

Μεταπτυχιακή Διατριβή:

Ανάλυση και εκτίμηση ευστάθειας απορριμματικών πρανών ΧΥΤΑ Αμαρίου

Γεώργιος Χρυσικός

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός

Εξεταστική Επιτροπή:

Ευάγγελος Γιδάρacos, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Ιωάννης Τσομπανάκης, Αναπλ. Καθηγητής

Εμμανουήλ Στειακάκης, Επικ. Καθηγητής

-Χανιά 2015-

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της.

Πρώτα από όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα της παρούσας διατριβής κ. Ευάγγελο Γιδαράκο που μου ανέθεσε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, το οποίο με βοήθησε να διεκρύνω τις επιστημονικές μου γνώσεις

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ και στα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, στον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Ορυκτών Πόρων κ. Εμμανουήλ Στειακάκη για το ενδιαφέρον που έδειξε για το θέμα και την παραχώρηση του χώρου και των πόρων για την διεξαγωγή των υπολογισμών, και στον κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, για την αξιολόγηση της εργασίας μου.

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας συγχρηματοδοτήθηκε μέσω της Πράξης Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ για Μεταπτυχιακές Σπουδές Πρώτου Κύκλου (Μάστερ) - Οριζόντια Πράξη, από πόρους του ΕΠ «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση», του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου (ΕΚΤ) του ΕΣΠΑ, 2007-2013.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει δικαιωματικά στην οικογένεια και στους φίλους μου, που βρίσκονται δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, και χωρίς τη στήριξη τους η εκπόνηση αυτής της εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Χανιά, 2015
Γεώργιος Χρυσικός

Περίληψη

Η υγειονομική ταφή στο παρελθόν, αλλά και σήμερα, είναι η κύρια μέθοδος για τη διάθεση των αστικών στερεών αποβλήτων. Κατά τα τελευταία χρόνια, έχουν συμβεί σε αρκετές χώρες καταστροφικές αστοχίες πρανών, σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, μερικές από αυτές θανατηφόρες. Για να αποφευχθούν φαινόμενα αστοχίας, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε απώλειες ανθρώπινων ζωών αλλά και σε σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, απαιτείται περισσότερη έρευνα για τους μηχανισμούς και τις παραμέτρους που συνεισφέρουν αρνητικά στην ευστάθεια των απορριμματικών πρανών.

Στόχος της παρούσας διατριβής, είναι η ανάλυση της ευστάθειας των απορριμματικών πρανών του χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων Αμαρίου, με τη χρήση μεθόδων οριακής ισορροπίας και του λογισμικού GeoSlope.

Ο ΧΥΤΑ Αμαρίου κλήθηκε να καλύψει τις ανάγκες του συνόλου της Περιφερειακής Ενότητας Ρεθύμνου, χωρίς αυτό να έχει ληφθεί υπόψη από τις αρχικές μελέτες. Οπότε, σε συνδυασμό με τις αστοχίες που παρατηρούνται στο πεδίο, κρίθηκε απαραίτητη η διεξαγωγή νέων μελετών.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα διάφορα δεδομένα για τον εξεταζόμενο ΧΥΤΑ. Στη συνέχεια, γίνεται μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για τον αναμενόμενο τύπο αστοχίας σε ένα απορριμματικό πρανές, τους παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια του και τις συνήθεις μεθόδους ανάλυσης. Γίνεται, επίσης, εκτενής αναφορά στα διαθέσιμα βιβλιογραφικά δεδομένα για τις μηχανικές ιδιότητες των αστικών στερεών αποβλήτων. Στη συνέχεια, παρατίθεται η υπολογιστική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, βασισμένο στο λογισμικό SLOPE/W, αλλά και οι αριθμητικές τιμές που επελέγησαν για τις παραμέτρους, που είναι απαραίτητες για την διενέργεια της ανάλυσης ευστάθειας των πρανών της εξεταζόμενης γεωκατασκευής.

Στην επόμενη ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ντετερμινιστικής και στατιστικής ανάλυσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, εισάγεται το πλαίσιο για την αξιολόγηση του κινδύνου της αστοχίας των πρανών του υπό εξέταση χώρου υγειονομικής ταφής. Επιπλέον, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας για το απορριμματικό πρανές υπό την ταυτόχρονη εξέταση όλων των δυσμενών δράσεων.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την ντετερμινιστική ανάλυση, αφορούν στην εύρεση της πιο κρίσιμης θέσης του ΧΥΤΑ, αλλά και την επίδραση των σεισμικών δράσεων στον συντελεστή ασφαλείας. Επίσης, από την στατιστική ανάλυση προέκυψαν διαγράμματα κατανομής των συντελεστών ασφαλείας, όταν οι μηχανικές ιδιότητες αλλά και το ύψος της πιεζομετρικής γραμμής παίρνουν τυχαίες τιμές από ένα προκαθορισμένο εύρος. Από την διεξαχθείσα διερεύνηση προέκυψε ότι ο ΧΥΤΑ είναι επαρκώς ευσταθής, αφού οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι μεγαλύτερες από τα όρια που τίθενται από τον Ευρωκώδικα 7.

Abstract

Landfills have consistently, both in the past and nowadays, been the primary method for urban waste disposal. During the last years, catastrophic landfill slope failures have occurred worldwide, some of them with human casualties. Further research is required on the mechanisms and factors that have negative contribution on the stability of landfills, in order to avoid such devastating phenomena, which can have significant environmental and social impact.

The aim of this study, is the analysis and assessment of the slope stability of Amari landfill using limit equilibrium methods utilizing Geoslope software. Amari landfill is expected to cover the needs of the whole Rethymno region, without proper initial planning. Due to several minor failures that have been observed in-situ, it is necessary to perform new analyses to determine its adequacy mainly in terms of waste slope stability.

At first, all major data for the examined landfill are presented. Subsequently, a literature review regarding the expected type of failure in a landfill, the factors affecting the stability and the various analysis methods is presented. In addition, a comprehensive review of the available with respect to the mechanical properties of municipal solid waste is provided. Moreover, the computational procedure, using the software SLOPE/W is presented and the numerical values, for the main parameters, to perform slope stability analysis, are given.

In the following section, the results of the deterministic and probabilistic slope stability analysis, of the examined landfill, are presented. Thus, the framework for evaluating the risk of landfill slope failure is introduced. In addition, the safety factor for the slope is calculated, taking into account all the required actions.

The conclusions that are drawn from the deterministic analysis show not only the critical part of the landfill, but also the impact of seismic loads in the factor of safety. Furthermore, the obtained charts of the factors of safety (FOS), by the probabilistic analysis, in which the numerical values of the waste mechanical properties and the height of the piezometric line, are randomly chosen from a specified range of values. Based on the performed investigation it is concluded that the landfill is adequately stable, as the values of FOS were greater than the threshold values, imposed by Eurocode 7.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

Πίνακας περιεχομένων

| | |
|---|----|
| Ευρετήριο πινάκων | 12 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1.1 ΧΥΤΑ Αμαρίου | 1 |
| 1.1.1 Γεωγραφική θέση | 1 |
| 1.1.2 Σύστημα μόνωσης | 4 |
| 1.1.3 Μορφολογία εδάφους | 5 |
| 1.1.4 Στοιχεία σεισμικότητας | 6 |
| 1.1.5 Απορριμματικό φορτίο | 7 |
| 1.1.5.1 Ποιοτική και ποσοτική ανάλυση | 7 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ | 13 |
| 2.1 Τύποι αστοχίας ενός ΧΥΤΑ | 13 |
| 2.1.1 Αστοχία από ολίσθηση του συστήματος συλλογής στραγγισμάτων | 13 |
| 2.1.2 Αστοχία από ολίσθηση του τελικού συστήματος κάλυψης | 14 |
| 2.1.3 Περιστροφική αστοχία των πλευρικών τοιχωμάτων του πρανού ή της βάσης | 14 |
| 2.1.4 Περιστροφική αστοχία υποστρώματος με συμμετοχή αποβλήτων, στεγάνωσης, και υπεδάφους | 15 |
| 2.1.5 Περιστροφική αστοχία μέσα στην απορριμματική μάζα | 15 |
| 2.1.6 Μεταθετική ολίσθηση κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης | 16 |
| 2.2 Ευστάθεια, συντελεστής ασφαλείας | 16 |
| 2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια | 17 |
| 2.3.1 Γεωμετρία | 18 |
| 2.3.2 Διατμητική αντοχή | 18 |
| 2.3.3 Συνθήκες φόρτισης | 18 |
| 2.3.4 Πίεση του νερού των πόρων | 19 |

| | |
|--|----|
| 2.3.5 Καθιζήσεις | 20 |
| 2.3.6 Λειτουργίες | 21 |
| 2.4 Διάφορες μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρηνών | 21 |
| 2.5 Μέθοδος των λωρίδων | 22 |
| 2.5.1 Συνήθης μέθοδος των λωρίδων ή μέθοδος <i>Fellenius</i> | 23 |
| 2.5.2 Απλοποιημένη μέθοδος <i>Bishop</i> | 24 |
| 2.5.3 Απλοποιημένη μέθοδος <i>Janbu</i> | 24 |
| 2.5.4 Μέθοδος <i>Spencer</i> | 25 |
| 2.5.5 Μέθοδος <i>Morgenstern-Price</i> | 25 |
| 2.5.6 Γενικευμένη Οριακή Ισορροπία | 25 |
| 2.6 Επιλογή ιδανικής μεθόδου ανάλυσης | 25 |
| 2.7 Διδιάστατη και τριδιάστατη ανάλυση | 26 |
| 2.8 Μηχανικές ιδιότητες ΑΣΑ | 29 |
| 2.8.1 Ειδικό βάρος | 29 |
| 2.8.2 Διατμητική αντοχή | 35 |
| 2.9 Λογισμικό ανάλυσης ευστάθειας πρηνών | 42 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ | 44 |
| 3.1 Καθορισμός γεωμετρίας | 45 |
| 3.2 Επιλογή μηχανικών ιδιοτήτων | 50 |
| 3.2.1 Ειδικό βάρος | 50 |
| 3.2.2 Συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής | 52 |
| 3.3 Ορισμός πιεζομετρικής γραμμής | 55 |
| 3.4 Ορισμός επιφανειών αστοχίας | 56 |
| 3.5 Ορισμός σεισμικών φορτίων | 57 |
| 3.6 Ορισμός ανάλυσης | 58 |

| | |
|--|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 61 |
| 4.1 Εύρεση δυσμενέστερης θέσης του πρανούς | 61 |
| 4.2 Διαστρωμάτωση ανά 10m | 69 |
| 4.3 Διαστρωμάτωση ανά 5m | 71 |
| 4.4 Στατιστική ανάλυση | 74 |
| 4.5 Μεταβολή ύψους πιεζομετρικής γραμμής | 77 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 87 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 92 |

Ευρετήριο Εικόνων

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1. Πληρωμένοι τομείς (LS1 – LS3), μέτωπο ενεργής εναπόθεσης και χώρος επέκτασης ΧΥΤΑ Αμαρίου [Νικολάου et al., 2013] | 2 |
| Εικόνα 2. Στάδια απορριμματικού ανάγλυφου ΧΥΤΑ Αμαρίου [Νικολάου et al., 2013] | 3 |
| Εικόνα 3. Φωτογραφίες άποψης ΧΥΤΑ Αμαρίου | 4 |
| Εικόνα 4. Χάρτης σεισμικών επιταχύνσεων Ελλάδας [portal.tee.gr] | 6 |
| Εικόνα 5. Μηνιαίο εισερχόμενο απορριμματικό φορτίο στον ΧΥΤΑ Αμαρίου κατά το 2012 [Νικολάου et al., 2013] | 7 |
| Εικόνα 6. Αστοχία του συστήματος συλλογής στραγγισμάτων [Pinarati, 2005] | 14 |
| Εικόνα 7. Αστοχία του τελικού υλικού κάλυψης [Pinarati, 2005] | 14 |
| Εικόνα 8. Περιστροφική αστοχία πλευρικών πρανών του ΧΥΤΑ [Pinarati, 2005] | 15 |
| Εικόνα 9. Περιστροφική αστοχία υποστρώματος με συμμετοχή αποβλήτων, στεγάνωσης, και υπεδάφους [Pinarati, 2005] | 15 |
| Εικόνα 10. Περιστροφική αστοχία μέσα στην απορριμματική μάζα [Pinarati, 2005] | 16 |
| Εικόνα 11. Ολίσθηση κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης [Pinarati, 2005] | 16 |
| Εικόνα 12. Δυνάμεις, μέθοδος των λωρίδων [Παπαδόπουλος, 2012] | 23 |
| Εικόνα 13. Υπεραπλουστευμένη σύγκριση μεταξύ 2D και 3D μεθόδου λωρίδων [Boutwell, 2004] | 27 |
| Εικόνα 14. Διάγραμμα διασποράς τιμών ειδικού βάρους σε συνάρτηση με το βάθος, από επιτόπου δοκιμές μεγάλης κλίμακας [Kavazanjian, 1995] | 31 |
| Εικόνα 15. Ποιοτικό μοντέλο της αύξησης του ειδικού βάρους των ΑΣΑ συναρτήσει της ενέργειας που καταναλώνεται για τη συμπίεση [Zekkos et al., 2006] | 33 |
| Εικόνα 16. Ποιοτική επίδραση του βάθους ή των τάσεων, στο ειδικό βάρος των απορριμμάτων [Zekkos, 2006] | 33 |
| Εικόνα 17. Προτεινόμενες καμπύλες υπολογισμού ειδικού βάρους απορριμμάτων τυπικών ΧΥΤΑ [Zekkos, 2005] | 34 |
| Εικόνα 18. Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης μεγάλης κλίμακας σε αστικά στερεά απόβλητα [Θεοδωράτος, 2006] | 40 |
| Εικόνα 19. Μεταβολή των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των ΑΣΑ σε σχέση με το βάθος [Babu et al., 2010] | 42 |
| Εικόνα 20. Ορισμός σελίδας SLOPE/W | 44 |
| Εικόνα 21. Ορισμός κανάβου | 44 |
| Εικόνα 22. Διάταξη μηκοτομών | 46 |
| Εικόνα 23. Μηκοτομή AB | 47 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 24. Μηκοτομή ΓΒ _____ | 48 |
| Εικόνα 25. Εισαγωγή σημείων _____ | 49 |
| Εικόνα 26. Εδαφικά προφίλ διατομών ΑΒ και ΓΒ _____ | 49 |
| Εικόνα 27. Ορισμός περιοχών _____ | 50 |
| Εικόνα 28. Προφίλ αύξησης ειδικού βάρους με το βάθος _____ | 52 |
| Εικόνα 29. Εισαγωγή των μηχανικών ιδιοτήτων και των στατιστικών τους παραμέτρων στο SLOPE/W _____ | 54 |
| Εικόνα 30. Ορισμός πιεζομετρικής γραμμής στο SLOPE/W _____ | 55 |
| Εικόνα 31. Εισαγωγή στατιστικών παραμέτρων για τη μεταβολή του ύψους της πιεζομετρικής γραμμής από το αρχικό _____ | 56 |
| Εικόνα 32. Ορισμός των υπό εξέταση επιφανειών αστοχίας _____ | 57 |
| Εικόνα 33. Ορισμός σεισμικής δράσης _____ | 58 |
| Εικόνα 34. Ρυθμίσεις ανάλυσης _____ | 60 |
| Εικόνα 35. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για ανώτερο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση και χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΑΒ) _____ | 62 |
| Εικόνα 36. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για ανώτερο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΑΒ) _____ | 62 |
| Εικόνα 37. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για μέσο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΑΒ) _____ | 63 |
| Εικόνα 38. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για μέσο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΑΒ) _____ | 63 |
| Εικόνα 39. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για κατώτερο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΑΒ) _____ | 64 |
| Εικόνα 40. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για κατώτερο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΑΒ) _____ | 64 |
| Εικόνα 41. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για ανώτερο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ) _____ | 65 |
| Εικόνα 42. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για ανώτερο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ) _____ | 66 |
| Εικόνα 43. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για μέσο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ) _____ | 66 |
| Εικόνα 44. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για μέσο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ) _____ | 67 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 45. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για κατώτερο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ) | 67 |
| Εικόνα 46. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για κατώτερο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ) | 68 |
| Εικόνα 47. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας χωρίς σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 10m (διατομή ΑΒ) | 69 |
| Εικόνα 48. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας με σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 10m (διατομή ΑΒ) | 70 |
| Εικόνα 49. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας χωρίς σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 10m (διατομή ΓΒ) | 70 |
| Εικόνα 50. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας με σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 10m (διατομή ΓΒ) | 71 |
| Εικόνα 51. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας χωρίς σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 5m (διατομή ΑΒ) | 72 |
| Εικόνα 52. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας με σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 5m (διατομή ΑΒ) | 72 |
| Εικόνα 53. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας χωρίς σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 5m (διατομή ΓΒ) | 73 |
| Εικόνα 54. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας με σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 5m (διατομή ΓΒ) | 73 |
| Εικόνα 55. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης για την διατομή ΑΒ, χωρίς σεισμική δράση (επάνω), και με σεισμική δράση (κάτω) | 75 |
| Εικόνα 56. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης για την διατομή ΓΒ, χωρίς σεισμική δράση (επάνω), και με σεισμική δράση (κάτω) | 76 |
| Εικόνα 57. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 1m, χωρίς σεισμική δράση, διατομή ΑΒ | 78 |
| Εικόνα 58. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 1m, με σεισμική δράση, διατομή ΑΒ | 79 |
| Εικόνα 59. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 1m, χωρίς σεισμική δράση, διατομή ΓΒ | 80 |
| Εικόνα 60. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 1m, με σεισμική δράση, διατομή ΓΒ | 81 |
| Εικόνα 61. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 2m, χωρίς σεισμική δράση, διατομή ΑΒ | 82 |
| Εικόνα 62. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 2m, με σεισμική δράση, διατομή ΑΒ | 83 |

Εικόνα 63. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 2m, χωρίς σεισμική δράση, διατομή ΓΒ

84

Εικόνα 64. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 2m, με σεισμική δράση, διατομή ΓΒ

85

Ευρετήριο Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1. Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ, Α' Φάση δειγματοληψίας | 9 |
| Πίνακας 2. Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ, Β' Φάση δειγματοληψίας | 9 |
| Πίνακας 3. Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ, Γ' Φάση δειγματοληψίας | 10 |
| Πίνακας 4. Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ, Δ' Φάση | 10 |
| Πίνακας 5. Κατά βάρος ποσοστιαία σύνθεση νοσοκομειακού κλάσματος | 11 |
| Πίνακας 6. Συγκριτικά στοιχεία ποσοστιαίας σύνθεσης ΑΣΑ | 12 |
| Πίνακας 7. Λύσεις και υποθέσεις ανά μέθοδο [Omari, 2012] | 26 |
| Πίνακας 8. Παράμετροι υπερβολικού μοντέλου αύξησης ειδικού βάρους με το βάθος, για διαφορετικούς βαθμούς συμπίεσης και ποσότητας εδάφους κάλυψης [Zekkos, 2006] | 34 |
| Πίνακας 9. Εύρος στατιστικών παραμέτρων, δηλαδή μέσης τιμής (μ), τυπικής απόκλισης (σ) και συντελεστή μεταβλητότητας (CoV), για το ειδικό βάρος των αστικών στερεών αποβλήτων. Στοιχεία από δημοσιευμένες μελέτες [Babu et al., 2010] | 41 |
| Πίνακας 10. Ειδικά βάρη κλασμάτων ΑΣΑ 'στον κάδο' | 51 |
| Πίνακας 11. Ειδικά βάρη ΑΣΑ σε διάφορα στάδια | 51 |
| Πίνακας 12. Εύρος στατιστικών παραμέτρων, από βιβλιογραφικά δεδομένα [Babu et al., 2010] | 53 |
| Πίνακας 13. Επιλεγείσες τιμές ειδικού βάρους, συνοχής και γωνίας εσωτ. τριβής ανά στρώση | 53 |
| Πίνακας 14. Συνοπτικός πίνακας ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας, που προέκυψαν κατά την διερεύνηση του δυσμενέστερου σημείου του εδαφικού προφίλ, για την διατομή ΑΒ | 65 |
| Πίνακας 15. Συνοπτικός πίνακας ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας, που προέκυψαν κατά την διερεύνηση του δυσμενέστερου σημείου του εδαφικού προφίλ, για την διατομή ΓΒ | 68 |
| Πίνακας 16. Τιμές μηχανικών ιδιοτήτων ανά στρώση | 69 |
| Πίνακας 17. Συνοπτικός πίνακας ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας, ανά διατομή για ύψος στρώσης 10m | 71 |

| | |
|---|----|
| Πίνακας 18. Συνοπτικός πίνακας ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας, ανά διατομή για ύψος στρώσης 5m _____ | 74 |
| Πίνακας 19. Εύρος τιμών από το οποίο λαμβάνονται τιμές για τη μέθοδο ανάλυσης Monte Carlo (h) _____ | 77 |
| Πίνακας 20. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για διάφορες τιμές μέσης μεταβολής της πιεζομετρικής γραμμής από την αρχική, διατομή AB _____ | 86 |
| Πίνακας 21. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για διάφορες τιμές μέσης μεταβολής της πιεζομετρικής γραμμής από την αρχική, διατομή ΓΒ _____ | 86 |
| Πίνακας 22. Αναμενόμενα επίπεδα επίδοσης ΧΥΤΑ συναρτήσει του δείκτη αξιοπιστίας (USACE 1999) _____ | 89 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΧΥΤΑ Αμαρίου

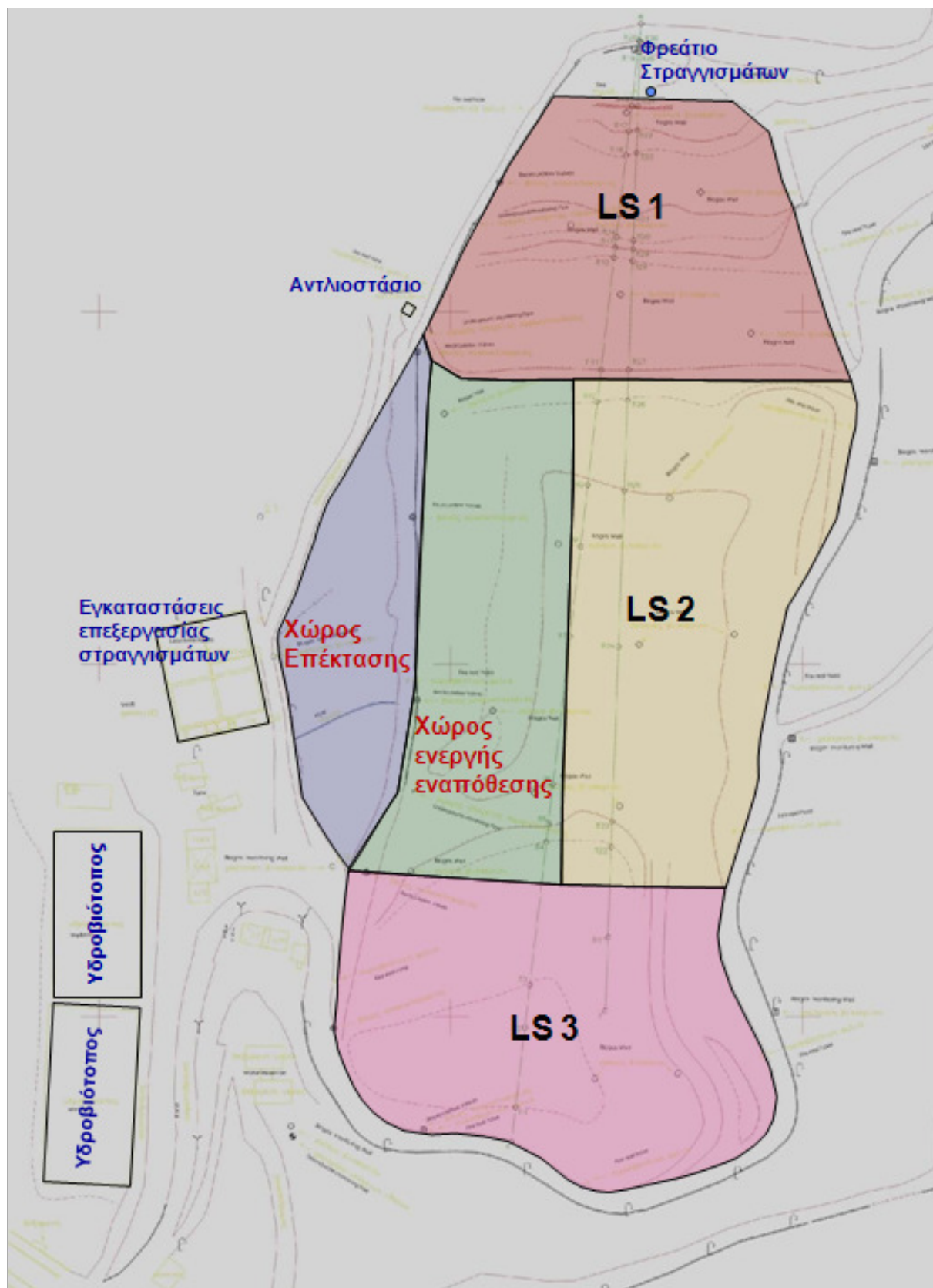
1.1.1 Γεωγραφική θέση

Ο Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων Αμαρίου βρίσκεται στη θέση «Κουλέ Μασχάλια» του Δήμου Αμαρίου της Περιφερειακής Ενότητας Ρεθύμνου και εξυπηρετεί σήμερα, εκτός του Δήμου Αμαρίου, το σύνολο των Δήμων της Περιφερειακής Ενότητας Ρεθύμνου (Δήμοι Αγίου Βασιλείου, Ανωγείων, Μυλοπόταμου και Ρεθύμνης). Η συνολική του έκταση ανέρχεται σε 179 στρέμματα και βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 650 μέτρων. Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται ως ορεινή, με χαμηλή βλάστηση, ενώ αρκετά χιλιόμετρα περιμετρικά του ΧΥΤΑ δεν υπάρχουν καλλιεργήσιμες εκτάσεις.

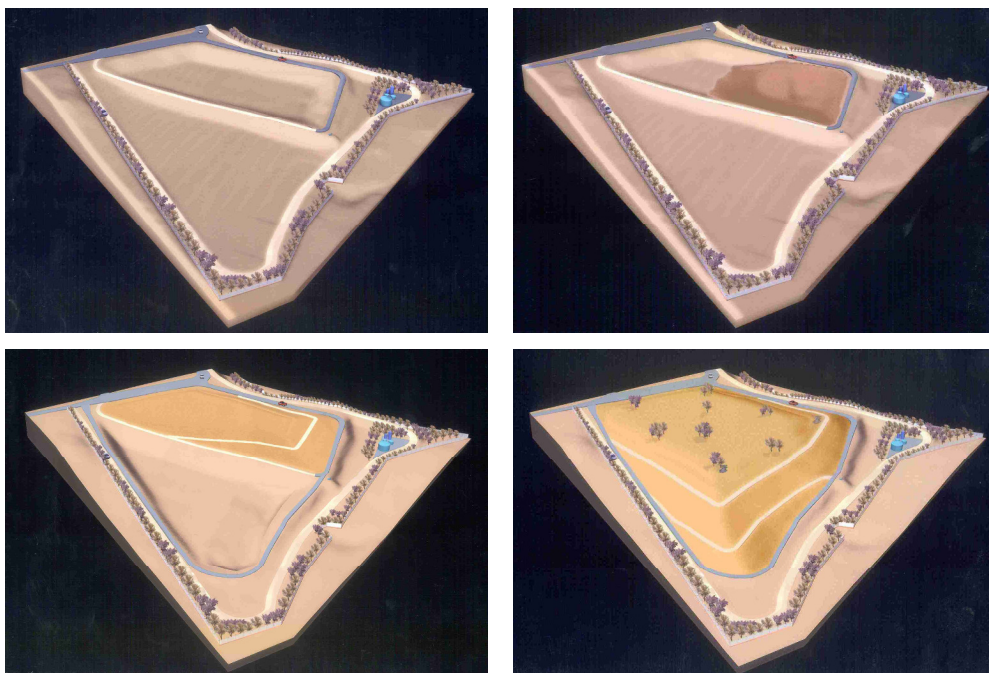
Ο ΧΥΤΑ Αμαρίου κατασκευάστηκε το 1997 με σκοπό την εξυπηρέτηση της Επαρχίας Αμαρίου. Μετά την παύση λειτουργίας του ΧΥΤΑ Μαρουλά το 2006, ο ΧΥΤΑ Αμαρίου εξυπηρετεί το σύνολο της Περιφερειακής Ενότητας Ρεθύμνου. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε σχετική επέκταση, κατάντη του ΧΥΤΑ Α' Φάσης με σκοπό την κάλυψη των αυξημένων απαιτήσεων. Οι αρχικές μελέτες και προβλέψεις που είχαν διενεργηθεί σχετικά με την λειτουργία του ΧΥΤΑ, όπως ήταν φυσικό, δεν λάμβαναν υπόψη τον υπερδιπλασιασμό του εξυπηρετούμενου πληθυσμού, για αυτό κρίθηκε απαραίτητη η διεξαγωγή νέων μελετών.

Ο ΧΥΤΑ έχει κατασκευαστεί σε δύο φάσεις (Α' και Β'), ενώ η Α' φάση του ΧΥΤΑ χωρίζεται σε δύο κύτταρα. Αυτή τη χρονική περίοδο βρίσκεται σε λειτουργία η Α' φάση του ΧΥΤΑ, ενώ η Β' φάση θα λειτουργήσει μετά την πλήρωση με απορρίμματα της Α' φάσης.

Στη συνέχεια, οι δύο αυτές φάσεις (Α' και Β') θα ενοποιηθούν, σχηματίζοντας ένα ενιαίο απορριμματικό ανάγλυφο, όπως φαίνεται και στις παρακάτω Εικόνες 1 έως 3.



Εικόνα 1. Πληρωμένοι τομείς (LS1 – LS3), μέτωπο ενεργής εναπόθεσης και χώρος επέκτασης
XYTA Αμαρίου [Νικολάου et al., 2013]



Εικόνα 2. Στάδια απορριμματικού ανάγλυφου ΧΥΤΑ Αμαρίου [Νικολάου et al., 2013]

Οι λεκάνες απόθεσης του ΧΥΤΑ, έχουν διαμορφωθεί με τη δημιουργία πλευρικών επιφανειών που κατεβαίνουν προς τον πυθμένα του ΧΥΤΑ με κλίσεις της τάξης του 1:3. Ουσιαστικά, δημιουργήθηκαν σκάμματα των οποίων τα περιμετρικά πρανή αποτελούν τμήματα της περιμετρικής οδοποιίας του ΧΥΤΑ. Οι κλίσεις αυτές στοχεύουν στο να εξασφαλίζουν, κατά πρώτο λόγο, ευστάθεια στην τοποθέτηση του τεχνητού γεωλογικού φραγμού, αλλά και στην τοποθέτηση και συγκράτηση όλων των στεγανοποιητικών υλικών του ΧΥΤΑ και κατά δεύτερο λόγο την ωφέλιμη χωρητικότητα του χώρου.

Οι κατά μήκος κλίσεις των λεκανών απόθεσης είναι της τάξης του 6% με κατεύθυνση από ΝΔ προς ΒΑ. Οι πυθμένες των λεκανών έχουν διαμορφωθεί σε σχήμα ανάποδου W, του οποίου οι κλίσεις είναι της τάξης του 2% με υψομετρική διαφορά από κάθε κορυφή 30cm. Στα χαμηλότερα υψομετρικά σημεία του πυθμένα έχουν τοποθετηθεί οι συλλεκτήριοι αγωγοί των στραγγισμάτων. Η έκταση των λεκανών απόθεσης ανέρχεται σε 35.100 m² περίπου για την Α' φάση και σε 39.120 m² περίπου για την Β' φάση (Νικολάου et al., 2013).



Εικόνα 3. Φωτογραφίες άποψης ΧΥΤΑ Αμαρίου

1.1.2 Σύστημα μόνωσης

Οι λεκάνες απόθεσης είναι στεγανοποιημένες τόσο στον πυθμένα, όσο και στα πρανή τους. Οι στεγανοποιητικές στρώσεις που έχουν τοποθετηθεί στις λεκάνες απόθεσης είναι οι ακόλουθες, (Νικολάου et al., 2013):

Για τη λεκάνη της Α' φάσης του ΧΥΤΑ

- Αργιλική στρώση πάχους 50 cm με συντελεστή διαπερατότητας $K=10^{-9}$ m/sec.
- Γεωμεμβράνη από HDPE πάχους 1,5 mm.
- Γεώφασμα προστασίας της γεωμεμβράνης βάρους 350gr/m².
- Στρώση άμμου προστασίας πάχους 10 cm.
- Αποστραγγιστική στρώση από χαλίκι πάχους 30 cm.

Για τον πυθμένα της Β' φάσης του ΧΥΤΑ

- Γεωσυνθετικός φραγμός G.S.L. (Geosynthetic Clay Liner) με συντελεστή διαπερατότητας $K=5 \times 10^{-11}$ m/sec.
- Γεωμεμβράνη από HDPE πάχους 1,5 mm.
- Γεώφασμα προστασίας της γεωμεμβράνης βάρους 350gr/m².
- Στρώση άμμου προστασίας πάχους 10 cm
- Αποστραγγιστική στρώση από χαλίκι πάχους 40 cm.

Για τα πρανή της Β' φάσης του XYTA

- Γεωσυνθετικός φραγμός G.S.L. (Geosynthetic Clay Liner) με συντελεστή διαπερατότητας $K=5 \times 10^{-11}$ m/sec.
- Γεωμεμβράνη από HDPE πάχους 1,5 mm.
- Γεώφασμα προστασίας της γεωμεμβράνης βάρους 350gr/m².
- Γεωσυνθετική αποστραγγιστική στρώση GEONET.
- Γεώφασμα προστασίας της αποστραγγιστικής στρώσης βάρους 150gr/m².

1.1.3 Μορφολογία εδάφους

Η υπό μελέτη περιοχή χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη αλλουβιακών προσχώσεων, ασβεστόλιθων, δολομιτών, φυλλιτών και χαλαζιτών. Οι νεογενείς σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, μάργες, αργίλους και κροκαλοπαγή.

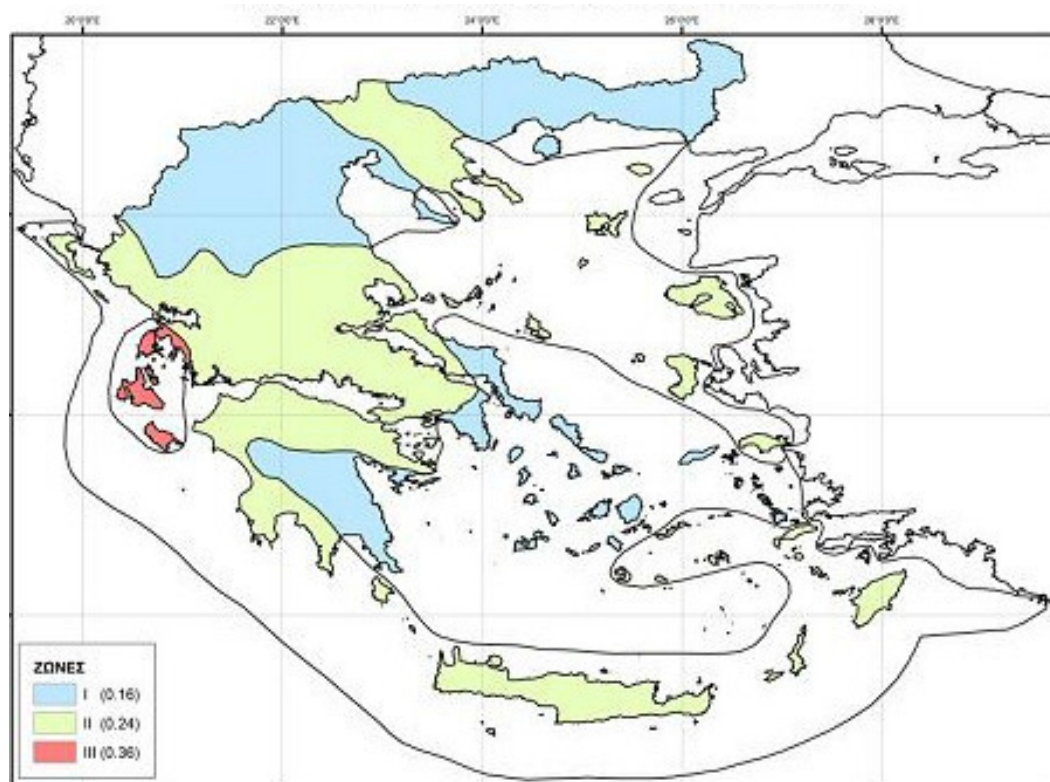
Ο άμεσου ενδιαφέροντος χώρος του XYTA χαρακτηρίζεται από μία έξαρση της φυλλιτικής-χαλαζιτικής σειράς πετρωμάτων, ο οποίος όμως περιβάλλεται από εξάρσεις ασβεστολιθικών σχηματισμών. Η φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά πετρωμάτων θεωρείται αδιαπέρατη από το νερό ή πολύ χαμηλής διαπερατότητας. Αντίθετα, τα ανθρακικά πετρώματα είναι διαπερατοί σχηματισμοί και υπόκεινται σε υψηλό βαθμό καρστικοποίησης.

Στην υπό μελέτη περιοχή, οι περιβάλλοντες ανθρακικοί σχηματισμοί (όπως ασβεστόλιθοι) χαρακτηρίζονται από μεγάλο πάχος και έντονη καρστικοποίηση. Το παραπάνω υποδηλώνει την υψηλή πιθανότητα ύπαρξης σημαντικής υδροφορίας. Επιπλέον, ο βαθμός καρστικοποίησης, είναι άμεσα συνδεδεμένος με την δυνατότητα μεταφοράς ρυπογόνων φορτίων σε μεγάλες αποστάσεις και αρνητικής επίδρασης σε υδροφόρους σχηματισμούς (Α.Νικολάου et al., 2013).

1.1.4 Στοιχεία σεισμικότητας

Ο νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας ενσωματώνεται στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό του 2000, που τροποποιήθηκε με την απόφαση Δ 17α/115/9/ΦΝ 275/7.8.2003 του Υφυπουργού ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε και δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ 1154Β/12.8.2003. Ο Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας που ισχύει σήμερα, σχεδιάστηκε την περίοδο 1986- 1989 και άρχισε να εφαρμόζεται το 1995. Η αναθεώρησή του, σχεδόν 15 χρόνια μετά την εκπόνησή του, κρίθηκε αναγκαία για πολλούς παράγοντες που μεσολάβησαν από τότε.

Με το νέο χάρτη, ο ελληνικός χώρος κατανέμεται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας. Οι τιμές εδαφικών επιταχύνσεων σχεδιασμού είναι 0,16g (ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας g) για την πρώτη ζώνη, 0,24g για τη δεύτερη ζώνη και 0,36g για την τρίτη ζώνη (portal.tee.gr).



Εικόνα 4. Χάρτης σεισμικών επιταχύνσεων Ελλάδας [portal.tee.gr]

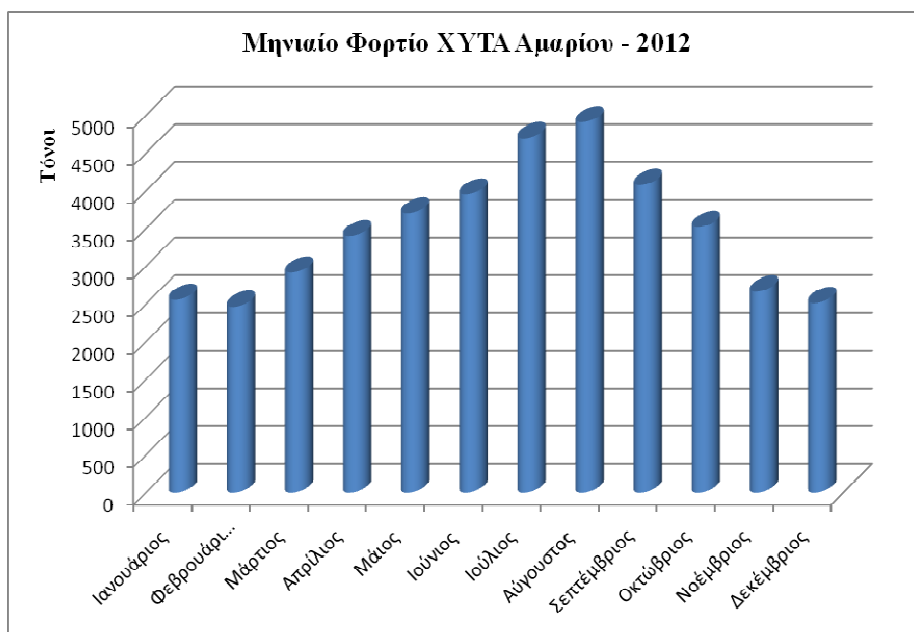
Όπως προκύπτει από τον χάρτη, όλη η Κρήτη ανήκει στη δεύτερη ζώνη, άρα κατά τους υπολογισμούς, λαμβάνεται ως τιμή σεισμικής επιτάχυνσης, η τιμή 0,24g.

1.1.5 Απορριμματικό φορτίο

1.1.5.1 Ποιοτική και ποσοτική ανάλυση

Το απορριμματικό φορτίο, που δέχεται ο ΧΥΤΑ Αμαρίου, είναι της τάξης των 45000 τόνων αστικών απορριμμάτων ετησίως. Εκτός αυτών, στο πεδίο αποτίθεται βιολογική ιλύς, που προέρχεται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, αλλά και ιλύς που παράγεται στην εγκατάσταση επεξεργασίας στραγγισμάτων του ΧΥΤΑ. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Αμάρι ΟΤΑ Α.Ε. το συνολικό εισερχόμενο φορτίο το έτος 2012, ήταν 41385 τόνοι, ενώ το αντίστοιχο το 2011 ήταν 46825 τόνοι απορριμμάτων, άρα παρατηρείται μια αυξητική τάση του εισερχόμενου απορριμματικού φορτίου.

Από το ραβδόγραμμα στην Εικόνα 5, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η παραγωγή απορριμμάτων κατά τους μήνες, Ιούλιος-Αύγουστος, δηλαδή τους μήνες που παρατηρείται αυξημένη τουριστική κίνηση, είναι αυξημένη σε σχέση με την παραγωγή στερεών αποβλήτων τη χειμερινή (Νοέμβριος-Φεβρουάριος). Στην ουσία, οι ποσότητες διπλασιάζονται κατά την τουριστική περίοδο.



Εικόνα 5. Μηνιαίο εισερχόμενο απορριμματικό φορτίο στον ΧΥΤΑ Αμαρίου κατά το 2012
[Νικολάου et al., 2013]

Για τον πλήρη προσδιορισμό των παραμέτρων του εισερχόμενου απορριμματικού φορτίου απαιτείται και η γνώση της ποιοτικής σύνθεσης των εισερχόμενων απορριμμάτων. Για αυτόν το λόγο πραγματοποιήθηκε μελέτη, από το Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων του Πολυτεχνείου Κρήτης, κατά

τα έτη 2003-2004, για τον προσδιορισμό της ποιοτικής σύνθεσης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, διαπιστώθηκε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό που δέχτηκε ο ΧΥΤΑ τα προηγούμενα χρόνια ήταν το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των απορριμμάτων (χαρτί και τροφικά υπολείμματα). Η διαπίστωση αυτή, σε συνδυασμό με τις λοιπές συνθήκες που επικρατούν εντός του σώματος του ΧΥΤΑ, ευνοεί τις διεργασίες βιολογικής αποδόμησης της οργανικής ύλης. Συμπερασματικά, θα επέλθει σημαντική παραγωγή βιοαερίου, καθίζηση της απορριμματικής μάζας, και αύξηση του ειδικού βάρους στο πεδίο, όπως επίσης και μεταβολή των εδαφικών χαρακτηριστικών, με την πάροδο του χρόνου.

Στο χρονικό διάστημα που μεσολάβησε, μεταβλήθηκαν σημαντικές παράμετροι, γι' αυτό η διενέργεια μιας νέας μελέτης, κρίθηκε απαραίτητη. Το γεγονός ότι είχε παρέλθει χρονικό διάστημα, περίπου μιας δεκαετίας από την προηγούμενη αντίστοιχη μελέτη, οδήγησε στην ανάγκη ύπαρξης μιας σύγχρονης ανάλυσης. Επίσης, η διαφοροποίηση του καθεστώτος εισροής απορριμμάτων στον ΧΥΤΑ Αμαρίου (με την εξυπηρέτηση πλέον του συνόλου του Ν. Ρεθύμνης), σε συνδυασμό με τα εφαρμοζόμενα προγράμματα ανακύκλωσης, μέσω των οποίων διαφοροποιείται το προς υγειονομική ταφή κλάσμα απορριμμάτων, συνετέλεσε στην διενέργεια νέας ανάλυσης.

Τα νέα δεδομένα που προέκυψαν, θα χρησιμοποιηθούν στην διαχείριση των στερεών αποβλήτων ολόκληρου του νομού Ρεθύμνης, αφού αφορούν, πια, το σύνολό του. Επίσης, θα χρησιμοποιηθούν για τους απαραίτητους υπολογισμούς στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, ως κύριο εργαλείο για την εκτίμηση του ειδικού βάρους των απορριμμάτων, παραμέτρου απαραίτητης για την ανάλυση της ευστάθειας.

Η νέα ποιοτική και ποσοτική ανάλυση έχει ετήσια μορφή, ώστε να λαμβάνει υπόψη τις εποχιακές διακυμάνσεις της σύστασης των απορριμμάτων, πράγμα απαραίτητο σε περιοχές με πληθυσμιακή αιχμή τους καλοκαιρινούς μήνες, όπως είναι ο Νομός Ρεθύμνης. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες και αναλύσεις, σε 4 φάσεις. Η έναρξη αυτών (1^η φάση) έλαβε χώρα κατά την καλοκαιρινή περίοδο, όπου παρατηρείται και το μέγιστο παραγόμενο απορριμματικό φορτίο. Η 2^η φάση δειγματοληψιών πραγματοποιήθηκε το φθινόπωρο, η 3^η το χειμώνα και η 4^η, και τελευταία, την άνοιξη. Στους Πίνακες 1 έως 4 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ποιοτικής ανάλυσης ανά Δήμο του Ν.

Ρεθύμνης αλλά και τα συγκεντρωτικά ποσοστά στο Νομό, στις τέσσερις δειγματοληπτικές φάσεις.

Πίνακας 1. Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ, Α' Φάση δειγματοληψίας

| ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ % ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΑ (Α' ΦΑΣΗ) | | | | | | |
|---|------------|-------------|------------------|----------------|-------------|-------------|
| ΚΛΑΣΜΑΤΑ | Δ. ΑΜΑΡΙΟΥ | Δ. ΑΝΩΓΕΙΩΝ | Δ. ΑΓ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ | Δ. ΜΥΛΟΠΟΤΑΜΟΥ | Δ. ΡΕΘΥΜΝΟΥ | Ν. ΡΕΘΥΜΝΟΥ |
| ΠΛΑΣΤΙΚΟ | 20,47 | 22,82 | 23,52 | 24,97 | 23,77 | 23,66 |
| ΖΥΜΩΣΙΜΑ | 47,22 | 45,36 | 38,99 | 51,63 | 51,29 | 49,32 |
| ΧΑΡΤΙ | 10,04 | 4,69 | 11,25 | 5,27 | 6,33 | 6,95 |
| Δ.Ξ.Υ.Λ.* | 3,87 | 7,16 | 6,92 | 4,72 | 5,42 | 5,39 |
| ΓΥΑΛΙ | 2,17 | 0,85 | 2,46 | 2,59 | 2,36 | 2,34 |
| ΜΕΤΑΛΛΟ | 1,05 | 1,02 | 1,70 | 1,34 | 0,75 | 1,02 |
| ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ | 0,61 | 0,68 | 1,76 | 0,55 | 0,74 | 0,81 |
| ΑΔΡΑΝΗ | 4,03 | 2,90 | 1,14 | 1,40 | 0,34 | 1,06 |
| Χ.Π.&Ο.Χ.** | 10,54 | 14,52 | 11,80 | 7,47 | 8,92 | 9,33 |
| ΕΙΔ. ΤΥΠΟΥ | 0,00 | 0,00 | 0,46 | 0,07 | 0,07 | 0,11 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

*Δ.Ξ.Υ.Λ.: Δέρμα Ξύλο Ύφασμα Λάστιχα

**Χ.Π.&Ο.Χ.: Χαρτιά Προσωπικής και Οικιακής Χρήσης

Πίνακας 2. Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ, Β' Φάση δειγματοληψίας

| ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ % ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΑ (Β' ΦΑΣΗ) | | | | | | |
|---|------------|-------------|------------------|----------------|-------------|-------------|
| ΚΛΑΣΜΑΤΑ | Δ. ΑΜΑΡΙΟΥ | Δ. ΑΝΩΓΕΙΩΝ | Δ. ΑΓ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ | Δ. ΜΥΛΟΠΟΤΑΜΟΥ | Δ. ΡΕΘΥΜΝΟΥ | Ν. ΡΕΘΥΜΝΟΥ |
| ΠΛΑΣΤΙΚΟ | 17,79 | 25,11 | 24,72 | 26,67 | 25,62 | 25,04 |
| ΖΥΜΩΣΙΜΑ | 48,99 | 47,73 | 41,75 | 49,29 | 46,66 | 46,84 |
| ΧΑΡΤΙ | 8,90 | 7,03 | 9,19 | 4,48 | 4,65 | 5,61 |
| Δ.Ξ.Υ.Λ. | 6,41 | 2,74 | 5,41 | 2,88 | 7,48 | 6,04 |
| ΓΥΑΛΙ | 4,09 | 2,94 | 7,77 | 6,79 | 4,02 | 4,98 |
| ΜΕΤΑΛΛΟ | 1,09 | 3,56 | 1,48 | 0,66 | 1,26 | 1,24 |
| ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ | 0,30 | 0,64 | 0,72 | 0,35 | 0,54 | 0,51 |
| ΑΔΡΑΝΗ | 1,31 | 0,76 | 1,96 | 1,23 | 1,69 | 1,56 |
| Χ.Π.&Ο.Χ. | 10,53 | 9,46 | 7,00 | 5,87 | 8,00 | 7,73 |
| ΕΙΔ. ΤΥΠΟΥ | 0,57 | 0,03 | 0,00 | 1,78 | 0,07 | 0,45 |

Πίνακας 3. Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ, Γ' Φάση δειγματοληψίας

| ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ % ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΑ (Γ' ΦΑΣΗ) | | | | | | |
|---|------------|-------------|------------------|----------------|-------------|-------------|
| ΚΛΑΣΜΑΤΑ | Δ. ΑΜΑΡΙΟΥ | Δ. ΑΝΩΓΕΙΩΝ | Δ. ΑΓ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ | Δ. ΜΥΛΟΠΟΤΑΜΟΥ | Δ. ΡΕΘΥΜΝΟΥ | Ν. ΡΕΘΥΜΝΟΥ |
| ΠΛΑΣΤΙΚΟ | 16,73 | 26,30 | 17,46 | 16,08 | 22,96 | 20,54 |
| ΖΥΜΩΣΙΜΑ | 55,72 | 47,73 | 50,45 | 55,86 | 45,62 | 49,17 |
| ΧΑΡΤΙ | 10,76 | 12,32 | 10,26 | 10,92 | 8,80 | 9,70 |
| Δ.Ξ.Υ.Δ. | 3,00 | 4,16 | 5,78 | 2,55 | 4,76 | 4,27 |
| ΓΥΑΛΙ | 2,12 | 0,76 | 1,33 | 1,42 | 5,38 | 3,65 |
| ΜΕΤΑΛΛΟ | 1,92 | 0,85 | 1,36 | 1,30 | 1,45 | 1,43 |
| ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ | 0,39 | 0,09 | 0,15 | 0,19 | 0,69 | 0,48 |
| ΑΔΡΑΝΗ | 0,10 | 0,00 | 2,85 | 0,61 | 0,60 | 0,80 |
| Χ.Π.&Ο.Χ. | 9,06 | 7,79 | 8,87 | 10,66 | 9,55 | 9,58 |
| ΕΙΔ. ΤΥΠΟΥ | 0,20 | 0,00 | 1,48 | 0,40 | 0,19 | 0,38 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Πίνακας 4. Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ, Δ' Φάση

| ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ % ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΑ (Δ' ΦΑΣΗ) | | | | | | |
|---|------------|-------------|------------------|----------------|-------------|-------------|
| ΚΛΑΣΜΑΤΑ | Δ. ΑΜΑΡΙΟΥ | Δ. ΑΝΩΓΕΙΩΝ | Δ. ΑΓ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ | Δ. ΜΥΛΟΠΟΤΑΜΟΥ | Δ. ΡΕΘΥΜΝΟΥ | Ν. ΡΕΘΥΜΝΟΥ |
| ΠΛΑΣΤΙΚΟ | 19,25 | 26,12 | 24,10 | 22,68 | 22,87 | 22,80 |
| ΖΥΜΩΣΙΜΑ | 46,81 | 46,05 | 48,72 | 47,78 | 47,38 | 47,52 |
| ΧΑΡΤΙ | 11,11 | 12,13 | 8,21 | 10,51 | 10,05 | 10,10 |
| Δ.Ξ.Υ.Δ. | 3,86 | 2,62 | 3,90 | 4,11 | 3,94 | 3,91 |
| ΓΥΑΛΙ | 3,04 | 0,46 | 2,50 | 1,26 | 2,38 | 2,15 |
| ΜΕΤΑΛΛΟ | 2,57 | 2,17 | 1,93 | 1,56 | 1,16 | 1,49 |
| ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ | 1,79 | 0,08 | 0,42 | 1,20 | 1,08 | 1,04 |
| ΑΔΡΑΝΗ | 1,16 | 1,48 | 1,62 | 0,00 | 1,04 | 0,93 |
| Χ.Π.&Ο.Χ. | 10,38 | 8,78 | 8,43 | 10,76 | 10,08 | 10,00 |
| ΕΙΔ. ΤΥΠΟΥ | 0,03 | 0,11 | 0,18 | 0,15 | 0,03 | 0,07 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Πέραν της γενικής ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης και των τεσσάρων φάσεων που παρουσιάστηκαν, κρίθηκε σκόπιμο να ληφθούν και στοιχεία σχετικά με τα εισερχόμενα νοσοκομειακά απόβλητα. Για τον λόγο αυτό, έγινε εκτίμηση της

σύστασης από το απορριμματοφόρο που συλλέγει τα απόβλητα του νοσοκομείου, περίπου σε εβδομαδιαία βάση. Τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζουν αποκλειστικά την ποιοτική σύσταση του νοσοκομειακού κλάσματος που καταλήγει στον ΧΥΤΑ, χωρίς να υπάρχει ποσοτική εικόνα αυτών, καθότι δεν γίνεται διαχωρισμός. Τα αποτελέσματα αυτά δεν συγκαταλέγονται στην ευρύτερη ποιοτική συσχέτιση, αλλά χαρακτηρίζουν μία ειδική κατηγορία εισερχόμενου φορτίου.

Πίνακας 5. Κατά βάρος ποσοστιαία σύνθεση νοσοκομειακού κλάσματος

| ΥΛΙΚΟ | ΠΟΣΟΣΤΟ |
|------------|---------|
| ΠΛΑΣΤΙΚΟ | 29,77 |
| ZYMΩΣΙΜΑ | 25,31 |
| ΧΑΡΤΙ | 5,05 |
| Δ.Ξ.Υ.Δ. | 3,90 |
| ΓΥΑΛΙ | 5,47 |
| ΜΕΤΑΛΛΟ | 0,46 |
| ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ | 0,73 |
| ΑΔΡΑΝΗ | 1,07 |
| Χ.Π.&Ο.Χ. | 14,77 |
| ΕΙΔ. ΤΥΠΟΥ | 13,47 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 100,00 |

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα στοιχεία σύστασης του νοσοκομειακού κλάσματος. Το κλάσμα διαχωρισμού «Ειδικού Τύπου» που αναφέρεται στον Πίνακα 6 αφορά αποκλειστικά νοσοκομειακά απόβλητα (σύριγγες, καθετήρες, ορούς, φιαλίδια κ.α.). Στη συνέχεια παρατίθενται τα συγκριτικά στοιχεία της ποιοτικής ανάλυσης των τεσσάρων φάσεων, για το σύνολο του Νομού Ρεθύμνης. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία είναι εύκολο να υπολογιστεί η πυκνότητα και το ειδικό βάρος των απορριμμάτων. (Παναγιωτακόπουλος, 2007).

Πίνακας 6. Συγκριτικά στοιχεία ποσοστιαίας σύνθεσης ΑΣΑ

| ΚΛΑΣΜΑΤΑ | Α' ΦΑΣΗ | Β' ΦΑΣΗ | Γ' ΦΑΣΗ | Δ' ΦΑΣΗ |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| ΠΛΑΣΤΙΚΟ | 23,66 | 25,04 | 20,54 | 22,80 |
| ΖΥΜΩΣΙΜΑ | 49,32 | 46,84 | 49,17 | 47,52 |
| ΧΑΡΤΙ | 6,95 | 5,61 | 9,70 | 10,10 |
| Λ.Ξ.Υ.Λ. | 5,39 | 6,04 | 4,27 | 3,91 |
| ΓΥΑΛΙ | 2,34 | 4,98 | 3,65 | 2,15 |
| ΜΕΤΑΛΛΟ | 1,02 | 1,24 | 1,43 | 1,49 |
| ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ | 0,81 | 0,51 | 0,48 | 1,04 |
| ΑΔΡΑΝΗ | 1,06 | 1,56 | 0,80 | 0,93 |
| Χ.Π.&Ο.Χ. | 9,33 | 7,73 | 9,58 | 10,00 |
| ΕΙΔ. ΤΥΠΟΥ | 0,11 | 0,45 | 0,38 | 0,07 |
| ΥΠΟΛΟΙΠΑ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

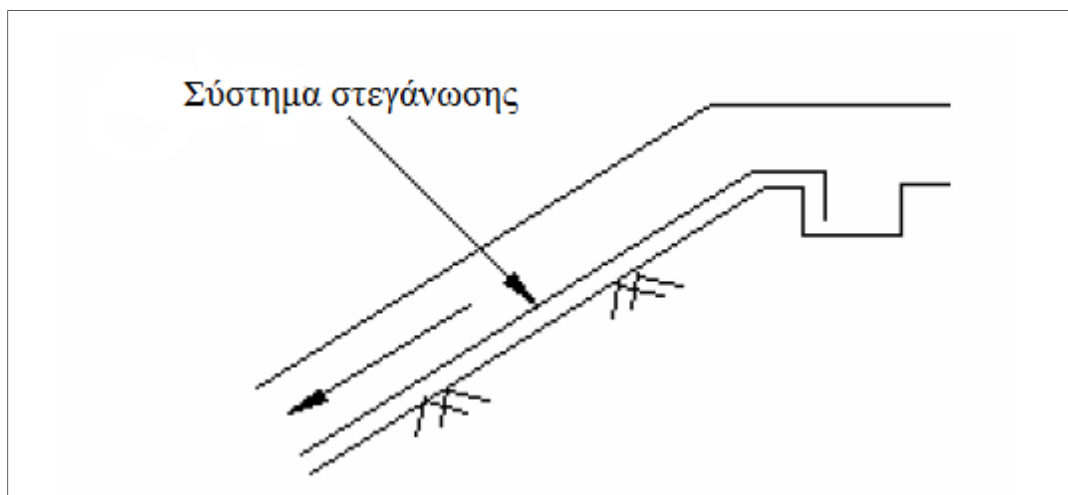
2.1 Τύποι αστοχίας ενός ΧΥΤΑ

Η ευστάθεια των πρανών των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων είναι ένα σημαντικό θέμα με καταστροφικές συνέπειες. Μερικές αστοχίες που έχουν καταγραφεί, είχαν ως αποτέλεσμα την απώλεια ζωών. Για αυτόν το λόγο, η κατανόηση των μηχανισμών των αστοχιών που μπορούν να συμβούν σε χώρους υγειονομικής ταφής, είναι πολύ κρίσιμη.

Ο Eid (2000) ισχυρίστηκε ότι μόνο τα ομοιογενή υλικά, όπως μαλακές άργιλοι, εμπλέκονται σε περιπτώσεις περιστροφικών αστοχιών, ενώ σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων είναι πιο πιθανές μεταθετικές μορφές αστοχίας. Ωστόσο, ένα χρόνο μετά την δημοσίευση αυτής της έρευνας, η περιστροφική αστοχία που συνέβη σε χώρο υγειονομικής ταφής στις Φιλιππίνες, οδήγησε στην ολίσθηση περισσότερων από 1,2 εκατομμυρίων m³ απορριμματικής μάζας και στο θάνατο 300 ανθρώπων. Αυτό το ατύχημα τόνισε την ανάγκη περαιτέρω έρευνας σε αυτόν τον μηχανισμό αστοχίας. Έτσι, στη συνέχεια οι Qian et al., (2001) δημοσίευσαν τους γενικούς μηχανισμούς αστοχίας χώρων υγειονομικής ταφής. Στη συνέχεια, περιγράφονται διάφοροι τύποι αστοχιών ΧΥΤΑ. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα διερευνηθεί η πιθανότητα κυκλικής αστοχίας.

2.1.1 Αστοχία από ολίσθηση του συστήματος συλλογής στραγγισμάτων

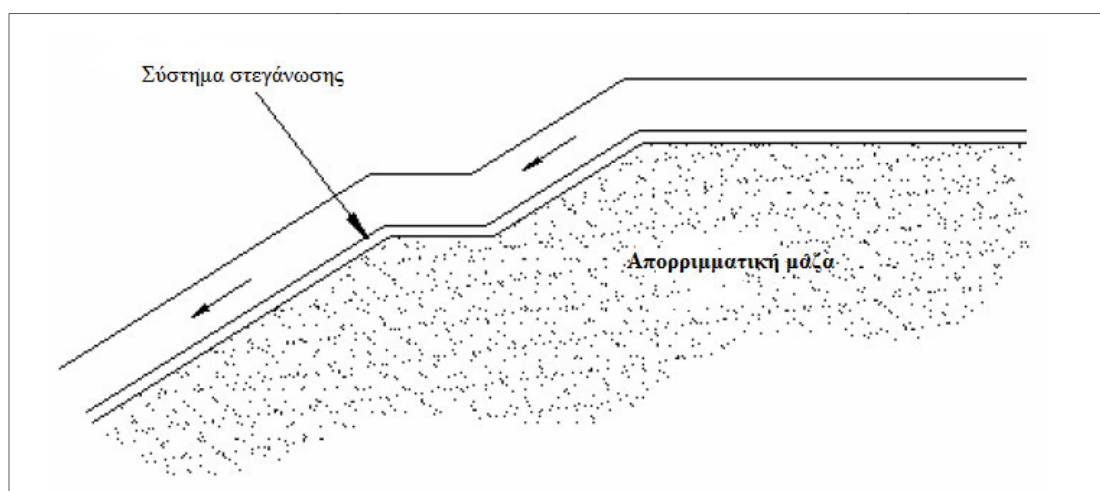
Το σύστημα συλλογής στραγγισμάτων, μπορεί να ολισθήσει πάνω στο υποκείμενο στρώμα στεγάνωσης, αν το πρανές έχει απότομη κλίση. Τέτοιου είδους αστοχία, αναμένεται κατά τη διάρκεια μεγάλων βροχοπτώσεων. Αυτή είναι μια αστοχία διεπιφάνειας (Pinarati, 2005).



Εικόνα 6. Αστοχία του συστήματος συλλογής στραγγισμάτων [Pinarati, 2005]

2.1.2 Αστοχία από ολίσθηση του τελικού συστήματος κάλυψης

Το τελικό σύστημα κάλυψης (το επιφανειακό έδαφος και το έδαφος προστασίας), μπορεί επίσης να ολισθήσει, στη στεγανωτική στρώση, σε κατάσταση έντονης βροχόπτωσης, σε πρανή με μεγάλες κλίσεις (Pinarati, 2005).

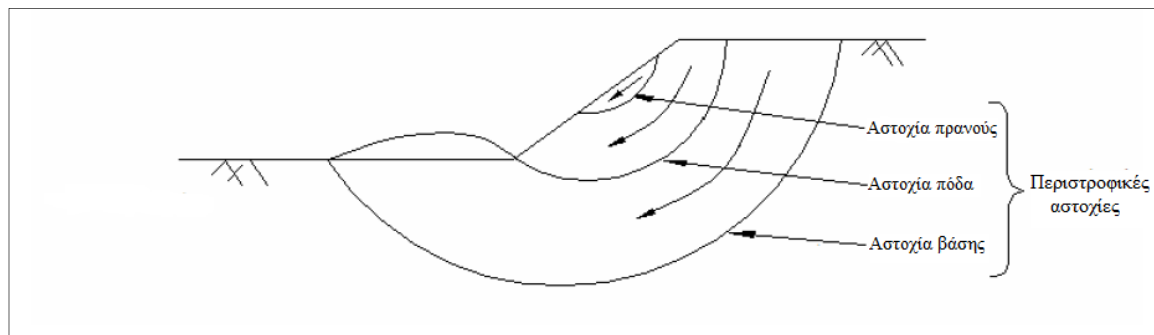


Εικόνα 7. Αστοχία του τελικού υλικού κάλυψης [Pinarati, 2005]

2.1.3 Περιστροφική αστοχία των πλευρικών τοιχωμάτων του πρανούς ή της βάσης

Η εδαφική μάζα πίσω από το χώρο αποθήκευσης αποβλήτων, ή κάτω από το πεδίο, μπορεί να είναι ασταθής και να αστοχήσει. Η αστοχία είναι συνήθως περιστροφική,

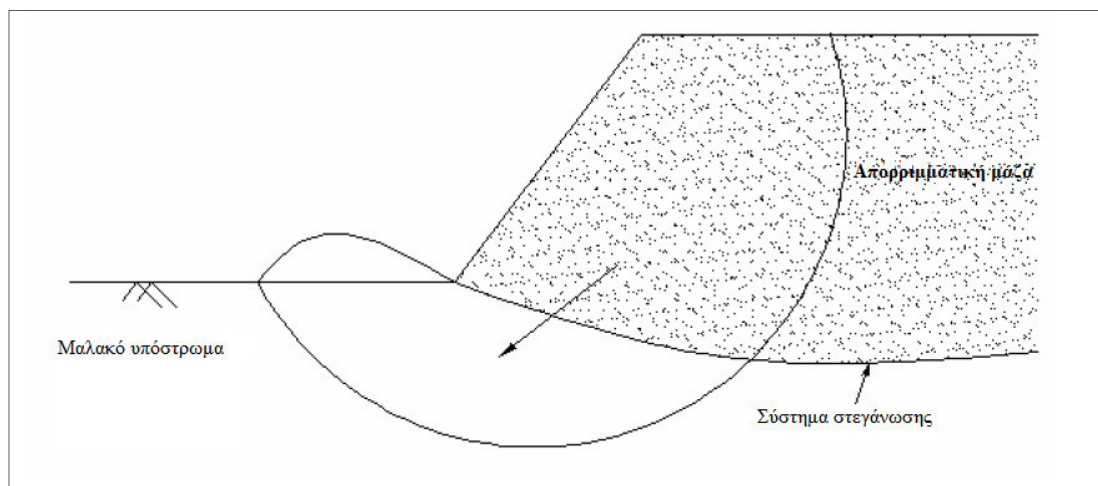
και εμφανίζεται κατά μήκος του πρανούς, στον πόδα τα του πρανούς, ή εντός της θεμελίωσης (Pinarati, 2005).



Εικόνα 8. Περιστροφική αστοχία πλευρικών πρανών του ΧΥΤΑ [Pinarati, 2005]

2.1.4 Περιστροφική αστοχία υποστρώματος με συμμετοχή αποβλήτων, στεγάνωσης, και υπεδάφους

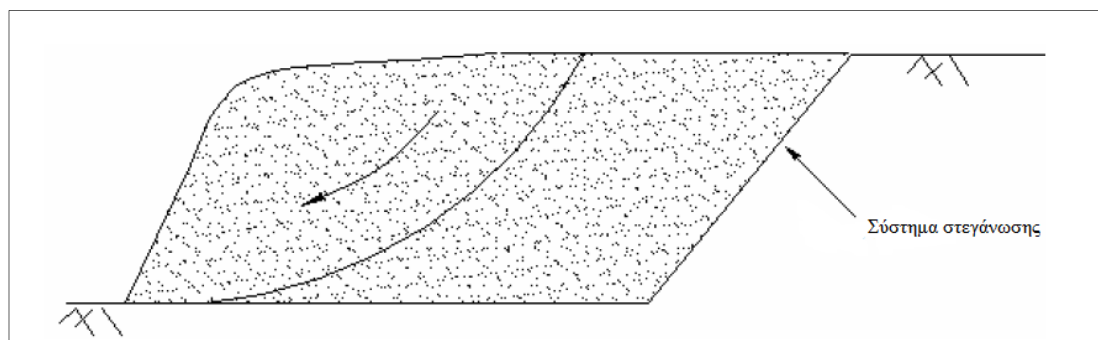
Μια περιστροφική αστοχία μπορεί να ξεκινήσει σε ένα μαλακό υπόστρωμα που μπορεί όμως να επεκταθεί μέχρι τη μάζα των αποβλήτων. Η αντίσταση από ένα σύστημα στεγάνωσης, εάν υπάρχει, είναι αμελητέα, (Pinarati, 2005).



Εικόνα 9. Περιστροφική αστοχία υποστρώματος με συμμετοχή αποβλήτων, στεγάνωσης, και υπεδάφους [Pinarati, 2005]

2.1.5 Περιστροφική αστοχία μέσα στην απορριμματική μάζα

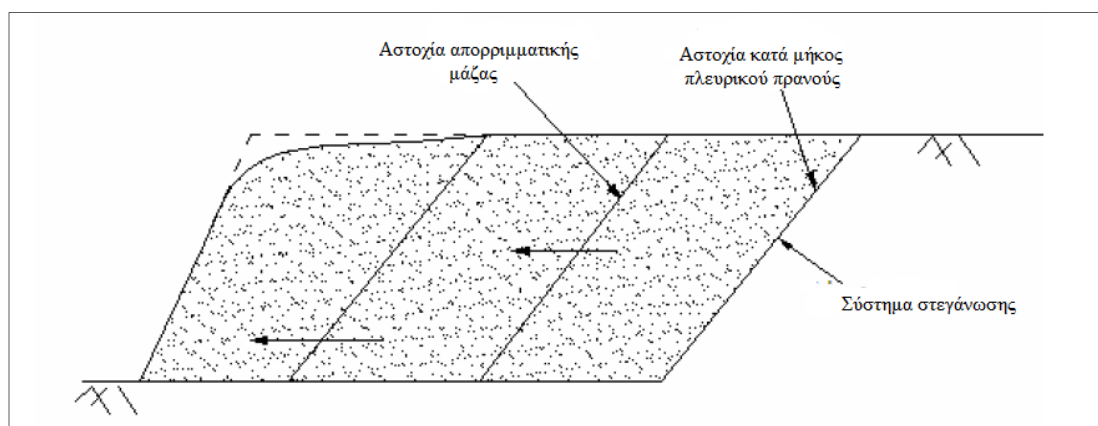
Η αστοχία μπορεί επίσης να εμφανιστεί στο εσωτερικό της μάζας των αποβλήτων, γεγονός εντελώς ανεξάρτητο από το σύστημα στεγάνωσης (Pinarati, 2005).



Εικόνα 10. Περιστροφική αστοχία μέσα στην απορριμματική μάζα [Pinarati, 2005]

2.1.6 Μεταθετική ολίσθηση κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης

Η αστοχία αυτή μπορεί να συμβεί με την απορριμματική μάζα να ολισθαίνει σε κάποιο σημείο της μάζας των αποβλήτων (Pinarati, 2005).



Εικόνα 11. Ολίσθηση κατά μήκος του συστήματος στεγάνωσης [Pinarati, 2005]

2.2 Ευστάθεια, συντελεστής ασφαλείας

Ένα πρανές θεωρείται ευσταθές μόνο όταν η διατμητική καταπόνηση που αναπτύσσεται κατά μήκος της πιο πιθανής επιφάνειας αστοχίας είναι μικρότερη από τη διατμητική αντοχή του υλικού σε αυτή την επιφάνεια. Ο συντελεστής κατά τον οποίο, η διατμητική αντοχή του υλικού του πρανούς, πρέπει να μειωθεί, έτσι ώστε να βρεθεί η μάζα σε κατάσταση οριακής ισορροπίας, κατά μήκος της επιλεγμένης επιφάνειας αστοχίας, ονομάζεται συντελεστής ασφάλειας της συγκεκριμένης επιφάνειας αστοχίας (Pinarati, 2005).

Ο Συντελεστής ασφαλείας (Factor of Safety, FOS) ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων και των ροπών που αντιστέκονται προς τις κινητήριες δυνάμεις ολίσθησης και ροπές ανατροπής.

$$FOS = \frac{\sum \text{Αντιστεκόμενες δυνάμεις/ροπές}}{\sum \text{Κινητήριες δυνάμεις/ροπές}}$$

Παρά το γεγονός ότι η ασφάλεια των φυσικών και τεχνητών πρανών περιέχει ασάφειες, είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται η ίδια έκφραση του συντελεστή ασφαλείας, για διαφορετικούς βαθμούς αβεβαιότητας που εμπλέκονται στον υπολογισμό του, προκειμένου να εκτιμηθεί η ευστάθεια (Duncan, 2000). Η προσέγγιση αυτή καλείται ντετερμινιστική, η οποία αντίθετα με την πιθανοτική προσέγγιση, παρέχει τη μέση τιμή των αβέβαιων παραμέτρων και διακρίνει έναν παράγοντα μεταξύ υψηλών και χαμηλών αβέβαιων συνθηκών (Lacasse et al., 2007).

Τιμές του συντελεστή ασφαλείας <1 , υποδεικνύουν ότι θα λάβει χώρα αστοχία, ενώ τιμές ≥ 1 είναι αποδεκτές, από την άποψη της ασφαλείας. Ωστόσο, όλα εξαρτώνται από την ακρίβεια των δεδομένων, η οποία, γενικά, είναι αμφίβολη σε γεωτεχνικές κατασκευές, ειδικά για τους χώρους υγειονομικής ταφής και χωματερές. Έτσι, είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται $FOS = 1.5$ κατά τον σχεδιασμό ενός ΧΥΤΑ ως μια αξιόπιστη τιμή για την ευστάθεια των πρανών σε γεωτεχνικά έργα (US Army Corps of Engineers, 1997; Jahanfar, 2014; Ευρωκώδικας 7, 2008).

Ο συντελεστής που έχει την ελάχιστη τιμή από όλους τους πιθανούς για ένα πρανές, ονομάζεται συνολικός συντελεστής ασφαλείας για το πρανές. Η επιφάνεια ολίσθησης που αντιστοιχεί στον παραπάνω συντελεστή, ονομάζεται επιφάνεια αστοχίας ή επιφάνεια ολίσθησης του πρανούς.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια

Οι παράγοντες που επηρεάζουν και λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση ευστάθειας πρανών, είναι οι ακόλουθοι: η γεωμετρία, η διατμητική αντοχή των υλικών, οι συνθήκες φόρτισης, η πίεση του νερού των πόρων, οι καθιζήσεις και οι διάφορες λειτουργίες.

2.3.1 Γεωμετρία

Η κατατομή του απορριμματικού πρανούς του υπό μελέτη ΧΥΤΑ, έχει σημαντική επίδραση στην ευστάθειά του. Οι εξωτερικές πλαγιές, οι υποκείμενες στρώσεις, το ύψος πλήρωσης και οι επιπλέον αποθέσεις δρουν ως κινητήριες δυνάμεις στην ανάλυση ευστάθειας πρανών. Αναχώματα ή αναβαθμοί στον πόδα του πρανούς, συνεισφέρουν στις δυνάμεις αντίστασης. Συμπερασματικά, τα στρώματα των κατώτερων βαθμίδων, τα στρώματα του κύριου σώματος του ΧΥΤΑ αλλά και τα πλάγια πρανή της στεγάνωσης, πρέπει να διατηρούνται κατά το δυνατό χωρίς έντονες κλίσεις (Jahanfar, 2014; Pinapati 2005).

2.3.2 Διατμητική αντοχή

Η διατμητική αντοχή των εδαφών επένδυσης, οι διεπιφάνειες μεταξύ των διαφόρων γεωσυνθετικών υλικών και του εδάφους, και τα απορρίμματα, επηρεάζουν την ευστάθεια των ΧΥΤΑ. Η διατμητική αντοχή των υλικών του υποστρώματος ή των υποκείμενων εδαφών, αντιστέκεται σε πιθανή αστοχία. Η διατμητική αντοχή των απορριμμάτων, αλλά και η αντοχή των εδαφών των περιμετρικών πρανών, παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια. Επίσης, πρέπει να συνυπολογίζεται και το ποσοστό των βιοστερεών που αποτίθεται μαζί με τα αστικά στερεά απόβλητα, εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητας σε υγρασία και σε οργανικό υλικό (Pinapati 2005).

2.3.3 Συνθήκες φόρτισης

Το ειδικό βάρος των απορριμμάτων και κάθε εξωτερικό φορτίο, όπως η αποθήκευση σε σωρούς πάνω στο σώμα του ΧΥΤΑ, είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τις συνθήκες φόρτισης του χώρου υγειονομικής ταφής. Οι κατακόρυφες αποθέσεις, οι σωροί, αλλά και φορτία από οχήματα και δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του πρανούς, αυξάνουν το φορτίο σε όλα τα υλικά. Αυτό το επιπλέον φορτίο που επιβάλλεται, συμβάλλει στην στερεοποίηση των απορριμμάτων. Μετά το κλείσιμο του χώρου, μπορεί να λάβουν χώρα διάφορες δραστηριότητες, που μπορούν να αυξήσουν ή και να μειώσουν τα φορτία, στα υλικά (Pinapati, 2005).

Ένας χώρος υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, εκτός των στατικών φορτίων, στα οποία υποβάλλεται, σε χώρες που χαρακτηρίζονται από υψηλή σεισμικότητα,

υπόκειται και σε σεισμική καταπόνηση. Η επιπρόσθετη δυναμική καταπόνηση, επιβάλλεται κυρίως μέσω αδρανειακών επιταχύνσεων (και κατά συνέπεια δυνάμεων), οι οποίες αναπτύσσονται στο σώμα της απορριμματικής μάζας και αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο τοπικής ή καθολικής αστοχίας. Η υπολογιστική πρακτική, προτείνει τη χρήση ψευδοστατικών αναλύσεων, οι οποίες βασίζονται συνήθως στην υπόθεση σταθερής (χωρικός και χρονικός) επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Αυτού του είδους οι αναλύσεις χαρακτηρίζονται από απλότητα και χαμηλό υπολογιστικό κόστος, και είναι ιδιαίτερες κατάλληλες όταν δεν υπάρχουν πειραματικά στοιχεία για τον προσδιορισμό των εδαφικών παραμέτρων, που απαιτούνται για την δυναμική ανάλυση (Ψαρρόπουλος και Τσομπανάκης, 2005).

2.3.4 Πίεση του νερού των πόρων

Οι αυξήσεις στην πίεση του νερού των πόρων, μπορούν να έχουν επιζήμια αποτελέσματα στην ευστάθεια των ΧΥΤΑ, ενώ μια αντίστοιχη μείωση μπορεί να έχει σταθεροποιητικά αποτελέσματα. Αυτές οι αλλαγές στις πιέσεις, επιδρούν στην αντοχή των απορριμμάτων, εξαιτίας των αλλαγών στις ενεργές τάσεις, οι οποίες μειώνονται και μειώνουν τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή. Αντίθετα, μια μείωση (π.χ. αρνητική πίεση νερού των πόρων) μπορεί να αυξήσει την ευστάθεια του πρανούς, αυξάνοντας στην συνέχεια την κατακόρυφη ενεργή τάση. Αποσταθεροποιητικά αποτελέσματα μπορούν να προκύψουν από τα στραγγίσματα, τον υπόγειο υδροφόρα, την διήθηση επιφανειακών υδάτων και την επανακυκλοφορία στραγγισμάτων στην απορριμματική μάζα, αν δεν υπάρχει κατάλληλος έλεγχος. Επίσης, η διάθεση ιλύων και βιοστερεών, αλλά και υγρών αποβλήτων, δημιουργεί ανεπιθύμητα αποτελέσματα, επειδή το νερό λιμνάζει και προκαλεί υγρές εστίες, ρηχά ρυάκια και εν τέλει οδηγεί στην αστοχία των ενδιάμεσων και τελικών στρώσεων κάλυψης καθώς δημιουργούνται περιοχές χαμηλότερης αντοχής, οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν ως ασθενείς διεπιφάνειες.

Παρόλο που η εισαγωγή του νερού ή άλλων υγρών ενισχύει την αποικοδόμηση των αποβλήτων, έχει δυνητικά αποσταθεροποιητικές επιπτώσεις, που μπορεί να μετριαστούν με σωστό σχεδιασμό, κατά την κατασκευή, και κατά τις πρακτικές λειτουργίας. Ως εκ τούτου, οι χώροι υγειονομικής ταφής μπορούν να

σχεδιασθούν, να κατασκευαστούν και να λειτουργούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις της νομοθεσίας και τα πρότυπα της πρακτικής για την ευστάθεια πρανών.

Αύξηση της στάθμης των υδάτων στην απορριμματική μάζα, μπορεί να συμβεί εξαιτίας διαφόρων παραγόντων:

- Ισχυρής βροχόπτωσης και επακόλουθων υψηλών πιέσεων του νερού των πόρων
- Δημιουργίας στραγγισμάτων (λόγω προβλημάτων αποστράγγισης, ή ανεπαρκούς επανακυκλοφορίας)
- Υψηλών συγκεντρώσεων βιοαερίου αφού η βιοαποικοδόμηση των αποβλήτων παράγει βιοαέριο, που παγιδεύεται στους χώρους υγειονομικής ταφής και ανεβάζει την πίεση του νερού των πόρων σε κορεσμένα απόβλητα
- Ταφή πλαστικών αντικειμένων, επειδή η απόθεση πλαστικών αντικειμένων σε έναν ΧΥΤΑ οδηγεί σε υψηλότερη οριζόντια διαπερατότητα, με αποτέλεσμα τη συγκράτηση του νερού. Επιπλέον, η διατμητική αντοχή θα μπορούσε δυνητικά να μειωθεί από πολλές διεπιφάνειες μεταξύ των πλαστικών (Jahanfar, 2014).

2.3.5 Καθιζήσεις

Οι καθιζήσεις σε χώρους υγειονομικής ταφής υλικών μπορούν να έχουν τόσο σταθεροποιητικές όσο και αποσταθεροποιητικές επιδράσεις στην ευστάθεια πρανών. Αποσταθεροποίηση προκαλείται από μεταβολή των τάσεων, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν θραύση και κατάρρευση. Τοπικές καθιζήσεις και χαμηλά σημεία ενθαρρύνουν την διείσδυση του επιφανειακού νερού στη μάζα, αυξάνοντας ενδεχομένως την πίεση των πόρων και την πιεζομετρική στάθμη στη μάζα των αποβλήτων. Σε χώρους υγειονομικής ταφής, έχουν παρατηρηθεί επιταχυνόμενες καθιζήσεις λόγω της αποσύνθεσης και της σταθεροποίησης του αποικοδομήσιμου οργανικού κλάσματος του χώρου υγειονομικής ταφής. Αυτό επιδεινώνεται αν αποτίθενται μαζί με ΑΣΑ, βιοστερεά και ιλύες, οι οποίες δημιουργούν μεγαλύτερους ρυθμούς στερεοποίησης, προκαλώντας μάλιστα τοπικές καθιζήσεις, στα σημεία όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση.

2.3.6 Λειτουργίες

Διάφορες δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα σε έναν ΧΥΤΑ, έχουν αντίκτυπο στην ευστάθεια του πρανούς. Για παράδειγμα, ο βαθμός κορεσμού των απορριμμάτων, τα συστήματα επανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, το δίκτυο συλλογής βιοαερίου, η θερμοκρασία της απορριμματικής μάζας, η πιεζομετρία κ.α., μπορούν να έχουν επίδραση στην ευστάθεια και για αυτό πρέπει να ελέγχονται (Pinapati, 2005).

Όσον αφορά την εκτίμηση της ευστάθειας των απορριμματικών πρανών, διαπιστώνεται ότι τα απορριμματικά πρανή δεν διαφέρουν ιδιαίτεως από τα φυσικά εδαφικά πρανή ή τα τεχνητά πρανή ή τα επιχώματα, άρα οι μέθοδοι υπολογισμού της ευστάθειας ή της αστάθειας μπορούν να είναι οι ίδιες με τα άλλα είδη πρανών. Οι όποιες διαφορές, οφείλονται στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων, καθώς και στη χρήση διαφόρων άλλων υλικών, στο σώμα ενός ΧΥΤΑ, συνήθως στεγανωτικών μεμβρανών (Ψαρρόπουλος και Τσομπανάκης, 2005).

2.4 Διάφορες μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν τρεις κατηγορίες μεθόδων για τον προσδιορισμό της ευστάθειας των γεωκατασκευών:

- οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας, και
- η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.
- οι μέθοδοι μόνιμων παραμορφώσεων.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων, ενώ η οριακή ισορροπία έχει τη βάση της, στην ισορροπία δυνάμεων και ροπών. Οι παράμετροι τάσεων παραμορφώσεων που απαιτούνται για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι δύσκολες στον προσδιορισμό, σε σύγκριση με τις παραμέτρους αντοχής των μεθόδων οριακής ισορροπίας. Στις μεθόδους μόνιμων παραμορφώσεων που βασίζονται στο προσομοίωμα του ολισθαίνοντος στερεού σε κεκλιμένο επίπεδο κατά Newmark (1965) βασικός στόχος είναι ο υπολογισμός των μόνιμων μετατοπίσεων μιας ολισθαίνουσας εδαφικής ή απορριμματικής μάζας. Γενικά, οι περισσότερες από τις μεθόδους ευστάθειας πρανών

έχουν εστιάσει στην οριακή ισορροπία (Omarí, 2012). Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τις αναλύσεις είναι ο Συντελεστής Ασφαλείας (ΣΑ) του πρανούς, που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα (Jahanfar, 2014; Pinarati, 2005).

Η αξιοπιστία της ανάλυσης ευστάθειας, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των ιδιοτήτων αντοχής και της καθορισμένης γεωμετρίας. Το είδος της ανάλυσης, ή ο υπολογισμός ευστάθειας, μπορεί επίσης να εισαγάγει μεταβλητότητα στα αποτελέσματα, λόγω των εγγενών παραδοχών που γίνονται για την ανάπτυξη της μεθόδου ανάλυσης (Pinarati 2005).

2.5 Μέθοδος των λωρίδων

Η μέθοδος των λωρίδων, μπορεί να επιλύσει εύκολα, προβλήματα με πολύπλοκη γεωμετρία, ετερογενείς ιδιότητες των υλικών και εξωτερικά φορτία. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου των λωρίδων, γίνεται διαχωρισμός της αναλυόμενης τομής σε λωρίδες, ίσου ή μεταβαλλόμενου πλάτους, και εξετάζεται η ισορροπία της κάθε λωρίδας χωριστά. Οι επιπρόσθετες δυνατότητες της μεθόδου των λωρίδων διαμορφώνονται ως εξής:

- Μπορεί να προσεγγίσει τη μεταβολή των υδραυλικών συνθηκών κατά μήκος της τομής.
- Μπορεί να προσεγγίσει τη μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών.
- Μπορεί να εφαρμοστεί σε πρανή στα οποία η μορφολογία της επιφάνειας δεν είναι επίπεδη ή σε πρανή με κλιμακωτή ανάπτυξη.
- Μπορεί να αναλύσει αστοχίες στις οποίες η γεωλογική δομή οδηγεί στην ανάπτυξη μη κυκλικής επιφάνειας αστοχίας.

Στην Εικόνα 12 απεικονίζονται σχηματικά οι δυνάμεις ανά λωρίδα (Παπαδόπουλος, 2012) όπου:

W_i : το ίδιο βάρος συμπεριλαμβανομένων και των εξωτερικών φορτίων.

E_i, X_i : οι εσωτερικές δυνάμεις διεπιφάνειας.

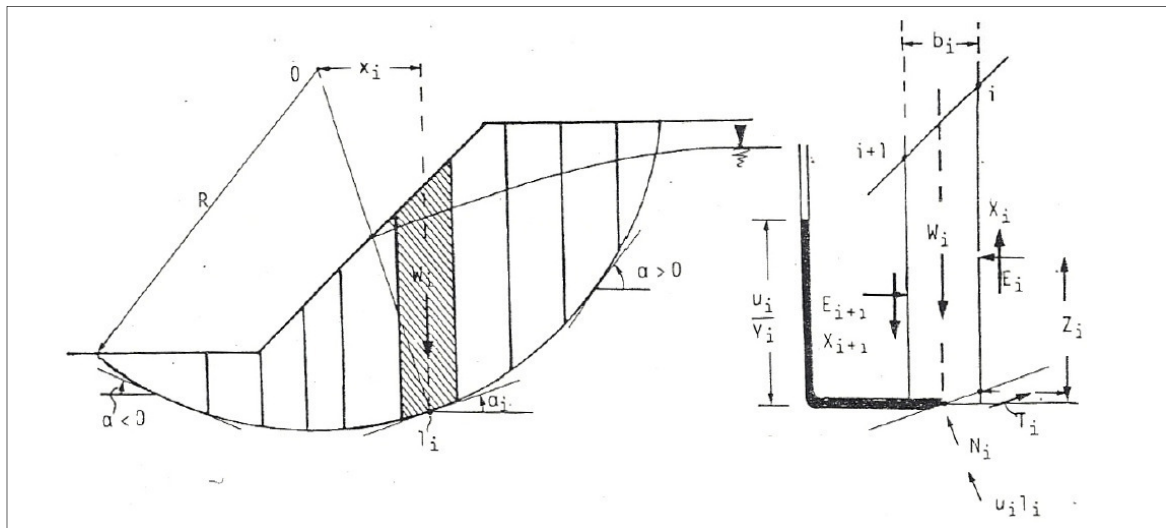
N_i : η ορθή δύναμη επί της επιφάνειας ολίσθησης.

U_i : η πίεση του νερού των πόρων.

T_i : η τριβή εξαιτίας της ενεργοποιημένης διατμητικής αντοχής.

Γενικά υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία:

1. Συνήθης μέθοδος των λωρίδων ή μέθοδος Fellenius,
2. Απλοποιημένη μέθοδος Bishop
3. Απλοποιημένη μέθοδος Janbu
- 4 Μέθοδος Spencer
5. Μέθοδος Morgenstern-Price
6. Γενικευμένη Οριακή Ισορροπία



Εικόνα 12. Δυνάμεις, μέθοδος των λωρίδων [Παπαδόπουλος, 2012]

2.5.1 Συνήθης μέθοδος των λωρίδων ή μέθοδος Fellenius

Η συνήθης μέθοδος των λωρίδων αγνοεί τις εσωτερικές δυνάμεις διεπιφάνειας μεταξύ των λωρίδων κι έτσι δεν ικανοποιεί την οριακή ισορροπία. Η βασική παραδοχή είναι, ότι η συνισταμένη των πλευρικών δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε λωρίδα έχει διεύθυνση παράλληλη προς τη βάση της λωρίδας. Ως θέση εφαρμογής των δυνάμεων, θεωρείται το σημείο τομής, της κατακόρυφης από το κέντρο βάρους, με τη βάση της λωρίδας. Επίσης, δεν επιτρέπεται η εκδήλωση φαινομένων υδραυλικής ανύψωσης. Ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$F_S = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \varphi)}{\sum_{n=1}^{n=p} (W_n \sin \alpha_n)}$$

όπου:

c = συνοχή

$$\Delta L_n = \frac{b_n}{\cos \alpha_n}$$

b_n = πλάτος λωρίδας n

N_r = κύρια συνιστώσα αντίδρασης R

W_n = βάρος λωρίδας

α_n = γωνία μεταξύ W_n και N_r

φ = γωνία εσωτερικής τριβής

Η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει τιμές αυξημένες προς την πλευρά της ασφάλειας κατά 10 έως 15%. Δεν ενδείκνυται για περιπτώσεις με βαθείς κύκλους ολίσθησης και για μεγάλες τιμές υπερπίεσης των υδάτων των πόρων.

2.5.2 Απλοποιημένη μέθοδος Bishop

Σε αυτή τη μέθοδο, η επίδραση των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων δεν λαμβάνεται υπόψη, υποθέτοντας ότι η κατακόρυφη συνιστώσα των δυνάμεων μεταξύ των τομών είναι μηδέν, άρα η συνισταμένη των πλευρικών δυνάμεων έχει οριζόντια διεύθυνση. Η απλοποιημένη μέθοδος Bishop ικανοποιεί την ισορροπία δυνάμεων κατά την κατακόρυφο, προκειμένου να εκτιμηθούν οι δυνάμεις που απαιτούνται για την ισορροπία ροπών.

2.5.3 Απλοποιημένη μέθοδος Janbu

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε αργότερα από τις δύο που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι δύο πρώτες βασικές παραδοχές που υιοθετούνται με αυτή τη μέθοδο είναι ότι, οι πλευρικές οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα είναι ίσες και ότι ικανοποιείται η ισορροπία των οριζόντιων δυνάμεων στο εξεταζόμενο εδαφικό κομμάτι. Η μέθοδος Janbu ικανοποιεί και την ισορροπία ροπών αλλά και την ισορροπία δυνάμεων.

2.5.4 Μέθοδος Spencer

Η μέθοδος Spencer ικανοποιεί τα δύο είδη ισορροπίας (ροπών και δυνάμεων) καθώς και όλες τις άλλες καταστάσεις ισορροπίας, συμπεριλαμβανομένης και της ισορροπίας των επιμέρους λωρίδων. Υποθέτει ότι οι δυνάμεις μεταξύ των τομών είναι παράλληλες και η συνισταμένη τους έχει μια σταθερή κλίση προς την κατακόρυφο.

2.5.5 Μέθοδος Morgenstern-Price

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει να καθοριστούν διαφορετικοί τύποι συναρτήσεων όσον αφορά τις δυνάμεις μεταξύ των τομών. Είναι παρόμοια με τη μέθοδο Spencer, εκτός από το γεγονός ότι η κλίση της συνισταμένης δύναμης μεταξύ των τομών, ποικίλλει ανάλογα με μία αυθαίρετη συνάρτηση. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει να καθοριστεί η συνάρτηση των δυνάμεων μεταξύ των τομών. Ενώ η μέθοδος Spencer ικανοποιεί τη γενική ισορροπία ροπών, η 'Morgenstern-Price', θεωρεί μόνο τις εξισώσεις που αφορούν τις ροπές, κάθε λωρίδας ξεχωριστά. Και οι δύο αυτές μέθοδοι, ικανοποιούν όλες τις καταστάσεις ισορροπίας, αλλά η 'Spencer' απαιτεί περίπου τον μισό χρόνο για τον υπολογισμό.

2.5.6 Γενικευμένη Οριακή Ισορροπία

Η γενικευμένη μέθοδος οριακής ισορροπίας, ενσωματώνει όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους. Υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας για όλες τις καθορισμένες τιμές του 'λ'. Είναι παρόμοια με τη μέθοδο Morgenstern-Price, εκτός του ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας για ένα εύρος τιμών του 'λ'.

2.6 Επιλογή ιδανικής μεθόδου ανάλυσης

Γενικά, η μέθοδος που θα επιλεγεί για την ανάλυση, πρέπει να ικανοποιεί και την ισορροπία ροπών και την ισορροπία δυνάμεων. Από τη βιβλιογραφία (Omari, 2012) προτείνονται οι μέθοδοι Spencer, Janbu και Morgenstern-Price. Αυτή η επιλογή, είναι αποτέλεσμα της ικανοποίησης των απαιτήσεων ισορροπίας (δυνάμεων και ροπών) από αυτές τις μεθόδους. Η απλοποιημένη Janbu ικανοποιεί γενικευμένη ισορροπία

ροπών, αλλά και κατακόρυφη και οριζόντια ισορροπία δυνάμεων, αλλά δεν ικανοποιεί την ισορροπία ροπών των επιμέρους λωρίδων. Αντίθετα, η μέθοδος Janbu, ικανοποιεί όλα τα προαναφερθέντα είδη ισορροπιών (γενική, επιμέρους λωρίδων). Στον Πίνακα 7, συνοψίζονται όλες οι μέθοδοι, και παρατίθενται τα είδη ισορροπίας που ικανοποιεί η καθεμία, αλλά και οι υποθέσεις που λαμβάνονται υπόψη σχετικά με τις δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων (Omari, 2012).

Πίνακας 7. Λύσεις και υποθέσεις ανά μέθοδο [Omari, 2012]

| Μέθοδος | Συντελεστής ασφαλείας | | Δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων |
|-------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|
| | Ισορροπία δυνάμεων | Ισορροπία ροπών | |
| Συνήθης | - | Ναι | Αγνοούνται |
| Bishop | - | Ναι | Μόνο οριζόντιες |
| Janbu | Ναι | - | Οριζόντιες και κάθετες |
| Spencer | Ναι | Ναι | Οριζόντιες και κάθετες |
| Morgenstern-Price | Ναι | Ναι | Οριζόντιες και κάθετες |

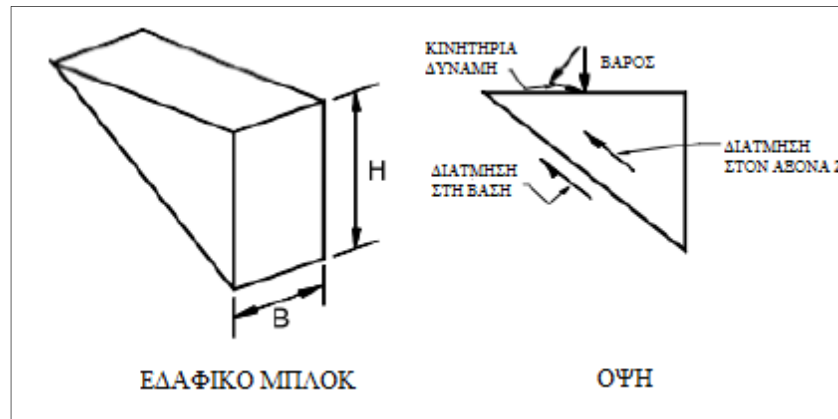
2.7 Διδιάστατη και τριδιάστατη ανάλυση

Με τις μεθόδους που περιγράφηκαν γίνεται η ανάλυση σε δύο διαστάσεις αντί τριών. Κατά αυτόν τον τρόπο τα προβλήματα ευστάθειας πρανών απλοποιούνται όσον αφορά στις δυνάμεις και ροπές ολίσθησης/ανατροπής και τις αντίστοιχες που τις παρεμποδίζουν. Για να μπορεί να γίνει σύγκριση αυτών των δύο εναλλακτικών, ο Boutwell, (2004), υπεραπλούστευσε την κατάσταση, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.

Το βάρος του τεμάχους περιλαμβάνει την κινητήρια δύναμη, ενώ η επιφάνεια ολίσθησης εμπλέκεται με τη διατμητική αντοχή, ως δύναμη αντίστασης. Η κρίσιμη τιμή του ύψους τεμάχους H_c θα είναι ίση με:

$$H_c = \left(\frac{4c}{\gamma}\right) x \left(1 + \frac{H_c}{2B}\right)$$

όπου:



Εικόνα 13. Υπεραπλουστευμένη σύγκριση μεταξύ 2D και 3D μεθόδου λωρίδων [Boutwell, 2004]

γ το ειδικό βάρος του εδάφους, c η συνοχή του εδάφους και B το πλάτος του μπλοκ.

Η παραπάνω εξίσωση με όρους συντελεστών ασφαλείας στις δύο και στις τρεις διαστάσεις λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$FOS_{3D} = FOS_{2D} \times \left(1 + \left(\frac{H_c}{2B}\right)\right)$$

Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος FOS_{3D}/FOS_{2D} (συντελεστής σφήνας) για έναν τυπικό χώρο υγειονομικής ταφής με 80 μέτρα ύψος και 300 μέτρα μήκος, θα είναι περίπου στο 1.13 (Boutwell, 2004).

Οι Koerner και Snoog, (2000), μελέτησαν 10 αστοχίες χώρων υγειονομικής ταφής, τόσο με 2D όσο και με 3D ανάλυση, οι οποίες επιβεβαίωσαν ότι οι συντελεστές ασφαλείας των μπλοκ κυμαίνονται μεταξύ 1,06 και 1,25. Το συμπέρασμα ήταν ότι η παράλειψη των πλευρικών δυνάμεων διάτμησης στην ανάλυση δύο διαστάσεων, ήταν ο κύριος λόγος των συντηρητικών αποτελεσμάτων, που προέκυψαν με τη μέθοδο αυτή.

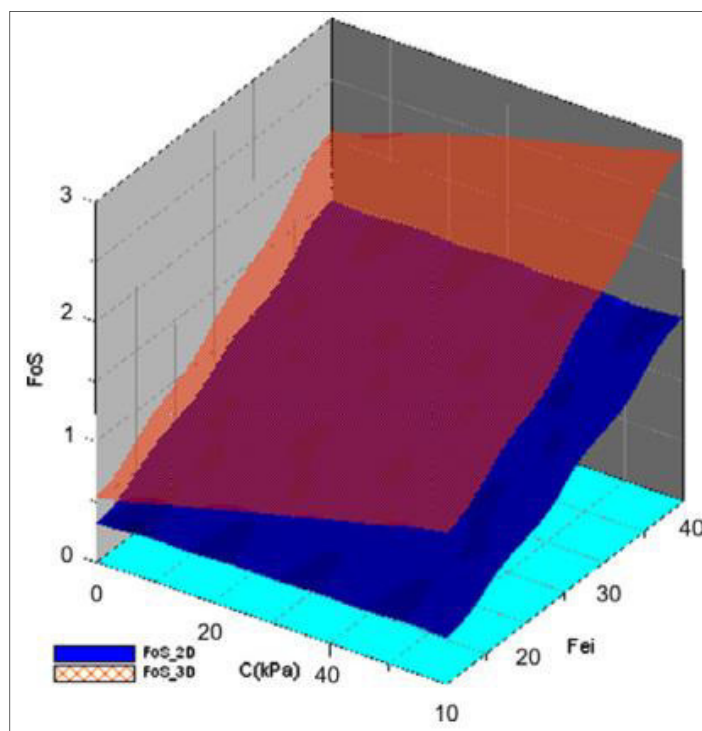
Παρά το γεγονός ότι ένα πρυνές δύο διαστάσεων είναι απλούστερο και πιο συντηρητικό από την ανάλυση ευστάθειας σε τρεις διαστάσεις, είναι αδύνατο, η ανάλυση σε τρεις διαστάσεις, να αντικαταστήσει τη βιβλιογραφία που υπάρχει για ανάλυση ευστάθειας πρυνών δύο διαστάσεων. Οι Eid et al. (2000), κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ανάλυση 2D είναι κατάλληλη για πρυνή λόγω των συντηρητικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν, αλλά η ανάλυση 3D μπορεί δυνητικά να χρησιμοποιηθεί για ανάστροφες αναλύσεις, για να βρεθεί η πραγματική αντοχή σε διάτμηση, κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Οι Yu and Batlle, 2011, πρότειναν ότι η 2D ανάλυση δεν είναι χρήσιμη, σε περιπτώσεις όπως: πρυνή με πλευρικά η

σημειακά φορτία, πλευρικά πολύπλοκη γεωμετρία και πιεζομετρικό ύψος, οριζόντια ανισότροπα και ετερογενή υλικά, κ.α.

Το γεγονός ότι κατά την 2D ανάλυση προκύπτουν πιο συντηρητικά αποτελέσματα, επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη των Stark and Eid, 2000, οι οποίοι διενέγγησαν 2D και 3D ανάστροφη ανάλυση σε XYTA (Rumpke, ΗΠΑ), και διαπίστωσαν ότι η διατμητική αντοχή στην 2D ανάλυση ήταν κατά 25-30% πιο συντηρητική από την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε κατά την τρισδιάστατη ανάλυση.

Στην ανάλυση των Yu and Batlle, 2011, έγινε σύγκριση των ισοδύναμων αποτελεσμάτων 3D και 2D. Δοκιμάζοντας διάφορους συνδυασμούς συνοχής-γωνίας εσωτερικής τριβής ($c=0-60$ kPa, $\phi=10-40^\circ$) προσδιορίστηκαν οι FOS_{3D} και FOS_{2D} , αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο FOS_{3D} είναι υψηλότερος από τον FOS_{2D} κατά 46% έως 87%.

Ωστόσο, σε άλλη μελέτη, ο Adamczyk, (2005), ανέλυσε την αστοχία του XYTA Kettleman (Καλιφόρνια). Ως αποτέλεσμα, προέκυψε ότι ο FOS_{2D} είναι σημαντικά υψηλότερος από τον FOS_{3D} . Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, τα ασύμβατα αποτελέσματα μπορεί να προέρχονται από την προσομοίωση της πραγματικής γεωμετρίας με ανάλυση 3D. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι η ανάλυση 2D υποτίμησε τη γωνία εσωτερικής τριβής, σε σύγκριση με την 3D ανάλυση.



Εικόνα 19. Η επίδραση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής στην τιμή του συντελεστή ασφαλείας [Boutwell, 2004]

2.8 Μηχανικές ιδιότητες ΑΣΑ

2.8.1 Ειδικό βάρος

Το ειδικό βάρος των αστικών στερεών αποβλήτων είναι μια σημαντική παράμετρος, στη μηχανική ανάλυση της ευστάθειας, ενός χώρου υγειονομικής ταφής, αλλά επί του παρόντος υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα σχετικά με την τιμή του. Η γνώση της τιμής του ειδικού βάρους είναι απαραίτητη, κατά τη στατική και κατά τη δυναμική ανάλυση (Zekkos et al., 2006).

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων είναι η ανομοιογένεια. Ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους, γι' αυτό το λόγο, είναι ιδιαίτερα δύσκολη και επίπονη διαδικασία. Αν ληφθεί υπόψη και η χρονικά και χωρικά, μεταβαλλόμενη συμπεριφορά τους, ο προσδιορισμός των τιμών της πυκνότητας της απορριμματικής μάζας, δυσχεραίνει. Πιο συγκεκριμένα, η συμπύκνωση που λαμβάνει χώρα στο πεδίο, τα φορτία που προστίθενται από τη συνεχή εναπόθεση, αλλά και οι καθιζήσεις, μεταβάλλουν συνεχώς το ειδικό βάρος, που είναι μία από τις βασικότερες παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη, από τις μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας πρανών.

Επισημαίνεται, ότι το ειδικό βάρος είναι η μόνη ιδιότητα των απορριμμάτων, που είναι σημαντική σε όλους τους διαφορετικούς τύπους ανάλυσης απορριμματικών πρανών με μεθόδους οριακής ισορροπίας (Dixon and Jones, 2005). Είναι επίσης σημαντικό για την αξιολόγηση σεισμικών αποκρίσεων (Zekkos et al., 2006). Να σημειωθεί, ότι οι τιμές που αναφέρονται για το ειδικό βάρος στη βιβλιογραφία, αντιπροσωπεύουν το βάρος του μίγματος απορριμμάτων-υλικού κάλυψης, καθώς αυτή είναι η παράμετρος που σχετίζεται με τη μηχανική ανάλυση. Γι' αυτόν τον λόγο, ο όρος ειδικό βάρος απορριμμάτων, αναφέρεται στην πραγματικότητα, στο μοναδιαίο βάρος του μίγματος, που αναφέρθηκε προηγουμένως (Zekkos et al., 2006).

Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού του ειδικού βάρους, που περιλαμβάνουν:

- Επιτόπου δοκιμές
- Εμπειρικές μετρήσεις, στις οποίες υπολογίζεται το ειδικό βάρος κάθε συστατικού του απορριμματικού όγκου και έπειτα από μια ποσοστιαία εκτίμηση του καθενός, προσδιορίζεται το ειδικό βάρος

- Καταγραφές και παρακολούθηση, όπου η συνολική αποτιθέμενη μάζα (απορρίμματα και έδαφος) καταγράφεται καθημερινά, και παράλληλα διενεργείται τοπογραφική αποτύπωση της ογκομετρικής μεταβολής, οπότε υπολογίζεται μία μέση τιμή του ειδικού βάρους
- Δειγματοληψία "αδιατάρακτων" δοκιμίων: το ειδικό βάρος μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια, μόνο αν μπορούν να ανακτηθούν πραγματικά αντιπροσωπευτικά και αδιατάρακτα δείγματα. Ωστόσο, ακόμη και αν το παραπάνω είναι εφικτό, δηλαδή η δειγματοληψία από ένα χώρο υγειονομικής ταφής ΑΣΑ σύμφωνα με τις προδιαγραφές, αυτή η μέθοδος δεν συνιστάται, διότι είναι αμφίβολο αν είναι δυνατό το δείγμα να είναι είτε αντιπροσωπευτικό ή αδιατάρακτο, διότι δεν υπάρχουν επαρκή μεγάλα σωματίδια στο δείγμα και επίσης, η διαταραχή του δείγματος θα μπορούσε να οδηγήσει σε "ανεπανόρθωτα" λάθη.
- Γεωφυσικές μεθόδους, δηλαδή επιτόπου προσδιορισμός του ειδικού βάρους με χρήση ακτινών γάμμα (Zekkos et al., 2006; Ζανιά, 2009; Fassett et al., 1994).

Από αυτές τις μεθόδους, οι επιτόπου δοκιμές μεγάλης κλίμακας, κρίνονται να είναι οι πιο αξιόπιστες, για την αξιολόγηση του μοναδιαίου βάρους των απορριμμάτων. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι συνήθως οι μεγάλοι όγκοι, συμπεριλαμβάνουν μεγάλου μεγέθους σωματίδια, ελαχιστοποιώντας σφάλματα, που οφείλονται σε διαταραχές και μη-αντιπροσωπευτικό υλικό. Έτσι, λαμβάνονται υπόψη οι αλλαγές που έχουν συμβεί στο υλικό, από την τοποθέτηση του στο χώρο υγειονομικής ταφής (Zekkos et al. 2006).

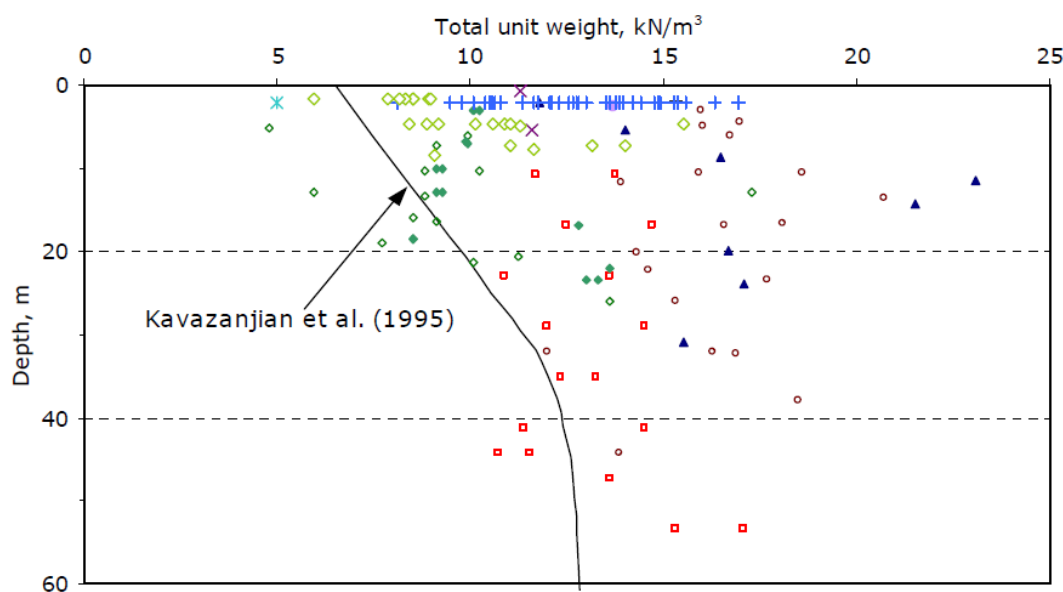
Ο υπολογισμός της πυκνότητας έχει νόημα όταν γίνεται, παράλληλα, αναφορά των παρακάτω παραμέτρων:

- σύσταση των απορριμμάτων σε συνδυασμό με την καθημερινή εδαφική κάλυψη και το ποσοστό υγρασίας,
- μέθοδος και βαθμός συμπίκνωσης,
- βάθος στο οποίο αναφέρεται η μέτρηση, και
- ηλικία των απορριμμάτων (Ζανιά 2009; Fassett et al., 1994).

Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε παγκόσμια κλίμακα, οι οποίες προσδιόρισαν το ειδικό βάρος των ΑΣΑ, συνδέοντάς το με τη συμπίεση που γίνεται

στο πεδίο και τις υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες. Σύμφωνα με την έκθεση της Επιτροπής Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής, χρησιμοποιώντας στοιχεία πολλών ερευνητών, οι τιμές του ειδικού βάρους κυμαίνονται από 3 kN/m^3 για ασυμπίεστα ή ελαφρώς συμπιεσμένα απορρίμματα, μέχρι 17 kN/m^3 για καλά συμπιεσμένα (Konig and Jessberger, 1997). Στοιχεία, σχετικά με τις τιμές του ειδικού βάρους στο πεδίο, που συλλέχθηκαν από τους Zekkos et al. (2005, από 37 διαφορετικούς ΧΥΤΑ, αναφέρουν ότι οι τιμές διαφοροποιούνται μεταξύ 3 και 20 kN/m^3 (Zekkos et al., 2005).

Στη βιβλιογραφία, η πιο συχνά αναφερόμενη μελέτη, σχετικά με το ειδικό βάρος, είναι αυτή των Kavazanjian et al. (1995). Οι τιμές του ειδικού βάρους της μελέτης αυτής κυμαίνονται περίπου στα 6 kN/m^3 κοντά στην επιφάνεια, και ανέρχονται μέχρι 13 kN/m^3 σε βάθη 45m ή μεγαλύτερα (Εικόνα 12) (Kavazanjian et al., 1995). Παρόλη την αποδοχή αυτών των τιμών, σήμερα θεωρούνται αρκετά χαμηλές, ακόμα και αν γίνεται αναφορά σε 'ξηρούς' ΧΥΤΑ, δηλαδή όπου δεν λαμβάνει χώρα ανακυκλοφορία στραγγισμάτων.



Εικόνα 14. Διάγραμμα διασποράς τιμών ειδικού βάρους σε συνάρτηση με το βάθος, από επιτόπου δοκιμές μεγάλης κλίμακας [Kavazanjian, 1995]

Μεταγενέστερες μελέτες αναφέρουν τιμές από $10\text{-}13 \text{ kN/m}^3$ στην επιφάνεια, που αυξάνονται έως $13\text{-}16 \text{ kN/m}^3$ σε βάθος 30m (Kavazanjian et al., 1996). Άλλες μελέτες προτείνουν μεγαλύτερες τιμές: $12\text{-}16 \text{ kN/m}^3$ στην επιφάνεια και $14\text{-}17 \text{ kN/m}^3$ σε βάθος 60m (Kavazanjian et al., 1999). Ο ίδιος συγγραφέας σε δημοσίευση

του μερικά χρόνια αργότερα, υποστήριξε ότι σε μερικούς συμβατικούς ΧΥΤΑ (δηλαδή ΧΥΤΑ με υψηλό περιεχόμενο σε έδαφος ή μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία) το ειδικό βάρος μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 15 kN/m^3 και αυτό εξαιτίας της υγρασίας. Επίσης, σε ΧΥΤΑ που λαμβάνει χώρα ανακυκλοφορία στραγγισμάτων, οι τιμές μπορούν να φτάσουν και τα 20 kN/m^3 (Kavazanjian et al., 2001).

Για πλήρως κορεσμένες συνθήκες, έχουν αναφερθεί, επίσης, τιμές από $14,5\text{-}16 \text{ kN/m}^3$ για όλη την κορεσμένη μάζα. Στη χώρα μας, σε αντίστοιχες μελέτες ανάλυσης ευστάθειας απορριμματικών πρανών, γίνεται διάκριση των απορριμμάτων, σε φρέσκα (ηλικίας <2 ετών), και ηλικίας >2 ετών, με τιμές για το ειδικό βάρος $8\text{-}10$ και $10\text{-}12 \text{ kN/m}^3$, αντίστοιχα (Τεχνική Υπηρεσία Δήμου Αριδαίας, 2009).

Οι Stark et al., 2008, σε ανάστροφες αναλύσεις που πραγματοποίησαν, σε ΧΥΤΑ που αστόχησαν, χρησιμοποίησαν ως τυπική τιμή του ειδικού βάρους των απορριμμάτων, την τιμή $12,6 \text{ kN/m}^3$ (Stark et al., 2008).

Η χρήση μιας τυπικής συνάρτησης μεταβολής του ειδικού βάρους συναρτήσει του βάθους, για κάθε ΧΥΤΑ, το οποίο εξαρτάται από ορισμένα χαρακτηριστικά του, προτάθηκε από τον Zekkos, 2005. Η προτεινόμενη σχέση μεταξύ του ειδικού βάρους και του χρόνου (σε μέρες) δίνεται από την εξίσωση:

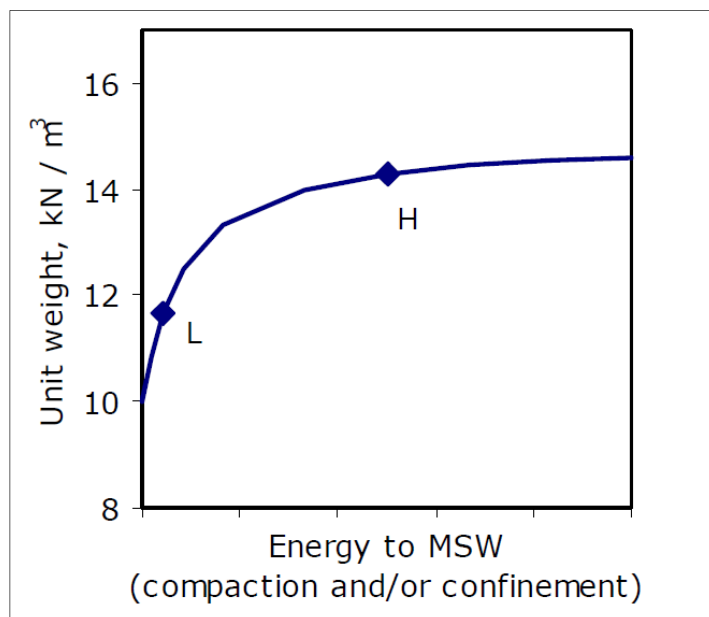
$$\frac{\gamma_t}{\gamma_1} = 0,0172 \log(t) + 1,006$$

όπου, γ_1 η τιμή του ειδικού βάρους την πρώτη μέρα και γ_t το ειδικό βάρος μετά από χρόνο t , σε μέρες.

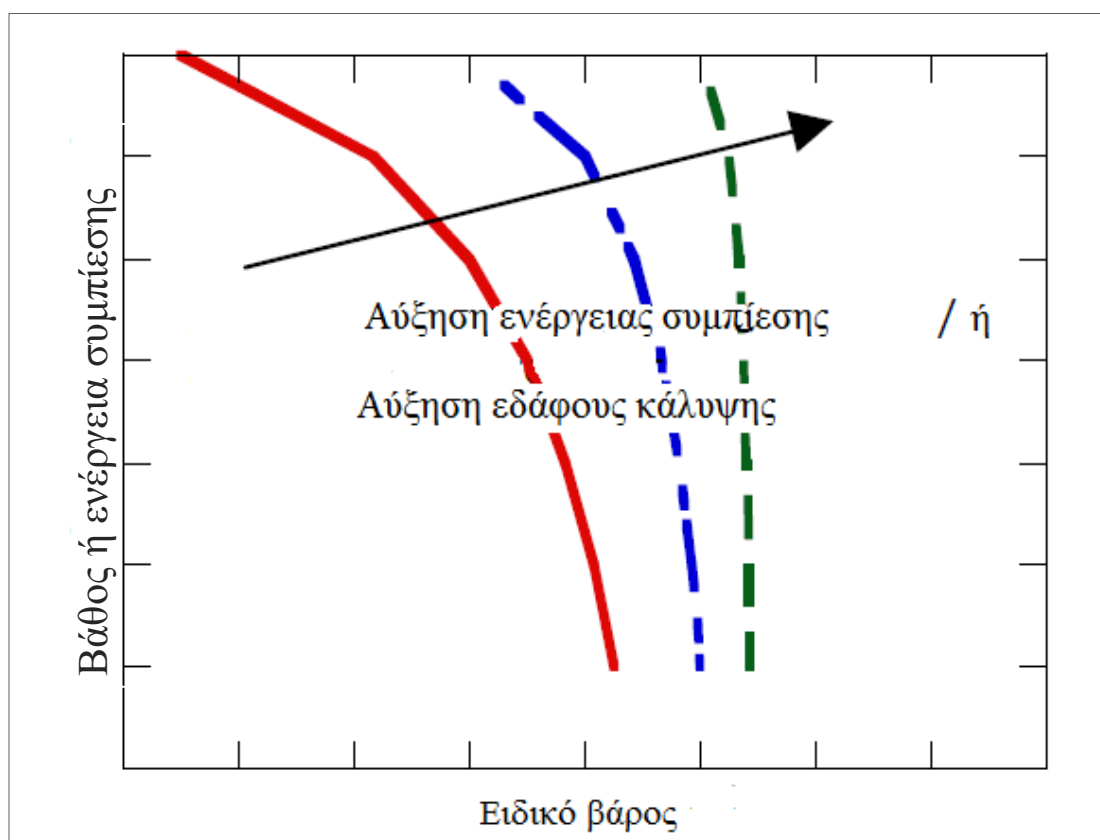
Για έναν συγκεκριμένο ΧΥΤΑ, του οποίου το εισερχόμενο φορτίο είναι γνωστής σύνθεσης και πυκνότητας, όσο η συμπίεση και η ποσότητα του εδάφους αυξάνεται, το ειδικό βάρος των ΑΣΑ αυξάνεται ανάλογα, με μεγάλο ρυθμό κοντά στην επιφάνεια και η αύξηση αυτή γίνεται λιγότερο έντονη σε μεγαλύτερα βάθη, όπου αυξάνεται η τάση. Έτσι, μπορεί να υποθεθεί μια υπερβολική σχέση, μεταξύ του ειδικού βάρους των απορριμμάτων, και της ενέργειας που καταναλώνεται για τη συμπίεση (Εικόνες 14 και 15).

Η ακόλουθη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιείται για να περιγράψει το υπερβολικό μοντέλο για το ειδικό βάρος των απορριμμάτων, γ :

$$\gamma = \gamma_i + \frac{z}{a + b z}$$



Εικόνα 15. Ποιοτικό μοντέλο της αύξησης του ειδικού βάρους των ΑΣΑ συναρτήσει της ενέργειας που καταναλώνεται για τη συμπίεση [Zekkos et al., 2006]

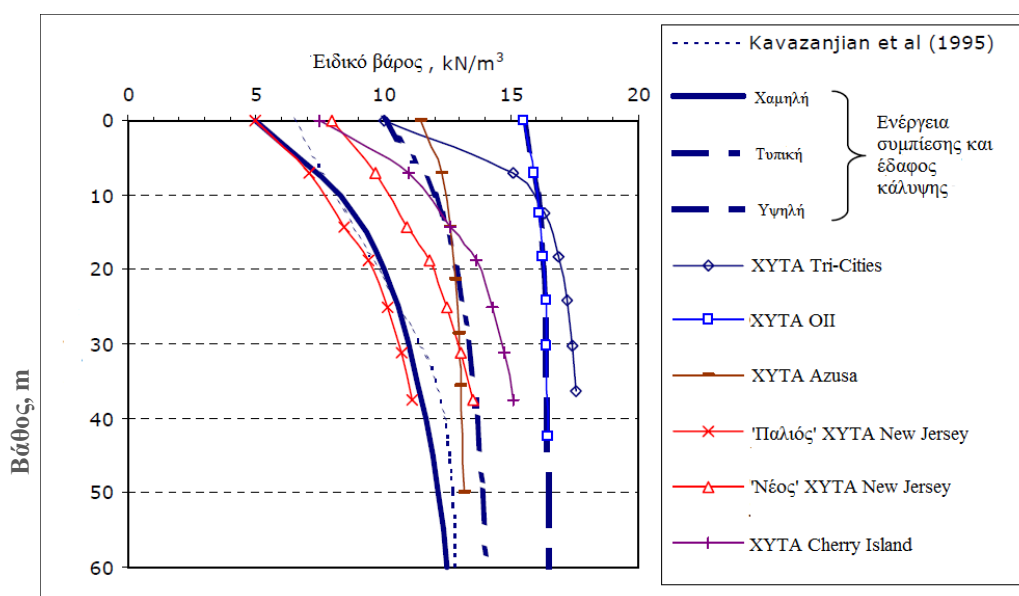


Εικόνα 16. Ποιοτική επίδραση του βάθους ή των τάσεων, στο ειδικό βάρος των απορριμμάτων [Zekkos, 2006]

Όπου, γ_i το αρχικό ειδικό βάρος, το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί και z το βάθος για το οποίο γίνεται ο υπολογισμός. Στην πραγματικότητα το z αντιπροσωπεύει στην εξίσωση, την επίδραση της κατακόρυφης ή μέσης τάσης. Η παράμετρος b είναι μια συνάρτηση της διαφοροποίησης που λαμβάνουν οι τιμές το ειδικού βάρους, στην επιφάνεια και σε μεγαλύτερα βάθη, και λαμβάνει τιμές από 0 kN/m^3 (όταν το ειδικό βάρος σε μεγάλα βάθη, είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο στην επιφάνεια) μέχρι 1 kN/m^3 , όταν το ειδικό βάρος, σε επιφάνεια και μεγάλα βάθη, λαμβάνει κοντινές τιμές. Η παράμετρος a δίνεται ως συνάρτηση της αύξησης του ειδικού βάρους κοντά στην επιφάνεια και λαμβάνει τιμές από $0\text{-}10 \text{ m}^4/\text{kN}$. Όταν το ειδικό βάρος αυξάνεται απότομα κοντά στην επιφάνεια, χρησιμοποιούνται μικρές τιμές της παραμέτρου a . (Zekkos et al., 2006). Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι παράμετροι του υπερβολικού μοντέλου που περιγράφηκε για διαφορετικούς βαθμούς συμπίεσης και διαφορετικά αρχικά ειδικά βάρη.

Πίνακας 8. Παράμετροι υπερβολικού μοντέλου αύξησης ειδικού βάρους με το βάθος, για διαφορετικούς βαθμούς συμπίεσης και ποσότητας εδάφους κάλυψης [Zekkos, 2006]

| Συμπίεση και έδαφος κάλυψης | γ_i (kN/m^3) | b (m^3/kN) | a (m^4/kN) |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Χαμηλή | 5 | 0.1 | 2 |
| Τυπική | 10 | 0.2 | 3 |
| Υψηλή | 15.5 | 0.9 | 6 |



Εικόνα 17. Προτεινόμενες καμπύλες υπολογισμού ειδικού βάρους απορριμμάτων τυπικών XYTA [Zekkos, 2005]

Γενικά, διαπιστώνεται μεγάλη διασπορά στις αναφερόμενες τιμές από τις διάφορες μελέτες. Αυτό που μπορεί όμως να παρατηρηθεί εύκολα, είναι η τάση αύξησης της τιμής του ειδικού βάρους, όσο αυξάνεται το βάθος. Επίσης, το ειδικό βάρος στο πεδίο, κοντά στην επιφάνεια, αυξάνεται με την συμπίεση και το περιεχόμενο σε υλικό κάλυψης.

Η επιλογή, όμως, της τιμής του ειδικού βάρους, επηρεάζει και τις υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες. Πειραματικά στοιχεία των Zekkos et al., (2005), έδειξαν, ότι δείγματα με ειδικό βάρος $10,9 \text{ kN/m}^3$ είχαν 20-30% μικρότερη διατμητική αντοχή, από δείγματα με ειδικό βάρος $12,3 \text{ kN/m}^3$. Τα παραπάνω δείγματα είχαν ποσοστό υγρασίας που κυμαινόταν από 9-13%, τιμές ενδεικτικές για να θεωρηθούν τα απορρίμματα σχετικά ξηρά.

Άλλα δείγματα με διαφορετικές τιμές ειδικού βάρους, που υποβλήθηκαν σε τριαξονικές δοκιμές, οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι τα δείγματα με χαμηλότερο βάρος, παρουσιάζουν χαμηλότερες διατμητικές αντοχές. Από τα αποτελέσματα, προέκυψε ότι μειώνοντας το ειδικό βάρος από 8 σε $5,5 \text{ kN/m}^3$, μειωνόταν και η γωνία εσωτερικής τριβής κατά 5° και η διατμητική αντοχή κατά 40%, (Zekkos, 2005; Bray et al., 2009).

Επίσης, έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες δοκιμές στερεοποίησης υπό στραγγισμένες συνθήκες (CD tests) για ‘φρέσκα’ και 4 χρονών απορρίμματα. Τα αποτελέσματα αυτά έδειξαν, ότι στην περίπτωση ‘φρέσκων’ απορριμμάτων, αλλάζοντας το ειδικό βάρος από 8 έως 10 kN/m^3 προκαλείται μια μέση αύξηση της τάξης του 35%, στην διατμητική αντοχή των ΑΣΑ. Για τα απορρίμματα ηλικίας 4 ετών, αυξάνοντας το βάρος από 10 σε 14 kN/m^3 , αυξήθηκε η διατμητική αντοχή έως και 25%, (Nascimento, 2007).

2.8.2 Διατμητική αντοχή

Για τον σχεδιασμό χώρων υγειονομικής ταφής Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) απαιτείται η επιλογή αντιπροσωπευτικών γεωτεχνικών ιδιοτήτων των υλικών των ΑΣΑ. Η κατανόηση της μηχανικής απόκρισης των ΑΣΑ έχει εξελιχθεί σημαντικά κατά τα τελευταία έτη, αλλά πολλές πτυχές της απόκρισής τους παραμένουν ακόμα αβέβαιες, (Zekkos et al., 2008).

Η ανάγκη για καθ' ύψος εκτεινόμενους χώρους υγειονομικής ταφής, δημιούργησε το ζήτημα προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής των ΑΣΑ, υπο υψηλές κύριες τάσεις. Αποδείχθηκε, λοιπόν, η εξάρτηση της διατμητικής αντοχής των ΑΣΑ, με την αξονική τάση καθώς και με την παραμόρφωση (Stark et al., 2008).

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων (διατμητικής αντοχής, ειδικού βάρους) του απορριμματικού υλικού, χρησιμοποιούνται μέθοδοι αντίστοιχες με τις γεωτεχνικές διερευνήσεις του εδάφους. Οι πιο απλές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι ανάστροφες αναλύσεις. Αναλύσεις στατικής ευστάθειας πρανών ΧΥΤΑ έχουν συχνά χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής του απορριμματικού υλικού, αν και συχνά αναφέρεται, ότι με αυτήν την μέθοδο υπολογισμού προκύπτουν συντηρητικά αποτελέσματα (Fassett et al., 1994). Αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται στον υπολογισμό των προαναφερθέντων παραμέτρων με επιτόπου δοκιμές. Τέλος, η σύγχρονη τεχνολογία έχει βοηθήσει στην εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών μεγάλης κλίμακας αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, επομένως έχουν εκτελεστεί πειράματα άμεσης διάτμησης και τριαξονικής δοκιμής (Ζανιά, 2009).

Το κύριο κλάσμα των απορριμμάτων είναι η οργανική ύλη και λόγω της βιοαποικοδόμησης, η αντοχή θα είναι μια συνάρτηση του χρόνου. Στην πραγματικότητα, η φθορά της μάζας, που προκύπτει από διεργασίες βιοαποικοδόμησης, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη της αντοχής σε αυτά τα υλικά (Shariatmadari et al., 2009).

Η διατμητική αντοχή των ΑΣΑ προκύπτει ως συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως το είδος των απορριμμάτων, η ποιοτική τους σύνθεση, η συμπίεση, η καθημερινή κάλυψη με έδαφος, οι συνθήκες υγρασίας, η ηλικία, η αποσύνθεση, οι πιέσεις από τα υπερκείμενα στρώματα, κλπ. αλλά και από την αξονική τάση και την διατμητική παραμόρφωση (Stark et al., 2000; Eid et al., 2000).

Επίσης, οι ιδιότητες των ΑΣΑ διαφέρουν σημαντικά από τη μια περιοχή στην άλλη, γι' αυτό κατά τον σχεδιασμό των χώρων υγειονομικής ταφής, άλλα και για την βελτίωση της ικανότητας πλήρωσης των υπαρχουσών εγκαταστάσεων, πρέπει να πραγματοποιούνται τοπικές μετρήσεις και αξιολογήσεις. Ωστόσο, η ύπαρξη δεδομένων που αφορούν τον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των απορριμμάτων, κυρίως δεδομένα από παρόμοιες θέσεις πεδίων, μπορεί να βοηθήσει τους μελετητές να επιλέξουν εναλλακτικές τιμές για την ανάλυση ευστάθειας (Machado, 2010).

Οι παράγοντες αυτοί, σε συνδυασμό, με μη τυποποιημένες μεθόδους δειγματοληψίας, με τα ανεπαρκή μεγέθη των δειγμάτων, που δεν είναι αντιπροσωπευτικά των επί τόπου συνθηκών και της περιορισμένης διατμητικής μετατόπισης ή της αξονικής τάσης, που επιβάλλονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής διάτμησης στο εργαστήριο, δημιουργούν σημαντική διασπορά στα αποτελέσματα.

Η δοκιμή διάτμησης των ΑΣΑ είναι δύσκολη, λόγω της ετερογενούς σύνθεσης των υλικών υγειονομικής ταφής, των δυσκολιών κατά τη δειγματοληψία, κατά την προετοιμασία των δειγμάτων, την δοκιμή, και το εύρος του μεγέθους των σωματιδίων των αποβλήτων, και των χρονο-εξαρτώμενων ιδιοτήτων, όπως η ηλικία των απορριμμάτων και το στάδιο αποσύνθεσης, το ειδικό βάρος, κ.λπ.

Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν δεδομένα για τη διατμητική αντοχή των απορριμμάτων από εργαστηριακές δοκιμές, επιτόπου δοκιμές και ανάστροφες αναλύσεις περιστατικών αστοχίας, που χρησιμοποιούνται για την καλύτερη κατανόηση της διατμητικής αντοχής των ΑΣΑ. Οπότε προκύπτουν τιμές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στατικές αναλύσεις, αλλά και σε αναλύσεις σεισμικής ευστάθειας απορριμματικών πρανών χώρων υγειονομικής ταφής.

Επίσης, στη βιβλιογραφία υφίσταται ένα ευρύ φάσμα τιμών των ενεργών διατμητικών παραμέτρων. Στις στατικές και δυναμικές αναλύσεις ευστάθειας, χρησιμοποιούνται οι ενεργές παράμετροι, επειδή η υψηλή διαπερατότητα των ΑΣΑ συνήθως δεν επιτρέπει την ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων, που προκαλούνται από τις πιέσεις του νερού των πόρων, εκτός και αν λαμβάνει χώρα έντονη επανακυκλοφορία στραγγισμάτων.

Όλοι οι ερευνητές που ασχολήθηκαν με τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής των ΑΣΑ, χρησιμοποίησαν το βασικό μοντέλο Mohr-Coulomb, λόγω της ανάγκης ύπαρξης ενός κριτηρίου αστοχίας κατά τη στατική και δυναμική ανάλυση ευστάθειας απορριμματικών πρανών. Τα βιβλιογραφικά δεδομένα για τη διατμητική αντοχή, που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, πρέπει να χρησιμοποιούνται κατόπιν αξιολόγησης, καθώς θεωρούνται μια απαραίτητη γενίκευση, η οποία προκύπτει από την ανάγκη ύπαρξης μιας περιβάλλουσας αντοχής.

Έχουν αναφερθεί τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής που κυμαίνονται από 10° έως 53° , ενώ η ενεργός συνοχή λαμβάνει τιμές από 0-67kPa, αντίστοιχα. Αυτό το μεγάλο εύρος στις τιμές οφείλεται στους πολλούς παράγοντες, που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των δοκιμών, περιλαμβάνοντας όσους αναφέρθηκαν προηγουμένως, δηλαδή την ετερογένεια που χαρακτηρίζει τα στερεά απόβλητα, την ηλικία των

δειγμάτων, το βαθμό αποικοδόμησης, το ειδικό βάρος, την προεπεξεργασία των δειγμάτων και την ακολουθούμενη μέθοδο, (Stark et al., 2008).

Αναφέρονται επίσης τιμές $\phi'=20-35^\circ$ και $c'=0-50\text{kPa}$ (Isenberg, 2003) οι οποίες κυμαίνονται στα όρια που προτείνονται από αρκετές μελέτες ($\phi' = 35^\circ$ και $c' = 0-25\text{ kPa}$, Eid et al., 2000, $\phi'=10-53^\circ$, $c'=0-67\text{kPa}$, Stark et al., 2008). Ως πιο πιθανές και λογικές τιμές ϕ' και c' αναφέρονται τα εύρη $35-40^\circ$ και $1-2\text{kPa}$ αντίστοιχα (Milanov et al., 1997).

Οι Eid et al. (2000), χρησιμοποίησαν δημοσιευμένα αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων, από απορριμματικά πρανά που είχαν αστοχήσει και δημοσιευμένα αποτελέσματα δοκιμών μεγάλης κλίμακας σε άμεση διάτμηση και εκτίμησαν την μέση διατμητική αντοχή του απορριμματικού υλικού. Εν συνεχεία, οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν, δηλαδή συνοχή ίση με 25 kPa και γωνία τριβής ίση με 35° , επαληθεύθηκαν με αρκετή ακρίβεια και για άλλες τρεις περιπτώσεις αστοχίας πρανών XYTA, ενώ από τα αποτελέσματα των ανάστροφων αναλύσεων του XYTA Cincinnati, ΗΠΑ, υπολογίστηκε λίγο μεγαλύτερη τιμή συνοχής (40 kPa). Η βιβλιογραφική επισκόπηση μερικών εργασιών, που χρησιμοποίησαν ανάστροφες αναλύσεις (Dixon and Jones, 2005), έδειξε ότι η συνοχή ισούται με 10kPa ενώ η γωνία τριβής λαμβάνει τιμές από 15° έως 25° , (Ζανιά, 2009).

Σε μία πιο πρόσφατη διερεύνηση της διατμητικής αντοχής του απορριμματικού υλικού (Palaypayon and Ohta, 2007) αναφέρεται ότι βάσει ανάστροφων αναλύσεων ευστάθειας, από παρατηρηθείσες αστοχίες των XYTA Payatas και Leuwigajah, η συνοχή υπολογίστηκε ίση με 19 και 10 kPa , αντίστοιχα και η γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 28° και 20° , αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, στη συγκεκριμένη εργασία, αναφέρεται ότι έπειτα από διερεύνηση για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής σε 15 XYTA στην Ιαπωνία, η συνοχή προέκυψε να λαμβάνει τιμές από 39 έως 69 kPa , ενώ η γωνία εσωτερικής τριβής ήταν ίση με 30° . Τέλος, από ανάστροφες αναλύσεις ευστάθειας κατακόρυφων απορριμματικών πρανών ύψους $3-5\text{m}$ του XYTA Toyon Bay, ΗΠΑ, υπολογίστηκε ότι η συνοχή μπορεί να λαμβάνει μικρότερες τιμές σε σχέση με τις προαναφερθείσες, δηλαδή από 3.4 έως 7.1 kPa , ενώ οι αντίστοιχες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής, κυμαίνονται μεταξύ 40° και 30° .

Σύμφωνα με τους Dixon and Jones, 2005, η συνοχή λαμβάνει τιμές από 0 έως 23.5 kPa ενώ η γωνία τριβής από 21° έως 42° , όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική

επισκόπηση μερικών εργασιών δημοσιευμένων πριν το 1995, οι οποίες παρουσίαζαν αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης.

Στη χώρα μας, σε αντίστοιχες μελέτες ανάλυσης ευστάθειας απορριμματικών πρανών, γίνεται η διάκριση του απορριμματικού φορτίου, σε φρέσκα (ηλικίας <2 ετών), και ηλικίας <2 ετών. Οι τιμές που προτείνονται για τη συνοχή και την γωνία εσωτερικής τριβής για τα απορρίμματα ηλικίας μέχρι 2 ετών είναι 15-18° και 10-15 kPa, ενώ για το απορριμματικό φορτίο ηλικίας >2 ετών, 18-20° και 15 kPa, αντίστοιχα (Τεχνική Υπηρεσία Δήμου Αριδαίας, 2009).

Η πλέον διαδεδομένη περιβάλλουσα αστοχίας που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διατμητικής αντοχής των στερεών αποβλήτων είναι αυτή των Kavazanjian et al., 1995. Πρόκειται για διγραμμική περιβάλλουσα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: Για $\sigma_n < 30$ kPa, $\varphi = 0^\circ$ και $c = 24$ kPa ενώ για $\sigma_n > 30$ kPa, $\varphi = 33^\circ$ και $c = 0$. Η συγκεκριμένη περιβάλλουσα είχε ως σκοπό να παρέχει μια συντηρητική εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των αστικών στερεών αποβλήτων και βασίστηκε στα πολύ περιορισμένα εργαστηριακά αποτελέσματα της περιόδου εκείνης, καθώς και σε ανάστροφες αναλύσεις ευσταθών πρανών, (Θεοδωράτος, 2006).

Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται στα παρακάτω σχήματα, από το οποίο προκύπτει το αξιοσημείωτο γεγονός της περιορισμένης διασποράς των πειραματικών σημείων παρά την ποικιλομορφία των υλικών και τη γεωγραφική διασπορά των θέσεων των ΧΥΤΑ. Ανάλογη προσαρμογή ευθύγραμμης περιβάλλουσας στα δεδομένα της Εικόνας 18 οδηγεί στις τιμές $\varphi = 32^\circ$ και $c = 26$ kPa. Λαμβάνοντας όμως υπόψη γωνία τριβής μειούμενη με την αύξηση της ορθής τάσης είναι δυνατή η προσαρμογή καμπύλης περιβάλλουσας αστοχίας της μορφής:

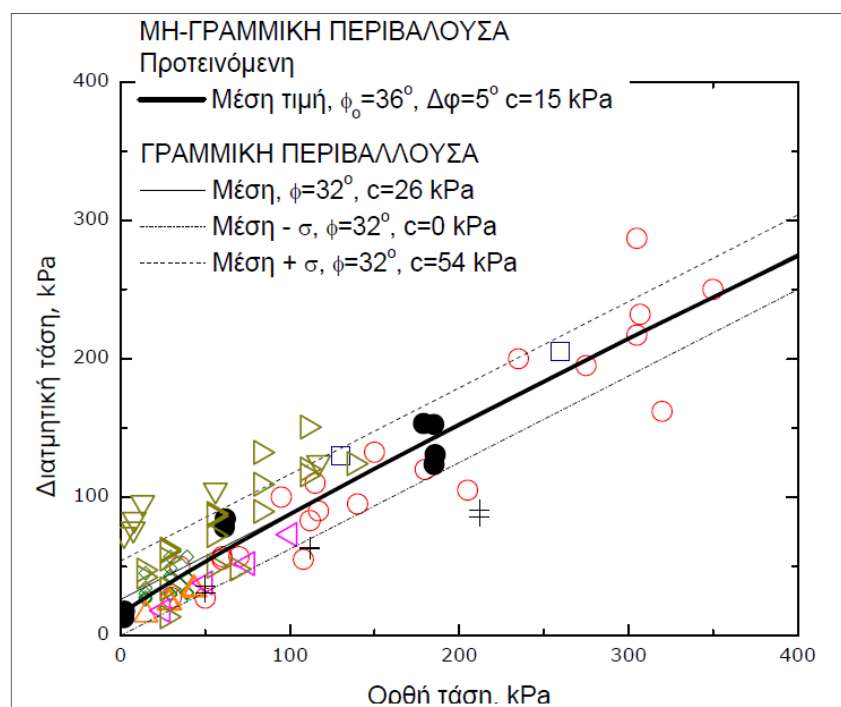
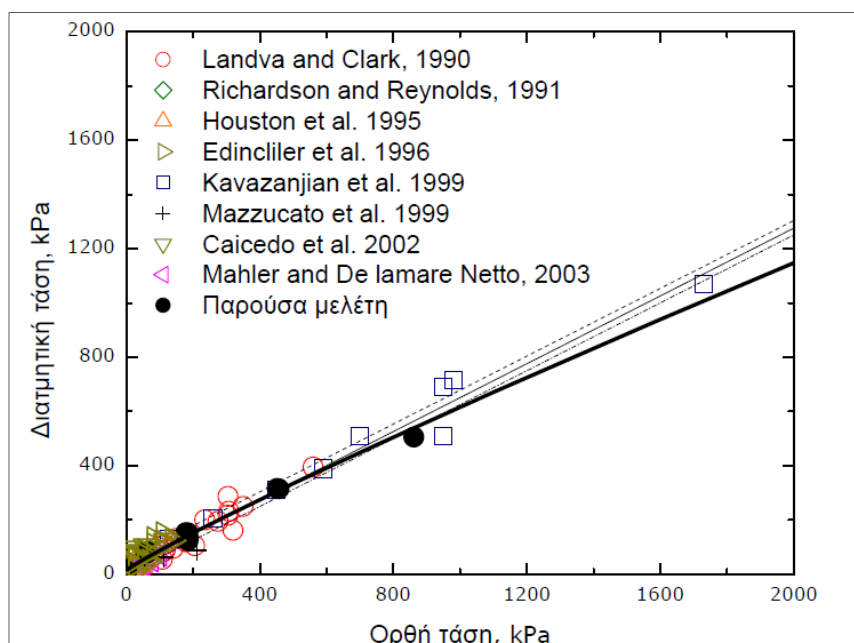
$$\tau = c + \sigma_n \tan(\varphi)$$

όπου: $c = 15$ kPa

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \log \frac{\sigma_n}{P_a}$$

$\varphi_0 = 36^\circ$ (γωνία τριβής για ορθή τάση ίση με 1 atm ή 101.3 kPa)

$\Delta\varphi = 5^\circ$, κλίση της ευθείας γραμμής του διαγράμματος $\varphi - \log(\sigma_n)$, (Θεοδωράτος, 2006)



Εικόνα 18. Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης μεγάλης κλίμακας σε αστικά στερεά απόβλητα [Θεοδωράτος, 2006]

Είναι γνωστό ότι οι γεωτεχνικές ιδιότητες των απορριμμάτων παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Μια μελέτη είχε ως αντικείμενο την θεώρηση χωρικής διακύμανσης των γεωτεχνικών παραμέτρων, σε στοχαστικό πλαίσιο. Μελετήθηκε ο ρόλος της χωρικής μεταβολής των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των αποβλήτων και η επίδραση της βιοαποικοδόμησης και του βαθμού αποσύνθεσης, οι οποίες συμβαίνουν με την

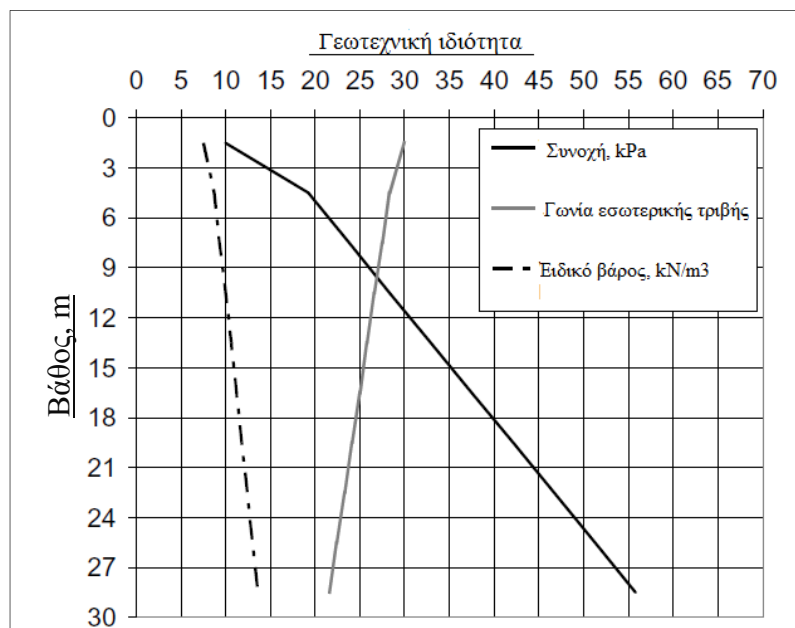
πάροδο του χρόνου. Οι δείκτες αξιοπιστίας μειώθηκαν όταν υπήρχαν αυξήσεις στις μεταβολές των ιδιοτήτων, ή του βαθμού αποσύνθεσης (Babu et al., 2010).

Σε αυτή τη μελέτη συνοψίστηκαν στοιχεία από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία (Zekkos et al., 2006; Stark et al., 2008) σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των απορριμμάτων, που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αξιολογήθηκαν, λοιπόν, το εύρος των στατιστικών παραμέτρων, δηλαδή οι μέσες τιμές, οι τυπικές αποκλίσεις, και οι συντελεστές μεταβλητότητας, για το ειδικό βάρος, τη συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9:

Πίνακας 9. Εύρος στατιστικών παραμέτρων, δηλαδή μέσης τιμής (μ), τυπικής απόκλισης (σ) και συντελεστή μεταβλητότητας (CoV), για το ειδικό βάρος των αστικών στερεών αποβλήτων. Στοιχεία από δημοσιευμένες μελέτες [Babu et al., 2010]

| | Ειδικό βάρος (γ)kN/m ³ | Συνοχή (c) kPa | Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) |
|----------|---|------------------------------|---------------------------------------|
| μ | 9.17 – 13.09 (11.13) | 6.63- 29.85 (18.23) | 27.6° – 36.93° (32.27°) |
| σ | 1.86 – 3.38 (2.62) | 3.81 – 24.0 (13.91) | 6.11° – 9.66° (7.89°) |
| CoV | 20.24-25.81% (23.54%) | 57.41 – 80.40% (68.9%) | 22.14% – 26.17% (24.16%) |

Οι μέσες τιμές των ιδιοτήτων των αστικών απορριμμάτων λαμβάνονται από τον παραπάνω πίνακα. Αρχικά, η ευστάθεια του απορριμματικού πρανούς υπολογίστηκε με τον αρχικό συντελεστή ασφάλειας με τις αρχικές τιμές των ιδιοτήτων των απορριμμάτων ($\gamma = 11.13 \text{ kN / m}^3$, $c = 18.23 \text{ kPa}$, $\phi = 32.27^\circ$) για το συνολικό ύψος πλήρωσης, ως ένα ενιαίο στρώμα. Έπειτα, διεξήχθη μια παραμετρική μελέτη για την στατιστική εκτίμηση της ευστάθειας, λαμβάνοντας υπόψη χωρική διακύμανση των γεωτεχνικών ιδιοτήτων, με αρχικές τιμές των ιδιοτήτων, ίσες με τις παραπάνω μέσες τιμές, συντελεστές μεταβλητότητας (CoV%) όπως αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 9, και πολυστρωματικό πρανές. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν. Έτσι προέκυψε μια σχέση των ιδιοτήτων συναρτήσει του βάθους, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19. Μεταβολή των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των ΑΣΑ σε σχέση με το βάθος [Babu et al., 2010]

2.9 Λογισμικό ανάλυσης ευστάθειας πρανών

Υπάρχουν διάφορα είδη λογισμικού που είναι διαθέσιμα για την ανάλυση της ευστάθειας πρανών. Τα εν λόγω λογισμικά χρησιμοποιούν τις μεθόδους οριακής ισορροπίας ή πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και δισδιάστατη ή τρισδιάστατη ανάλυση ή και τα δύο. Αυτά τα λογισμικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ευστάθειας και βασίζουν την ανάλυση σε δεδομένα που εισάγονται από το χρήστη και εξάγουν ως αποτέλεσμα τον συντελεστή ασφαλείας για το υπό εξέταση πρανές. Ιδανικά, η ανάστροφη ανάλυση είναι η καταλληλότερη μέθοδος για τον προσδιορισμό των εδαφικών παραμέτρων των υλικών. Όπου αυτό δεν είναι εφικτό, χρησιμοποιούνται δεδομένα που αντλούνται από τη βιβλιογραφία, τα οποία με τη σειρά τους, βασίζονται σε διάφορες μεθόδους, όπως περιγράφηκαν προηγουμένως.

Για την παρούσα ανάλυση έγινε χρήση του λογισμικού SLOPE/W, που είναι ένα από τα στοιχεία ενός πλήρους πακέτου γεωτεχνικών προϊόντων, που ονομάζεται GeoStudio. Το SLOPE/W χρησιμοποιεί τις μεθόδους οριακής ισορροπίας ροπών και δυνάμεων, για την εκτίμηση της ευστάθειας, υπολογίζοντας ταυτόχρονα τους συντελεστές ασφάλειας, με τις διαθέσιμες μεθόδους. Η ανάλυση της ευστάθειας καταλήγει επίσης στην εκτίμηση της αντίστοιχης επιφάνειας αστοχίας.

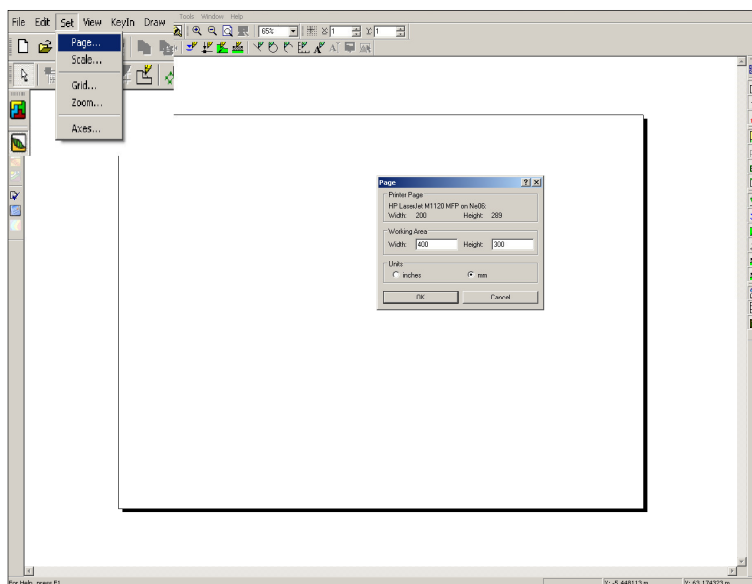
Οι παραδοχές που γίνονται είναι, ότι:

- ο συντελεστής ασφαλείας είναι ο ίδιος για όλα τα εδάφη που συμμετέχουν
- ο συντελεστής ασφαλείας είναι ο ίδιος για όλες τις λωρίδες

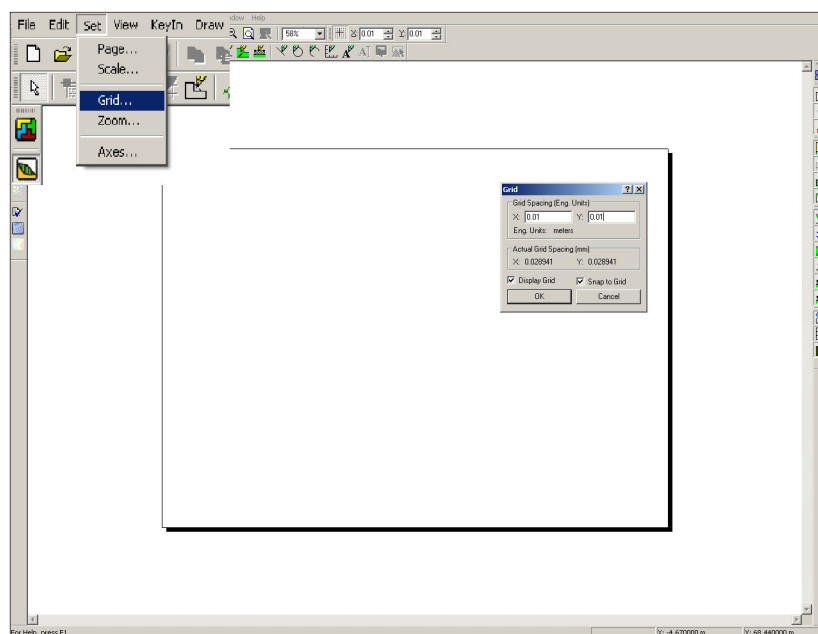
Το πρόγραμμα προσφέρει την δυνατότητα επίλυσης σύνθετων προβλημάτων με περίπλοκη γεωμετρία και στρωματογραφία. Επίσης, επιτρέπει τον ορισμό συνθηκών πίεσης νερού των πόρων, ειδικού βάρους, συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής, των υλικών που συνθέτουν την στρωματογραφία. Μπορούν να εισαχθούν, επιπλέον, διάφορα εξωτερικά φορτία. Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα εισαγωγής στατιστικών παραμέτρων για τα παραπάνω μεγέθη, για τη διεξαγωγή στατιστικής ανάλυσης με το μοντέλο Monte Carlo. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε επαναλαμβανόμενη, τυχαία επιλογή αριθμητικών τιμών για κάθε παράμετρο, λαμβάνοντας τις ανάλογες τιμές από ένα εύρος τιμών που έχει καθοριστεί, με στόχο την επίτευξη ενός διαγράμματος πιθανοτήτων, (GEO-SLOPE, 2013).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να περατωθεί η μελέτη ανάλυσης ευστάθειας απορριμματικών πρανών του υπό εξέταση ΧΥΤΑ. Αρχικά, ορίστηκε η σελίδα του γραφικού περιβάλλοντος του SLOPE/W, με την εντολή SET>PAGE και, ο κανάβος (με $X=0,01$ και $Y=0,01$, επειδή τα σημεία των μηκοτομών έχουν ακρίβεια δεύτερου δεκαδικού ψηφίου) με την εντολή SET>GRID:



Εικόνα 20. Ορισμός σελίδας SLOPE/W



Εικόνα 21. Ορισμός κανάβου

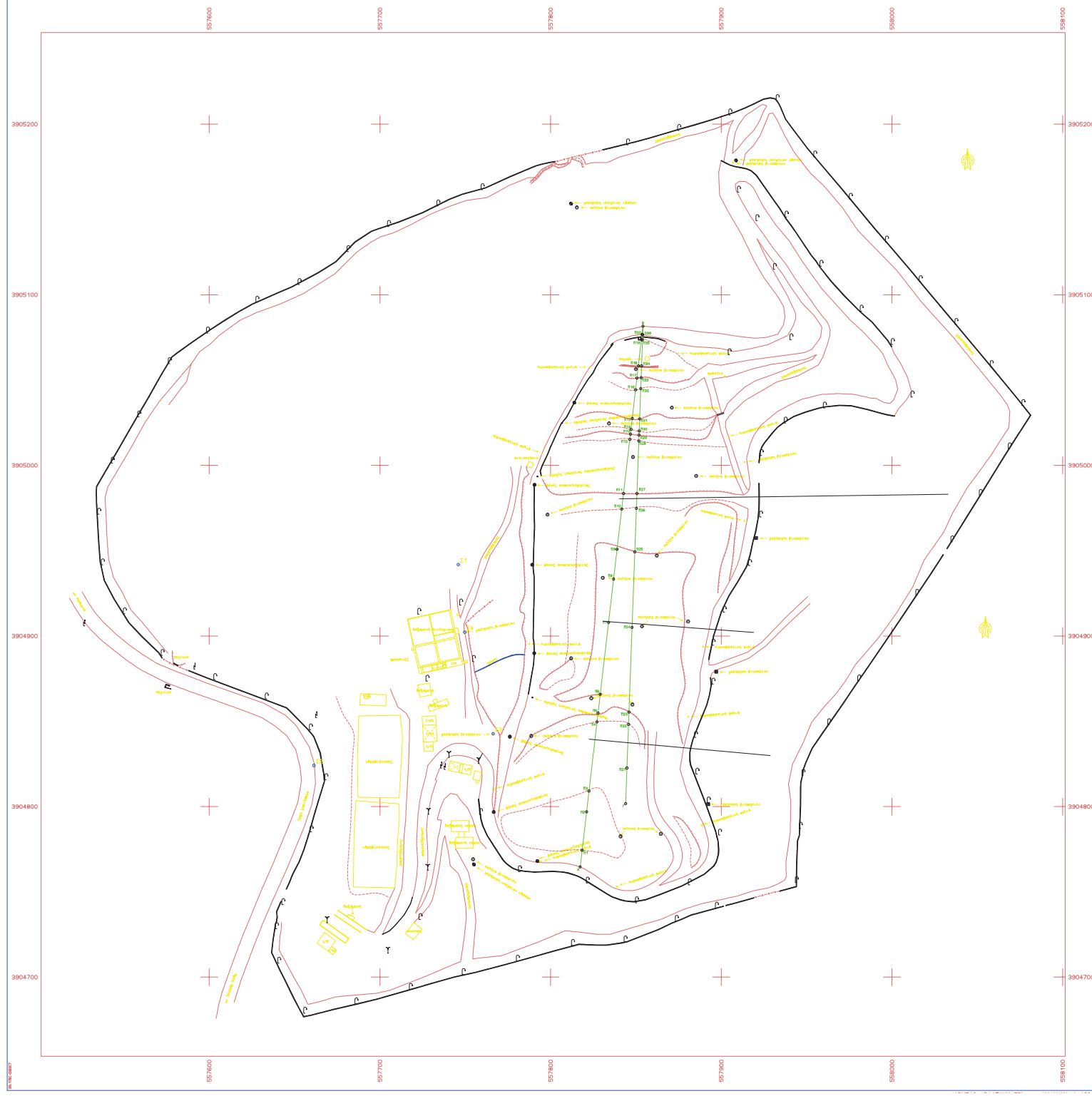
3.1 Καθορισμός γεωμετρίας

Για τον καθορισμό της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκαν δύο μηκοτομές, για τις οποίες υπήρχαν πλήρη στοιχεία υψομέτρων. Η διάταξη των μηκοτομών, φαίνεται στην Εικόνα 22, που απεικονίζει την οριζοντιογραφία του ΧΥΤΑ, όπως προέκυψε κατά την τελευταία τοπογραφική αποτύπωση, την περίοδο Ιουλίου-Αυγούστου 2013. Οι παρούσες μηκοτομές (Εικόνες 22 και 23), κρίθηκαν αντιπροσωπευτικές για την εκτίμηση της ευστάθειας του ΧΥΤΑ, καθώς διέρχονται από τα πληρωμένα, και μη, κύτταρα, και περιλαμβάνουν τμήματα του πρανούς με διαφορετικές τιμές για τις κλίσεις.

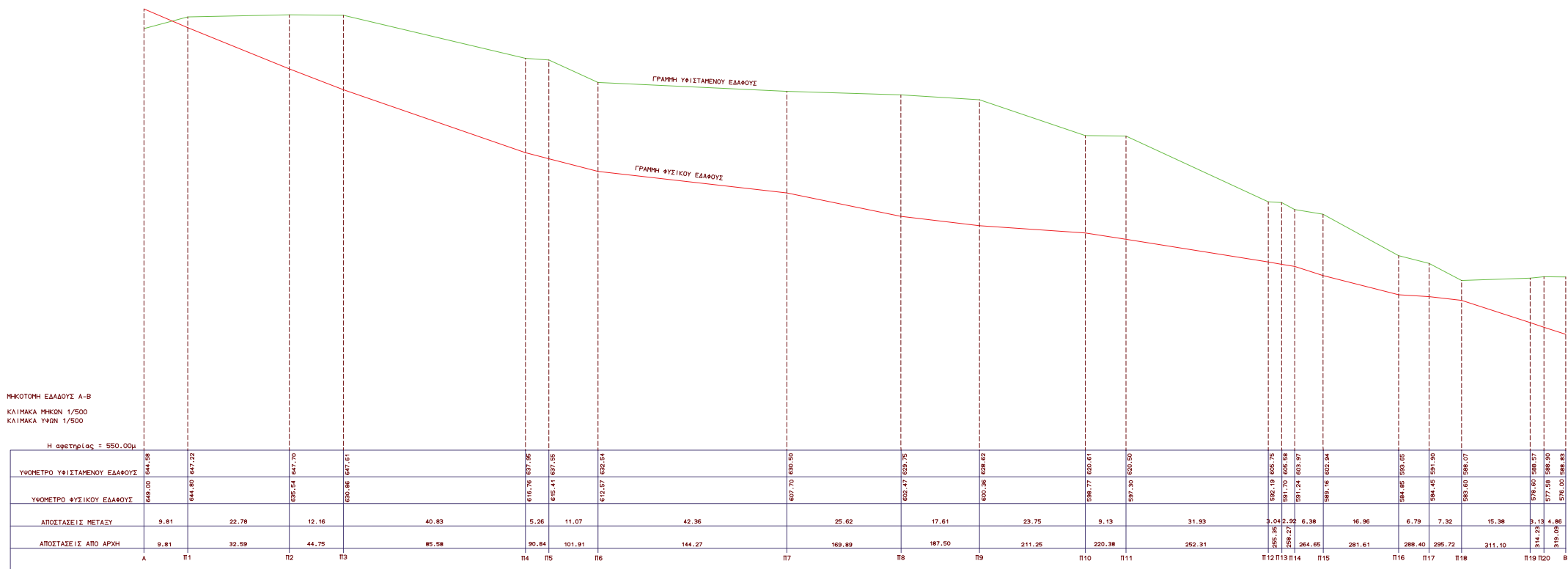
Στη συνέχεια φαίνονται οι μηκοτομές ΑΒ και ΒΓ. Από αυτές μπορούν να αντληθούν όλα τα στοιχεία, που απαιτούνται για τον πλήρη καθορισμό της γεωμετρίας, που είναι απαραίτητα για την ανάλυση. Αυτά είναι:

- το υψόμετρο υφιστάμενου εδάφους,
- το υψόμετρο φυσικού εδάφους,
- οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων, καθώς και οι αποστάσεις κάθε σημείου από το αρχικό

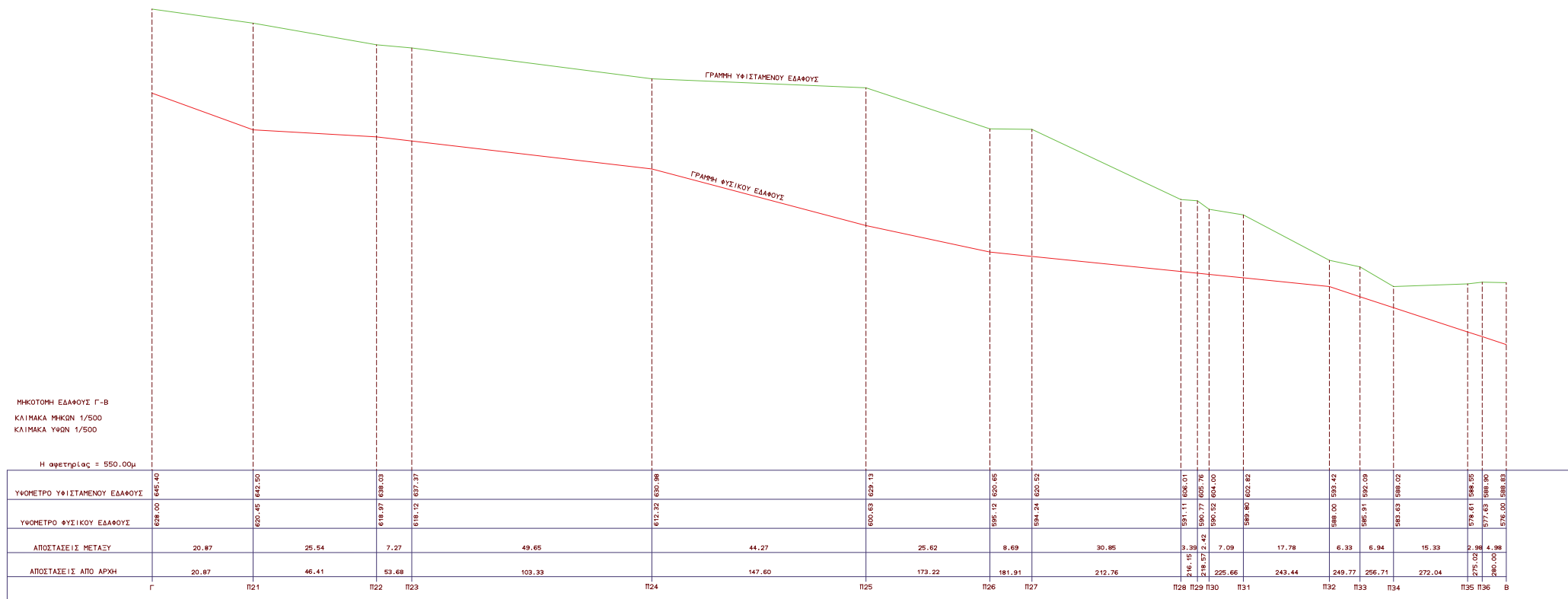
Τα παραπάνω στοιχεία εισήχθησαν στο πρόγραμμα με τη μορφή συντεταγμένων σε χαρακτηριστικά σημεία του υπό εξέταση ΧΥΤΑ.



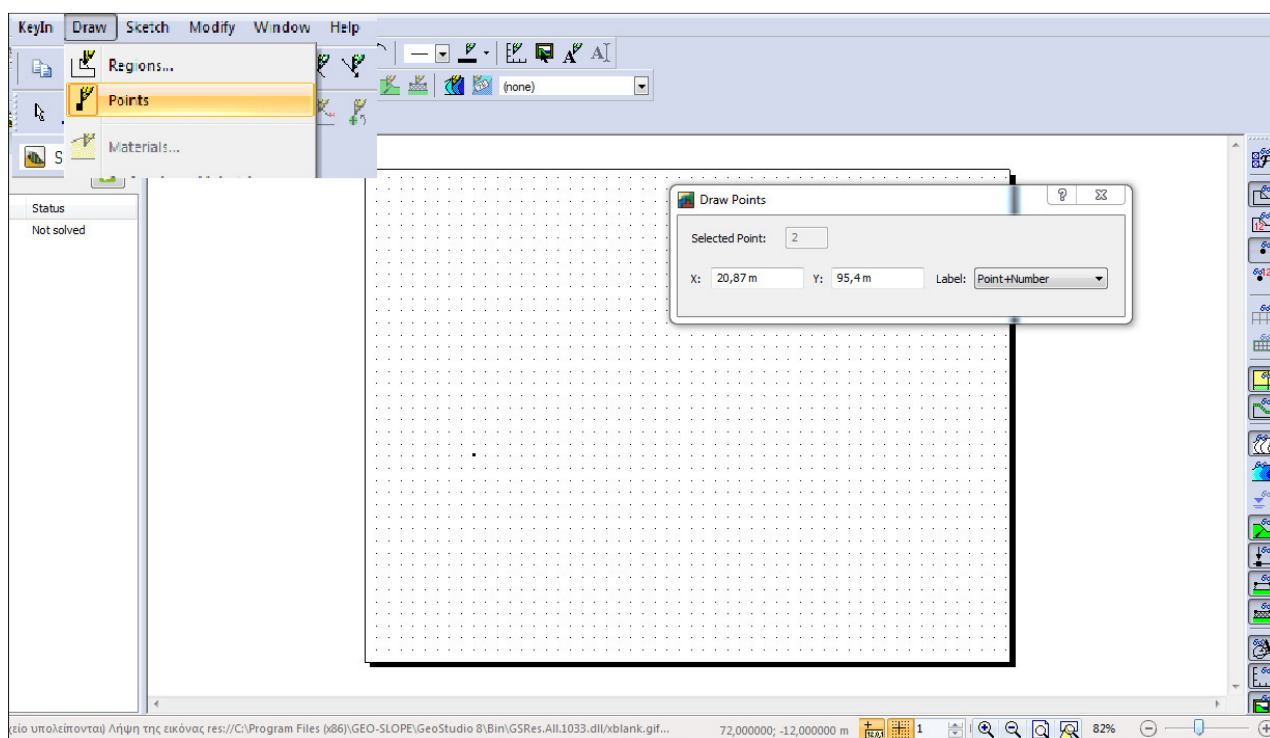
Εικόνα 22. Διάταξη μηχανομημάτων



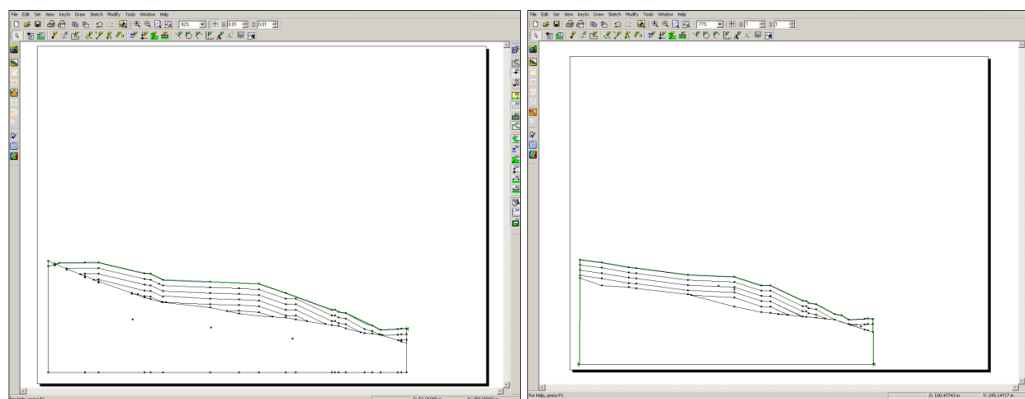
Εικόνα 23. Μηκτομή ΑΒ



Εικόνα 24. Μήκοτομή ΒΓ

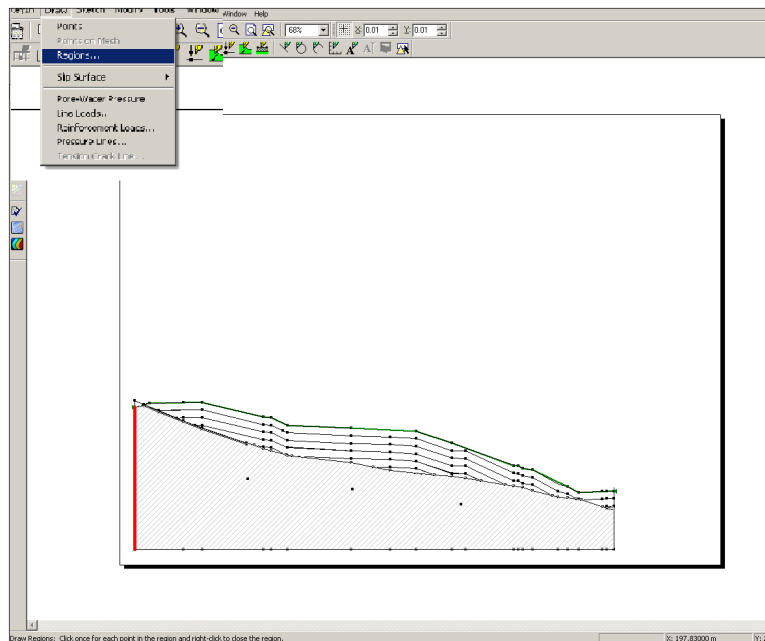


Εικόνα 25. Εισαγωγή σημείων



Εικόνα 26. Εδαφικά προφίλ διατομών ΑΒ και ΓΒ

Κάθε εδαφικό προφίλ, στη συνέχεια, χωρίστηκε σε υποπεριοχές, ανά 5m, έτσι ώστε κάθε επιμέρους περιοχή να αποκτήσει διαφορετικό συνδυασμό γεωτεχνικών ιδιοτήτων. Έτσι προέκυψε η διαστρωμάτωση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 27. Το ύψος κάθε στρώσης επιλέχθηκε να είναι 5m, μετά από δοκιμές. Πάχος στρώσεων χαμηλότερο από 5m δεν επηρεάζει την τιμή του ΣΑ, και υπάρχει χωρικός διαχωρισμός των ιδιοτήτων των υλικών (γεγονός που είναι φανερό από την επισκόπηση της βιβλιογραφίας), η μεταβολή των οποίων με το βάθος να αντιπροσωπεύεται πλήρως, αλλά και για την απλοποίηση των υπολογισμών.



Εικόνα 27. Ορισμός περιοχών

3.2 Επιλογή μηχανικών ιδιοτήτων

3.2.1 Ειδικό βάρος

Για την εκτίμηση του προφίλ αύξησης του ειδικού βάρους συναρτήσει του βάθους απαιτείται ο υπολογισμός του αρχικού ειδικού βάρους, δηλαδή αυτού που αντιστοιχεί σε βάθος 0m. Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης των απορριμμάτων σε συνδυασμό με τα ειδικά βάρη του κάθε κλάσματος, όπως παρατίθενται στον Πίνακα 10:

Από τον λόγο, του ποσοστιαίου βάρους του κάθε κλάσματος προς την τυπική τιμή του ειδικού βάρους του κάθε κλάσματος, προκύπτει ο όγκος που καταλαμβάνεται. Στη συνέχεια έγινε αναγωγή του όγκου του κάθε κλάσματος στο 1m^3 . Έπειτα, υπολογίστηκε η μάζα κάθε κλάσματος που αντιστοιχεί σε ένα κυβικό μέτρο απορριμμάτων. Αυτό το μέγεθος αντιστοιχεί στο ειδικό βάρος σε χαλαρή κατάσταση.

Έτσι αν οριστεί:

- ρ_χ το ειδικό βάρος των ΑΣΑ όταν βρίσκονται σε χαλαρή κατάσταση
- ρ_μ κατά τη μεταφορά

Πίνακας 10. Ειδικά βάρη κλασμάτων ΑΣΑ 'στον κάδο'

| Συστατικό υλικό | Ειδικό βάρος 'στον κάδο' (kg/m ³) | | |
|----------------------|---|-------------|---------------------------|
| | Διακύμανση τιμών | Τυπική τιμή | Μέγιστος βαθμός συμπίεσης |
| Οργανικά | | | |
| Τροφικά υπολείμματα | 130-490 | 250 | 3 |
| Χαρτί | 35-140 | 90 | 6.5 |
| Χαρτόνι | 40-180 | 50 | 6.5 |
| Πλαστικά | 40-130 | 60 | 10 |
| Υφάσματα | 35-100 | 60 | 7 |
| Λάστιχα | 80-200 | 130 | 3.5 |
| Δέρματα | 100-260 | 150 | 3.5 |
| Αλλά οργανικά | 100-350 | 150 | 3 |
| Ανόργανα | | | |
| Γυαλί | 150-500 | 200 | 2.5 |
| Μη σιδηρούχα μέταλλα | 50-240 | 160 | 6.7 |
| Σιδηρούχα μέταλλα | 150-1200 | 350 | 3.3 |
| Άλλα αδρανή | 320-960 | 480 | 1.3 |

Πηγή: Παναγιωτακόπουλος, 2007

- ρ_t το τελικό ειδικό βάρος των ΑΣΑ στον ΧΥΤΑ μετά τη συμπίεση,

και r ο βαθμός συμπίεσης, τότε ο συνολικός βαθμός συμπίεσης, υπολογίζεται από τη σχέση $r = \rho_t / \rho_\chi$ και ο βαθμός συμπίεσης στα απορριμματοφόρα που υπολογίζεται από το λόγο: ρ_μ / ρ_χ (Παναγιωτακόπουλος, 2007).

Από τις παραπάνω σχέσεις εύκολα μπορεί να υπολογιστεί το ρ_t . Η τιμή αυτή, που αντιστοιχεί στο ειδικό βάρος των απορριμμάτων στον ΧΥΤΑ, είναι 633kg/m³ ή 5,82kN/m³. Από τον Πίνακα 11, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα ΑΣΑ υπόκεινται σε καλή ή πολύ καλή συμπίεση.

Πίνακας 11. Ειδικά βάρη ΑΣΑ σε διάφορα στάδια

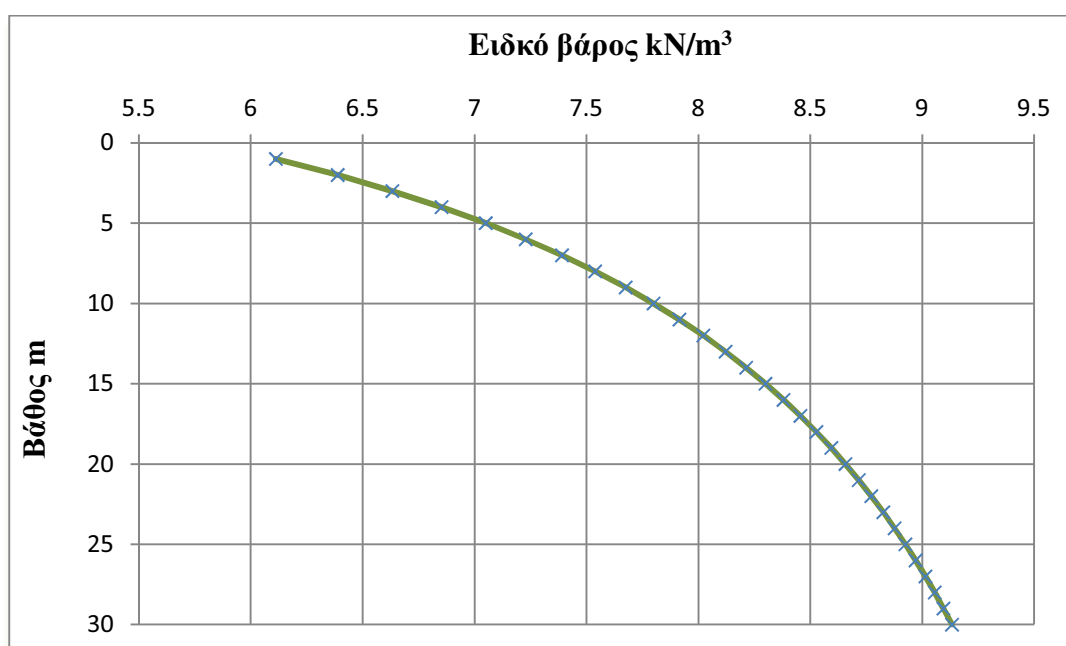
| Κατάσταση ΑΣΑ | Ειδικό βάρος, ρ (kg/m ³) | |
|--|---|-------------|
| | Διακύμανση τιμών | Τυπική Τιμή |
| Οικιακά | | |
| • Σε χαλαρή κατάσταση, χωρίς επεξεργασία | 60-200 | 130 |
| • Μέσα στο απορριμματοφόρο, συμπιεσμένα | 180-450 | 300 |
| • Μετά την εκκένωση τους από το απορριμματοφόρο, όπου είχαν συμπιεστεί | 120-250 | 180 |
| Εμπορικά βιομηχανικά | 175-350 | 250 |
| ΑΣΑ | | |
| • Στο απορριμματοφόρο, με συμπίεση | 180-450 | 300 |
| • Στο ΧΥΤΑ με απλή συμπίεση | 300-500 | 450 |
| • Στο ΧΥΤΑ με καλή συμπίεση | 400-750 | 600 |
| • Στο ΧΥΤΑ με πολύ καλή συμπίεση | 600-1200 | 800 |
| Κατασκευών/Κατεδαφίσεων (αδρανή) | 1000-1800 | 1500 |

Πηγή: Παναγιωτακόπουλος, 2007

Έχοντας υπολογίσει εμπειρικά το αρχικό ειδικό βάρος, ο υπολογισμός του προφίλ υπερβολικής αύξησής του, σε συνάρτηση με το βάθος γίνεται, όπως προαναφέρθηκε, σύμφωνα με τη σχέση

$$\gamma = \gamma_i + \frac{z}{a + b z}$$

όπως προτάθηκε από τους Zekkos et al. (2005). Αναλυτική περιγραφή του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 2.7.1. Για τιμές των παραμέτρων a και b , $3\text{m}^4/\text{kN}$ και $0,2\text{m}^3/\text{kN}$, αντίστοιχα, προκύπτει η καμπύλη της Εικόνας 28.



Εικόνα 28. Προφίλ αύξησης ειδικού βάρους με το βάθος

3.2.2 Συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής

Για την επιλογή των ιδιοτήτων αυτών, που είναι απαραίτητες για την ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη μελέτη των Babu et al. (2010). Σε αυτήν τη μελέτη, συνδυάστηκαν στοιχεία από δημοσιευμένα στοιχεία που αφορούν τις μηχανικές ιδιότητες των ΑΣΑ. Έτσι, προέκυψε το εύρος των στατιστικών παραμέτρων, δηλαδή της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και του συντελεστή μεταβλητότητας, για την συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής.

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές του Πίνακα 12 με γραμμική μεταβολή συναρτήσει του βάθους (Babu, 2010). Έτσι, προέκυψαν οι τιμές που επιλέχθηκαν για κάθε στρώση.

Πίνακας 12. Εύρος στατιστικών παραμέτρων, από βιβλιογραφικά δεδομένα [Babu et al., 2010]

| | Συνοχή (c) kPa | Γωνία εσωτερικής τριβής (φ) |
|-------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Μέση τιμή (μ) | 6,63-29,85 (18,23) | 27,6°-36,93° (32,27°) |
| Τυπική απόκλιση (σ) | 3,81-24,0 (13,91) | 6,11° -9,66° (7,89°) |
| Συντελεστής μεταβλητότητας (CoV) | 57,41%-80,4 % (68,9%) | 22,14 % -26,17 % (24,16%) |

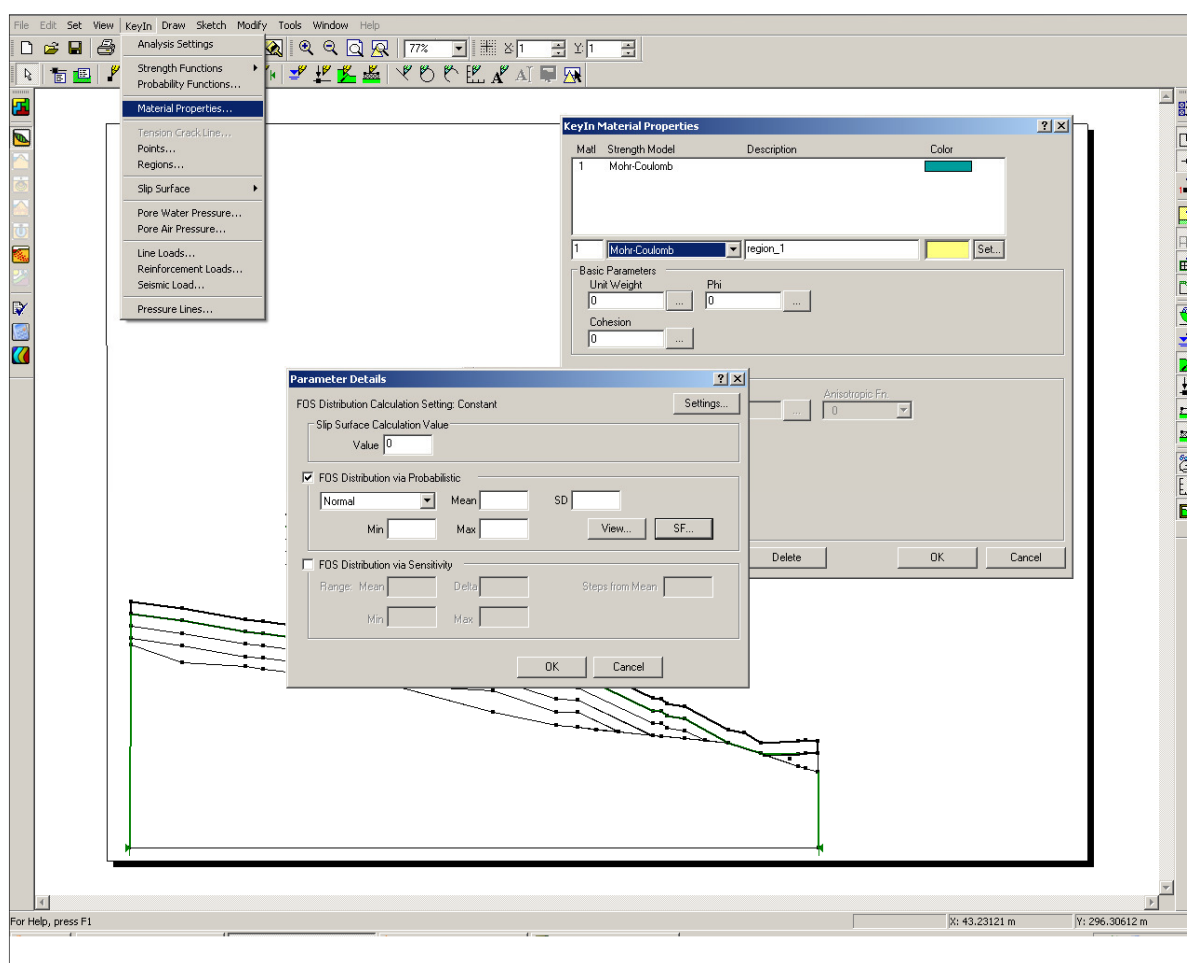
Πίνακας 13. Επιλεγείσες τιμές ειδικού βάρους, συνοχής και γωνίας εσωτ. τριβής ανά στρώση

| Στρώση | Βάθος (m) | Ειδικό βάρος (kN/m ³) | Συνοχή (kPa) | Γωνία εσωτ. τριβής (°) |
|--------|--------------|--------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| 1 | 0-5 | 6,51 | 18 | 33 |
| 2 | 5-10 | 7,47 | 19 | 31,5 |
| 3 | 10-15 | 8,07 | 20 | 30 |
| 4 | 15-20 | 8,49 | 21 | 28,5 |
| 5 | 20-30 | 8,80 | 22 | 27 |
| 6 | 25-30 | 9,04 | 23 | 25,5 |

Για τη γωνία εσωτερικής τριβής επιλέχθηκε η αρχική τιμή να είναι ίση με τη μέση τιμή, ενώ η ελάχιστη, να είναι η ελάχιστη τιμή του εύρους τιμών, αφού είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι η τιμή της μειώνεται με αύξηση της ορθής τάσης (Θεοδωράτος, 2006). Για την συνοχή, διατηρήθηκε η τάση αύξησης με το βάθος, αλλά κρίθηκε ότι η ανώτερη τιμή του εύρους είναι ιδιαίτερα υψηλή (γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το ότι οι τιμές της συνοχής που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία ακολουθούν λογαριθμική κατανομή, και η πιθανότητα εμφάνισης τιμών

μεγαλύτερων από 23kPa, είναι μικρότερη. Επίσης, αυτή η υπόθεση θα οδηγήσει σε πιο συντηρητικό αποτέλεσμα, από την πλευρά της ασφάλειας) (Jahanfar, 2014).

Στη συνέχεια, και αφού επιλέχθηκαν οι εδαφικές παράμετροι, εισάγονται οι τιμές τους στο πρόγραμμα. Με την εντολή KeyIn>Material Properties μπορεί να εισαχθεί ο αύξοντας αριθμός, το μοντέλο αντοχής (επιλέγεται μοντέλο Mohr-Coulomb όπως αναφέρθηκε παραπάνω), το όνομα, το χρώμα και οι αριθμητικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού της στρώσης. Επίσης, μπορούν να οριστούν οι στατιστικές παράμετροι, για στατιστική ανάλυση, δηλαδή η κατανομή που ακολουθούν τα δεδομένα, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση.

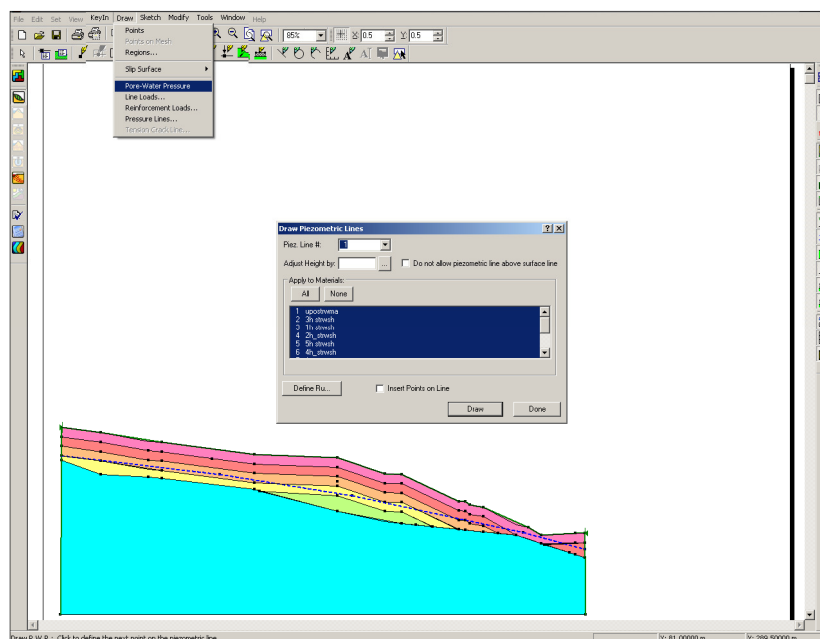


Εικόνα 29. Εισαγωγή των μηχανικών ιδιοτήτων και των στατιστικών τους παραμέτρων στο SLOPE/W

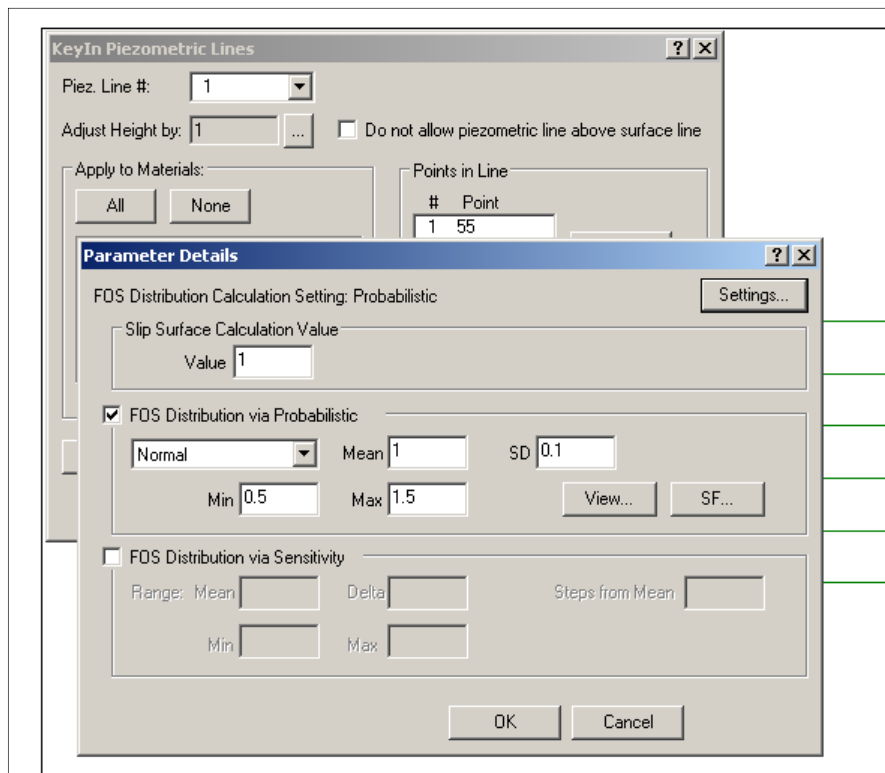
3.3 Ορισμός πιεζομετρικής γραμμής

Ο ορισμός της πιεζομετρικής γραμμής γίνεται με χάραξη της στη μηκοτομή που δημιουργήθηκε με την περιγραφόμενη διαδικασία. Προηγουμένως, ορίστηκε η εφαρμογή της πιεζομετρικής γραμμής σε όλα τα υλικά. Αυτό γίνεται με την εντολή DRAW>PORE WATER PRESSURE και επιλογή των επιθυμητών υλικών. Στην περίπτωση που μελετάται, επιλέγονται όλα τα υλικά που συνθέτουν το απορριμματικό πρανές. Όσον αφορά το υπόστρωμα, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία, οπότε θεωρείται ότι ο υδροφόρος ορίζοντας είναι σε μεγάλο βάθος και δεν επηρεάζει την ευστάθεια της κατασκευής. Να σημειωθεί ότι οι πιέσεις του νερού των πόρων στο SLOPE/W, παίζουν ρόλο μόνο στον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής στη βάση της κάθε λωρίδας και δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των λωρίδων, (GeoSlope, 2013).

Έπειτα, ακολουθεί η χάραξη με την εντολή DRAW. Επιλέχθηκε αυθαίρετα η πιεζομετρική γραμμή να απέχει 5-10m από το υπόστρωμα και στις δύο υπό μελέτη διατομές, για να μπορεί να γίνει υπόθεση επικράτησης των ίδιων συνθηκών και άρα να είναι δυνατή η όποια σύγκριση. Το νερό που βρίσκεται στα κατώτερα στρώματα, μπορεί να οφείλεται σε ανεπαρκή ή κακή απορροή ομβρίων κατά την περίοδο βροχοπτώσεων, ή σε κακή επανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής στατιστικών παραμέτρων για το ύψος της πιεζομετρικής γραμμής (δηλ. της διαφοράς της από την αρχικά ορισθείσα)



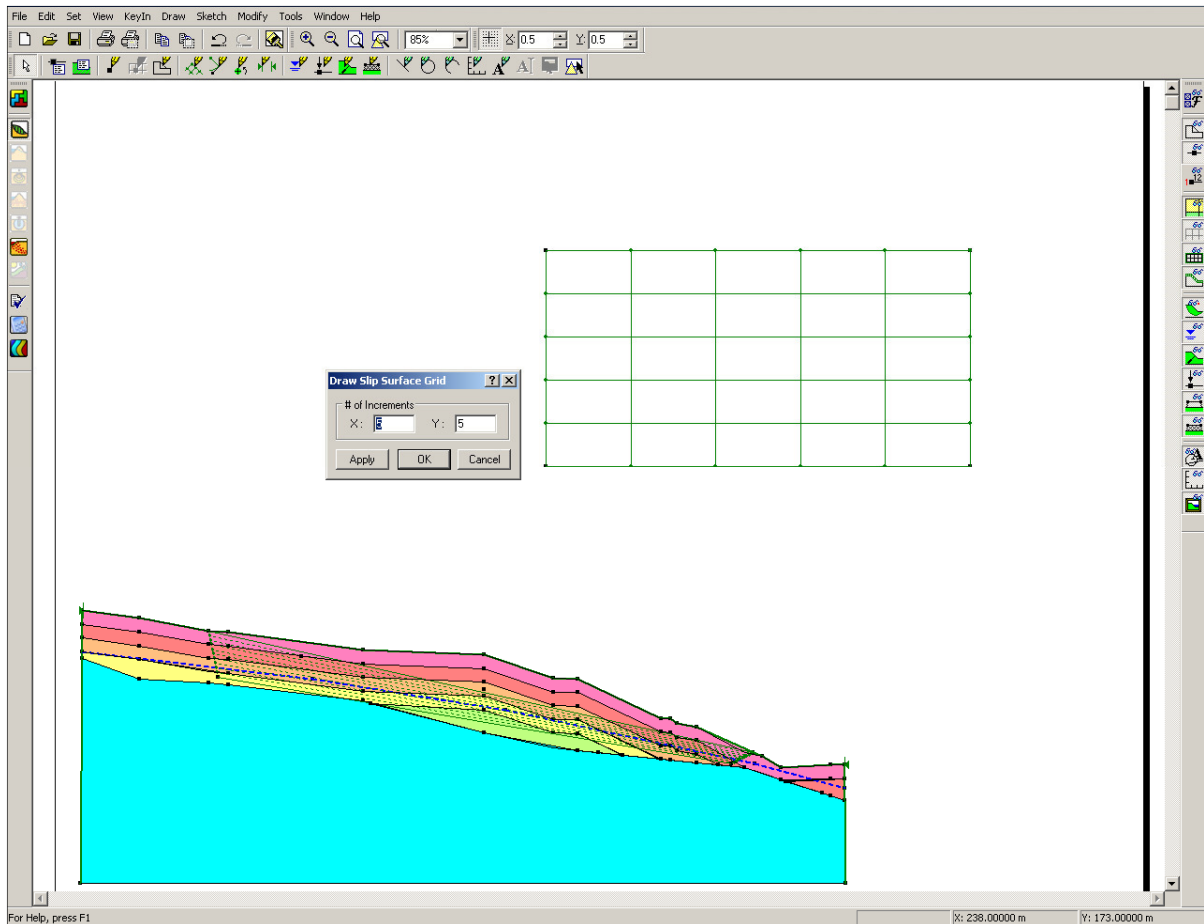
Εικόνα 30. Ορισμός πιεζομετρικής γραμμής στο SLOPE/W



Εικόνα 31. Εισαγωγή στατιστικών παραμέτρων για τη μεταβολή του ύψους της πιεζομετρικής γραμμής από το αρχικό

3.4 Ορισμός επιφανειών αστοχίας

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα να ελεγχθούν πιθανές επιφάνειες ολίσθησης με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, ορίζοντας περιοχές αφετηρίας και τέλους του κύκλου ολίσθησης ή ορίζοντας ένα σύνολο σημείων, πιθανών κέντρων του κύκλου ολίσθησης, και διάφορες τιμές για την ακτίνα του. Στην Εικόνα 32 απεικονίζεται το παράθυρο διαλόγου για τον ορισμό του ‘πλέγματος’ (κανάβου), αλλά και των πιθανών ακτινών (KEY IN>SLIP SURFACE>GRID AND RADIUS). Να σημειωθεί ότι στους υπολογισμούς που παρουσιάζονται στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές για την θέση του πλέγματος, έτσι ώστε να βρεθεί η θέση στην οποία θα προκύψει το κέντρο του κρίσιμου κύκλου.

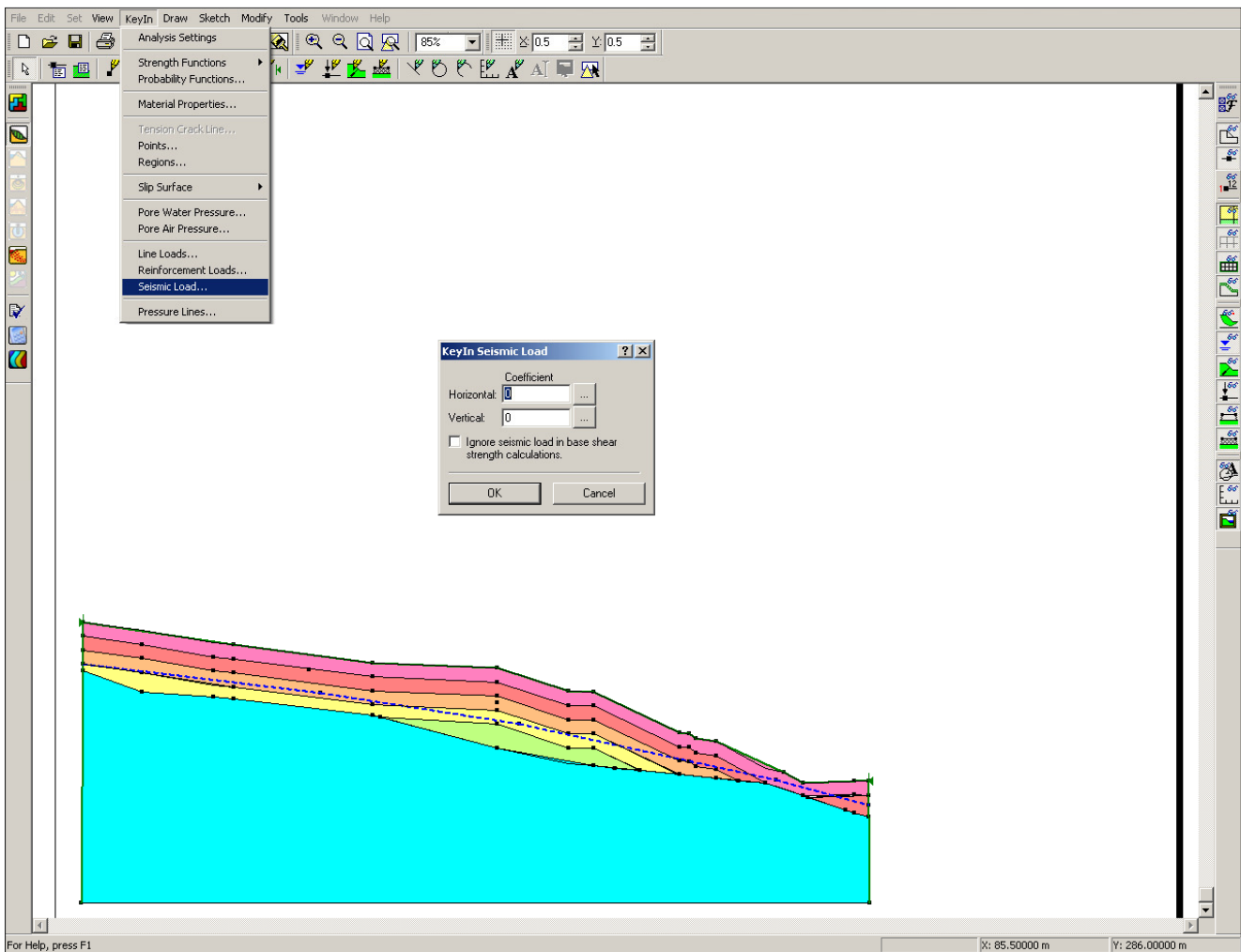


Εικόνα 32. Ορισμός των υπό εξέταση επιφανειών αστοχίας

3.5 Ορισμός σεισμικών φορτίων

Το SLOPE/W δίνει τη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη η σεισμική δράση με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι η εισαγωγή ενός αδιάστατου συντελεστή, που αντιπροσωπεύει την σεισμική επιτάχυνση (ψευδοστατική ανάλυση). Αυτοί οι συντελεστές μπορούν να θεωρηθούν ότι αποτελούν ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας g . Συνεπώς, η τιμή για σεισμική επιτάχυνση $0,24g$ που λαμβάνεται ως επιτάχυνση σχεδιασμού από τον χάρτη σεισμικών επιταχύνσεων, και αντιπροσωπεύει την ψευδοστατική επιτάχυνση, αναλογεί στο 24% της επιτάχυνσης της βαρύτητας, (Geoslope, 2013).

Η ψευδοστατική ανάλυση έχει ως αποτέλεσμα τη δράση κάποιων δυνάμεων, οριζόντιων και κάθετων, που προκαλούνται από τις αντίστοιχες επιταχύνσεις, σε κάθε λωρίδα. Οι επιταχύνσεις αυτές εισάγονται στο πρόγραμμα ως εξής:



Εικόνα 33. Ορισμός σεισμικής δράσης

3.6 Ορισμός ανάλυσης

Τέλος, πρέπει να λάβουν χώρα διάφορες ρυθμίσεις, όσον αφορά την ανάλυση. Αυτές περιλαμβάνουν:

- επιλογή των μεθόδων ανάλυσης,
- επιλογή συνθηκών πίεσης νερού των πόρων,
- είδος των επιφανειών αστοχίας,
- είδος της κατανομής του συντελεστή ασφάλειας (ντετερμινιστική ή στατιστική). Στην δεύτερη περίπτωση ορίζονται και άλλες παράμετροι, όπως: το πλήθος των αναλύσεων Monte Carlo, εάν οι δοκιμές θα γίνουν με τυχαία επιλογή μεταβλητών κάθε φορά, ή με τη χρήση δεδομένων χωρικής διακύμανσης, κ.α.
- και άλλων ρυθμίσεων (π.χ αριθμός λωρίδων, ρυθμίσεις βελτιστοποίησης).

Στην υπό μελέτη περίπτωση του ΧΥΤΑ Αμαρίου, έγινε επιλογή της ανάλυση με τη μέθοδο Bishop, τη μέθοδο Janbu, Morgenstern-Price, και Spencer. Επίσης, οι πιέσεις του νερού των πόρων υπολογίζονται από την πιεζομετρική γραμμή. Κατά τη στατιστική ανάλυση έγιναν 2000 δοκιμές με το μοντέλο Monte Carlo, με τυχαία επιλογή μεταβλητών κάθε φορά, και αριθμό λωρίδων 30, αφού αύξηση αυτού του αριθμού δεν επιφέρει αλλαγές στο αποτέλεσμα (GeoSlope, 2013). Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι ελήφθησαν όπως προεπιλέγονται από το λογισμικό. (Εικόνα 34)



Εικόνα 34. Ρυθμίσεις ανάλυσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

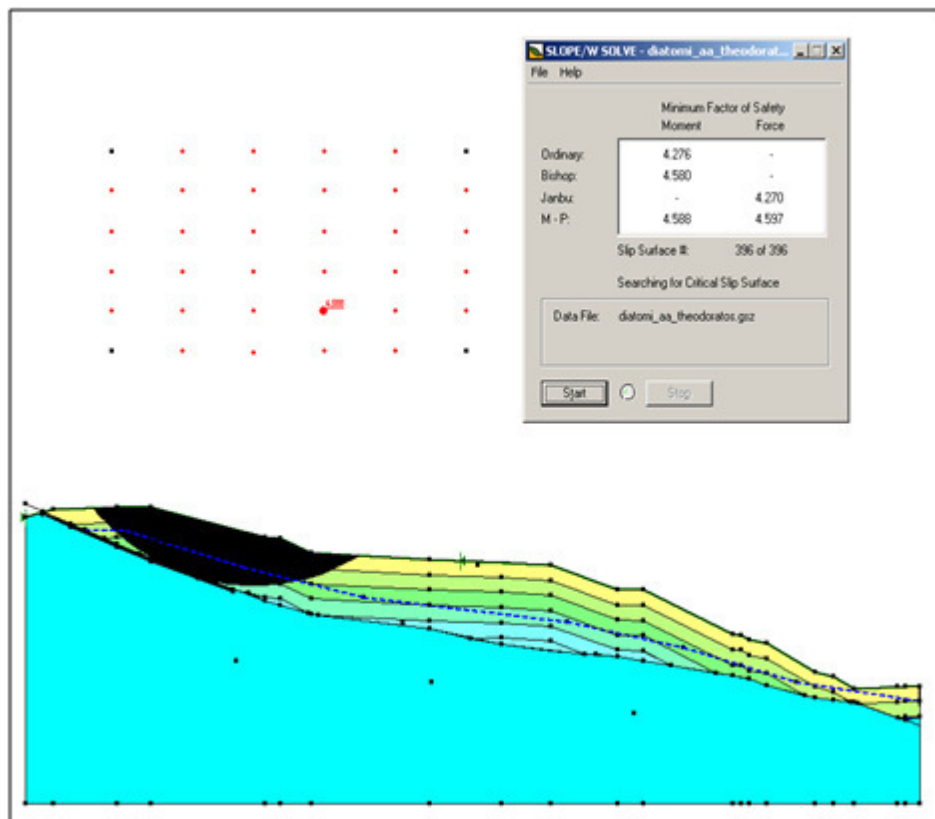
4.1 Εύρεση δυσμενέστερης θέσης του πρανούς

Αρχικά, πρέπει να βρεθεί η κρίσιμη θέση στο οποίο θα γίνει η ανάλυση. Αναμένεται, η περιοχή αυτή να είναι, εκεί όπου υπάρχει η πιο απότομη κλίση. Ορίστηκε ύψος πιεζομετρικής γραμμής 5-10m, το οποίο κρατήθηκε σταθερό καθ' όλη την πορεία των υπολογισμών, για να μπορεί να γίνει σύγκριση των επιμέρους αποτελεσμάτων, ειδικό βάρος, όπως αυτό υπολογίστηκε προηγουμένως, συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής, 18kPa και 33°, αντίστοιχα. Η σεισμική επιτάχυνση ορίστηκε ίση με 0,24g (g επιτάχυνση της βαρύτητας). Η ανάλυση έλαβε χώρα σε τρεις διαφορετικές περιοχές και για τις δύο διατομές, τόσο για σεισμική δράση, όσο και με απουσία σεισμού.

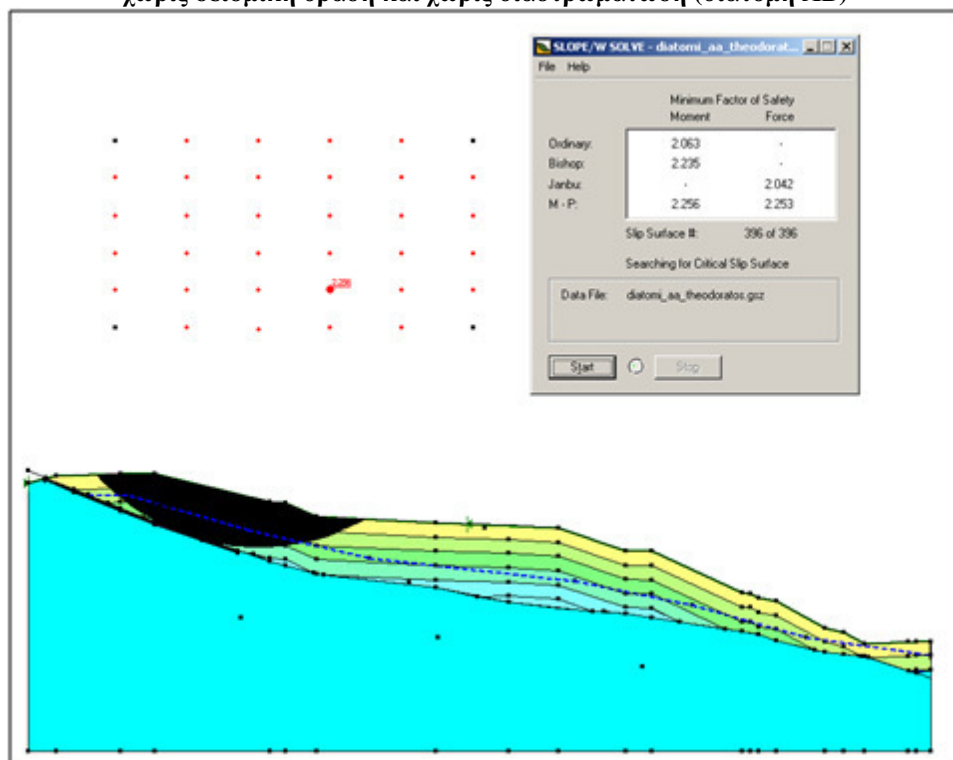
Στις Εικόνες 35 έως 40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών, δηλαδή οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας με τις διάφορες μεθόδους (παράθυρο διαλόγου), αλλά και η αντίστοιχη επιφάνεια αστοχίας (χρωματισμένη περιοχή). Υπολογίστηκαν οι συντελεστές ασφαλείας και οι επιφάνειες αστοχίας για τρία πιθανά σενάρια, σε ισάριθμα τμήματα του πρανούς (ανώτερο, μέσο, κατώτερο), χωρίς διαστρωμάτωση, για τη διατομή AB.

Στον Πίνακα 14 συνοψίζονται οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας, που προέκυψαν από τους παραπάνω υπολογισμούς, για όλα τα σημεία στα οποία έγιναν έλεγχοι (κατώτερο, μέσο, ανώτερο) για τη διατομή AB. Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας προέκυψε από τη μέθοδο Janbu, παρόλο που και οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδίδουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο, δυσμενέστερο σενάριο παρατηρείται στο κατώτερο σημείο, καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι σημαντικά μικρότερος τόσο με σεισμική δράση, όσο και χωρίς. Παρατηρείται επιπλέον μια μείωση στον συντελεστή ασφαλείας, όταν συνυπολογίζεται η σεισμική επιτάχυνση, η οποία κυμαίνεται από 72-110%.

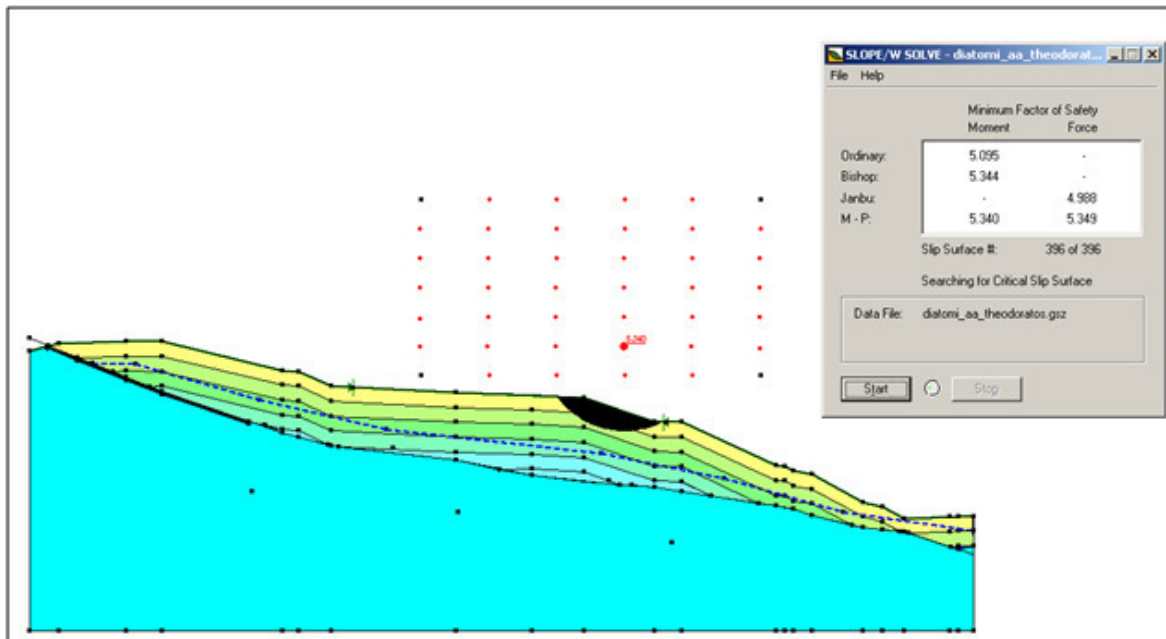
Διατομή AB



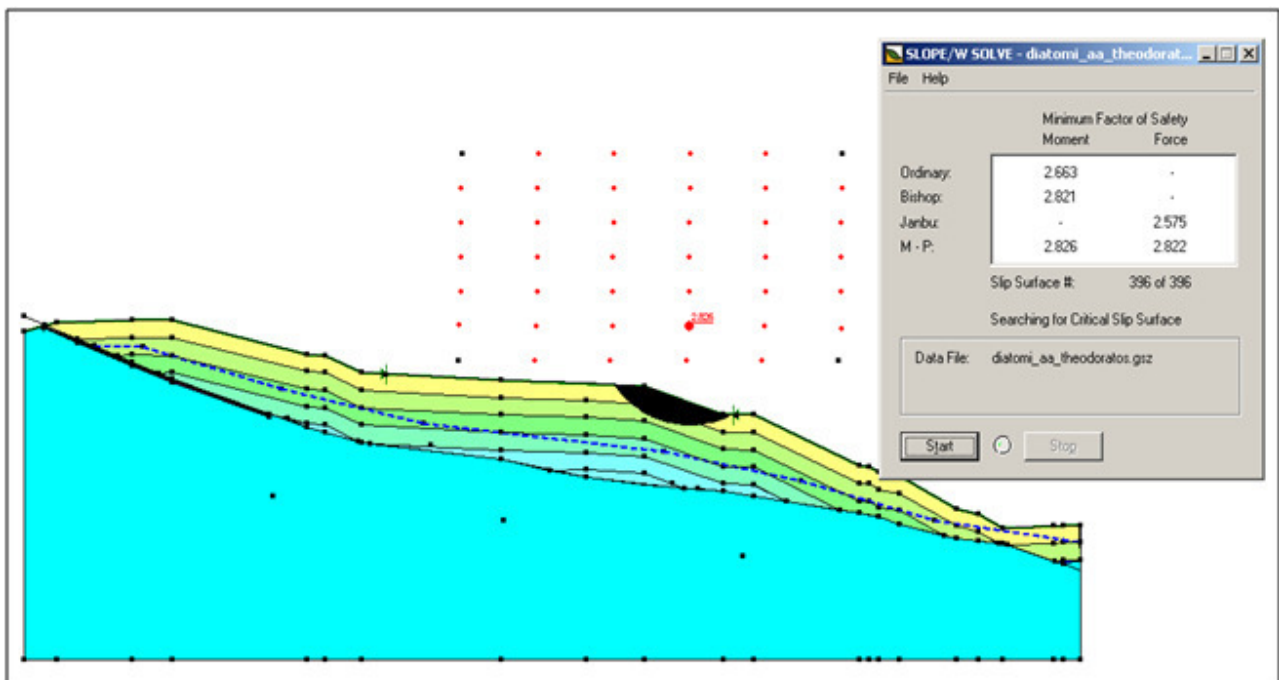
Εικόνα 35. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για ανώτερο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση και χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή AB)



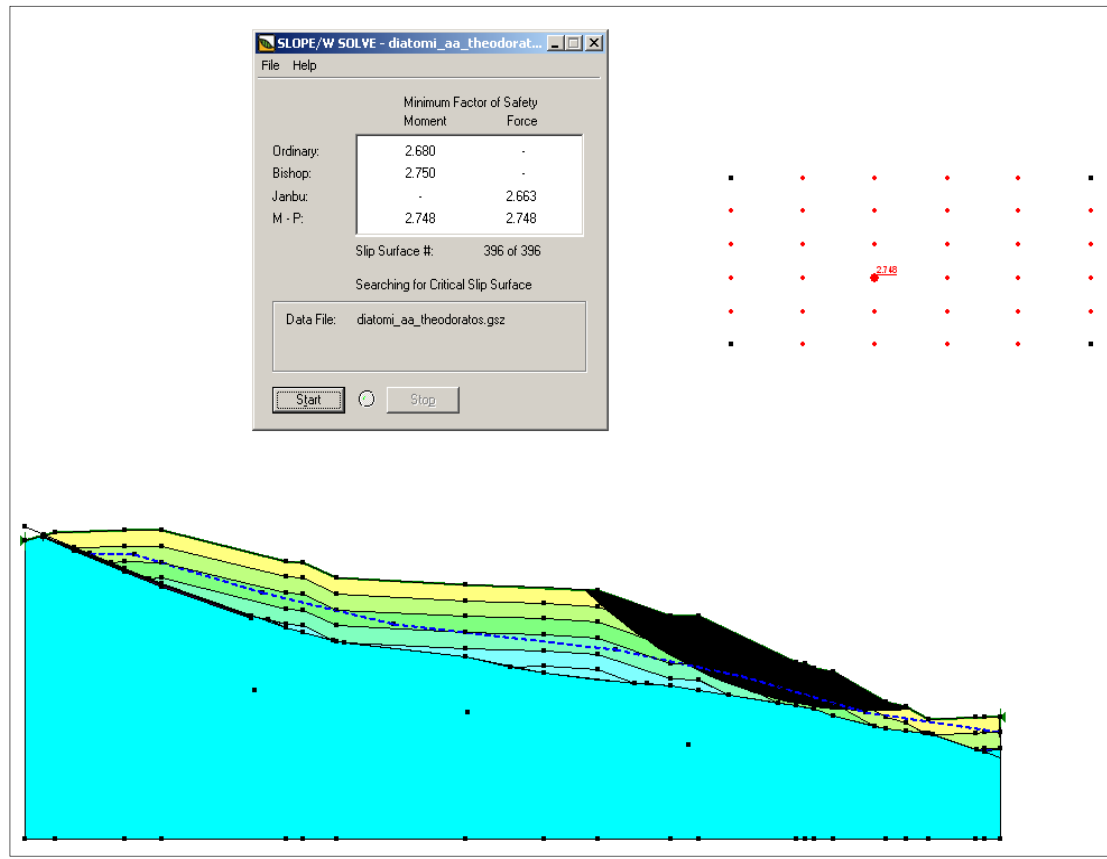
Εικόνα 36. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για ανώτερο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή AB)



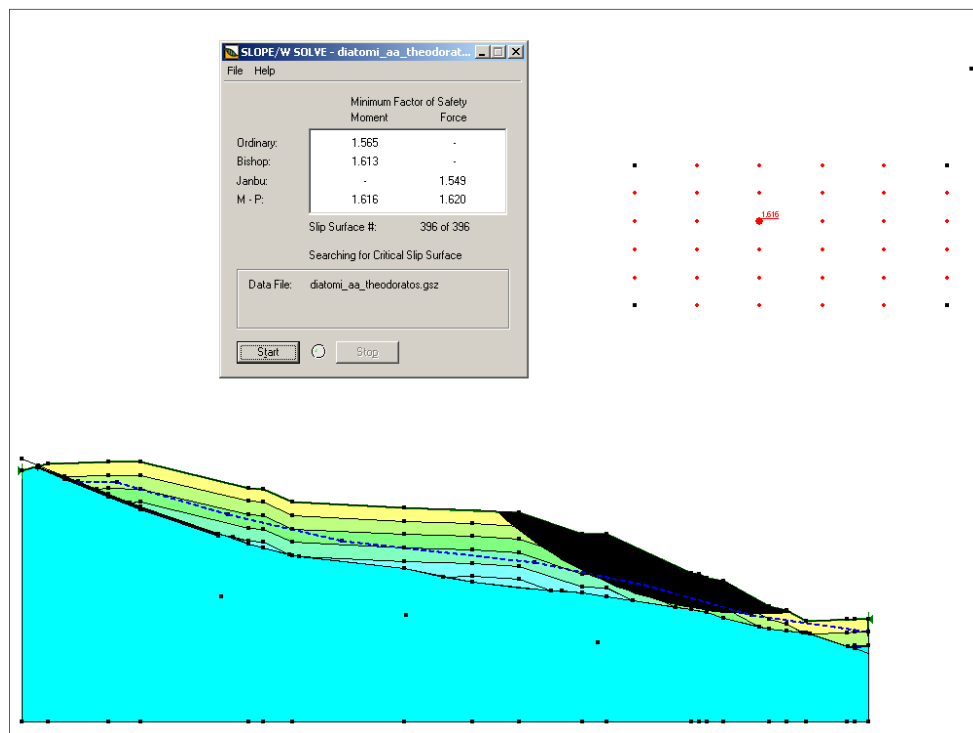
Εικόνα 37. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για μέσο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή AB)



Εικόνα 38. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για μέσο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή AB)



Εικόνα 39. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για κατώτερο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή AB)



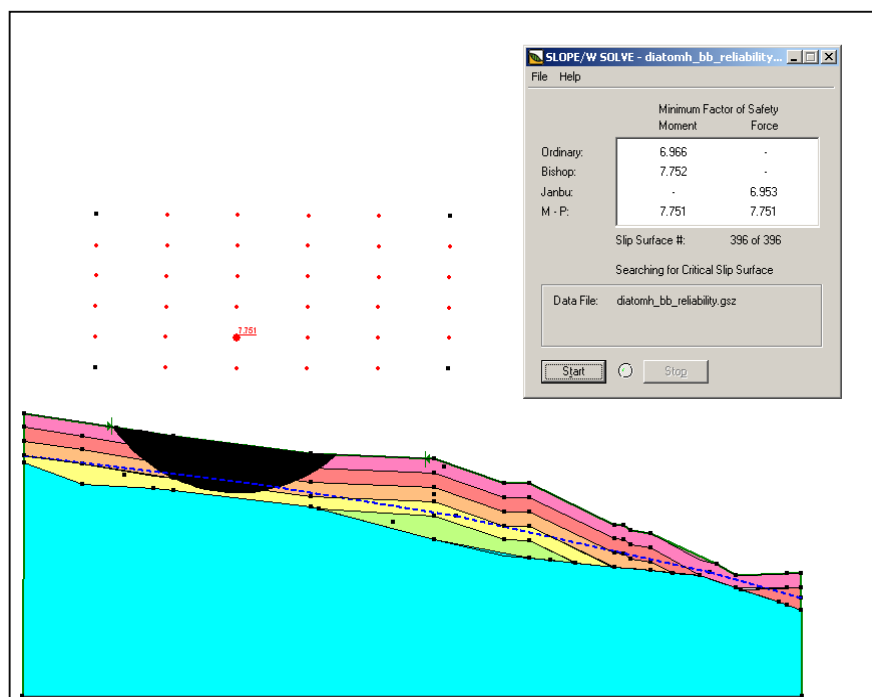
Εικόνα 40. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για κατώτερο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή AB)

Πίνακας 14. Συνοπτικός πίνακας ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας, που προέκυψαν κατά την διερεύνηση του δυσμενέστερου σημείου του εδαφικού προφίλ, για την διατομή AB

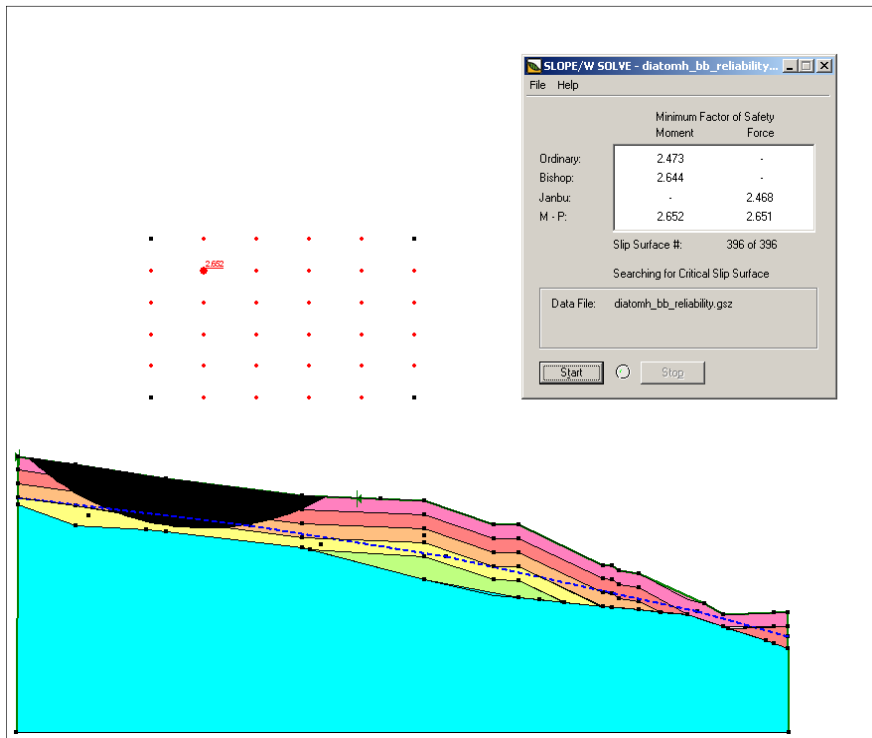
| Διατομή AB | | Χωρίς σεισμό | Με σεισμό |
|------------|----------------|--------------|-----------|
| FOS | Ανώτερο τμήμα | 4,27 | 2,04 |
| | Μέσο τμήμα | 4,99 | 2,58 |
| | Κατώτερο τμήμα | 2,66 | 1,55 |

Διατομή ΓΒ

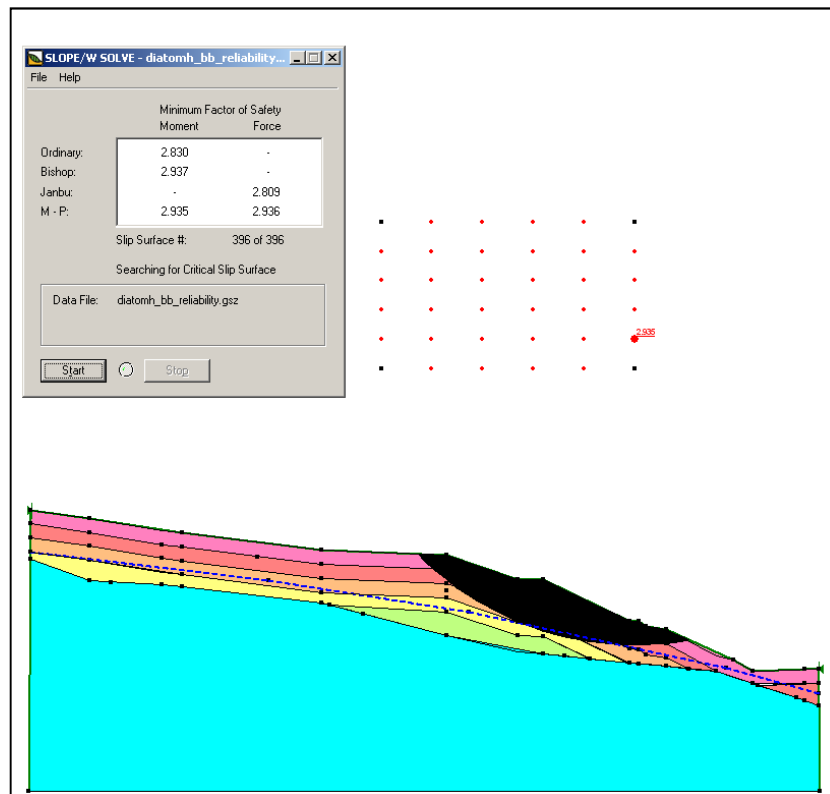
Στις Εικόνες 41 έως 46 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών, δηλαδή οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας με τις διάφορες μεθόδους (παράθυρο διαλόγου), αλλά και η αντίστοιχη επιφάνεια αστοχίας (χρωματισμένη περιοχή). Υπολογίστηκαν οι συντελεστές ασφαλείας και οι επιφάνειες αστοχίας για τρία πιθανά σενάρια, σε ισάριθμα τμήματα του πρανούς (ανώτερο, μέσο, κατώτερο), χωρίς διαστρωμάτωση, για τη διατομή AB.



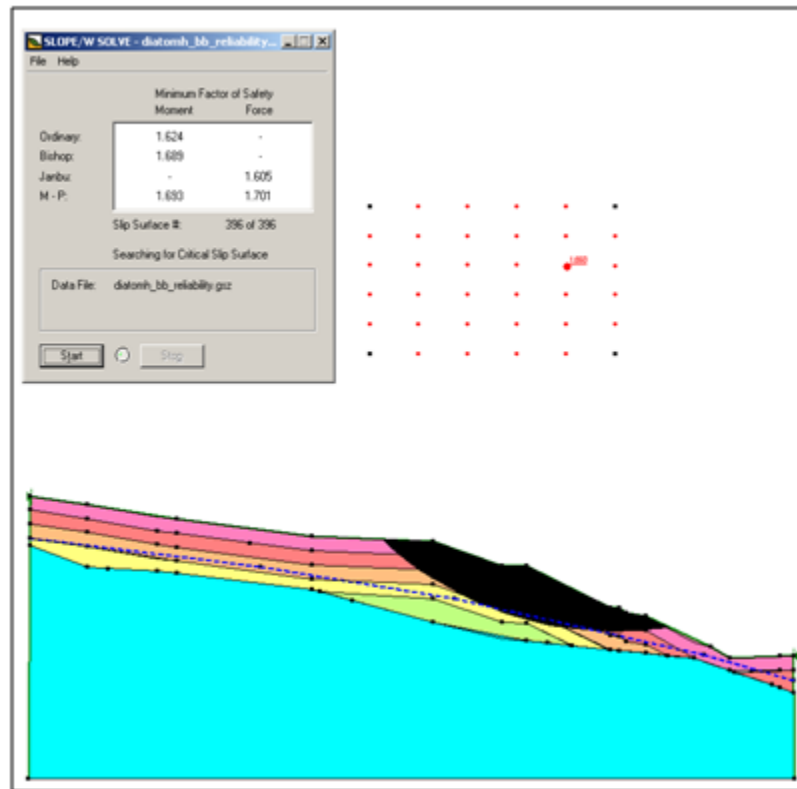
Εικόνα 41. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για ανώτερο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ)



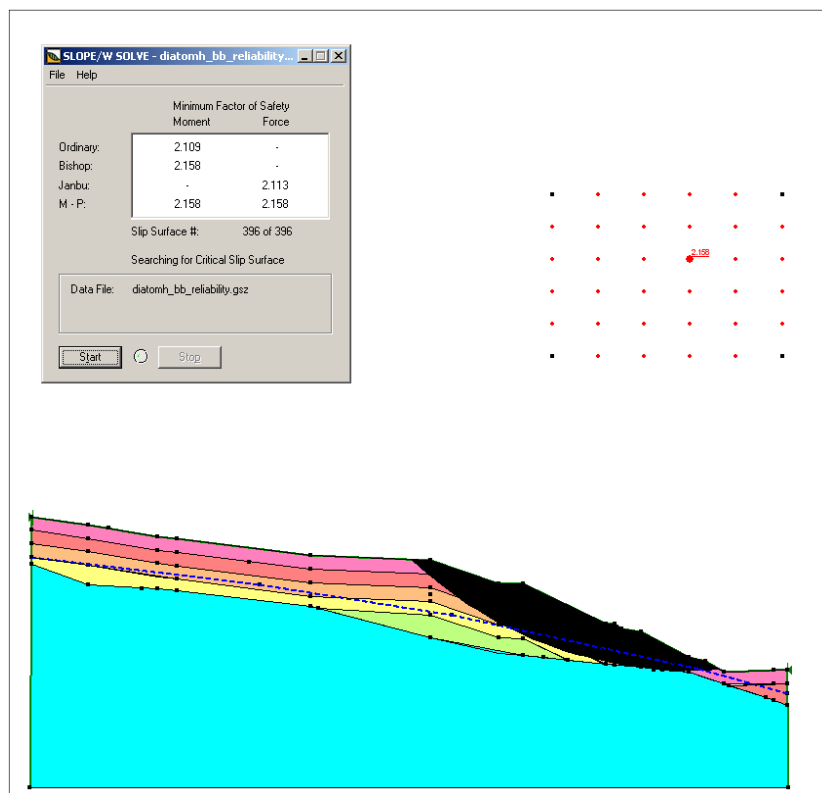
Εικόνα 42. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για ανώτερο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ)



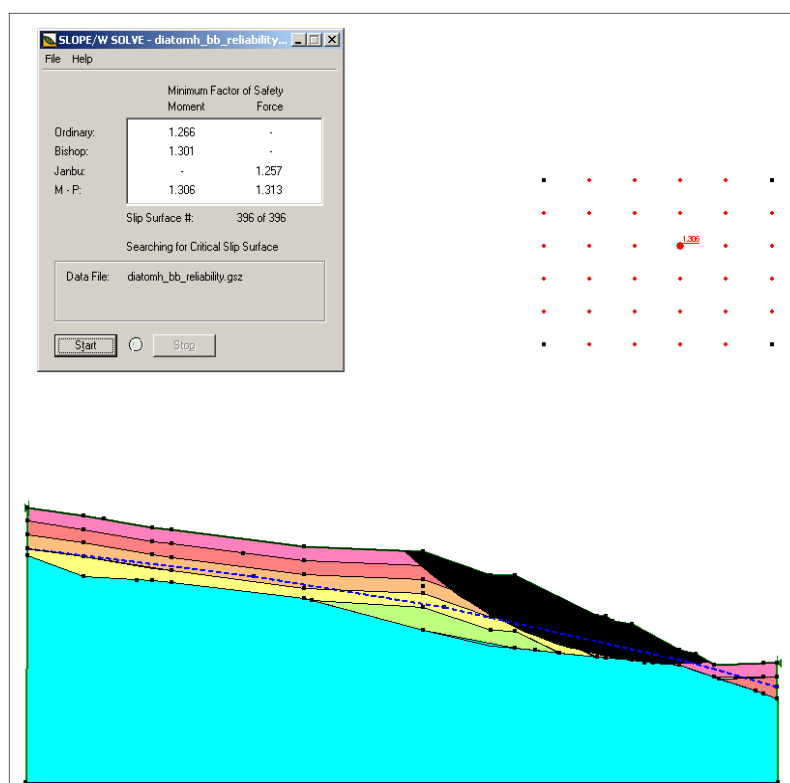
Εικόνα 43. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για μέσο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ)



Εικόνα 44. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για μέσο τμήμα του πρανούς, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ)



Εικόνα 45. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για κατώτερο τμήμα του πρανούς, χωρίς σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ)



Εικόνα 46. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας, για κατώτερο τμήμα του πρανού, με σεισμική δράση, χωρίς διαστρωμάτωση (διατομή ΓΒ)

Στον Πίνακα 15 συνοψίζονται οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας, που προέκυψαν από τους παραπάνω υπολογισμούς, για όλα τα σημεία στα οποία έγιναν έλεγχοι (κατώτερο, μέσο, ανώτερο) για τη διατομή ΓΒ. Οι υπολογισμοί έγιναν τόσο με σεισμική δράση, όσο και χωρίς σεισμική δράση και σε αυτήν τη διατομή και δυσμενέστερο σενάριο βρέθηκε στο κατώτερο σημείο, καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι σημαντικά μικρότερος.

Πίνακας 15. Συνοπτικός πίνακας ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας, που προέκυψαν κατά την διερεύνηση του δυσμενέστερου σημείου του εδαφικού προφίλ, για την διατομή ΓΒ

| Διατομή ΓΒ | | Χωρίς σεισμό | Με σεισμό |
|------------|----------------|--------------|-----------|
| FOS | Ανώτερο τμήμα | 6,95 | 2,47 |
| | Μέσο τμήμα | 2,81 | 1,61 |
| | Κατώτερο τμήμα | 2,11 | 1,26 |

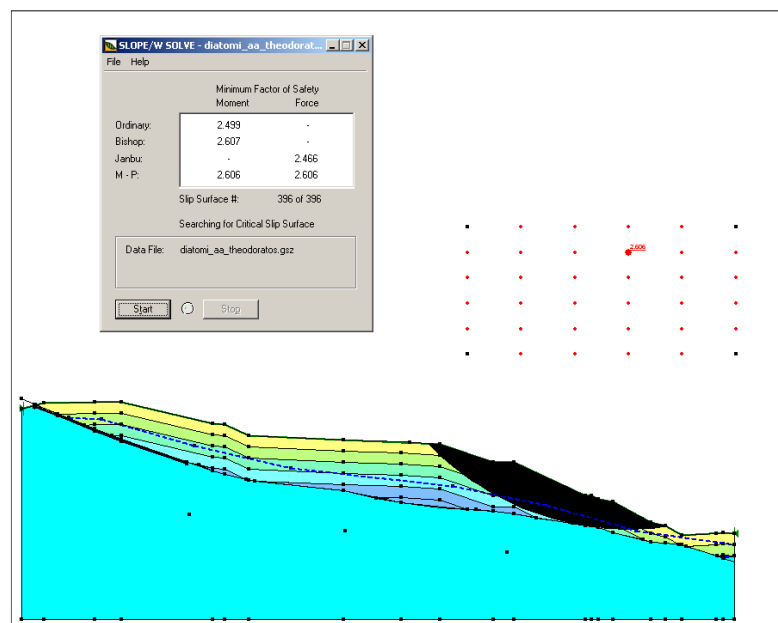
4.2 Διαστρωμάτωση ανά 10m

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας, με τις τιμές του c και του ϕ να μεταβάλλονται κάθε 10m. Οι τιμές αυτές δίνονται στον Πίνακα 16. Στις εικόνες 47 έως 50 φαίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών στο κρίσιμο σημείο του πρανούς, με πάχος κάθε στρώσης 10m., για τις διατομές AB και ΓΒ.

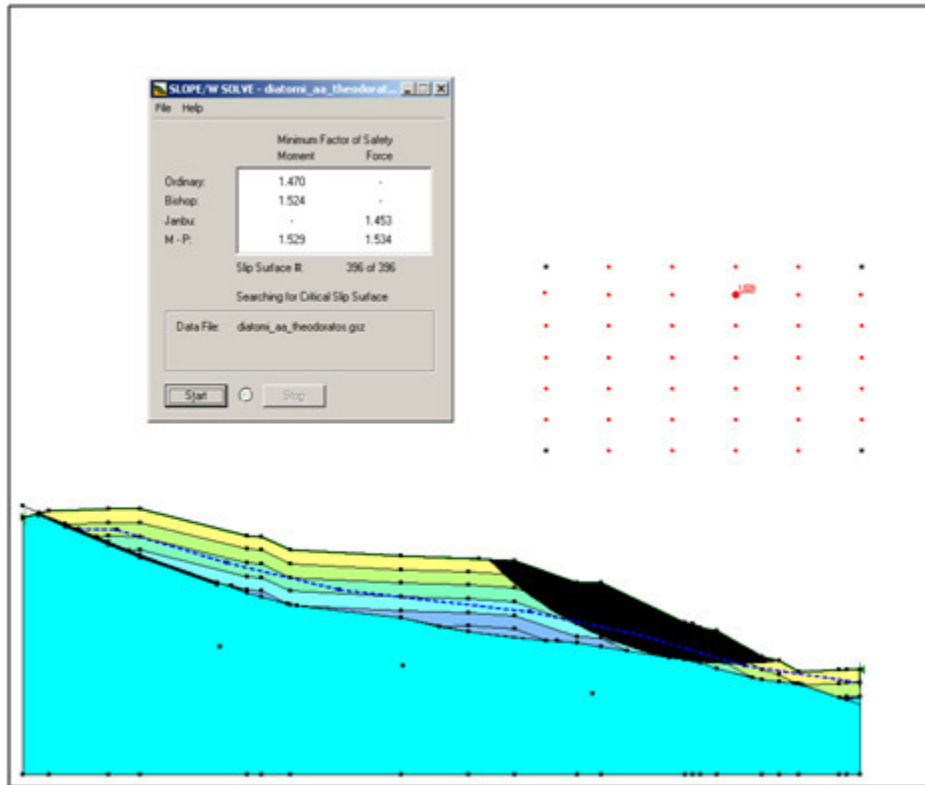
Πίνακας 16. Τιμές μηχανικών ιδιοτήτων ανά στρώση

| Στρώση | Βάθος (m) | Ειδικό βάρος (kN/m ³) | Συνοχή (kPa) | Γωνία εσ. τριβής (^ο) |
|--------|--------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| 1 | 0-5 | 6,51 | 18 | 33 |
| 2 | 5-10 | 7,47 | 18 | 33 |
| 3 | 10-15 | 8,07 | 20 | 30 |
| 4 | 15-20 | 8,49 | 20 | 30 |
| 5 | 20-30 | 8,80 | 22 | 27 |
| 6 | 25-30 | 9,04 | 22 | 27 |

Διατομή AB

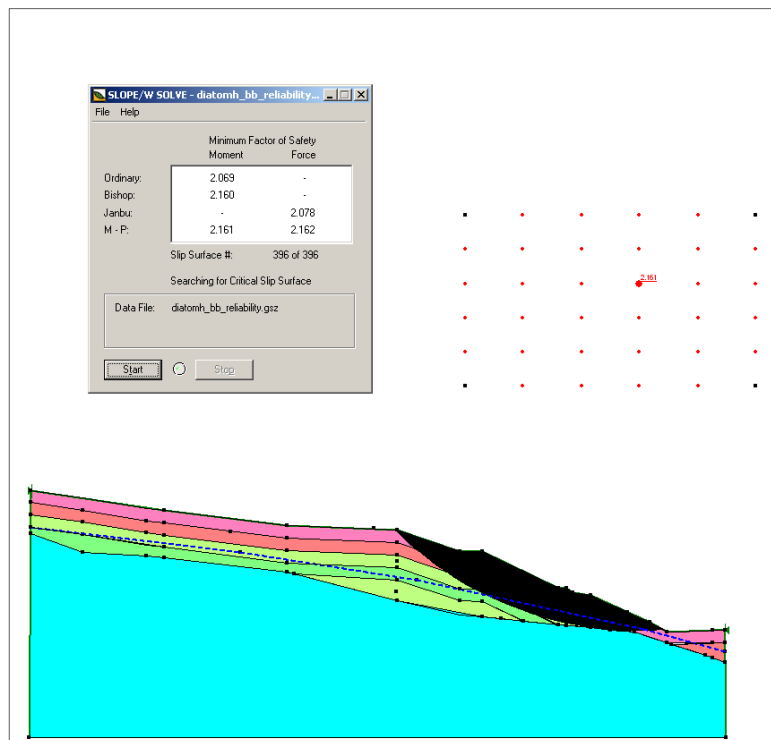


Εικόνα 47. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφαλείας χωρίς σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 10m (διατομή AB)

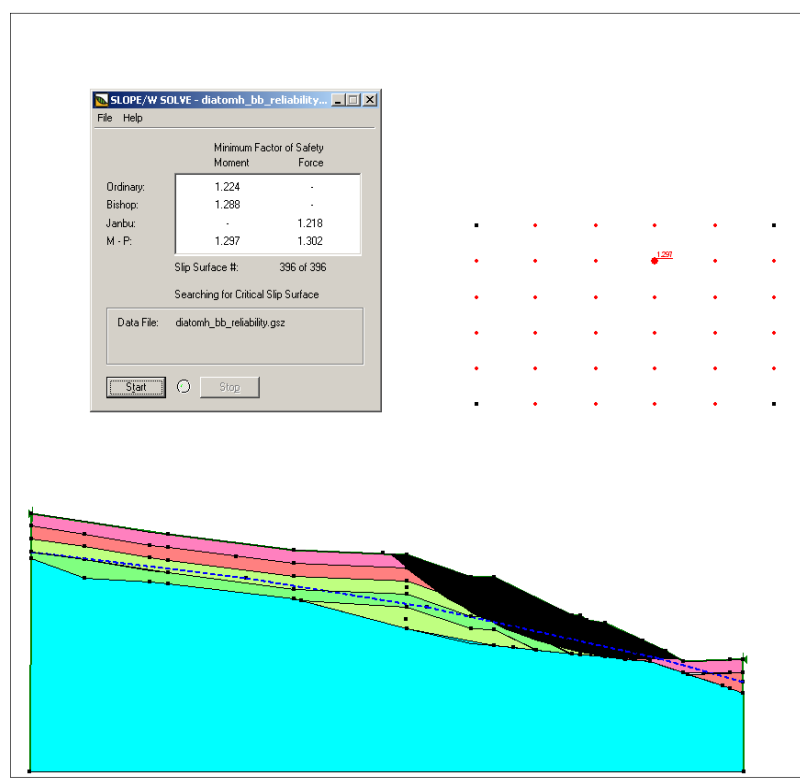


Εικόνα 48. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας με σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 10m (διατομή AB)

Διατομή ΓΒ



Εικόνα 49. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας χωρίς σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 10m (διατομή ΓΒ)



Εικόνα 50. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας με σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 10m (διατομή ΓΒ)

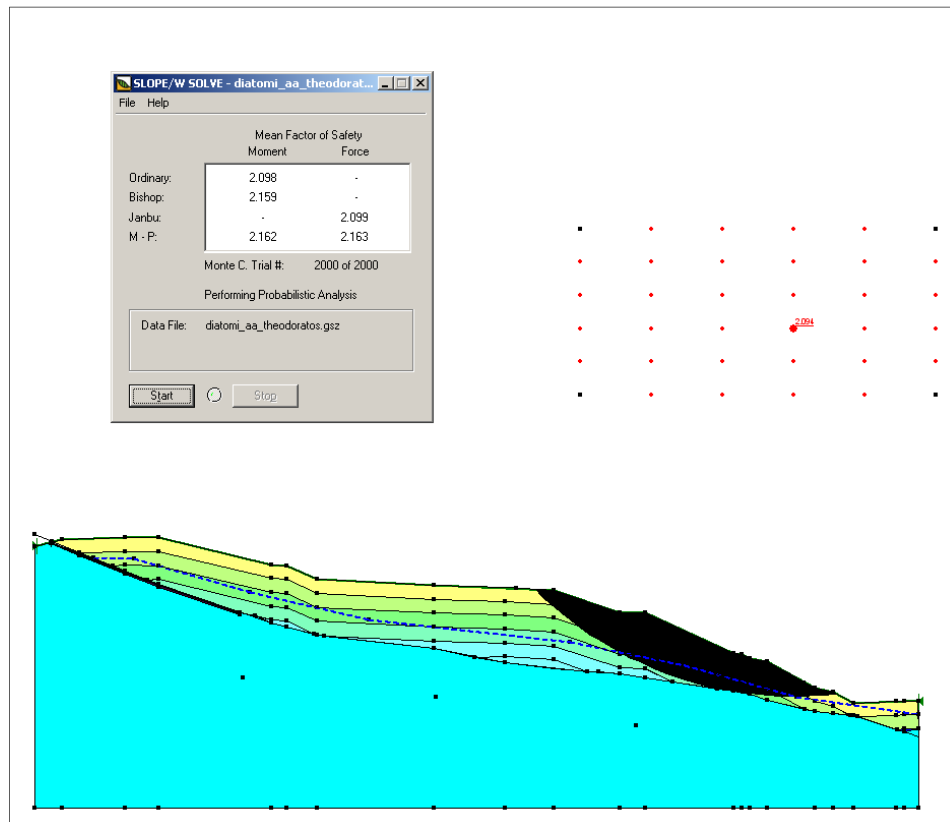
Πίνακας 17. Συνοπτικός πίνακας ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας, ανά διατομή για ύψος στρώσης 10m

| Διατομή | | Χωρίς σεισμό | Με σεισμό |
|---------|-----|--------------|-----------|
| ΑΒ | FOS | 2,47 | 1,45 |
| ΓΒ | | 2,08 | 1,22 |

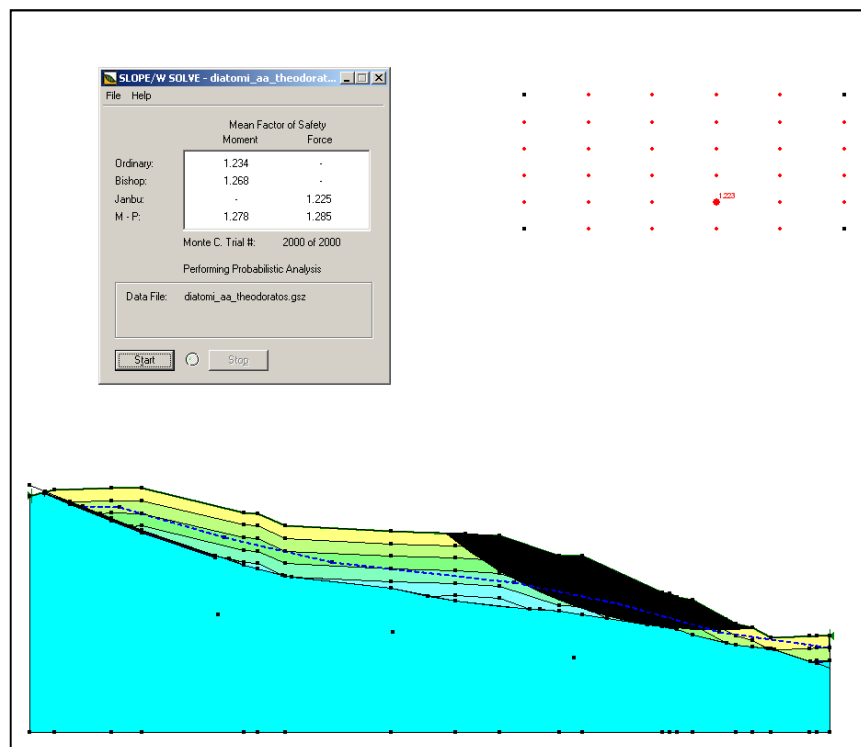
4.3 Διαστρωμάτωση ανά 5m

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας με διαστρωμάτωση ανά 5m. Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 13. Τα σχετικά αποτελέσματα και για τις δύο διατομές απεικονίζονται 51 έως 54, ενώ οι αντίστοιχοι ΣΑ δίνονται στον Πίνακα 18.

Διατομή AB

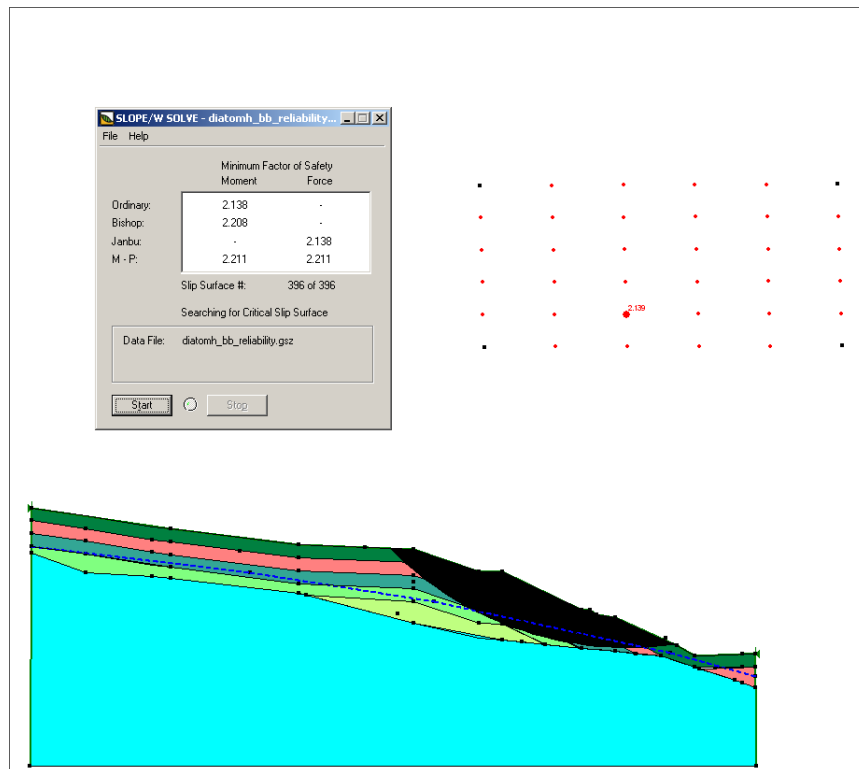


Εικόνα 51. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας χωρίς σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 5m (διατομή AB)

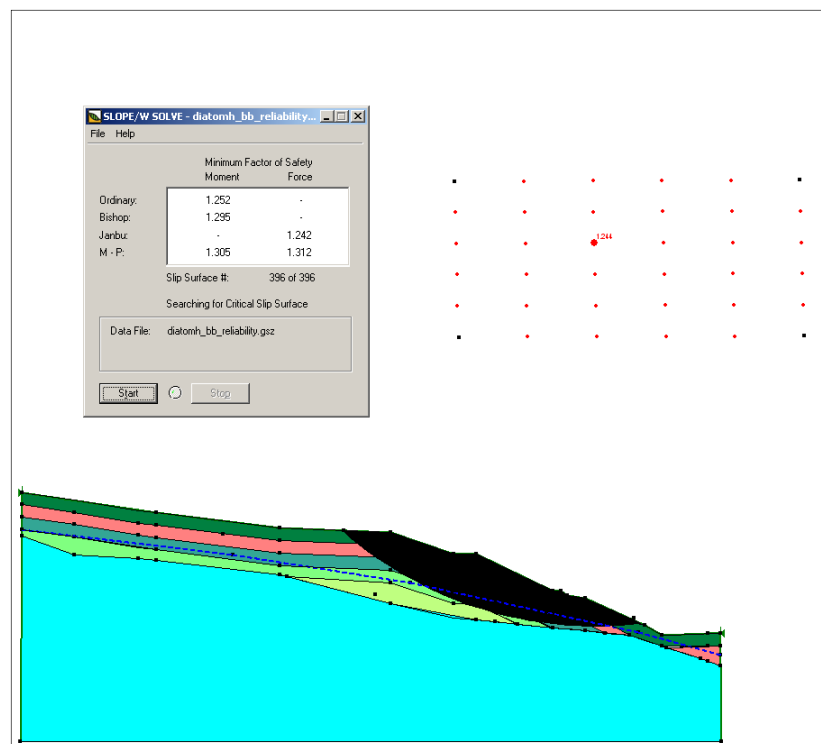


Εικόνα 52. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας με σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 5m (διατομή AB)

Διατομή ΓΒ



Εικόνα 53. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας χωρίς σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 5m (διατομή ΓΒ)



Εικόνα 54. Επιφάνεια αστοχίας και συντελεστές ασφάλειας με σεισμική δράση, με διαστρωμάτωση ανά 5m (διατομή ΓΒ)

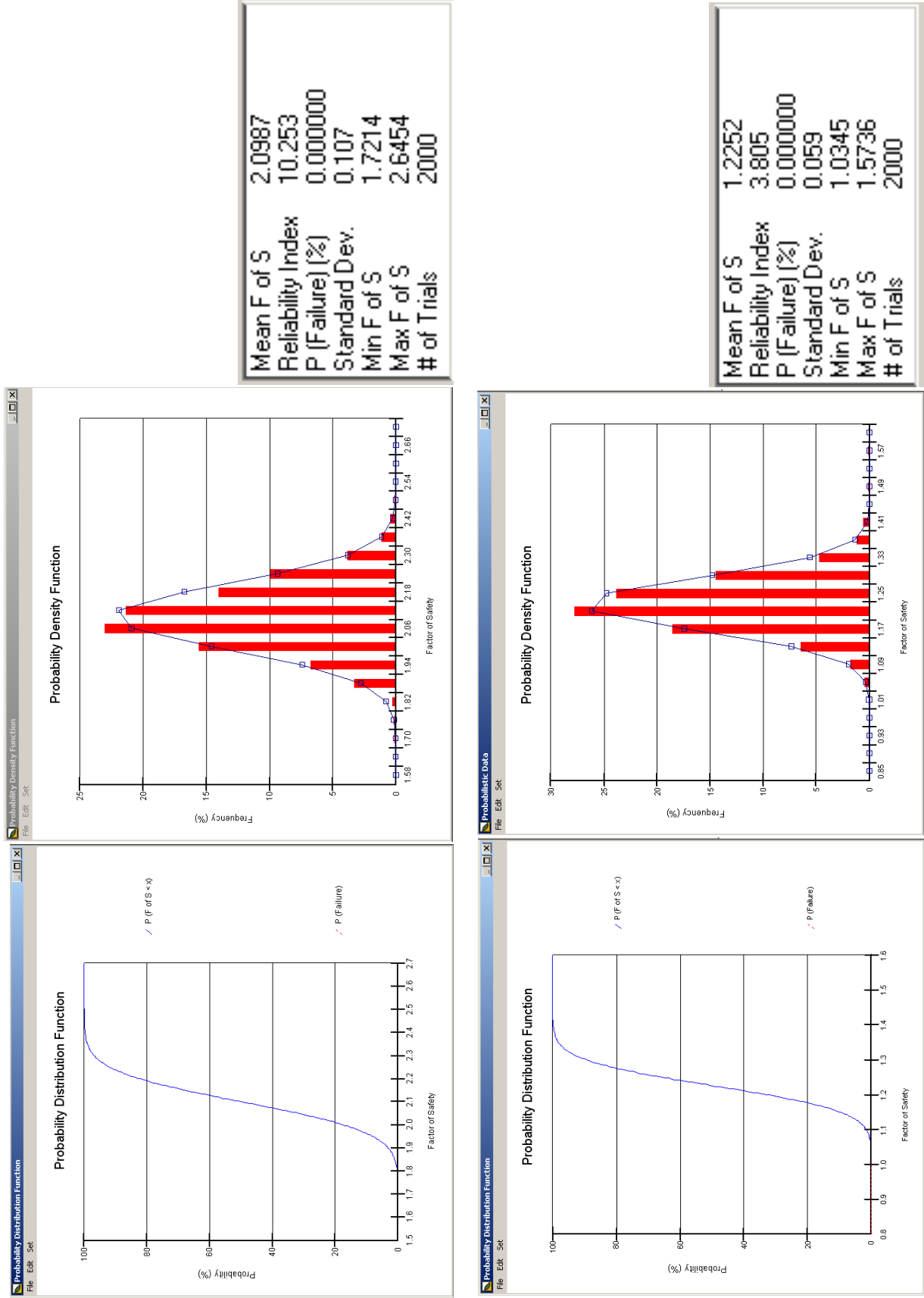
Πίνακας 18. Συνοπτικός πίνακας ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας, ανά διατομή για ύψος στρώσης 5m

| Διατομή | | Χωρίς σεισμό | Με σεισμό |
|---------|-----|--------------|-----------|
| AB | FOS | 2,10 | 1,23 |
| ΓΒ | | 2,14 | 1,24 |

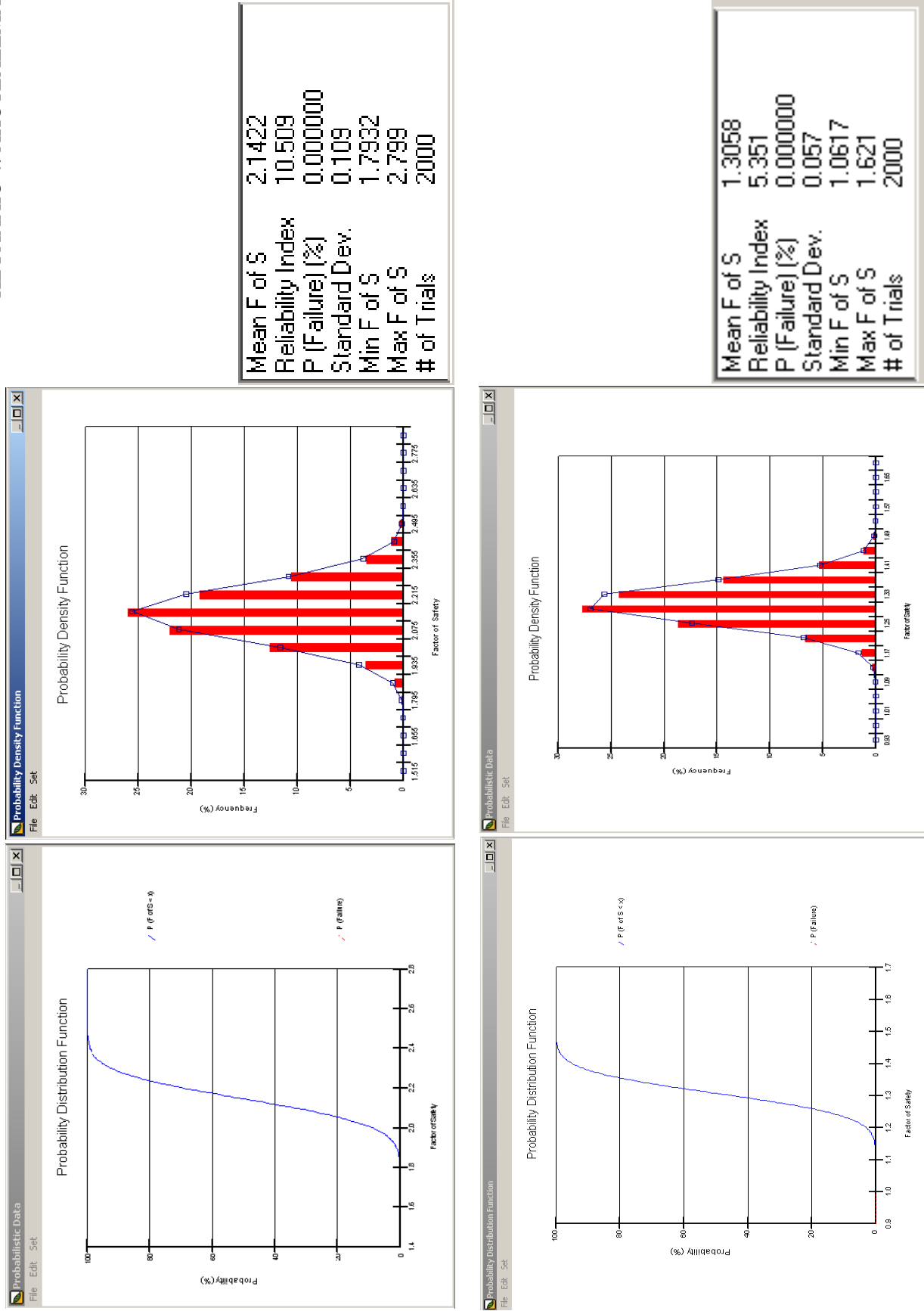
4.4 Στατιστική ανάλυση

Στις παραπάνω περιπτώσεις εισήχθησαν στατιστικές παράμετροι για τη διεξαγωγή στατιστικής ανάλυσης. Για τη συνοχή και για τη γωνία εσωτερικής τριβής, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις στρώσεις στη ντετερμινιστική ανάλυση θεωρήθηκαν ως οι μέσες τιμές. Οι τιμές της συνοχής ακολουθούν τη λογαριθμική κατανομή, ενώ οι αντίστοιχες της εσωτερικής τριβής ακολουθούν την κανονική κατανομή, (Jahanfar, 2014). Ως τυπικές αποκλίσεις ορίστηκαν οι τιμές 2 και 4, για τη ϕ και c , αντίστοιχα

Στις εικόνες 55 και 56 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης τα οποία περιλαμβάνουν, διαγράμματα κατανομής των συντελεστών ασφαλείας, ελάχιστο και μέγιστο συντελεστή, που υπολογίζονται με βάση τις προαναφερθείσες τιμές για τις στατιστικές παραμέτρους.



Εικόνα 55. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης για την διατομή ΑΒ, χωρίς σεισμική δράση (επάνω), και με σεισμική δράση (κάτω)



Εικόνα 56. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης για την διατομή ΓΒ, χωρίς σεισμική δράση (επάνω), και με σεισμική δράση (κάτω)

4.5 Μεταβολή ύψους πιεζομετρικής γραμμής

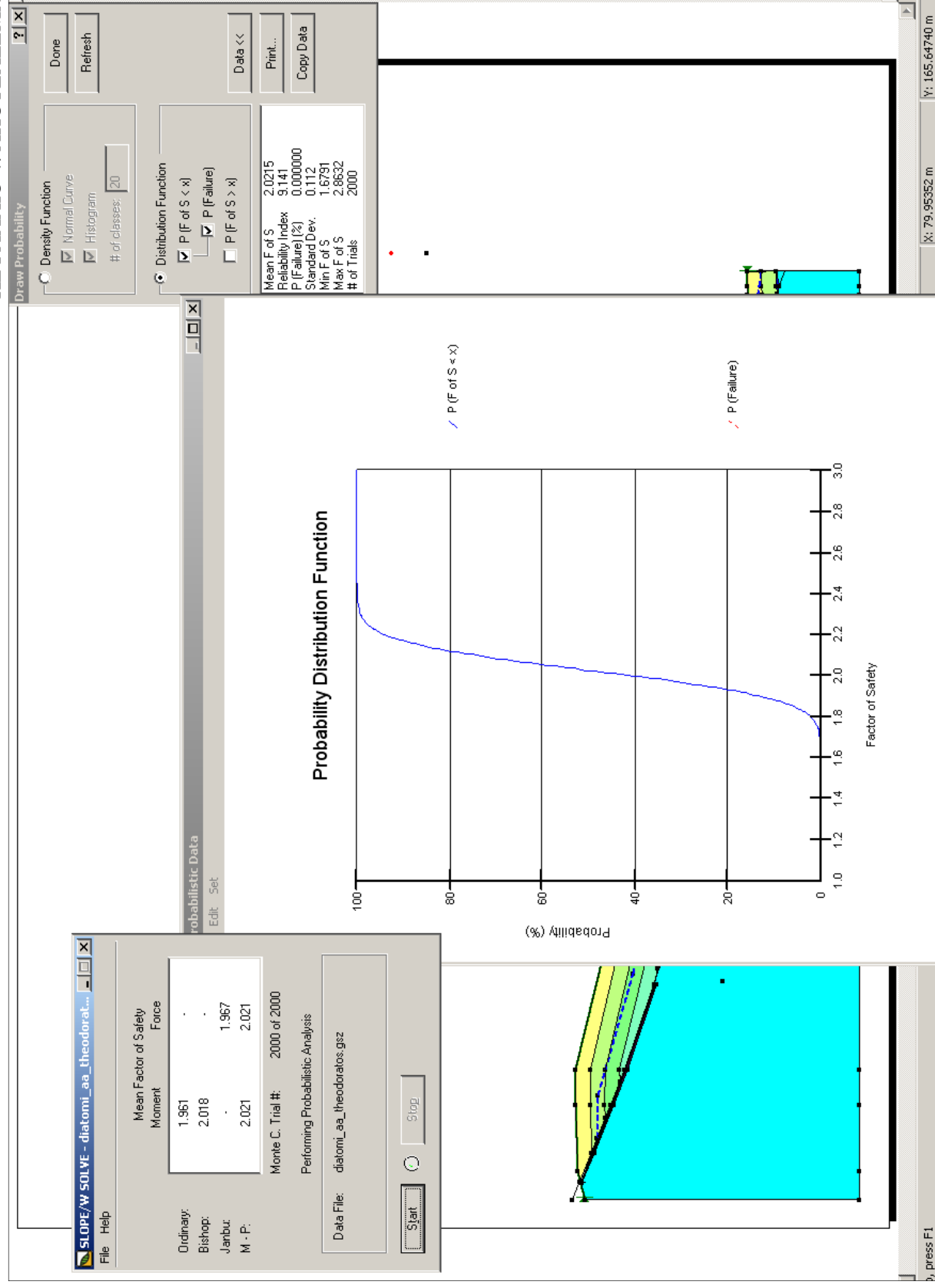
Στη συνέχεια κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί η επίδραση στον συντελεστή ασφαλείας, μιας μετατόπισης της πιεζομετρικής γραμμής. Πρόκειται για μια κρίσιμη παράμετρο, που διέπεται από αβεβαιότητα στο πεδίο. Εξετάστηκαν 2 σενάρια αύξησης του ύψους της πιεζομετρικής από το αρχικό, κατά 1 και 2m. Τα εύρη των τιμών είναι αντίστοιχα 0,5-1,5m και 1,5-2,5m, αντίστοιχα. Οπότε, το εύρος τιμών από το οποίο ελήφθησαν οι τιμές που δίνονται στον Πίνακα 19:

Πίνακας 19. Εύρος τιμών από το οποίο λαμβάνονται τιμές για τη μέθοδο ανάλυσης Monte Carlo (h)

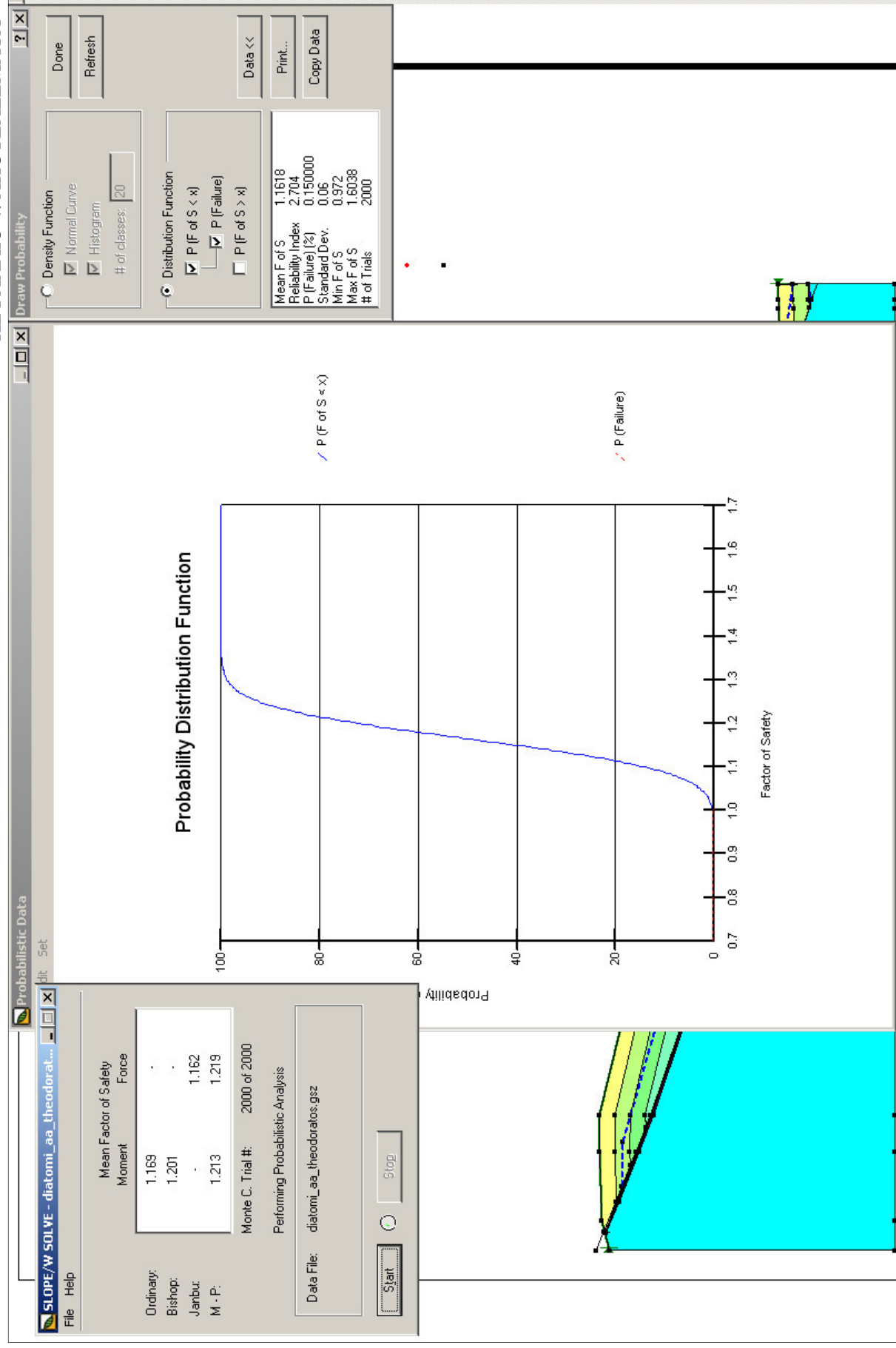
| Μετατόπιση της πιεζομετρικής γραμμής από το αρχικό (h) | Τυπική απόκλιση | Ελάχιστη τιμή | Μέγιστη τιμή |
|--|-----------------|---------------|--------------|
| 1m | 0,1 | 0,5 | 1,5 |
| 2m | 0,1 | 1,5 | 2,5 |

Στις εικόνες 57 έως 64 φαίνεται η επίδραση των μεταβολών του ύψους της πιεζομετρικής γραμμής στην τιμή του συντελεστή ασφαλείας. Από τα επιμέρους παράθυρα, που απαρτίζουν καθεμία από τις παρακάτω εικόνες, μπορούν να αντληθούν πολλές πληροφορίες, όπως:

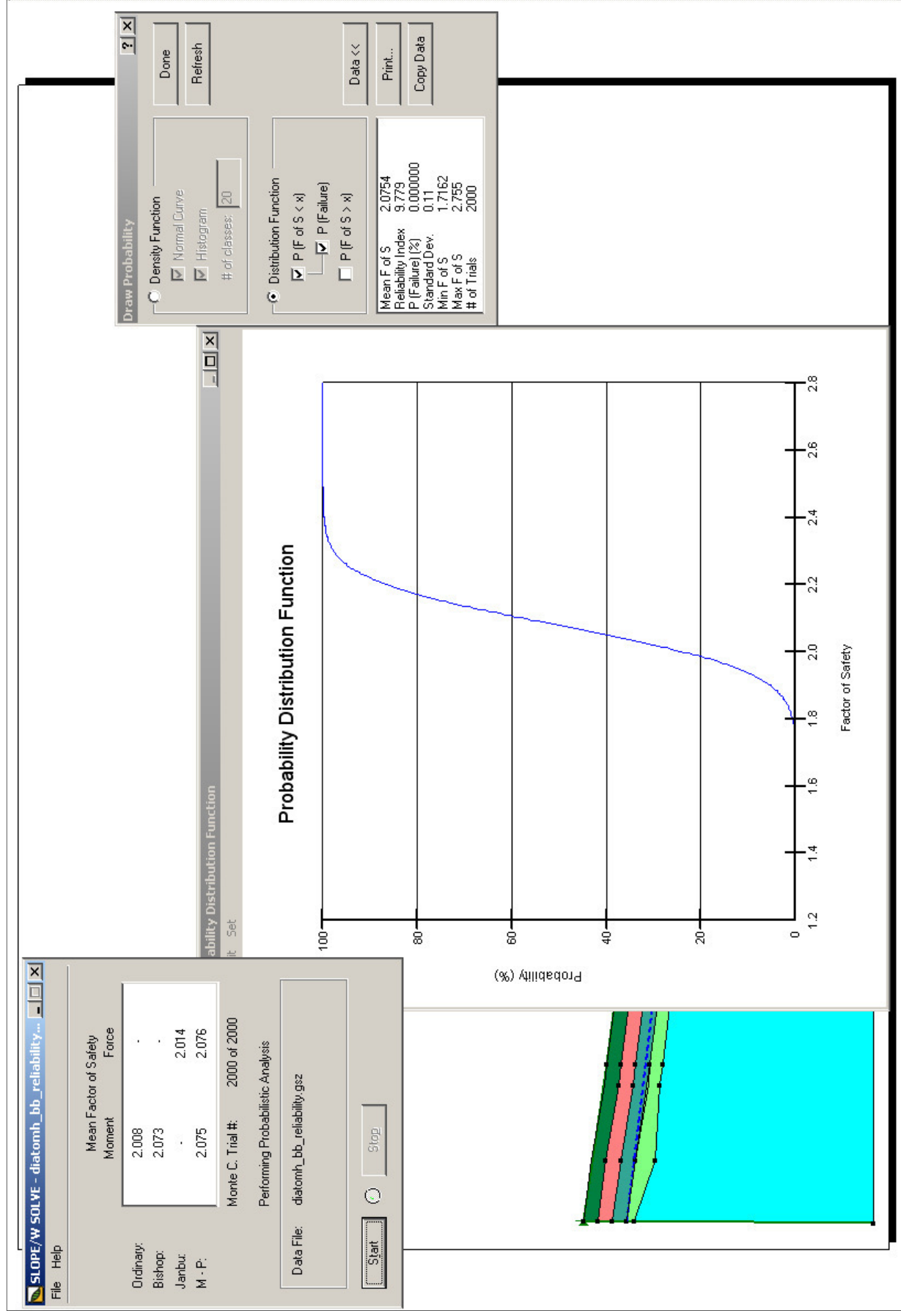
- μέση τιμή των συντελεστών ασφαλείας, όπως προκύπτουν μετά τη στατιστική ανάλυση (διάφοροι συνδυασμοί παραμέτρων)
- διάγραμμα κατανομής πιθανοτήτων εμφάνισης για κάθε τιμή του συντελεστή ασφαλείας,
- πιθανότητα αστοχίας, δείκτης εμπιστοσύνης και μέγιστη και ελάχιστη παρατηρούμενη τιμή του συντελεστή ασφαλείας, κατά τη διενέργεια του υπολογισμού.



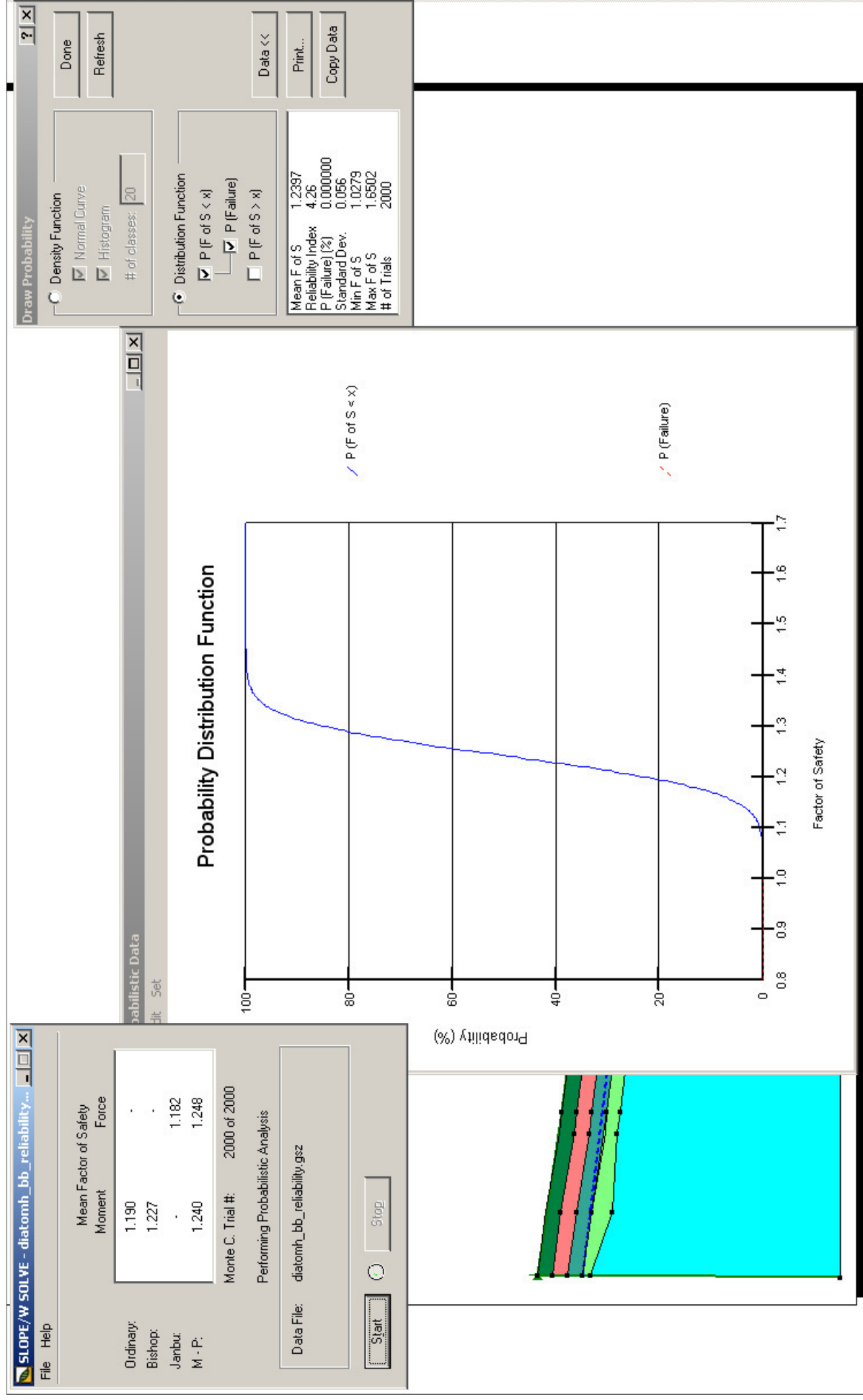
Εικόνα 57. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 1m, χωρίς σεισμική δράση, διατομή AB



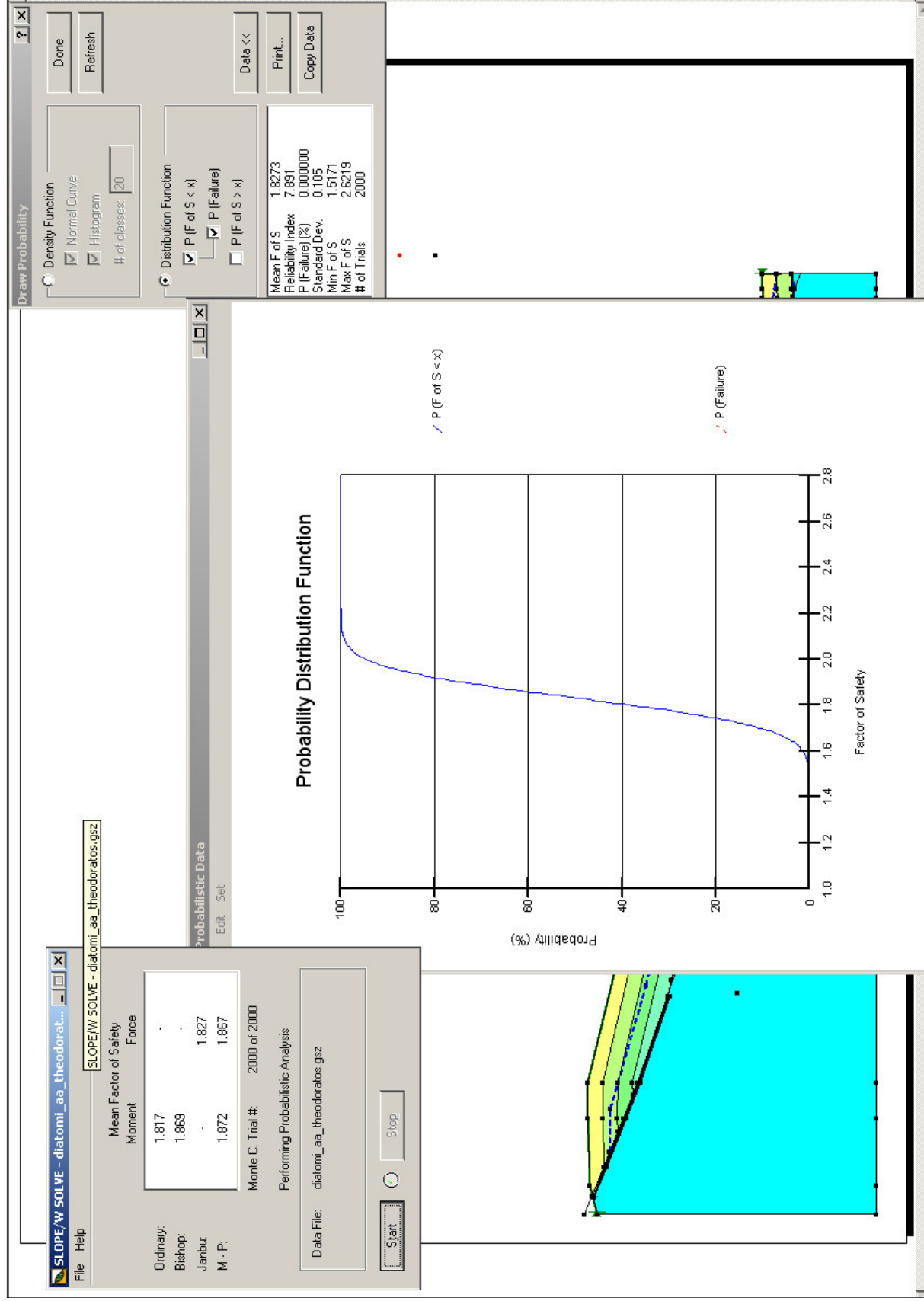
Εικόνα 58. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 1m, με σεισμική δράση, διατομή AB



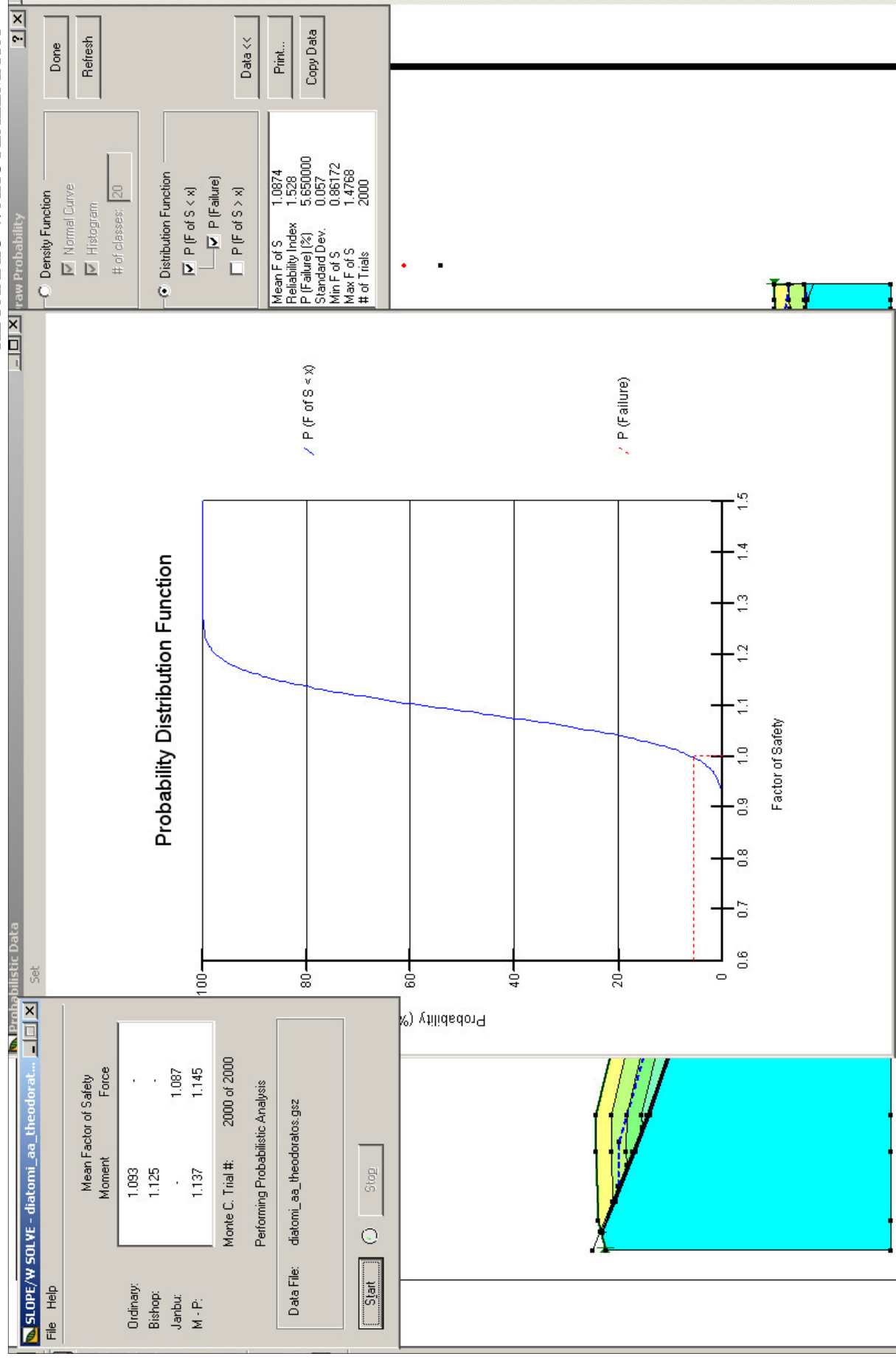
Εικόνα 59. Μεταβολή πεζομετρικής γραμμής κατά 1m, χωρίς σεισμική δράση, διατομή ΓΒ



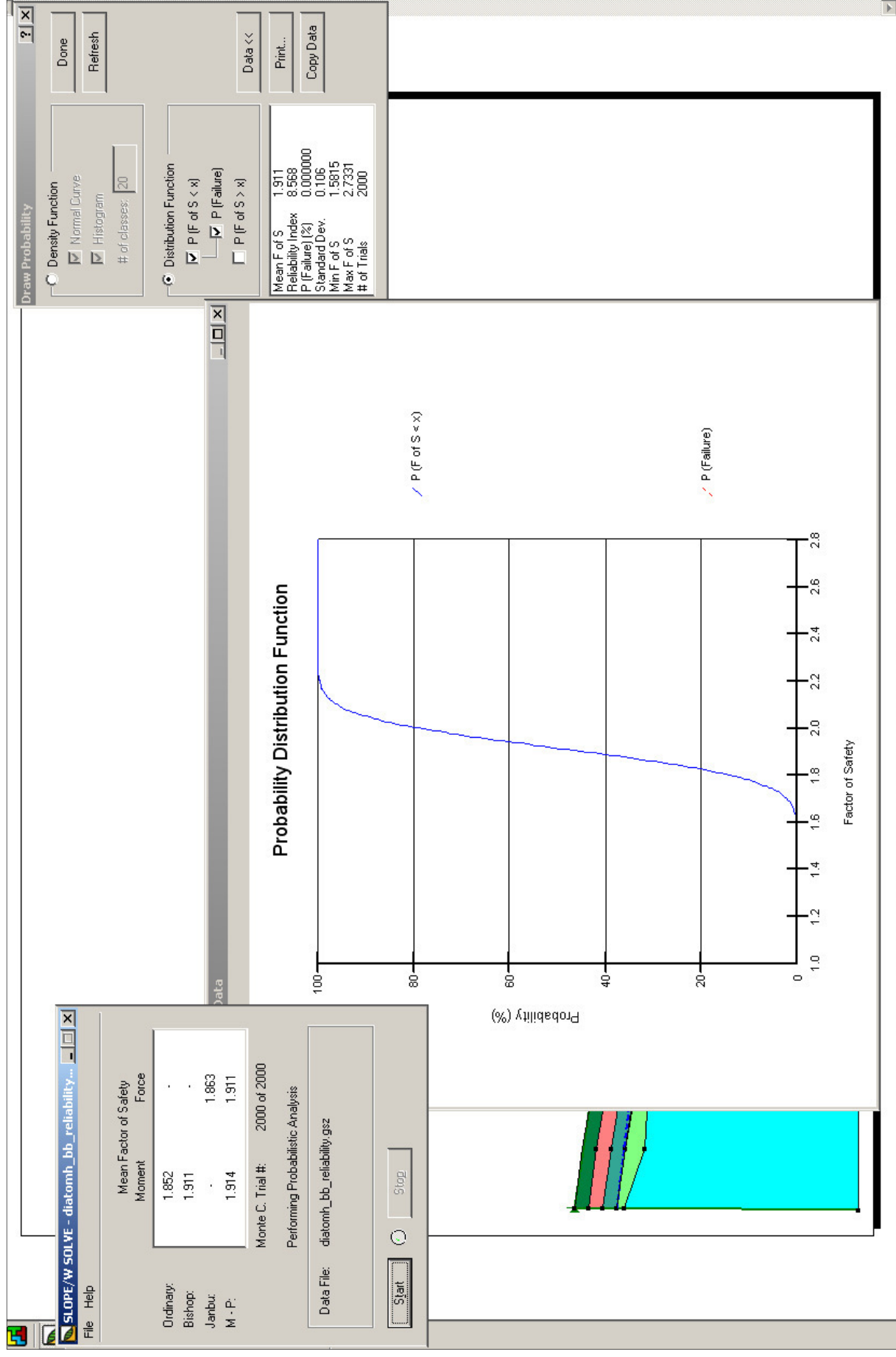
Εικόνα 60. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 1m, με σεισμική δράση, διατομή ΓΒ



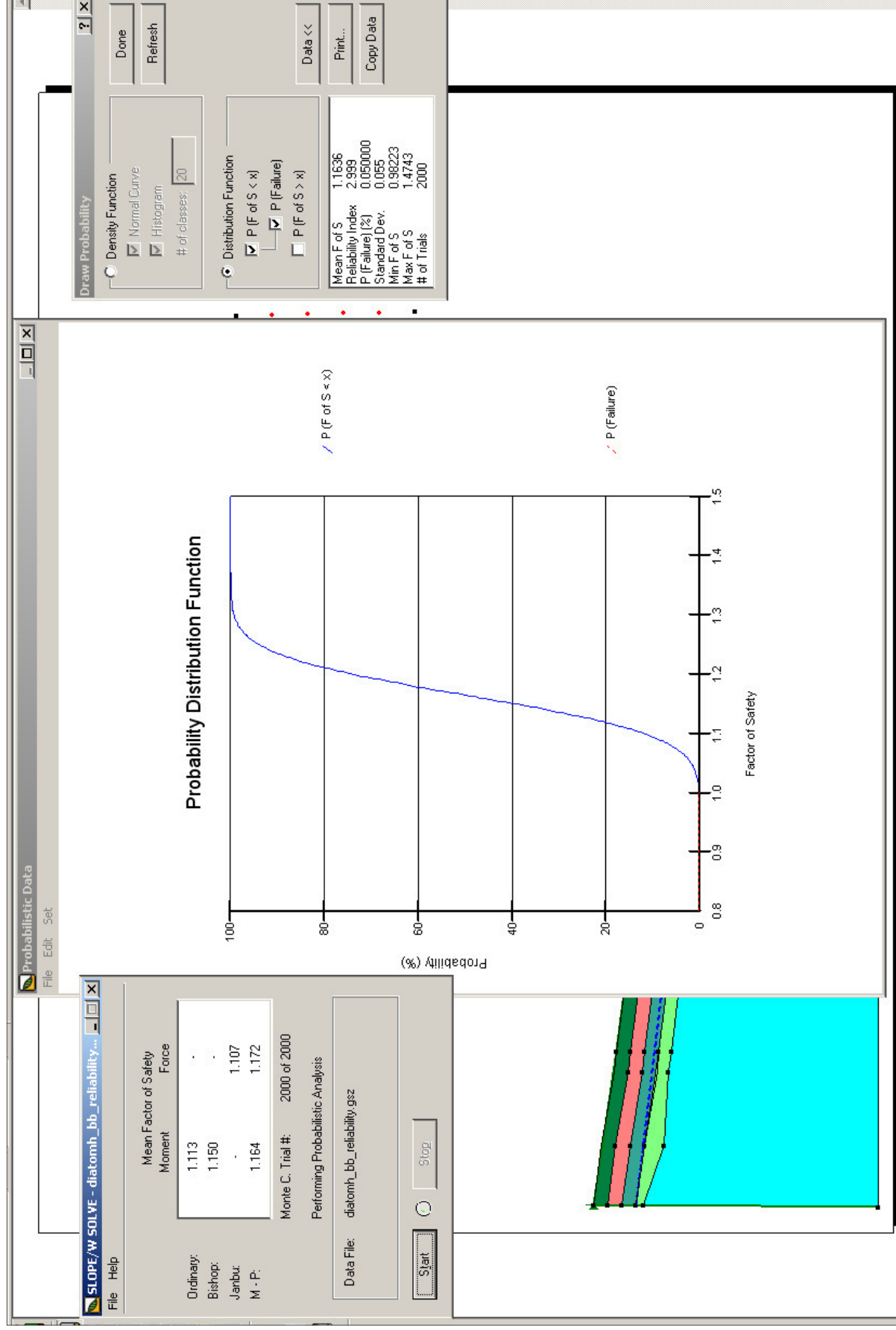
Εικόνα 61. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 2m, χωρίς σεισμική δράση, διατομή AB



Εικόνα 62. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 2m, με σεισμική δράση, διατομή AB



Εικόνα 63. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 2m, χωρίς σεισμική δράση, διατομή ΓΒ



Εικόνα 64. Μεταβολή πιεζομετρικής γραμμής κατά 2m, με σεισμική δράση, διατομή ΓΒ

Στους Πίνακες 20 και 21 παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας, συναρτήσει της μέσης μεταβολής του ύψους της πιεζομετρικής γραμμής, από την αρχική. Επισημαίνονται οι περιπτώσεις στις οποίες παρατηρήθηκαν πιθανότητες αστοχίας.

Πίνακας 20. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για διάφορες τιμές μέσης μεταβολής της πιεζομετρικής γραμμής από την αρχική, διατομή ΑΒ

| Διατομή ΑΒ | Χωρίς σεισμική δράση | | | Με σεισμική δράση | | |
|---|----------------------|-----------|--------------|-------------------|-----------|--------------|
| Μέση μεταβολή ύψους πιεζομετρικής γραμμής (m) | Ελάχιστη τιμή | Μέση τιμή | Μέγιστη τιμή | Ελάχιστη τιμή | Μέση τιμή | Μέγιστη τιμή |
| 0 | 1,72 | 2,09 | 2,65 | 1,03 | 1,22 | 1,57 |
| 1 | 1,68 | 2,02 | 2,86 | 0,97 | 1,16 | 1,60 |
| 2 | 1,52 | 1,83 | 2,62 | 0,86 | 1,09 | 1,48 |

Πίνακας 21. Τιμές του συντελεστή ασφαλείας για διάφορες τιμές μέσης μεταβολής της πιεζομετρικής γραμμής από την αρχική, διατομή ΓΒ

| Διατομή ΓΒ | Χωρίς σεισμική δράση | | | Με σεισμική δράση | | |
|---|----------------------|-----------|--------------|-------------------|-----------|--------------|
| Μέση μεταβολή ύψους πιεζομετρικής γραμμής (m) | Ελάχιστη τιμή | Μέση τιμή | Μέγιστη τιμή | Ελάχιστη τιμή | Μέση τιμή | Μέγιστη τιμή |
| 0 | 1,79 | 2,14 | 2,80 | 1,06 | 1,31 | 1,62 |
| 1 | 1,72 | 2,08 | 2,76 | 1,03 | 1,24 | 1,65 |
| 2 | 1,58 | 1,91 | 2,73 | 0,98 | 1,16 | 1,47 |

Παρατηρείται ότι πιθανότητα αστοχίας εμφανίζεται: στην διατομή ΑΒ για μέση μεταβολή ύψους πιεζομετρικής γραμμής 1 και 2 μέτρων, παρουσία σεισμικής δράσης και στην διατομή ΓΒ για μέση μεταβολή ύψους πιεζομετρικής γραμμής 2 μέτρων, παρουσία σεισμικής δράσης. Εξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι οι μεταβολές στο ύψος της πιεζομετρικής γραμμής έχει σημαντική επίδραση στην τιμή του συντελεστή ασφαλείας. Άρα, η γνώση της πιεζομετρίας στον ΧΥΤΑ Αμαρίου είναι απαραίτητη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βάσει των αποτελεσμάτων της εργασίας μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Εύρεση κρίσιμης θέσης

Μετά από δοκιμές σε διάφορα τμήματα των εδαφικών προφίλ του ΧΥΤΑ Αμαρίου διαπιστώθηκε ότι το κρίσιμο σημείο στο οποίο εμφανίζονται οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας, είναι σε εκείνο το τμήμα του πρανούς όπου υπάρχει μεγαλύτερη κλίση (ενδεικτικά αναφέρεται η ελάχιστη παρατηρούμενη κλίση στην διατομή AB, που είναι 1:1,8), γεγονός που ήταν αναμενόμενο. Σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν, η διαφορά των ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας μεταξύ των διαφόρων σημείων ήταν μεγάλη, σε αρκετές περιπτώσεις υπερδιπλάσια. Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύει την άμεση ανάγκη εστίασης στην συγκεκριμένη περιοχή του ΧΥΤΑ, καθώς αποτελεί τη δυσμενέστερη θέση. Εξομάλυνση των κλίσεων, αλλά και υποβάθμιση του υδροφόρου ορίζοντα, σε εκείνο το σημείο, θα βελτίωνε την ευστάθεια.

- Μείωση συντελεστή ασφαλείας με την επιβολή σεισμικής δράσης

Η μείωση που παρατηρείται στον συντελεστή ασφαλείας με την επιβολή του σεισμικού φορτίου είναι αρκετά σημαντική και σε πολλές από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, διαπιστώθηκε υποδιπλασιασμός του συντελεστή. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς η σεισμική δράση προκαλεί δυνάμεις που συνεισφέρουν στην αποσταθεροποίηση του πρανούς. Έτσι, η προσεκτική επιλογή των τιμών των ψευδοστατικών αναλύσεων, είναι απαραίτητη σε περιοχές με έντονη σεισμικότητα, όπως είναι η Κρήτη, όπου βρίσκεται ο υπό μελέτη ΧΥΤΑ.

- Σύγκριση με οριακές τιμές

Με τις επιλεγείσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των απορριμμάτων που ελήφθησαν υπόψη κατά την ανάλυση, προέκυψαν συντελεστές ασφαλείας οι οποίοι ήταν άνω του ορίου που τίθενται από τους κανονισμούς. Οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας για τους ΧΥΤΑ, ως γεωτεχνικές κατασκευές, είναι:

- $FS=1,4$ για μόνιμες και πρόσκαιρες φορτικές δράσεις,

- $FS=1$ για σεισμικές φορτικές δράσεις (Ευρωκώδικας 7, 2008).

Οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας, υπολογίστηκαν κατά την στατιστική ανάλυση, ως οι ελάχιστες τιμές ενός συνόλου που ακολουθεί κανονική κατανομή. Οι τιμές αυτές ήταν:

- 1,72 χωρίς σεισμό και 1,03 με σεισμό, για τη διατομή AB
- 1,79 χωρίς σεισμό και 1,06 με σεισμό, για την διατομή ΓΒ

Οι τιμές αυτές ήταν αποτέλεσμα τυχαίων συνδυασμών, συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής, που υπολογίστηκαν με το μοντέλο Monte Carlo και με βάση τις στατιστικές παραμέτρους, δηλαδή της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης, που ορίστηκαν. Να σημειωθεί ότι από τα αποτελέσματα προκύπτει και η συχνότητα, αλλά και η πιθανότητα εμφάνισης κάθε τιμής συντελεστή ασφαλείας (όπως είναι φυσικό οι ελάχιστες τιμές, ως ακραίες, έχουν πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης). Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο ΧΥΤΑ ευσταθεί, ακόμα και μετά την εισαγωγή των στατιστικών παραμέτρων.

- Πιθανότητα αστοχίας

Θεωρώντας δεδομένες τις τιμές και τις κατανομές των παραμέτρων ϕ και c , αλλά και το αρχικό ύψος εξετάστηκε στοχαστικά η επίδραση της μεταβολής του ύψους της πιεζομετρικής γραμμής. Στόχος ήταν να υπολογιστεί η μείωση του συντελεστή ασφαλείας για δεδομένη μεταβολή του ύψους, αλλά και η εύρεση του κρίσιμου ύψους, δηλαδή από ποιο ύψος και πάνω, υπάρχει τιμή του συντελεστή ασφαλείας κάτω του ορίου, δηλαδή πιθανότητα εμφάνισης αστοχίας.

Η πιθανότητα αστοχίας είναι στην ουσία, πιθανότητα ύπαρξης συντελεστή ασφαλείας μικρότερου του 1, ανάμεσα στο πλήθος των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το μοντέλο Monte Carlo. Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας μειώνονται σχεδόν γραμμικά με την ανύψωση της πιεζομετρικής γραμμής. Πιθανότητα αστοχίας αρχίζει να εμφανίζεται στην διατομή AB όταν η μέση μεταβολή του ύψους είναι 1m και η πιθανότητα είναι 0,15%. Η μεταβολή του ύψους κατά την οποία αναμένεται η εμφάνιση της αστοχίας είναι περίπου 1,5m. Η αντίστοιχη πιθανότητα για μέση μεταβολή 2m υπολογίστηκε 5,65%. Για την διατομή ΓΒ πιθανότητα αστοχίας εμφανίζεται όταν η μέση μεταβολή του ύψους της

πιεζομετρικής γραμμής είναι 2m, και είναι ίση με 0,05%. Η μεταβολή του ύψους κατά την οποία αναμένεται η εμφάνιση της αστοχίας είναι περίπου 2,5m.

- Δείκτης αξιοπιστίας

Επειδή δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ του ντετερμινιστικού συντελεστή ασφαλείας και της πιθανότητας αστοχίας, μπορεί ένα πρανές με υψηλότερο συντελεστή ασφαλείας να είναι λιγότερο σταθερό από ένα πρανές με χαμηλότερο συντελεστή ασφαλείας. Ένας άλλος τρόπος εξέτασης του κινδύνου αστοχίας είναι ο δείκτης αξιοπιστίας, ο οποίος χαρακτηρίζει την αναμενόμενη επίδοση του ΧΥΤΑ, όπως προκύπτει από τις τιμές του Πίνακα 22. Το μέγεθος είναι αντιστρόφως ανάλογο με την πιθανότητα αστοχίας.

Πίνακας 22. Αναμενόμενα επίπεδα επίδοσης ΧΥΤΑ συναρτήσει του δείκτη αξιοπιστίας (USACE 1999)

| Αναμενόμενο επίπεδο επίδοσης | Δείκτης αξιοπιστίας (β) | Πιθανότητα αστοχίας (p_f) |
|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Υψηλό | 5.0 | 0.0000003 |
| Καλό | 4.0 | 0.00003 |
| Άνω του μέσου όρου | 3.0 | 0.001 |
| Κάτω του μέσου όρου | 2.5 | 0.006 |
| Φτωχό | 2.0 | 0.023 |
| Μη ικανοποιητικό | 1.5 | 0.07 |
| Επικίνδυνο | 1.0 | 0.16 |

Το ελάχιστο αποδεκτό όριο για τον δείκτη αξιοπιστίας είναι η τιμή 3, που αντιστοιχεί σε καλή επίδοση άνω του μέσου όρου (USACE, 1997). Στις περιπτώσεις που η πιθανότητα αστοχίας υπολογίστηκε ότι είναι μηδενική, ο δείκτης είναι μεγαλύτερος του 3.

Οι περιπτώσεις πιθανότητας αστοχίας και δείκτη αξιοπιστίας μικρότερου του 3 είναι:

- Όταν η μέση μεταβολή του ύψους της πιεζομετρικής γραμμής είναι 1m, με επιβολή σεισμικής δράσης, στη διατομή ΑΒ.
- Όταν η μέση μεταβολή του ύψους της πιεζομετρικής γραμμής είναι 2m, με επιβολή σεισμικής δράσης, στη διατομή ΑΒ.
- Όταν η μέση μεταβολή του ύψους της πιεζομετρικής γραμμής είναι 2m, με επιβολή σεισμικής δράσης, στη διατομή ΓΒ.

Τα παραπάνω οδηγούν σε δείκτες αξιοπιστίας με τιμές 2,704, 1,528 και 2,999, αντίστοιχα. Γεγονός που δείχνει ότι η επίδοση κρίνεται από χαμηλότερη του μέσου όρου έως μη ικανοποιητική, όσο η πιεζομετρική γραμμή ανεβαίνει πιο ψηλά.

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι κατά την απόθεση απορριμμάτων στον ΧΥΤΑ Αμαρίου, οι κλίσεις του απορριμματικού πρανούς πρέπει να διατηρούνται κατά το δυνατό λιγότερο απότομες και πρέπει να υπάρχει έλεγχος για την πιεζομετρία, μέσω ενός συστήματος παρακολούθησης της υδροφορίας. Έτσι, η γνώση του ύψους του κορεσμένου υλικού, εντός της απορριμματικής μάζας, μπορεί να αποτελέσει στοιχείο για την ενδεχόμενη εμφάνιση αστοχίας στον ΧΥΤΑ Αμαρίου. Για την μείωση του ύψους της κορεσμένης μάζας προτείνεται έλεγχος της απορροής των ομβρίων υδάτων αλλά και της ανεξέλεγκτης ροής στραγγισμάτων.

Η παρούσα μελέτη μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της ευστάθειας των απορριμματικών πρανών του ΧΥΤΑ Αμαρίου μελλοντικά, καθώς έχουν εξεταστεί όλοι οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Επιπροσθέτως προτείνονται οι ακόλουθες ενέργειες:

- Λειτουργία συστήματος παρακολούθησης καθιζήσεων. Οι καθιζήσεις μεταβάλλουν το ειδικό βάρος των απορριμμάτων στο πεδίο και αλλάζουν την γεωμετρία, συνήθως συνεισφέροντας θετικά στην ευστάθεια.
- Λειτουργία συστήματος παρακολούθησης υδροφορίας, για την γνώση της πιεζομετρίας, εντός της απορριμματικής μάζας του ΧΥΤΑ Αμαρίου. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορεί να προσδιοριστεί η σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζει την ευστάθεια, δηλαδή το ύψος της πιεζομετρικής γραμμής. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θα μπορούν να αποφευχθούν φαινόμενα αστοχίας του πρανούς, καθώς όπως διαπιστώθηκε, μικρές αυξήσεις στο ύψος της πιεζομετρικής γραμμής συντελούν σε μεγάλες μειώσεις των συντελεστών ασφαλείας.
- Εξέταση της επίδρασης του βιοαερίου στην συνολική ευστάθεια, καθώς επηρεάζει την πίεση των πόρων, που όπως αναφέρθηκε είναι κρίσιμη παράμετρος. Η εξέταση των ενδεχόμενων σταθεροποιητικών ή αποσταθεροποιητικών δράσεων είναι ζωτικής σημασίας για τον ΧΥΤΑ Αμαρίου, όπου όχι μόνο δεν υπάρχει επαρκές σύστημα συλλογής του παραγόμενου βιοαερίου, αλλά αντίθετα λαμβάνει χώρα ανεξέλεγκτη ροή βιοαερίου εντός της μάζας.

- Επικαιροποίηση των αποτελεσμάτων με καινούρια τοπογραφική αποτύπωση, καθώς στον χρόνο που μεσολάβησε έλαβαν χώρα αποθέσεις απορριμματικού υλικού στο υπό λειτουργία κύτταρο του ΧΥΤΑ Αμαρίου. Με αυτόν τον τρόπο, θα διαπιστωθεί αν υπήρξε μεταβολή στις κλίσεις του πρανούς, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μείωση της ευστάθειας, και επομένως σε ενδεχόμενη πιθανότητα εμφάνισης αστοχίας
- Μελέτη των διεπιφανειών που αναπτύσσονται μεταξύ των υλικών και των γεωσυνθετικών φραγμών, που χρησιμοποιούνται για τη στεγάνωση του πυθμένα του ΧΥΤΑ, αλλά και εξέταση ασθενών σημείων εντός της απορριμματικής μάζας (π.χ. σημεία εναπόθεσης ανομοιογενών υλικών, σημεία απόθεσης ιλύος βιολογικών καθαρισμών)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Adamczyk, J. (2005). Reanalysis of the Kettleman Hills Landfill Slope Stability Failure., 20–25
- Babu, G. S. (2012). Influence of Spatially Variable Geotechnical Properties of MSW on Stability of Landfill Slopes. *Journal of Hazardous*, (312).
- Boutwell, G.P., (2004). Slides Happen - Landfill Stability Analysis. Symposium Honoring the Research Achievements of Dr. Robert M. Koerner, Drexel University, Philadelphia, PA, September 13, 2004.
- Bray, J., & Zekkos, D. (2009). Shear strength of municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 709–722.
- Dixon, N., and Jones, D. R. V. (2005). “Engineering properties of municipal solid waste.” *Geotext. Geomembr.*, 23(3), 205–233.
- Duncan, J. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307–316.
- Eid H.T., Stark T., Evans W.D., and Sherry P.E. (2000). Municipal solid waste slope failure I: waste and foundation soil proper- ties. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, pp. 397-407.
- Fassett, J. B. (1993). “Geotechnical properties of municipal solid waste.” *Project Rep.*, Purdue Univ., School of Civil Eng., West Lafayette, Ind.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2013 edition), *Stability Modeling with SLOPE/W*
- Isenberg RH (2003) Landfill and waste geotechnical stability. Presentation at US EPA Bioreactor Workshop, February 27–28, 2003, Arlington-VA
- Jahanfar M. A. (2014), *Landfill Slope Stability Risk Assesment*, Guelph Ontario Canada
- Kavazanjian, E., Jr. (2001). “Mechanical properties of municipal solid waste.” *Proc., Sardinia 2001, 8th Int. Landfill Symp.*
- Kavazanjian, E., Jr., Matasovic, N., and Bachus, R. C. (1999). “Large diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste.” *Proc., Sardinia '99—7th Int. Waste Management and Landfill Symp.*, Environmental Sanitary Engineering Centre(CISA), Univ. of Padua, Italy, Vol. III, 437–444.
- Kavazanjian, E., Jr., Matasovic, N., Bonaparte, R., and Schmertmann, G. R. (1995). “Evaluation of MSW properties for seismic analysis.” *Geoenvironment 2000*, Vol. 2, 1126–1141.
- Kavazanjian, E., Jr., Matasovic, N., Stokoe, K. H., II, and Bray, J. D. (1996). “In situ shear wave velocity of solid waste from surface wave measurements.” *Environmental geotechnics*, Kamon ed., Rotterdam,

- Koerner, R., Snoog, T. (2000). Stability assessment of ten large landfill failures. GeoDenver 2000 Congress.
- Konig, D., and Jessberger, H. L. (1997). "Environmental geotechnics." *Rep. ISSMFE Technical Committee TC 5 on Environmental Geotechnics*, Univ. of Bochum, Bochum, Germany
- Lacasse, S., Nadim, F., & Uzielli, M. (2007). Hazard and Risk Assessment of Landslides. *Computer Applications In Geotechnical Engineering*, 1–10.
- Machado, S. L., Karimpour-Fard, M., Shariatmadari, N., Carvalho, M. F., & do Nascimento, J. C. F. (2010). Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 30(12), 2579–91.
- Milanov V, Corade JM, Bruyat-Korda F, Falkenreck G (1997) Waste slope failure analysis at the Rabastens landfill site. Sardinia 97. In: Proceedings 6th international landfill symposium, vol 3, pp 551–557. Cagliari, Italy
- Omari, A. (2012). Slope Stability Analysis of Industrial Solid Waste Landfills. Dissertation. Luleå University of Technology.
- Pinapati K. K. (2005), Variation of geotechnical strength properties with age of landfills accepting biosolids, University of Central Florida
- Qian, X., Koerner, R.M. and Gray D.H. (2002), *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*, Prentice Hall Publications
- Shariatmadari, N., Machado, S. L., Noorzad, A., & Karimpour-Fard, M. (2009). Municipal solid waste effective stress analysis. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 29(12), 2918–30.
- Stark, T. D., Huvaj-Sarihan, N., & Li, G. (2008). Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. *Environmental Geology*, 57(8), 1911–1923.
- US Army Corps of Engineers. (1997). Engineering and Design Introduction to Probability and Reliability Methods for use in Geotechnical Engineering. Engineer Technical Letter, Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers
- Yu, L., & Battle, F. (2011). A hybrid method for quasi-three-dimensional slope stability analysis in a municipal solid waste landfill. *Waste management (New York, N.Y.)*, 31(12), 2484–96.
- Zekkos, D. P., Bray, J. D., Kavazanjian, E., & Riemer, M. Framework for the estimation of MSW unit weight profile, Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium
- Zekkos, D., A. M., Bray, J. D., (2006). Unit Weight of Municipal Solid Waste, 132(10), 1250–1261.
- Zekkos, D., Bray, J. D., Stokoe, K., Kavazanjian, E., Rathje, E., Athanasopoulos G. A., Riemer, M., Matasovic, N., Lee, J. J., Seos, B. (2008), Recent Findings on

the Static and Dynamic Properties of Municipal Solid Waste, GEOCONGRESS
2008: GEOTECHNICS OF WASTE MANAGEMENT AND REMEDIATION

Ελληνική βιβλιογραφία

- Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων, (2013), Έρευνα για πιθανή ρύπανση στην περιοχή του ΧΥΤΑ Αμαρίου, εκτίμηση επικινδυνότητας και πρόταση για μέτρα αποκατάστασης
- Ευρωκώδικας 7, (2008) (EN 1997-1), θέματα σχεδιασμού Γεωτεχνικών Έργων, Eurocode 7 (EN 1997-1) : Geotechnical Design – Part 1 : General Rules, M. Καρβαδάς, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ
- Ζανιά Β, (2009), Σεισμική καταπόνηση ΧΥΤΑ: Μηχανισμοί αστοχίας και μέθοδοι ενίσχυσης, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Θεοδωράτος Α.Ε., Αθανασόπουλος Γ.Α., Γεωργιόπουλος Δ.Φ., Ζέκκος Δ.Π., Bray J.D., Riemer M.F. (2006), Εργαστηριακή Διερεύνηση της Διατμητικής Αντοχής Υλικών ΧΥΤΑ σε Μεγάλη Συσκευή Άμεσης Διάτμησης, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006 1
- Παναγιωτακόπουλος Δ. Χ. (2007), Βιώσιμη διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις ΖΥΓΟΣ
- Παπαδόπουλος Β., Λουπασάκης Κ., (2012), Ευστάθεια πρανών, Εδαφομηχανική και Στοιχεία Θεμελιώσεων, ΕΜΠ, Διαφάνειες Διαλέξεων
- Τεχνική Υπηρεσία Δήμου Αριδαίας (2009), έργο: Επέκταση ΧΥΤΑ Αλμωπίας, Οριστική Μελέτη, Παράρτημα V, Γεωτεχνική Μελέτη
- Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, portal.tee.gr
- Ψαρρόπουλος Π., Τσομπανάκης Ι. (2005), Εδαφικές συνθήκες και αντισεισμικός σχεδιασμός ΧΥΤΑ, Heleco '05, ΤΕΕ, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου 2005