάχους, με διακύμανση του βαθμού αποσάθρωσης με το βάθος με βάση το προφίλ στην Εικόνα 2.1.5. Ένα τέτοιο προφίλ είναι ευνοϊκό ως προς τη διαχείριση των επιμέρους ζωνών. Η ανώτερη ζώνη προσεγγίζεται ως ένας ομογενής εδαφικός σχηματισμός με ορυκτολογική επιρροή, αν υπάρχει, και οι κατώτερες ζώνες προσεγγίζονται με κανόνες βραχομηχανικής.

Στον Ελλαδικό χώρο αντίθετα, οι παράγοντες αποσάθρωσης προσβάλλουν το μητρικό πέτρωμα σε μικρό βάθος, προσβάλλουν όμως και τις ήδη εξαλλοιωμένες ζώνες διάρρηξης δημιουργώντας σύνθετα προφίλ αποσάθρωσης με υλικά διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης ακολουθώντας τις υφιστάμενες τεκτονικές δομές. Δημιουργούνται έτσι προφίλ αποσάθρωσης με έντονη ανομοιομορφία υλικών ως προς το βαθμό αποσάθρωσης που αναπτύσσονται σε σημαντικό βάθος και με έντονη ανισοτροπία αλλά και επίδραση της ορυκτολογικής σύστασης στη συμπεριφορά των επιμέρους υλικών. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι σκόπιμος ο εντοπισμός και η χωροθέτηση ενοτήτων υλικών ίδιου βαθμού αποσάθρωσης και η διερεύνηση των επιμέρους ιδιοτήτων τους ξεχωριστά. Με βάση τα παραπάνω αναγνωρίστηκαν και περιγράφηκαν οι Ενότητες Α, Β και C για την περιοχή της Ασπροβάλτας. Πρόκειται στην ουσία για διαφορετικά υπολειμματικά εδάφη με βάση τον Πίνακα Ταξινόμησης Υπολειμματικών Εδαφών (Πίνακας 2.2.1). Η Ενότητα Β εμπίπτει στην Ομάδα Α-α, ενώ η Ενότητα C στην Ομάδα Β-α.

Στην παράκτια ζώνη της Ασπροβάλτας αναπτύσσονταν λίμνες και λιμνοθάλασσες, δηλαδή δεν επικρατούν συνθήκες αποστράγγισης και σε συνδυασμό με την έντονη παρουσία βιοτίτη στους γνευσίους της περιοχής διαμορφώθηκε ένα ευνοϊκό περιβάλλον αποσάθρωσης για το σχηματισμό των αργιλικών ορυκτών της ομάδας του σμεκτίτη στην Ενότητα C. **Γίνεται αντιληπτό, πως το προϊόν αποσάθρωσης γνευσιακών πετρωμάτων αποτελείται από εδάφη με προβληματική μηχανική συμπεριφορά.** Η σύγκριση των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας με ίδιας προέλευσης υπολειμματικά εδάφη στο Κ. Νευροκόπι Δράμας και στο Δερβένι Θεσσαλονίκης έδειξε πως το τελικό προϊόν έχει παρόμοια ορυκτολογική σύσταση και ιδιότητες, δηλαδή παρατηρείται στις περιοχές αυτές το ίδιο μοντέλο αποσάθρωσης.

6.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΑΣΠΡΟΒΑΛΤΑΣ

Για τις επιμέρους Ενότητες των υπολειμματικών εδαφών της Ασπροβάλτας εκτελέσθηκε ένα πλήρες εργαστηριακό πρόγραμμα διερεύνησης των φυσικών και μηχανικών τους χαρακτηριστικών, προσανατολισμένο προς τη διερεύνηση και λύση του προβλήματος της ευστάθειας πρανών. Επιπλέον εκτελέστηκε ένα ενδελεχές πρόγραμμα ορυκτολογικής διερεύνησης με βάση το οποίο ερμηνεύθηκαν τα περισσότερα εργαστηριακά αποτελέσματα. **Κατά την έρευνα υπολειμματικών εδαφών με έντονη ορυκτολογική επιρροή, η εκτέλεση ορυκτολογικών αναλύσεων θα πρέπει να αποτελεί πάγια πρακτική.** Για τα αποτελέσματα της εργαστηριακής έρευνας μπορούν να διατυπωθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Εντοπίσθηκαν πλακώδη διογκούμενα αργιλικά ορυκτά της ομάδας του σμεκτίτη στην Ενότητα C, όπως αναμενόταν. Τα ορυκτά αυτά προσανατολίζονται από τις επί τόπου μεταβολές του εντατικού πεδίου και σχηματίζουν λείες, στιλβωμένες επιφάνειες διάτμησης πολύ μικρής αντοχής.

- Διαπιστώθηκε η παρουσία αργιλικών συσσωματωμάτων που συνδέεται με τις εποχιακές επιφανειακές ζώνες εξάτμισης. Η παρουσία τους επιταχύνει τις διαδικασίες αποσάθρωσης και επιδρά στη μηχανική συμπεριφορά σε ακόρεστες συνθήκες.

- **Η προετοιμασία των δειγμάτων για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών καταστρέφει τα επί τόπου χαρακτηριστικά του υπολειμματικού εδάφους και πρέπει να γίνεται με προσοχή.** Προτείνεται η αποφυγή ξήρανσης των δειγμάτων στον κλίβανο πριν από την εκτέλεση των δοκιμών, όπου είναι δυνατόν.

- Η καταγραφή της επί τόπου εποχιακής διακύμανσης της φυσικής υγρασίας των υπολειμματικών εδαφών είναι σημαντική. **Οι τιμές της συνδέονται με την εποχιακή διακύμανση των τιμών μύζησης και επομένως με την εποχιακή διακύμανση της διατμητικής αντοχής.**

- **Η τιμή του ειδικού βάρους στα υπολειμματικά εδάφη μπορεί να είναι ασυνήθιστα υψηλή ή χαμηλή και πρέπει πάντοτε να γίνεται εργαστηριακός προσδιορισμός της.**

- **Η τιμή του ξηρού φαινόμενου βάρους συνδέεται με το βαθμό αποσάθρωσης και αποτελεί δείκτη ποσοτικοποίησής του**.

- Η διαπερατότητα των υπολειμματικών εδαφών ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από την κληρονομημένη δομή του μητρικού πετρώματος. Πρέπει να υπολογίζεται από επί τόπου δοκιμές μεγάλης κλίμακας.

- Οι έννοιες «ιστορικό τάσεων, κανονικά στερεοποιημένο και υπερστερεοποιημένο έδαφος» δε σχετίζονται με τα υπολειμματικά εδάφη. Η αρχική κατάσταση ενός υπολειμματικού εδάφους είναι το ίδιο το μητρικό πέτρωμα και όχι ένα χαλαρό ίζημα σε θαλάσσιο ή λιμναίο περιβάλλον.

- **Η χρήση του διαγράμματος *e-logp* για την παρουσίαση αποτελεσμάτων συμπιεστότητας σε υπολειμματικά εδάφη μπορεί να είναι παραπλανητική και να αποτυπώνει μια ψευδώς υπερστερεοποιημένη συμπεριφορά.**

- Η μορφή των καμπυλών συμπίεσης σχετίζεται με το δείκτη υδαρότητας (LI). Εδάφη με μικρή τιμή LI εμφανίζουν μείωση της συμπιεστότητας, ενώ εδάφη με υψηλή τιμή LI εμφανίζουν αύξηση της συμπιεστότητας και ευδιάκριτη τιμή πίεσης στην οποία μεταβάλλεται η κλίση της καμπύλης συμπίεσης.

- Για το υλικό της Ενότητας C διαπιστώνεται μείωση της συμπιεστότητας με την αύξηση της παραμόρφωσης (strain-hardening), αποτέλεσμα αναμενόμενο εφόσον εμφανίζει μικρή τιμή LI και διογκούμενη συμπεριφορά κατά τις φάσεις αποφόρτισης. Την ίδια συμπεριφορά εμφανίζει και το αντίστοιχο υλικό από την περιοχή του Κ. Νευροκοπίου.

- **Ο συντελεστής μεταβολής όγκου m_v φαίνεται να είναι η καταλληλότερη παράμετρος έκφρασης της συμπιεστότητας για τα υπολειμματικά εδάφη.**

- Διαπιστώθηκε το φαινόμενο της προοδευτικής κατάρρευσης της δομής, γνωστό και ως υδροστερεοποίηση, το οποίο συναντάται σε υπολειμματικά εδάφη ασταθούς δομής όπως αυτά της Ενότητας Β και σε ανθρωπογενείς τεχνητές ή ιστορικές επιχωματώσεις.

- Η διατμητική αντοχή της Ενότητας Β παρουσιάζει ανισοτροπία κατά τη διεύθυνση των υπολειμματικών επιφανειών σχιστότητας, που μπορεί να διερευνηθεί με την εκτέλεση δοκιμών προσανατολισμένων διατμήσεων σε αδιατάρακτα δείγματα μεγάλης κλίμακας. Επίσης διατηρείται μία δομή εξαιτίας δεσμών ανάμεσα στους κόκκους του εδάφους, η οποία εκφράζεται με μία σημαντική τιμή συνοχής. **Επειδή η δομή αυτή καταστρέφεται με αύξηση της εφαρμοζόμενης ορθής τάσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής άμεσης διάτμησης και για να προσδιορίζεται ακριβέστερα η συμβολή αυτού του παράγοντα, η δοκιμή θα πρέπει να εκτελείται για μικρές τιμές ορθής τάσης.**

6.4 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας αποτελεί ο σχεδιασμός, η εγκατάσταση και η βαθμονόμηση της πειραματικής διάταξης που επιτρέπει την εκτέλεση τριαξονικής δοκιμής με έλεγχο της μύζησης καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Με την προσθήκη ενός ελεγκτή πίεσης-όγκου αέρα και μίας βάσης με κεραμικό δίσκο υψηλής πίεσης εισόδου αέρα στο αυτοματοποιημένο σύστημα τριαξονικών δοκιμών της GDS του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας έγινε δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου μεταβολής της αξονικής αναφοράς πιέσεων (axis translation technique). Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίστηκε η Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους της Ενότητας C και η επίδραση της μύζησης στη διατμητική της αντοχή.

Έγινε προσπάθεια να αποδοθούν οι όροι των εννοιών της μηχανικής μερικώς κορεσμένων εδαφών στην Ελληνική γλώσσα διότι δεν έχουν οριστικοποιηθεί στην Ελληνική βιβλιογραφία. Προτείνονται οι όροι *Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους (ΧΑ.Κ.Μ.Ε.), ελκτική μύζηση* και *συσταλτική στοιβάδα* για τους αντίστοιχους *Soil-Water Characteristic Curve, matric suction* και *contractile skin.*

Η δημοσίευση της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης Εδάφους και ο υπολογισμός της γωνίας φ^b για επιμέρους εδαφικά υλικά είναι σημαντική για τη διεθνή έρευνα διότι συμβάλλει στη βελτίωση του θεωρητικού πλαισίου που αποδίδει τη μηχανική συμπεριφορά σε ακόρεστες συνθήκες, το οποίο είναι υπό διαμόρφωση. Επιπλέον, οι συγκεκριμένες εργαστηριακές δοκιμές απαιτούν πολύ μεγάλο χρόνο εκτέλεσης, ειδική τεχνογνωσία και σύνθετες πειραματικές διατάξεις, που διατίθενται σε λίγα ερευνητικά κέντρα ανά τον κόσμο. Η πειραματική διάταξη που εγκαταστάθηκε για την εκτέλεση των συγκεκριμένων εργαστηριακών δοκιμών με δυνατότητα ελέγχου της μύζησης, είναι η πρώτη στην Ελλάδα. **Επίσης τα αποτελέσματα προσδιορισμού των παραμέτρων αντοχής σε ακόρεστες συνθήκες είναι τα πρώτα για εδάφη του Ελλαδικού χώρου και από τα πρώτα παγκοσμίως για υπολειμματικά εδάφη με έντονη ορυκτολογική και δομική επιρροή.** Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται πολύ σημαντική η αξιολόγηση και η ερμηνεία των εν λόγω εργαστηριακών αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα της εργαστηριακής έρευνας με έλεγχο της μύζησης για το υπολειμματικό έδαφος της Ενότητας C συνοψίζονται στα εξής:

- Προσδιορίστηκε η Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους για το υλικό της Ενότητας C. Η τιμή πίεσης εισόδου αέρα για το συγκεκριμένο υλικό είναι περίπου 300 kPa. Η σχετικά υψηλή αυτή τιμή αποδίδεται στη φύση του υλικού το οποίο είναι ιδιαίτερα λεπτόκοκκο. Η τιμή της μύζησης για την οποία μεταβάλλεται η κλίση της ΧΑ.Κ.Μ.Ε. είναι περίπου 400 kPa και αντιστοιχεί σε βαθμό κορεσμού 74% περίπου. Συγκρίνοντας τη ΧΑ.Κ.Μ.Ε με τις μετρήσεις φυσικής υγρασίας του υλικού της Ενότητας C φαίνεται ότι το υλικό σε βάθος βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού, ενώ στην επιφανειακή ζώνη οι τιμές υγρασίας αντιστοιχούν σε βαθμό κορεσμού μεταξύ 73%-100%. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε τιμές μύζησης 0-400

kPa, ενώ επιφανειακά και σε ξηρές περιόδους ο βαθμός κορεσμού αντιστοιχεί σε τιμές μύζησης > 800 kPa.

- Με βάση τα στοιχεία αυτά της καμπύλης καθώς και τις επί τόπου τιμές υγρασίας του υλικού, επελέγησαν οι τρεις τιμές μύζησης για την εκτέλεση των δοκιμών θραύσης CD. Η τιμή u_a-u_w=200 kPa αντιστοιχεί πρακτικά σε συνθήκες κορεσμού (τιμή μικρότερη από 250 kPa), η τιμή u_a-u_w=400 kPa βρίσκεται κοντά στην τιμή πίεσης εισόδου αέρα και αντιστοιχεί στον επί τόπου βαθμό κορεσμού κατά τη φάση εκδήλωσης των αστοχιών, ενώ τέλος η τιμή u_a-u_w=800 kPa εισάγεται για να εκτιμηθεί η μεταβολή της διατμητικής αντοχής σε υψηλές τιμές μύζησης.

- Το συγκεκριμένο γεωυλικό παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλή τιμή γωνίας τριβής φ' (≈ 13°) και τιμή της παραμένουσας γωνίας φ'_r (≈ 11°) η οποία είναι υψηλή σε σχέση με τη φ'. Η χαμηλή τιμή της φ' αποδίδεται στον προσανατολισμό των διογκούμενων αργιλικών ορυκτών με μεγάλο πλακοειδές (σμεκτίτες). Επιπρόσθετα παρατηρείται αύξηση της φ' με αύξηση της μύζησης. Το φαινόμενο συναντάται στη βιβλιογραφία ως παραμένουσα αντοχή των εδαφών μετά την αστοχία λόγω συσσωμάτωσης των αργιλικών ορυκτών (aggregation stiffening), δηλαδή σε δομικού τύπου αστοχίες. Φαίνεται λοιπόν πως οι εκτιμώμενες τιμές αντοχής αποτελούν την δομικού χαρακτήρα αντοχή του εξεταζόμενου υπολειμματικού εδάφους. Η γωνία τριβής και η υπολειμματική γωνία τριβής σχεδόν συμπίπτουν και παρατηρείται σαφής διαφορά των τιμών των δοκιμών βραδείας διάτμησης με αυτές των δοκιμών άμεσης διάτμησης (c'=18 kPa, φ'=23°). Επομένως το εξεταζόμενο υπολειμματικό έδαφος έχει φ'=23° η οποία μεταπίπτει σε φ'=13° με το δομικό προσανατολισμό των ορυκτών και σε φ_r'=11° μετά την αστοχία.

- Η κλίση της γραμμής τομής που προκύπτει από την τομή του επιπέδου αστοχίας με το επίπεδο διατμητικής τάσης – μύζησης [τ - (u_a-u_w)], αντιπροσωπεύει τη γωνία φ^b. Η γωνία αυτή είναι αντιπροσωπευτική του κάθε υλικού και πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι για μικρές τιμές μύζησης (κορεσμένες συνθήκες) ισούται με την φ' ενώ για μεγάλες τιμές μύζησης (πάνω από την τιμή air entry value) παρουσιάζεται σταθερή και πάντα μικρότερη ή ίση με την φ'. Για το εξεταζόμενο υλικό υπολογίστηκε σε φ^b =8,1^o.

- Η αύξηση της μύζησης συνεισφέρει στην αύξηση της στιφρότητας, της θραυσιμότητας και της διογκωσιμότητας του υλικού, ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές πλευρικής τάσης. Γενικά η συμπεριφορά του υλικού προσομοιάζει με αυτήν ενός υπερστερεοποιημένου υλικού για υψηλές τιμές μύζησης και ενός κανονικά στερεοποιημένου για χαμηλές τιμές μύζησης.

- Η αύξηση της μύζησης αυξάνει τη διατμητική αντοχή του εξεταζόμενου υλικού, επιφέροντας αύξηση τόσο στη συνοχή, όσο και στη γωνία τριβής προσανατολισμού. Αντίθετα με το αναμενόμενο, η αύξηση της μύζησης οδηγεί σε

μείωση της υπολειμματικής αντοχής επιφέροντας μείωση στην υπολειμματική συνοχή c'_r χωρίς επίδραση στη φ'_r.

- Σε αδιατάρακτα δοκίμια της ενότητας C εκτελέστηκαν δοκιμές τριαξονικής αντοχής χωρίς στερεοποίηση και αποστράγγιση με τυχαίο προσανατολισμό και με βαθμό κορεσμού S=70% που αντιστοιχεί στη φυσική υγρασία των δειγμάτων. Οι δοκιμές αυτές εκτελέστηκαν για να διερευνηθεί η διατμητική αντοχή της υπολειμματικής σχιστότητας. Η διάτμηση κατά μήκος αυτών των επιφανειών έδωσε αποτελέσματα c'=15kPa και φ'=13°, τιμές που συμπίπτουν με την τιμή αντοχής των αναζυμωμένων δοκιμίων για τιμή μύζησης 400kPa, δηλαδή για S=73%. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι πιθανότατα η αντοχή μιας επιφάνειας σχιστότητας που αρχικά δημιουργείται από τον προσανατολισμό των ορυκτών του πετρώματος κατά τη διαδικασία της μεταμόρφωσής του και στη συνέχεια εδαφοποιείται, συμπίπτει με την αντοχή ενός ήδη εδαφοποιημένου υλικού του οποίου τα ορυκτά προσανατολίζονται κατά τη πειραματική διαδικασία. Μία τέτοια διαπίστωση θα μπορούσε να υπερκεράσει το πρόβλημα της εκτέλεσης δοκιμών αντοχής σε αδιατάρακτα δείγματα για τη συγκεκριμένη κατηγορία υπολειμματικών εδαφών και είναι ενδιαφέρον να ερευνηθεί περαιτέρω.

6.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ ΑΣΠΡΟΒΑΛΤΑΣ

Ο εντοπισμός της παρουσίας υπολειμματικών εδαφών και ιδιαίτερα αυτών που αναπτύσσονται σε συγκεκριμένες, δομικά ελεγχόμενες, διευθύνσεις μέσα στη μάζα βραχωδών σχηματισμών είναι εξαιρετικά σημαντικός. Κι αυτό γιατί η διαφοροποίησή τους από ιζηματογενή αργιλικά εδάφη, υλικά πλήρωσης ασυνεχειών και υλικά κορημάτων, είναι καθοριστική για την ερμηνεία της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Στη διαδικασία αυτή έχει κεφαλαιώδη σημασία η καλή γνώση της γεωλογικής και τεκτονικής δομής των σχηματισμών και η επί τόπου διερεύνηση και αναγνώριση των διαφορετικών κατηγοριών τέτοιων υλικών σε σχέση με το βαθμό εξαλλοίωσης και αποσάθρωσής τους.

Η αδυναμία επιλογής χαρακτηριστικών τιμών αντοχής για τα υπολειμματικά εδάφη έχει οδηγήσει στην περιγραφή της αντοχής τους με μία ενιαία τιμή "ισοδύναμου" υλικού που θεωρείται ομοιογενές και ισότροπο. **Η θεώρηση αυτή επιτυγχάνει ενδεχομένως ικανοποιητική προσομοίωση της παρατηρούμενης αστοχίας με την εφαρμογή ανάστροφων αναλύσεων, δε συμβάλλει όμως καθόλου στο πρόβλημα του αρχικού σχεδιασμού. Το αποτέλεσμα είναι τα συχνά φαινόμενα απρόβλεπτων αστοχιών σε υπολειμματικά εδάφη.**

Η θεώρηση των υπολειμματικών εδαφών ως ομοιογενών υλικών είναι προβληματική, ακόμα και στο τελευταίο στάδιο εδαφοποίησής τους. Τα ιζηματογενή εδάφη υπόκεινται σε μία συστηματική διαδικασία διαβάθμισης κατά τις φάσεις διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης και τείνουν να διαμορφώνονται ως ομοιογενή. **Τα υπολειμματικά εδάφη αντίθετα, δεν υπόκεινται σε τέτοιες διαδικασίες και εμφανίζονται ως ετερογενή εδάφη με έντονη ανομοιομορφία, που η μηχανική τους συμπεριφορά ελέγχεται από την υπολειμματική δομή του μητρικού πετρώματος.**

Οι αστοχίες των ορυγμάτων που παρατηρήθηκαν στα υπολειμματικά εδάφη της περιοχής έρευνας έλαβαν χώρα σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, σε διαφορετικές θέσεις και με διαφορετική μορφή. Η αποκατάστασή τους έγινε θεωρώντας ότι η ευστάθεια ελέγχεται αποκλειστικά από τη γεωμετρία τους και με την θεώρηση "ισοδύναμου" ομοιογενούς υλικού στις ανάστροφες αναλύσεις που διεξήχθησαν. Η προσέγγιση αυτή δεν λαμβάνει υπόψη το σύνθετο γεωλογικό προφίλ της αποσάθρωσης και δεν μπορεί να ερμηνεύσει τα επιμέρους χαρακτηριστικών των αστοχιών αυτών.

Προτείνεται το μοντέλο της ανισότροπης κατανομής εργαστηριακά προσδιορισμένων παραμέτρων αντοχής των επιμέρους Ενοτήτων γεωυλικών. Η κατανομή γίνεται σε καθορισμένες διευθύνσεις στο εσωτερικό του ορύγματος, με σκοπό τον προσδιορισμό μιας σύνθετης επιφάνειας που δίνει τον ελάχιστο συντελεστή ασφάλειας. Με βάση τα αποτελέσματα της εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου μπορούν να διατυπωθούν τα εξής συμπεράσματα:

- **Οι αστοχίες που παρατηρήθηκαν ελέγχονται από την υφιστάμενη τεκτονική δομή και πιο συγκεκριμένα είναι ολισθήσεις παράλληλα προς τη διεύθυνση**

του συστήματος διακλάσεων KL3, δηλαδή Ν-ΝΔ. Το συμπέρασμα ενισχύεται από το γεγονός ότι οι αστοχίες παρατηρήθηκαν μόνο στο τμήμα από Χ.Θ. 9+700 έως Χ.Θ. 10+800, όπου η διεύθυνση του δρόμου είναι δυσμενής ως προς τη διεύθυνση της KL3, ενώ στη συνέχεια και με την αλλαγή της διεύθυνση του δρόμου, δεν παρατηρούνται αστοχίες.

- Από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ορυγμάτων σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια παίζει το ύψος και το μήκος και όχι η κλίση τους. Αυτό συμβαίνει διότι τα ορύγματα μεγάλου μήκους και ύψους εμφανίζουν ικανό μέγεθος μετώπου εκσκαφής ώστε να αποκαλυφθούν σύνθετες δομικές επιφάνειες, οι οποίες διαμορφώνουν ολισθαίνοντα σώματα σε σημαντικό βάθος και επομένως με σημαντικό βάρος. Τα σώματα αυτά οριοθετούνται από τα συστήματα διακλάσεων KL2 και KL3 ενώ τα παρακατακόρυφα συστήματα KL1 και KL4 οριοθετούν τις επιφάνειες αποκόλλησης στην τρίτη διάσταση. Στις περιπτώσεις πλήρως εξαλλοιωμένων ορυγμάτων ο παραπάνω μηχανισμός παράγει αστοχίες φαινομενικά (μακροσκοπικά) κυκλικού τύπου και ερμηνεύει τόσο τις θέσεις όπου παρατηρήθηκαν αστοχίες, όσο και τη μορφή τους.

Η διάνοιξη των ορυγμάτων ενεργοποίησε ή και επιτάχυνε κάποιους μηχανισμούς, υποβαθμίζοντας τις συνθήκες ευστάθειας αυτών. Οι μηχανισμοί μείωσης των παραμέτρων αντοχής των γεωυλικών που δρουν στην περιοχή έρευνας ερμηνεύθηκαν, ποσοτικοποιήθηκαν και είναι οι εξής:

- Η αύξηση του ρυθμού αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης μετά τις εκσκαφές. Η σταδιακή με το χρόνο εξασθένιση των γεωυλικών οφείλεται στην εκσκαφή, την αφαίρεση του βάρους των υπερκείμενων και τη μείωση των ορθών τάσεων. Η διαδικασία αυτή σε συνδυασμό με τις αυξομειώσεις της περιεχόμενης υγρασίας των γεωυλικών οδηγεί σε επιτάχυνση του ρυθμού αποσάθρωσης, εδαφοποίηση των γεωυλικών, κατάρρευση της δομής και τελικά σε αστοχίες δομικού χαρακτήρα. Η επίδραση της υποβάθμισης της Ενότητας Α σε Ενότητα Β, είναι φανερή τόσο στο συντελεστή ασφάλειας όσο και στην αναμενόμενη μορφή αστοχίας.

- Η μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών της Ενότητας C λόγω του προσανατολισμού των αργιλικών ορυκτών. Οι μεταβολές της εντατικής κατάστασης των ορυγμάτων εξαιτίας των εκσκαφών και των διαδοχικών διογκώσεων και συρρικνώσεων με τις μεταβολές της υγρασίας, προκαλούν προσανατολισμό των φυλλόμορφων αργιλικών ορυκτών της Ενότητας C. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, με την πάροδο του χρόνου, να υποβαθμίζεται η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής.

- Η μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών της Ενότητας C λόγω των μεταβολών της τιμής της μύζησης. Κύριος παράγοντας ενεργοποίησης νέων αστοχιών είναι η απώλεια της μύζησης λόγω βροχόπτωσης, με συνέπεια τη μείωση της ολικής συνοχής σε μία κρίσιμη τιμή αστοχίας. Σε περιπτώσεις προϋπάρχουσας αστοχίας, όπου η ευστάθεια ελέγχεται από την υπολειμματική

αντοχή, αυτή μειώνεται με αύξηση της μύζησης, γεγονός που ερμηνεύει την αστοχία τέτοιων ορυγμάτων κατά τη διάρκεια παρατεταμένης ξηρής περιόδου.

6.6 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στα πλαίσια εκπόνησης της διατριβής ανέκυψαν σημαντικά ζητήματα σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά των υπολειμματικών εδαφών αλλά και τη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες. Μια σημαντική προοπτική με βάση την υποδομή και την τεχνογνωσία που αποκτήθηκε για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών με έλεγχο του βαθμού κορεσμού, είναι η δημιουργία βάσης δεδομένων των μηχανικών παραμέτρων αντοχής σε ακόρεστες συνθήκες για εδάφη του Ελλαδικού χώρου και όχι μόνο (Χαρακτηριστικές Καμπύλες Μύζησης Εδάφους και γωνίες φ^b). Τέτοιες πειραματικές βάσεις δεδομένων έχουν έντονο ερευνητικό αλλά και οικονομικό ενδιαφέρον, γιατί αξιοποιούνται από εταιρίες παραγωγής λογισμικών με εφαρμογές στην Τεχνική Γεωλογία και τη Γεωτεχνική Μηχανική.

Διαπιστώνονται ελλείψεις στη γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς των υπολειμματικών εδαφών αναφορικά με τις μεταβολές όγκου. Ο ρόλος της δομής των υπολειμματικών εδαφών είναι καθοριστικός στην εν λόγω συμπεριφορά και παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις από την αντίστοιχη συμπεριφορά των ιζηματογενών εδαφών. Φαινόμενα όπως η κατάρρευση της δομής και η υδροστερεοποίηση χαρακτηρίζουν τα υπολειμματικά εδάφη και έχουν σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς σχετίζονται με πολλές αστοχίες τεχνικών έργων.

Επιπλέον, παραμένει προβληματικός ο εργαστηριακός προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υπολειμματικών εδαφών. Είναι σημαντικό να αναπτυχθούν μέθοδοι επί τόπου έρευνας σε μεγάλη κλίμακα, ειδικά για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας και της ανισοτροπίας της αντοχής τους.

Τέλος, μεγάλο πρακτικό αλλά και ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατά το δυνατόν πιο συστηματική και αναλυτική διερεύνηση του σύνθετου θέματος της αποσαθρωσιμότητας των βραχωδών γεωυλικών (ταχύτητα - ρυθμός αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης, μείωση των χαρακτηριστικών αντοχής τους).

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Adams, B. A., Wulfsohn, D., & Fredlund, D. G. (1996, March). Air Volume Change Measurement in Unsaturated Soil Testing Using a Digital Pressure-Volume Controller. *Geotechnical Testing Journal , 19* (1), σσ. 12-21.

Affendi, A., & Faisal, H. A. (1996). Suction, rainfall and slope stability. *4th Int. Conf. on Tropical Soils*, *1*, σσ. 539-544. Kuala Lumpur, Malaysia.

Aitchison, G. D. (1965). *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, A Symp. in Print.* Butterworths, Australia: G. D. Aitchison.

ASTM. (1983). Standard test method for classification of soils for engineering purposes. *ASTM Designation D2487-83, Annual book of ASTM standards , 04.08*, 395-408.

Aydin, A., & Egeli, I. (2001). Stability of slopes cut in metasedimentary saprolites in Hong Kong. *Bulletin of Engineering Geology end Environment* (60), σσ. 315-319.

Bardanis, M. E., & Kavvadas, M. J. (2008). Soil-Water Characteristic Curves and Void Ratio Changes Relative to Suction for Soils in Greece. Στο D. G. Toll, C. E. Augarde, D. Gallipoli, & S. J. Wheeler, *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering* (σσ. 263-269). London: CRC Press/Balkema.

Barnes, G. E. (2000). *Soil Mechanics: Principles and Practice.* Palcrave MacMillan .

Baynes, F., & Dearman, W. (1978). The microfabric of a chemically weathered granite. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* (18), σσ. 91-100.

Beattie, A. A., & Attewill, L. J. (1977). A landslide study in Hong Kong residual soils. *Proc. 5th Southeast Asian Conf. on Soil Eng.*, (σσ. 177-187). Bangkok.

Begonha, A., & Sequeira Braga, M. A. (2002). Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties. *Catena* (49), σσ. 57-76.

Bishop, A. W., & Donald, I. B. (1961). The Experimental Study of Partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus. *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, *1*, σσ. 13-21. Paris.

Bishop, A. W., & Henkel, D. J. (1692). *The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test* (2 εκδ.). London, England: Edward Arnold.

Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E., & Donald, I. B. (1960). Factors Controlling the Shear Strength of Partly Saturated Cohesive Soils. *ASCE Res. Conf Shear Strength of Cohesive Soils, Univ. of Colorado, Boulder, CO*, (σσ. 503-532).

Black, D. K., & Lee, K. L. (1973). Saturating Laboratory Samples by Back Pressure. *ASCE J. Soil Mech. Found. Eng. Div. , 99* (SM1), σσ. 75-95.

Blight, G. E. (1965). A study of effective stresses for volume change. Στο *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils. Beneath Covered Areas* (σσ. 259-269). Butterworth, Australia.

Blight, G. E. (1983). Aspects of the capillary model for unsaturated soils. *Proc Asia Reg. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.* Haifa, Israel.

Blight, G. E. (1988). Construction in tropical soils. *Proc. 2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils*, *II*, σσ. 449-467. Singapore.

Blight, G. E. (1987). Lowering the groundwatertable by deep-rooted vegetation-The geotechnical effects of groundwater recovery. *Proc. 9th European Conf. On Soil Mech. and Found. Eng.*, *1*, σσ. 285-288. Dublin.

Blight, G. E. (1997). *Mechanics of Residual Soils.* Rotterdam, Netherlands: Balkema.

Blight, G. E. (1991). Tropical processes causing rapid geological change. *Quaternary Engineering Geology* (7), σσ. 459-471.

Brand, E. W. (1982). Analysis and design in residual soils, Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils. *Geotech. Div. Spec. Conf* (σσ. 89-143). Honolulu, Hawai: ASCE.

Brand, E. W. (1988). Evolution of a classification scheme fot wearhered rock. Written discussion Geomechanics in Tropical Soils. *Proc. of 2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils, Singapore. 2*, σσ. 515-518. Amsterdam: Balkema.

Brand, E. W. (1995). Slope stability in tropical areas. *Proc. Int. Conf. on Landslides* (σσ. 2031-2050). Balkema.

Brand, E. W., & Phillipson, H. B. (1985). *Sampling and testing of residual soils.* Hong Kong: South East Asian Geotechnical Society, Scorpion Press.

Brink, A. B., & Kantey, B. A. (1961). Colapsible grain structure in residual granite soils in Southern Africa. *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.*, *1*, σσ. 611-614. Paris.

Budhu, M. (2000). *Soil Mechanics and Foundations.* New York: Wiley.

Bujang, B. K., Faisal, H. A., & Rajoo, R. S. (2006). Stability Analysis and Stability Chart for Unsaturated Residual Soil Slope. *Amer. J. of Env. Sci. , 2* (4), σσ. 154-160.

Burland, J. B., Butler, F. G., & Dunican, P. (1966). The behavior and design of large diameter bored piles in stiff clay. *Symp. Large Bored Piles. Instn. Civ. Engrs.*, (σσ. 51-71). London.

Chandler, R. J., & Gutierrez, C. I. (1986). The Filter-Paper Method of Suction Measurement. *Geotechnique , 36*, σσ. 265-268.

Chandler, R. J., & Skempton, A. W. (1974). The design of permanent cutting slopes in stiff fissured clays. *Geotechnique , 24* (4), σσ. 457-466.

Chang, M. F., & Goh, A. T. (1988). Lateraly loaded bored piles in residual soils and weathered rocks. *Proc. 2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 303-310. Singapore.

Chatawarangul, K. (1983). *Comparative Study of Different Procedures to Evaluate Effective Stress Strength Parameters for Partially Saturated Soils.* MSc Thesis, Asia Inst. of Tech., Bankonk.

Chatziaggelou, M., & Christaras, B. (2005). Influence of Rainfall on Slope Stability at Egnatia Highway, Asprovalta-Strymonas Part. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials , 16* (1-2), 21-26.

Chatziaggelou, M., & Christaras, B. (2006). Instability of Sopes Along the Nymphopetra to Strymonas Section of the Egnatia Highway in N. Greece. *10th IAEG Congress: Engineering Geology for Tomorrow's Cities.* Nottingham: IAEG.

Chatzigogos, N. T., Makedon, T., Tsotsos, S., & Christaras, B. (2006). Implementation of a ground investigation strategy on urban fills. *10th IAEG Congress.* Nottingham, UK.

Chatzigogos, N., Makedon, T., & Tsotsos, S. (2007). The mechanical behaviour of gneisseous rocks and the selection of strength parameters for stability analysis of excavated slopes. *1st SLGS Int. Conf. on Soil and Rock Engineering.* Colombo, Sri Lanka.

Ching, R. K., & Fredlund, D. G. (1984). A Small Saskatchewan Town Copes with Swelling Clay Problems. *Proc. 5th Int. Conf. Expansive Soils*, (σσ. 306-310). Adelaide, Australia.

Ching, R. K., Sweeney, D. J., & Fredlund, D. G. (1984). Increase in factor of safety due to soil suction in two Jong Kong slopes. *Proc. 4th Int. Symp. on Landslides* (σσ. 617-623). Toronto: BiTech.

Chu, B. L., Hsu, T. W., & Lai, T. C. (1988). In situ direct shear tests for lateritic gravels in Taiwan. *Proc. 2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 119-126. Singapore.

Collins, K. (1985). Towards characterization of tropical soil microstructure. *Proc of the 1st Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils*, *1*, σσ. 85-96. Brasilia.

Costa Filho, L. M., & Vargas, J. E. (1985). *Topic 2.3. Hydraulic properties. Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils.* Brasilian Society of Soil Mechanics.

Cowland, J. W., & Carbray, A. M. (1988). Three cut slop[e failures in relict discontinuities in saprolitic soils. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 253-258. Singapore.

Craig, R. F. (1992). *Soil Mechanics* (5 εκδ.). London: Chapman & Hall.

Croney, D. (1952). The Movement and Distribution of Water in Soils. *Geotechnique , 3*, σσ. 1-16.

Croney, D., & Coleman, J. D. (1954). Soil Strucrure in Relation to Soil Suction (pF). *J. Soil Sci. , 5* (1), σσ. 75-84.

Das, B. M. (1998). *Principles of Geotechnical Engineering* (4 εκδ.). Boston: PWS.

Davies, J. T., & Rideal, E. K. (1963). *Interfacial Phenomena.* New York: Academic.

De Graft-Johnson, J. W., & Bhatia, H. S. (1969). General report-engineering characteristics. *Proc. Specialty Session on Engineering Properties of Lateritic Soils, 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineerin*, *2*, σσ. 13-43. Mexico.

De Mello, L. G., Franco, J. M., & Alvise, C. R. (1988). Grouting of canaliculae in residual soils and behavior of the foundation of Balbina dam. *2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils* , *1*, σσ. 385-390. Singapore.

Deere, D. V., & Patton, F. D. (1971). Slope stability in residual soils. *Proc. 4th Pan. Am. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, *I*, σσ. 87-170. Puerto Rico.

Derjaguin, B. V. (1965). Recent Research into the Properties of Water in Thin Films and in Micro-Capillaries. *Proc. Soc. for Experimental Biology Symp., XIX, The State and Movement of Water in Living Organisms.* London: Cambridge Univ. Press.

Donald, I. B. (1963). Effective Stress Parameters in Unsaturated Soils. *Proc. 4thAustalia-New Zealand Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, (σσ. 41-46). Adelaide.

Durgin, P. B. (1977). Landslides and the weathering of granitic rocks. *Reviews in Engineering Geology* , σσ. 127-131.

Edlefsen, N. E., & Anderson, A. B. (1943). Thermodynamics of Soil Moisture. *Hilgardia , 15*, σσ. 31-298.

Egli, M., Mirabella, A., & Fitze, P. (2003). Formation rates of smectites derived from two Holocene chronosequences in the Swiss Alps. *Geoderma* (117), σσ. 81-98.

Escario, V., & Saez, J. (1986). The Shear Strength of Partly Saturated Soils. *Geotechnique , 36* (3), σσ. 453-456.

Escario, V., Juca, J. F., & Coppe, M. S. (1989). Strength and Deformation of Partly Saturated Soils. *Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech & Found. Eng.*, (σσ. 43-46). Rio de Janeiro, Brazil.

Fityus, S. G., & Smith, D. W. (2004). The development of a residual soil profile from a mudstone in a temperate climate. *Engineering Geology , 74*, σσ. 39-56.

Fitzpatrick, R. Q., & Le Roux, J. (1977). Mineralogy and chemistry of a Transvaal black clay topo sequence. *Jour. Soil Sci. , 28*, σσ. 165-179.

Florkiewicz, A., & Mroz, Z. (1989). Limit analysis for cracked and layered soils. *Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, *1*, σσ. 515-518. Rio de Janeiro, Brazil.

Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress State Variables for Unsaturated Soils. *ASCE J. Geotech. Eng. Div. GT5 , 103*, σσ. 447-466.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). An Overview of Unsaturated Soil Behaviour. *Geotechnical Special Publication. 39*, σσ. 1-32. New York: ASCE.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils.* New York: John Wiley & Sons, Inc.

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). The Shear Strength of Unsaturated Soils. *Can. Geotech. J. , 15* (3), σσ. 313-321.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Gan, J. (1987). Nonlinearity of Strength Envelope for Unsaturated Soils. *Proc. 6th Int. Conf. Expansive Soils*, *1*, σσ. 49-54. New Delhi, India.

Frost, R. J. (1976). Importance of correct pretesting preparation of some tropical soils. *Proc 1st S.E. Asian Conf. on Soil Engineering.* Bangonk, Thailand.

Gan, J. K. (1986). *Direct Shear Strength Testing of Unsaturated Soils.* MSc Thesis, Univ. of Saskatchewan, Canada.

Gardner, W. R. (1958). Some Steady State Solutions of the Unsaturated Flow-Equation with Applications to Evaporation from Water-Table. *Soil Science , 85* (4).

GCO. (1988). *Guide to Rock and Soil Descriptions. Geoguide 3.* Geotechnical Control Office, Hong Kong.

Geological Society Engineering Working Party Report. (1990). Tropical Residual Soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology , 23* (1), σσ. 1-101.

Geotechnical Manual for Slopes (2nd εκδ.). (2000). Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, The Goverment of Hong Kong.

Gidigasu, M. D. (1976). *Lateritic Soil Engineering.* Amsterdam: Elsevier.

Head, K. H. (1986). Effective Stress Tests. Στο *Manual of Soil Laboratory Testing* (Τόμ. 3, σσ. 743-1238). New York: Wiley.

Hecht, L., Thuro, K., Plinninger, R. J., & Cuney, M. (1999). Mineralogical and geochemical characteristics of hydrothermal alteration and episyenitization in the Konigshain granites, northern Bohemian Massif, Germany. *Int. Journ. Earth Sciences* (88), σσ. 236-252.

Ho, D. Y., & Fredlund, D. G. (1982). Strain Rates for Unsaturated Soil Shear Strength Testing. *Proc. 7th Southeast asian Geotech. Conf.* Hong Kong.

Ho, Y. F. (1979). *Measurement of Soil Suction Using the Filter Paper Technique.* Internal Report, IR-11, Univ. of Saskatchewan, Transportation and Geotech. Group, Dep. of Civil Eng., Saskatoon.

Horn, A. (1982). Swell and Creep properties of an African black clay. *Proc. ASCE Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils*, (σσ. 199-215). Hawai.

Howatt, M. D. (1988). The in situ strength of saturated decomposed granite. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 311-316. Singapore.

Howatt, M. D., & Cater, R. W. (1982). Passive strength of completely weathered granite. *Proc. 1st Int. Conf. Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils*, *2*, σσ. 371-379. Brasilia.

Irfan, T. Y., & Woods, N. W. (1988). The influence of relict discontinuities in saprolitic soils. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 267-276. Singapore.

Irfan, T. Y., & Woods, N. W. (1988). The influence of relict discontinuities on slope stability in saprolitic soils. *Proc. Second Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 267-276. Singapore.

Islam, M. R., Peuraniemi, V., Aario, R., & Rojstaczer, S. (2002). Geochemistry and mineralogy of saprolite in Finnish Lapland. *Applied Geochemistry* (17), σσ. 885-902.

Jackson, T. A., & Keller, W. D. (1970). A comparative study of the role of lichens and inorganic processes in the chemical weathering of recent Hawaian laval flows. *Amer. Jour. Sci. , 269*, σσ. 446-466.

Janbu, N. (1988). Sediment deformation. Trondheim, Norway: Norwegean University of Science and Technology.

Jennings, J. E., & Knight, K. (1975). A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. *Proc. 6th Reg. Conf. For Africa on Soil Mech and Found. Eng.*, *1*, σσ. 99-105. Durban.

Kenny, T. C. (1977). Residual Strength of Mineral Mixtures. *Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mech.*, *1*, σσ. 155-160.

Kezdi, A. (1969). Landslide in loess along the bank of the Danube. *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, *2*, σσ. 617-626. Mexico.

Kim, S., & Park, H. D. (2003, Ιούνιος 27). The relationship between physical and chemical weathering indices of granites around Seoul, Korea. *Bull. Eng. Geol. Env.* (62), σσ. 207-212.

Kitamura, R., & Sako, K. (2010). Contibution of "Soils and Foundations" to studies on rainfall-induced slope failure. *Soils and Foundations , 50* (6), σσ. 955-964.

Knight, K. (1961). *The collapse of structure of sandy sub-soils on wetting.* PHD Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg.

Krahn, J., & Fredlund, D. G. (1972). On Total Matric and Osmotic Suction. *J. Soil Sci. , 114* (5), σσ. 339-348.

Leong, E. C., Rahardjo, H., & Fredlund, D. G. (2001). Application of Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Engineering. *Proc. 8th East Asian Pacific Conf. on Structural Eng. and Constructions.* Singapore.

Li, A. G., Yue, Z. Q., Tham, L. G., Lee, C. F., & Law, K. T. (2005). Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope. *Can. Geotech. J. , 42*, σσ. 13-26.

Lim, T. T., Rahardjo, H., & Change, M. F. (1996). Climatic Effects on Negative Pore-Water Pressures in a Residual Soil Slope. *4th Int. Conf. on Tropical Soils*, *1*, σσ. 568-574. Kuala Lumpur, Malaysia.

Little, A. L. (1969). The engineering classification of residual tropical soils. *Proc. Spec. Session on Eng. Props. Lareitic Soils. 7th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.*, (σσ. 1-10). Mexico City.

Lo, K. W., Leung, C. F., Hayata, K., & Lee, S. L. (1988). Stability of excavated slopes in the weathered Jurong. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 277-285. Singapore.

Lumb, P. (1975). Slope failures in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engng Geology* (8), σσ. 31-65.

Lumb, P. (1961). The properties of decomposed granite. *Geotechnique , 3*, σσ. 226-242.

Lumb, W. B. (1982). Engineering problems in tropical and residual soils in Hawai. *Proc ASCE Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils*, (σσ. 1-12). Hawai.

Lupini, J. P., Skinner, A. E., & Vaughan, P. R. (1981). The Drained Residual Strength of Cohesive Soils. *Geotechnique , 31* (2), σσ. 181-213.

Malone, A. W., & Shelton, J. C. (1982). Landslides in Hong Kong. *Proc. ASCE Spec. Conf. on Eng. and Constr. in Tropical and Residual Soils*, (σσ. 425-443). Hawai.

Martin, R., Bailey, S., Eberl, D., Fanning, D., Guggenhiem, S., Kodama, H., και συν. (1991). Comments on report of the Clay Mineral Society Nomenclature Commitee Revised Classification of Clay Minerals. *Clays and Clay Minerals* (39), σσ. 333-335.

Mason, B. (1949). Oxidation and reduction in geochemistry. *Jour.Geol. , 57* (1), σσ. 62-72.

Matyas, E. L. (1969). Some engineering propertiew of Sasumua clay. *Proc. Specialty Session, Seventh International Conference ISSMFE, Engineering Properties of Lateritic Soils.* Mexico.

McKeen, R. G. (1985). *Validation of Procedures for Pavement Design on Expansive Soils.* Final Report, Dep. of Transportation, Washington DC.

Meng, G. H., & Chu, J. (2011). The Strength Anisotropy of a Residual Soil in Singapore. *Geotech. Eng. Jour. of the SEAGS & AGSSEA , 42* (4), 10-18.

Merchan, V., Vaunat, J., Romero, E., & Meca, T. (2008). Experimental Study of the Influence of Suction on the Residual Friction Angle of Clays. Στο D. G. Toll, C. E. Augarde, D. Gallipoli, & S. J. Wheeler, *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering* (σσ. 423-428). London: CRC Press/Balkema.

Mesri, G., & Cepeda-Diaz, A. F. (1986). Residual Shear Strength of Clays and Shales. *Geotechnique , 36* (2), σσ. 269-274.

Mitchel, J. K. (1976). *Fundamentals of soil behaniour.* New York: Wiley .

Mitchell, J., & Sitar, N. (1982). Engineering properties of tropical residual soils. *Proc. ASCE Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical Residual Soils*, (σσ. 30-57). Hawai.

Morgenstern, N. R., & Matos, M. (1975). Stability of slopes in residual soils. *Proc. 5th Pan. Amer. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, *3*, σσ. 369-384. Buenos Aires.

Morin, W. J., & Ayetey, J. (1971). Formation and properties of red tropical clays. *5th Reg. Conf. for Africa on Soil Mech. & Found. Eng.*, (σσ. 45-53). Luanda, Angola.

Morin, W., & Todor, P. (1976). *Laterite and lateritic soils and other problem soils of the tropics* (USAID Publication 3682 εκδ.). Baltimore USA: Lyon Associates.

Murray, E. J., & Sivakumar, V. (2010). *Unsaturated Soils: A Fundamental Interpretation of Soil Behaviour.* Oxford: Wiley-Blackwell.

Newill, D. (1961). A laboratory investigation of two red clays from Kenya. *Géotechnique , 11* (4), σσ. 302-318.

Pells, P. J., & Maurenbrecher, P. M. (1974). Cutting failures near Waterval Boven. *Civil Engineer in South Africa , 16* (5), σσ. 180-181.

Pillissier, J. P. (1991). Piles in deep residual soils. *Proc. 10th Conf. For Africa on Soil Mech. and Found. Eng.*, *1*, σσ. 31-40. Maseru, Lesotho.

Pings, W. B. (1968). Bacterial leaching. *Mineral Industries Bulletin , 2* (3), σ. 19.

Pradel, D., & Raad, G. (1993). Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. *Journal of Geotechnical Engineering , 16* (5), σσ. 315-332.

Premchitz, J., Gray, I., & Massey, J. B. (1988). Skin Friction on driven precast concrete piles founded in weathered granite. *Proc. 2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 317-324. Singapore.

Price, J. R., & Velbel, M. A. (2003). Chemical weathering indices applied to weathered profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology* (202), σσ. 397-416.

Pun, W. K., & Urciuoli, G. (2008). Soil nailing and subsurface drainage for slope stabilisation. *10th Int. Symp. on Landslides and Engineered Slopes. 1*, σσ. 85-125. Leiden, The Netherlands: CRC Press.

Queiroz de Carvalho, J. B. (1985). Effects of deferation and removal of amorphous silica and alumina on selected properties of Brazilian lateritic soils. *Proc. of the Int. Seminar on Laterite*, *II*, σσ. 559-567. Tokyo.

Queiroz de Carvalho, J. B. (1991). Microstructure of concretionary lateritic soils. *Proc. of the IX Panamerican Conf. of Soil Mech. and Found. Eng.*, *I*, σσ. 117-128.

Rahardjo, H., Aung, K. K., Leong, E. C., & Rezaur, R. B. (2004). Characteristics of Residual Soils in Singapore as Formed by Weathering. *Engineering Geology , 73*, σσ. 157-169.

Rahardjo, H., Heng, O. B., & Choon, L. E. (2004). Shear Strength of a Compacted Residual Soil from Consolidated Drained and Constant Water Triaxial Tests. *Can. Geotech. J. , 41*, σσ. 421-436.

Rahardjo, H., Santoro, V. A., Leong, E. C., Ng, Y. S., & Hua, C. J. (2011, June). Performance of Horizontal Drains in Residual Soil Slopes. *Soils and Foundations , 51* (3), σσ. 437-447.

Rahardjo, H., Santoso, V. A., Leong, E. C., Ng, Y. S., & Hua, C. J. (2011, June). Numerical Analyses and Monitoring Performance of Residual Soil Slopes. *Soils and Foundations , 51* (3), σσ. 417-482.

Ray, R. P., & Morris, K. B. (1995). Automated LaboratoryTesting for Soil-Water Characteristic Curves. *Proc. 1st Int. Conf. Unsaturated Soils* (σσ. 547-552). Paris: Balkema, Rotterdam.

Richards, B. G. (1965). Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychometric Technique Using Thermistors. *Moisture Equilibria and Moisture*

Changes in Soils Beneath Covered Areas, A Symp. in Print, (σσ. 39-46). Australia: Butterworths.

Richards, B. G. (1985). Sampling and Testing of Residual Soils. Στο E. Brand, & H. B. Phillipson, *Residual Soils of Australia.* (σσ. 23-30). Hong Kong: Scorpion Press.

Rouse, W. C., Reading, A. J., & Walsh, R. P. (1986). Volcanic soil properties in Dominica, West Indies. *Engineering Geology* (23), σσ. 1-28.

Rowe, P. W. (1974). The importance of soil fabric and its relevance in engineering practice. Rankine Lecture. *Géotechnique , 24* (3), σσ. 265-310.

Satija, B. S., & Gulhati, S. K. (1979). Strain Rate for Shearing Testing in Unsaturated Soil. *Proc. 6th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, (σσ. 83-86). Singapore.

Schwartz, K., & Yates, J. R. (1980). Engineering properties of aeolian Kalahari sands. *Proc. 7th Reg. Conf. For Africa on Soil Mech. and Found. Eng.*, *1*, σσ. 67-74. Accra, Ghana.

Simmons, J. (1989). *Preliminary Studies of Dispersive Soil Fabrics from the Burdekin River Irrigation Area using the Scanning Electron Microscope.* Research Bulletin CS38, James Cook University of North Queensland, Department of Civil and Systems Engineering, Townsville, Australia.

Skempton, A. W. (1985). Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory. *Geotechnique , 35* (1), σσ. 3-18.

St John, B. J., Sowers, G. F., & Weaver, C. H. (1969). Slickensides in residual soils and their engineering significance. *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.* Mexico City.

Strakhov, N. M. (1967). *The principles of lithogenesis* (Τόμ. 1). Edinburgh: Oliver and Boyd.

Sun, D. A., Matsuoka, H., Muramatsu, D., Hara, T., Kudo, A., Yoshida, Z., και συν. (2004). Deformation and strength characteristics of weathered soft rock using triaxial tests. *Int. J. Rock Mech. Sci. , 41* (3).

Sweeney, D. J. (1982). Some in situ soil suction measurements in Hong Kong's Residual soil slopes. *Proc. 7th Southeast Asian Geotech. Conf.*, (σσ. 91-105). Hong Kong.

Tan, Y. C., & Gue, S. S. (2001). The determination of shear strength in residual soils for slope stability analysis. *Seminar Cerun Kebangsaan.* Cameron Highlands.

Tang, R. K. (1978). *Measurement of Soil Suction by Filter Paper Method, Phases I-IV.* Laboratory Reports, Univ. of Saskatchewan , Dep. of Civil Eng., Saskatoon.

Terzaghi, K. (1958). Design and performance of Sasumua Dam. *Proc ICE*, *9*, σσ. 369-394.

Terzaghi, k., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3 εκδ.). New York: Wiley.

Thuro, K., & Scholz, M. (2003). Deep weathering and alteration in granites-a product of coupled processes. Stockholm, Sweden: Geo Proc.

Townsend, F. C. (1985). Geotechnical characteristics of residual soils. *Journal of Geotechnical Engineering* (1), σσ. 77-94.

Tromp, B. E. (1985). *Design of stiffened raft foundations for houses on collapsing sands.* Johannesburg: Schwarz, Tromp and Associates.

Tsiambaos, G. (1991). Correlation of Mineralogy and Index Properties with Residual Strength of Iraklion Marls. *Engineering Geology , 30* (3-4), σσ. 357-369.

Tsuchida, T., Athapathu, A. M., Kano, S., & Suga, K. (2011, June). Estimation of In-Situ Shear Strength Parameters of Weathered Granitic (Masado) Slopes Using Lightweight Dynamic Cone Penetrometer. *Soils and Foundations , 51* (3), σσ. 497-512.

Tuncer, E. R., & Lohnes, R. A. (1977). An engineering classification for certain basalt-derived lateritic soils. *Engineering Geology , II* (4), σσ. 319-339.

Uehara, G. (1982). Soil science for the tropics. Engineering and construction in tropical and residual soils. *ASCE Geotch. Div. Spec. Conf.*, (σσ. 13-26). Honolulu, Hawai.

Van der Merwe, D. H. (1965). *The soils and their enginnering properties of an area between Pretoria and Brits, Transvaal.* DSc Thesis, University of Pretoria.

Vargas, M. (1974). Engineering properties of residual soils from South-Central Region of Brazil. *2nd Int. Conf. of the Int. Assoc. of Engng. Geology*, *1*, σσ. 5.1-5.26. Sao Paolo.

Vaughan, P. R. (1988). Keynote paper: Characterising the mechanical properties of in situ residual soil. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, *2*, σσ. 469-487. Singapore.

Weinert, H. H. (1974). A climatic index of weathering and its application in road construction. *Geotechnique , 23* (4), σσ. 471-494.

Weinert, H. H. (1964). *Basic igneous rocks in road foundation.* Research Report 218, CSIR, Pretoria, South Africa.

Wen, B. P., Aydin, A., Duzgoren-Aydin, N. S., Li, Y. R., Chen, H. Y., & Xiao, S. D. (2007, August 30). Residual Strength of Slip Zones of Large Landslides in the Three Gorges Area, China. *Engineering Geology , 93* (3-4), σσ. 82-98.

Wesley, L. D. (1988). Engineering classification of residual soils. *Proc. Second Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 77-84. Singapore.

Wesley, L. D. (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils.* Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.

Wesley, L. D. (2003). Residual Strength of Clays and Correlations Using Atterberg Limits. *Geotechnique , 23* (7), σσ. 669-672.

Wesley, L. D. (1974). Shear strength properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. *Géotechnique , 27* (2), σσ. 125-136.

Wesley, L. D., & Lelaratnam, V. (2001). Shear strength parameters from back analysis of single slips. *Geotechnique , 51* (4), σσ. 373-374.

Wesley, L. D., & Matuschika, T. (1988). Geotechnical engineering in volcanic ash soils. *Proc. Second Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 333-340. Singapore.

Wesley, L. D., & Matuschka, T. (1988). Geotechnical engineering in volcanic ash soils. *Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils*, *1*, σσ. 333-342. Singapore.

Williams, A. A. (1991). The extraordinary phenomenon of chemical heaving and its effect on buildings and roads. *Proc. 10th Reg. Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Eng.*, *1*, σσ. 91-98. Maseru, Lesotho.

Zaruba, O., & Mencl, V. (1976). *Engineering Geology.* Amsterdam: Elsevier Scientific.

ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε. (2004). *Αποκατάσταση της Κατολίσθησης στο Όρυγμα περί τη Χ.Θ. 10+500.*

Μαρίνος, Π. Γ. (2004). *Έκθεση περί της Αστοχίας στη Χ.Θ. 10+300 της Εγνατίας Οδού, Περιοχή Ασπροβάλτα.*

Μουντράκης, Δ. Μ. (1985). *Γεωλογία της Ελλάδος.* Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.- Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ. (2004). *Οριστική Γεωλογική και Γεωτεχνική Μελέτη Αποκατάστασης Κατολίσθησης Ορύγματος Περιοχής Ασπροβάλτας περί τη Χ.Θ. 9+700.*

ΟΔΟΤΕΧΝΙΚΗ Ε.Π.Ε.-Β.ΠΕΡΛΕΡΟΣ. (2004). *Οριστική Γεωλογική και Γεωτεχνική Μελέτη Αποκατάστασης Ορυγμάτων Περιοχής Ασπροβάλτας περί τις Χ.Θ.10+300 & 10+800.* ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.

Στιμάραντζης, Θ., Δημόπουλος, Γ. Χ., Κίλιας, Α. Α., Χατζηαγγέλου, Μ., Χατζηγώγος, Ν. Θ., & Χρηστάρας, Β. Γ. (2004). Διερεύνηση Συνθηκών Ευστάθειας Υψηλού Ανοιχτού Ορύγματος Κατά Μήκος της Εγνατίας Οδού, Ασπροβάλτα - Μακεδονία. *Δελτίον Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας. 36*, σσ. 1833-1842. ΕΛ.Γ.Ε.

Τσότσος, Σ., & Καββαδάς, Μ. (2004). *Σχετικά με την Ευστάθεια των Ορυγμάτων από τη Χ.Θ. 9+000 έως τη Χ.Θ. 15+000, στα Τμήματα 11.2 και 11.3 της Εγνατίας Οδού.*

Χατζηαγγέλου, Μ. (2008). *Εκτίμηση Συνθηκών των Αστοχιών που Παρουσιάζονται στην Κακής Ποιότητας Βραχομάζα των Σηραγγών Ασπροβάλτας και Μέτρα Αντιμετώπισής Τους.* Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Θεσσαλονίκη.

Χατζηγώγος, Ν. (2009). *Γεωτεχνική μελέτη για την κατασκευή δημοτικού σχολείου στο 1ο Δ.Σ. στο Δήμο Κ. Νευροκοπίου.* Θεσσαλονίκη.

Χατζηγώγος, Ν. Θ., & Μακεδών, Θ. Κ. (2008). Η Επίδραση της Παρουσίας Υπολειμματικών Υλικών στην Ευστάθεια Πρανών σε Μεταμορφωμένα Πετρώματα με Έντονη Αποσάθρωση και Καταπόνηση. *Πρακτικά 3ου Π.Σ.Α.Μ.Η.Τ.Σ.* Αθήνα.

Χατζηγώγος, Ν. Θ., Μακεδών, Θ., Δημόπουλος, Γ., Τσότσος, Σ., & Χρηστάρας, Β. (2010). Εργαστηριακή Διερεύνηση της Διατμητικής Αντοχής Υπολειμματικών Γεωυλικών σε Ακόρεστες Συνθήκες. *Πρακτικά 6ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. 1*, σσ. 105-111. Βόλος: ΤΕΕ.

Χατζηγώγος, Ν., & Τσότσος, Σ. (2008). *Τεχνική Έκθεση με Θέμα: α)Γεωτεχνικά Στοιχεία σε Σχέση με τον «Εδαφικό» Τύμβο και τα Υλικά Δόμησης του Μακεδονικού Τάφου «Μακρίδη» στο Δερβένι Θεσσαλονίκης. β) Εκτιμήσεις της Φόρτισης του Τάφου από τον Τύμβο Διαχρονικά.* Θεσσαλονίκη.

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Θ. ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ
Πτυχιούχος MSc-DIC Γεωλόγος

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
(ΤΕΥΧΟΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ)

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2015

ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Θ. ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ
Πτυχιούχος MSc-DIC Γεωλόγος

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας

Τομέας Γεωλογίας

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 30/03/2015

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής Βασίλειος Χρηστάρας, Επιβλέπων

Καθηγητής Γεώργιος Δημόπουλος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Καθηγητής Στέφανος Τσότσος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγήτρια Θεοδώρα Τίκα-Βασιλικού

Καθηγητής Χρήστος Αναγνωστόπουλος

Καθηγητής Γεώργιος Δημόπουλος

Καθηγητής Αδαμάντιος Κίλιας

Καθηγητής Σπυρίδων Παυλίδης

Καθηγητής Στέφανος Τσότσος

Καθηγητής Βασίλειος Χρηστάρας

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

ISBN:

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ορυκτολογικές Αναλύσεις

ΕΝΟΤΗΤΑ Α

: HG_D1_WR.DI 3-Jul-2007 15:42

A.U.Th.-School of Geology Dept. of Mineralogy-Petrology-Ec.Geology

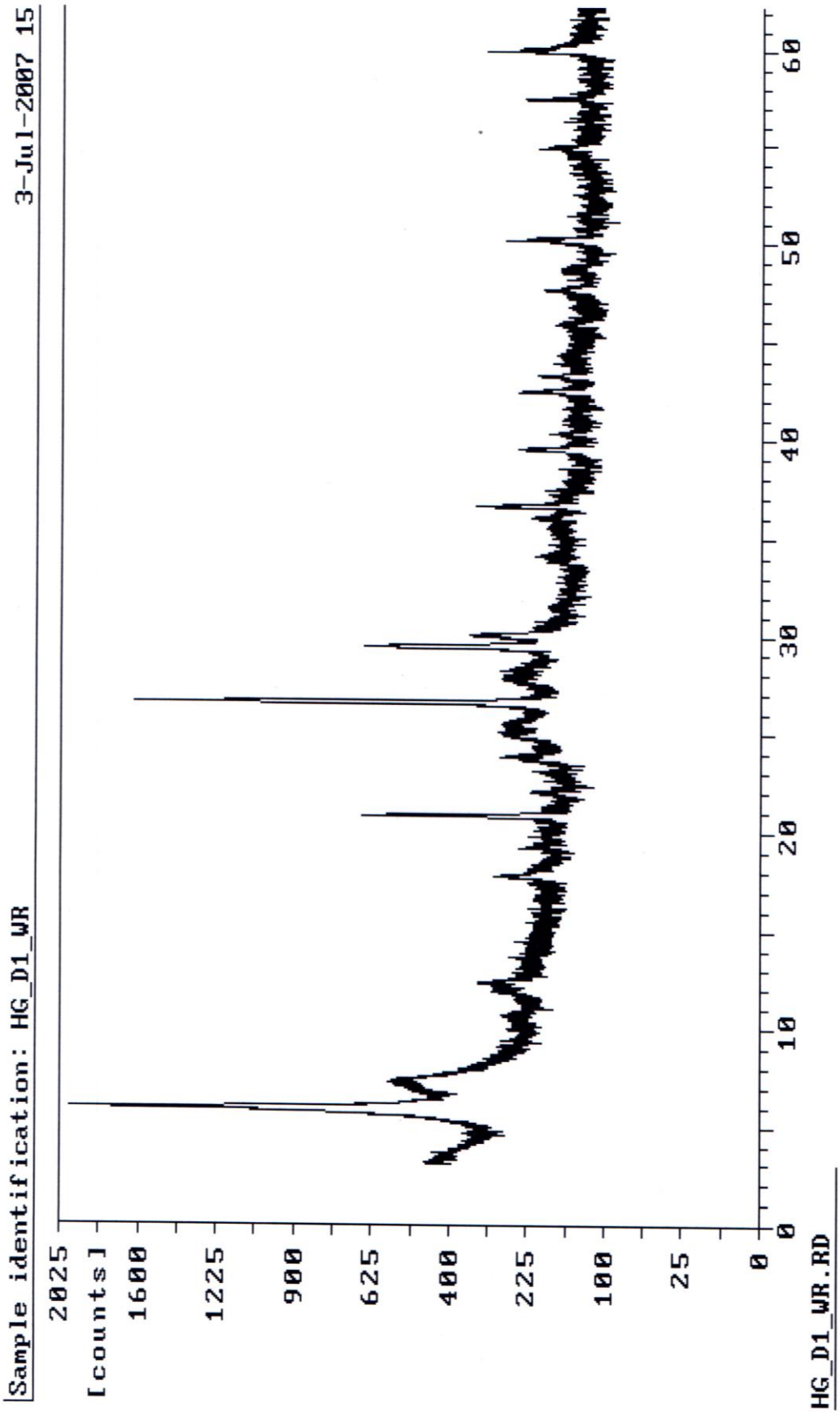
Sample identification: HG_D1_WR
Data measured at: 3-Jul-2007 14:52:00

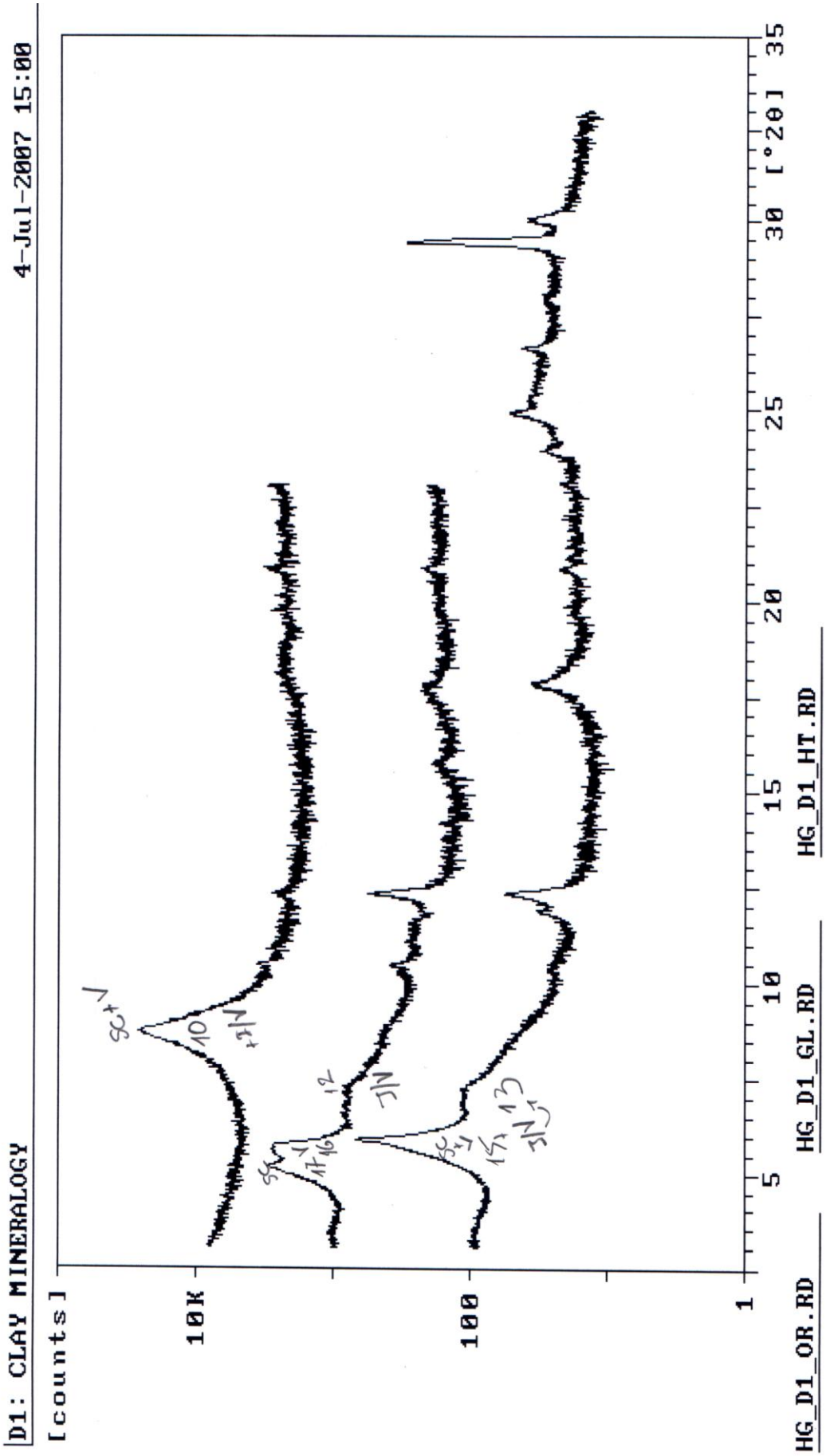
Diffractometer type: PW1710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 35
Generator current [mA]: 25
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: AUTOMATIC
Irradiated length [mm]: 12
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: NO

Start angle [°2θ]: 3.000
End angle [°2θ]: 63.000
Step size [°2θ]: 0.010
Maximum intensity: 8208.360
Time per step [s]: 0.500
Type of scan: CONTINUOUS
Intensities converted to: FIXED

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 40

Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
3.325	26.5504	26.6164	0.640	1421	2218	17.3	6.80
5.940	14.8665	14.9035	0.080	8208	1246	100.0	7.95
7.305	12.0914	12.1214	0.200	1129	1011	13.8	1.20
10.585	8.3508	8.3716	0.560	30	615	0.4	1.06
11.915	7.4215	7.4399	0.120	144	529	1.8	0.79
12.345	7.1639	7.1817	0.160	210	511	2.6	1.51
17.800	4.9789	4.9912	0.140	146	289	1.8	1.76
19.280	4.5999	4.6113	0.120	56	253	0.7	1.02
20.845	4.2579	4.2685	0.050	686	228	8.4	2.16
22.010	4.0351	4.0451	0.120	52	210	0.6	2.39
22.895	3.8811	3.8907	0.120	28	199	0.3	1.12
23.105	3.8463	3.8559	0.120	37	196	0.5	0.91
23.890	3.7217	3.7309	0.120	119	190	1.4	0.77
24.940	3.5673	3.5762	0.200	121	182	1.5	1.82
25.515	3.4882	3.4969	0.400	114	182	1.4	1.50
26.635	3.3440	3.3523	0.070	1600	174	19.5	8.45
26.695	3.3366	3.3449	0.040	1030	174	12.6	0.90
27.985	3.1857	3.1936	0.120	83	169	1.0	0.82
29.455	3.0299	3.0375	0.060	458	159	5.6	1.59
30.035	2.9727	2.9801	0.160	156	156	1.9	3.54
33.830	2.6474	2.6540	0.200	23	121	0.3	1.01
36.025	2.4910	2.4972	0.160	56	110	0.7	1.13
36.560	2.4558	2.4619	0.060	151	106	1.8	0.97
39.480	2.2806	2.2863	0.140	81	94	1.0	2.90
40.295	2.2363	2.2419	0.080	41	92	0.5	0.84
42.445	2.1279	2.1332	0.080	74	86	0.9	0.91
43.255	2.0899	2.0951	0.200	42	83	0.5	1.89
45.805	1.9793	1.9842	0.160	29	77	0.4	0.92
47.605	1.9086	1.9133	0.200	35	74	0.4	1.77
48.630	1.8707	1.8754	0.400	21	71	0.3	2.63
50.160	1.8172	1.8217	0.040	76	69	0.9	0.89
50.300	1.8125	1.8170	0.060	40	67	0.5	0.94
51.455	1.7745	1.7789	0.080	23	66	0.3	0.88
52.520	1.7410	1.7453	0.240	6	66	0.1	0.84
54.870	1.6718	1.6760	0.060	40	64	0.5	0.88
56.250	1.6340	1.6381	0.060	24	62	0.3	1.89
57.410	1.6037	1.6077	0.040	61	61	0.7	1.04
57.555	1.6001	1.6040	0.040	35	61	0.4	0.78
59.985	1.5409	1.5447	0.060	98	61	1.2	2.37
60.150	1.5371	1.5409	0.060	56	61	0.7	2.23





==========

A.U.Th.-School of Geology Dept. of Mineralogy-Petrology-Ec.Geology

Sample identification: HG_D1
Data measured at: 2-Jul-2007 15:01:00

Diffractometer type: PW1710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 35
Generator current [mA]: 25
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: AUTOMATIC
Irradiated length [mm]: 12
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: NO

Start angle [°2θ]: 3.000
End angle [°2θ]: 33.000
Step size [°2θ]: 0.010
Maximum intensity: 30625.00
Time per step [s]: 0.500
Type of scan: CONTINUOUS
Intensities converted to: FIXED

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 20

Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
3.450	25.5887	25.6523	0.800	3249	4343	10.6	2.40
5.895	14.9799	15.0171	0.090	30625	2540	100.0	21.72
6.785	13.0168	13.0492	0.160	2683	2209	8.8	0.77
7.130	12.3877	12.4185	0.240	2372	2107	7.7	2.04
10.335	8.5522	8.5735	0.240	52	655	0.2	0.79
11.860	7.4558	7.4743	0.080	299	449	1.0	0.83
12.320	7.1784	7.1962	0.120	900	404	2.9	5.72
13.820	6.4025	6.4184	0.060	23	292	0.1	0.86
17.805	4.9775	4.9898	0.200	324	234	1.1	3.93
20.825	4.2620	4.2726	0.140	77	222	0.3	1.88
21.135	4.2001	4.2106	0.120	46	219	0.2	0.82
23.055	3.8545	3.8641	0.120	66	199	0.2	0.77
23.915	3.7178	3.7271	0.100	174	196	0.6	1.33
24.855	3.5793	3.5882	0.100	416	188	1.4	2.04
25.240	3.5256	3.5343	0.160	256	185	0.8	0.93
26.615	3.3465	3.3548	0.050	299	180	1.0	0.93
27.915	3.1935	3.2014	0.160	139	172	0.5	0.77
29.400	3.0355	3.0430	0.050	2884	164	9.4	8.20
29.480	3.0274	3.0350	0.050	1697	164	5.5	3.07
30.000	2.9761	2.9835	0.080	204	161	0.7	1.08

3-Jul-2007 16:59

A.U.Th.-School of Geology Dept. of Mineralogy-Petrology-Ec.Geology

Sample identification: HG_D1_GL
Data measured at: 3-Jul-2007 16:42:00

Diffractometer type: PW1710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 35
Generator current [mA]: 25
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: AUTOMATIC
Irradiated length [mm]: 12
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: NO

Start angle [°2θ]: 3.000
End angle [°2θ]: 23.000
Step size [°2θ]: 0.010
Maximum intensity: 15351.21
Time per step [s]: 0.500
Type of scan: CONTINUOUS
Intensities converted to: FIXED

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 12

Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
3.400	25.9649	26.0294	0.240	7534	1163	49.1	1.46
5.175	17.0623	17.1048	0.060	15351	762	100.0	1.53
5.500	16.0548	16.0947	0.100	13317	718	86.7	0.93
5.735	15.3975	15.4357	0.080	13087	686	85.3	4.03
7.135	12.3791	12.4098	0.320	2652	552	17.3	2.25
8.735	10.1148	10.1400	0.480	924	454	6.0	1.45
10.455	8.4543	8.4754	0.100	655	376	4.3	2.01
11.485	7.6983	7.7175	0.160	317	346	2.1	1.50
12.295	7.1929	7.2108	0.030	930	320	6.1	0.99
15.725	5.6309	5.6449	0.200	64	243	0.4	0.98
17.640	5.0236	5.0361	0.200	121	237	0.8	1.25
20.820	4.2630	4.2736	0.100	83	228	0.5	0.99

: HG_D1_HT.DI 4-Jul-2007 10:03

A.U.Th.-School of Geology Dept. of Mineralogy-Petrology-Ec.Geology

Sample identification: HG_D1_HT
Data measured at: 4-Jul-2007 9:46:00

Diffractometer type: PW1710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 35
Generator current [mA]: 25
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: AUTOMATIC
Irradiated length [mm]: 12
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: NO

Start angle [°2θ]: 3.000
End angle [°2θ]: 23.000
Step size [°2θ]: 0.010
Maximum intensity: 4556.250
Time per step [s]: 0.500
Type of scan: CONTINUOUS
Intensities converted to: FIXED

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 6

Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
4.375	20.1804	20.2305	0.060	237	2510	5.2	1.24
8.710	10.1438	10.1690	0.100	4556	1063	100.0	2.24
10.460	8.4503	8.4713	0.080	100	548	2.2	1.17
12.265	7.2105	7.2284	0.160	74	317	1.6	0.97
18.605	4.7652	4.7770	0.400	37	210	0.8	0.80
20.755	4.2762	4.2868	0.080	69	204	1.5	0.79

Exp. Pattern		Phase 1 130135 Montmorillonite-15A, Calcium Magnesi		Phase 2 791906 Quartz, Silicon Oxide		Phase 3 290863 Sepiolite, ferrian, Magnesium Iron S		Phase 4 896538 Kaolinite, Aluminum Silicate Hydroxi	
d(A)	Int	d(A)	Int	d(A)	Int	d(A)	Int	d(A)	Int
14.8665	100	15.0000	100						
12.0914	13.8					11.9000	100		
8.3508	0.4								
7.4215	1.8					7.3800	4		
7.1639	2.6							7.1585	100
4.9789	1.8	5.0100	60			4.9600	2		
4.5999	0.7	4.5000	80			4.4600	10		
4.2579	8.4			4.2551	14	4.2700	4	4.1748	48
4.0351	0.6					3.9800	2		
3.8811	0.3								
3.8463	0.5							3.8425	32
3.7217	1.4	3.7700	20			3.7200	15	3.7414	15
3.5673	1.5							3.5793	56
3.4882	1.4	3.5000	10					3.4251	1
3.344	19.5			3.3434	100			3.3807	18
3.3366	12.6		10			3.3400	60		
3.1857	1					3.1700	4	3.1488	3
3.0299	5.6	3.0200	60					3.0983	4
2.9727	1.9					3.0000	10		
2.6474	0.3	2.5800	40			2.6700	15	2.5627	11
2.491	0.7	2.5000	40			2.5500	4	2.4937	15
2.4558	1.8			2.4567	12				
2.2806	1	2.2600	10	2.2813	6			2.2948	22
2.2363	0.5					2.2410	6	2.2491	2
2.1279	0.9	2.1500	10	2.1276	3	2.1190	2	2.1314	1
2.0899	0.5					2.0670	2	2.0614	1
1.9793	0.4			1.9797	6			1.9880	9
1.9086	0.4					1.9180	4	1.9212	2
1.8707	0.3	1.8800	10			1.8710	4	1.8707	2
1.8172	0.9			1.8179	11				
1.8125	0.5					1.8120	4	1.8063	1
1.7745	0.3							1.7896	2
1.741	0.1					1.7510	2	1.7126	2
1.6718	0.5	1.7000	30	1.6717	1			1.6667	8
1.634	0.3							1.6331	1
1.6037	0.7			1.6083	1			1.6045	1
1.6001	0.4					1.5810	6		
1.5409	1.2			1.5415	5	1.5420	2	1.5408	4
1.5371	0.7	1.5000	50						
Intensity Scale Factor:			22.8 %		18.9 %		14.9 %		11.1 %

ΕΝΟΤΗΤΑ C

A.U.Th.-School of Geology Dept. of Mineralogy-Petrology-Ec.Geology

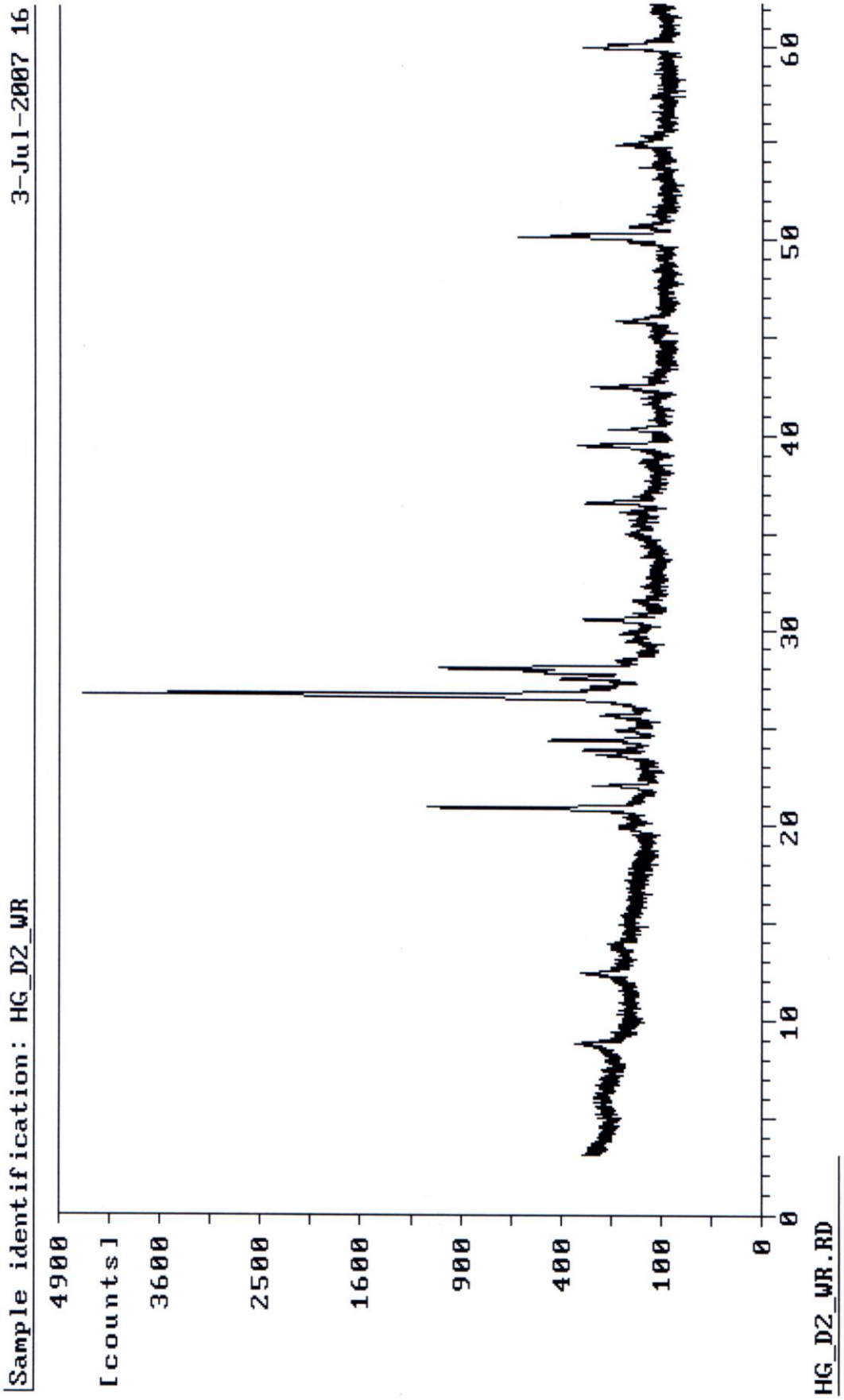
Sample identification: HG_D2_WR
Data measured at: 3-Jul-2007 15:51:00

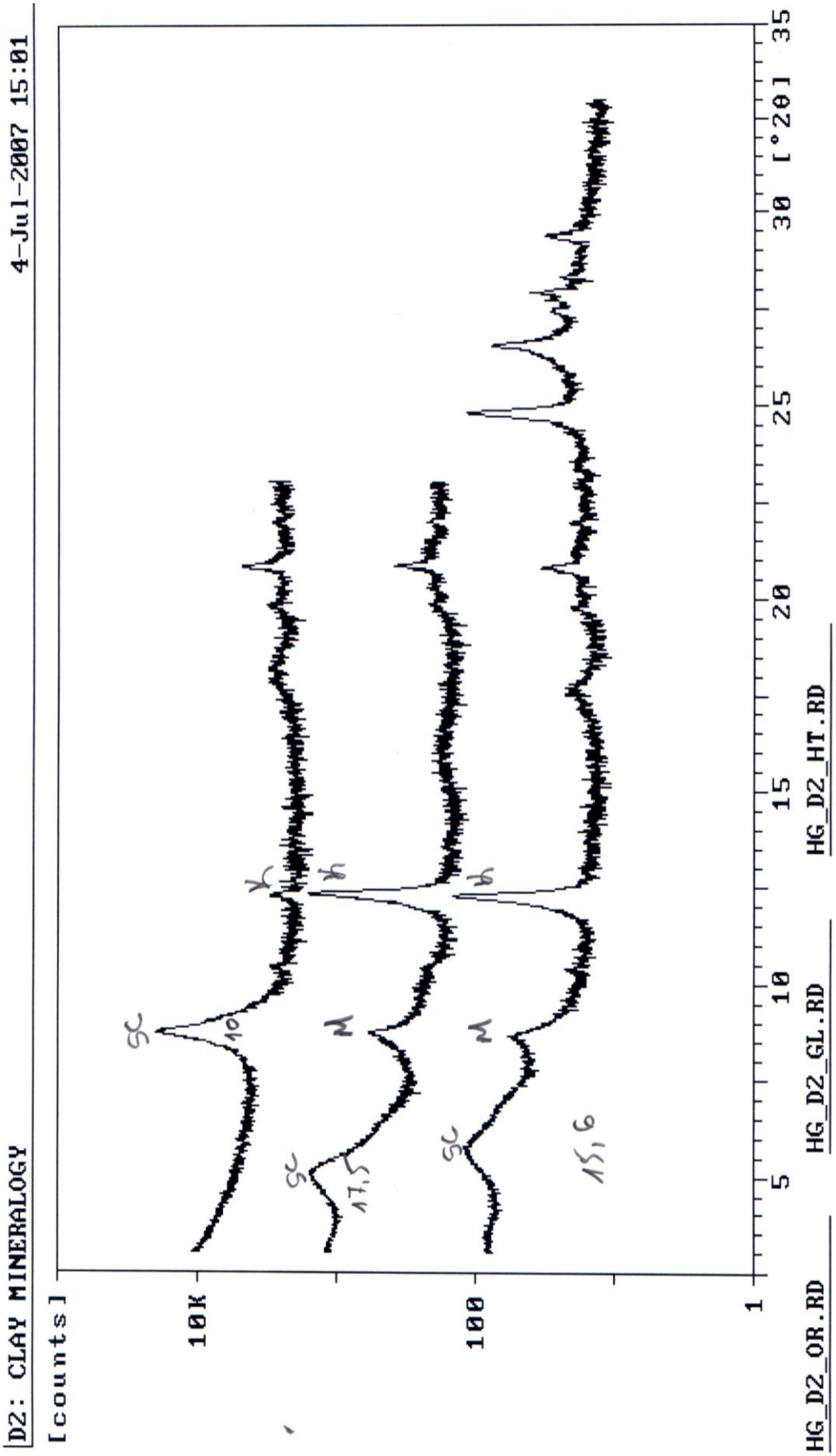
Diffractometer type: PW1710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 35
Generator current [mA]: 25
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: AUTOMATIC
Irradiated length [mm]: 12
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: NO

Start angle [°2θ]: 3.000
End angle [°2θ]: 63.000
Step size [°2θ]: 0.010
Maximum intensity: 4886.010
Time per step [s]: 0.500
Type of scan: CONTINUOUS
Intensities converted to: FIXED

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 50

Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
3.180	27.7607	27.8297	0.480	999	1552	20.4	2.34
5.925	14.9041	14.9412	0.960	361	835	7.4	2.45
8.775	10.0688	10.0939	0.160	480	566	9.8	1.86
12.360	7.1553	7.1730	0.120	324	388	6.6	2.52
13.890	6.3703	6.3862	0.120	114	342	2.3	2.00
14.890	5.9447	5.9595	0.080	72	310	1.5	0.78
19.845	4.4702	4.4813	0.160	88	188	1.8	1.02
20.870	4.2529	4.2634	0.110	1347	177	27.6	15.69
22.015	4.0342	4.0442	0.040	132	166	2.7	0.87
22.940	3.8736	3.8832	0.140	22	156	0.5	1.51
23.620	3.7636	3.7729	0.100	142	149	2.9	1.45
23.880	3.7232	3.7324	0.050	202	146	4.1	2.01
24.375	3.6487	3.6578	0.050	396	144	8.1	2.02
24.890	3.5743	3.5832	0.120	100	139	2.0	1.90
25.675	3.4668	3.4754	0.120	137	135	2.8	2.78
26.650	3.3422	3.3505	0.070	4886	128	100.0	16.85
26.720	3.3336	3.3418	0.050	2725	128	55.8	1.29
27.090	3.2889	3.2970	0.080	169	123	3.5	0.89
28.000	3.1840	3.1919	0.060	955	119	19.5	4.82
29.425	3.0330	3.0405	0.160	53	110	1.1	1.30
29.775	2.9981	3.0056	0.160	62	108	1.3	0.80
30.490	2.9294	2.9367	0.040	196	104	4.0	0.86
30.795	2.9011	2.9083	0.120	32	102	0.7	0.98
31.470	2.8404	2.8474	0.080	38	100	0.8	0.81
33.850	2.6459	2.6525	0.120	15	90	0.3	0.91
35.020	2.5602	2.5665	0.200	59	85	1.2	1.56
35.440	2.5308	2.5371	0.120	41	85	0.8	0.78
36.050	2.4893	2.4955	0.100	71	81	1.4	1.32
36.550	2.4564	2.4625	0.100	154	81	3.1	2.47
38.600	2.3305	2.3363	0.480	23	74	0.5	2.57
39.470	2.2812	2.2868	0.060	180	72	3.7	2.06
40.295	2.2363	2.2419	0.050	85	71	1.7	1.00
41.690	2.1647	2.1701	0.320	17	67	0.3	0.84
42.470	2.1267	2.1320	0.040	135	64	2.8	0.77
44.980	2.0137	2.0187	0.240	18	58	0.4	1.14
45.785	1.9801	1.9851	0.050	81	58	1.7	0.80
47.255	1.9219	1.9267	0.640	5	55	0.1	0.98
48.360	1.8805	1.8852	0.100	14	53	0.3	0.97
49.880	1.8267	1.8313	0.060	48	52	1.0	1.28
50.145	1.8177	1.8222	0.060	279	52	5.7	4.15
50.275	1.8133	1.8178	0.040	156	52	3.2	0.83
50.670	1.8001	1.8046	0.060	44	50	0.9	1.46





==========

A.U.Th.-School of Geology Dept. of Mineralogy-Petrology-Ec.Geology

Sample identification: HG_D2
Data measured at: 2-Jul-2007 15:30:00

Diffractometer type: PW1710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 35
Generator current [mA]: 25
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: AUTOMATIC
Irradiated length [mm]: 12
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: NO

Start angle [°2θ]: 3.000
End angle [°2θ]: 33.000
Step size [°2θ]: 0.010
Maximum intensity: 5776.000
Time per step [s]: 0.500
Type of scan: CONTINUOUS
Intensities converted to: FIXED

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 17

Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
3.345	26.3917	26.4573	0.480	5776	1260	100.0	1.32
5.665	15.5876	15.6263	0.200	5084	745	88.0	1.09
8.645	10.2199	10.2453	0.120	1296	488	22.4	1.74
10.385	8.5112	8.5323	0.060	177	408	3.1	0.79
12.250	7.2193	7.2372	0.080	3058	346	52.9	7.79
17.605	5.0336	5.0461	0.200	108	225	1.9	1.14
19.715	4.4993	4.5105	0.100	90	202	1.6	0.95
20.770	4.2731	4.2837	0.100	253	190	4.4	2.08
21.935	4.0487	4.0588	0.120	72	182	1.3	2.06
22.930	3.8752	3.8849	0.200	35	177	0.6	0.78
23.490	3.7841	3.7935	0.240	55	172	0.9	1.13
24.790	3.5885	3.5975	0.050	1163	164	20.1	1.84
26.530	3.3570	3.3653	0.080	692	154	12.0	3.71
27.435	3.2483	3.2564	0.140	156	149	2.7	2.08
27.905	3.1946	3.2026	0.030	286	149	4.9	2.06
28.315	3.1493	3.1571	0.080	96	146	1.7	1.86
29.365	3.0390	3.0466	0.120	159	142	2.7	2.76

3-Jul-2007 17:16

A.U.Th.-School of Geology Dept. of Mineralogy-Petrology-Ec.Geology

Sample identification: HG_D2_GL
Data measured at: 3-Jul-2007 16:59:00

Diffractometer type: PW1710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 35
Generator current [mA]: 25
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: AUTOMATIC
Irradiated length [mm]: 12
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: NO

Start angle [°2θ]: 3.000
End angle [°2θ]: 23.000
Step size [°2θ]: 0.010
Maximum intensity: 6241.000
Time per step [s]: 0.500
Type of scan: CONTINUOUS
Intensities converted to: FIXED

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 11

Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
3.150	28.0250	28.0947	0.320	6241	4238	100.0	1.53
5.060	17.4499	17.4932	0.400	6131	2632	98.2	13.16
8.710	10.1438	10.1690	0.140	992	835	15.9	3.45
10.370	8.5235	8.5446	0.160	94	538	1.5	0.83
12.295	7.1929	7.2108	0.070	3215	372	51.5	7.54
13.575	6.5174	6.5337	0.120	28	313	0.5	0.84
16.025	5.5261	5.5399	0.960	55	266	0.9	1.42
19.840	4.4713	4.4824	0.280	85	213	1.4	1.25
20.275	4.3763	4.3872	0.200	72	210	1.2	0.79
20.785	4.2701	4.2807	0.040	306	204	4.9	0.98
21.965	4.0433	4.0533	0.120	90	193	1.4	1.58

: HG_D2_HT.DI 4-Jul-2007 10:21

A.U.Th.-School of Geology Dept. of Mineralogy-Petrology-Ec.Geology

Sample identification: HG_D2_HT
Data measured at: 4-Jul-2007 10:04:00

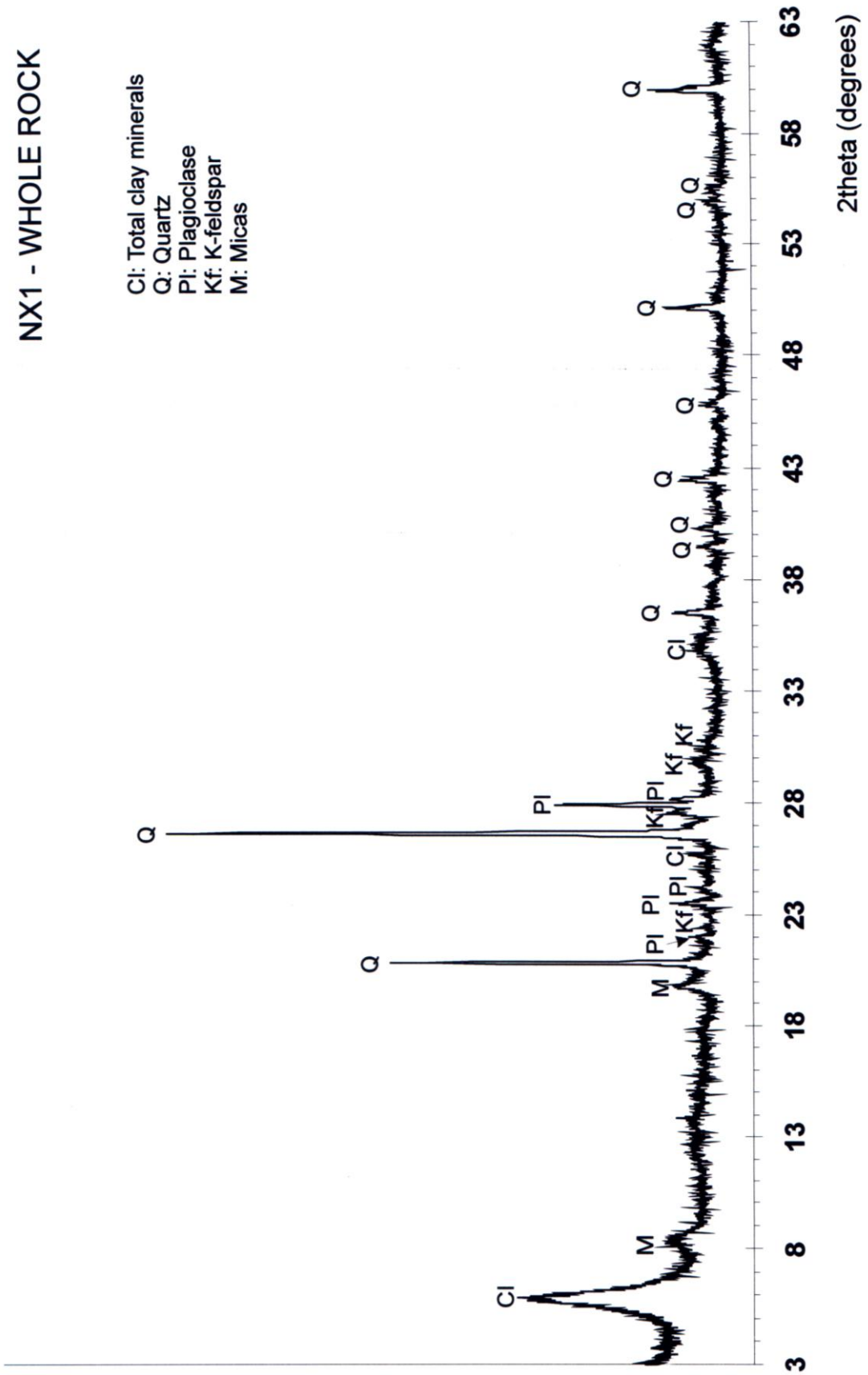
Diffractometer type: PW1710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 35
Generator current [mA]: 25
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: AUTOMATIC
Irradiated length [mm]: 12
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: NO

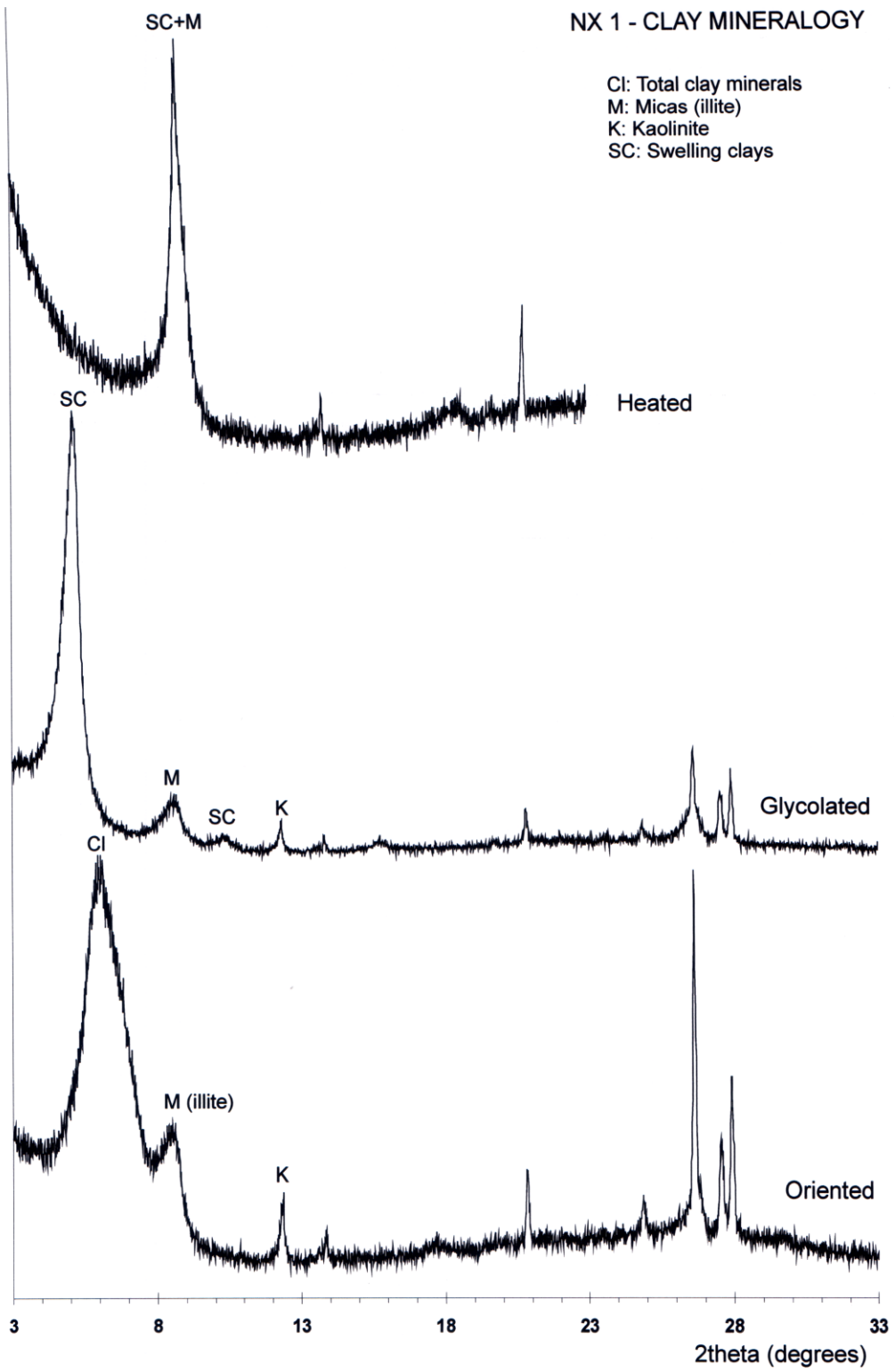
Start angle [°2θ]: 3.000
End angle [°2θ]: 23.000
Step size [°2θ]: 0.010
Maximum intensity: 3516.490
Time per step [s]: 0.500
Type of scan: CONTINUOUS
Intensities converted to: FIXED

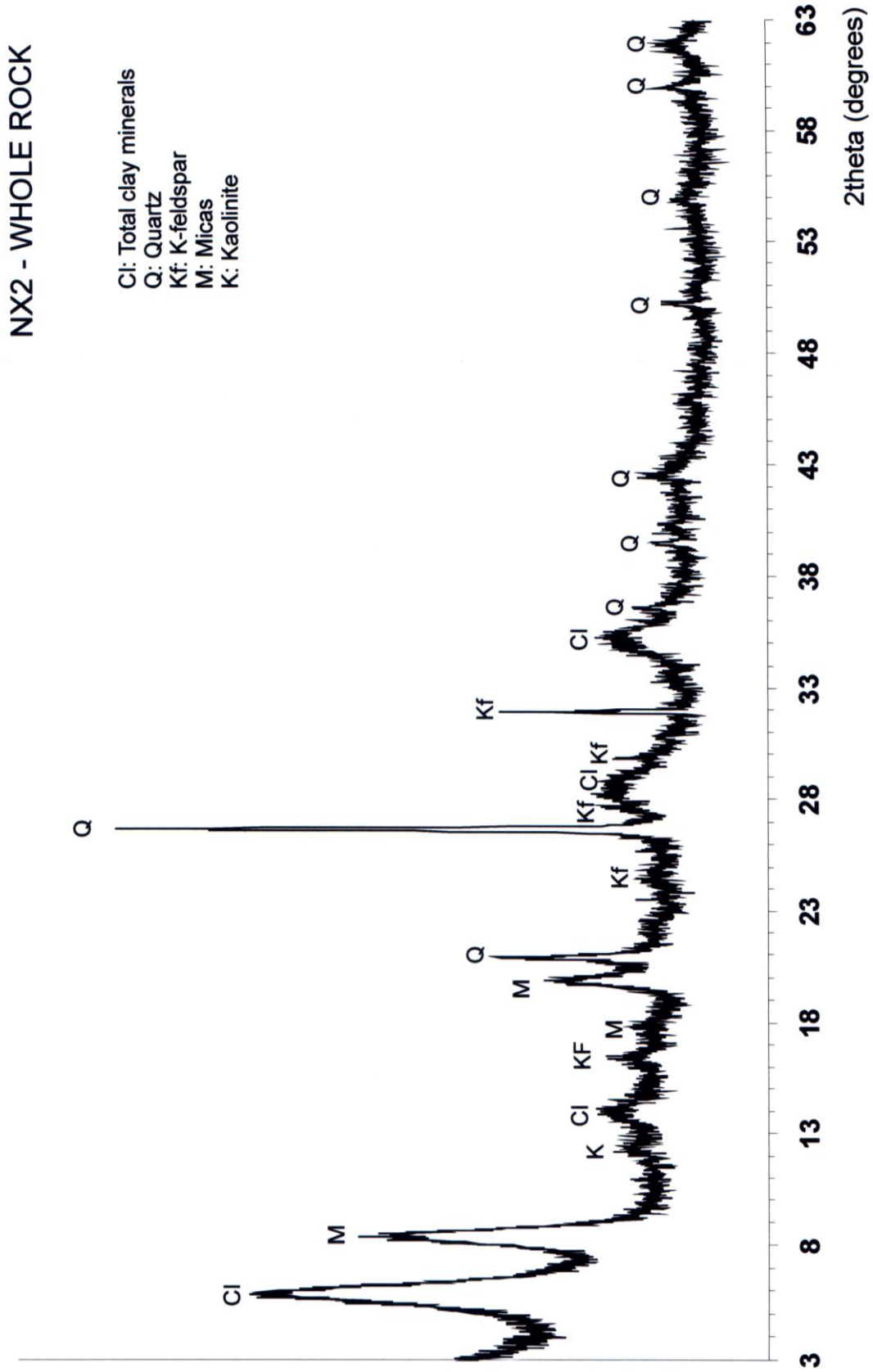
Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 8

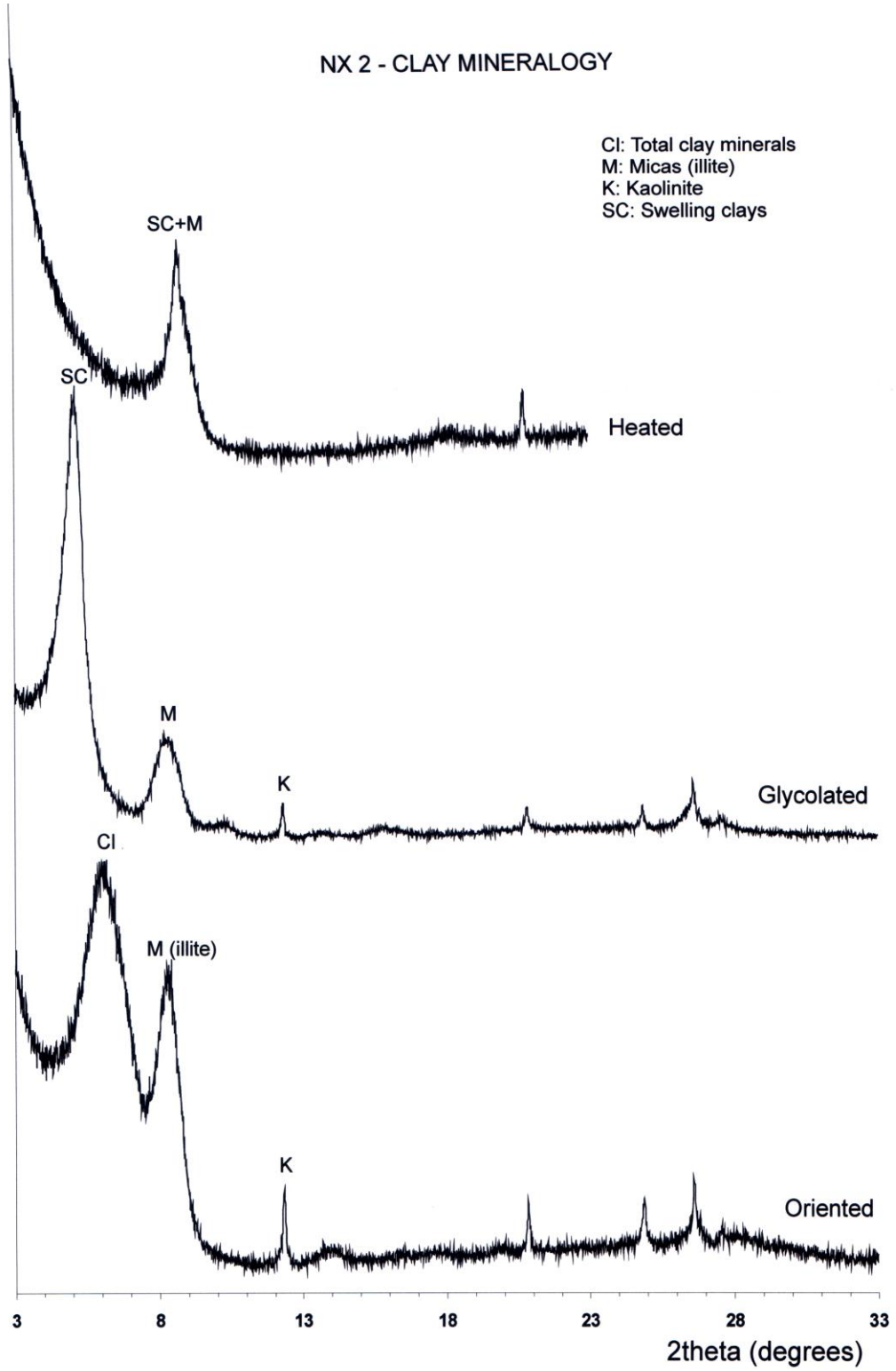
Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
3.060	28.8490	28.9208	0.200	2530	3844	71.9	1.12
8.720	10.1322	10.1574	0.160	3516	756	100.0	11.82
10.400	8.4989	8.5201	0.160	61	454	1.7	0.91
12.250	7.2193	7.2372	0.120	130	317	3.7	1.85
18.020	4.9186	4.9308	0.640	67	225	1.9	1.63
19.730	4.4960	4.5071	0.320	77	204	2.2	1.83
20.750	4.2772	4.2878	0.100	256	193	7.3	3.00
21.915	4.0524	4.0625	0.160	52	185	1.5	0.95

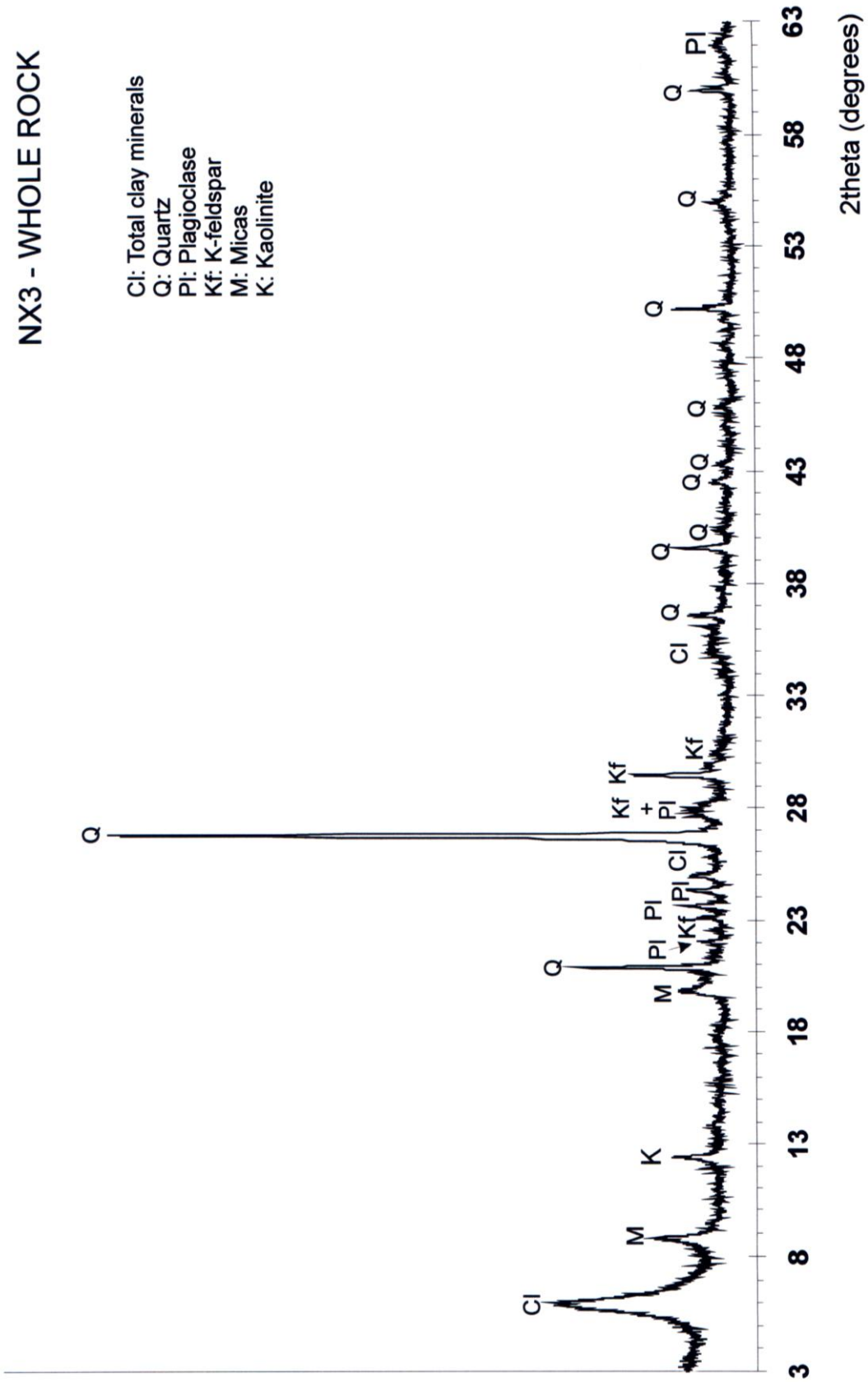
Exp. Pattern		Phase 1 791906 Quartz, Silicon Oxide		Phase 2 760823 Orthoclase, Potassium Sodium Aluminu		Phase 3 760927 Albite calcian low, Sodium Calcium A		Phase 4 897537 Phengite 2M1, Fe-rich, heated, Potas	
d(A)	Int	d(A)	Int	d(A)	Int	d(A)	Int	d(A)	Int
14.9041	7.4								
10.0688	9.8							10.0722	100
7.1553	6.6								
6.3703	2.3					6.3783	10		
5.9447	1.5								
4.4702	1.8							4.4976	61
4.2529	27.6		14					4.3352	10
4.0342	2.7					4.0368	65	4.0004	5
3.7636	2.9			3.7814	77	3.7569	26	3.7681	28
3.7232	4.1					3.7199	31		
3.6487	8.1					3.6434	26		
3.5743	2							3.6109	1
3.4668	2.8			3.4676	49			3.5193	46
3.3422	100	3.3434	100					3.3574	38
3.3336	55.8			3.3193	100				
3.2889	3.5			3.2886	58				
3.2425	6.3			3.2338	79			3.2303	37
3.2042	9.4					3.2038	70		
3.184	19.5					3.1891	100	3.1461	3
3.033	1.1							3.0170	41
2.9981	1.3			2.9959	55	3.0066	16		
2.9294	4			2.9350	8	2.9325	17	2.8880	25
2.5602	1.2			2.5526	9			2.5845	61
2.4893	1.4			2.4874	3	2.4956	1	2.4854	4
2.4564	3.1	2.4567	12			2.4407	1	2.4650	2
2.2812	3.7	2.2813	6	2.2681	2	2.2834	4	2.2802	1
2.2363	1.7			2.2334	1	2.2465	1	2.2268	5
2.1267	2.8	2.1276	3	2.1287	9	2.1261	4	2.1497	17
1.9801	1.7	1.9797	6	1.9737	10	1.9786	2	1.9818	5
1.8267	1			1.8297	3	1.8257	7		
1.8177	5.7	1.8179	11			1.8217	7		
1.8133	3.2			1.8105	3			1.7853	1
1.6715	1.2	1.6717	1	1.6712	2	1.6854	2	1.6723	7
1.5416	2.4	1.5415	5			1.5428	1	1.5418	1
1.5377	1.3			1.5352	6	1.5391	2	1.5379	6
Intensity Scale Factor:			91.1 %		18.6 %		18.3 %		34.9 %

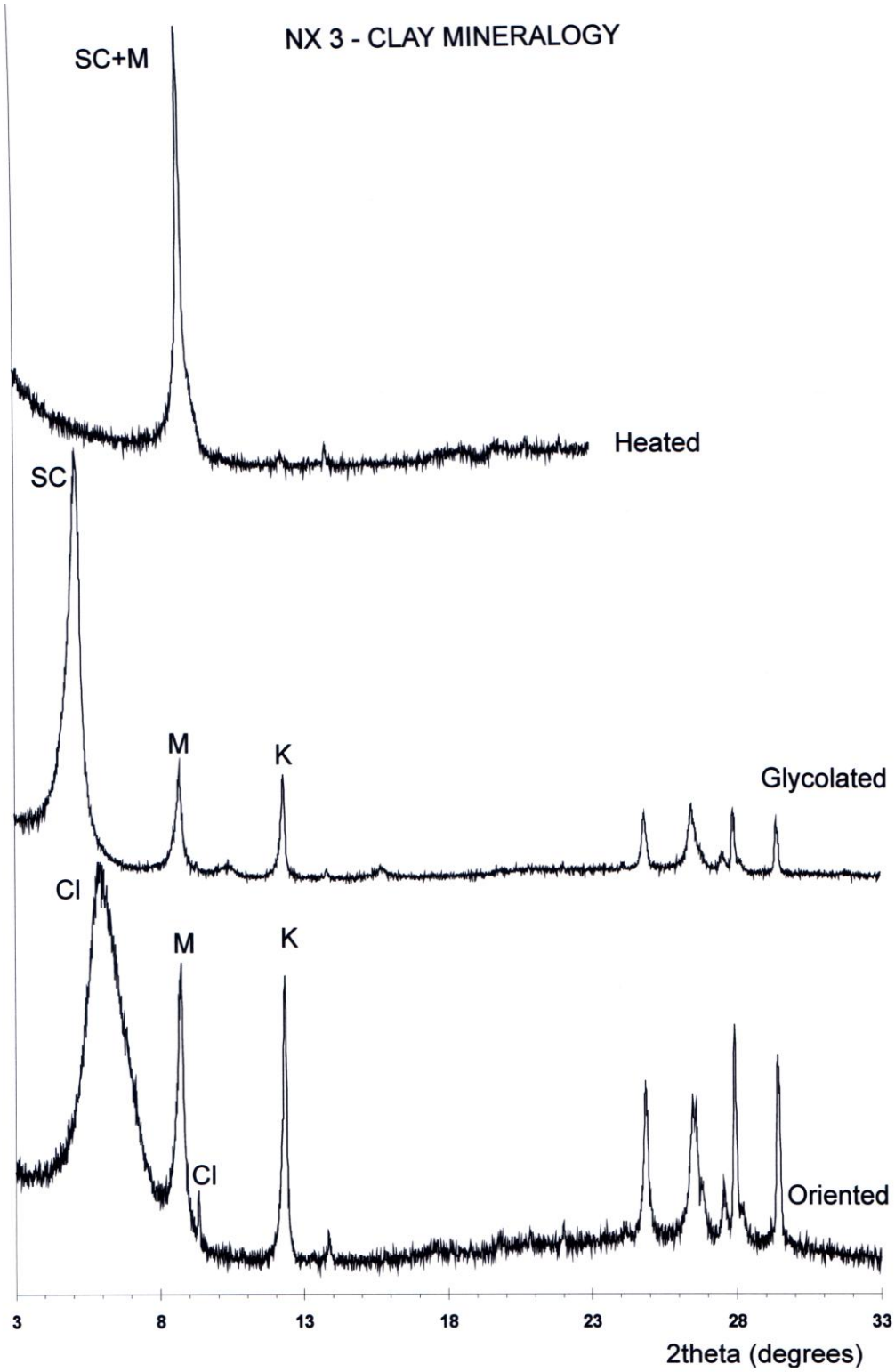












ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Δοκιμές Ταξινόμησης

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ
Εδαφικού Δοκιμίου - *ASTM D2216*

ΕΡΓΟ: Παράμετροι Unit B

ΓΕΩΤΡΗΣΗ: Επιφανειακό **ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:** 3/3/2008

ΔΕΙΓΜΑ: 1,2,3 **ΒΑΘΟΣ:** 0.5

	1	2	3		
Βάρος υγρού δείγματος και κάψας (gr)	47,33				
Βάρος ξηρού δείγματος και κάψας (gr)	46,698				
Βάρος κάψας (gr)	29,545				
Βάρος νερού (gr)	0,632	0	0		
Βάρος ξηρού δείγματος (gr)	17,153	0	0		
Περιεχόμενη υγρασία (%)	3,7	#ΔΙΑΙΡ/0!	#ΔΙΑΙΡ/0!	**Μ.Ο.**	**#ΔΙΑΙΡ/0!**

Περιγραφή δείγματος: Αργιλώδης Άμμος

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ
Εδαφικού Δοκιμίου - *ASTM D2216*

ΕΡΓΟ: Παράμετροι Unit C για γs

ΓΕΩΤΡΗΣΗ: Επιφανειακό **ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:** 8/11/2007

ΔΕΙΓΜΑ: Θέση 1 **ΒΑΘΟΣ:** 0.5

	1	2	3		
Βάρος υγρού δείγματος και κάψας (gr)	48,601	1865			
Βάρος ξηρού δείγματος και κάψας (gr)	44,21	1620			
Βάρος κάψας (gr)	30,423	818			
Βάρος νερού (gr)	4,391	245	0		
Βάρος ξηρού δείγματος (gr)	13,787	802	0		
Περιεχόμενη υγρασία (%)	31,8	30,5	#ΔΙΑΙΡ/0!	**Μ.Ο.**	**#ΔΙΑΙΡ/0!**

Περιγραφή δείγματος: Αμμώδης άργιλος

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ
Εδαφικού Δοκιμίου - *ASTM D2216*

ΕΡΓΟ: Παράμετροι Unit C

ΓΕΩΤΡΗΣΗ: Επιφανειακό **ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:** 3/3/2008

ΔΕΙΓΜΑ: 1,2,3 **ΒΑΘΟΣ:** 0.5

	1	2	3		
Βάρος υγρού δείγματος και κάψας (gr)	65,882	57,668	56,353		
Βάρος ξηρού δείγματος και κάψας (gr)	58,612	52,455	51,12		
Βάρος κάψας (gr)	29,38	30,115	29,457		
Βάρος νερού (gr)	7,27	5,213	5,233		
Βάρος ξηρού δείγματος (gr)	29,232	22,34	21,663		
Περιεχόμενη υγρασία (%)	24,9	23,3	24,2	**Μ.Ο.**	**24,13**

Περιγραφή δείγματος: Αμμώδης άργιλος

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ
Εδαφικού Δοκιμίου - *ASTM D2216*

ΕΡΓΟ: Παράμετροι Unit B

ΓΕΩΤΡΗΣΗ: Επιφανειακό **ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:** 8/11/2007

ΔΕΙΓΜΑ: 1,2,3 **ΒΑΘΟΣ:** 0.5

	1	2	3		
Βάρος υγρού δείγματος και κάψας (gr)	41,258	45,713	42,339		
Βάρος ξηρού δείγματος και κάψας (gr)	40,42	44,851	41,822		
Βάρος κάψας (gr)	25,614	27,878	30,055		
Βάρος νερού (gr)	0,838	0,862	0,517		
Βάρος ξηρού δείγματος (gr)	14,806	16,973	11,767		
Περιεχόμενη υγρασία (%)	5,7	5,1	4,4	**Μ.Ο.**	**5,1**

Περιγραφή δείγματος: Αργιλώδης Άμμος

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ
Εδαφικού Δοκιμίου - *ASTM D2216*

ΕΡΓΟ: Παράμετροι Unit C

ΓΕΩΤΡΗΣΗ: Επιφανειακό **ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:** 8/11/2007

ΔΕΙΓΜΑ: 1,2,3 **ΒΑΘΟΣ:** 0.5

	1	2	3		
Βάρος υγρού δείγματος και κάψας (gr)	135,02	176,54	162,93		
Βάρος ξηρού δείγματος και κάψας (gr)	123,77	152,67	144,92		
Βάρος κάψας (gr)	88,32	95,78	90,6		
Βάρος νερού (gr)	11,25	23,87	18,01		
Βάρος ξηρού δείγματος (gr)	35,45	56,89	54,32		
Περιεχόμενη υγρασία (%)	31,7	42	33,2	**Μ.Ο.**	**35,6**

Περιγραφή δείγματος: Αμμώδης άργιλος

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ ATTERBERG

BNQ-2501-092: Soils – Determination de la limite de liquidité à l' aide du pénétromètre suédois et de la limite de plasticité

ASTM D 4318-83: Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils

ΕΡΓΟ: Παράμετροι Unit C

ΓΕΩΤΡΗΣΗ: Επιφανειακά **ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 21/11/2007**

ΔΕΙΓΜΑ: 1,2,3 **ΒΑΘΟΣ: 0.5m**

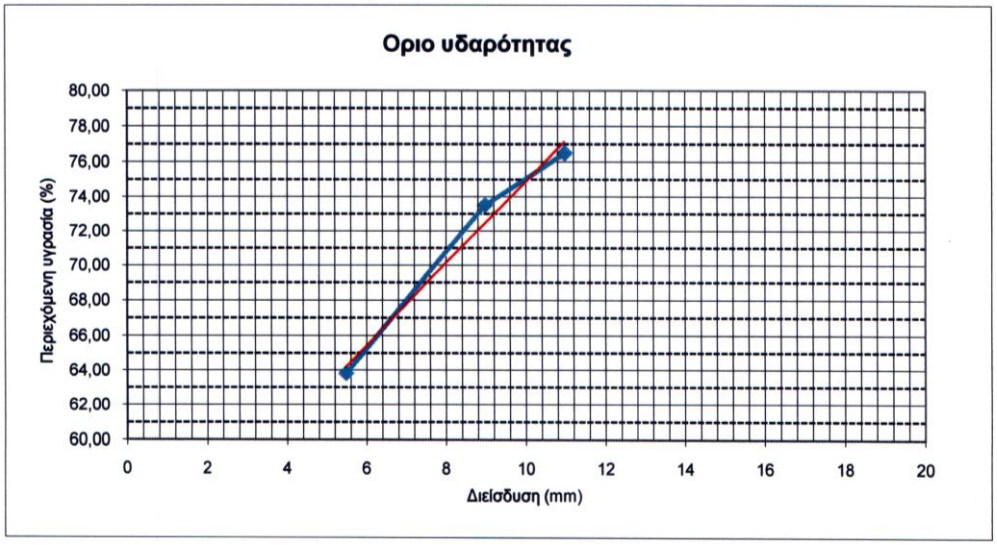
	ΔΟΚΙΜΗ		Προσδιορισμός Ορίου Υδαρότητας				Προσδιορισμός Ορίου Πλαστικότητας			
	Αριθμός δοκιμής		1	2	3	4	1	2	3	4
	Αριθμός υποδοχέα									
	Βάθος διείδυσης (mm)		5,5	9	11					
A	Βάρος υγρού δείγματος + υποδοχέα	gr	37,274	43,689	45,219		12,969	13,453	12,632	
B	Βάρος ξηρού δείγματος + υποδοχέα	gr	33,421	38,046	37,945		12,819	13,208	12,483	
Γ	Βάρος ύδατος	gr	3,853	5,643	7,274		0,150	0,245	0,149	
Δ	Βάρος υποδοχέα	gr	27,385	30,372	28,439		12,200	12,225	11,909	
E	Βάρος ξηρού δείγματος	gr	6,036	7,674	9,506		0,619	0,983	0,574	
Z	Περιεχόμενη υγρασία	%	63,83	73,53	76,52		24,23	24,92	25,96	

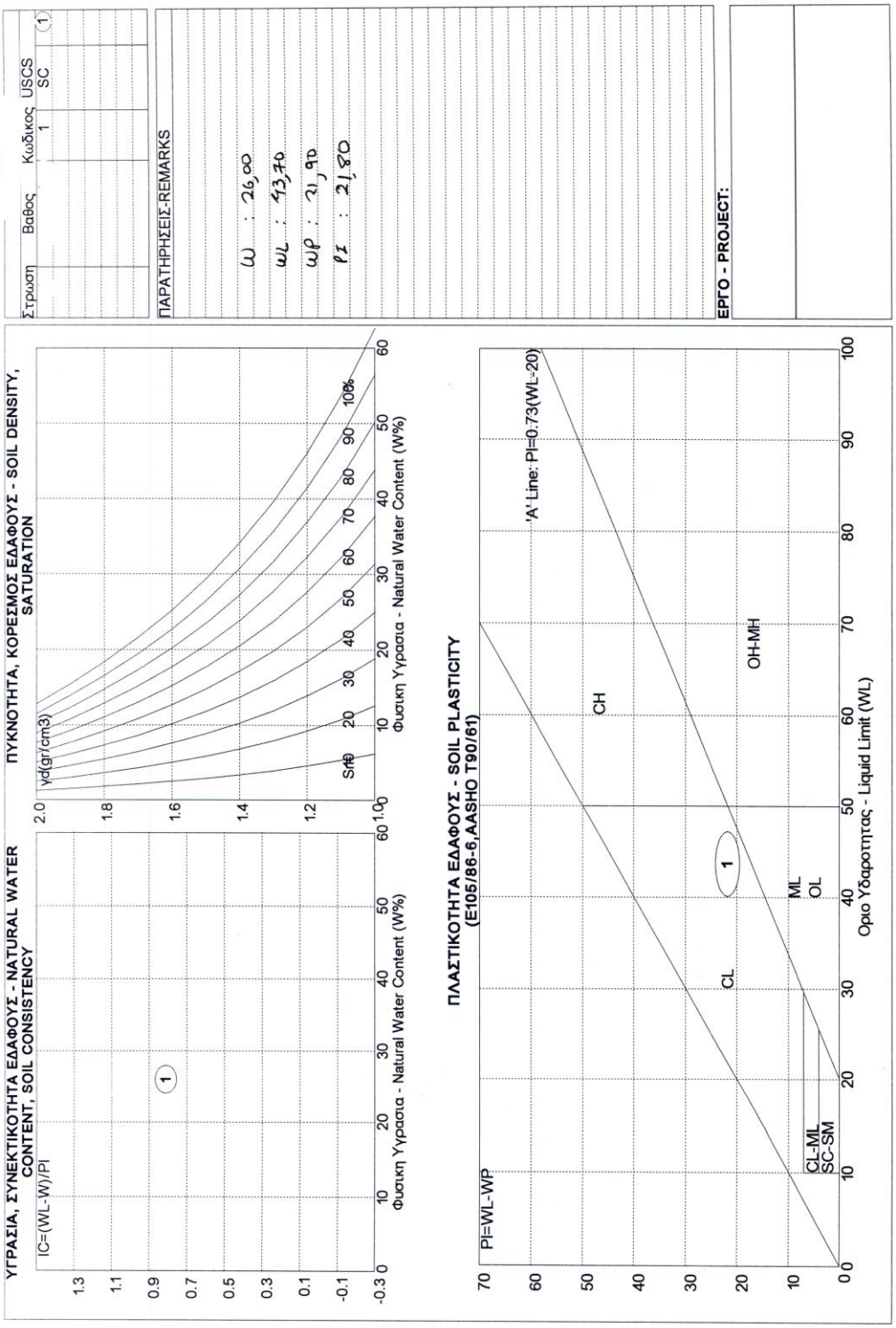
Οριο υδαρότητας **LL :** 75 %

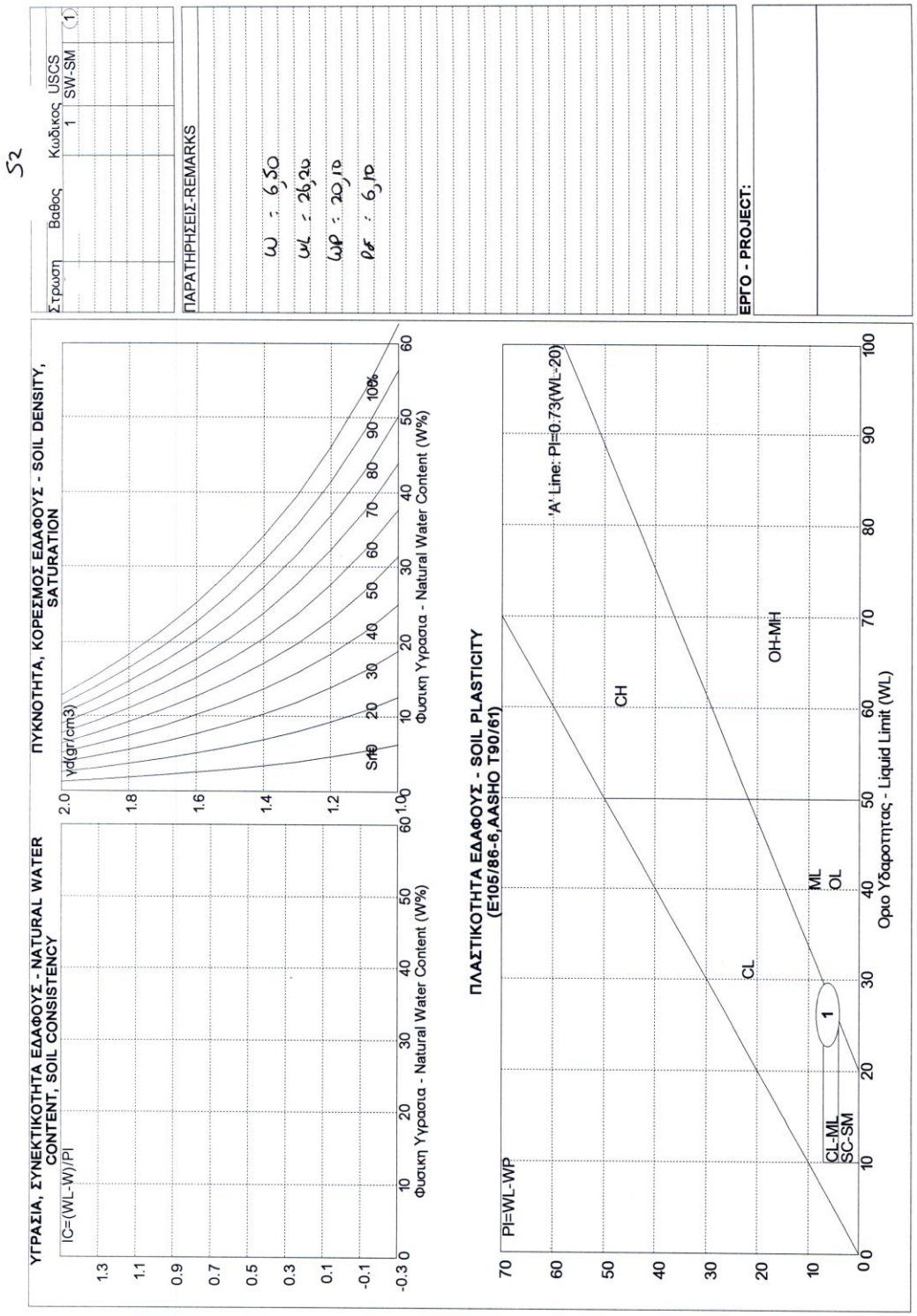
Οριο πλαστικότητας **PL :** 25 %

Δείκτης πλαστικότητας **IP :** 50 %

Παρατηρήσεις:







ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ ATTERBERG

BNQ-2501-092: Soils – Determination de la limite de liquidité à l' aide du pénétromètre suédois et de la limite de plasticité

ASTM D 4318-83: Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils

ΕΡΓΟ: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΗΜΟΤΙΚΟΥ ΣΧΟΛΕΙΟΥ ΣΤΟ 1ο Δ.Σ. ΣΤΟ ΔΗΜΟ Κ.ΝΕΥΡΟΚΟΠΙΟΥ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ: ΔΓ1 **ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 12/3/2009**

ΔΕΙΓΜΑ: Δ12 **ΒΑΘΟΣ: 8,00-8,45m**

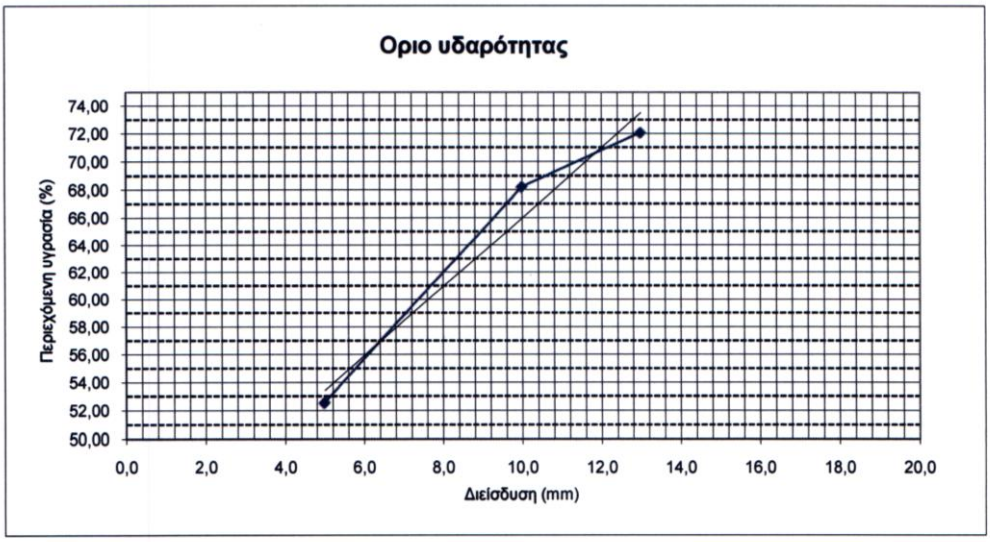
	ΔΟΚΙΜΗ		Προσδιορισμός Ορίου Υδαρότητας				Προσδιορισμός Ορίου Πλαστικότητας			
	Αριθμός δοκιμής		1	2	3	4	1	2	3	4
	Αριθμός υποδοχέα									
	Βάθος διείδυσης (mm)		5	10	13					
A	Βάρος υγρού δείγματος + υποδοχέα	gr	43,690	50,650	48,811		26,724	28,584		
B	Βάρος ξηρού δείγματος + υποδοχέα	gr	38,071	41,581	39,551		25,305	27,247		
Γ	Βάρος ύδατος	gr	5,619	9,069	9,260		1,419	1,337		
Δ	Βάρος υποδοχέα	gr	27,381	28,292	26,708		19,467	21,727		
E	Βάρος ξηρού δείγματος	gr	10,690	13,289	12,843		5,838	5,520		
Z	Περιεχόμενη υγρασία	%	52,56	68,24	72,10		24,31	24,22		

Οριο υδαρότητας **LL :** 66 %

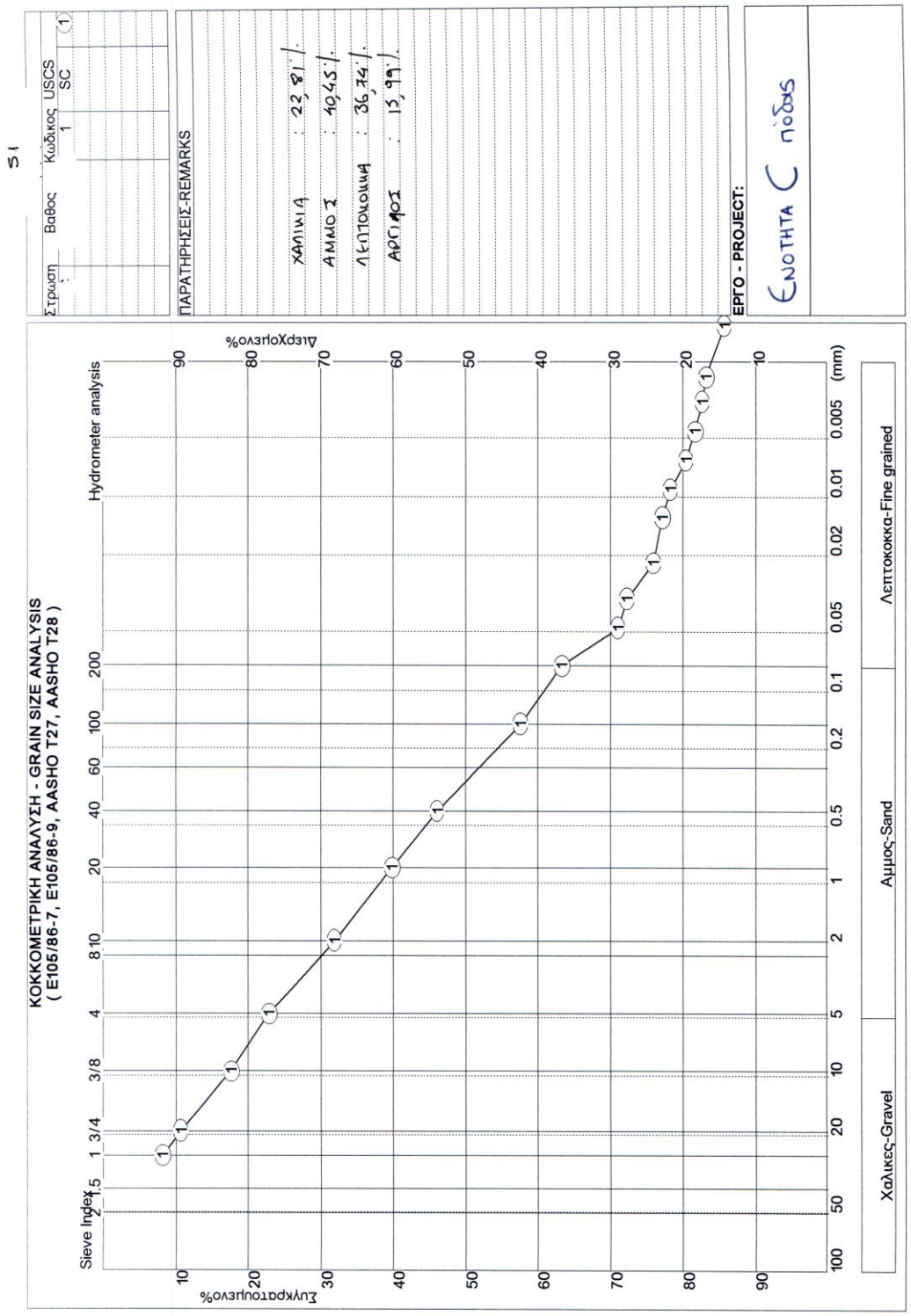
Οριο πλαστικότητας **PL :** 24 %

Δείκτης πλαστικότητας **IP :** 42 %

Παρατηρήσεις:



Περιγραφή δείγματος: Ιλυώδης Άργιλος (CH)



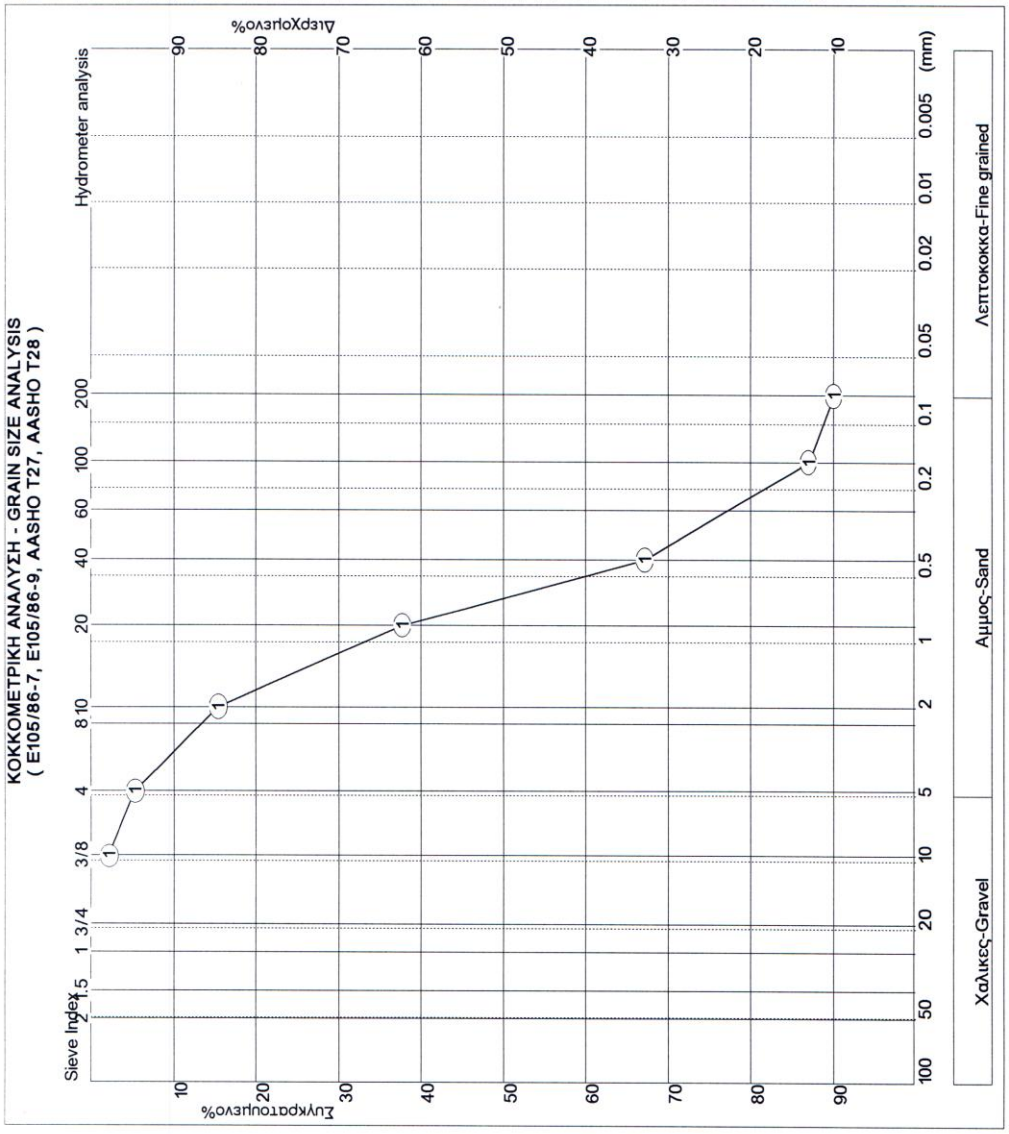
52

Στρώση	Βάθος	Κωδικός	USCS
		1	SW-SM (1)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-REMARKS

Χάλικας : 5,30 %
Άμμος : 84,93 %
Λεπτόκοκκα : 9,77 %

ΕΡΓΟ - PROJECT: ΕΝΟΤΗΤΑ Β.



ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΚΟΣΚΙΝΑ

Unit B
Ημερομηνία: 3.12 - 4.12

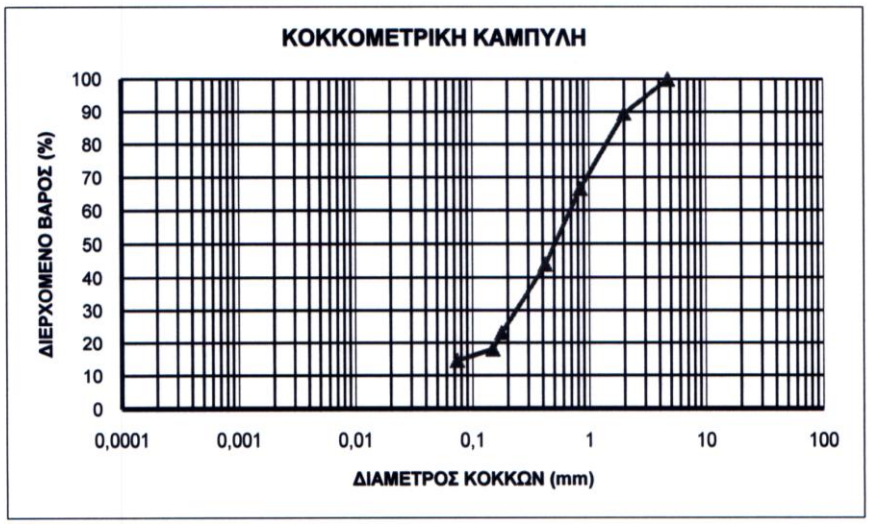
Αρχικό ξηρό βάρος πριν την πλύση (gr) 648,31
Ξηρό βάρος μετά την πλύση (gr) 553,33

α/α	No.	Ανοιγμα κοσκίνου (mm)	Βάρος κόσκινου (gr)	Βάρος κοσκίνου + έδαφος (gr)	Συγκρ. βάρος (gr)	Σύνολο συγκρ. βάρος (gr)	Συγκρατ. βάρος %	Διερχ. Βάρος %
1	4	4,76	450,74	450,91	0,17	0,17	0,026	99,974
2	10	2	386,79	454,06	67,27	67,44	10,402	89,598
3	20	0,84	359,78	509,04	149,26	216,7	33,425	66,575
4	40	0,42	313,37	459,95	146,58	363,28	56,035	43,965
5	80	0,177	287,26	422,04	134,78	498,06	76,824	23,176
6	100	0,149	282,25	315,12	32,87	530,93	81,894	18,106
7	200	0,074	272,58	294,98	22,4	553,33	85,350	14,650
Παιπάλη			322,71	417,69	94,98	648,31	100,000	0,000

Συντ. ομοιομορφίας
$U = d_{60}/d_{10}$
0,05
ομοιόμορφο

Βαθμός διαβάθμισης
$C_c = d_{30}^2/d_{60} \cdot d_{10}$
0,01

Συντ. διαπερατότητας
$k = c \cdot d_{10}^2$
21463,42



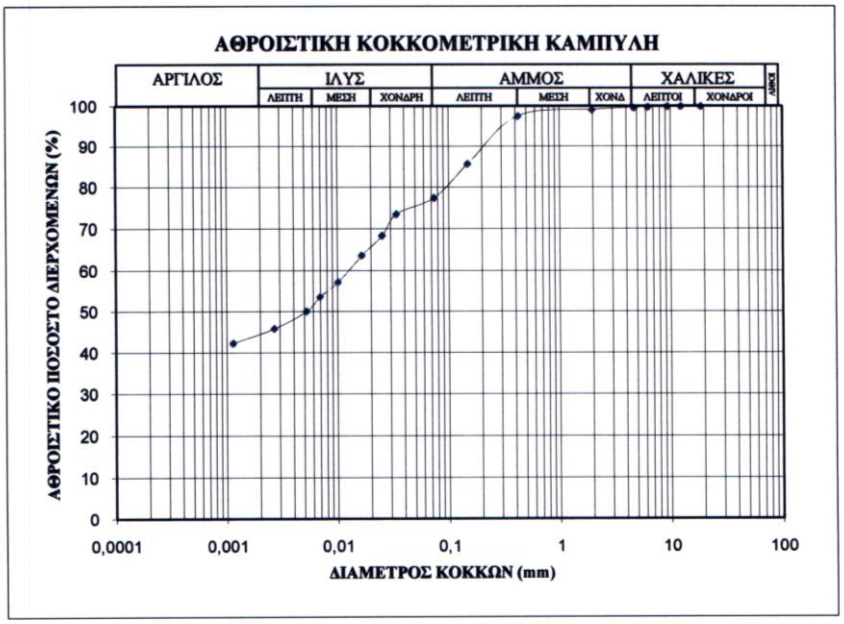
ΔΕΛΤΙΟ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

AASHTO T88 - ASTM D 422-72

ΕΡΓΟ: Παράμετροι Unit C

ΔΕΙΓΜΑ: 1-3/3/2008 **ΒΑΘΟΣ: Επιφανειακό**

Αριθμός κοσκίνου	Άνοιγμα κοσκίνου mm	Συγκρατούμενο βάρος gr	Συγκρατούμενο βάρος %	Διερχόμενο βάρος gr	Διερχόμενο βάρος %
2 in.	50	0	0,00	299,061	100,00
1 in.	25	0	0,00	299,061	100,00
3/4 in.	19	0	0,00	299,061	100,00
1/2 in.	12,5	0	0,00	299,061	100,00
3/8 in.	9,5	0	0,00	299,061	100,00
1/4 in.	6,3	0,55	0,18	298,511	99,82
No. 4	4,75	0,49	0,16	298,021	99,65
No. 10	2	0,49	0,51	296,481	99,14
No. 40	0,425	4,651	1,56	291,830	97,58
No. 100	0,15	35,44	11,85	256,390	85,73
No. 200	0,075	24,59	8,22	231,800	77,51
	0,0341	11,70	3,91	220,10	73,60
	0,0254	15,29	5,11	204,81	68,49
	0,0167	14,22	4,76	190,59	63,73
	0,0102	19,20	6,42	171,39	57,31
	0,0070	10,67	3,57	160,72	53,74
	0,0053	10,67	3,57	150,05	50,18
	0,0027	12,80	4,28	137,25	45,89
	0,0011	10,67	3,57	126,59	42,33
		126,59	42,33		
		299,061	100,00		



Κοκκομετρία κατά ASTM D2487			
Χαλίκια	Άμμος	Ιλύς	Άργιλλος
0,35	22,14	33,21	44,30

PLASTICITY			
LL	PL	PI	LLND
77	31	46	

FINES (F)	D60	D10	D30	Cu	Cc
77,51					

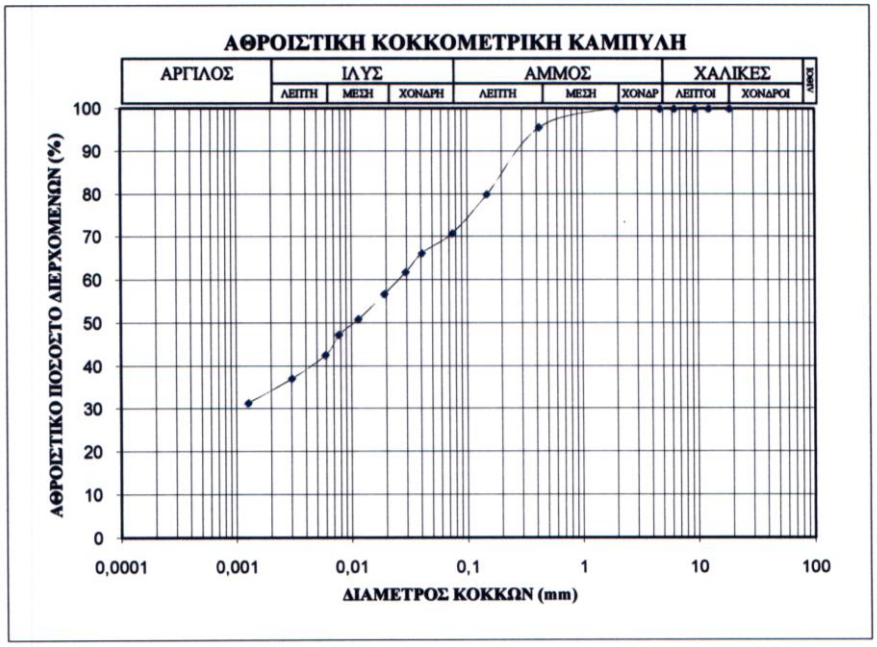
ΔΕΛΤΙΟ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

AASHTO T88 - ASTM D 422-72

ΕΡΓΟ: Παράμετροι Unit C

ΔΕΙΓΜΑ: 1-11/2007 **ΒΑΘΟΣ: Επιφανειακό**

Αριθμός κοσκίνου	Ανοιγμα κοσκίνου mm	Συγκρατούμενο βάρος		Διερχόμενο βάρος	
		gr	%	gr	%
2 in.	50	0	0,00	68,910	100,00
1 in.	25	0	0,00	68,910	100,00
3/4 in.	19	0	0,00	68,910	100,00
1/2 in.	12,5	0	0,00	68,910	100,00
3/8 in.	9,5	0	0,00	68,910	100,00
1/4 in.	6,3	0	0,00	68,910	100,00
No. 4	4,75	0	0,00	68,910	100,00
No. 10	2	0	0,00	68,910	100,00
No. 40	0,425	3,01	4,37	65,900	95,63
No. 100	0,15	10,78	15,64	55,120	79,99
No. 200	0,075	6,34	9,20	48,780	70,79
	0,0410	3,18	4,61	45,60	66,17
	0,0297	3,00	4,35	42,60	61,82
	0,0194	3,50	5,08	39,10	56,74
	0,0115	4,00	5,80	35,10	50,94
	0,0078	2,50	3,63	32,60	47,31
	0,0060	3,20	4,64	29,40	42,66
	0,0030	3,80	5,51	25,60	37,15
	0,0013	4,00	5,80	21,60	31,35
		21,60	31,35		
		68,910	100,00		



Κοκκομετρία κατά ASTM D2487			
Χαλίκια	Άμμος	Ιλύς	Άργιλλος
0,00	29,21	37,04	33,75

PLASTICITY			
LL	PL	PI	LLND
75	25	50	

FINES (F)	D60	D10	D30	Cu	Cc
70,79					

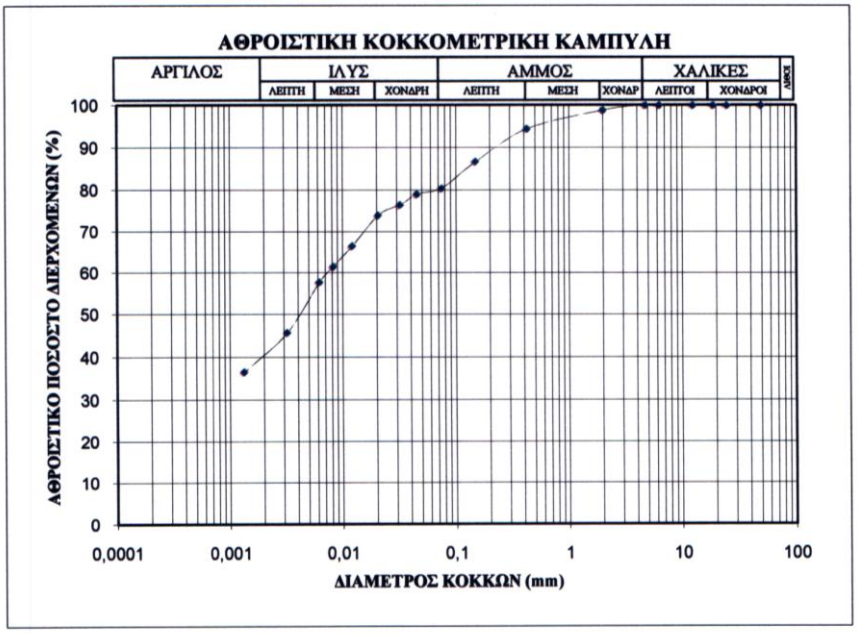
ΔΕΛΤΙΟ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

AASHTO T88 - ASTM D 422-72

ΕΡΓΟ: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΗΜΟΤΙΚΟΥ ΣΧΟΛΕΙΟΥ ΣΤΟ 1ο Δ.Σ. ΣΤΟ ΔΗΜΟ Κ.ΝΕΥΡΟΚΟΠΙΟΥ

ΔΕΙΓΜΑ: ΔΓ1Δ11 **ΒΑΘΟΣ: 7,00-8,00m**

Αριθμός κοσκίνου	Ανοιγμα κοσκίνου mm	Συγκρατούμενο βάρος		Διερχόμενο βάρος	
		gr	%	gr	%
2 in.	50	0	0,00	39,491	100,00
1 in.	25	0	0,00	39,491	100,00
3/4 in.	19	0	0,00	39,491	100,00
1/2 in.	12,5	0	0,00	39,491	100,00
1/4 in.	6,3	0	0,00	39,491	100,00
No. 4	4,75	0	0,00	39,491	100,00
No. 10	2	0	1,19	39,020	98,81
No. 40	0,425	1,74	4,41	37,280	94,40
No. 100	0,15	3,02	7,65	34,260	86,75
No. 200	0,075	2,48	6,28	31,780	80,47
	0,0454	0,56	1,41	31,22	79,06
	0,0323	0,99	2,50	30,24	76,56
	0,0207	0,99	2,50	29,25	74,06
	0,0122	2,96	7,51	26,28	66,55
	0,0083	1,98	5,00	24,31	61,55
	0,0062	1,48	3,75	22,82	57,80
	0,0032	4,74	12,01	18,08	45,79
	0,0013	3,66	9,26	14,43	36,53
		14,43	36,53		
		39,491	100,00		



Κοκκομετρία κατά ASTM D2487			
Χαλίκια	Άμμος	Ιλύς	Άργιλλος
0,00	19,53	40,68	39,79

PLASTICITY			
LL	PL	PI	LLND
66	24	42	

FINES (F)	D60	D10	D30	Cu	Cc
80,47					

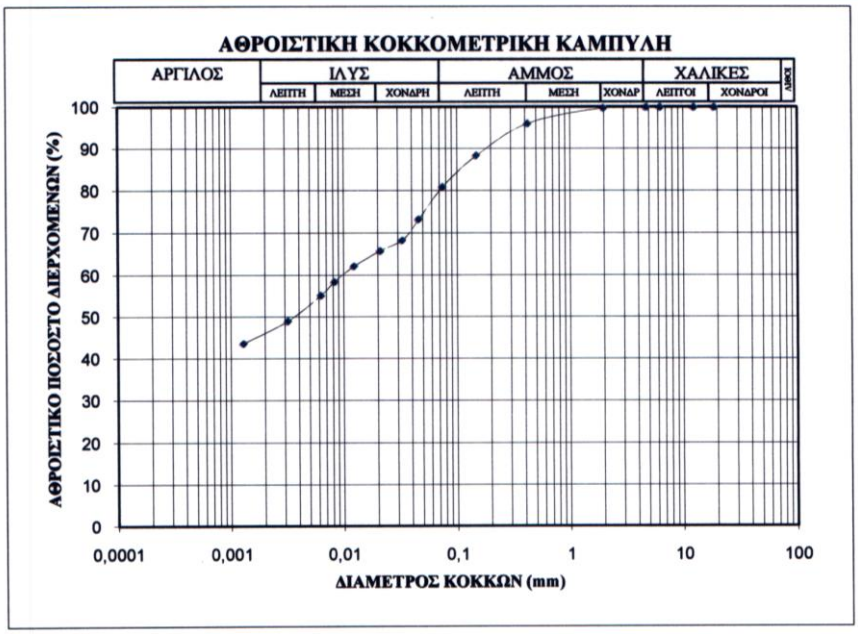
ΔΕΛΤΙΟ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

AASHTO T88 - ASTM D 422-72

ΕΡΓΟ: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΗΜΟΤΙΚΟΥ ΣΧΟΛΕΙΟΥ ΣΤΟ 1ο Δ.Σ. ΣΤΟ ΔΗΜΟ Κ.ΝΕΥΡΟΚΟΠΙΟΥ

ΔΕΙΓΜΑ: ΔΓ1Δ17 **ΒΑΘΟΣ: 11,00-12,00m**

Αριθμός κοσκίνου	Ανοιγμα κοσκίνου mm	Συγκρατούμενο βάρος		Διερχόμενο βάρος	
		gr	%	gr	%
2 in.	50	0	0,00	40,273	100,00
1 in.	25	0	0,00	40,273	100,00
3/4 in.	19	0	0,00	40,273	100,00
1/2 in.	12,5	0	0,00	40,273	100,00
1/4 in.	6,3	0	0,00	40,273	100,00
No. 4	4,75	0	0,00	40,273	100,00
No. 10	2	0	0,23	40,180	99,77
No. 40	0,425	1,502	3,73	38,678	96,04
No. 100	0,15	3,07	7,62	35,608	88,42
No. 200	0,075	3,02	7,50	32,588	80,92
	0,0463	3,06	7,59	29,53	73,33
	0,0331	2,00	4,95	27,54	68,37
	0,0211	1,00	2,48	26,54	65,90
	0,0124	1,50	3,72	25,04	62,18
	0,0083	1,50	3,72	23,55	58,46
	0,0063	1,30	3,22	22,25	55,24
	0,0032	2,49	6,19	19,75	49,05
	0,0013	2,19	5,45	17,56	43,60
		17,56	43,60		
		40,273	100,00		



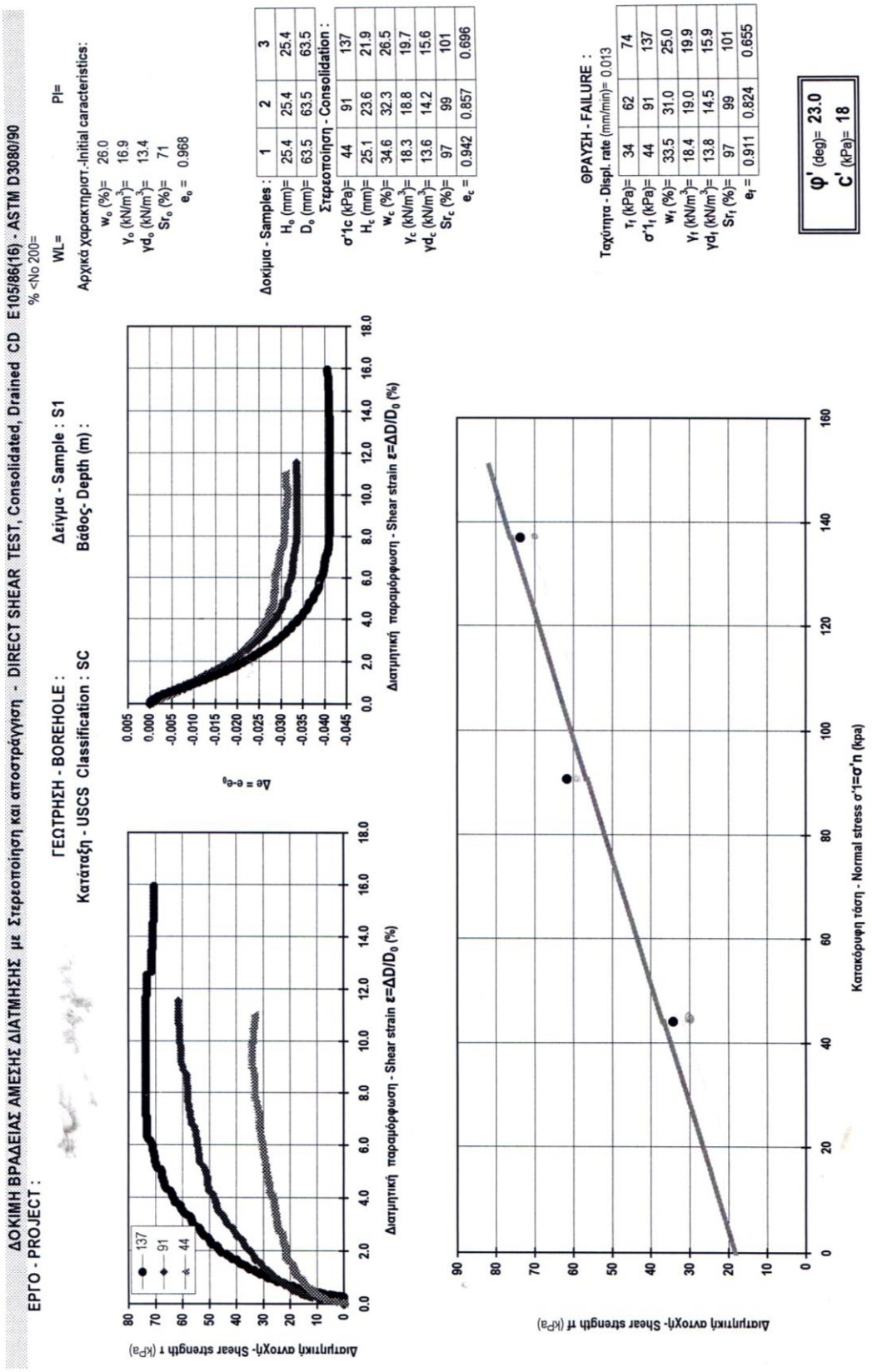
Κοκκομετρία κατά ASTM D2487			
Χαλίκια	Άμμος	Ιλύς	Άργιλλος
0,00	19,08	35,30	45,61

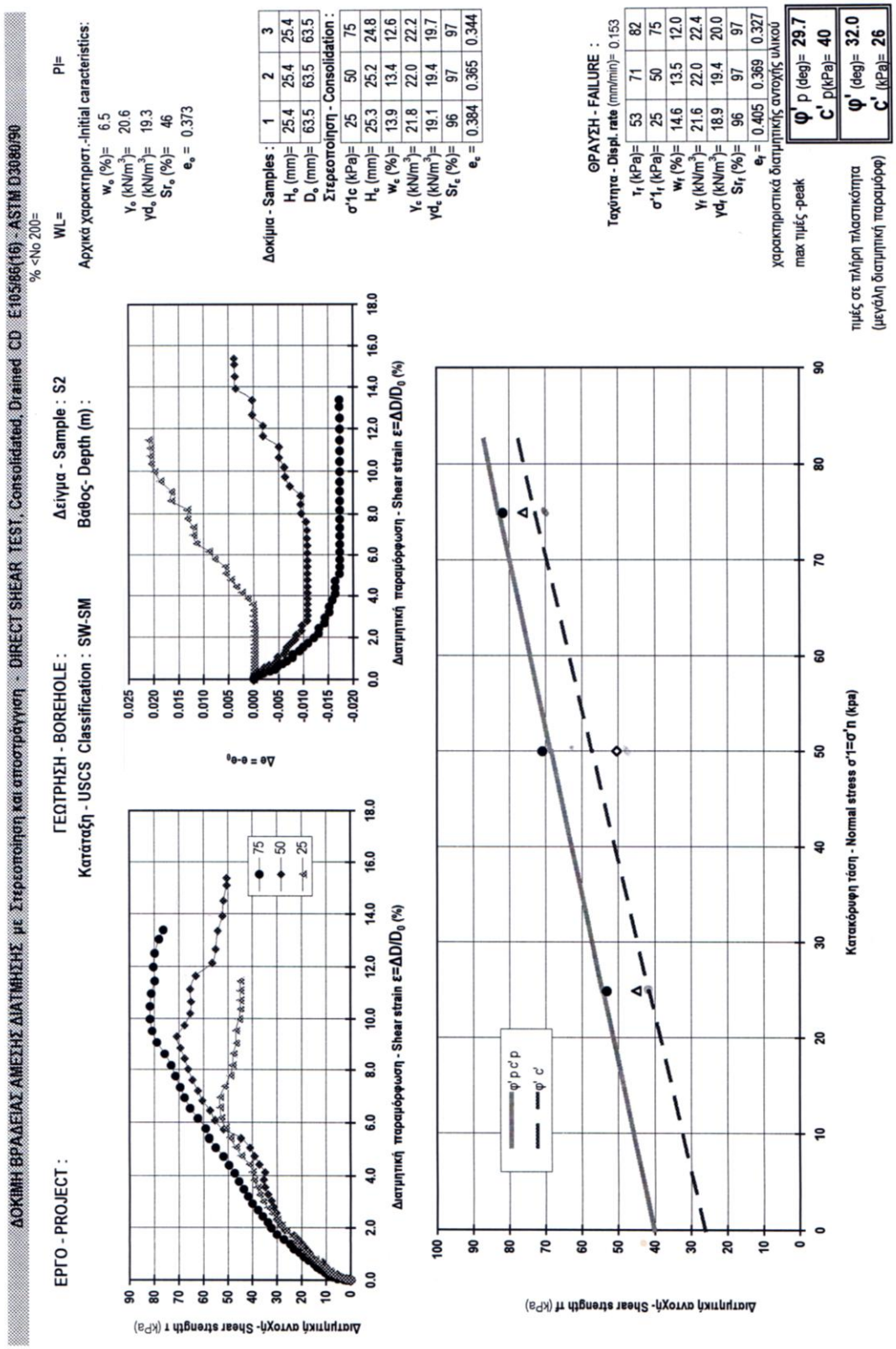
PLASTICITY			
LL	PL	PI	LLND
66	24	42	

FINES (F)	D60	D10	D30	Cu	Cc
80,92					

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Δοκιμές Μηχανικών Παραμέτρων





ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ - UNIAXIAL CONSOLIDATION TEST (ΥΠΕΧΩΔΕ E105/86-13 , ASTM D2435-80)

ΕΡΓΟ - PROJECT :

ΓΕΩΤΡΗΣΗ - BOREHOLE : Δείγμα - Sample : S1 H_o (mm)= 25.40 γ_o (kN/m^3)= 18.88 e_o = 0.863

Βάθος - Depth (m) : D (mm)= 63.50 γd_o (kN/m^3)= 14.23 Sr_o (%)= 100

Κατάταξη - USCS Classification : SC W_o (%)= 32.70

Δείκτες Συμπιεστότητας
Compressibility Indexes

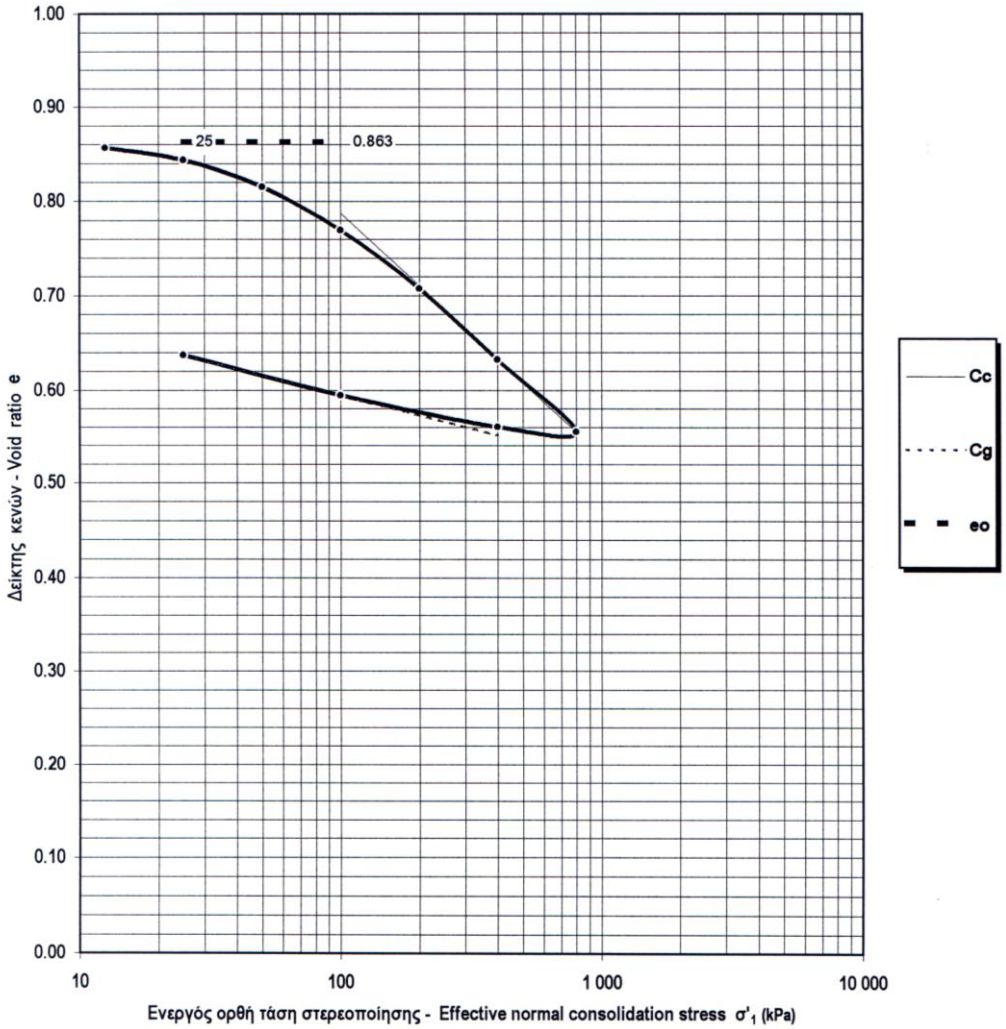
Cc= 0.258
μεσCa= 0.002

Cg= 0.071

σ'_1 (kPa)	S = ΔH/H$_o$ (%) $S_{0\%}$	$S_{50\%}$	$S_{100\%}$	$t_{50\%}$ (sec)	$e=e_{100\%}$	Es (kPa)	Cv (cm^2/sec)	Ca =-Δe/Δlogt	K (cm/sec)
12.5	0.03	0.19	0.34	68	0.856	2471	4.63E-03		1.87E-07
25	0.40	0.71	1.01	330	0.844	1744	9.49E-04	0.0011	5.44E-08
50	1.17	1.85	2.53	354	0.815	1825	8.65E-04	0.0008	4.74E-08
100	2.83	3.90	4.97	477	0.770	2427	6.15E-04	0.0017	2.54E-08
200	5.22	6.78	8.33	438	0.707	3727	6.30E-04	0.0018	1.69E-08
400	8.52	10.43	12.34	405	0.633	6568	6.30E-04	0.0018	9.59E-09
800	12.34	14.42	16.51	525	0.555		4.44E-04	0.0018	
400			16.23		0.560				
100			14.40		0.594	7004			
25			12.10		0.637	472			

Ενεργός Τάση Προφόρτισης :
Effective Preconsolidation Pressure:

p'c=



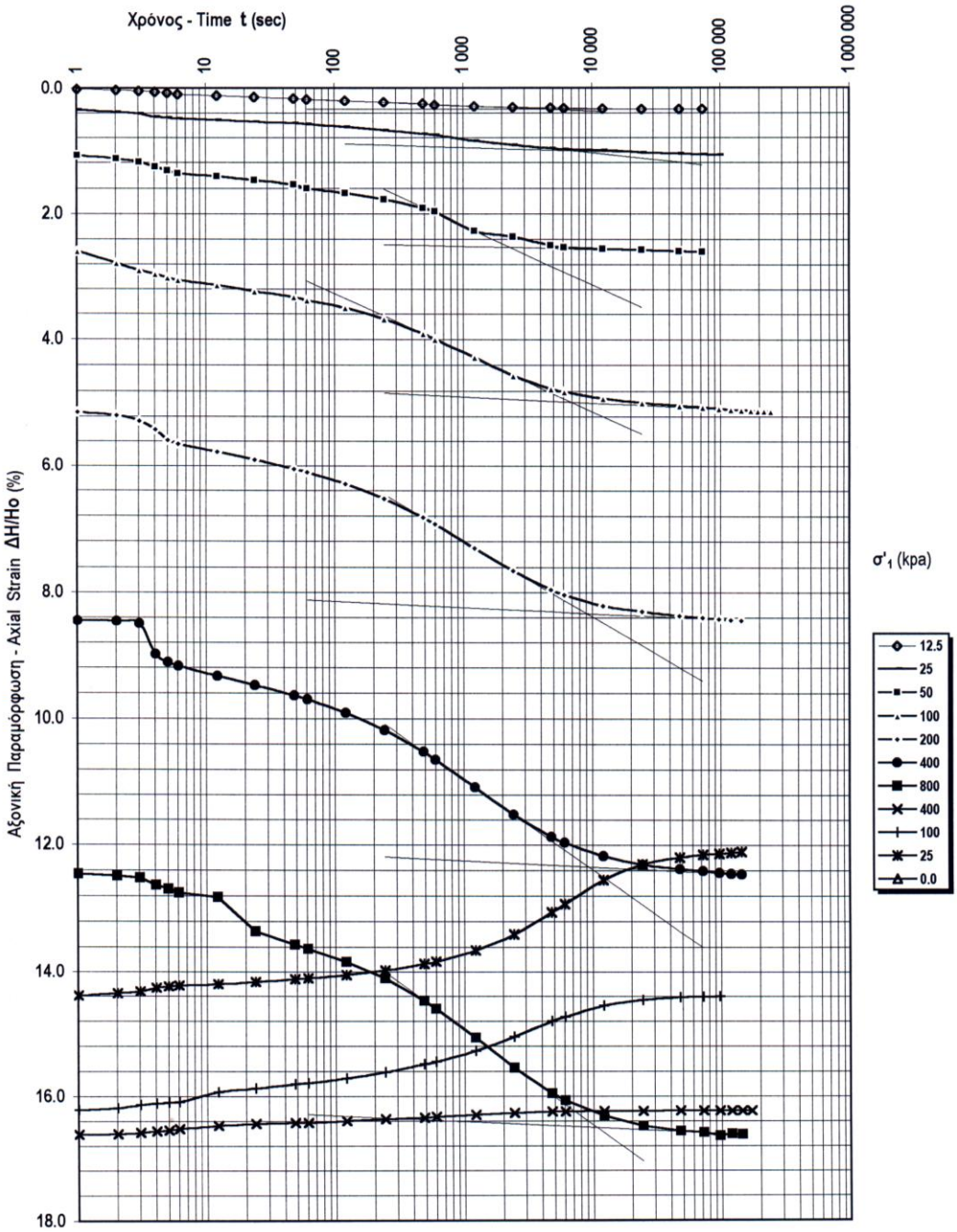
ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ - UNIAXIAL CONSOLIDATION TEST (ΥΠΕΧΩΔΕ E105/86-13 , ASTM D2435-80)

ΕΡΓΟ - PROJECT :

ΓΕΩΤΡΗΣΗ - BOREHOLE : Δείγμα - Sample : S1 H_o (mm)= 25.40 γ_o (kN/m^3)= 18.88 e_o = 0.863

Βάθος - Depth (m) : D (mm)= 63.50 γd_o (kN/m^3)= 14.23 Sr_o (%)= 100

Κατάταξη - USCS Classification : SC W_o (%)= 32.70



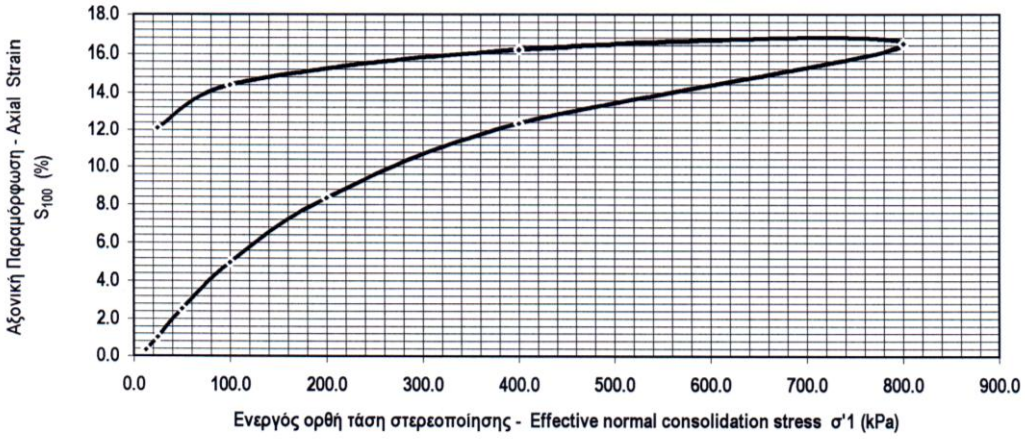
ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ - UNIAXIAL CONSOLIDATION TEST (ΥΠΕΧΩΔΕ E105/86-13 , ASTM D2435-80)

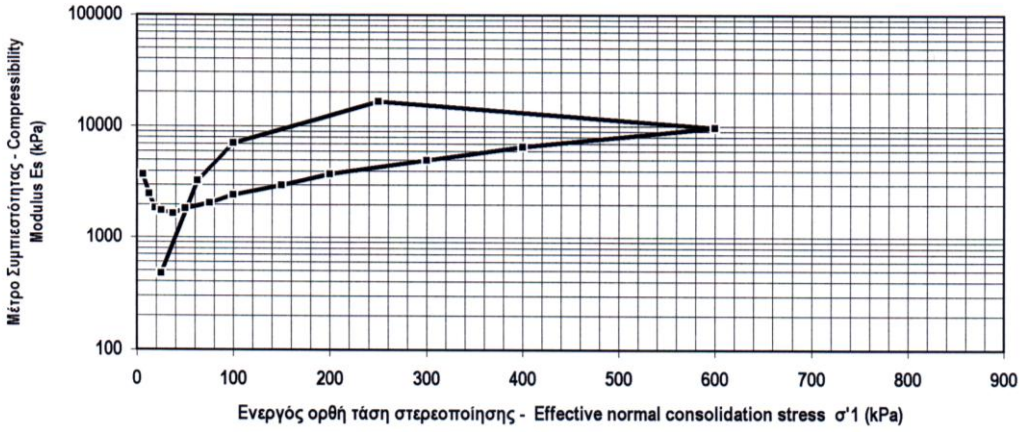
ΕΡΓΟ - PROJECT :

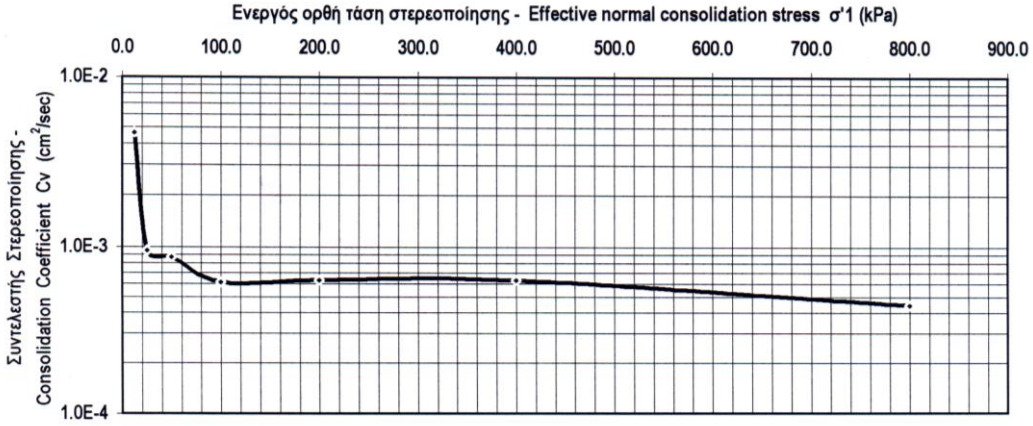
ΓΕΩΤΡΗΣΗ - BOREHOLE : Δείγμα - Sample : S1 H_o (mm)= 25.40 γ_o (kN/m^3)= 18.88 e_o = 0.863

Βάθος - Depth (m) : D (mm)= 63.50 γd_o (kN/m^3)= 14.23 Sr_o (%)= 100

Κατάταξη - USCS Classification : SC W_o (%)= 32.70







ΕΡΓΟ: ΑΣΠΡΟΒΑΛΤΑ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ UNIT C

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ: ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Χαρακτηρισμός Δοκιμίου και Υπολογισμοί

Δοκίμιο: Αριθμ. Συσκευής:

Διαστάσεις συσκευής: Ύψος (mm): 19 Διάμετρ.: 75,2 mm Επιφ/εια Α: 4439,2 mm^2

Ειδικό βάρος εδάφους γ_s: 2,7 Φαινόμενο βάρος γ: 1,90 t/m^3

Παρατηρήσεις

Μέση υδροπερατότητα: 9,08E-07 cm/sec

Βάρος συσκευής + υγρού εδάφους:	W =	280,21	gr
Βάρος συσκευής:	W_U =	119,7	gr
Βάρος υγρού δείγματος:	W_S =	160,51	gr
Βάρος ξηρού δείγματος:	W_T =	124,77	gr
R_1= συσκευή μετά τύπου 30 mm			gr
R_2= συσκευή χωρίς φορτίο			gr
R_3= συσκευή με φορτίο		kg/cm^2	gr
H_o= αρχικό ύψος δοκιμίου		19	mm
H_s= ισοδύναμο ύψος κόκκων		10,41	mm

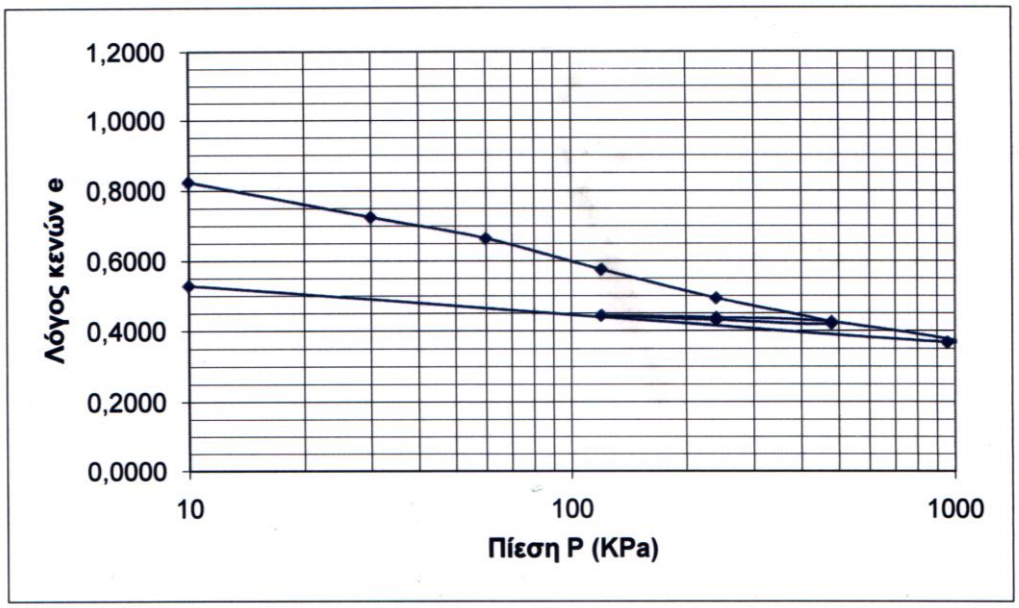
Υγρασία %	Πριν τη δοκιμή	Μετά τη δοκιμή
Αριθμ. κάψας		
Κάψα + Υγρό βάρος	46,596	259,73
Κάψα + Ξηρό βάρος	43,054	228,89
Βάρος νερού	3,542	30,84
Βάρος κάψας	28,297	104,12
Βάρος ξηρού δείγμ.	14,757	124,77
m %	**24,00**	**24,72**

Πίεση kPa	Τελική ανάγνωση R (mm)	Υποχώρ. σε 0.0001 (ΔR)	H=Ho-ΔR	Διάκενα H_o-H_s	Λόγ. κεν. $e = \frac{H - Hs}{Hs}$	Ξηρό φαινόμενο βάρος t/m^3	% Στερεοπ.	C_V (cm^2/sec) x10^{-4}
0			19	8,590	0,825	1,48		
30	1,03		17,97	7,560	0,726	1,56		19,86
60	1,658		17,342	6,932	0,666	1,62		5,96
120	2,586		16,414	6,004	0,577	1,71		8,94
240	3,444		15,556	5,146	0,494	1,81		1,79
480	4,194		14,806	4,396	0,422	1,90		1,79
240	4,096		14,904	4,494	0,432	1,89		
120	3,96		15,04	4,630	0,445	1,87		
240	4,02		14,98	4,570	0,439	1,88		
480	4,154		14,846	4,436	0,426	1,89		
960	4,754		14,246	3,836	0,369	1,97		4,26
0	3,064		15,936	5,526	0,531	1,76		

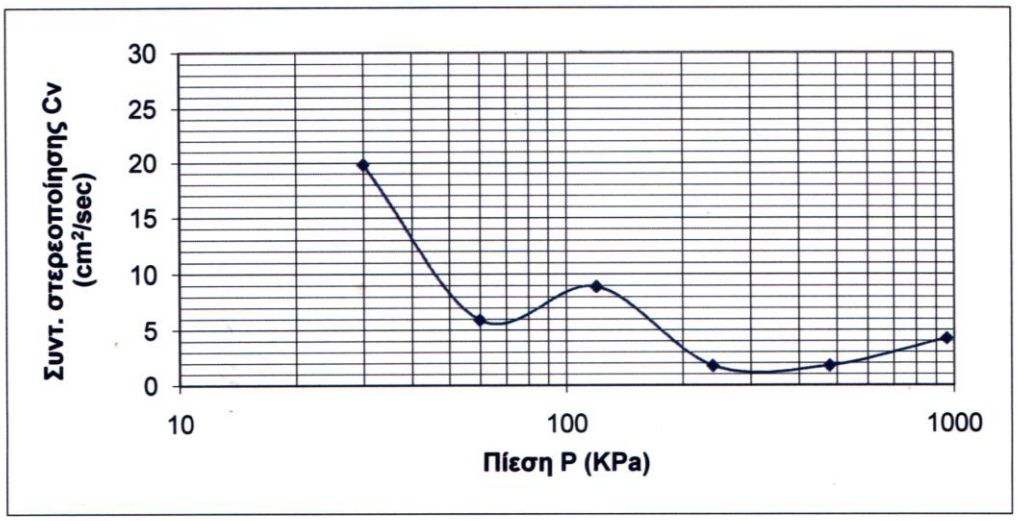
	Αρχική κατάστ.	Τελική κατάσταση
Ξηρό φαινόμενο βάρος γ_d (t/m^3)	1,479	1,764
Συνολικό ύψος H (mm)	19	15,936
Ύψος κόκκων H_s (mm)	10,41	10,41
Ύψος νερού H_w (mm)	0,6746	0,6947
Ύψος αέρα H_a (mm)	7,9156	4,8315
Περιεχόμενη υγρασία m (%)	24,00	24,72

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Α. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΟΓΟΥ ΚΕΝΩΝ - ΦΟΡΤΙΣΗΣ



Β. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ - ΦΟΡΤΙΣΗΣ



ΕΡΓΟ:ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΗΜΟΤΙΚΟΥ ΣΧΟΛΕΙΟΥ ΣΤΟ ΔΗΜΟ Κ.ΝΕΥΡΟΚΟΠΙΟΥ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ: ΔΓ1Δ11

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ: ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Χαρακτηρισμός Δοκιμίου και Υπολογισμοί

Δοκίμιο: Αριθμ. Συσκευής:

Διαστάσεις συσκευής: Ύψος (mm): 19 Διάμετρ.: 75,2 mm Επιφ/εια Α: 4439,2 mm^2

Ειδικό βάρος εδάφους γ_s: 2,31 Φαινόμενο βάρος γ: 1,95 t/m^3

Παρατηρήσεις

Μέση υδροπερατότητα: 8,25E-08 cm/sec

Βάρος συσκευής + υγρού εδάφους:	W =	284,05	gr
Βάρος συσκευής:	W_U =	119,7	gr
Βάρος υγρού δείγματος:	W_S =	164,35	gr
Βάρος ξηρού δείγματος:	W_T =	128,78	gr
R_1= συσκευή μετά τύπου 30 mm			gr
R_2= συσκευή χωρίς φορτίο			gr
R_3= συσκευή με φορτίο		kg/cm^2	gr
H_o= αρχικό ύψος δοκιμίου		19	mm
H_s= ισοδύναμο ύψος κόκκων		12,56	mm

Υγρασία %	Πριν τη δοκιμή	Μετά τη δοκιμή
Αριθμ. κάψας		
Κάψα + Υγρό βάρος	46,333	260,27
Κάψα + Ξηρό βάρος	42,33	219,2
Βάρος νερού	4,003	41,07
Βάρος κάψας	28,434	90,42
Βάρος ξηρού δείγμ.	13,896	128,78
m %	**28,81**	**31,89**

Πίεση kPa	Τελική ανάγνωση R (mm)	Υποχώρ. σε 0.0001 (ΔR)	H=Ho-ΔR	Διάκενα H_o-H_s	Λόγ. κεν. $e = \frac{H - Hs}{Hs}$	Ξηρό φαινόμενο βάρος t/m^3	% Στερεοπ.	C_V (cm^2/sec) $x10^{-4}$
0			19	6,442	0,513	1,53		
90	0,328		18,672	6,114	0,487	1,55		44,69
180	0,512		18,488	5,930	0,472	1,57		8,13
360	0,834		18,166	5,608	0,447	1,60		3,57
720	1,29		17,71	5,152	0,410	1,64		1,61
0	-0,636		19,636	7,078	0,564	1,48		0,59

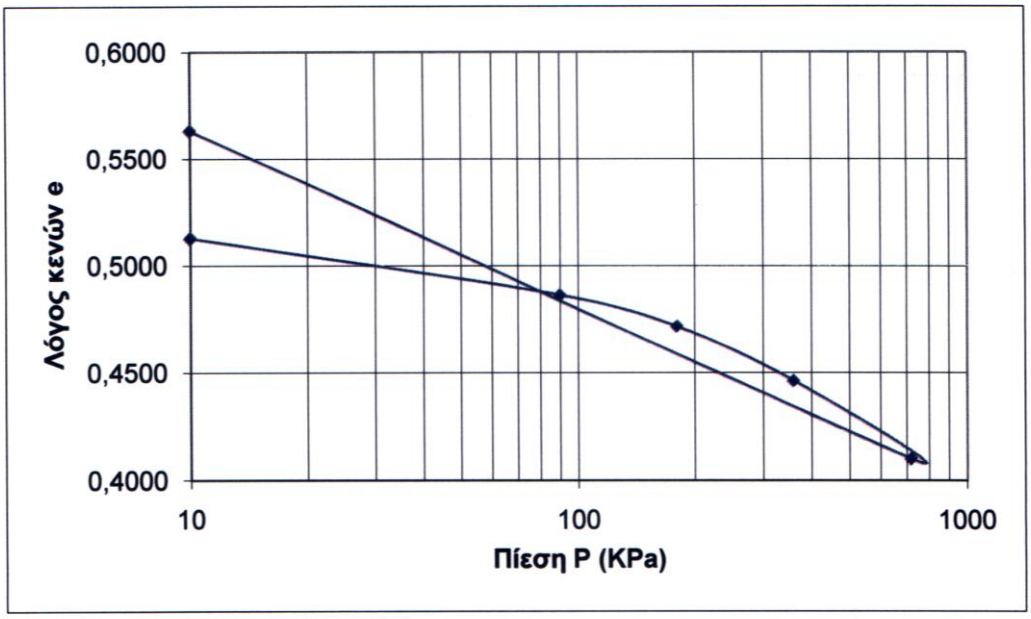
	Αρχική κατάστ.	Τελική κατάσταση
Ξηρό φαινόμενο βάρος γ_d (t/m^3)	1,527	1,638
Συνολικό ύψος H (mm)	19	17,71
Ύψος κόκκων H_s (mm)	12,56	12,56
Ύψος νερού H_w (mm)	0,8357	0,9252
Ύψος αέρα H_a (mm)	5,6060	4,2265
Περιεχόμενη υγρασία m (%)	28,81	31,89
Βαθμός κορεσμού S (%)	129,7	179,6

ΔΕΙΓΜΑ ΔΓ1Δ11

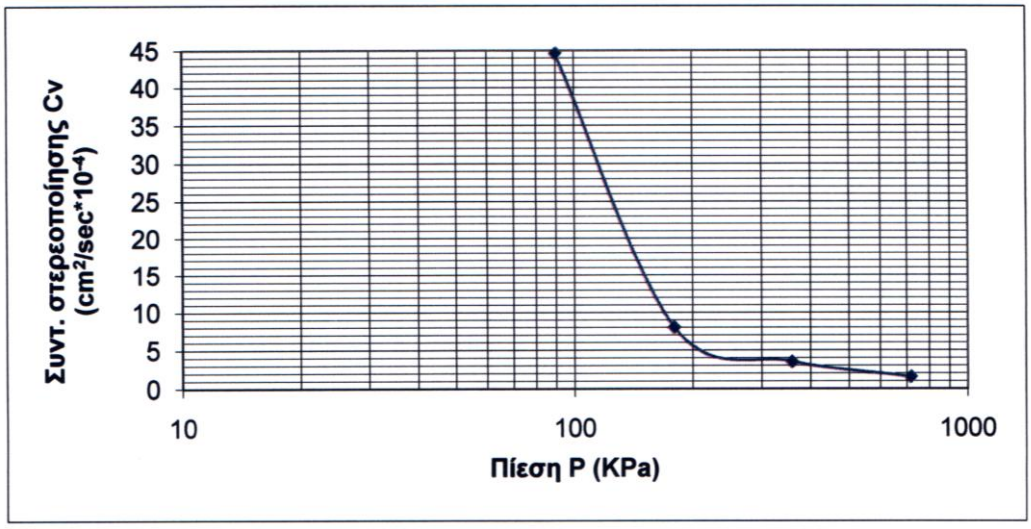
ΒΑΘΟΣ 7,00-8,00μ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Α. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΟΓΟΥ ΚΕΝΩΝ - ΦΟΡΤΙΣΗΣ

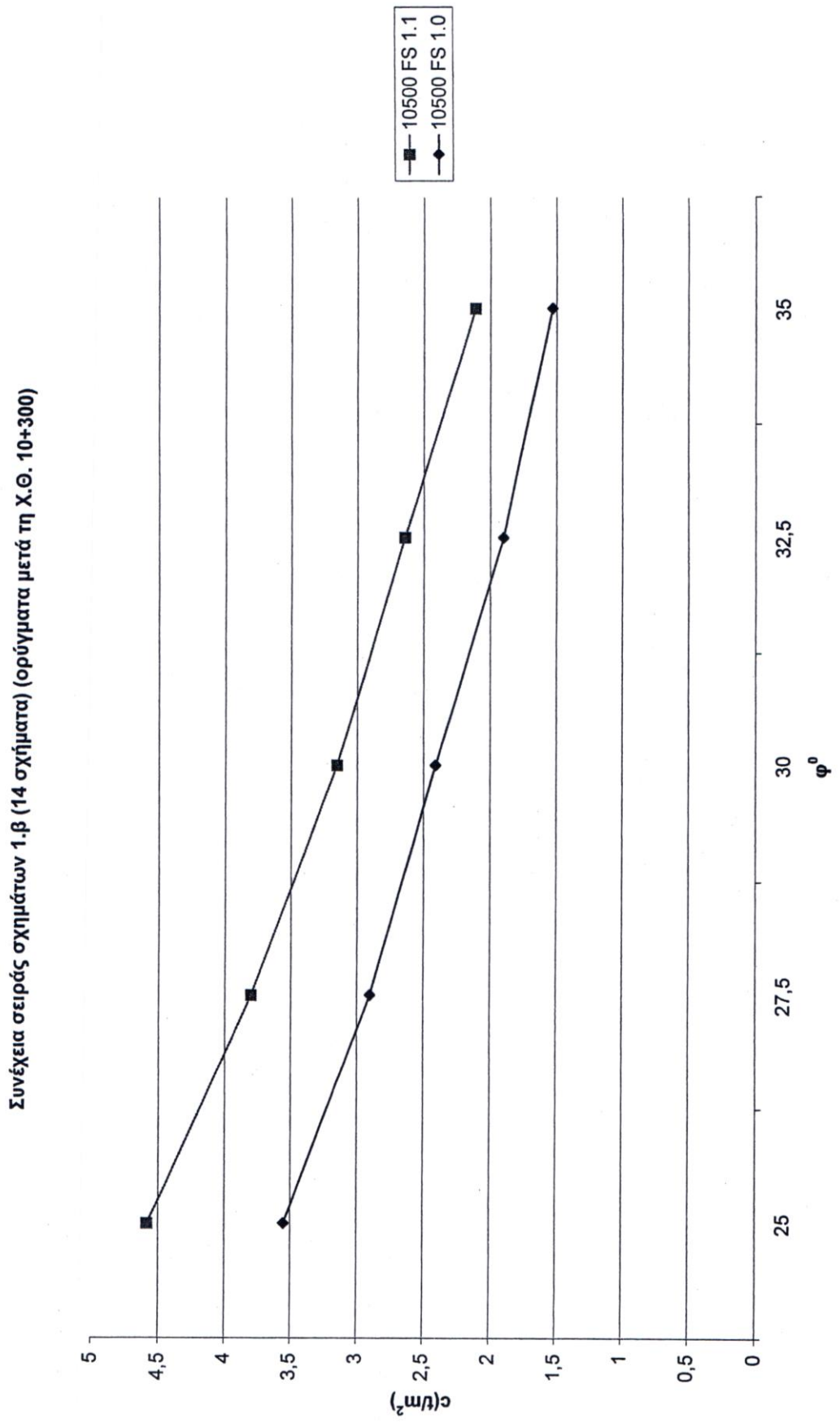


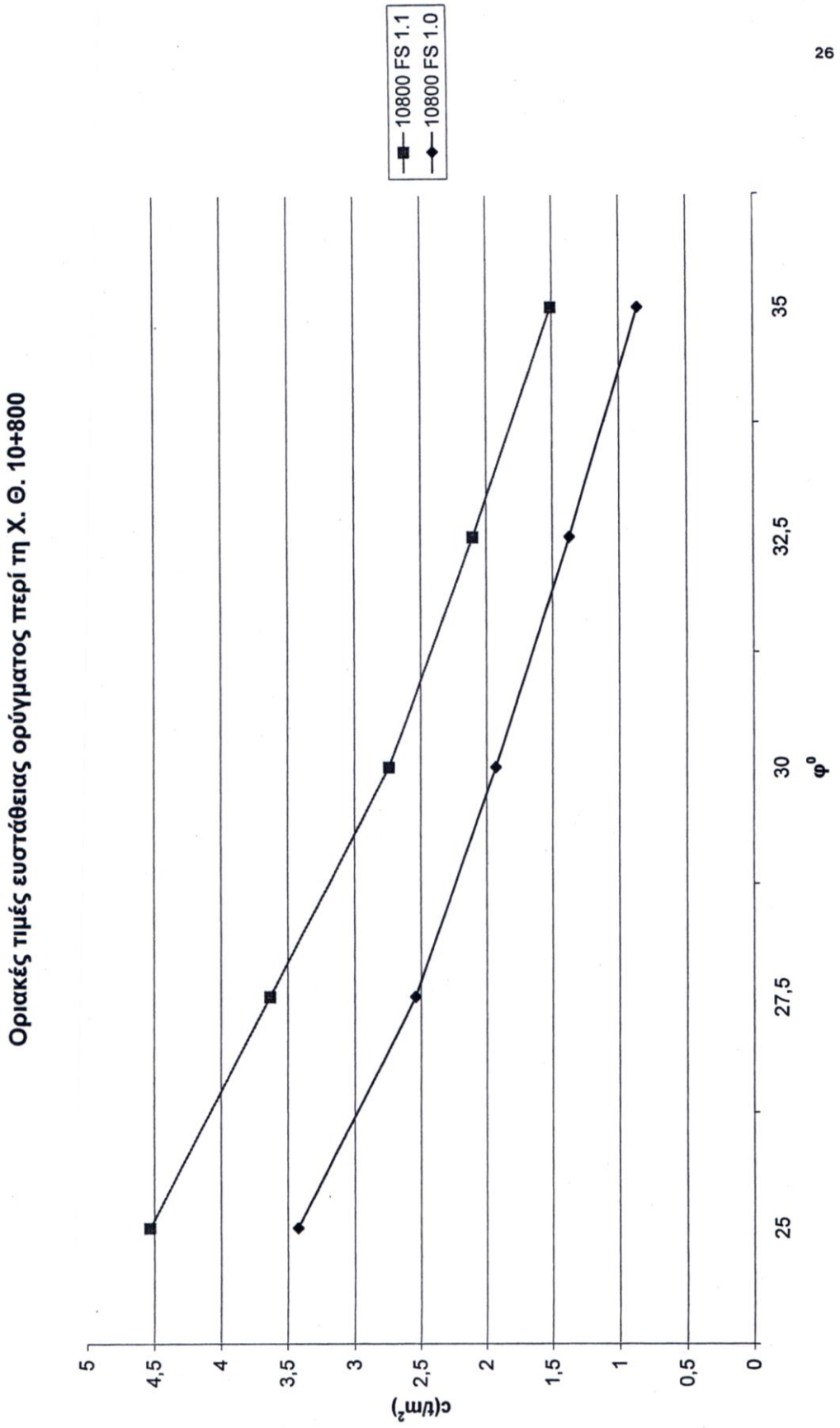
Β. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ - ΦΟΡΤΙΣΗΣ



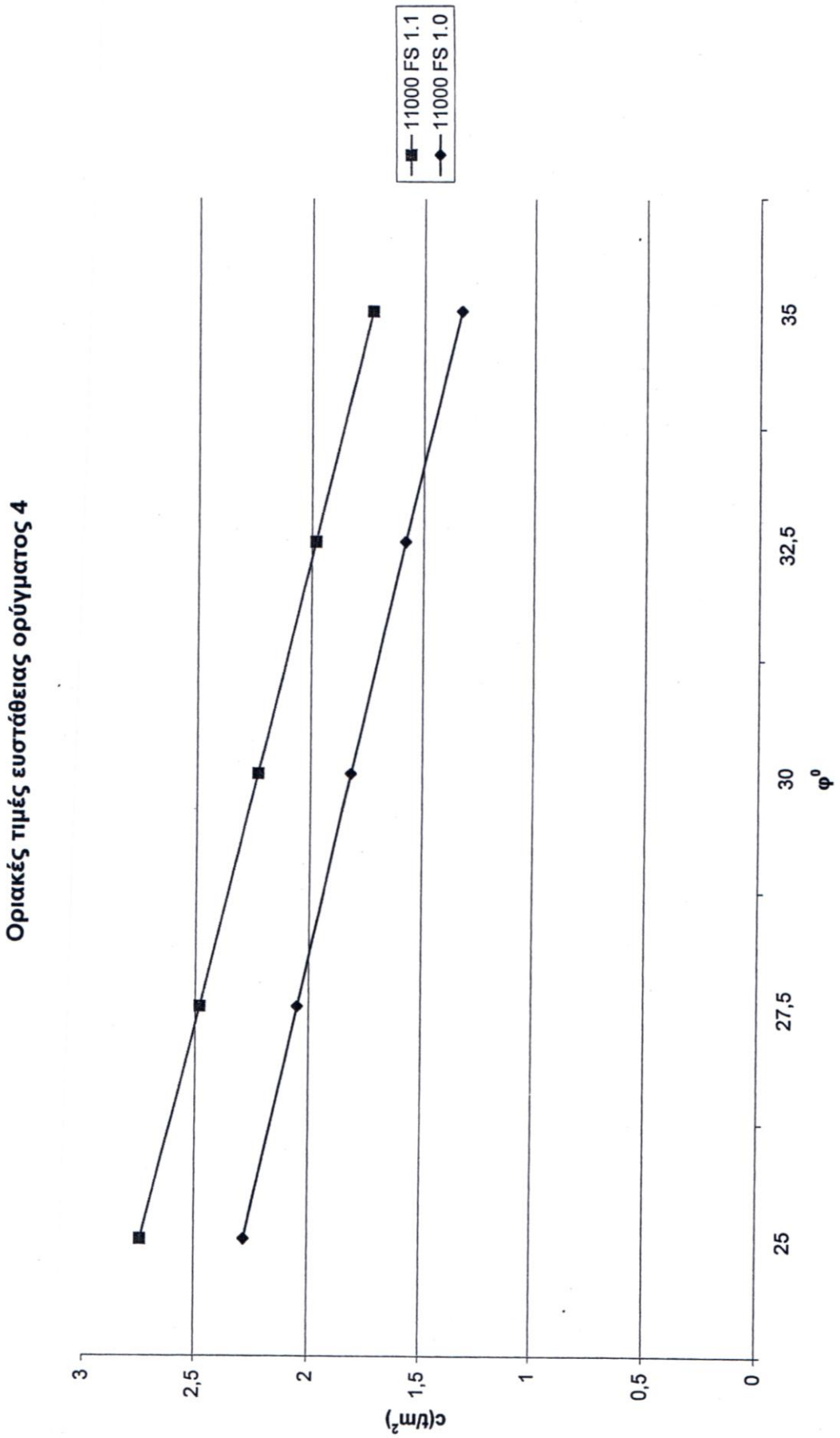
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

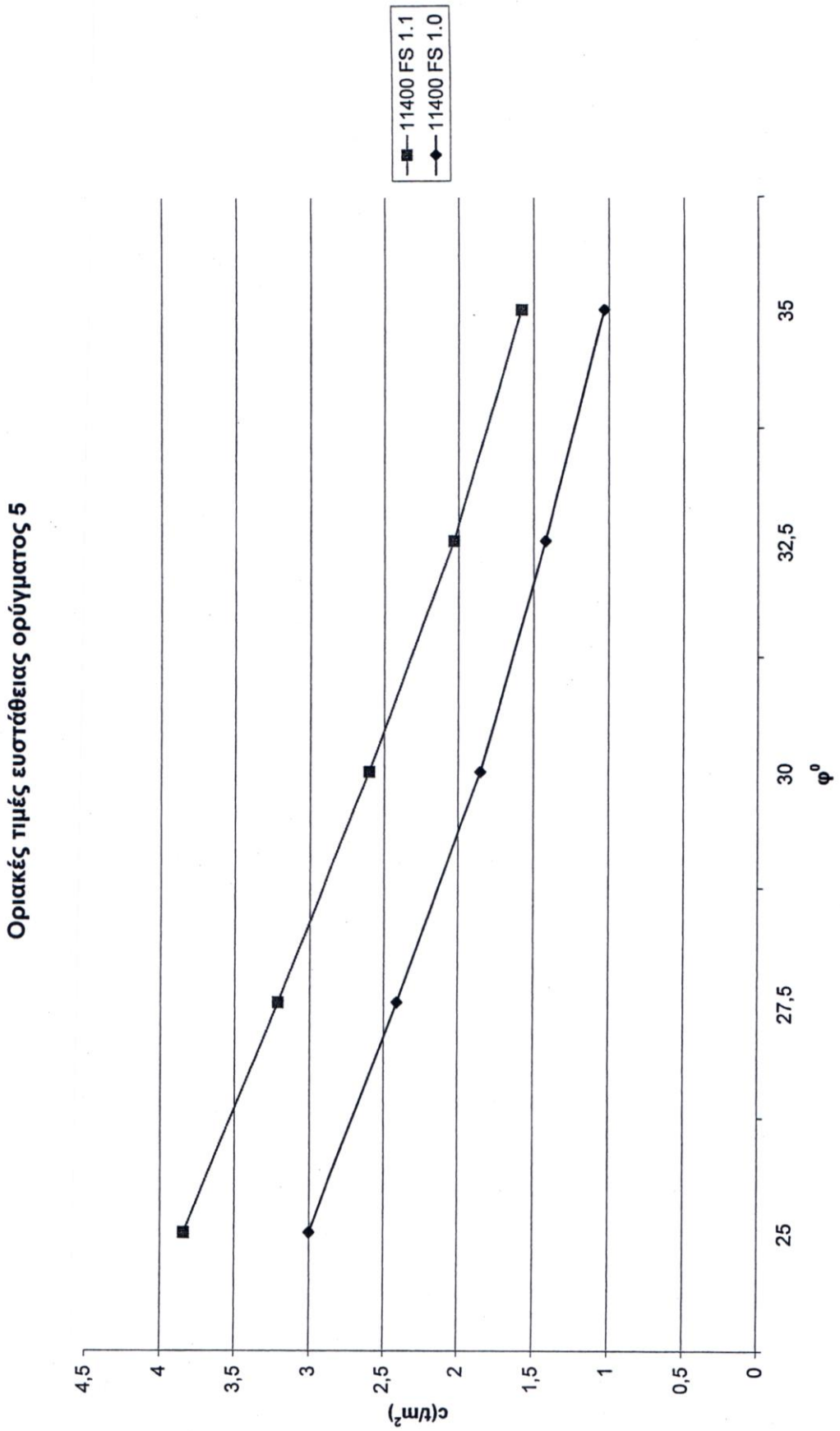
Αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων ισοτροπικού εδαφικού υλικού

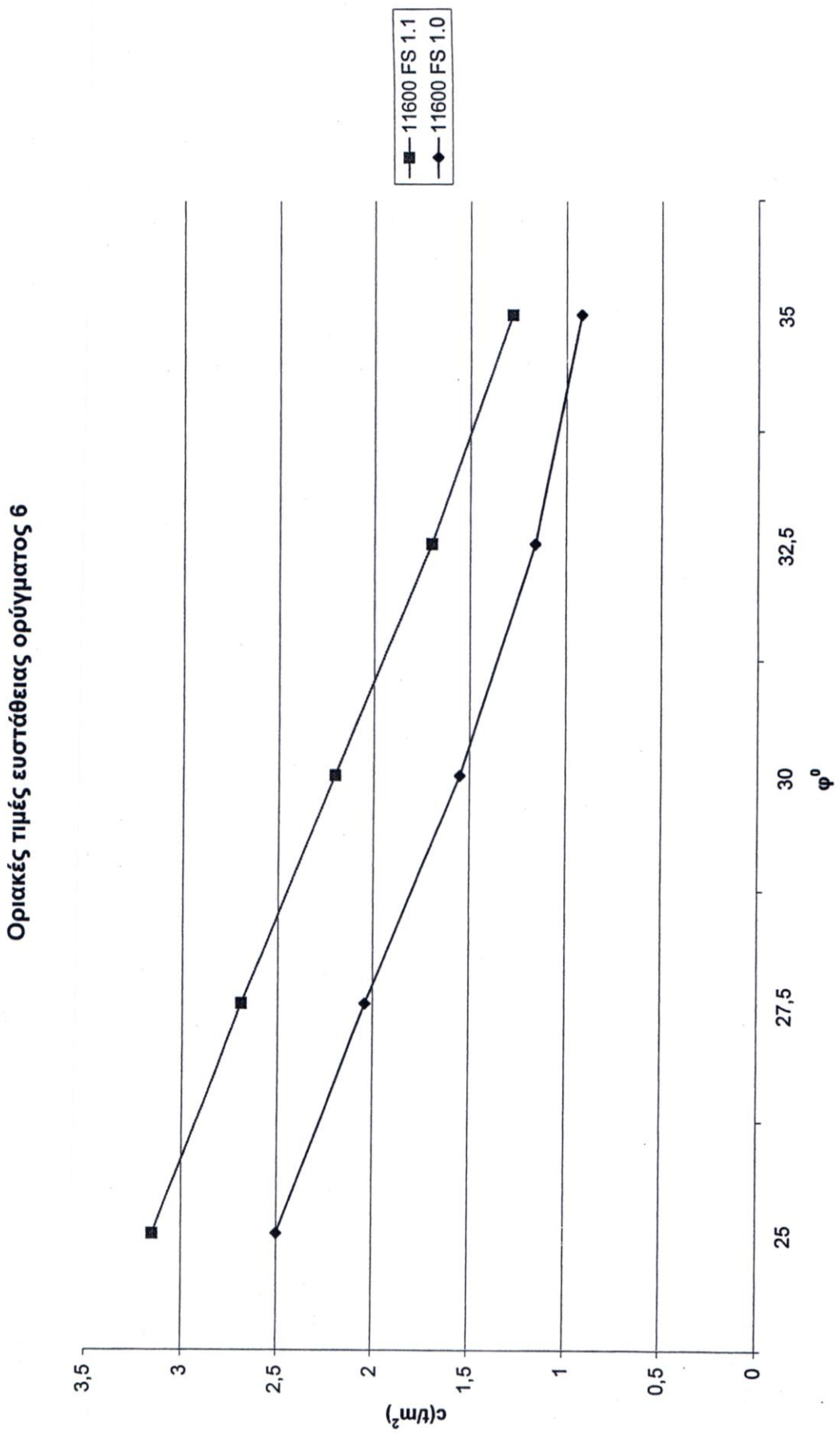


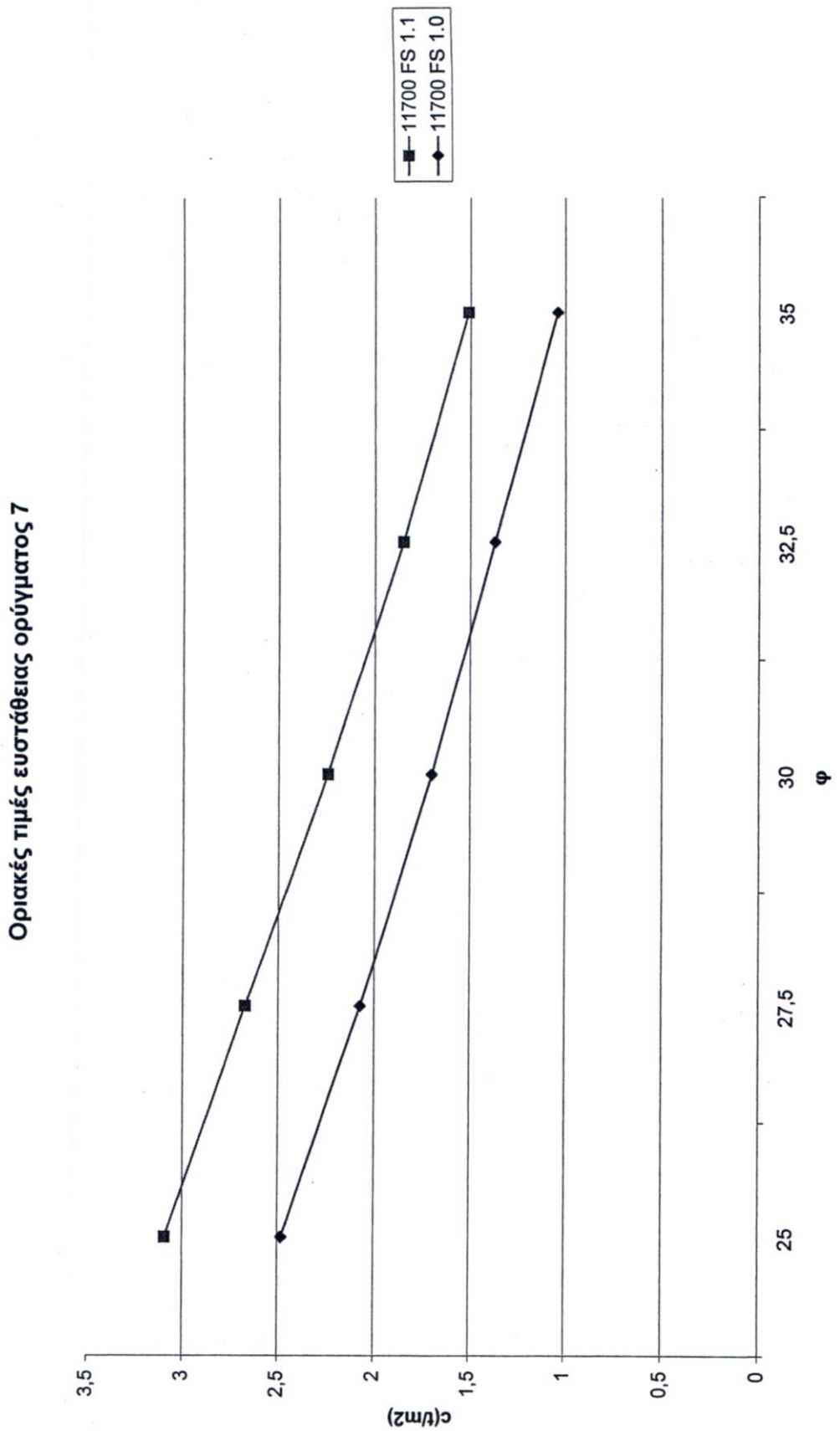


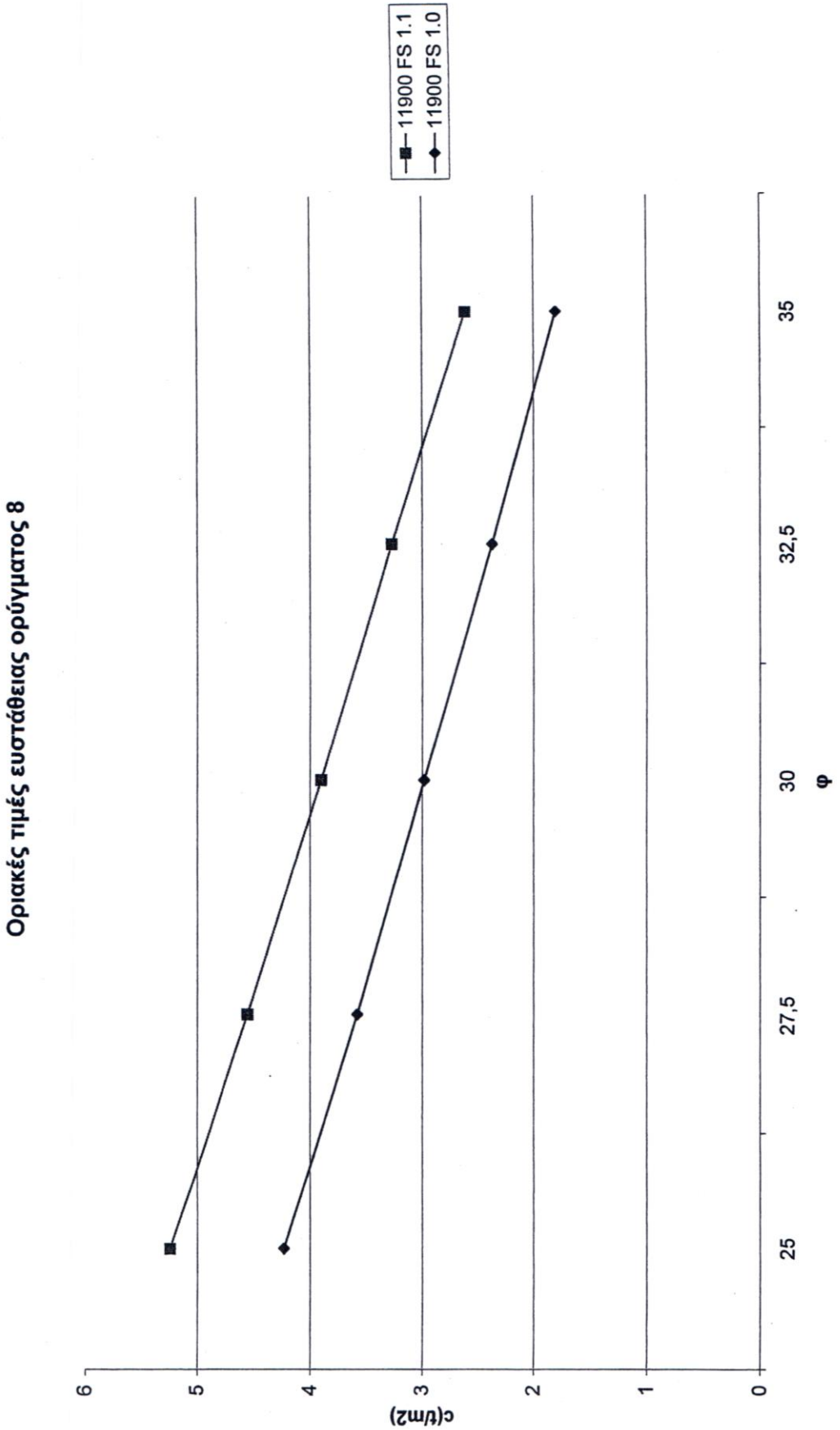
26

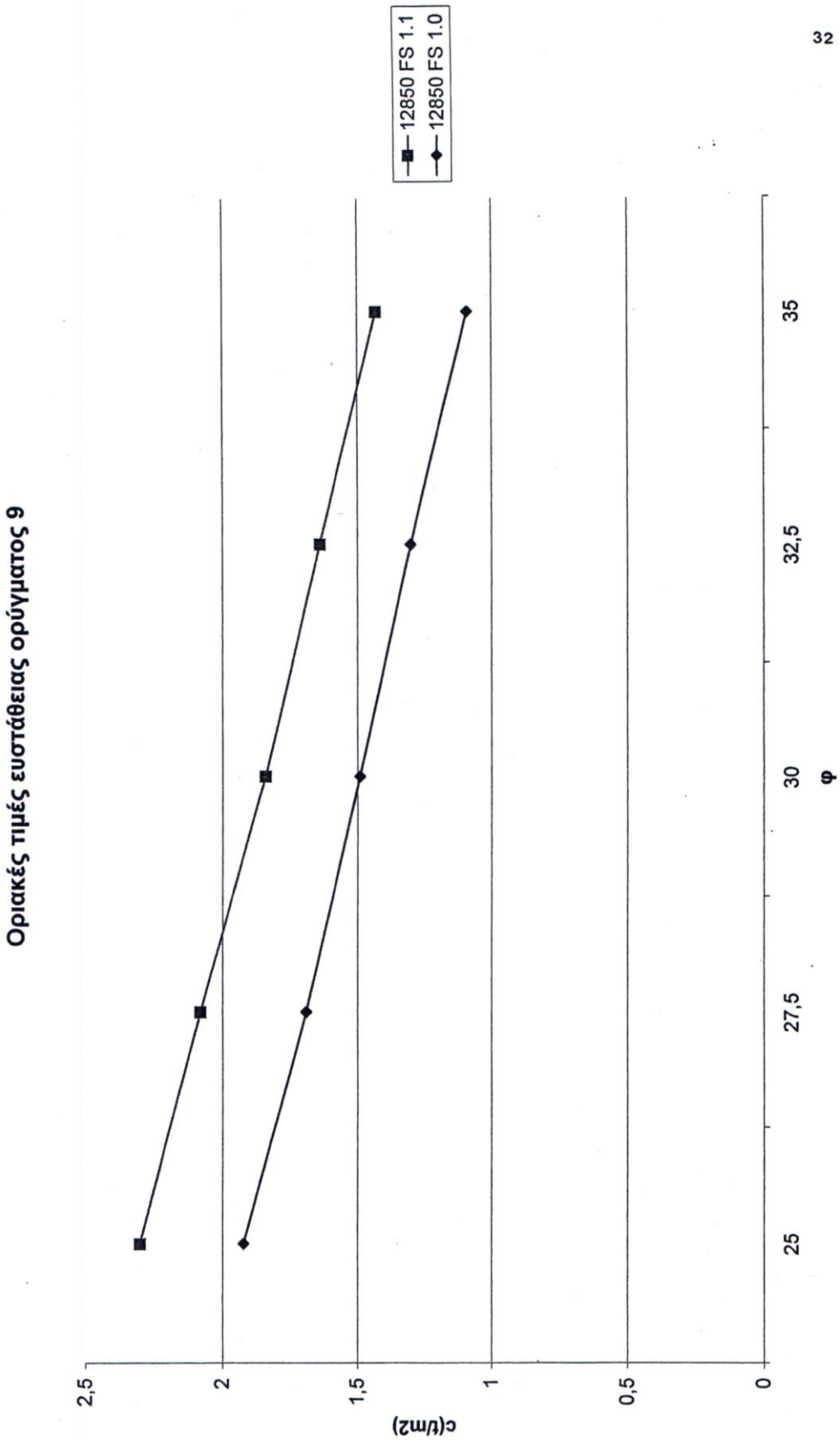


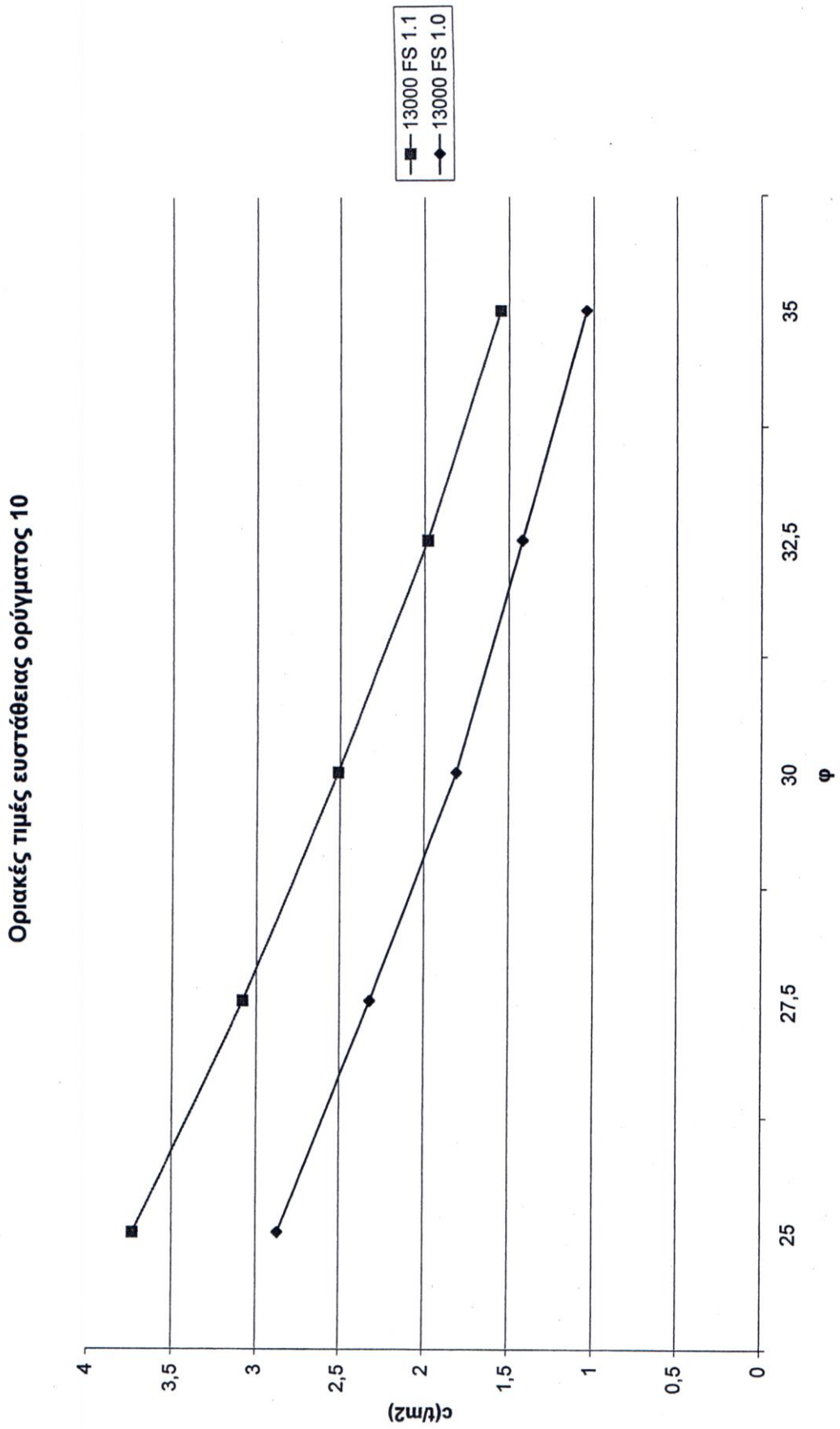


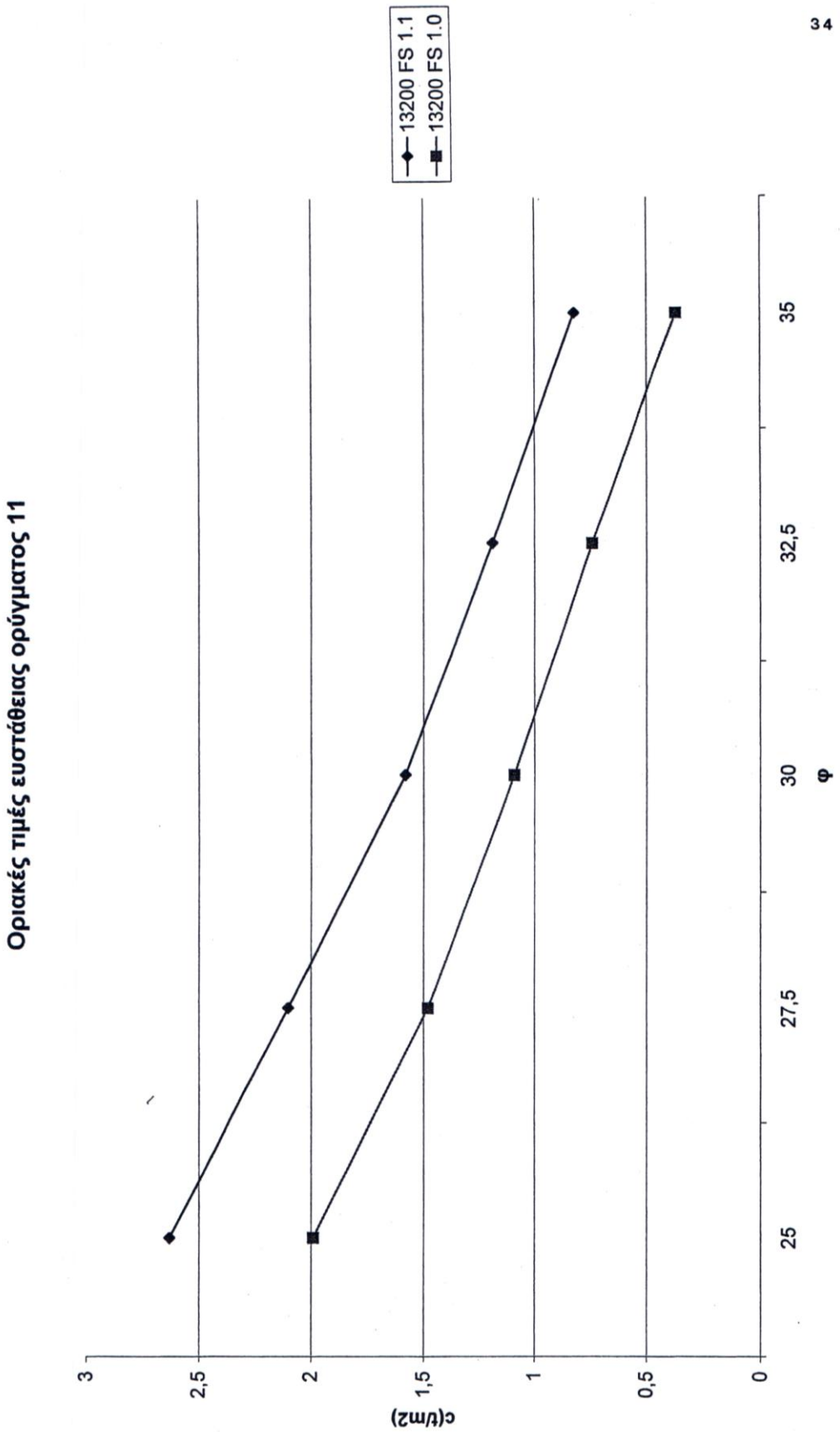




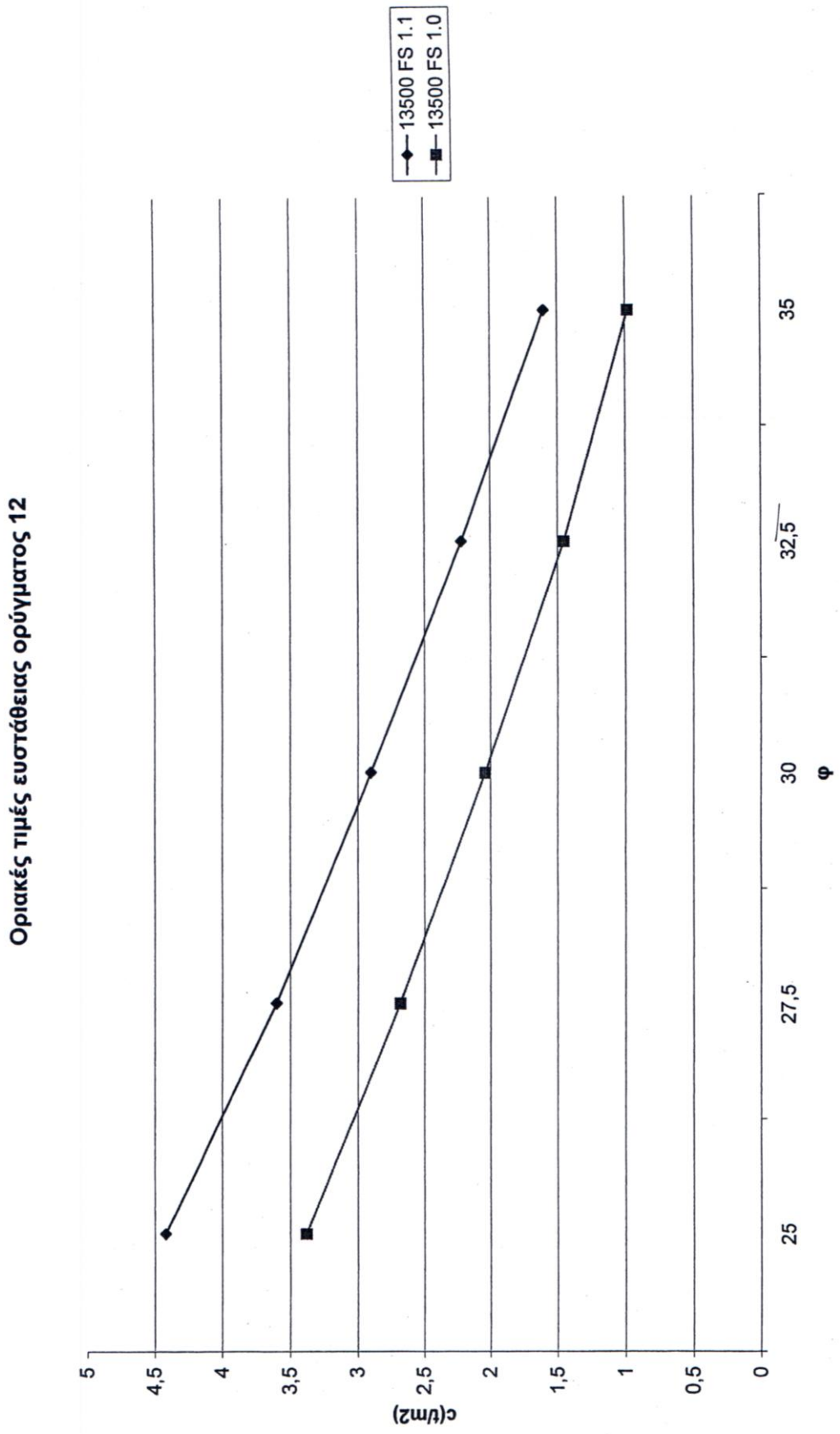


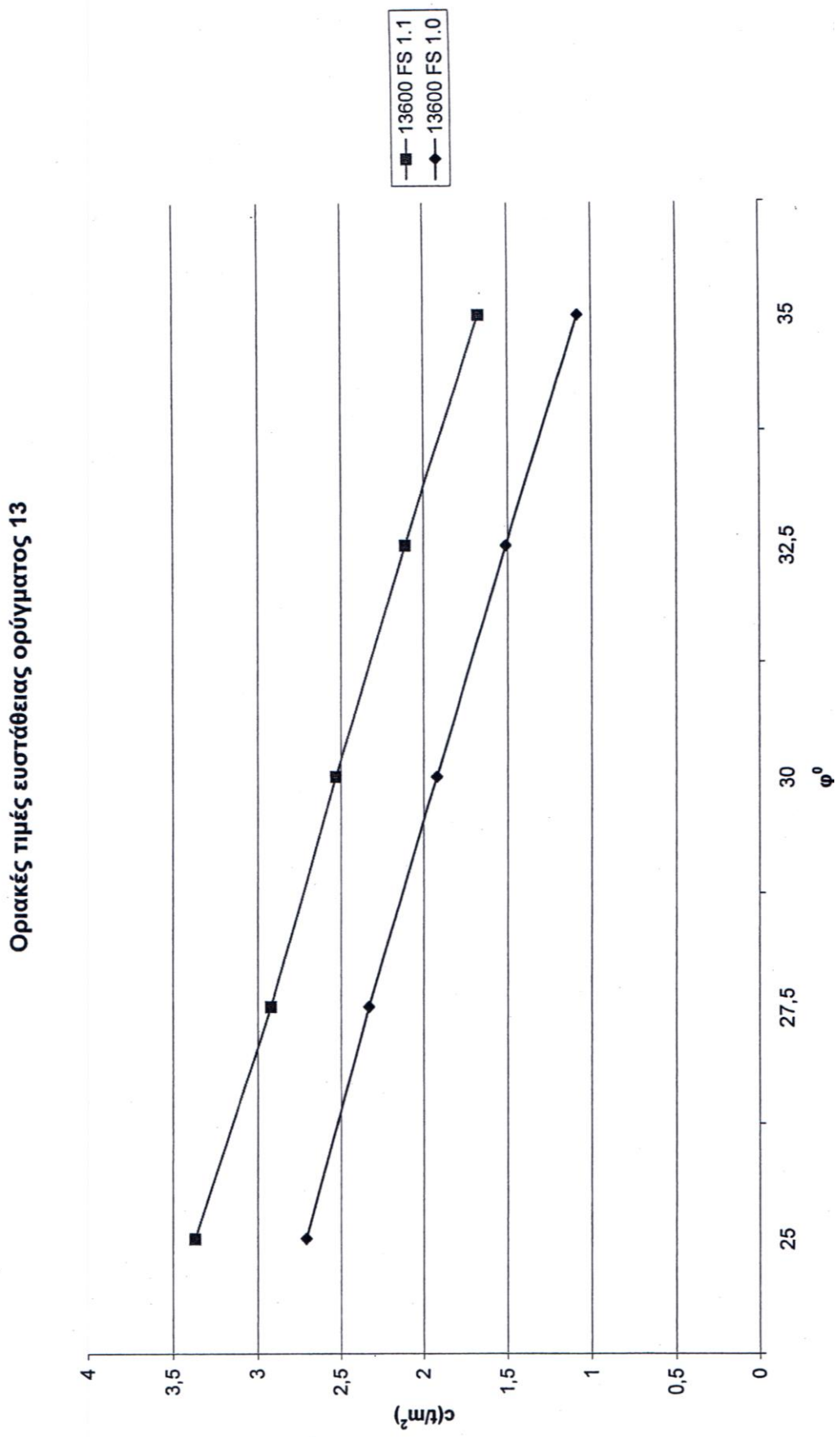


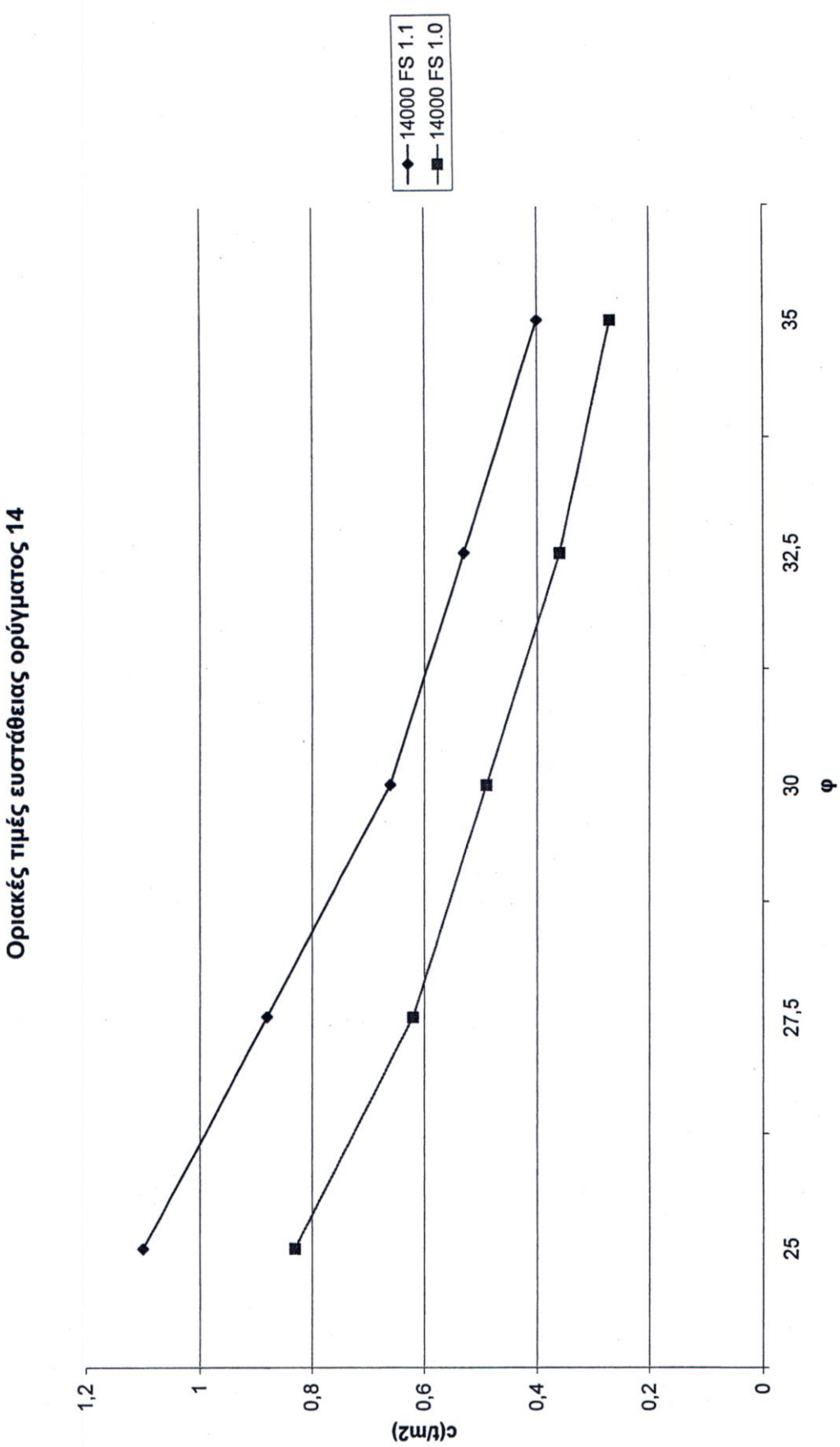


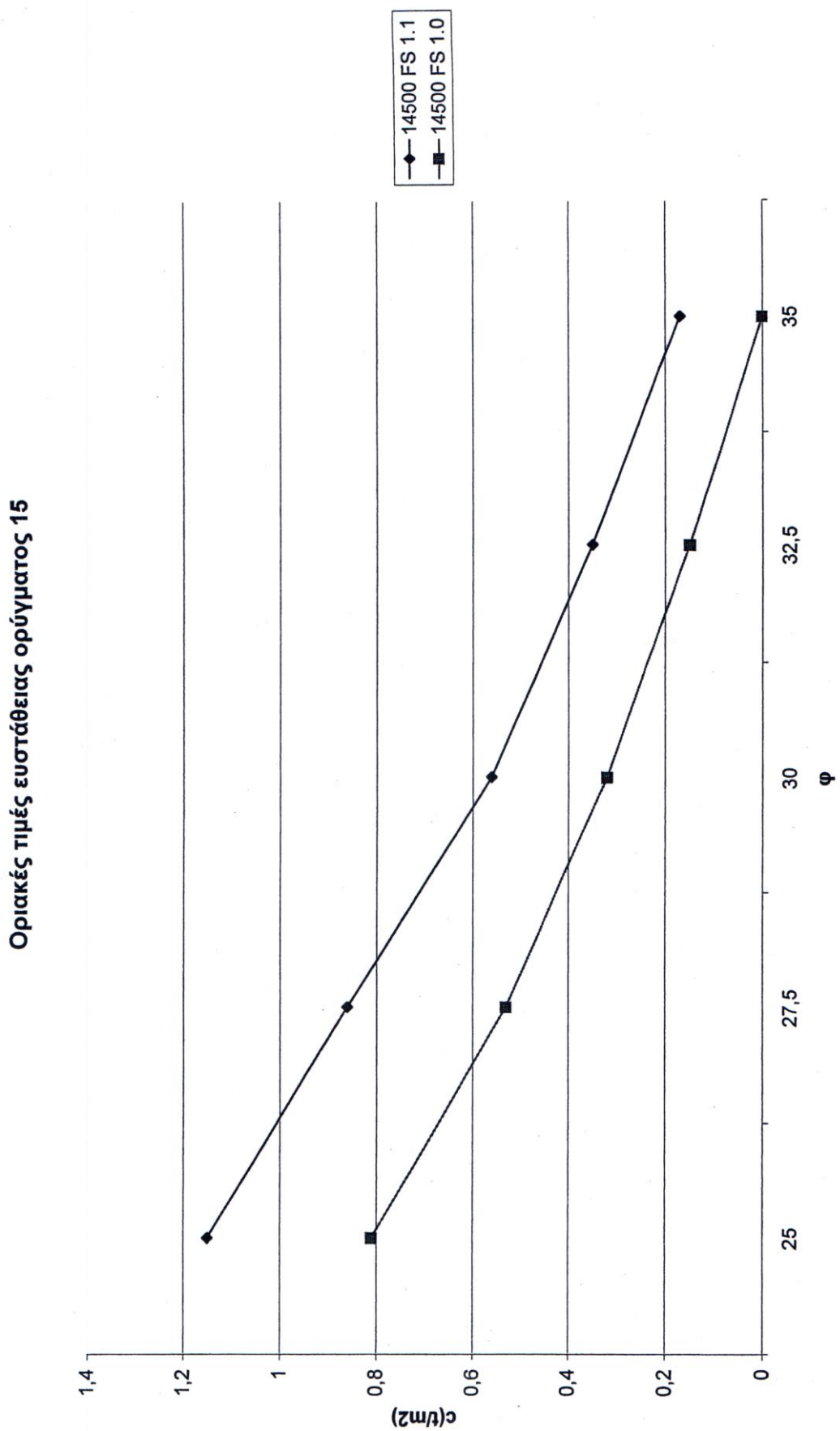


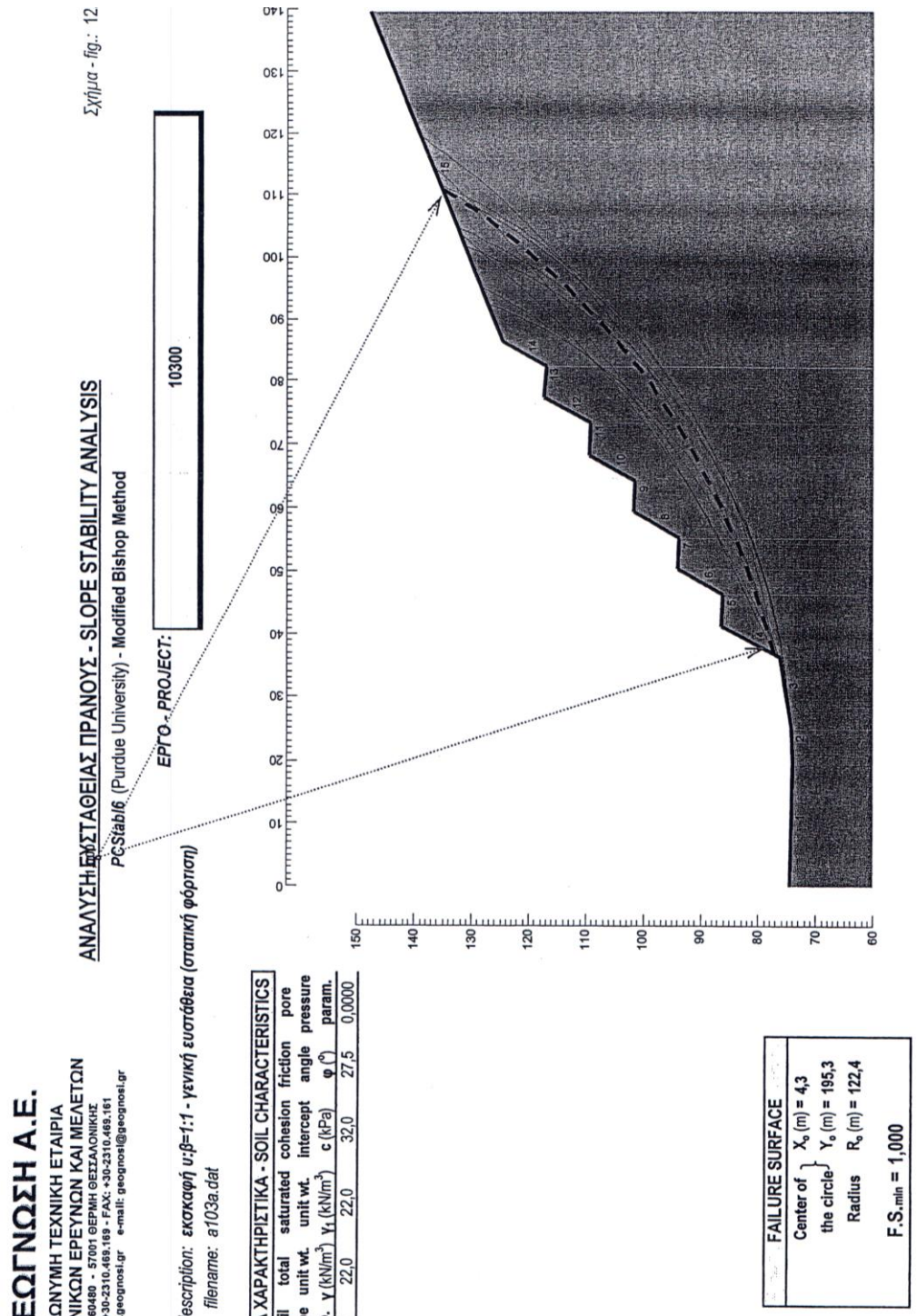
34

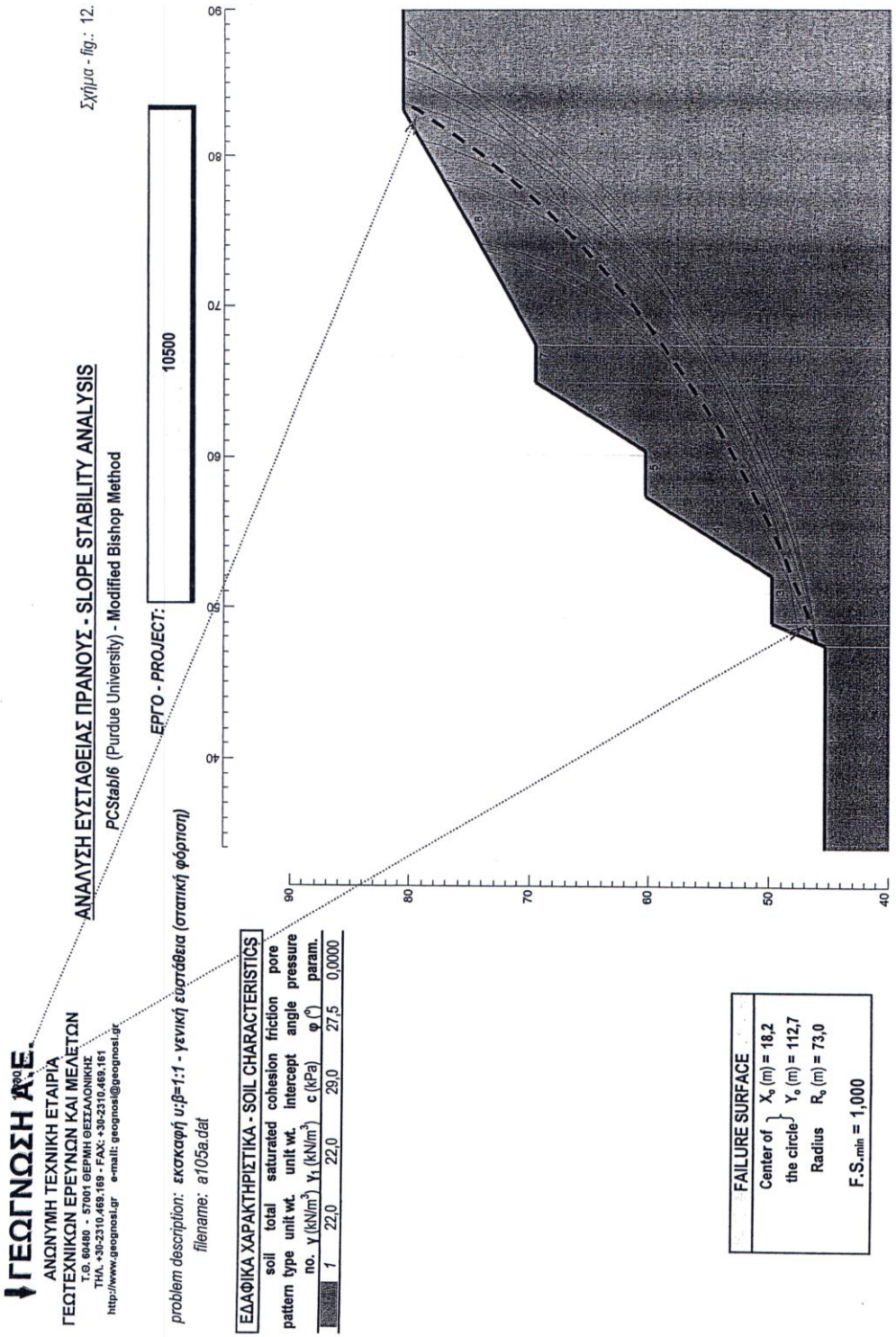




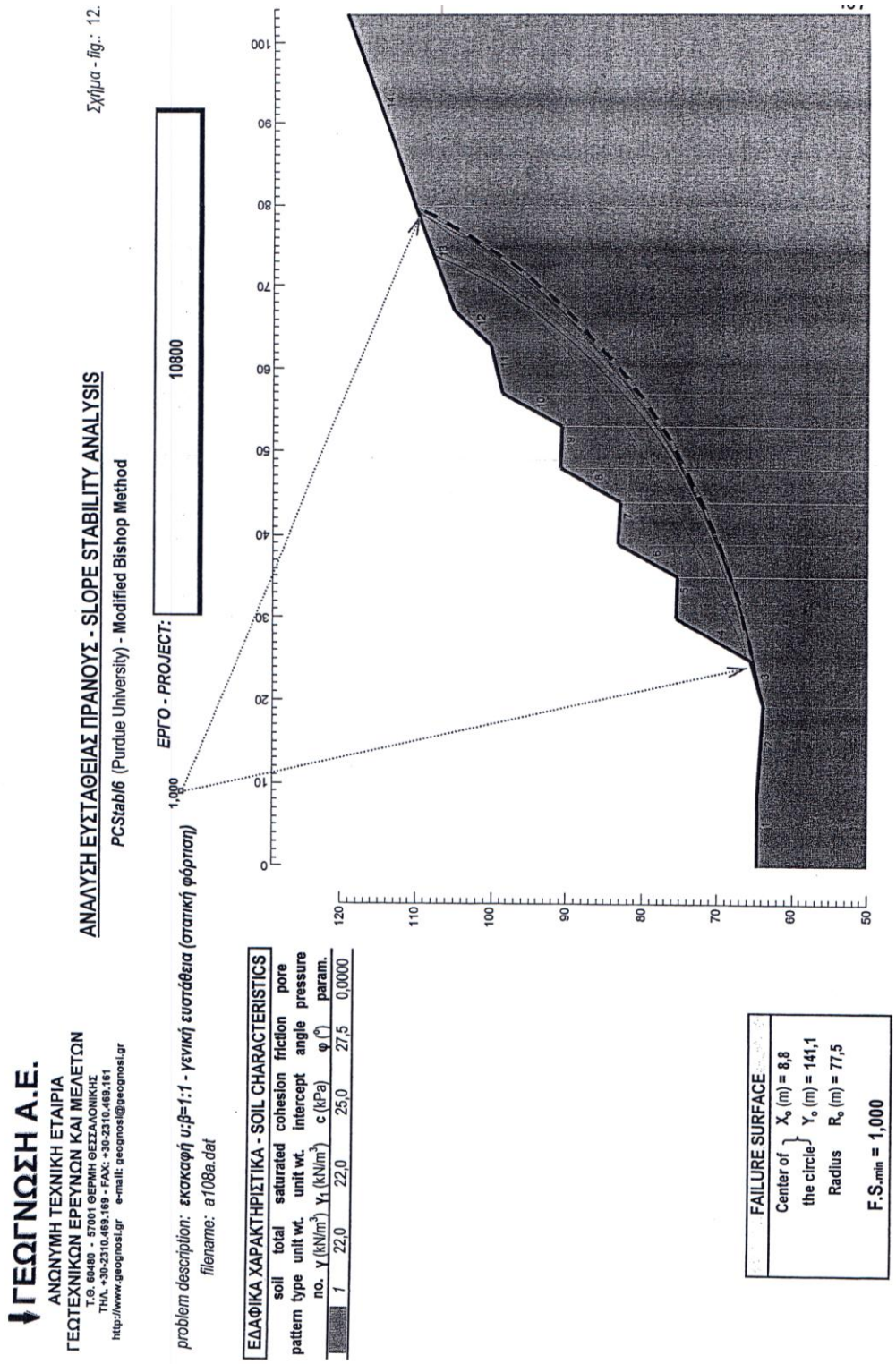




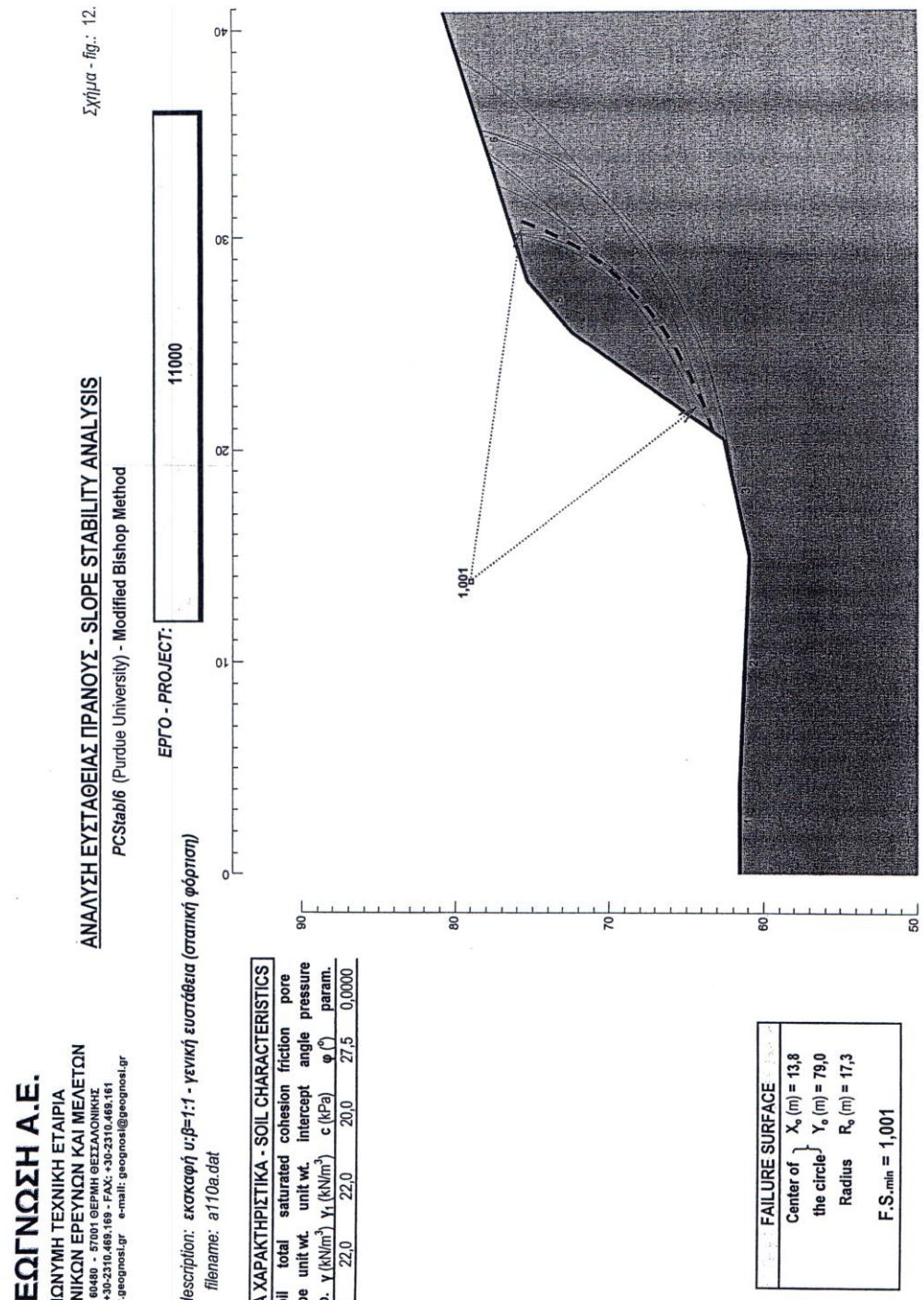




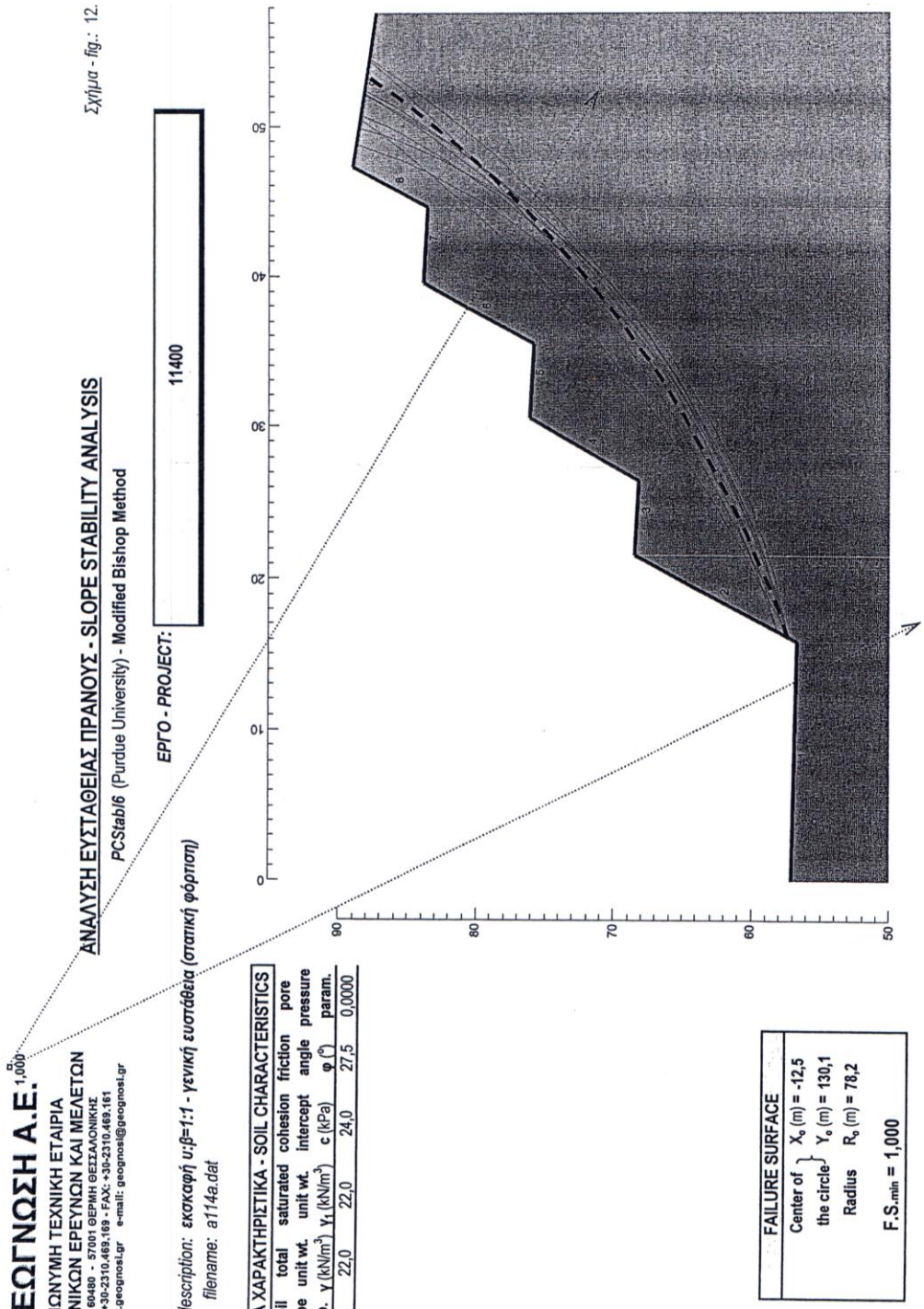
Σχήμα - fig.: 12.

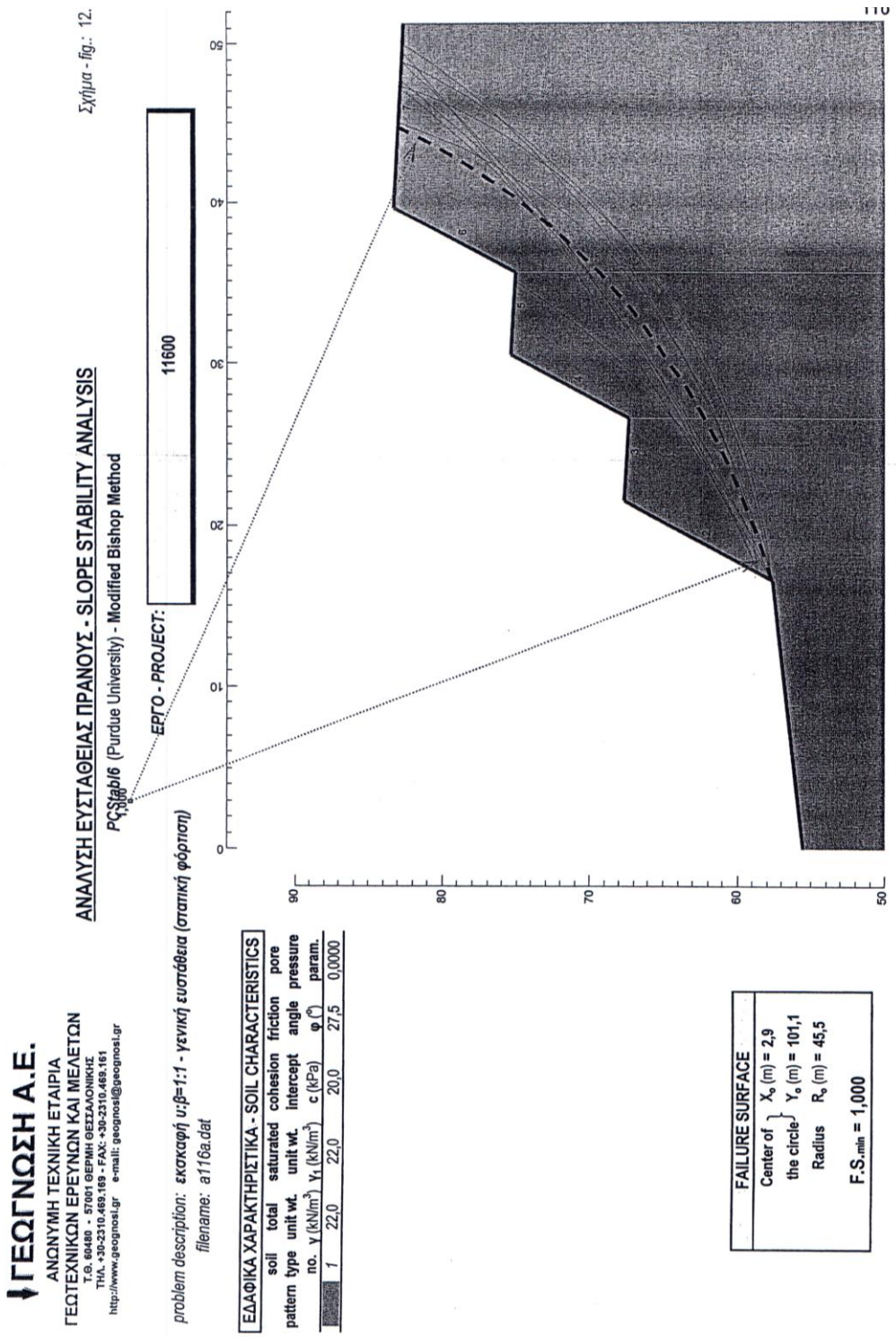


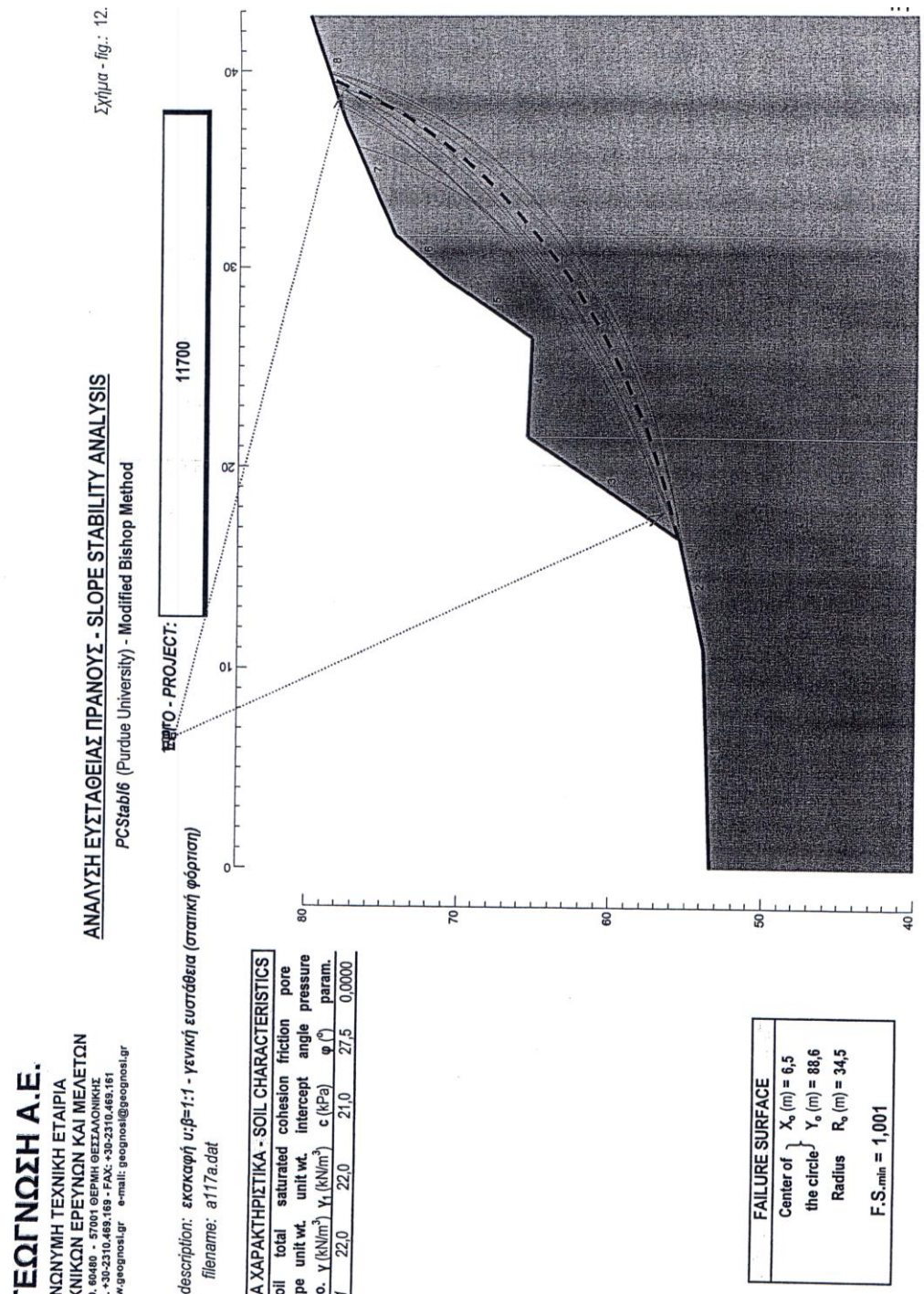
Σχήμα - fig.: 12.

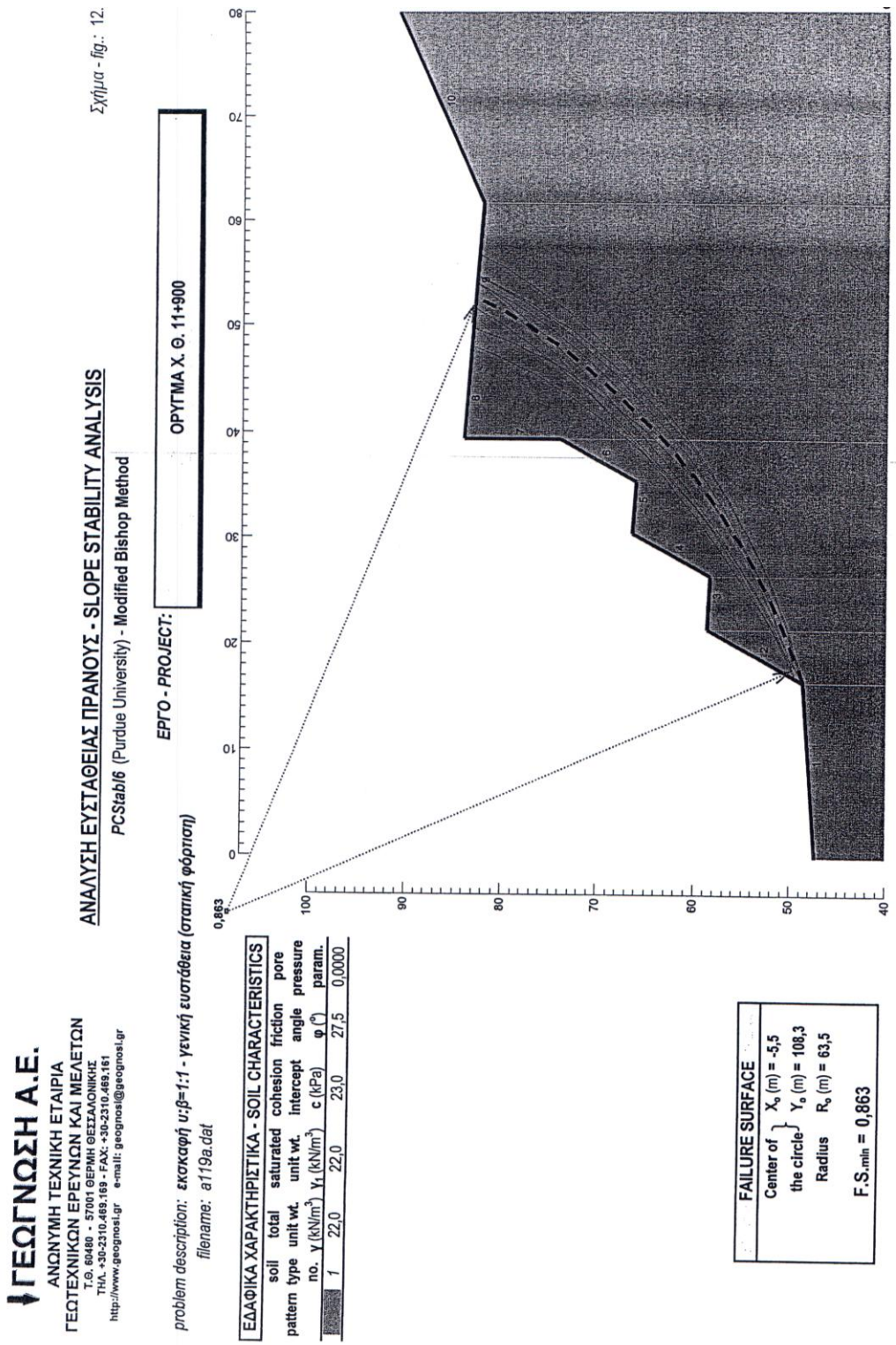


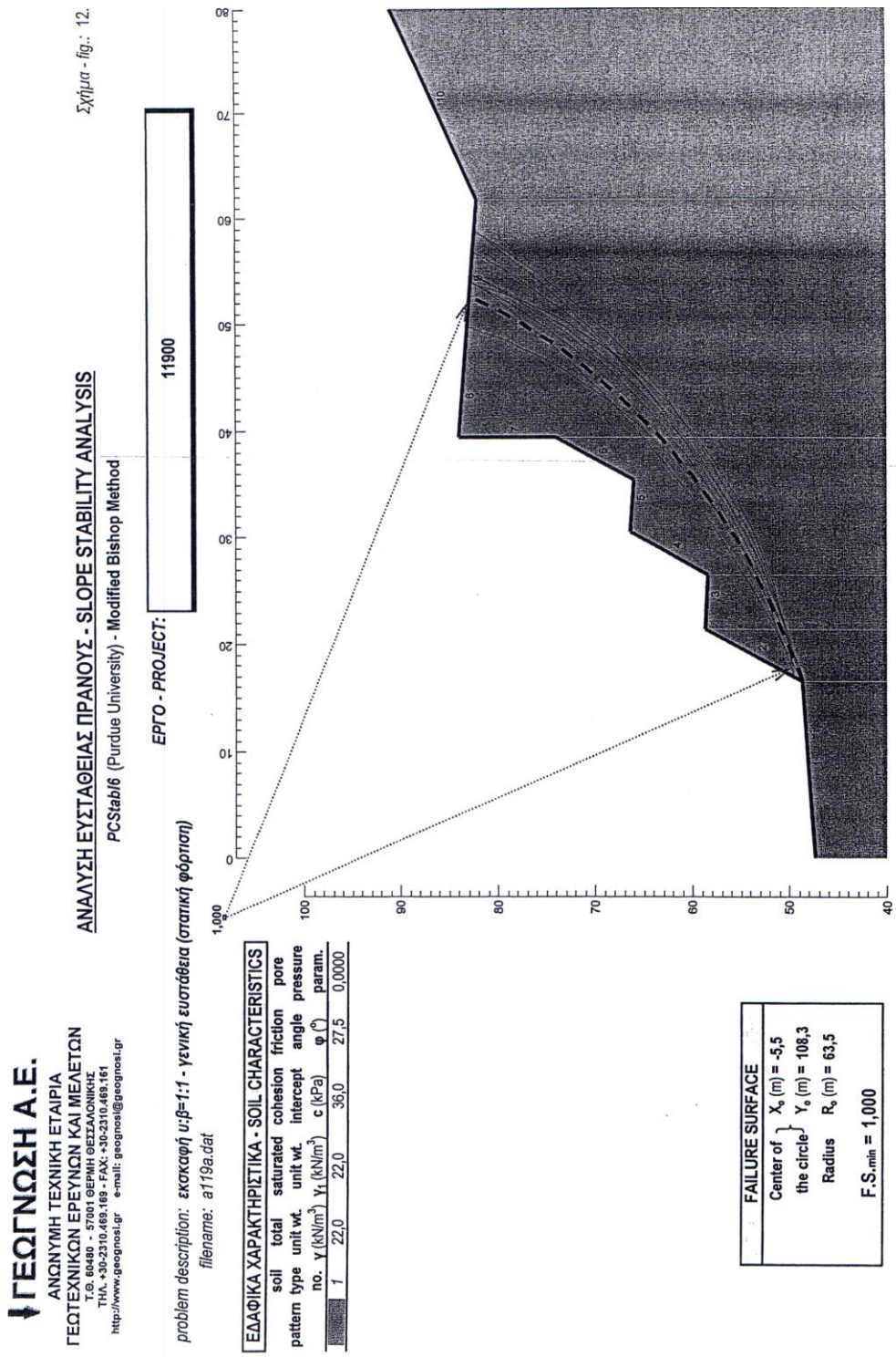
Σχήμα - fig.: 12.

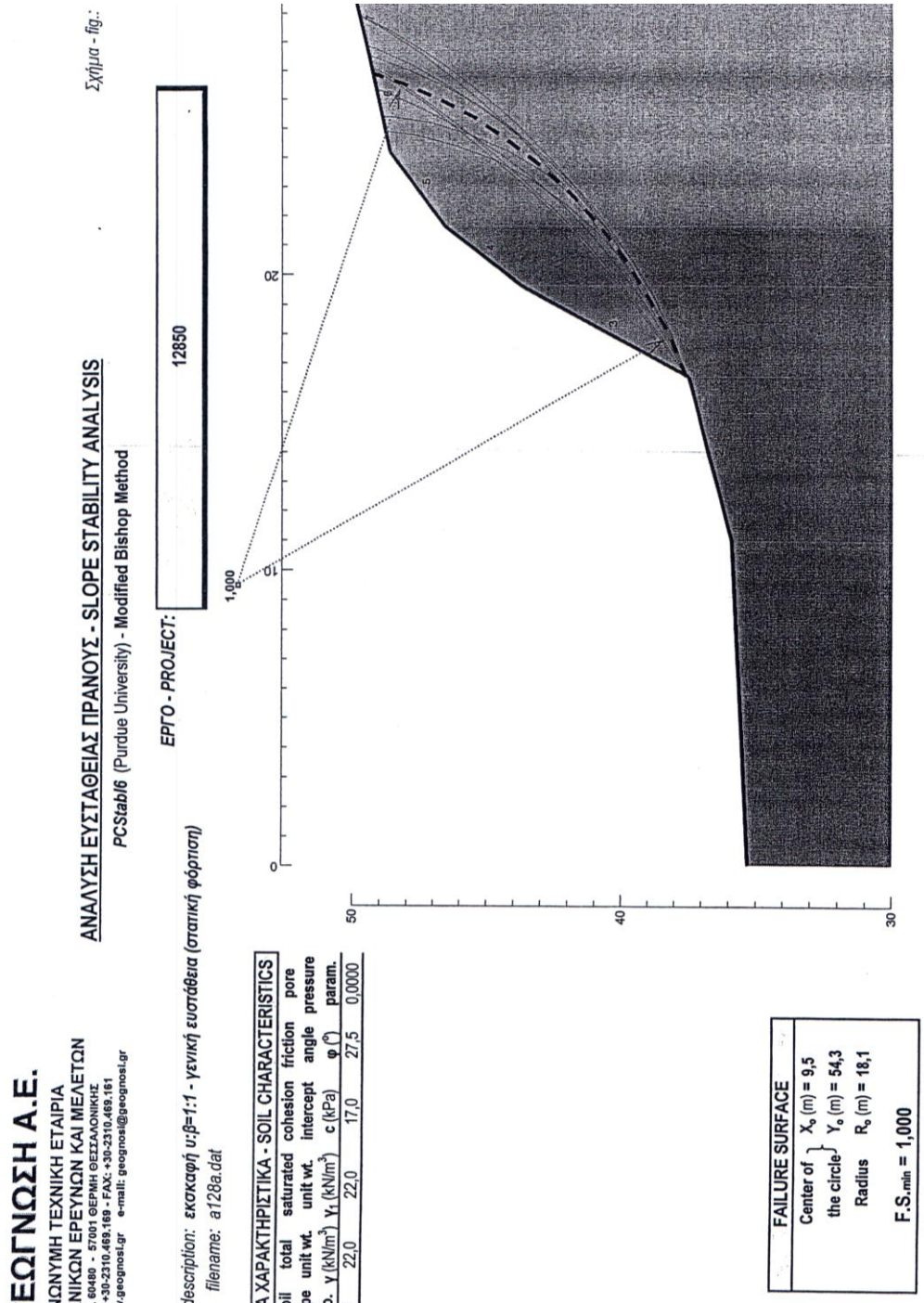


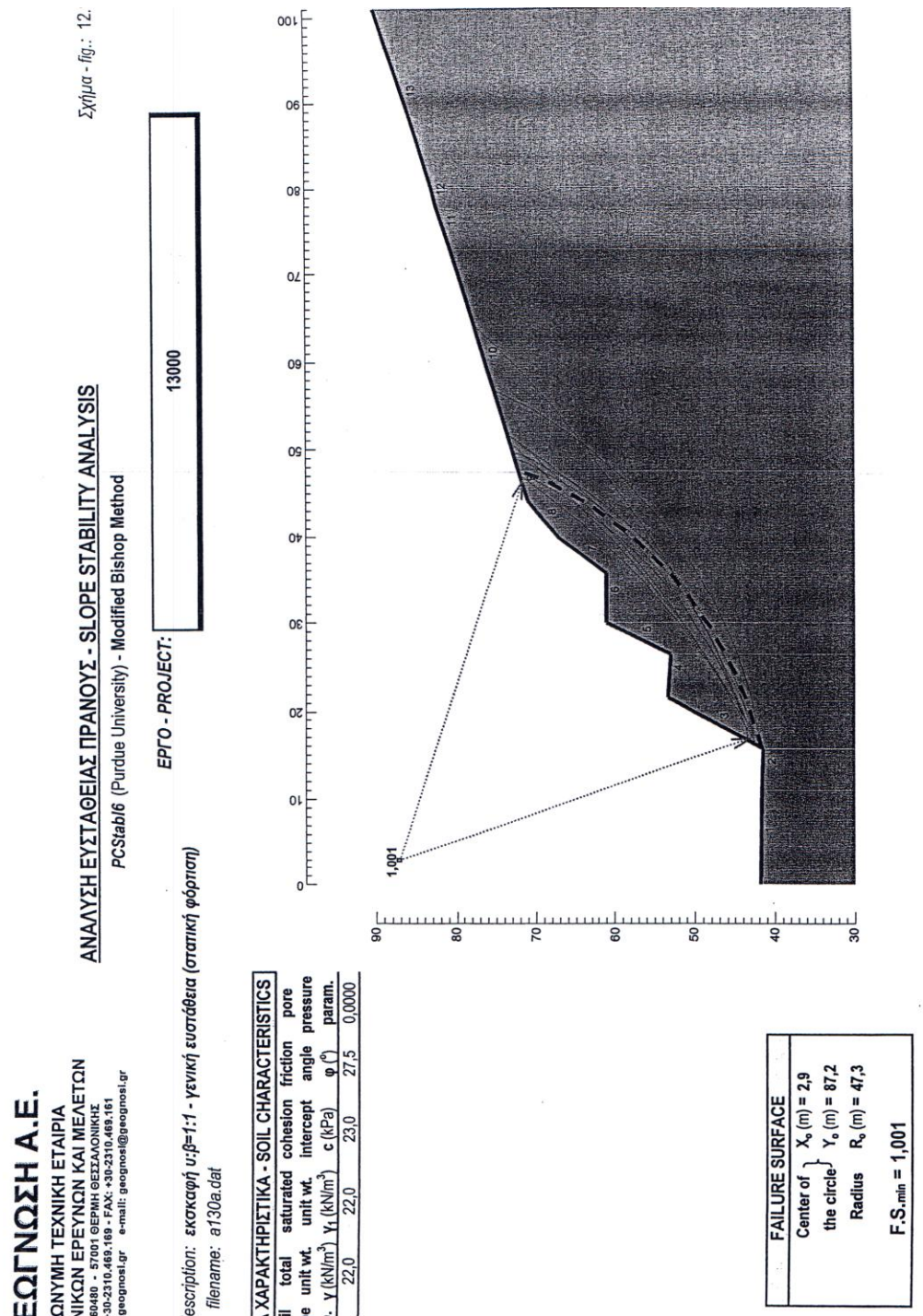


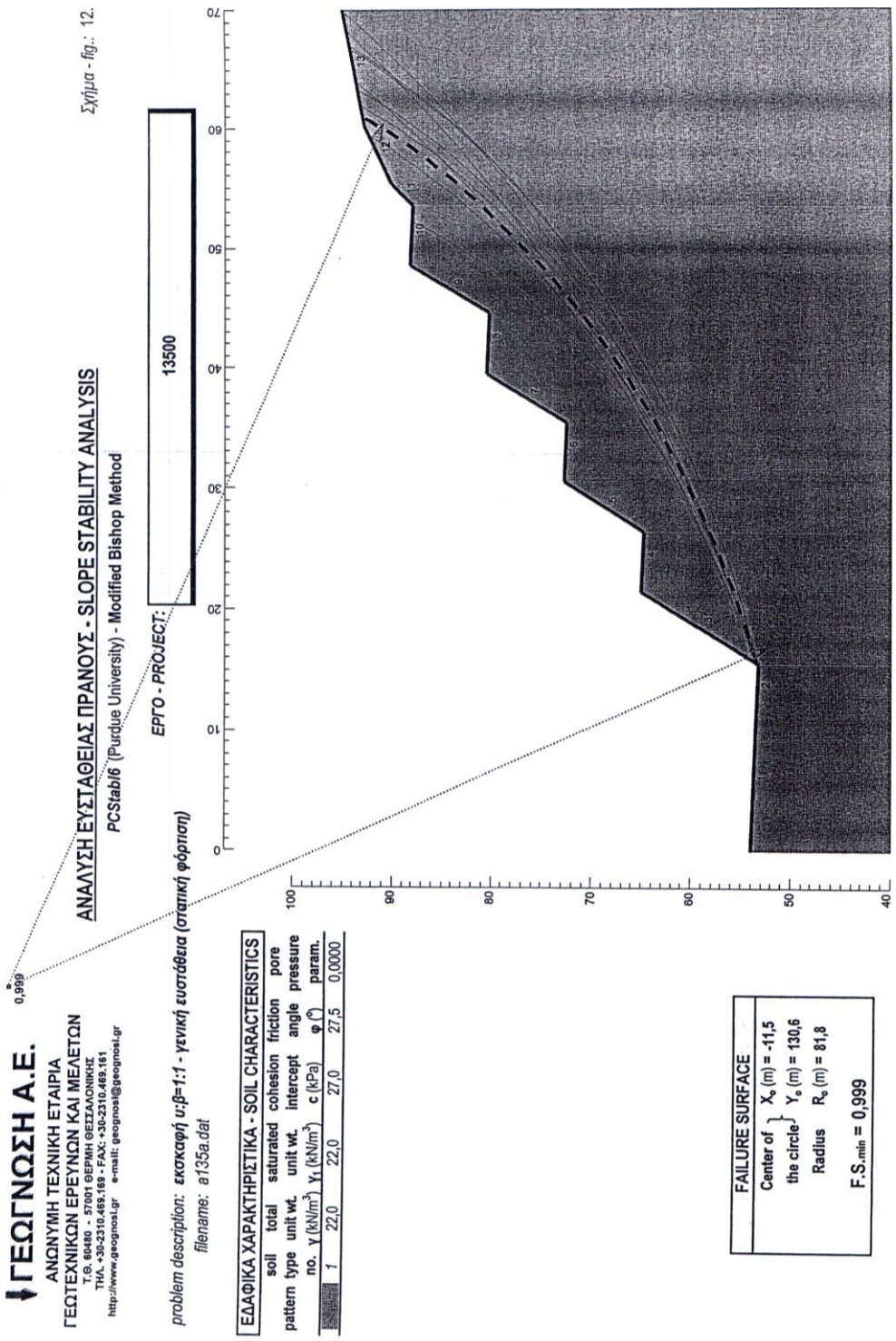


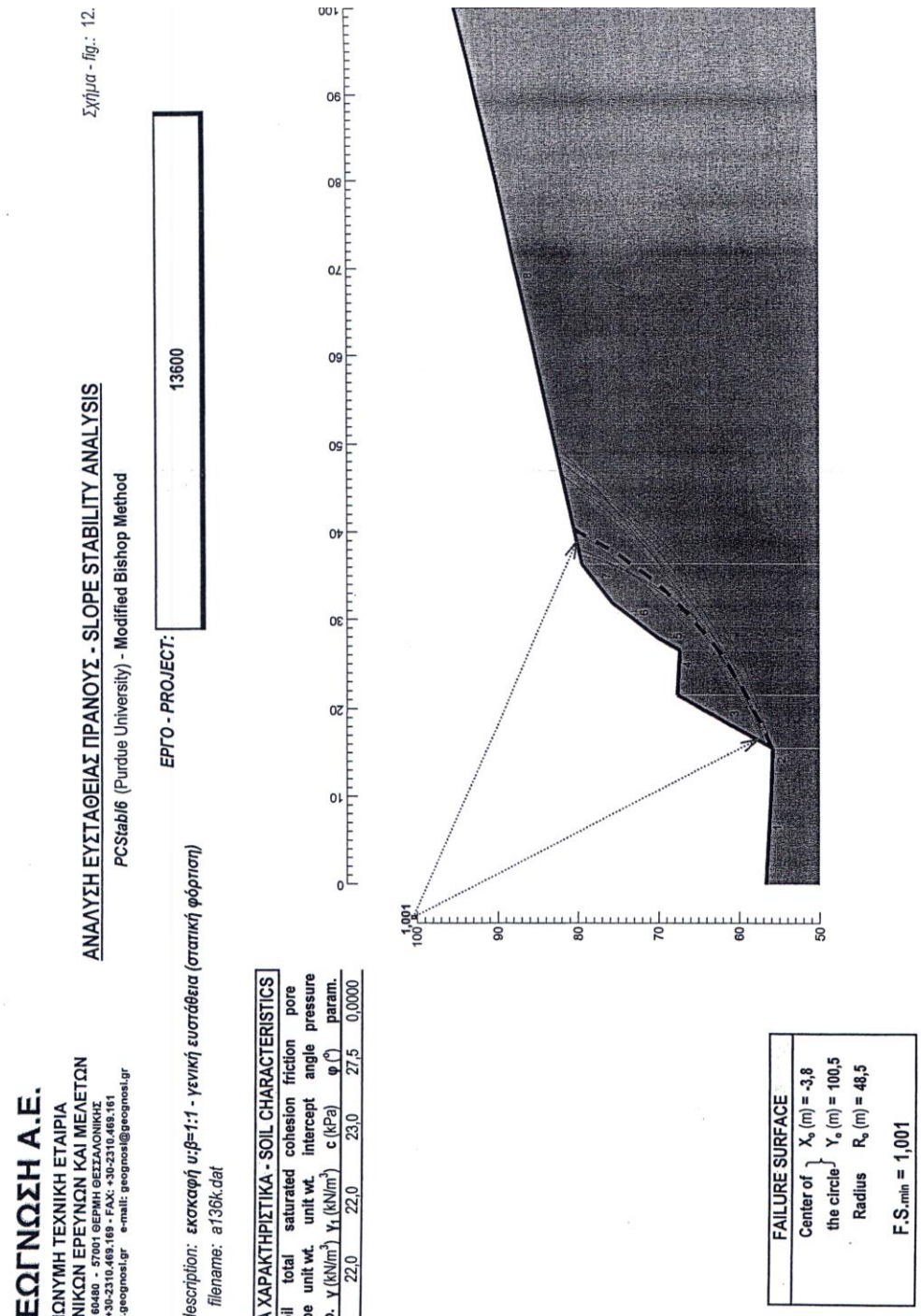


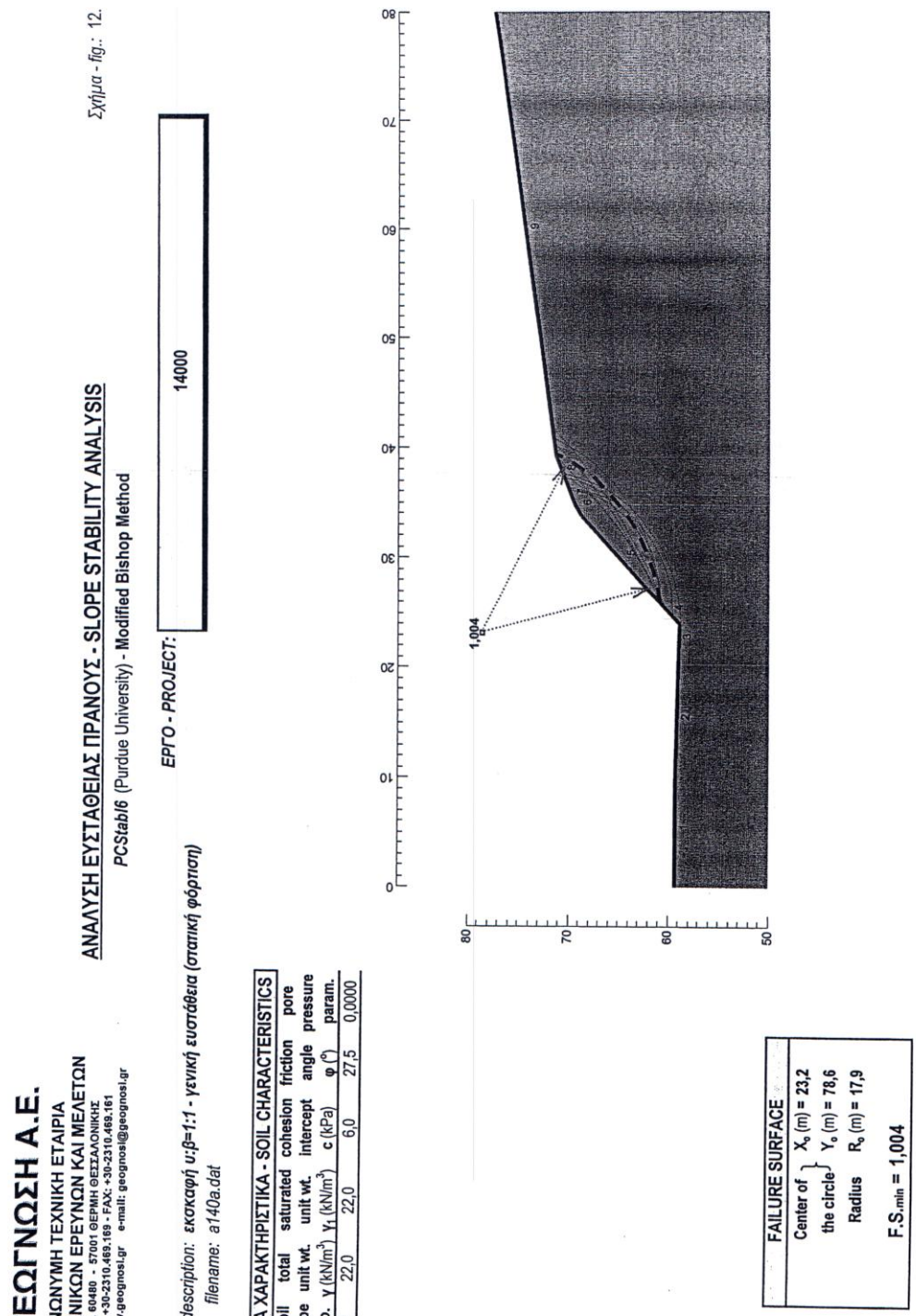




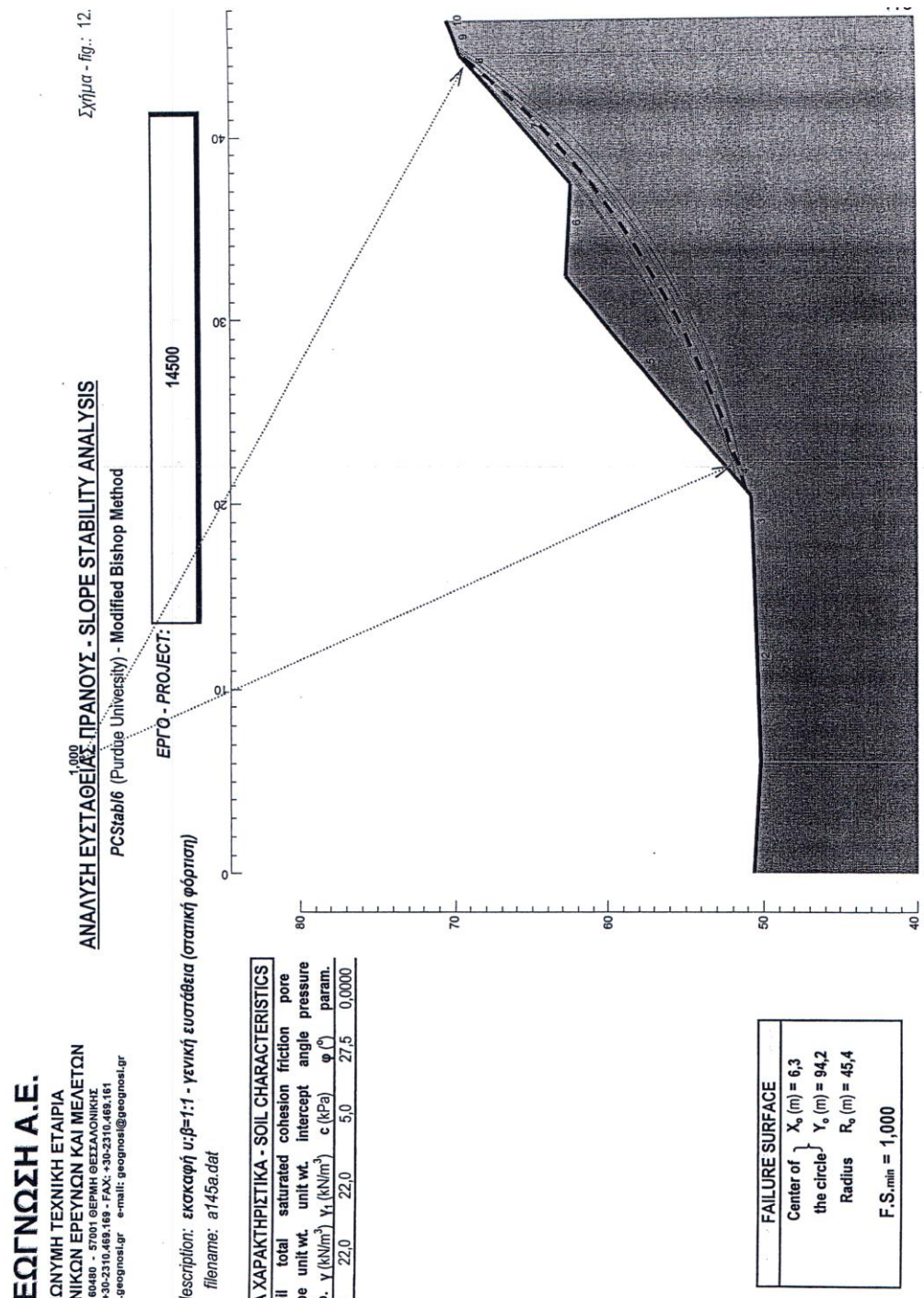


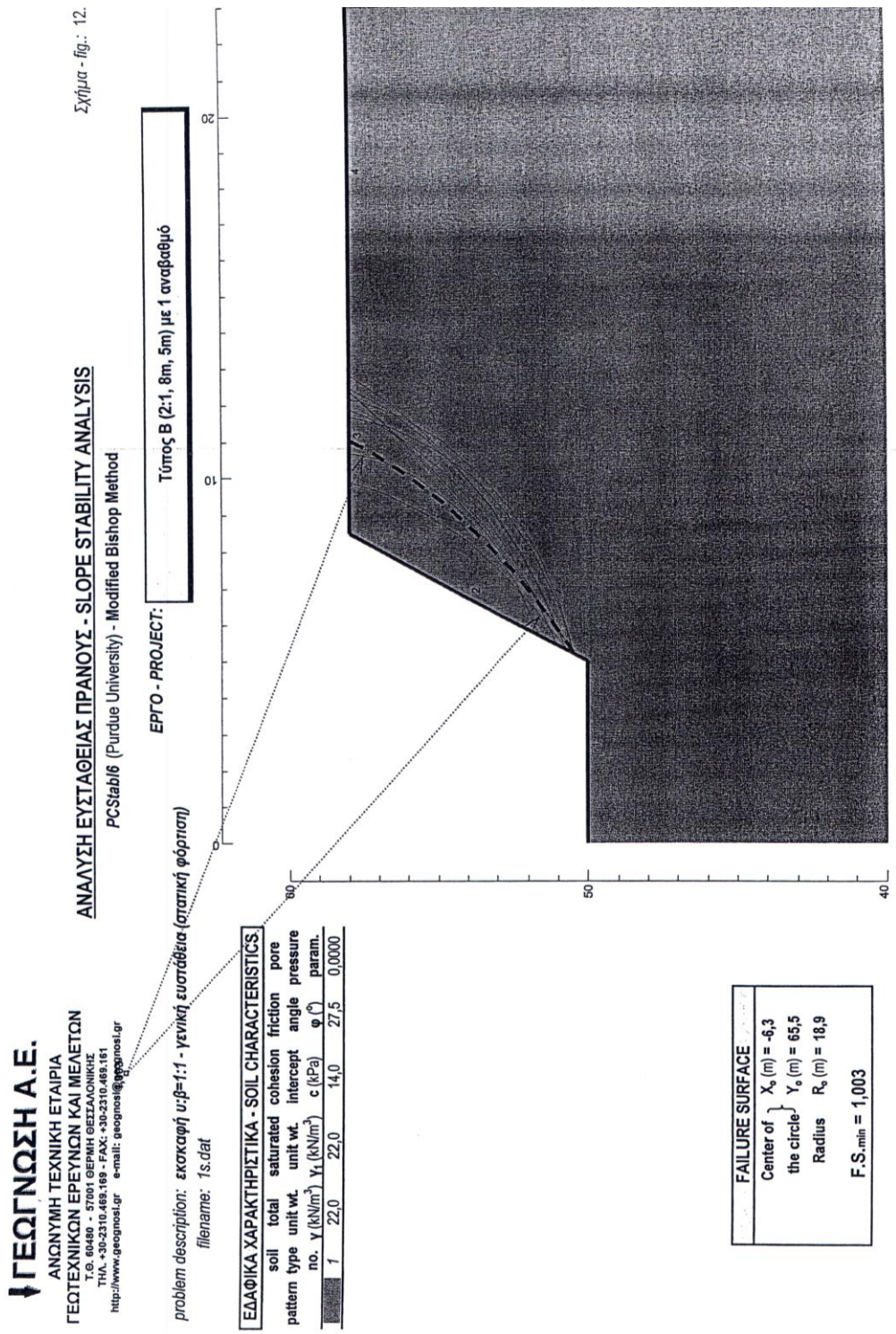


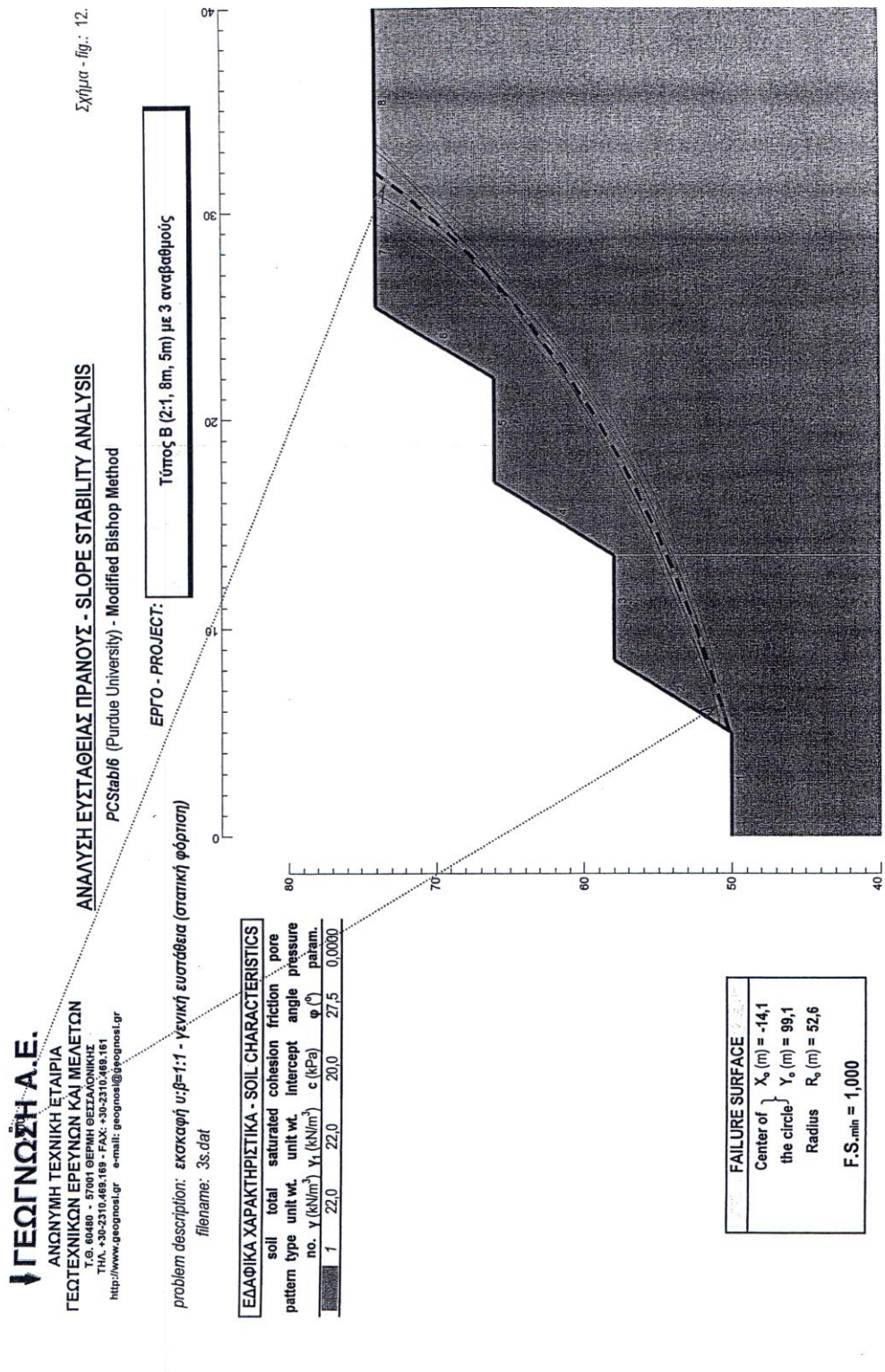


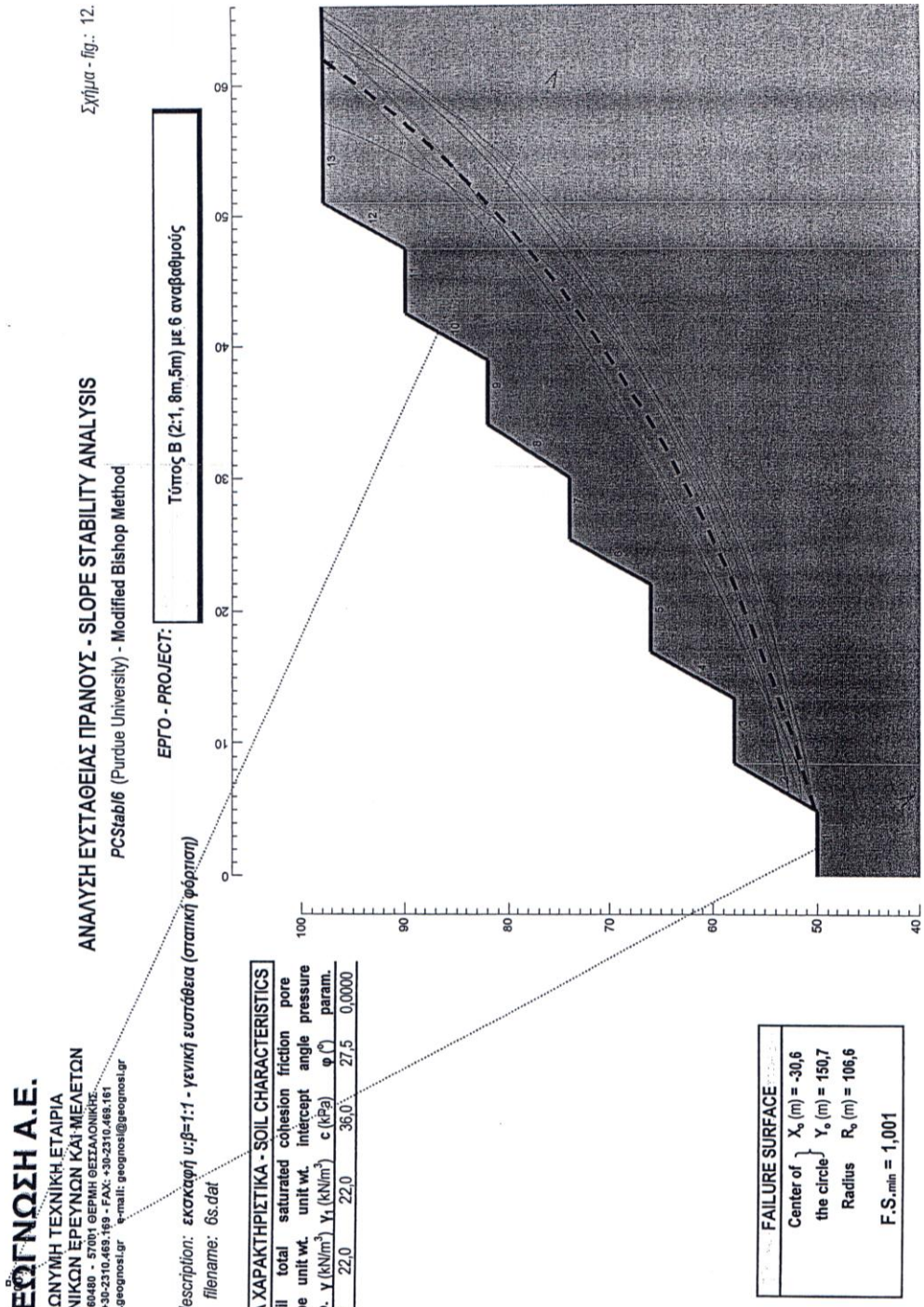


Σχήμα - fig.: 12.



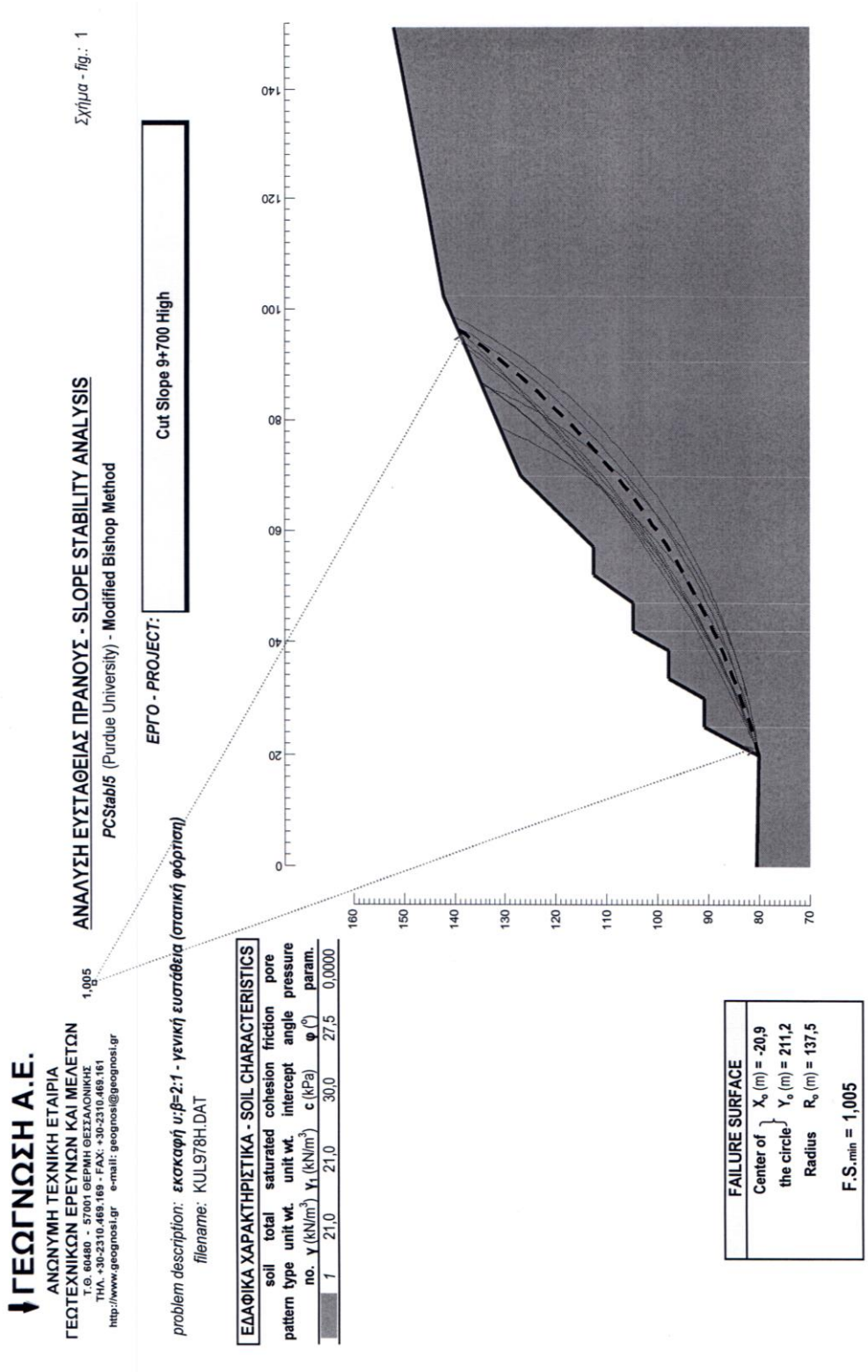


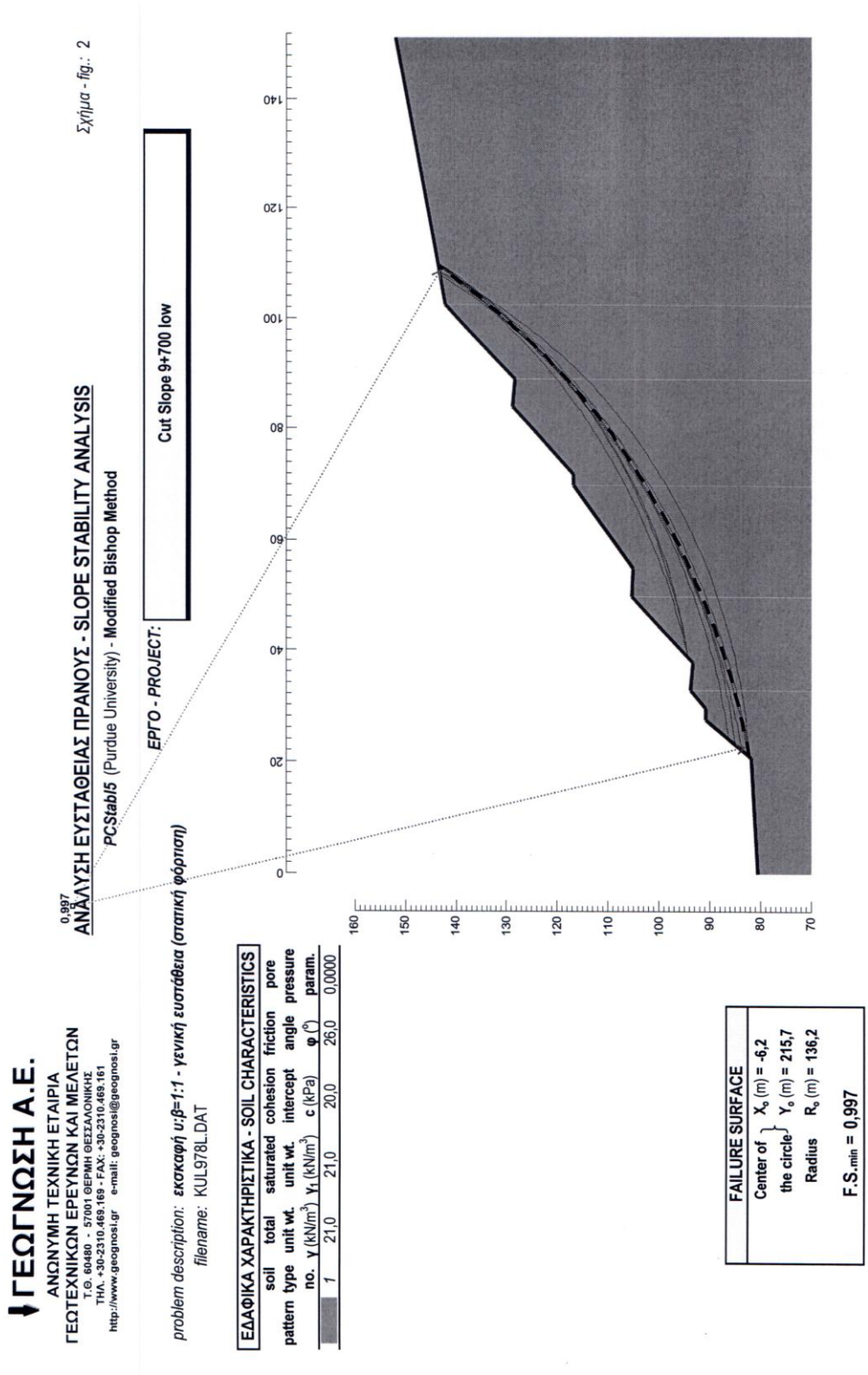


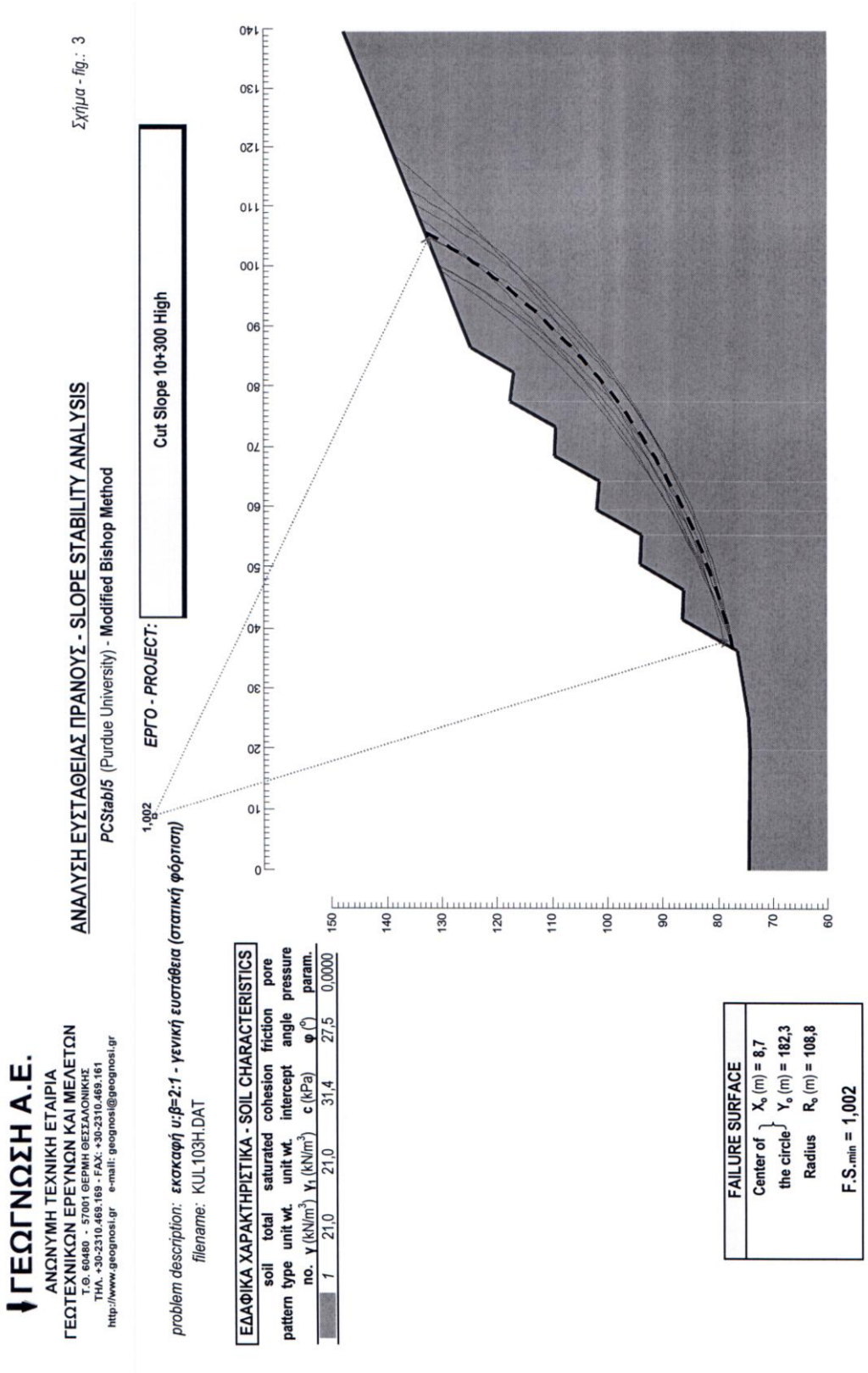


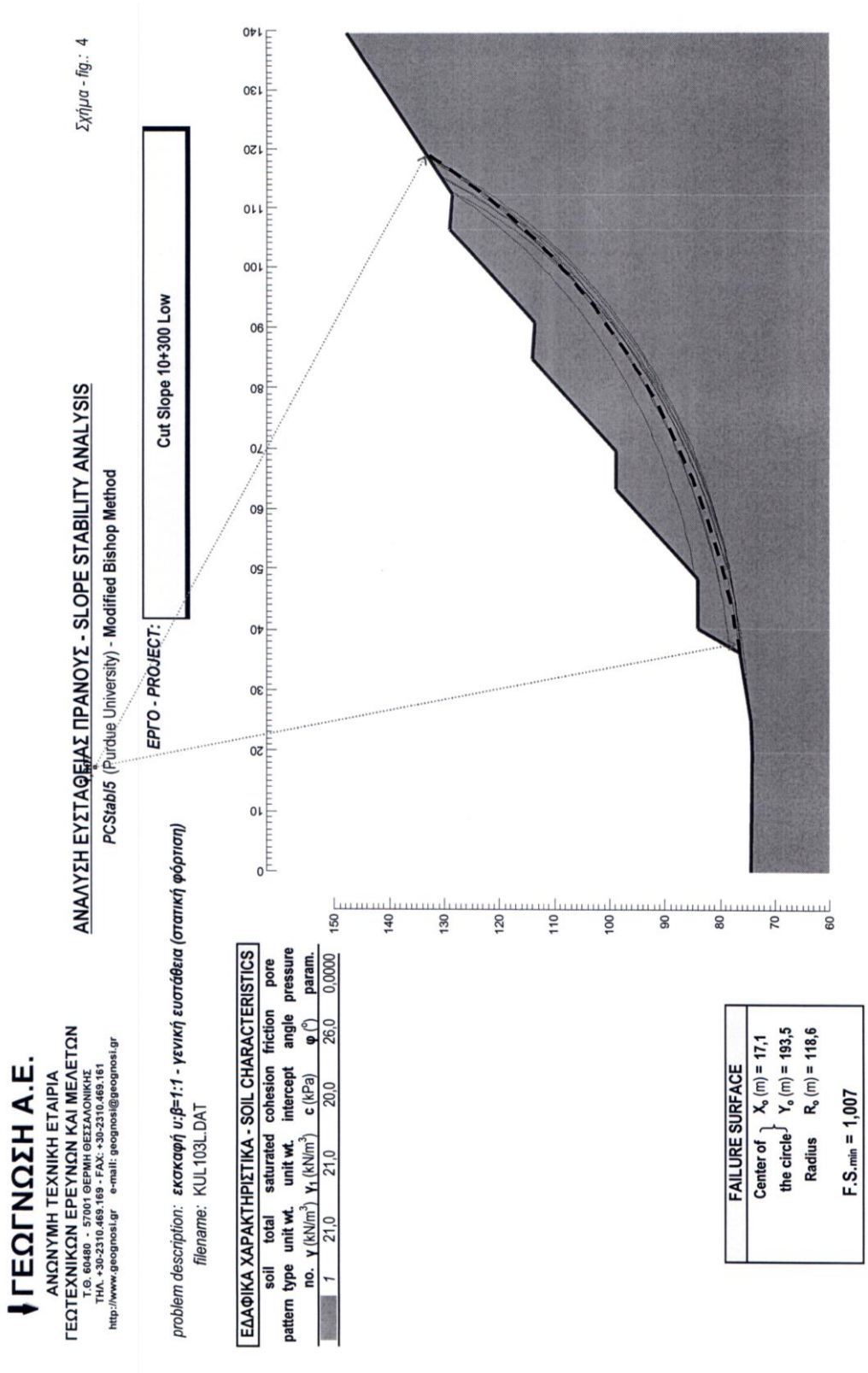
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

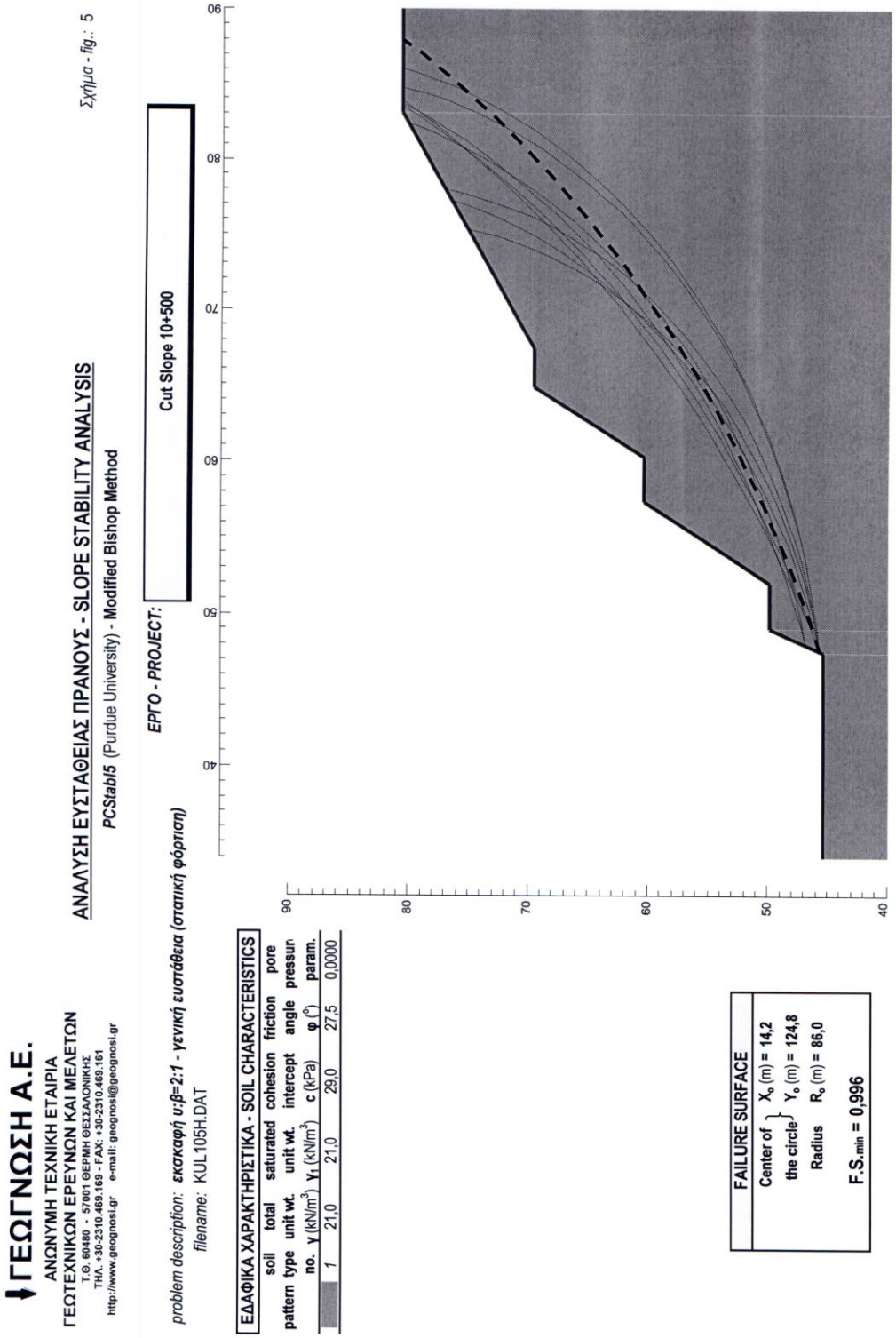
Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας ανισοτροπικού εδαφικού υλικού

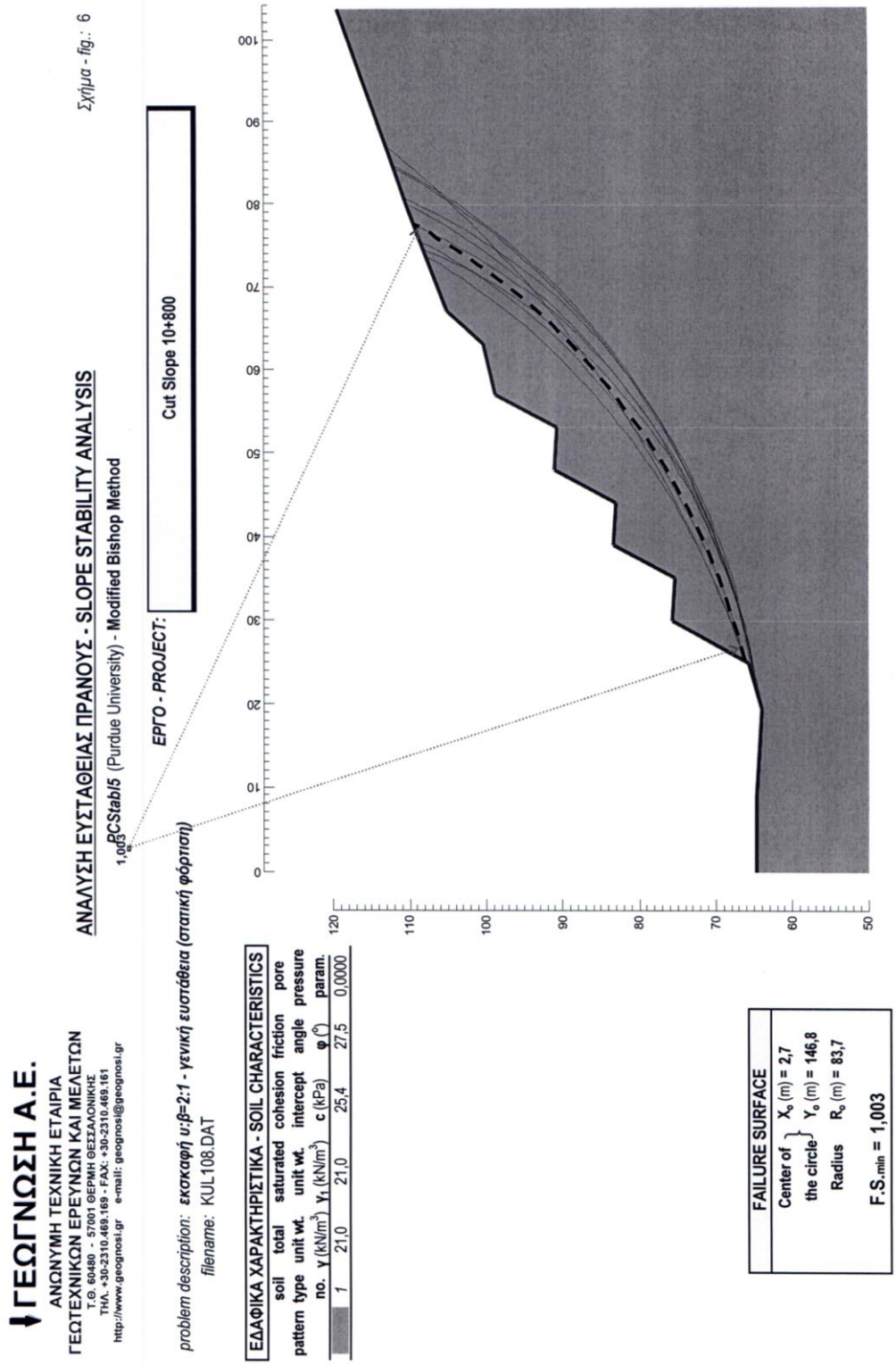


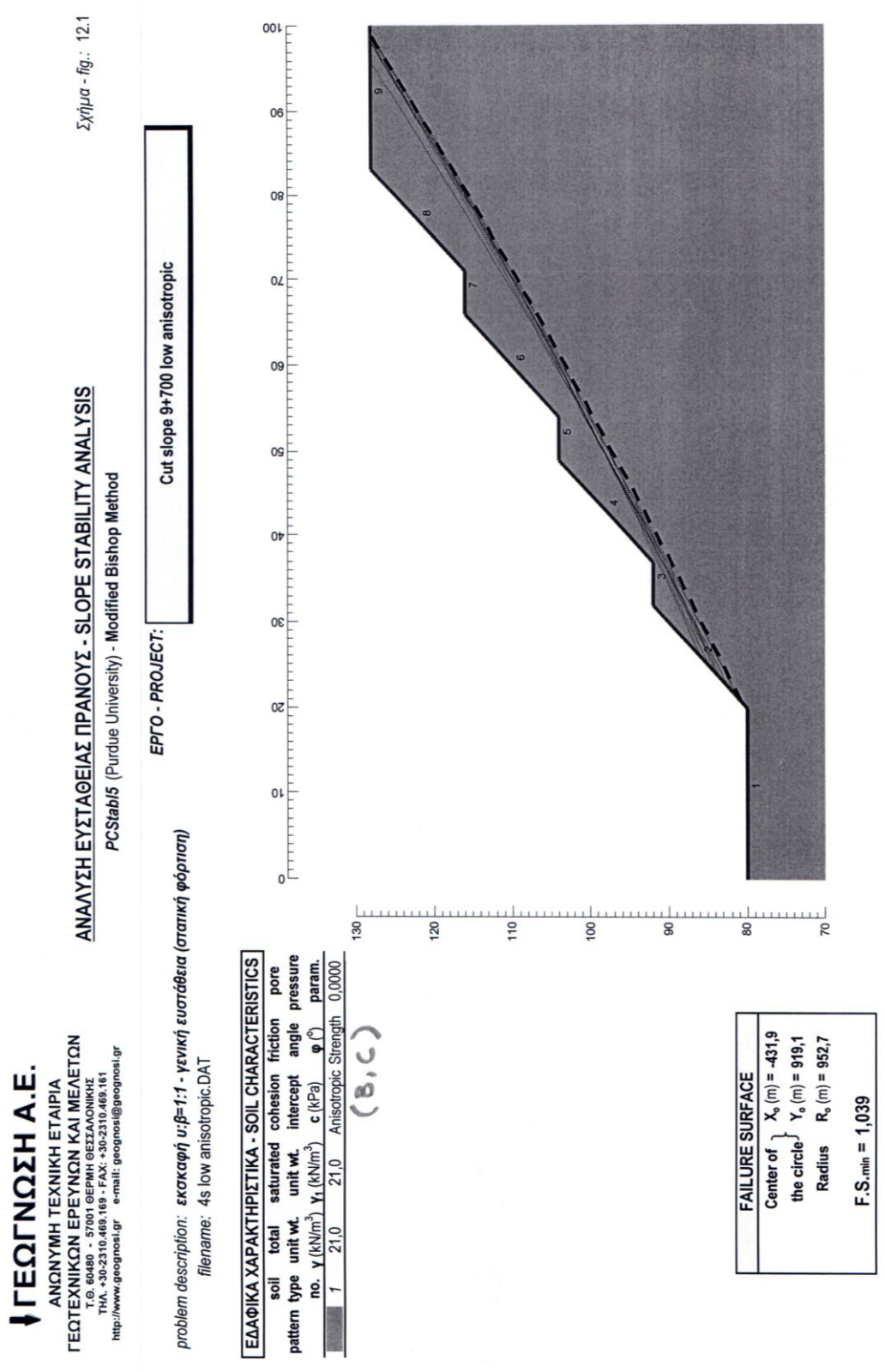


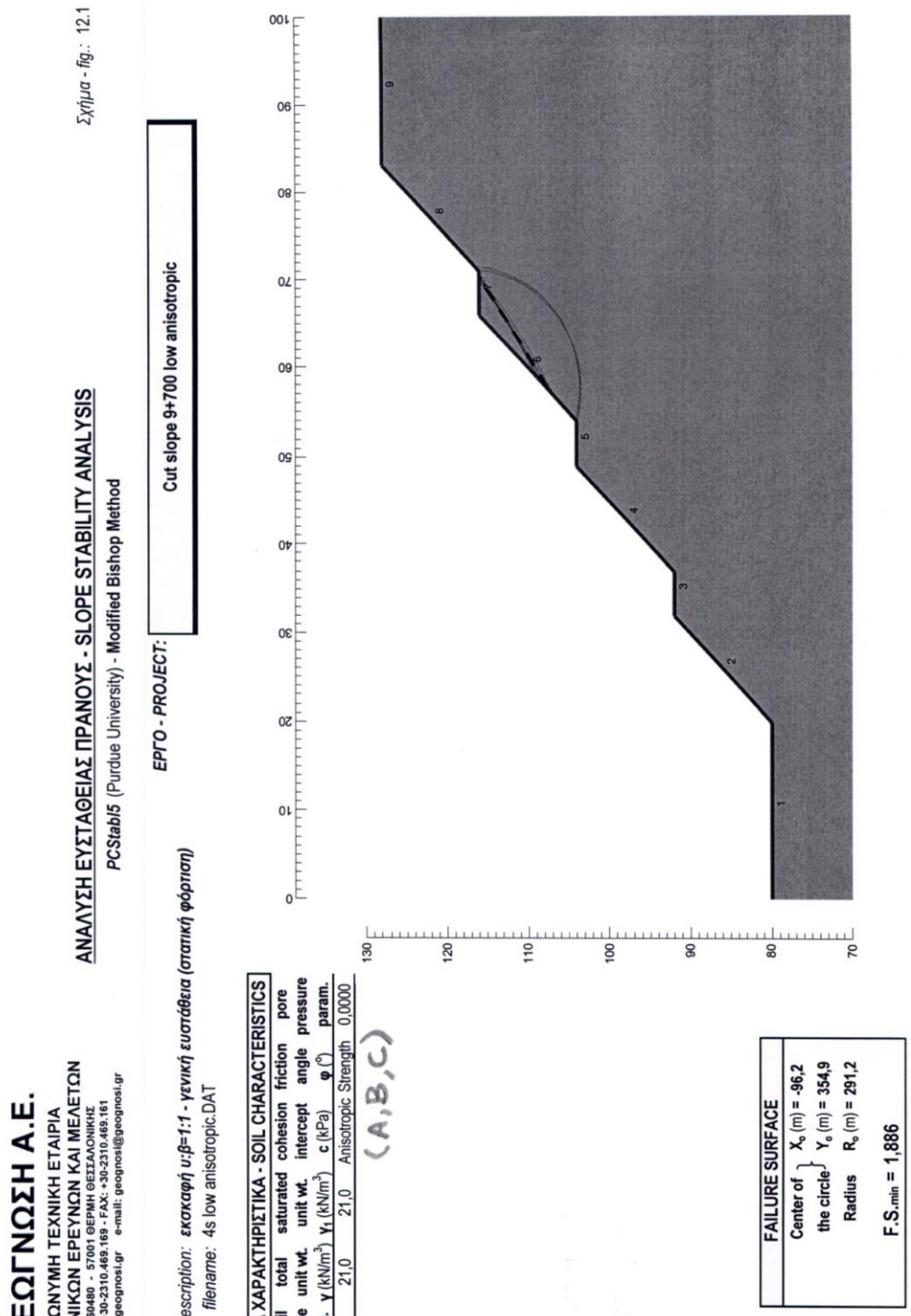


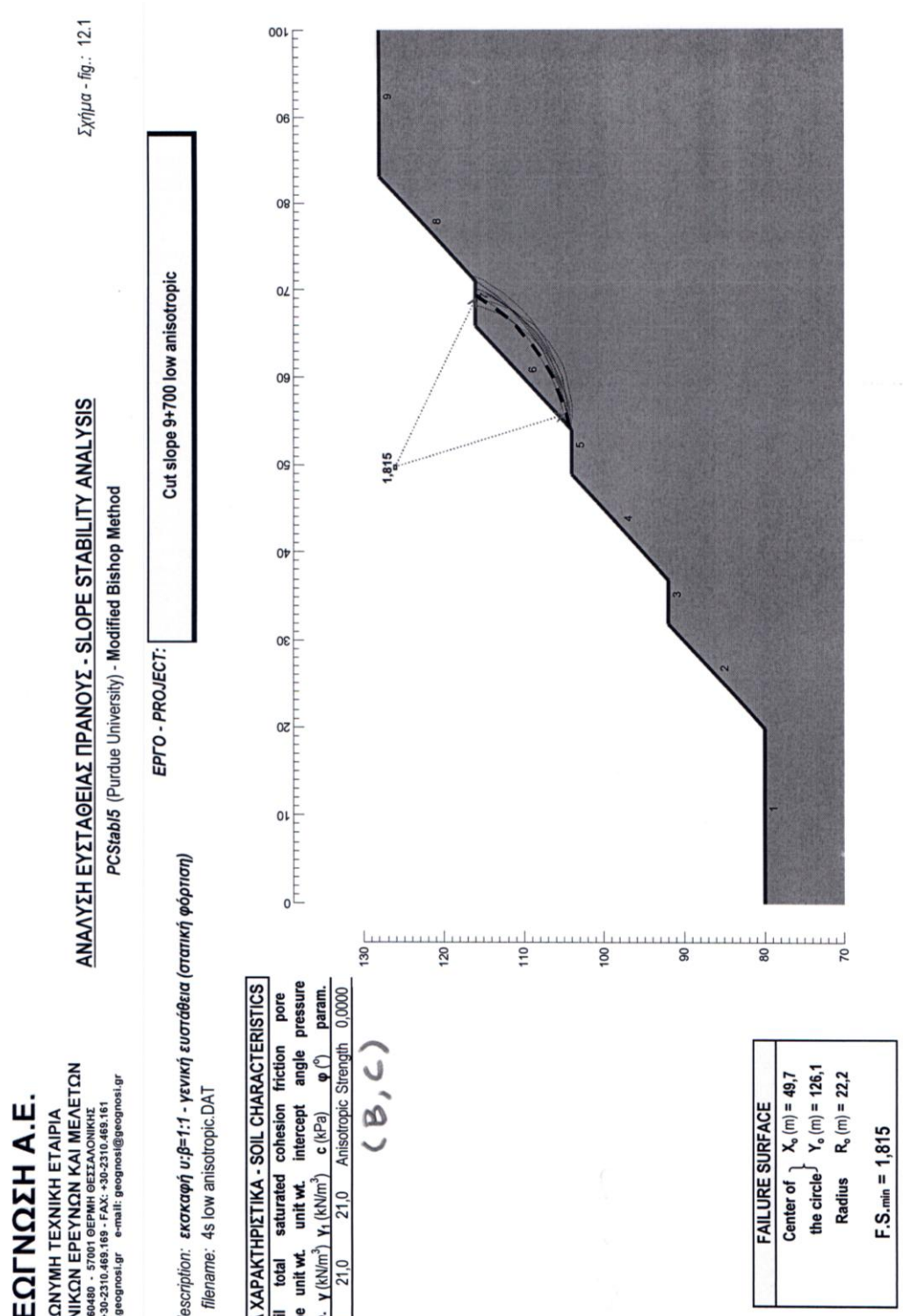


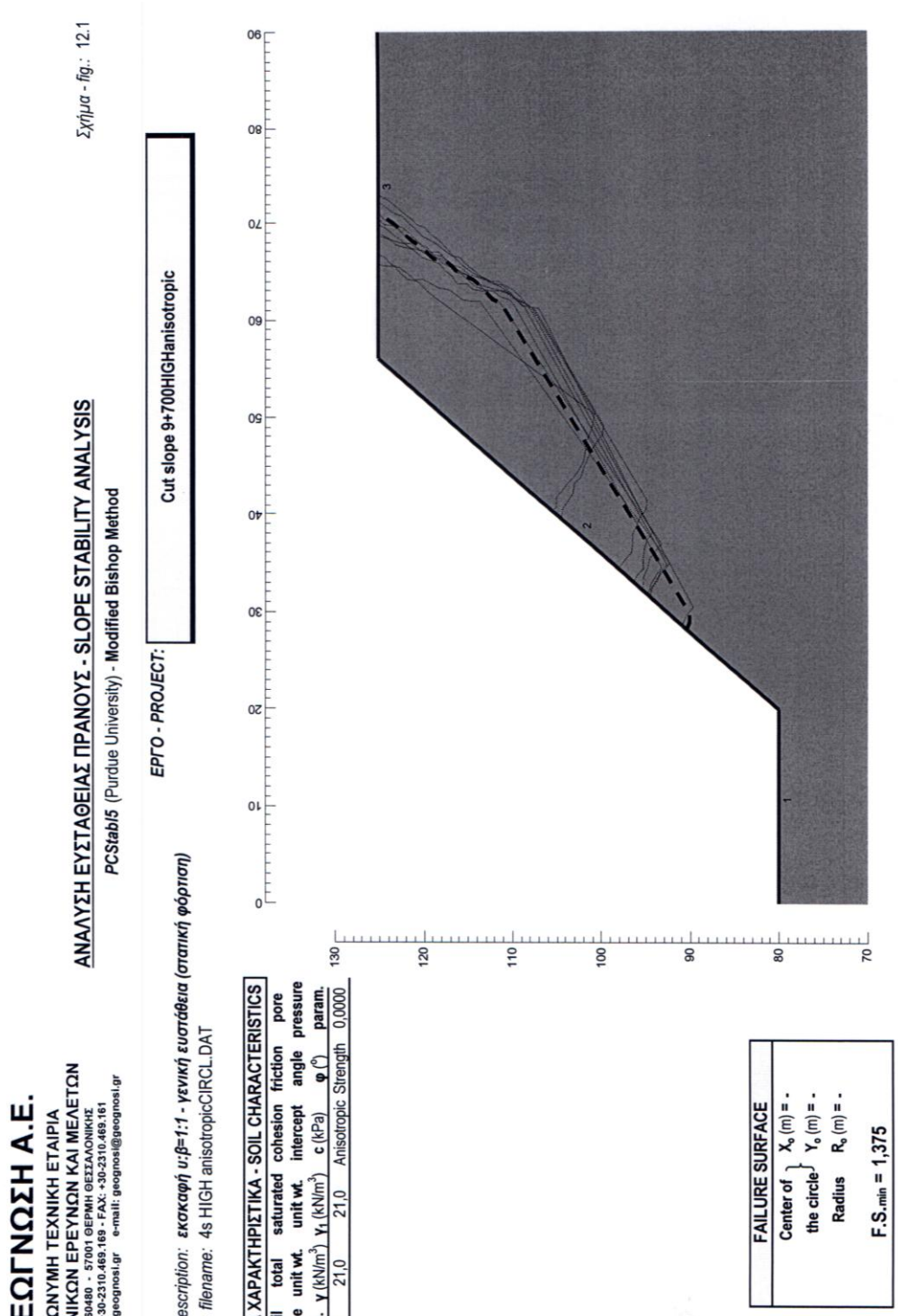


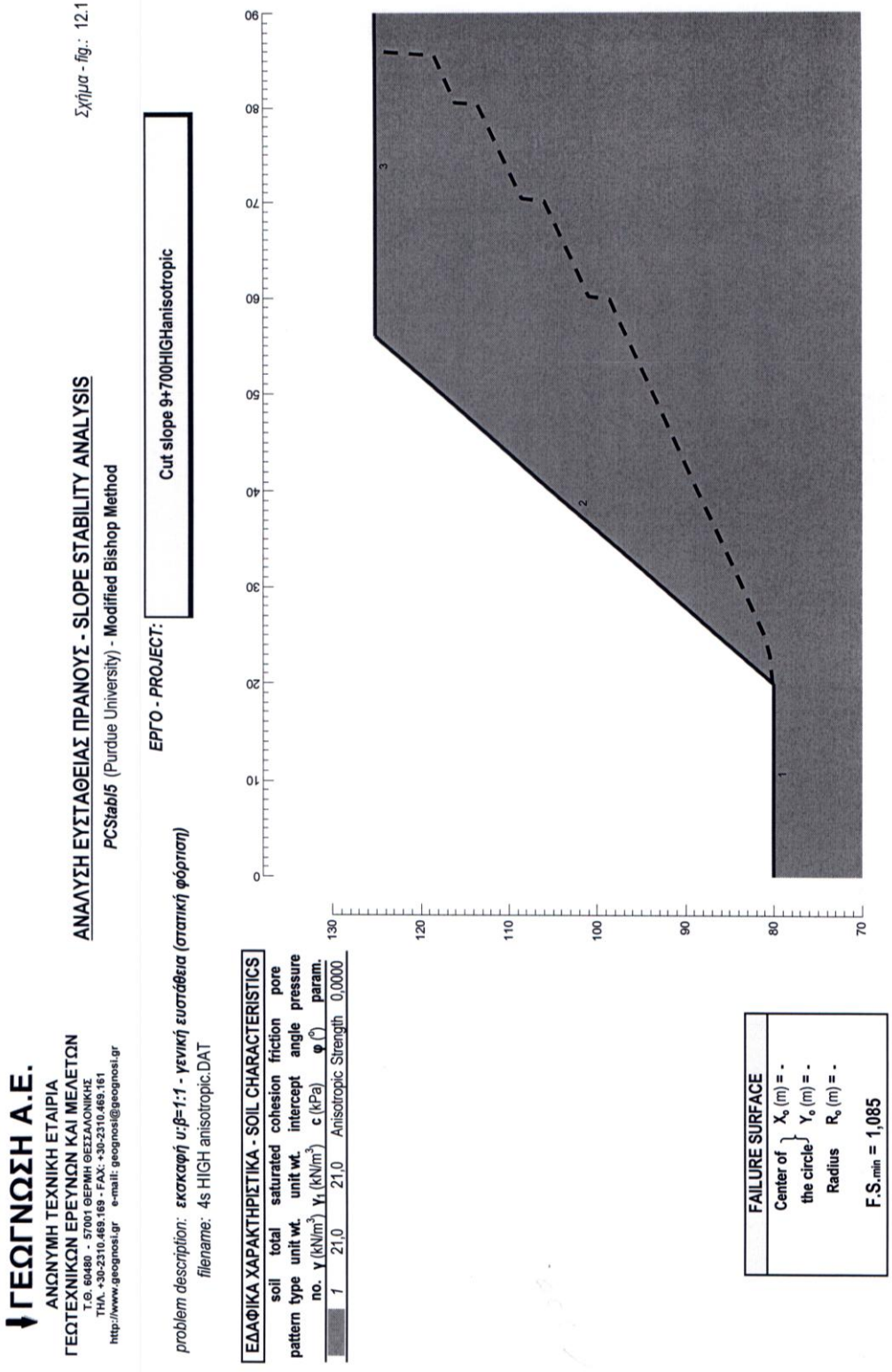


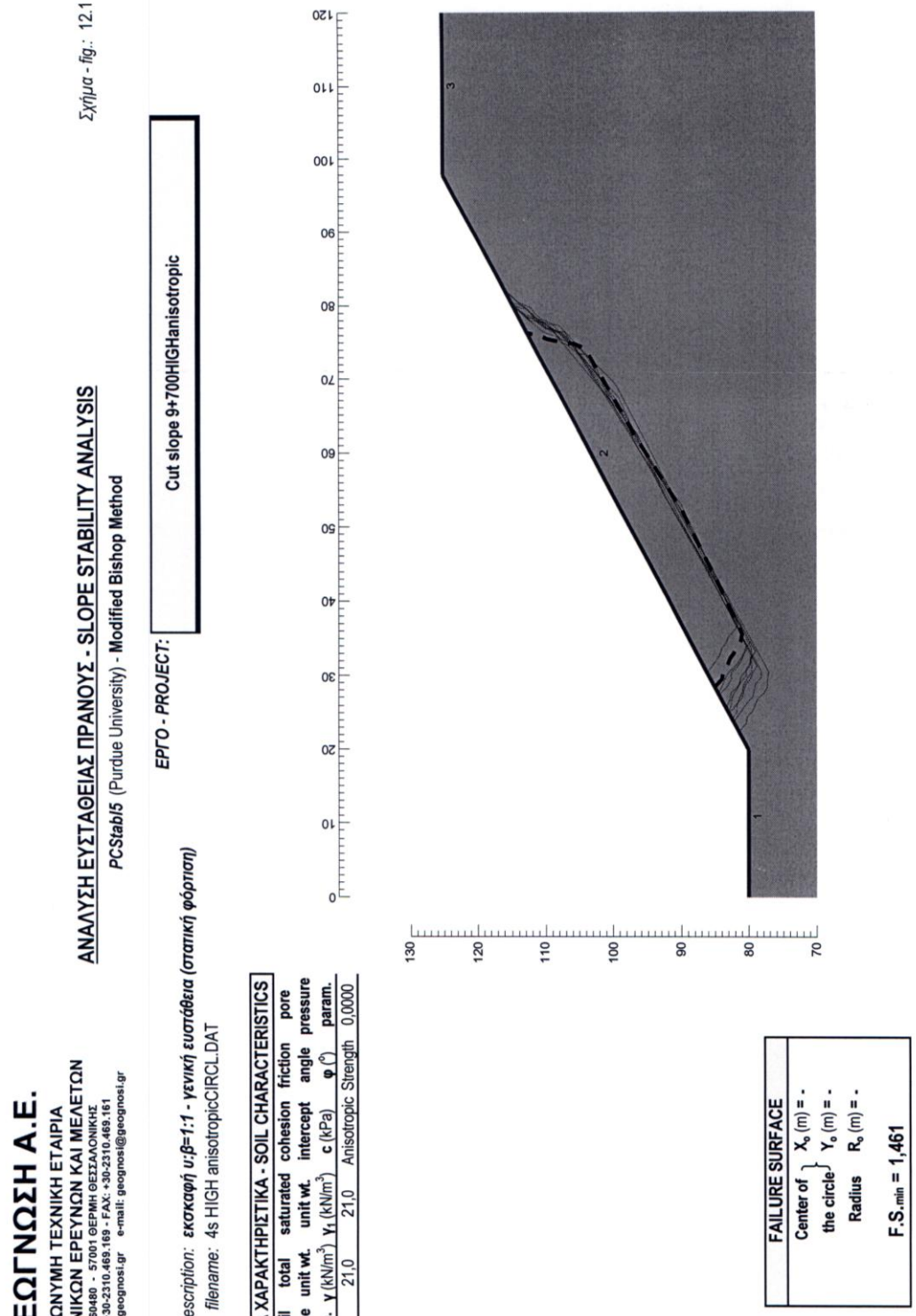


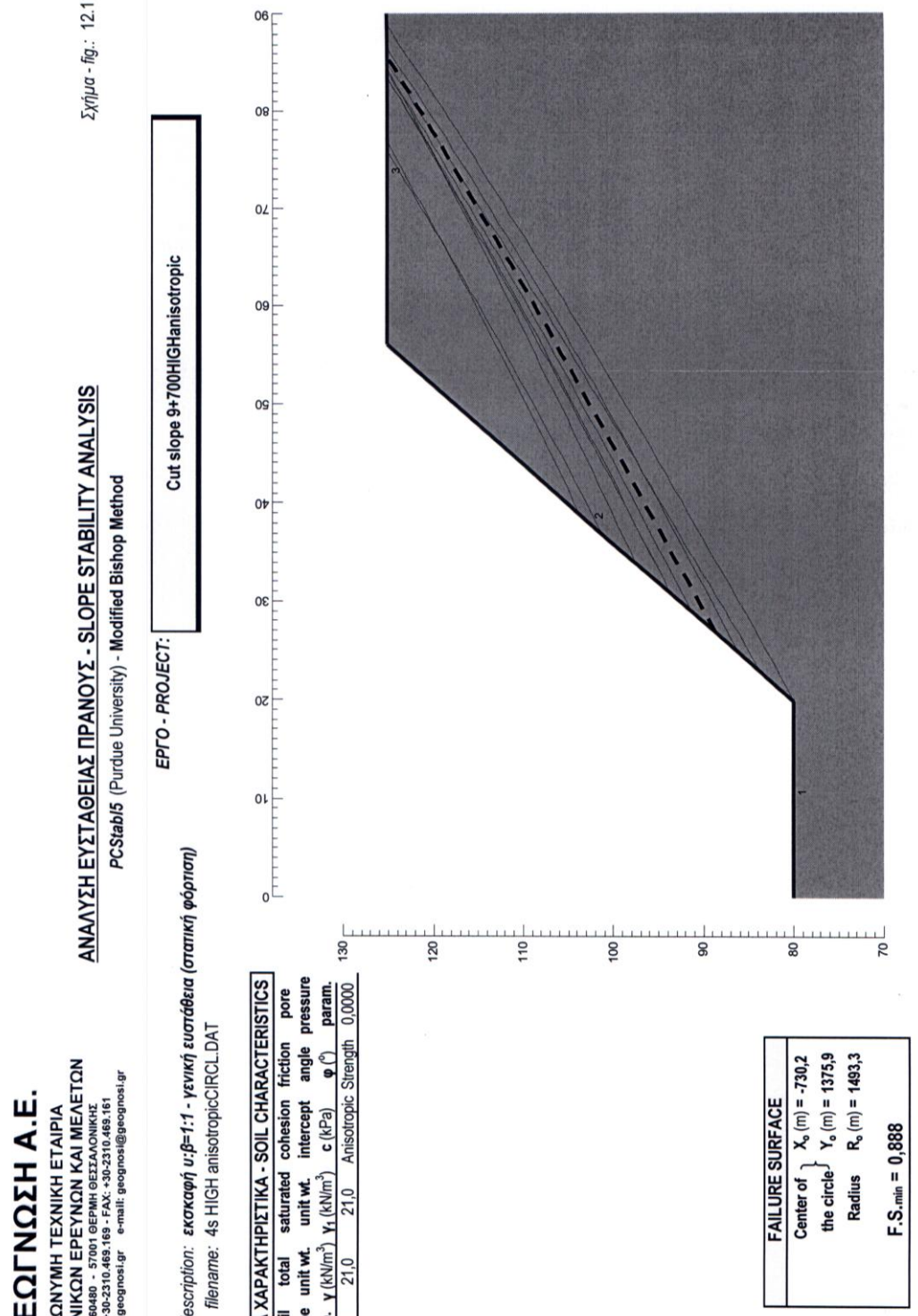


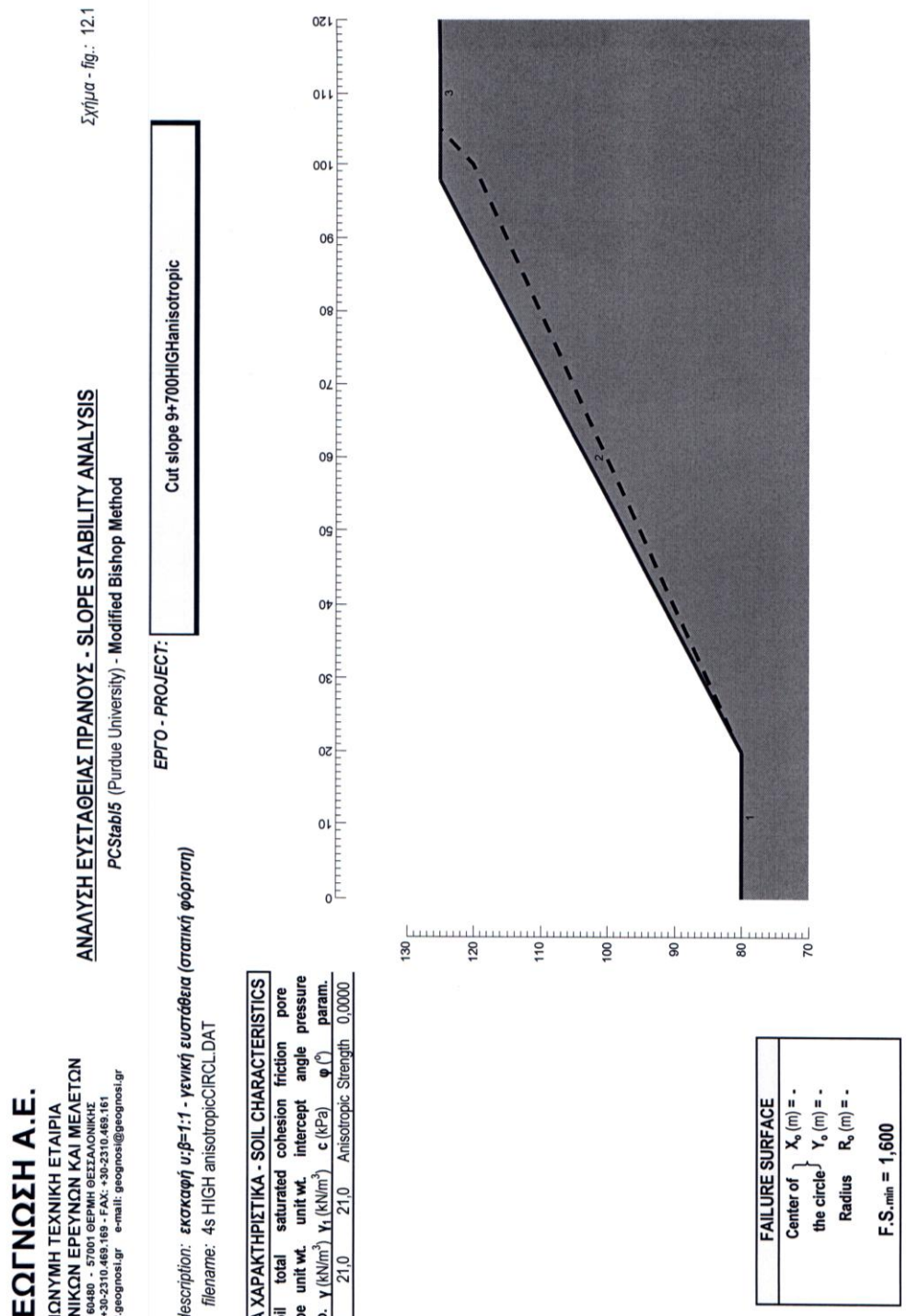


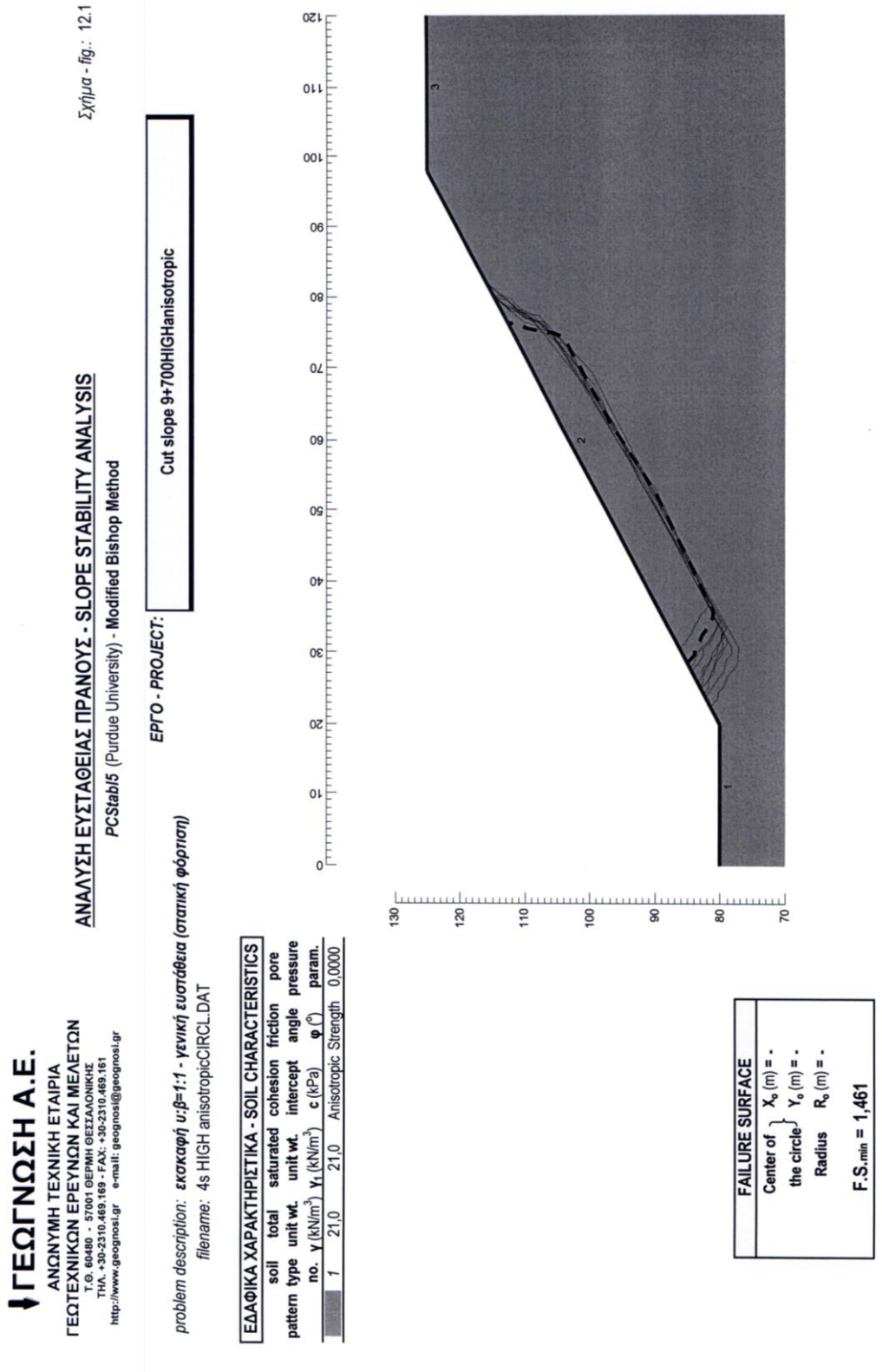


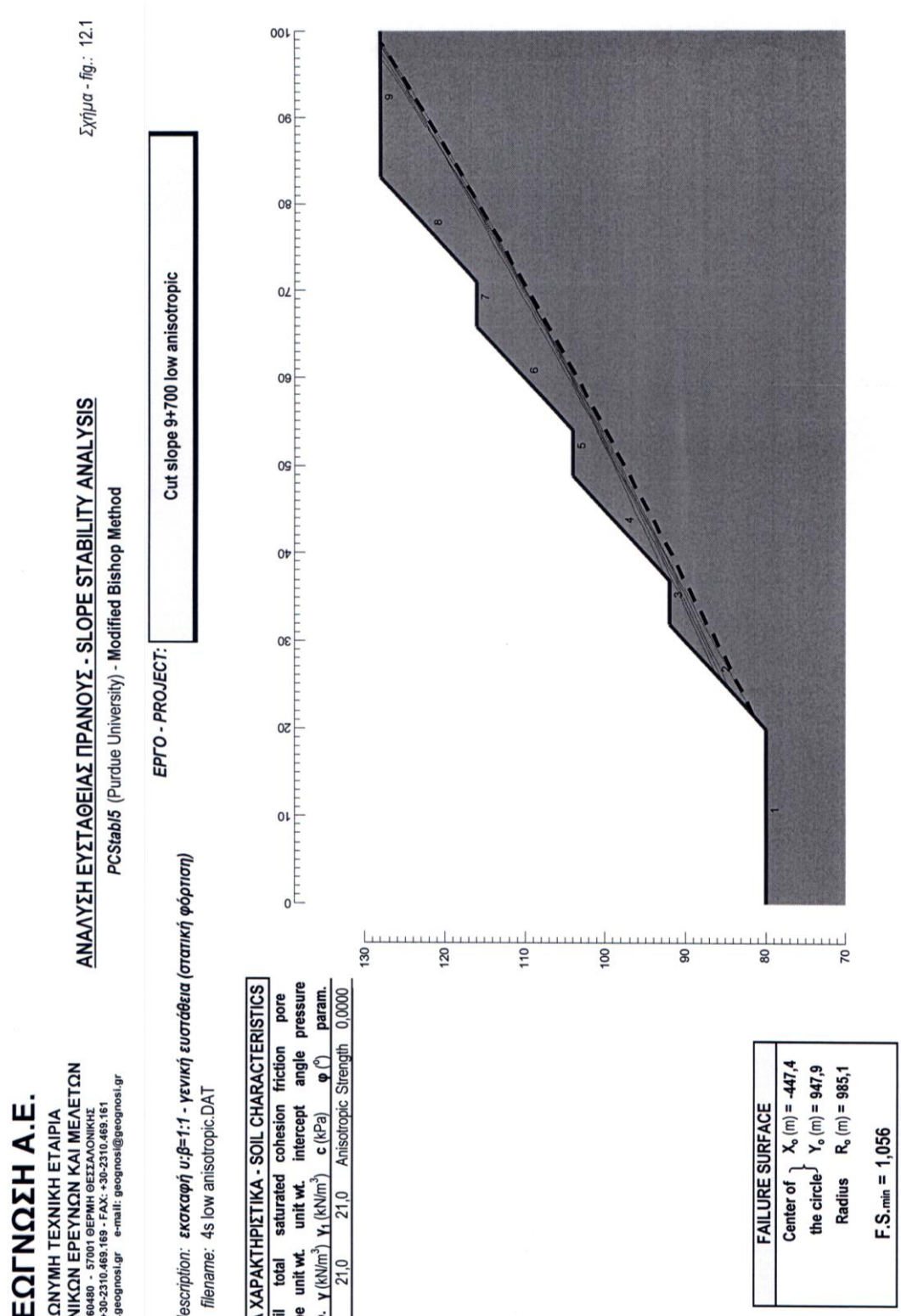


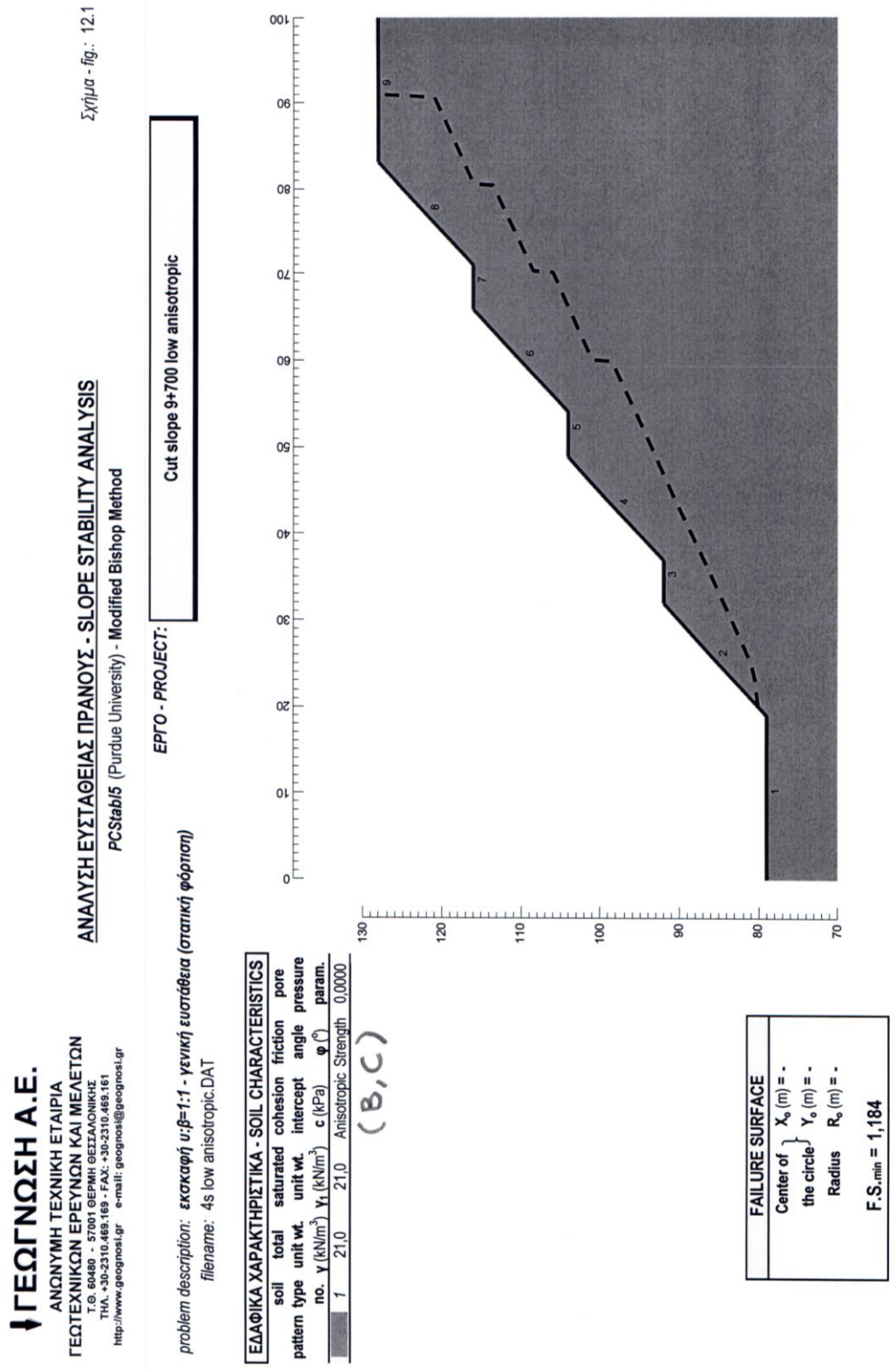


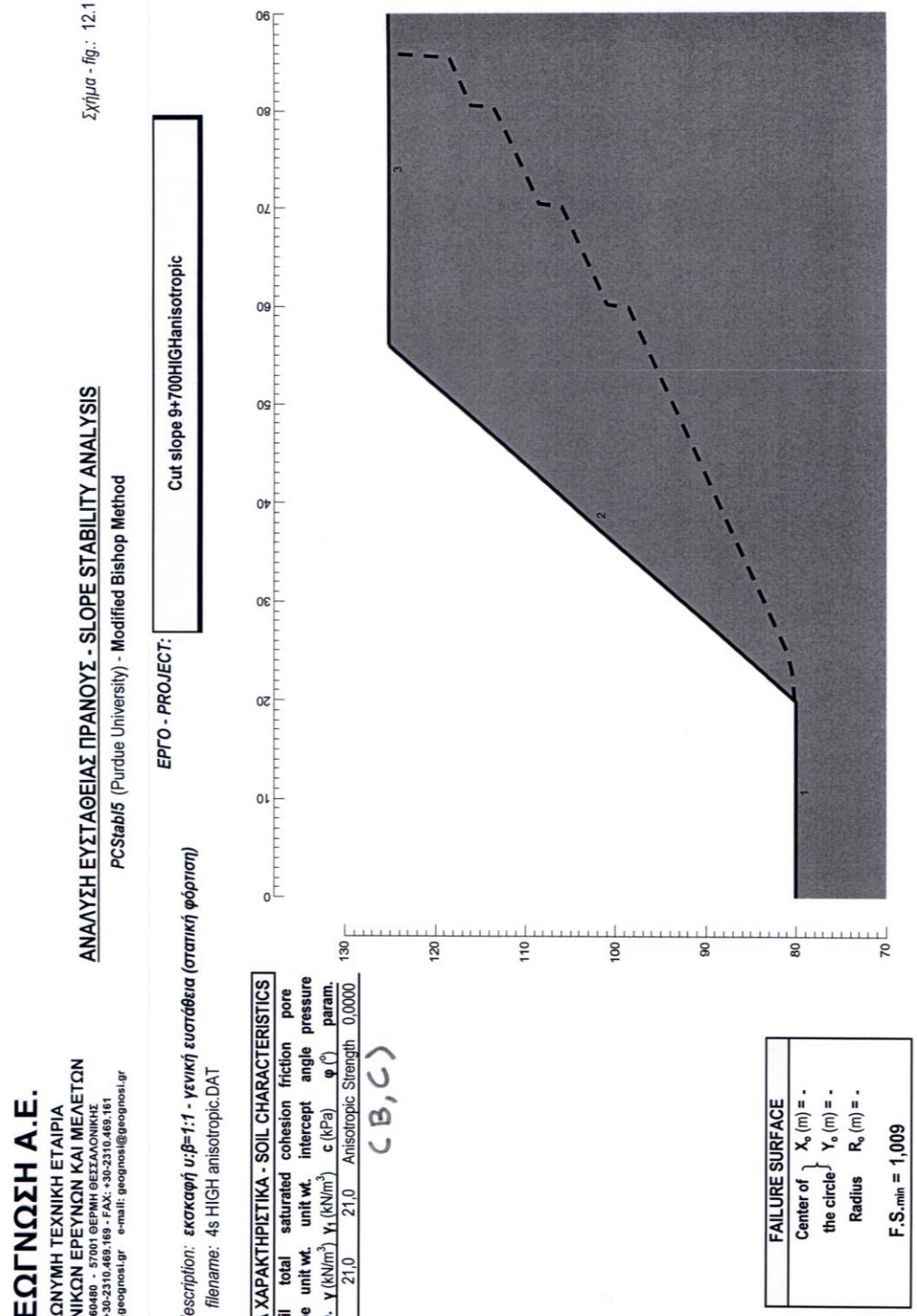


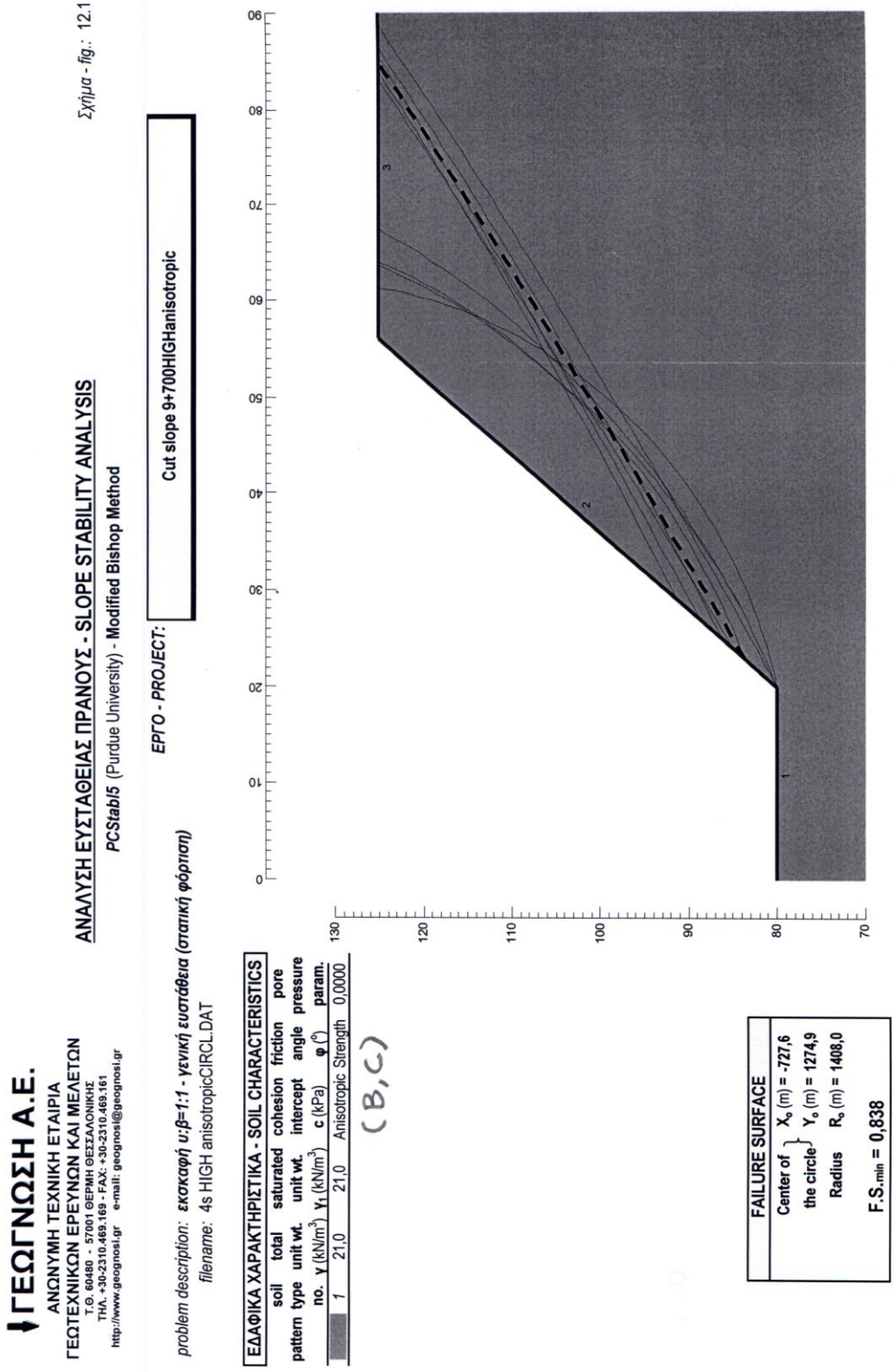


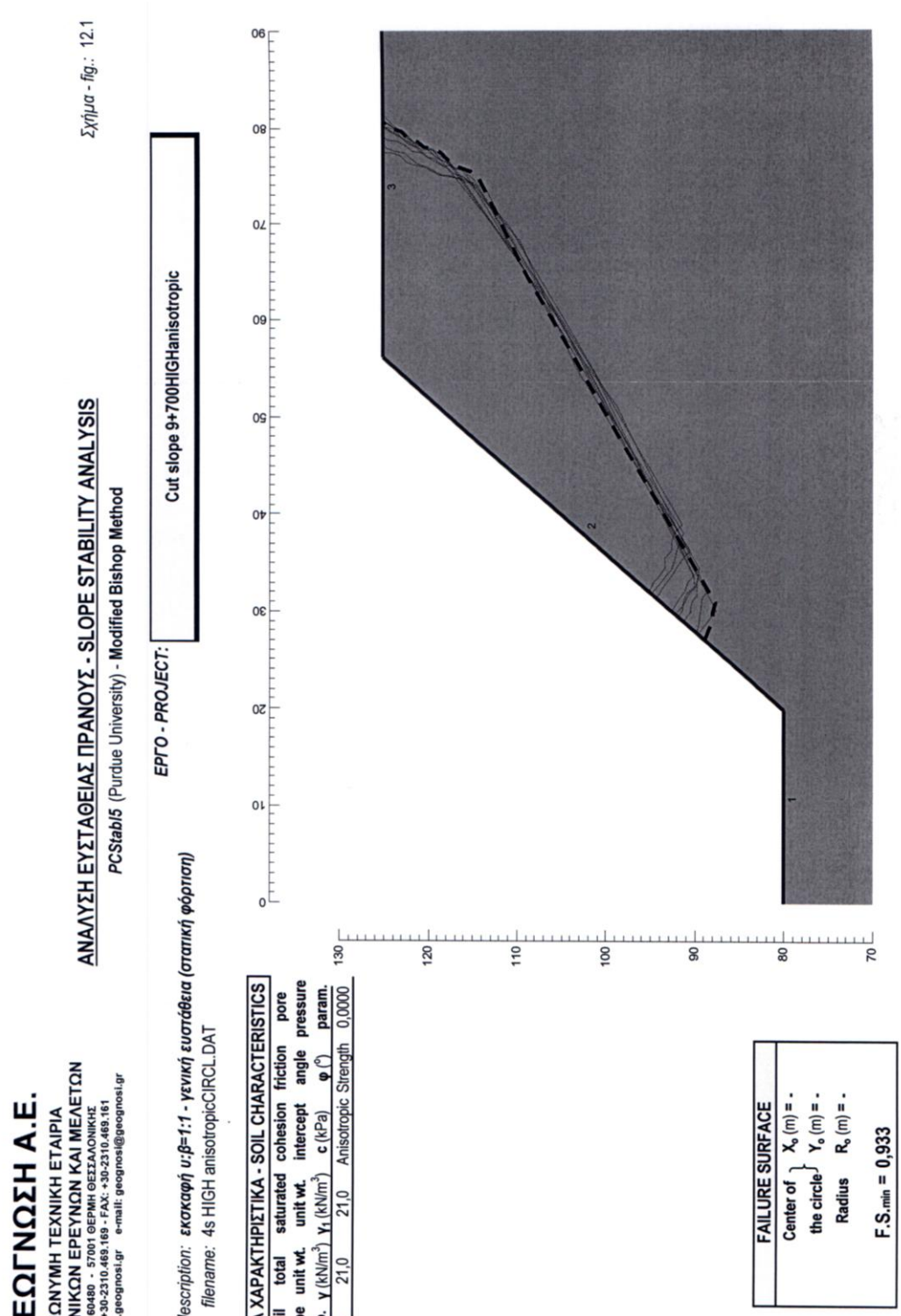


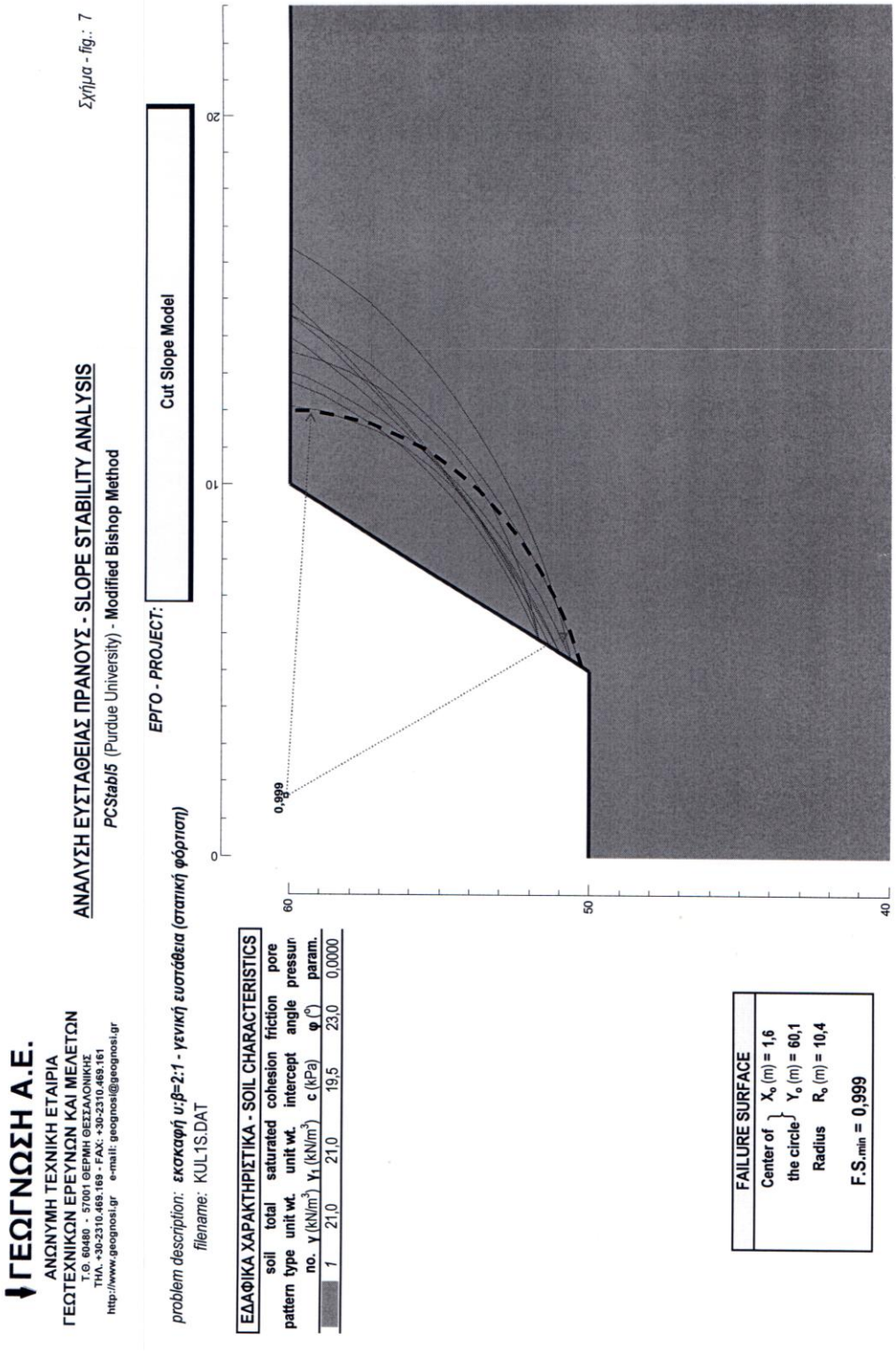


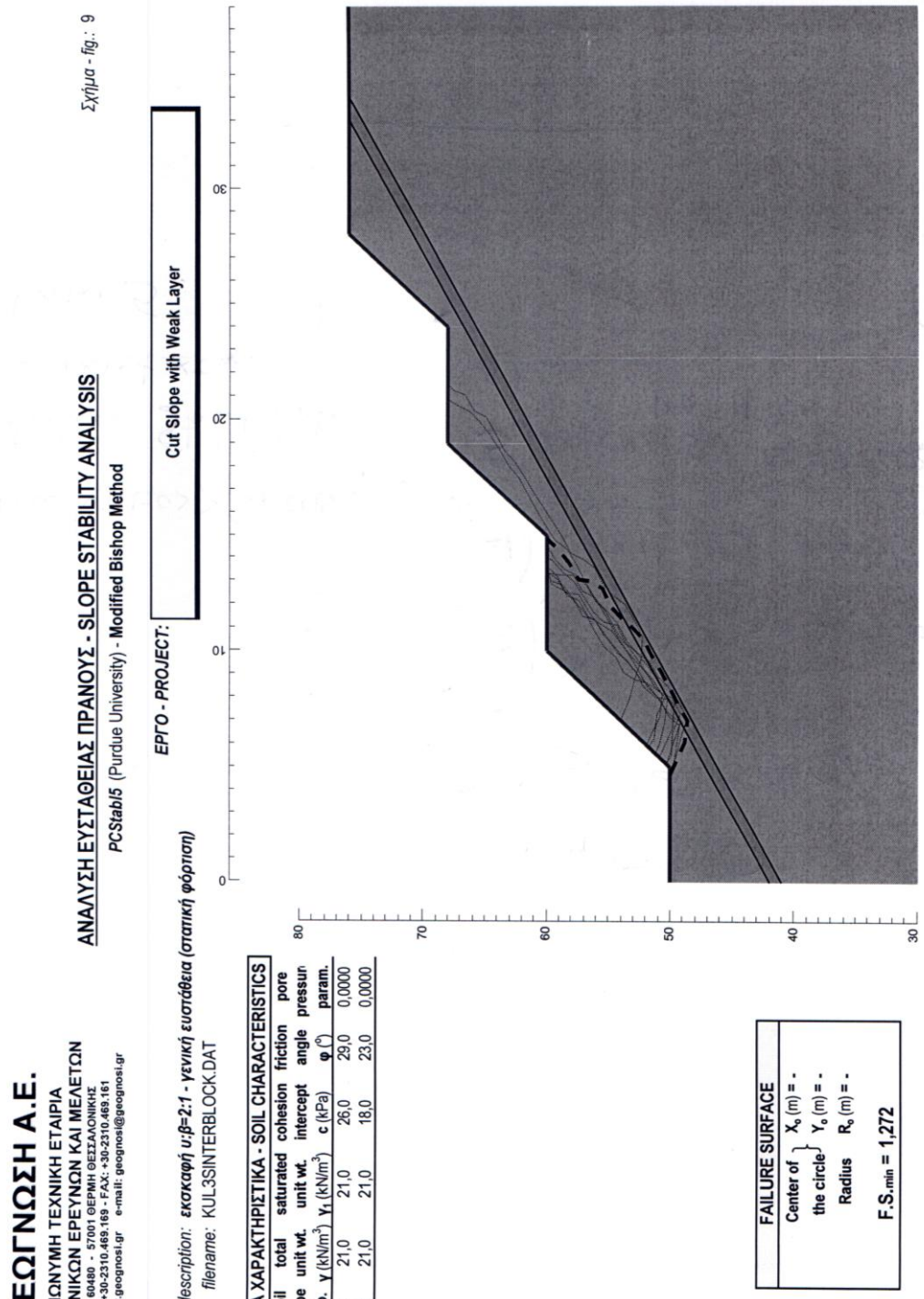












ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

Διατομές εξεταζόμενων ορυγμάτων κατά σειρά Χιλιομετρικής Θέσης