

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΠΜΣ ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ

«Διερεύνηση του φαινομένου της διάβρωσης των ακτών.
Εφαρμογή σε ακτή της Ρόδου»

ΚΟΤΣΗ ΙΩΑΝΝΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: Μ.Γ. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ

ΑΘΗΝΑ, 2008

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Κατάλογος Πινάκων.....	5
Κατάλογος Σχημάτων.....	7
Εισαγωγή.....	10
Βιβλιογραφία.....	74

Κεφάλαιο 1 Θεωρία Ευστάθειας Πρανών

1.1 Γενικά.....	13
1.2 Τύποι αστοχίας πρανούς.....	13
1.3 Ευστάθεια πρανούς.....	16
1.4 Εξίσωση διατμητικής τάσης αστοχίας κορεσμένου εδάφους.....	17
1.5 Εξίσωση διατμητικής αντοχής ακόρεστου εδάφους.....	18
1.6 Μύζηση.....	20
1.7 Υπολογισμός συντελεστή ασφάλειας.....	22
1.8 Αλγόριθμοι ευστάθειας πρανών.....	25
1.8.1 Οριζόντια στρώματα.....	25
1.8.2 Κατακόρυφες λωρίδες.....	26
1.8.3 Διατμητική αστοχία πρόβολου.....	28
1.9 Μηχανικά αποτελέσματα της βλάστησης στην ευστάθεια πρανών.....	28
1.10 Μοντέλο διάβρωσης ποδιού.....	30
1.10.1 Υπολογισμός της μέσης οριακής διατμητικής τάσης αστοχίας (τ_0).....	30
1.10.2 Διαβρωσιμότητα και κρίσιμη διατμητική τάση αστοχίας.....	31
1.10.3 Ποσοστά και ποσά διάβρωσης.....	31
1.11 Οι βροχοπτώσεις ως παράγοντας κατολισθήσεων.....	32
2.1 Μοντέλο ευστάθειας πρανών.....	34
2.2 Μοντέλο διάβρωσης ποδιού πρανούς.....	35
2.3 Χρήση των μοντέλων ευστάθειας πρανούς και διάβρωσης ποδιού.....	35
2.4 Δομή του μοντέλου.....	37
2.5 Διαδικασία χρήσης του μοντέλου.....	38
3.1 Γεωλογία – Τεκτονική ευρύτερης περιοχής.....	43
3.1.1 Γενική γεωλογία.....	43
3.1.2 Τεκτονική ευρύτερης περιοχής.....	43
3.2 Γεωμορφολογία, Γεωλογία, Υδρογεωλογία Περιοχής Μελέτης.....	45
3.2.1 Γεωμορφολογία – Υφιστάμενη κατάσταση.....	45

3.2.2 Γεωλογία	45
3.2.3 Υδρογεωλογία.....	47
3.3 Γεωτεχνικές έρευνες	47
3.3.1 Γεώτρηση.....	47
3.3.2 Στρωματογραφία υπεδάφους	48
3.4 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά εδαφικών στρώσεων	49
4.1 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο	53
4.2 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας για το πρανές.....	54
4.3 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας για διάφορα είδη φυτοκάλυψης.....	58
4.4 Διάβρωση ποδιού πρανούς	59
4.5 Διάβρωση ποδιού αφότου έχει κατολισθήσει υλικό πρανούς	64
4.6 Διάβρωση ποδιού όταν υπάρχει προστασία πρανούς	65
4.7 Τρόποι προστασίας πρανούς.....	70
5.1 Συμπεράσματα	73
5.2 Προτάσεις	74

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια διερεύνηση του φαινομένου της διάβρωσης των ακτών με την βοήθεια ενός μοντέλου που δημιουργήθηκε από τους Andrew Simon, Andrea Curini, Robert Thomas και Eddy Langendoen, μέλη του Εθνικού Εργαστηρίου Ιζηματοποίησης (National Sedimentation Laboratory) του υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ (US Department of Agriculture).

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρία που αφορά τα πρανή γενικά και περιέχει στοιχεία ακόρεστης μηχανικής. Παρουσιάζονται οι μέθοδοι που εφαρμόζονται ώστε να βρεθεί ο Συντελεστής Ασφαλείας με βάση τον οποίο μπορούμε να διαπιστώσουμε αν το πρανές είναι σταθερό ή όχι.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση του μοντέλου και του τρόπου λειτουργίας του. Αρχικά παρουσιάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιεί το μοντέλο και στην συνέχεια γίνεται μια περιγραφή βήμα-βήμα της χρήσης του μοντέλου.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, ο όρμος Λη της νήσου Ρόδου. Παρουσιάζεται η γεωμορφολογία, γεωλογία και υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης και επίσης γίνεται μια αναλυτική περιγραφή της στρωματογραφίας της περιοχής ώστε να εξαχθούν τα κατάλληλα δεδομένα για τον σχεδιασμό του προφίλ του πρανούς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η εφαρμογή των δεδομένων που εξάχθηκαν από την γεωτεχνική και γεωλογική μελέτη στο μοντέλο για την περιοχή μελέτης μας. Αρχικά υπολογίζεται η διάβρωση που θα υποστεί το πρανές λόγω της αστάθειας του. Στην συνέχεια διερευνάται η επίδραση της φυτοκάλυψης στην αποτροπή αστοχίας του πρανούς. Έπειτα διερευνάται η επίδραση του ύδατος στο πρανές. Τέλος δοκιμάζονται διάφορα υλικά προστασίας του πρανούς και παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι προστασίας πρανούς.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από αυτήν εργασία και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη του θέματος.

Abstract

In the present diplomatic work becomes a investigation of phenomenon of erosion of coasts with the help of model that was created by Andrew Simon, Andrea Curini, Robert Thomas and Eddy Langendoen, members of National Sedimentation Laboratory of the US Department of Agriculture.

In the first chapter is presented the theory that concerns natural slopes in general and contains elements of unsaturated mechanics. The methods are presented that are applied so that is found the Factor of Safety with which we can realise if the slope is constant or no.

In the second chapter take place a presentation of model and his way of operation. Initially are presented the elements that use the model and then presented a description step by step of use of model.

In the third chapter are presented the region of study, the bight Li of island Rhodes. It is presented the geomorphology, geology and hydrogeology of region of study and also an analytic description of stratigraphy of region so that are exported the suitable data on the planning of bank profile.

In the fourth chapter is presented the application of data that was exported from the geotechnical and geological study in the model for our region of study. Initially the erosion is calculated that will occur in bank because of his instability. Then the effect of vegetation averting the fail of bank is investigated. Then is investigated the effect of water in bank stability. Finally various materials and various ways of bank protection are presented.

Finally, in the fifth chapter the conclusions that derived from the analysis are mentioned together with the suggestions for further development of this subject.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πιθανές τιμές Συντελεστή Ασφαλείας.....	16
Πίνακας 2: Πειραματικές τιμές για το ϕ^b	20
Πίνακας 3: Στοιχεία υλικού αστοχίας.....	55
Πίνακας 4: Αποτελέσματα για διάφορα είδη φυτοκάλυψης.....	57
Πίνακας 5: Δεδομένα ροής.....	58
Πίνακας 6: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για διάφορα είδη φυτοκάλυψης στην περίπτωση χρήσης λεπτόκοκκης άμμου ως υλικού ποδιού.....	62

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Μορφές αστοχίας πρανούς.....	12
Σχήμα 2: Επιλογή τύπων αστοχιών που παρατηρούνται στο πεδίο.....	13
Σχήμα 3: Αναπαράσταση περιστροφικών κατολισθήσεων (α) βράχου (β) αργιλικού εδάφους.....	13
Σχήμα 4: Διάφορες μορφές περιστροφικών κατολισθήσεων.....	14
Σχήμα 5: Αναπαράσταση στρωματοειδών κατολισθήσεων (α) βράχου (β) εδάφους – τεμαχίων.....	14
Σχήμα 6: Πρισματική αστοχία.....	15
Σχήμα 7: Σφηνοειδής μορφή κατολίσθησης.....	15
Σχήμα 8 Κύκλος του Mohr για ακόρεστα εδάφη.....	17
Σχήμα 9 Mohr – Coulomb για ακόρεστα εδάφη.....	18
Σχήμα 10: Mohr – Coulomb για κορεσμένα εδάφη.....	18
Σχήμα 11: Γραμμή παρεμπόδισης κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας στο επίπεδο $\tau = f(\mu_a - \mu_w)$	21
Σχήμα 12: Μέθοδος των Λωρίδων.....	22
Σχήμα 13: Διαίρεση ενός τμήματος αστοχίας σε κομμάτια.....	25
Σχήμα 14: Κατάτμηση των τοπικών περιοχών ροής και υδραυλικών ακτινών.....	29
Σχήμα 15: Γεωλογικός Χάρτης Ευρύτερης Περιοχής Μελέτης (κλίμακα 1:50,000).....	43
Σχήμα 16: Ενδεικτική Γεωτεχνική Τομή στην Περιοχή της Γεώτρησης Γ5.....	50
Σχήμα 17: Προφίλ πρανούς.....	55
Σχήμα 18: Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας για πρανές.....	56
Σχήμα 19: Προφίλ πρανούς με χρήση ογκόλιθων ως υλικού ποδιού.....	59
Σχήμα 20: Προφίλ πρανούς με χρήση στρογγυλών πλακών ως υλικού ποδιού.....	59
Σχήμα 21: Προφίλ πρανούς με χρήση χαλικιού ως υλικού ποδιού.....	60
Σχήμα 22: Προφίλ πρανούς με χρήση χονδρόκοκκης άμμου ως υλικού ποδιού.....	60
Σχήμα 23: Προφίλ πρανούς με χρήση λεπτόκοκκης άμμου ως υλικού ποδιού.....	61
Σχήμα 24: Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας για υλικό ποδιού λεπτόκοκκη άμμος.....	62
Σχήμα 25: Διάβρωση ποδιού αφότου έχει γίνει κατολίσθηση.....	63
Σχήμα 26: Προφίλ πρανούς με χρήση plant cuttings ως προστασία πρανούς.....	64
Σχήμα 27: Προφίλ πρανούς με χρήση large woody debris ως προστασία πρανούς.....	65
Σχήμα 28: Προφίλ πρανούς με χρήση rip rap ως προστασία πρανούς.....	65

Σχήμα 29: Προφίλ πρανούς με χρήση jute net ως προστασία πρανούς.....	66
Σχήμα 30: Προφίλ πρανούς με χρήση coir fiber ως προστασία πρανούς.....	66
Σχήμα 31: Προφίλ πρανούς με χρήση Geotextile (synthetic)ως προστασία πρανούς.....	67
Σχήμα 32: Προφίλ πρανούς με χρήση live fascine ως προστασία πρανούς.....	67
Σχήμα 33: Τρόποι προστασίας πρανούς.....	70

Εισαγωγή

Η διάβρωση των ακτών είναι ένα πολύ σημαντικό γεωλογικό φαινόμενο με τεράστιες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις για τις περιοχές όπου εκδηλώνονται.

Οι περισσότεροι οικισμοί και η μεγαλύτερη συγκέντρωση ανθρώπων αναπτύχθηκαν στις παράκτιες περιοχές. Το κλίμα στις παράκτιες περιοχές είναι πιο ήπιο και φιλικό για την διαβίωση του ανθρώπου. Η Ελλάδα διαθέτει περίπου 16000 km ακτογραμμής και το 70% περίπου του ελληνικού πληθυσμού κατοικεί στην παράκτια ζώνη.

Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, η μείωση των βροχοπτώσεων και η αύξηση της συχνότητας και της έντασης εκδήλωσης ακραίων καιρικών φαινομένων (όπως οι κυματικές καταιγίδες) και αύξηση των περιπτώσεων πλημμυρών καθώς και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας λόγω της τήξης των πάγων θα έχουν σοβαρές επιπτώσεις σε πολλούς τομείς της χώρας. Ήδη έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα που περιγράφουν την αλλαγή της ακτογραμμής με βάση στατιστικές μεθόδους.

Με βάση το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία μπορούμε να εξάγουμε αποτελέσματα για συγκεκριμένες ακτές όπου είτε πιθανόν πρόκειται να γίνει κάποιο τεχνικό έργο και χρειαζόμαστε μια μελέτη ευστάθειας είτε απλώς θέλουμε να το ενισχύσουμε.

Κεφάλαιο 1

Θεωρία Ευστάθειας Πρανών

1.1 Γενικά

Ως πρανή ορίζονται κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Η κλίση αυτή του πρανούς το καθιστά «ασταθή» σε σχέση με έναν οριζόντιο σχηματισμό εδάφους λόγω της παρουσίας διατμητικών τάσεων.

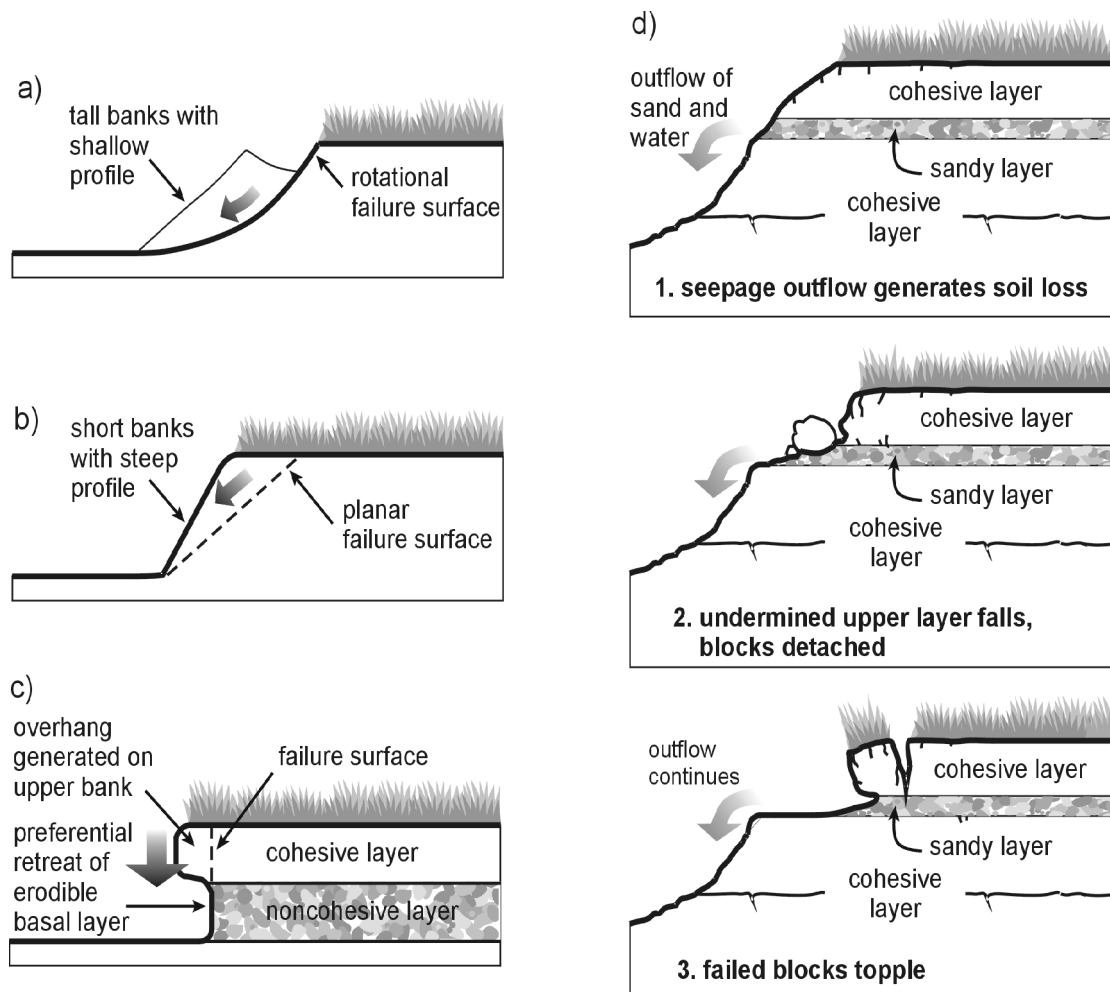
Σε ένα φυσικό πρανές η ευστάθεια δεν είναι πάντοτε εξασφαλισμένη. Το φυσικό πρανές μπορεί να αστοχήσει υπό την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα, οι σεισμοί κα. μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία του φυσικού πρανούς. Το πρανές που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία αστοχεί λόγω της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας και της διάβρωσης που προκαλείται από αυτήν την μεταβολή, καθώς και λόγω της βροχόπτωσης.

1.2 Τύποι αστοχίας πρανούς

Η αστοχία του πρανούς μπορεί να εμφανιστεί με διάφορους μηχανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των αστοχιών προβόλων ανασκαμμένων αναχωμάτων, της ανατροπής κάθετων πλακών και της περιστροφικής κατάρρευσης (Thorne et al., 1981). Ο τύπος της αστοχίας απεικονίζει το βαθμό ανασκαφής από την επίδραση ποτάμιων ή άλλων μηχανισμών υποσκαφής και τη φύση των υλικών των πρανών.

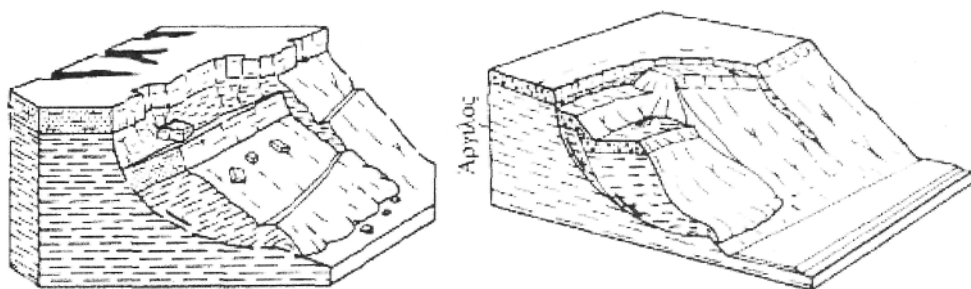


Σχήμα 1: Μορφές αστοχίας πρανούς



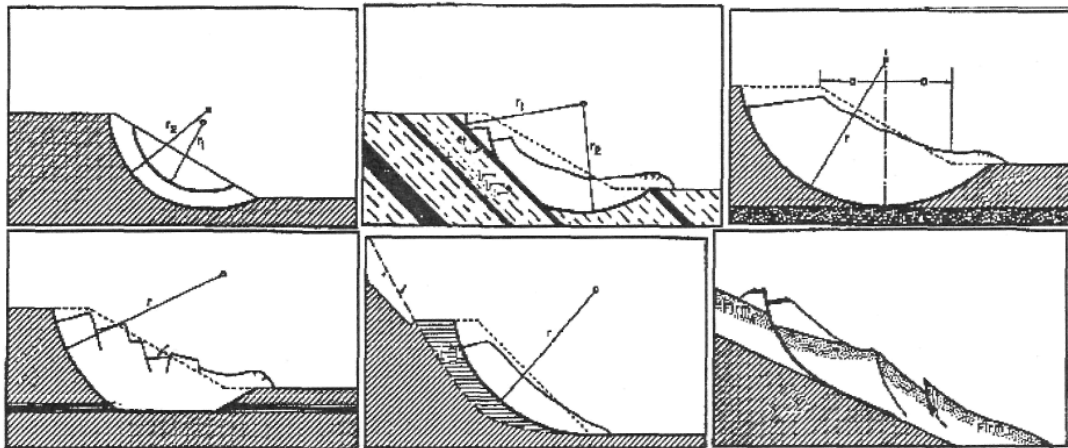
Σχήμα 2: Επιλογή τύπων αστοχιών που παρατηρούνται στο πεδίο.

Το μοντέλο ευστάθειας πρανών προσομοιώνει τους τύπους (β) και (γ) και μια τροποποίηση του τύπου (β) όπου μια εφελκυστική ρωγή δημιουργείται την στιγμή της αστοχίας. Όλα αυτά είναι αστοχίες διάτμησης που εμφανίζονται όταν η δύναμη της τάση υπερβαίνει τη δύναμη αντίστασης.

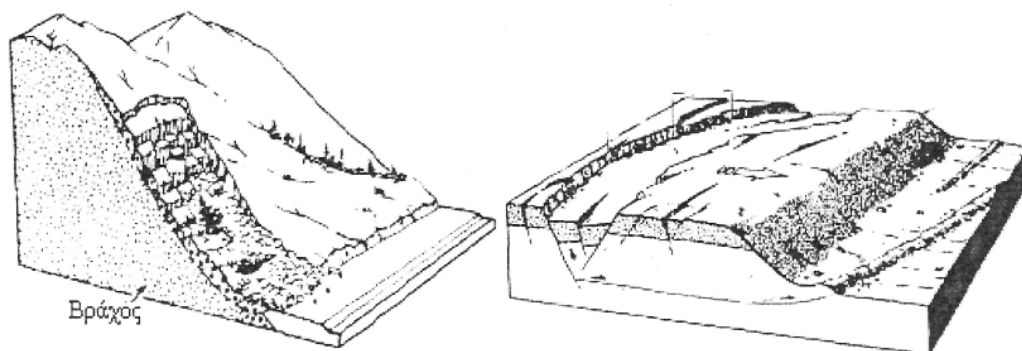


Σχήμα 3: Αναπαράσταση περιστροφικών κατολισθήσεων (α) βράχου (β) αργιλικού εδάφους

Η κυκλική και μη κυκλική μορφή αστοχίας (Σχήμα 1 και 2), εντάσσονται στις κυλινδρικές αστοχίας ή περιστροφικές κατολισθήσεις. Είναι οι πιο συνηθισμένες μορφές κατολίσθησης του εδάφους όταν δεν παρουσιάζονται ασυνέχειες ή έντονη διαστρωμάτωση. Οι κυκλικές μορφές εμφανίζονται σε ομογενή εδάφη ενώ οι μη κυκλικές σε μη ομογενή.



Σχήμα 4: Διάφορες μορφές περιστροφικών κατολισθήσεων

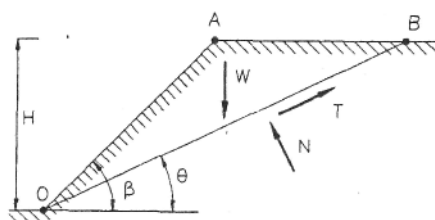


Σχήμα 5: Αναπαράσταση στρωματοειδών κατολισθήσεων (α) βράχου (β) εδάφους - τεμαχίων

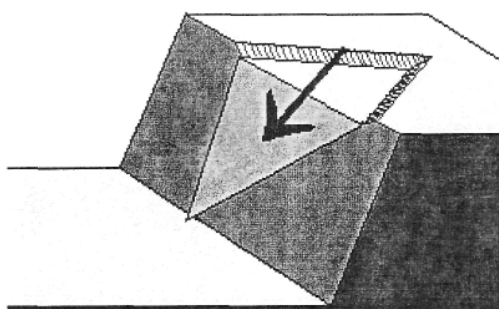
Στο Σχήμα 4 βλέπουμε κάποιες σύνθετες μορφές αστοχίας όπως και στο Σχήμα 1(δ). Οι σύνθετες μορφές όπως και οι στρωματοειδής ολισθήσεις (Σχήμα 1(γ), Σχήμα 5), παρουσιάζονται όταν η ολίσθηση επηρεάζεται από κάποιο υποκείμενο στρώμα αυξημένης αντοχής ή από κάποια μεγάλη ασυνέχεια.

Πρισματική μορφή αστοχίας (Σχήματα 6 και 7), παρουσιάζεται σε σχεδόν κατακόρυφα πρανή τα οποία διαθέτουν συνοχή και είναι εν γένει βραχώδη. Η

πρισματική μορφή αστοχίας μπορεί να παρουσιαστεί υπό την μορφή σφήνας κυρίως σε βραχώδη πρανή ειδικά όταν προυπάρχουν ασυνέχειες στο βράχο.



Σχήμα 6: Πρισματική αστοχία



Σχήμα 7: Σφηνοειδής μορφή κατολίσθησης

1.3 Ευστάθεια πρανούς

Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ευστάθεια των πρανών διακρίνονται από τον Chandler (1987) σε εξωτερικούς (διάβρωση, βροχόπτωση, σεισμός, διαμορφωμένη κλίση) και εσωτερικούς (εσωτερική διάβρωση λόγω κυκλοφορίας του νερού, υπόγειος υδροφόρος, είδος εδάφους, τεκτονική δομή). Οι δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για την αστάθεια των πρανών εξαρτώνται από το ύψος και την κλίση των πρανών, το μοναδιαίο βάρος του εδάφους και την ποσότητα του νερού μέσα σε αυτό και την επιφόρτιση που δέχεται.

Πιο αναλυτικά, η ευστάθεια του πρανούς εξαρτάται από την βαρύτητα, την συνοχή c και την γωνία εσωτερικής τριβής ϕ , την στρώση και κατατμητικότητα του εδάφους, τις χρονικές μεταβολές των τάσεων και παραμορφώσεων, την αποστράγγιση του πρανούς και την επίδραση ατμοσφαιρικών συνθηκών.

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας βασίζονται στην παραδοχή κάποιας μορφής αστοχίας. Αφού γίνει αυτή η παραδοχή γίνεται ανάλυση με μεθόδους οριακής ισορροπίας. Από αυτή την ανάλυση προκύπτει κάποιος συντελεστής ασφαλείας.

Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται Στατικός Συντελεστής Ασφαλείας και συμβολίζεται με F.S.

$$FS = \frac{\text{Δυνάμεις - Ροπές Αντιδράσεις}}{\text{Δυνάμεις - Ροπές Δράσεις}} \quad \text{ή} \quad \frac{\Sigma T}{\Sigma F} = \frac{\text{Δυνάμεις ή ροπές που ανθίστανται στην ολίσθηση}}{\text{Δυνάμεις ή ροπές που προκαλούν την ολίσθηση}} \quad (1)$$

Αν ο συντελεστής ασφαλείας είναι 1 τότε μιλάμε για οριακή ισορροπία – ευστάθεια του πρανούς. Συντελεστής μικρότερος του 1 σημαίνει ότι το πρανές δεν είναι ευσταθές και η εκδήλωση κάποιας κατολίσθησης είναι δυνατή.

$0 \leq FS \leq 1$	Το πρανές αστοχεί. Για $FS = 1$ βρίσκεται σε οριακή ισορροπία.
$1 \leq FS \leq 1,25$	Το πρανές κινδυνεύει από κυκλική ή επίπεδη αστοχία σε μικρότερο όμως βαθμό απ' ότι στην προηγούμενη περίπτωση.
$1,25 \leq FS \leq 1,5$	Το πρανές δεν θα αστοχήσει στην περίπτωση που υπάρχει στατική ή υδρολογική φόρτιση. Κινδυνεύει όμως σε περίπτωση σεισμικής φόρτισης.
$FS > 1,5$	Το πρανές ευσταθεί και δεν κινδυνεύει να αστοχήσει.

Πίνακας 1: Πιθανές τιμές Συντελεστή Ασφαλείας

1.4 Εξίσωση διατμητικής τάσης αστοχίας κορεσμένου εδάφους

Η διατμητική τάση αστοχίας του κορεσμένου εδάφους περιγράφεται από την εξίσωση Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_w) \tan \phi' \quad (2)$$

όπου:

τ_f = διατμητική τάση στην επιφάνεια αστοχίας (kPa)

c' = ενεργός συνεκτικότητα, το αποκοπτόμενο δηλαδή τμήμα του άξονα διατμητικής αντοχής όταν η ενεργός ορθή τάση και η μύζηση είναι μηδέν (kPa)

σ = ορθή τάση (kPa)

μ_w = πίεση του νερού των πόρων κατά την αστοχία (kPa)

ϕ' = ενεργός γωνία εσωτερικής τριβής (μοίρες).

1.5 Εξίσωση διατμητικής αντοχής ακόρεστου εδάφους

Η διατμητική αντοχή ενός ακόρεστου εδάφους μπορεί να διατυπωθεί με την βοήθεια των ανεξάρτητων εντατικών μεταβλητών. Για την εξίσωση της διατμητικής αντοχής μπορούν να χρησιμοποιηθούν οποιεσδήποτε δύο από τις τρεις πιθανές μεταβλητές $(\sigma - \mu_a)$, $(\mu_a - \mu_w)$ ή $(\sigma - \mu_w)$. Πρακτικά αποδεικνύεται ότι ο συνδυασμός $(\sigma - \mu_a)$, $(\mu_a - \mu_w)$ έχει τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Με χρήση των μεταβλητών αυτών η εξίσωση της διατμητικής αντοχής γράφεται:

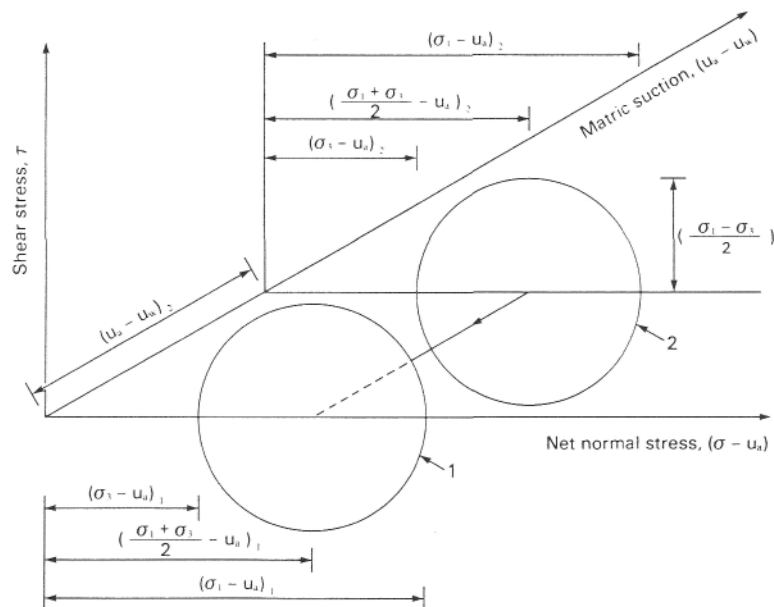
$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_a) \tan \phi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^b \quad (3)$$

όπου:

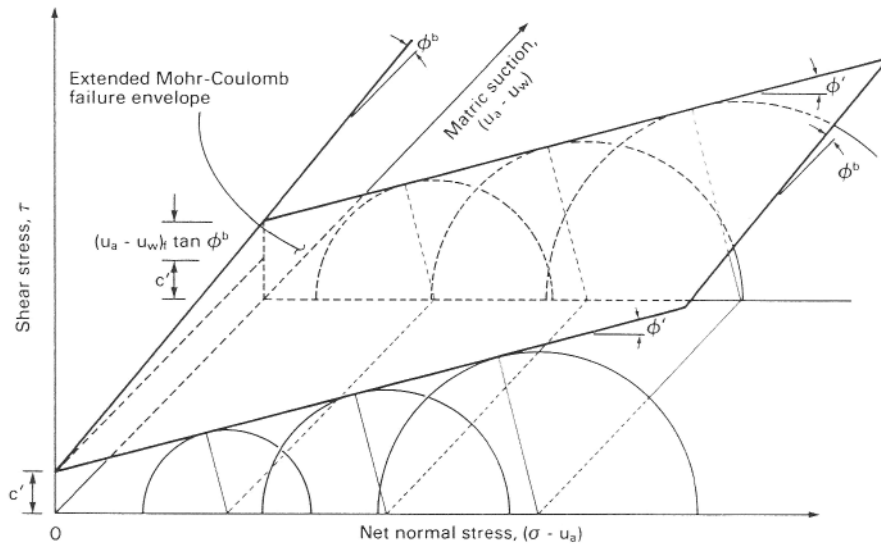
$(\sigma - \mu_a)$ = καθαρή ορθή τάση στην επιφάνεια αστοχίας

$(\mu_a - \mu_w)$ = matric μύζηση στην επιφάνεια αστοχίας

ϕ^b = γωνία που δείχνει τον ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής σε σχέση με την matric μύζηση.

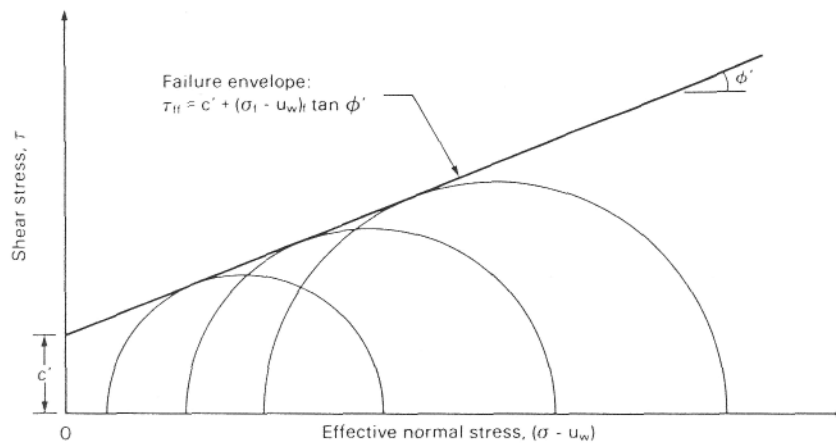


Σχήμα 8 Κύκλος του Mohr για ακόρεστα εδάφη



Σχήμα 9 Mohr – Coulomb για ακόρεστα εδάφη

Το Σχήμα 9 προκύπτει ως εξής: σχεδιάζουμε μια σειρά από κύκλους Mohr που αντιστοιχούν στις συνθήκες αστοχίας σε ένα δισδιάστατο σχήμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Mohr – Coulomb για κορεσμένα εδάφη

Στην περίπτωση του ακόρεστου εδάφους, οι κύκλοι Mohr που αντιστοιχούν στις συνθήκες αστοχίας μπορούν να σχεδιαστούν χρησιμοποιώντας τρεις διαστάσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.

Οι κύκλοι Mohr για ένα ακόρεστο έδαφος σχεδιάζονται σε σχέση με την καθαρή ορθή τάση ($\sigma - u_a$) όπως οι κύκλοι Mohr σχεδιάζονται για τα κορεσμένα εδάφη σε σχέση με την ενεργό ορθή τάση ($\sigma - u_w$). Εντούτοις, το που σχεδιάζεται ο κύκλος Mohr στην τρίτη διάσταση εξαρτάται από την matric μύζηση. Το Σχήμα 9 όπου

παρουσιάζεται ο Mohr – Coulomb για τα ακόρεστα εδάφη χρησιμεύει στο να καθορίσουμε την διατμητική αντοχή του ακόρεστου εδάφους.

1.6 Μύζηση

Η μύζηση αναφέρεται ως η κατάσταση του νερού του εδάφους με ελεύθερη ενέργεια (Edlefsen and Anderson, 1943). Η ενέργεια αυτή μπορεί να μετρηθεί ως η μερική πίεση των ατμών του νερού του εδάφους (Richards, 1965). Η θερμοδυναμική σχέση μεταξύ της μύζησης και της μερικής πίεσης των ατμών του νερού γράφεται ως εξής:

$$\psi = -\frac{RT}{\nu_{w0}\omega_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right) \quad (4)$$

όπου:

ψ = μύζηση του εδάφους ή ολική μύζηση (kPa)

R = παγκόσμια σταθερά των αερίων (8,31432 J/(molK))

T = απόλυτη θερμοκρασία (K)

ν_{w0} = ειδικός όγκος νερού ή το αντίστροφο της πυκνότητας του νερού (m³/kg)

ω_v = μοριακή μάζα των ατμών του νερού (18,016 kg/kmol)

\bar{u}_v = μερική πίεση των ατμών του νερού των πόρων (kPa)

\bar{u}_{v0} = πίεση κορεσμού των ατμών του νερού πάνω από μια επίπεδη επιφάνεια καθαρού νερού στην ίδια θερμοκρασία (kPa)

Ο όρος \bar{u}_v / \bar{u}_{v0} ονομάζεται σχετική υγρασία, RH (100%). Όταν ο όρος αυτός είναι ίσος με 100% τότε η μύζηση είναι 0.

Η μύζηση αποτελείται από δύο συστατικά, την *matric* και την οσμωτική μύζηση.

$$\psi = (\mu_a - \mu_w) + \pi \quad (5)$$

Στην παρούσα διατριβή μας αφορά η *matric* μύζηση. Η *matric* μύζηση (ή τριχοειδές συστατικό ελεύθερης ενέργειας) είναι η ισοδύναμη μύζηση που προέρχεται από την μέτρηση της μερικής πίεσης των ατμών του νερού σε ισορροπία με το νερό του εδάφους, η σχετική με την μερική πίεση των ατμών σε ισορροπία με ένα διάλυμα πανομοιότυπο στη σύνθεση με τον νερό του εδάφους.

Μύζηση (αρνητική πίεση πόρων ύδατος) πάνω από τη στάθμη του νερού έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της φαινόμενης συνοχής του εδάφους. Ο Fredlund (1978) όρισε μια λειτουργική σχέση που περιγράφει την αύξηση της δύναμης του εδάφους με την αύξηση της μύζησης. Το ποσοστό αύξησης καθορίζεται από την παράμετρο ϕ^b , που συνήθως είναι μεταξύ 10° και 20° , με μέγιστη τιμή του ϕ' σε κατάσταση κορεσμού (Fredlund και Rahardjo, 1993). Η φαινόμενη συνοχή ενσωματώνει την ηλεκτροχημική σύνδεση στην εδαφική μύζηση και τη συνοχή λόγω της επιφανειακής έντασης στη διεπιφάνεια αέρα-ύδατος του ακόρεστου εδάφους:

$$c_a = c' + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^b \quad (6)$$

όπου

c_a = φαινόμενη συνοχή (kPa)

c' = ενεργή συνοχή (kPa)

$(\mu_a - \mu_w)$ = μύζηση (kPa)

ϕ^b = γωνία που αναπαριστά την σχέση μεταξύ της διατμητικής δύναμης και της μύζησης.

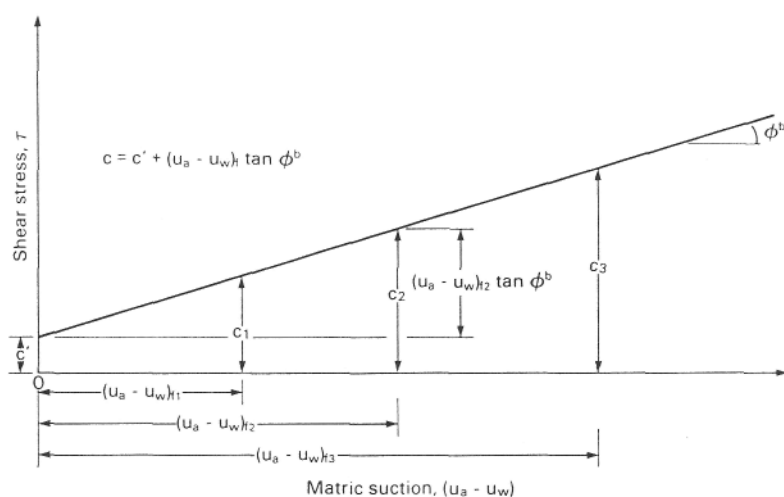
Soil Type	c' (kPa)	ϕ' (degrees)	ϕ^b (degrees)	Test Procedure	Reference
Compacted shale; $w = 18.6\%$	15.8	24.8	18.1	Constant water content triaxial	Bishop <i>et al.</i> (1960)
Boulder clay; $w = 11.6\%$	9.6	27.3	21.7	Constant water content triaxial	Bishop <i>et al.</i> (1960)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$,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

^aAverage value.

Πίνακας 2: Πειραματικές τιμές για το ϕ^b

Ο όρος ϕ^b είναι διαφορετικός για κάθε τύπο εδάφους, και για ένα δεδομένο έδαφος είναι διαφορετικός ανάλογο με την περιεκτικότητα σε υγρασία (Fredlund και

Rahardjo, 1993), (Simon et al, 2000). Δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για τιμές του ϕ^b σε αλλοβία υλικά. Εντούτοις, όταν αυτή η παράμετρος είναι γνωστή (ή ορίσουμε μια τιμή υποθετικά) τότε η φαινόμενη συνοχή (c_a) και η ενεργή συνοχή (c') μπορούν να υπολογιστούν μετρώντας την μύζηση με συσκευές και χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση.



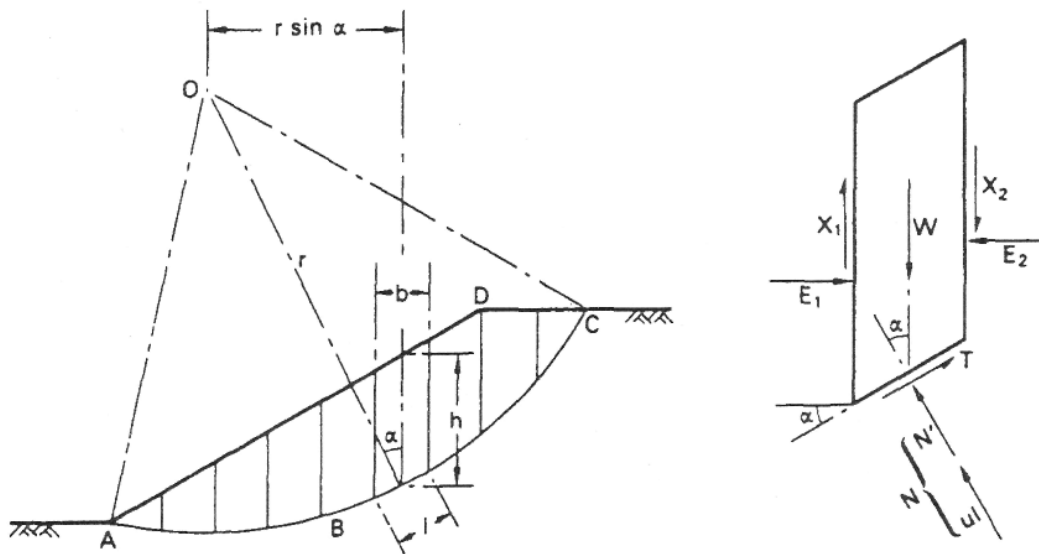
Σχήμα 11: Γραμμή παρεμπόδισης κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας στο επίπεδο $\tau = f(\mu_a - \mu_w)$

1.7 Υπολογισμός συντελεστή ασφάλειας

Η συνηθέστερη μέθοδος υπολογισμού, είναι η μέθοδος των λωρίδων. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε ένα πρανές με μια κυκλική μορφή αστοχίας. Ο όγκος που αστοχεί χωρίζεται σε n λωρίδες ώστε να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί.

Οι δυνάμεις που ασκούνται είναι οι εξής:

1. Το βάρος της λωρίδας, $W = \gamma b h$ (7) (γ_s στην περίπτωση κορεσμένου εδάφους). Στην περίπτωση που η λωρίδα αποτελείται από διαφορετικά στρώματα εδάφους τότε $W = b (\gamma_1 h_1 + \dots + \gamma_n h_n)$. (8)
2. Η δύναμη στην βάση, η οποία αναλύεται στην κάθετη δύναμη N και στην διατμητική δύναμη T . Η κάθετη δύναμη αναλύεται στην ενεργή δύναμη N' και στην άνοση του νερού U : $N = N' + U$ (9) όπου $U = ul$ (10), όπου u η πίεση των πόρων στην βάση της λωρίδας.



Σχήμα 12: Μέθοδος των Λωρίδων

3. Η διατμητική δύναμη στην βάση $T = \tau_m l$ (11)
4. Οι οριζόντιες δυνάμεις E_1, E_2 που ασκούνται στις πλευρές της λωρίδας.
5. Οι διατμητικές δυνάμεις X_1, X_2 που ασκούνται στις πλευρές της λωρίδας.

Κάθε λωρίδα τείνει να είναι ασταθής λόγω του βάρους της. Το βάρος της λωρίδας (W) δίνει ροπή ως προς το σημείο O με μοχλοβραχίονα $r \sin \alpha$, ροπή που τείνει να προκαλέσει ολίσθηση του πρανούς αν το κέντρο βάρους της λωρίδας είναι δεξιότερα από το O (Σχήμα 12). Αν το κέντρο βάρους της λωρίδας είναι αριστερά του O , τότε η ροπή που δίνει το βάρος της λωρίδας μειώνει την συνολική ροπή ολίσθησης. Έτσι η γωνία α χρησιμοποιείται προσημασμένη ώστε το $\sin \alpha$ να έχει το πρόσημο της γωνίας.

Ενάντια στις δυνάμεις ολίσθησης δρουν οι δυνάμεις τριβής και συνοχής (διατμητική αντοχή του εδάφους). Στην λωρίδα που εξετάζουμε ενάντια στην ολίσθηση δρα η δύναμη T . Η δύναμη T δίνει ροπή ευστάθειας ως προς το σημείο O με μοχλοβραχίονα r . Η διατμητική αντοχή μειώνεται στην περίπτωση που υπάρχουν υπόγεια ύδατα τα οποία δίνουν υδροστατική πίεση u στην επιφάνεια ολίσθησης.

Η επίλυση όλων των δυνάμεων E, X, T, N είναι εν γένει ένα υπερστατικό πρόβλημα και ως συνήθως γίνονται κάποιες παραδοχές για την επίλυση.

Εξετάζοντας την ισορροπία όλου του ολισθαίνοντος τμήματος $A-B-C-D$ λαμβάνουμε ροπές ως προς το σημείο O :

$$\sum Tr = \sum Wr \sin \alpha \quad (12)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης μπορεί να υπολογιστεί από την ασκούμενη διατμητική τάση στο τόξο A-B-C (τ_m) και από την διατμητική αντοχή που μπορεί να ενεργοποιηθεί σε αυτό το τόξο (τ_f).

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (13)$$

Η πιο πάνω σχέση γίνεται:

$$T = \tau_m l = \left(\frac{\tau_f}{F} \right) l \quad (14)$$

όπου l είναι το συνολικό μήκος του τόξου A-B-C.

Χρησιμοποιώντας τις διακριτές λωρίδες εφαρμόζουμε την σχέση (12) στην σχέση (14):

$$\sum \frac{\tau_f}{F} l = \sum W \sin \alpha \quad (15)$$

οπότε:

$$F = \frac{\sum \tau_f l}{\sum W \sin \alpha} \quad (16)$$

Χρησιμοποιώντας τις ενεργές τάσεις:

$$F = \frac{\sum (c' + \sigma' \tan \phi') l}{\sum W \sin \alpha} \quad (17)$$

ή

$$F = \frac{c' L_{AC} + \sum (N - ul) \tan \phi'}{\sum W \sin \alpha} \quad (18)$$

Η σχέση (18) είναι μια εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας. Για να υπολογιστούν οι απαραίτητες N , γίνονται κάποιες παραδοχές για να αρθεί η υπερστατικότητα ή αναζητείται μια πιο ακριβής λύση.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ευστάθειας πρανών για τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφαλείας.

1.8 Αλγόριθμοι ευστάθειας πρανών

1.8.1 Οριζόντια στρώματα

Η μέθοδος οριζόντιων στρωμάτων είναι μια περαιτέρω ανάπτυξη του τύπου αστοχίας σφηνών που αναπτύχθηκε από τους Simon και Curini (1998) και Simon et al (2000). Το μοντέλο είναι μια ανάλυση ισορροπίας ορίου στην οποία το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb χρησιμοποιείται για το κορεσμένο τμήμα της σφήνας και το κριτήριο Fredlund et Al (1978) χρησιμοποιείται για το ακόρεστο τμήμα. Εκτός από τη θετική και αρνητική πίεση πόρων-ύδατος, το πρότυπο ενσωματώνει στρωματοποίηση του εδάφους, αλλαγές στο μοναδιαίο βάρος του εδάφους σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία αλλά και την εξωτερική πίεση περιορισμού.

Το μοντέλο διαιρεί το προφίλ του πρανού σε πάνω από 5 στρώματα, τα οποία ορίζονται από τον χρήστη, με μοναδικές γεωτεχνικές ιδιότητες. Ο συντελεστής ασφάλειας δίνεται από:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^I (c_i' L_i + S_i \tan \phi_i^b + [W_i \cos \beta - U_i + P_i \cos(\alpha - \beta)] \tan \phi_i^a)}{\sum_{i=1}^I (W_i \sin \beta - P_i \sin(\alpha - \beta))} \quad (19)$$

όπου:

c_i' = ενεργή συνοχή του ι-οστού στρώματος (kPa)

L_i = μήκος του επιπέδου αστοχίας μέσα στο ι-οστό στρώμα (m)

S_i = δύναμη που παράγεται από την μύζηση στο ακόρεστο τμήμα της επιφάνειας αστοχίας (kN/m)

W_i = βάρος του ι-οστού στρώματος (kN)

U_i = η υδροστατική δύναμη άνωσης στο κορεσμένο τμήμα της επιφάνειας αστοχίας (kN/m)

P_i = υδροστατική πίεση λόγω της στάθμης του νερού (kN/m)

β = γωνία κλίσης επιπέδου αστοχίας

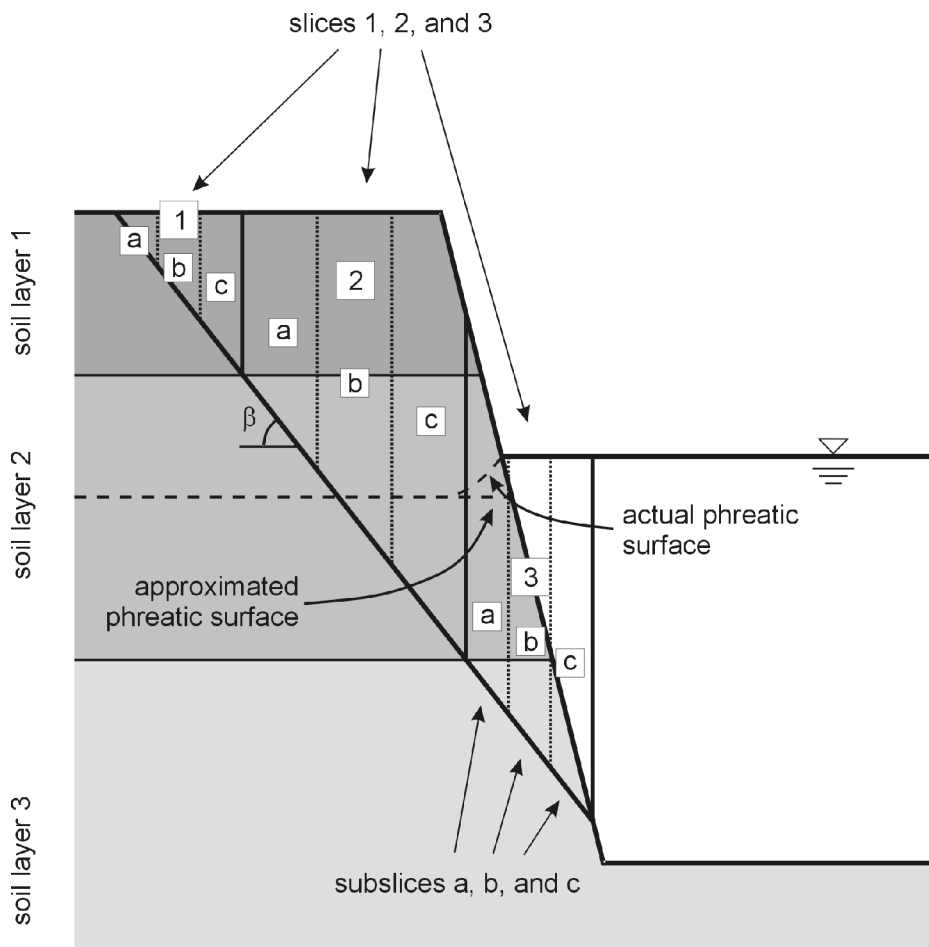
α = γωνία κλίσης πρανού

I = αριθμός στρωμάτων.

1.8.2 Κατακόρυφες λωρίδες

Η μέθοδος των κατακόρυφων λωρίδων είναι μια προσαρμογή της μεθόδου που εφαρμόστηκε στο μοντέλο CONCEPTS (Langendoen, 2000).

Όπως και στην μέθοδο οριζόντιων στρωμάτων, ακολουθείται η ανάλυση οριακής ισορροπίας. Εκτός από τις δυνάμεις που ενσωματώνονται στην μέθοδο οριζόντιων στρωμάτων, η μέθοδος κάθετων κομματιών υπολογίζει τις κανονικές και ενεργές δυνάμεις διάτμησης στα τμήματα αστοχίας. Στο σχήμα 13 βλέπουμε πως γίνεται η διαίρεση ενός τμήματος αστοχίας σε κομμάτια. Το πρηνές χωρίζεται σε κάθετα κομμάτια στα οποία υπάρχει ένας ίσος αριθμός J κομματιών και στρωμάτων.



Σχήμα 13: Διαίρεση ενός τμήματος αστοχίας σε κομμάτια

Κάθε κομμάτι υποδιαιρείται έπειτα σε τρία ακόμη κομμάτια ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια των υπολογισμών του F_s . Ο υπολογισμός του F_s είναι μια επαναληπτική διαδικασία 4 βημάτων: (1) οι κάθετες δυνάμεις που ενεργούν σε ένα κομμάτι αθροίζονται για να καθορίσουν την κανονική δύναμη που επιδρά στη βάση ενός

κομματιού, N_j (2) οι οριζόντιες δυνάμεις που ενεργούν σε ένα κομμάτι αθροίζονται για να καθορίσουν την ορθή δύναμη διεπιφάνειας, στο j (3) η διατμητική δύναμη διεπιφάνειας, I_{sj} υπολογίζεται από I_{nj} χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Morgenstern και Price (1965) και (4) οι οριζόντιες δυνάμεις αθροίζονται σε όλα τα κομμάτια για να υπολογιστεί το F_s .

Κατά την πρώτη επανάληψη, η ορθή και διατμητική δύναμη διεπιφάνειας αγνοούνται και η ορθή δύναμη N_j ισούται με:

$$\frac{W_j}{\cos \beta} \quad (20)$$

όπου W_j είναι το βάρος του j -οστού κομματιού. Η πρώτη επανάληψη δίνει το συνηθισμένο F_s . Οι ορθές δυνάμεις διεπιφάνειας καθορίζονται από:

$$I_{nj} = I_{n,j-1} - (c_j' L_j + S_j \tan \phi_j^b - U_j \tan \phi_j') \frac{\cos \beta}{F_s} + N_j (\sin \beta - \frac{\cos \beta \tan \phi_j'}{F_s}) \quad (21)$$

και οι διατμητικές δυνάμεις διεπιφάνειας καθορίζονται από:

$$I_{sj} = 0,4 I_{nj} \sin \left(\frac{\pi L_j}{\sum L_j} \right) \quad (22)$$

Μετά την πρώτη επανάληψη, η ορθή δύναμη, N_j ισούται με:

$$\frac{W_j + I_{s,j-1} - I_{sj} - \sin \beta \left(\frac{c_j' L_j + S_j \tan \phi_j^b - U_j \tan \phi_j'}{F_s} \right)}{\cos \beta + \frac{\tan \phi_j' \sin \beta}{F_s}} \quad (23)$$

Αυτό ολοκληρώνει τη δεύτερη επανάληψη. Συχνά, οι υπολογισμένες ορθές δυνάμεις διεπιφάνειας είναι αρνητικές (εφελκυσμός) κοντά στην κορυφή του τμήματος αστοχίας. Δεδομένου ότι το έδαφος είναι ανίκανο να αντισταθεί στις μεγάλες εκτατές πιέσεις, υποτίθεται ότι διαμορφώνεται μια εφελκυστική ρωγμή στο τελευταίο όριο διεπιφάνειας με τον εφελκυσμό.

Ο συντελεστής ασφάλειας καθορίζεται από την ισορροπία των δυνάμεων στην οριζόντια και κάθετη διεύθυνση για κάθε κομμάτι και στην οριζόντια διεύθυνση σε ολόκληρο το τμήμα αστοχίας.

$$F_s = \frac{\cos \beta \sum_{j=1}^J \left(c_j' L_j + S_j \tan \phi_j^b + [N_j - U_j] \tan \phi_j' \right)}{\sin \beta \sum_{j=1}^J (N_j) - P_j} \quad (24)$$

Το μοντέλο συνεχίζει τις επαναλήψεις έως ότου η τιμή του F_s συγκλίνει.

1.8.3 Διατμητική αστοχία πρόβολου

Ο αλγόριθμος διατμητικής αστοχίας πρόβολου είναι μια περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου που υιοθετείται στο πρότυπο CONCEPTS (Langendoen, 2000). Με απλά λόγια, ο συντελεστής ασφάλειας F_s είναι ίσο με την αναλογία της διατμητικής τάσης αστοχίας του εδάφους προς το βάρος του πρόβολου.

Εάν η όχθη είναι κατακλυσμένη τότε το βάρος των στρωμάτων που επηρεάζονται από το νερό μειώνεται στο κατακλυσμένο βάρος τους.

Με αυτή την μέθοδο, η κάθετη υδροστατική παράπλευρη δύναμη περιλαμβάνεται στον υπολογισμό. Ο F_s δίνεται από:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^I (c'_i L_i + S_i \tan \phi_i^b - U_i \tan \phi_i^i)}{\sum_{i=1}^I (W_i - P_i)} \quad (25)$$

1.9 Μηχανικά αποτελέσματα της βλάστησης στην ευστάθεια πρανών

Το χώμα είναι γενικά ισχυρό στη θλίψη, αλλά αδύνατο στον εφελκυσμό. Οι τινώδεις ρίζες των δέντρων και των ποωδών ειδών είναι ισχυρές στον εφελκυσμό αλλά αδύνατες στη θλίψη. Το χώμα που διαπερνάται από ρίζες, επομένως, αποτελεί ένα σύνθετο υλικό που έχει ενισχυμένη δύναμη (Thorne, 1990). Πολλοί συντάκτες έχουν υπολογίσει αυτήν την αύξηση χρησιμοποιώντας ένα μίγμα πειραμάτων πεδίου και εργαστηρίων. Οι Endo και Tsuruta (1969) χρησιμοποίησαν επί τόπου συσκευές διάτμησης για να μετρήσουν τη διαφορά δύναμης μεταξύ του εδάφους και του εδάφους με ρίζες. Οι Gray και Leiser (1982) και Wu (1984) χρησιμοποίησαν φυτά που αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο και υπολόγισαν τη δύναμη των ριζών σε μεγάλες συσκευές διάτμησης. Ο Wu (1979) ανέπτυξε μια ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση που υπολογίζει την αύξηση στην εδαφική δύναμη (c_r) ως συνάρτηση της εφελκυστικής δύναμης των ριζών, της τοπικής πυκνότητας και της στρέψης των ριζών κατά τη διάρκεια της διάτμησης:

$$c_r = T_r (A_r / A) (\cos \theta \tan \phi + \sin \theta) \quad (26)$$

όπου:

c_r = συνοχή λόγω των ριζών (kPa)

T_r = εφελκυστική δύναμη των ριζών (kPa)

A_r/A = περιοχή της διατμητικής επιφάνειας που καταλαμβάνεται από τις ρίζες, ανά μονάδα επιφάνειας (αναλογία περιοχής ριζών)

q = διατμητική στρέψη από την κατακόρυφο (μοίρες) και

f = γωνία τριβής του εδάφους (μοίρες)

Εκτός από τα αποτελέσματα σταθεροποίησης λόγω της ενίσχυσης των ριζών, η βλάστηση μπορεί να έχει επιπτώσεις στα πρανή με την αύξηση της επιφόρτισης. Η επιφόρτιση έχει ευεργετική αλλά και καταστρεπτική επίδραση. Αυξάνει τη μάζα που ενεργεί σε μια πιθανή επιφάνεια αστοχίας και αυξάνει την ορθή τάση και, επομένως, την διατμητική αντοχή λόγω τριβής. Είτε η καθαρή επίδραση σταθεροποιεί ή αποσταθεροποιεί εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας και την ενεργή γωνία τριβής (f') του εδάφους, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις αποσταθεροποιεί λόγω των απόκρημνων διατμητικών επιφανειών πρανών.

Η επιφόρτιση λόγω των μεγάλων παρόχθιων δέντρων υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την μάζα των δέντρων με την πυκνότητα βλάστησης (αριθμός δέντρων ανά μοναδιαία περιοχή). Ο όγκος των δέντρων υπολογίστηκε με την μέθοδο De Vries (De Vries, 1974):

$$V = \frac{\pi L(d_1^2 + d_2^2)}{8} \quad (27)$$

όπου

V = ο όγκος του ξύλου (m^3)

d_1 = διάμετρος του κορμού στη βάση (m)

d_2 = διάμετρος του κορμού στην κορυφή (m) και

L = μήκος του κορμού (m).

Ο όγκος μετατράπηκε σε μάζα χρησιμοποιώντας μια μέση πυκνότητα $0,96 \text{ g/cm}^3$ που μετρήθηκε για πλάτανο, sweetgum και σημύδα στο βόρειο Μισισιπή (Shields et al, 2001). Η μάζα μετατράπηκε σε επιφόρτιση υπολογίζοντας την δύναμη ανά μοναδιαία επιφάνεια, διαιρώντας το βάρος του δέντρου με την επιφάνεια έκτασης των ριζών.

1.10 Μοντέλο διάβρωσης ποδιού

1.10.1 Υπολογισμός της μέσης οριακής διατμητικής τάσης αστοχίας (τ_o)

Η μέση οριακή διατμητική τάση αστοχίας (τ_o) που ενεργεί σε κάθε κόμβο του υλικού της όχθης υπολογίζεται:

$$\tau_o = \gamma_w RS \quad (28)$$

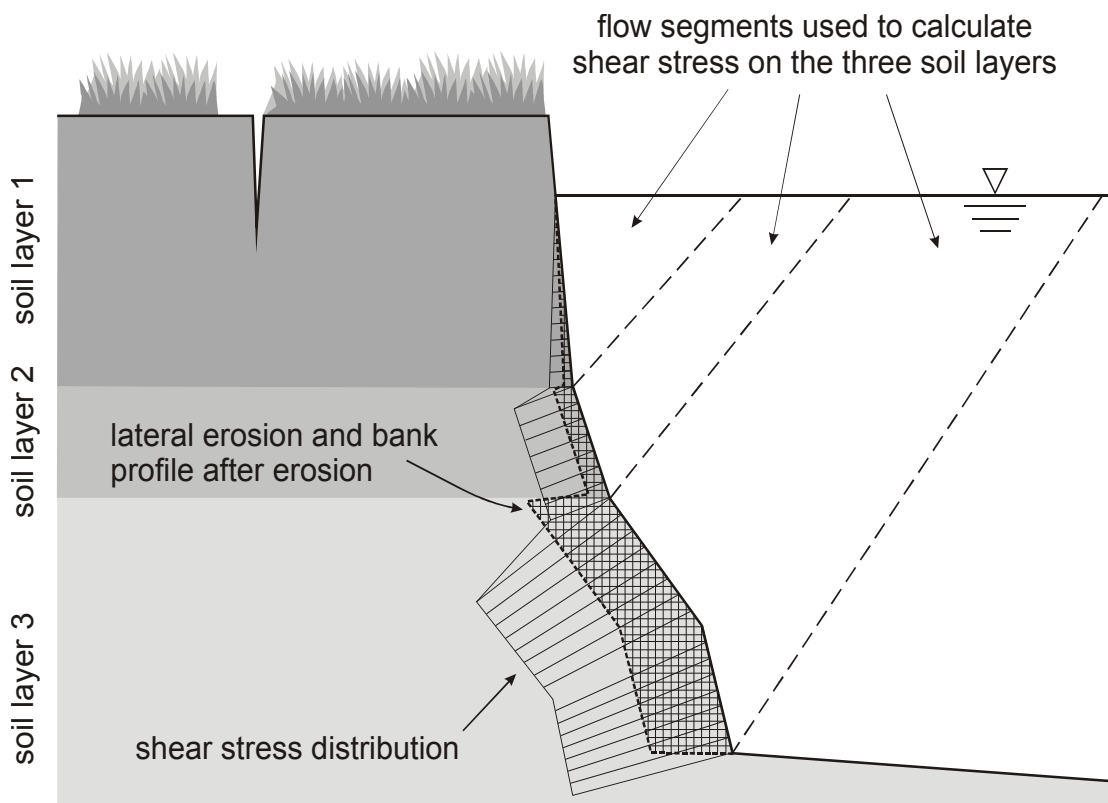
όπου

τ_o = μέση οριακή διατμητική τάση αστοχίας (Pa),

γ_w = ειδικό βάρος νερού (9,81 kN/m³),

R = τοπική υδραυλική ακτίνα (m) (που υπολογίζεται από το βάθος ύδατος) και

S = κλίση καναλιού (m/m).



Σχήμα 14: Κατάτμηση των τοπικών περιοχών ροής και υδραυλικών ακτινών.

Η μέση οριακή διατμητική τάση αστοχίας που ασκείται από τη ροή σε κάθε κόμβο καθορίζεται με τη διαίρεση της περιοχής ροής σε τμήματα που επηρεάζονται

μόνο από την τραχύτητα της όχθης και έπειτα με την περαιτέρω υποδιαίρεση για να καθοριστεί η περιοχή ροής που επηρεάζεται από την τραχύτητα του κάθε κόμβου. Η γραμμή που διαιρεί τα τμήματα της όχθης που επηρεάζονται υποτίθεται ότι διχοτομούν τη μέση γωνία της όχθης και την μέση γωνία του ποδιού (σχήμα 14 ανωτέρω).

Η υδραυλική ακτίνα της ροής σε κάθε τμήμα είναι η περιοχή του τμήματος (A) που διαιρείται με τη περιβρεχόμενη περίμετρο του τμήματος (P_n). Η διατμητική τάση αστοχίας του υγρού σύμφωνα με τις διαχωριστικές γραμμές δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τον προσδιορισμό της περιβρεχόμενης περιμέτρου.

1.10.2 Διαβρωσιμότητα και κρίσιμη διατμητική τάση αστοχίας

Μια ποντιζόμενη συσκευή jet-test έχει αναπτυχθεί από τον Hanson (1990) για να διεξάγει επιτόπιες δοκιμές διάβρωσης εδάφους. Αυτή η συσκευή έχει αναπτυχθεί βασισμένη στη γνώση των υδραυλικών χαρακτηριστικών ενός ποντιζόμενου jet και των χαρακτηριστικών της διάβρωσιμότητας του εδαφικού υλικού. Χρησιμοποιώντας αυτήν την συσκευή, οι Hanson και Simon (2001) ανέπτυξαν την ακόλουθη σχέση μεταξύ της κρίσιμης διατμητικής τάσης αστοχίας (τ_c) και του συντελεστή διαβρωσιμότητας (k) για συνεκτική ιλύ, αργιλοιλύ και αργίλο:

$$k = 2 \times 10^{-7} \tau_c^{-0,5} \quad (29)$$

1.10.3 Ποσοστά και ποσά διάβρωσης

Ένα μέσο ποσοστό διάβρωσης (σε m/s) υπολογίζεται για κάθε κόμβο με τη χρήση μιας προσέγγισης ακραίας διατμητικής τάσης αστοχίας (Partheniades, 1965). Αυτό το ποσοστό έπειτα ολοκληρώνεται σε σχέση με τον χρόνο ώστε να παραχθεί μια μέση απόσταση διάβρωσης (m):

$$E = k \Delta t (\tau_o - \tau_c) \quad (30)$$

όπου

E = απόσταση διάβρωσης (m),

k = συντελεστής διαβρωσιμότητας (m^3/Ns),

Δt = χρονικό βήμα (s),

τ_0 = μέση οριακή διατμητική τάση αστοχίας (Pa) και

τ_c = κρίσιμη διατμητική αντοχή (Pa).

Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με αυτήν που υιοθετείται στο μοντέλο CONCEPTS (Langendoen, 2000) εκτός από το ότι η διάβρωση υποτίθεται ότι εμφανίζεται ορθά στην τοπική γωνία της όχθης και όχι οριζόντια.

1.11 Οι βροχοπτώσεις ως παράγοντας κατολισθήσεων

Οι βροχοπτώσεις είναι ένας από τους κυριότερους μηχανισμούς εκκίνησης του φαινομένου των κατολισθήσεων, μέσα από την μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους ή και της αύξησης της πίεσης του νερού των πόρων στην δυνητική επιφάνεια ολίσθησης. Οι κατολισθήσεις που οφείλονται στην κατείδυση της βροχής είναι συνήθως ρηχές. Το βάθος εκδήλωσης του φαινομένου ελέγχεται συχνά από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την κλίση. Ο κορεσμός από την επιφάνεια ως την πιθανή επιφάνεια ολίσθησης μπορεί να προκαλέσει την αστοχία. Η κυριότερη υδρογεωτεχνική διαδικασία που οδηγεί στην αστοχία είναι η μείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Αυτού του είδους οι κατολισθήσεις στις περισσότερες περιπτώσεις εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια ή αμέσως μετά από μια καταιγίδα (Δεβενέ Σ. 2004)

Ο Wicczorek συμπέρανε ότι βαθιές ολισθήσεις σε εδάφη προκαλούνται συνήθως εξαιτίας μεγάλης διάρκειας και μέτριας έντασης καταιγίδας ενώ ρηχές ολισθήσεις εδάφους πάνω από βράχο προκαλούνται για σύντομης διάρκειας και υψηλής έντασης βροχόπτωση. Οι συσχετίσεις αυτές βροχοπτώσεων και κατολισθήσεων συγκεντρώνονται σε αστοχίες φυσικών πρανών.

Η βροχόπτωση υψηλής έντασης αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα που συμβάλλει στη δημιουργία κατολισθήσεων στην περίπτωση που επέλθει κορεσμός του εδάφους ή ανύψωση του υδροφόρου. Οι έντονες καταιγίδες, ακόμη και μικρής διάρκειας, μπορούν να προκαλέσουν ρηχές κατολισθήσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μέτριες σε ένταση βροχοπτώσεις, σημαντικής διάρκειας, μπορούν να επαναδραστηριοποιήσουν τις κατολισθήσεις. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, όπως ο αρχικός υδροφόρος ορίζοντας και η διάρκεια της προηγηθείσας βροχόπτωσης, που είναι επίσης σημαντικοί.

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή μοντέλου ευστάθειας πρανών

2.1 Μοντέλο ευστάθειας πρανών

Το μοντέλο ευστάθειας πρανών συνδυάζει τρία μοντέλα τα οποία υπολογίζουν τον συντελεστή ασφάλειας (F_s) για πολυστρωματικά πρανή ποταμών. Οι μέθοδοι προσομοίωσης είναι οριζόντια στρώματα (Simon et al., 2000), κάθετα κομμάτια με τάση θραύσης (Morgenstern and Price, 1965) και αστοχίες προβόλων (Thorne and Tovey, 1981). Το μοντέλο μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί ώστε να ενσωματώσει τα αποτελέσματα γεωφασμάτων ή άλλων μέτρων σταθεροποίησης πρανών που έχουν επιπτώσεις στην εδαφική αντοχή.

Το μοντέλο ερμηνεύει την αντοχή μέχρι πέντε εδαφολογικών στρωμάτων, την επίδραση της πίεσης πόρου-ύδατος (θετική και αρνητική (μύζηση μήτρας)), την περιοριστική πίεση λόγω της ροής του ποταμού και της εδαφικής ενίσχυσης και επιφόρτισης λόγω της βλάστησης.

Εισάγουμε τις συντεταγμένες του πρανούς (Εισαγωγή Γεωμετρίας) και τρέχουμε τη μακροεντολή γεωμετρίας για να δημιουργήσουμε το προφίλ του πρανούς, κατόπιν εισάγουμε τους εδαφολογικούς τύπους, τη φυτοκάλυψη και τον πίνακα ύδατος ή τις πιέσεις πόρου-ύδατος (μοντέλο πρανούς βήμα 2 και μοντέλο δεδομένων πρανούς) για να βρούμε το F_s .

Το πρανές είναι σταθερό εάν το F_s είναι μεγαλύτερο από 1,3, ώστε να παρέχει ένα περιθώριο ασφάλειας για αβέβαια ή μεταβλητά στοιχεία. Τα πρανή με τιμή F_s μεταξύ 1,0 και 1,3 θεωρούνται "υπό όρους σταθερά", δηλ. σταθερά αλλά με λίγο περιθώριο ασφάλειας. Τα πρανή με τιμή F_s λιγότερο από 1,0 είναι ασταθή.

Αυτή η έκδοση του μοντέλου υποθέτει υδροστατικές συνθήκες κάτω από τη στάθμη του νερού, και γραμμική παρεμβολή της μύζησης επάνω από τη στάθμη νερού (εκτός αν χρησιμοποιούνται τα στοιχεία πίεσης πόρου-ύδατος του χρήστη).

Το μοντέλο μπορεί είτε να χρησιμοποιήσει τα κατ' εκτίμηση δεδομένα εισόδου όπου κανένα στοιχείο πεδίου δεν είναι διαθέσιμο ή ως πρώτη λύση, είτε μπορεί να ρυθμιστεί να χρησιμοποιήσει τα στοιχεία του χρήστη. Τα δεδομένα του χρήστη μπορούν να προστεθούν στα άσπρα κιβώτια.

2.2 Μοντέλο διάβρωσης ποδιού πρανούς

Το μοντέλο διάβρωσης του ποδιού του πρανούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο για την εκτίμηση της υδραυλικής διάβρωσης του πρανούς και του ποδιού του πρανούς από την υδραυλική διατμητική τάση. Το μοντέλο προορίζεται πρώτιστα για χρήση σε μελέτες όπου η διάβρωση του ποδιού του πρανούς απειλεί την ευστάθεια του πρανούς. Τα αποτελέσματα της προστασίας από την διάβρωση στο πρανές και το πόδι του μπορούν να ενσωματωθούν για να παρουσιάσουν τα αποτελέσματα των μέτρων ελέγχου διάβρωσης.

Το πρότυπο υπολογίζει την οριακή διατμητική τάση από τη γεωμετρία του καναλιού, και θεωρεί την κρίσιμη διατμητική τάση και διαβρωσιμότητα σε δύο χωριστές ζώνες με ενδεχομένως διαφορετικά υλικά, το πρανές και το πόδι του πρανούς.

Αυτό είναι επειδή το μοντέλο υποθέτει ότι η διάβρωση δεν είναι περιορισμένη μεταφορά και δεν ενσωματώνει, σε καμία περίπτωση, προσομοίωση μεταφοράς ιζημάτων.

Εισάγουμε τις συντεταγμένες του πρανούς, τις παράμετρους της ροής και την κλίση του καναλιού (Εισαγωγή Γεωμετρίας), εισάγουμε έπειτα τους τύπους υλικών του πρανούς και του ποδιού του πρανούς και ενδεχομένως την προστασία έναντι διάβρωσης (Μοντέλο ποδιού βήμα 2 και μοντέλο δεδομένων ποδιού). Έπειτα, τρέχουμε τη μακροεντολή διατμητικής τάσης για να καθορίσουμε πόση διάβρωση μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου γεγονότος καταγίδας.

2.3 Χρήση των μοντέλων ευστάθειας πρανούς και διάβρωσης ποδιού

Το μοντέλο ευστάθειας πρανούς και διάβρωσης ποδιού είναι ένα φυσικά-βασισμένο μοντέλο. Αντιπροσωπεύει δύο ευδιάκριτες διαδικασίες, δηλαδή την αστοχία λόγω διάτμησης ενός κομματιού εδάφους μεταβλητής γεωμετρίας και την διάβρωση του πρανούς και του ποδιού του λόγω ροής. Η επίδραση της διάβρωσης του ποδιού, της βλάστησης ή άλλων μέτρων προστασίας του πρανούς και του ποδιού

μπορεί να είναι εξηγηθεί με τον υπολογισμό του πραγματικού συντελεστή ασφάλειας (F_s) του πρανούς. Για να λάβουμε μια τιμή του F_s ή να μοντελοποιήσουμε ακριβώς την διάβρωση του ποδιού, πρέπει ο χρήστης να συλλέγει τα δικά του στοιχεία για κάθε περιοχή και να εισάγει αυτές τις τιμές στα κατάλληλα παράθυρα. Εντούτοις, σε πολλές περιπτώσεις πεδίων αυτά τα στοιχεία δεν είναι όλα διαθέσιμα ή συλλέξιμα. Επιπλέον, ο μηχανισμός αστοχίας μπορεί να μην ταιριάζει ακριβώς με ένα από τα μοντέλα, ή τα φορτία ιζημάτων μπορεί να είναι τόσο υψηλά ώστε να μειωθεί η δυνατότητα διάβρωσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεκτικά ως ένα κατά προσέγγιση δείκτη της σταθερότητας του πρανούς ή του ποδιού όπως με ένα BEHI ή κάποια άλλη μέθοδο βασισμένη σε δείκτες. Για να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο κατ' αυτό τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να εισαγάγει το σχεδιάγραμμα της όχθης και να διαιρέσει την όχθη σε στρωματογραφικά στρώματα βασισμένα στα υλικά που απαριθμούνται στα παράθυρα καταλόγων (άμμος, ιλύς, άργιλος κ.λπ.). Εάν ο χρήστης κάνει αυτό πρέπει να γνωρίζει ότι και η τιμή F_s και τα ποσά διάβρωσης θα είναι προσεγγίσεις, δεδομένου ότι υπάρχει ιδιαίτερη αβεβαιότητα και μεταβλητότητα στις τιμές που επιλέγονται για κάθε τύπο υλικού. Σε σχέση με το F_s , ο χρήστης καλό θα ήταν να χρησιμοποιεί ένα περιθώριο ασφάλειας κατά την ταξινόμηση των οχθών ως σταθερών. Τυπικά περιθώρια είναι 1,3 ή 1,5, ανάλογα με πόσο κρίσιμο είναι το πρανές.

Για να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο αρχίζουμε με την εισαγωγή της γεωμετρίας (Input Geometry). Η σειρά που χρησιμοποιούνται τα στοιχεία είναι επιλέξιμα από τον χρήστη. Εντούτοις, εάν επιλέξουμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο διάβρωσης ποδιού (Toe Erosion), πρέπει τότε να χρησιμοποιήσουμε τα Toe Model Data και Toe Model Step 2 για να υπολογίσουμε την ποσότητα της διάβρωσης του ποδιού. Για να χρησιμοποιήσουμε μόνο το μοντέλο ευστάθειας πρανούς (Bank Stability), πρέπει να ξεκινήσουμε με την εισαγωγή της γεωμετρίας (Input Geometry) και έπειτα να χρησιμοποιήσουμε τα Bank Model Data και Bank Model Step 2 για να υπολογίσουμε τον συντελεστή ασφάλειας F_s . Στο Bank Model Step 2 μπορούμε να δούμε το υπολογισμένο σχεδιάγραμμα αστοχίας του πρανούς. Εάν είχαμε επιλέξει να εισάγουμε μια τάση θραύσης, τότε κάθε φορά που θα κάναμε μια αλλαγή στο bank Model Data ή στο Bank Model Step 2, θα έπρεπε να ξανατρέχουμε την μακροεντολή Bank Geometry στο Input Geometry. Τα αποτελέσματα μπορούν να μεταφερθούν πίσω στο μοντέλο για επιπλέον επαναλήψεις χρησιμοποιώντας το κουμπί Export

Coordinates bank into model. Εάν το επιλέξουμε τότε η επιλογή A επιλέγεται αυτόματα στο Input Geometry.

Η γεωμετρία του πρανούς μπορεί να εισαχθεί με δύο τρόπους. Αρχικά, η επιλογή A επιτρέπει να εισαχθούν μετρημένες τιμές κλίσεων για να λάβουμε υψηλής ανάλυσης σύνθετες κλίσεις. Εναλλακτικά, η επιλογή B παράγει ένα σχεδιάγραμμα πρανούς που βασίζεται σε μια δεδομένη γωνία πρανούς, το ύψος του πρανούς, τη γωνία και το μήκος του ποδιού. Εάν επιλέξουμε την επιλογή B τότε το πρανές αυτόματα δημιουργείται έτσι ώστε το πλάτος του στη στέψη να είναι 1m μεγαλύτερο από ότι το κομμάτι της αστοχίας. Λόγω των πολλών επιλογών αυτό χρειάζεται κάποια διευκρίνιση:

- Εάν επιλέξουμε την A επιλογή τότε τα πάντα διαβάζονται από τα κελιά στην αριστερή πλευρά.
- Εάν επιλέξουμε την B επιλογή τότε παράγεται το σχεδιάγραμμα του πρανούς και η βάση της επιφάνειας διάτμησης τίθεται στην κορυφή του ποδιού, αλλά η γωνία διαβάζεται από το κελί H29. Μπορείτε φυσικά να χρησιμοποιήσουμε τον υπολογιστή της επιφάνειας διάτμησης για να πάρουμε αυτήν την τιμή, αλλά θα πρέπει να την εισαγάγουμε με το χέρι.
- Εάν επιλέξουμε την B επιλογή και την επιλογή "αυτόματα ενημερώστε την γωνία επιφάνειας διάτμησης" τότε η γωνία της επιφάνειας διάτμησης υπολογίζεται αυτόματα και διαβάζεται βασισμένη στη γωνία τριβής στο κελί H39 και τη γωνία του πρανούς στο κελί H21.

Μπορούμε να δούμε το σχεδιάγραμμα του πρανούς στο Toe Model Step 2 ή στο Bank Model Step 2.

2.4 Δομή του μοντέλου

Το μοντέλο είναι ένα αρχείο excel το οποίο αποτελείται από 8 φύλλα εργασίας:

1. Εισαγωγική σελίδα, η οποία περιλαμβάνει ένα γενικό θεωρητικό υπόβαθρο.
2. Σελίδα τεχνικού υπόβαθρου, η οποία παρέχει τις εξισώσεις για την ανάλυση ευστάθειας οι οποίες περιλαμβάνουν τις αρνητικές και θετικές πιέσεις πόρων – ύδατος, τις επιδράσεις της βλάστησης και τέλος τον αλγόριθμο για την διάβρωση του ποδιού.

3. Σελίδα χρήσης του μοντέλου και συχνών ερωτήσεων, η οποία περιλαμβάνει την μεθοδολογία για την εφαρμογή των χαρακτηριστικών του μοντέλου, συμπεριλαμβάνοντας και διάφορα μικρά κόλπα και μυστικά για την εργασία με την γεωμετρία των πρανών, την επιλογή της διατμητικής επιφάνειας, τα στρώματα του εδάφους, τον πίνακα για την πίεση πόρων – ύδατος, την βλάστηση και τον αλγόριθμο διάβρωσης ποδιού.
4. Σελίδα εισαγωγής της γεωμετρίας (Input Geometry), στην οποία εισάγουμε τις συντεταγμένες για το προφίλ του πρανούς, το πάχος του στρώματος του εδάφους, και τις παραμέτρους ροής.
5. Σελίδα μοντέλου ποδιού βήμα 2 (Toe Model Step 2), στην οποία εισάγουμε τα δεδομένα διαβρωσιμότητας για το πόδι του πρανούς και τα στρώματα του εδάφους, και εκτελούμε τον υπολογισμό της διατμητικής δύναμης.
6. Σελίδα δεδομένων μοντέλου ποδιού (Toe Model Data), στην οποία εισάγουμε τις μη προκαθορισμένες τιμές για την διαβρωσιμότητα.
7. Σελίδα μοντέλου πρανούς βήμα 2 (Bank Model Step 2), στην οποία εισάγουμε τις ιδιότητες (γεωτεχνικές) του υλικού του πρανούς, πληροφορίες για τον πίνακα της πίεσης πόρων – ύδατος, και λαμβάνουμε αποτελέσματα.
8. Σελίδα δεδομένων μοντέλου πρανούς (Bank Model Data), στην οποία εισάγουμε τις μη προκαθορισμένες τιμές για τις ιδιότητες (γεωτεχνικές) του υλικού του πρανούς.

2.5 Διαδικασία χρήσης του μοντέλου

Βήμα 1:

Ανοίγοντας το excel αρχείο bsandtem4.1, επιλέγουμε την ενεργοποίηση των μακροεντολών.

Το πρώτο πράγμα που βλέπουμε είναι το φύλλο της εισαγωγής όπου όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μπορούμε να βρούμε διάφορες πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο.

Βήμα2:

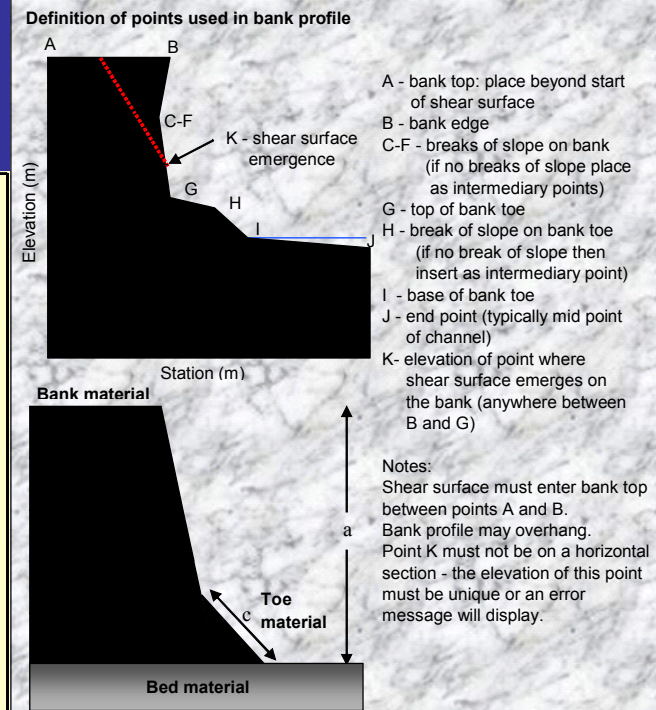
Πηγαίνουμε στο φύλλο εισαγωγής της γεωμετρίας

Input bank geometry and flow conditions

Work through all 3 sections then hit the "Run Bank Geometry Macro" button.

- 1) Select EITHER Option A or Option B for Bank Profile and enter the data in the relevant box- cells in the alternative option are ignored in the simulation and may be left blank if desired.
 - 2) Enter bank material layer thicknesses (if bank is all one material it helps to divide it into several layers).
 - 3) If bank is submerged then select the appropriate channel flow elevation to include confining pressure and calculate erosion amount; otherwise set to an elevation below the bank toe.
- You can check to ensure bank profile is correct on either **Toe Model Step 2** or **Bank Model Step 2**.

Option A - Draw a detailed bank profile using the boxes below			Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile		
<input type="radio"/> Option A			<input checked="" type="radio"/> Option B		
Point	Station (m)	Elevation (m)			
A	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> a) Input bank height (m)		
B	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> b) Input bank angle (°)		
C	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> c) Input bank toe length (m)		
D	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> d) Input bank toe angle (°)		
E	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Either input shear surface angle;		
F	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> Input shear surface angle		
G	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Or check box and have the model calculate shear surface angle from soil friction angle and bank angle		
H	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> Calculate shear surface angle from soil friction		
I	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> Input mean soil friction angle		
J	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Need to know the shear surface angle?		
K - shear emergence <input type="text"/>			<input type="text"/> Input mean bank angle		
Shear surface angle <input type="text"/>			<input type="text"/> Input mean soil friction angle		
			<input type="text"/> 0.0 Recommended shear surface angle		
2. Bank layer thickness (m)			3. Channel flow parameters		
	Bank layer thickness (m)	Elevation of layer base (m)			
Layer 1	<input type="text"/>	0.00	<input type="text"/> Input elevation of flow (m)		
Layer 2	<input type="text"/>	0.00	<input type="text"/> Input slope of channel (m/m)		
Layer 3	<input type="text"/>	0.00	<input type="text"/> Input duration of flow (hrs)		
Layer 4	<input type="text"/>	0.00			
Layer 5	<input type="text"/>	0.00			
Parallel layers, starting from point B					



Select which component you wish to use first. You will be automatically redirected to the relevant worksheet after hitting the Run Bank Geometry Macro button

Bank Stability component ▼

Αρχικά επιλέγουμε την επιλογή B για την γεωμετρία του πρανού και εισάγουμε τα δεδομένα γεωμετρίας.

Βήμα 3:

Στην συνέχεια εισάγουμε τα δεδομένα για το πάχος των στρωμάτων του πρανού. Σε περίπτωση που το πρανές είναι από μόνο ένα υλικό τότε και πάλι το χωρίζουμε σε στρώματα. Το στρώμα 5 πρέπει να τελειώνει σε ή κάτω από την βάση του ποδιού του πρανού. Επομένως η βασική ανύψωση του στρώματος 5 πρέπει να είναι ίση ή μικρότερη από την ανύψωση του σημείου I (βάση του ποδιού του πρανού) εάν έχουμε επιλέξει την A επιλογή ή μηδέν εάν είμαστε στην B επιλογή.

Έπειτα εισάγουμε τα δεδομένα για την ροή του καναλιού.

Βήμα 4:

Αφού έχουμε εισάγει όλα τα δεδομένα στο φύλλο γεωμετρίας, επιλέγουμε την διάβρωση ποδιού και τρέχουμε την μακροεντολή της γεωμετρίας του πρανούς.

Βήμα 5:

Έχοντας ολοκληρώσει το προηγούμενο βήμα το μοντέλο μας πηγαίνει στο φύλλο «Μοντέλο ποδιού βήμα 2» στο οποίο εισάγουμε τους τύπους των εδαφών που αποτελούν τα στρώματα του πρανούς.

Input bank materials

Specify the erodibility of the different materials. Use the drop down boxes to select material type or select "Enter own data" and add values in the 'Bank Model Data' worksheet. If you select a material, the values shown in the 'Toe Model Data' worksheet will be used. Once you are satisfied that you have completed all necessary inputs, hit the "Run Shear Stress Macro" button (Center Right of this page).

Bank Material					Bank Toe Material	Bed material
Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5		
Erodible cohesive	Moderate cohesive	Moderate cohesive	Erodible cohesive	Moderate cohesive	Enter own data	Fixed bed
0.10	5.00	5.00	0.10	5.00	Enter own data	248.83
0.316	0.045	0.045	0.316	0.045	Enter own data	0.006

Bank Protection
No protection

Bank Toe Protection
No protection

Run Shear Stress Macro

Average applied boundary shear stress	#DIV/0!	Pa
Maximum Lateral Retreat	#VALUE!	cm
Mean Eroded Area - Bank	#VALUE!	m ²
Mean Eroded Area - Bank Toe	#VALUE!	m ²
Mean Eroded Area - Bed	0.00	m ²
Mean Eroded Area - Total	#VALUE!	m ²

Export Coordinates back into model

Introduction / Model use and FAQ / Input Geometry / **Toe Model Step 2** / Toe Model Data / Bank Model Step 2 / Bank Model Data / Uni

Βήμα 6:

Στην συνέχεια πηγαίνουμε στο φύλλο «Δεδομένα μοντέλου ποδιού» και εισάγουμε τα δεδομένα για το πόδι του πρανούς.

Έπειτα επιστρέφουμε στο προηγούμενο φύλλο και τρέχουμε την μακροεντολή της διατμητικής τάσης. Τέλος εξάγουμε τα νέα δεδομένα στο φύλλο «Εισαγωγή Γεωμετρίας».

Βήμα 7:

Τα νέα δεδομένα έχουν συμπληρώσει τα κενά στην επιλογή A.

Με αυτή την διαδικασία έχουμε υπολογίσει αρχικά πόση είναι η διάβρωση που υφίσταται το πόδι του πρανούς.

Στη συνέχεια με τα νέα δεδομένα που έχουμε, θα τρέξουμε πάλι το μοντέλο για να διαπιστώσουμε εάν το πρανές είναι ασταθές ή σταθερό.

Στην επιλογή A θα πρέπει να εισάγουμε δύο ακόμη τιμές: την ανύψωση της επιφάνειας διάτμησης και την γωνία της επιφάνειας διάτμησης.

Βήμα 8:

Έχοντας ολοκληρώσει την εισαγωγή των δεδομένων, πηγαίνουμε στο φύλλο «Μοντέλο πρανούς βήμα 2» ώστε να επιλέξουμε τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα στρώματα του πρανούς. Επιστρέφουμε στην συνέχεια στο προηγούμενο φύλλο και επιλέγουμε να τρέξουμε και πάλι το μοντέλο αλλά αυτή την φορά για το μοντέλο ευστάθειας πρανών.

Βήμα 9:

Αρχικά ερωτώμαστε ένα θέλουμε να επιλέξουμε μια αστοχία προβόλου. Εάν επιλέξουμε όχι τότε θα εμφανιστεί και άλλο μήνυμα, για το αν θέλουμε να εισάγουμε μια τάση θραύσης. Σε περίπτωση που επιλέξουμε να εισάγουμε μια τάση θραύσης τότε θα ερωτηθούμε για την τιμή που θέλουμε να έχει.

Στην συνέχεια συμπληρώνουμε τα δεδομένα για την πίεση πόρων – ύδατος.

Έχοντας εισάγει όλα τα δεδομένα υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς.

Διαφορετικά αποτελέσματα θα πάρουμε σε περίπτωση που θεωρήσουμε ότι υπάρχει βλάστηση στο πρανές μας και μάλιστα η σταθερότητά του εξαρτάται από τον τύπο της βλάστησης και το ποσοστό επικάλυψης.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή περιοχής μελέτης

3.1 Γεωλογία – Τεκτονική ευρύτερης περιοχής

3.1.1 Γενική γεωλογία

Η περιοχή μελέτης απεικονίζεται στο γεωλογικό χάρτη (κλ. 1:50,000) απόσπασμα του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 15 (Mutti et al., 1970).

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης δομείται από ασβεστόλιθους, πλειοπλειστοκαινικά ιζήματα και αλλουβιακές αποθέσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται είναι οι ακόλουθοι, από τους παλαιότερους προς τους νεώτερους:

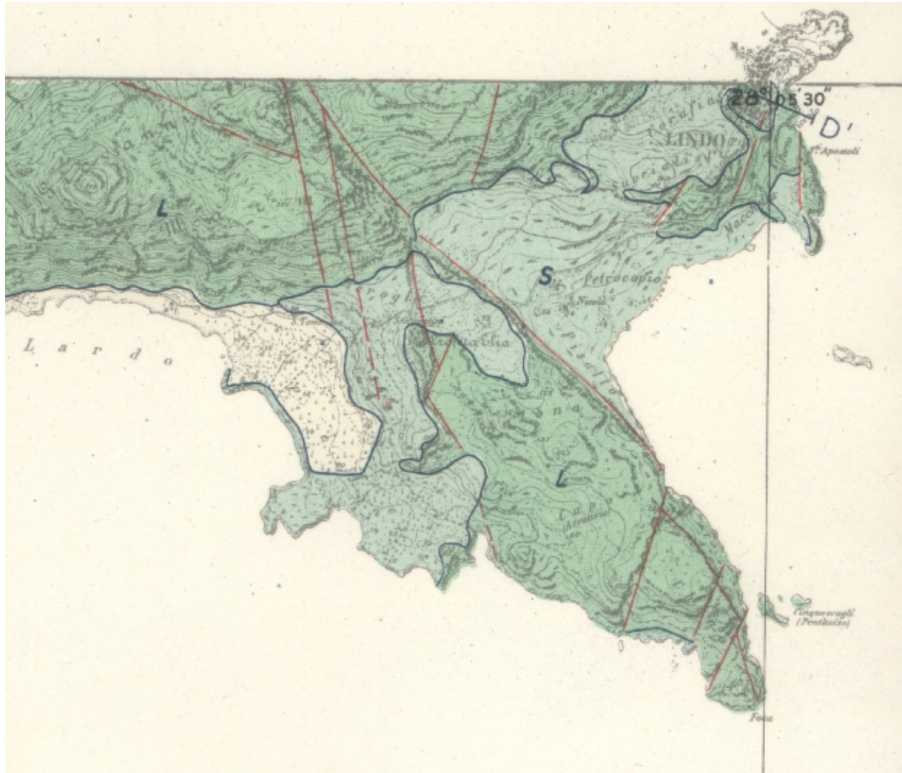
α) Ασβεστόλιθοι Κρητιδικού, της αλλόθθονης τεκτονικής ενότητας του Σάλακα (ασβεστόλιθοι Λίνδου, L). Είναι μαζώδεις, έντονα καρστικοποιημένοι - σπηλαιωμένοι και ρηγματωμένοι. Αποτελούν το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής.

β) Σχηματισμός Σγουρού (S). Αποτελείται κατά βάση από εναλλαγές αργίλων, άμμων και χαλαρών κροκαλοπαγών και επικάθεται ασύμφωνα στους ασβεστόλιθους. Στο σχηματισμό Σγουρού υπέρκειται οργανογενής ασβεστόλιθος (ranchina, coquina limestone), πάχους 0.5 – 4.0 m.

γ) Αλλουβιακές Αποθέσεις. Οι φάσεις του σχηματισμού Σγουρού καλύπτονται κατά θέσεις από νεώτερα υλικά αναβαθμίδων, σύγχρονων προσχώσεων, κατολισθήσεων και επιφανειακών επιτόπου αποσαθρώσεων (al). Εκτιμάται ότι το πάχος τους ανέρχεται σε 0.5 – 1.5 m.

3.1.2 Τεκτονική ευρύτερης περιοχής



Από τεκτονική άποψη η ευρύτερη περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από το τρίτο τεκτονικό σύστημα της Ρόδου (Levantine and Post - Levantine Structures). Τούτο αποτελεί ένα ευρέως ανεπτυγμένο σύστημα κατακόρυφων ρηγμάτων, το οποίο κατατέμνει τα δύο πρώτα τεκτονικά συστήματα της νήσου και την διαχωρίζει σε ρηξιγενή κέρατα (horsts) και τάφρους (grabens). Το πυκνό δίκτυο των ρηγμάτων αυτών αντιπροσωπεύει την πλέον εντυπωσιακή δομική και μορφολογική εικόνα της νήσου.



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

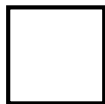
ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

AI : Αλλουβιακές Αποθέσεις
S : Σχηματισμός Σγουρού
 Όριο

 : Ρήγμα
 : Γεωλογικό

ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ

L : Ασβεστόλιθος Λίνδου

 : Θέση Έργου

Σχήμα 15. Γεωλογικός Χάρτης Ευρύτερης Περιοχής Μελέτης (κλίμακα 1:50,000)

3.2 Γεωμορφολογία, Γεωλογία, Υδρογεωλογία Περιοχής Μελέτης

3.2.1 Γεωμορφολογία – Υφιστάμενη κατάσταση

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στα όρια του Δήμου Λινδίων, στα ΝΑ της Ρόδου (Σχήμα 15). Εκτείνεται σε μήκος περίπου 500 m και εύρος 50 m, με μέσο υψόμετρο 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Στην παράκτια ζώνη έχουν παρατηρηθεί εδαφικές αστάθειες, οι οποίες λόγω του βροχερού χειμώνα 2002-2003, έχουν επεκταθεί προς το εσωτερικό της ενδοχώρας.

Στην ακτή έχουν παρατηρηθεί:

- Υποσκαφές της υποκείμενης οργανογενών ασβεστολίθων μάργας, αφενός μεν λόγω των γενικών ατμοσφαιρικών συνθηκών της περιοχής, αφετέρου δε λόγω της δράσης των θαλασσιών κυμάτων, που προκαλούν, καταρχάς, τη δημιουργία παρακατακορύφων ρωγμών, παραλλήλων με την διεύθυνση των πρηνών, εύρους $10 \div 20$ cm και βάθους μέχρι και 7 m και στη συνέχεια αποκολλήσεις και ανατροπές των υπερκειμένων ασβεστολιθικών ογκολίθων.
- Ρευστοποίηση της μάργας και πρόκληση λασποροής, είτε λόγω απευθείας διαβροχής τους είτε λόγω διείσδυσης του νερού των βροχών μέσα στις ρωγμές των υπερκειμένων ασβεστολίθων.

Στο εσωτερικό τα φαινόμενα εδαφικής αστάθειας εξελίσσονται με μορφή εδαφικών θραύσεων.

3.2.2 Γεωλογία

Η περιοχή μελέτης δομείται από πλειοπλειστοκαινικά ιζήματα, αλλουβιακές αποθέσεις και τεχνητές επιχώσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται είναι οι ακόλουθοι, από τους παλαιότερους προς τους νεώτερους:

α) **Σχηματισμός Σγουρού (S)** που αποτελείται, κατά βάση, από εναλλαγές αργίλων, άμμων και χαλαρών κροκαλοπαγών (Sm). Στο σχηματισμό Σγουρού υπέρκειται οργανογενής ασβεστόλιθος “panchina” (Sp), πάχους 0.5 – 4.0 m. Η αργιλοαμμώδης φάση του σχηματισμού απαντάται σε μεγάλη έκταση στην περιοχή Πεύκων, όπου σχηματίζει πρηνή ύψους 8.0 – 10.0 m. Οι ανώτεροι ορίζοντες εμφανίζονται λιγότερο συνεκτικοί, ενώ κατά θέσεις η άργιλος έχει μέση ως υψηλή πλαστικότητα. Στους

βαθύτερους ορίζοντες, όπως προέκυψε από τα στοιχεία των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, ο σχηματισμός έχει χαρακτήρα ημιβράχου (“μάργας”), με αυξημένη συνοχή και πλαστικότητα. Τα πρηνή της αργιλικής φάσης χαρακτηρίζονται από έντονα φαινόμενα βαθιάς διάβρωσης (νεροφαγώματα) και σταδιακής απόπλυσης – αποσάθρωσης με παράλληλη υποχώρηση των πρηνών προς το εσωτερικό της ακτής. Ο οργανογενής ασβεστόλιθος υπέρκειται της αργιλικής φάσης και έχει μέσο ορατό πάχος 1.0 – 2.0 m, το οποίο είναι αυξημένο (έως 4.0 m) στο βόρειο άκρο του όρμου, ενώ στην υπόλοιπη έκταση περιορίζεται σε 0.5 m στις περισσότερες θέσεις. Είναι πορώδης, κερματισμένος και έντονα διαβρωμένος και αποδομείται, στη θέση του, σε τεμάχια διαστάσεων έως 4 m x 1.5 m x 4 m, τα οποία αποκολλώνται και καταπίπτουν εκεί όπου η υποκείμενη αργιλική φάση έχει αποσαθρωθεί και δεν μπορεί να τον στηρίξει. Το πάχος του αυξάνεται γενικά προς το εσωτερικό και εκτιμάται σε 3.0 – 5.0 m. Η παρουσία του οργανογενούς ασβεστόλιθου είναι πολύ περιορισμένη στον όρμο Λη και ιδιαίτερα στο κεντρικό - δυτικό τμήμα. Απαντάται κυρίως στο ΝΑ άκρο του όρμου και σποραδικά στο ανατολικό τμήμα, ενώ δεν εντοπίστηκε στην γεώτρηση.

β) **Αλλουβιακές Αποθέσεις** από υλικά αναβαθμίδων, σύγχρονων προσχώσεων, κατολισθήσεων και επιφανειακών επιτόπου αποσαθρώσεων (al), τα οποία καλύπτουν, κατά θέσεις, τις φάσεις του σχηματισμού Σγουρού. Στην ευρύτερη περιοχή των Πεύκων τα υλικά αυτά έχουν κυρίως αμμώδη χαρακτήρα και πάχος 0.5 – 1.5 m. Στον όρμο Λη εκτιμάται ότι το πάχος τους ανέρχεται σε 1.0 – 1.5 m και καλύπτουν μία ζώνη πλάτους 5.0 m έως 7.0 m.

γ) **Τεχνητές Επιχώσεις** (μπάζα). Αποτελούνται από υλικά εκσκαφών και εμφανίζονται σε τμήμα του όρμου Λη με τη μορφή εκτεταμένων υψηλών επιχωμάτων με εύρος 5.0 – 15.0 m και πάχος έως και 10.0 m, τοποθετημένων κατά μήκος του αργιλικού πρηνούς. Από πληροφορίες των εντοπίων προκύπτει ότι οι τεχνητές επιχώσεις τοποθετήθηκαν μετά από αρχικές εκδηλώσεις ρωγμών πριν από 1-2 έτη, με σκοπό την “προστασία” της ακτής και των ιδιοκτησιών αλλά και την κατασκευή παραλιακής οδού.

3.2.3 Υδρογεωλογία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που προαναφέρθηκαν, εμφανίζουν διαφορετικές υδρογεωλογικές ιδιότητες, που είναι συνάρτηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους. Σύμφωνα με τις ιδιότητες αυτές οι σχηματισμοί της περιοχής κατατάσσονται στις κατηγορίες:

α) Υδροπερατοί Σχηματισμοί: Στην κατηγορία εντάσσονται οι οργανογενείς ασβεστόλιθοι ‘‘panchina’’.

β) Ημιπερατοί Σχηματισμοί: Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι μάργες Σγουρού, λόγω του κατακερματισμού τους και των ψαμμιτικών ενδιαστρώσεων.

Σχετικά με τα επιφανειακά νερά, επισημαίνεται ότι στην περιοχή Πεύκων υπάρχουν αρκετά πηγάδια, σε απόσταση έως 100 - 200 m από την ακτή. Σε πηγάδια κοντά στην παραλία, στα οποία ήταν δυνατή η επίσκεψη, η στάθμη του νερού μετρήθηκε σε βάθος 3 - 4 m, με βάθος πηγαδιών 6 -15 m. Εκτός από τα επιφανειακά νερά, ενδέχεται να εκδηλώνεται περιορισμένη υδροφορία μέσα στον αργιλοαμμώδη σχηματισμό, σε κάποια βάθη.

3.3 Γεωτεχνικές έρευνες

3.3.1 Γεώτρηση

Για τον καθορισμό της στρωματογραφίας του υπεδάφους της περιοχής ανορύχθηκε μία (1) γεώτρηση, Γ5, βάθους 15.45 m, πλησίον του εστιατορίου «ΚΑΒΟΣ». Η θέση της γεώτρησης φαίνεται στο Τοπογραφικό Διάγραμμα στο Παράρτημα Β1.

Η γεώτρηση εκτελέστηκε με περιστροφικό υδραυλικό γεωτρύπανο τύπου CRAELIUS D-750, που ήταν εξοπλισμένο με τα αναγκαία εξαρτήματα και εργαλεία (στελέχη, δειγματολήπτες, καρωταρίες, κοπτικά εξαρτήματα, σωληνώσεις επένδυσης και λοιπό βοηθητικό εξοπλισμό, αντλητικό συγκρότημα, δεξαμενή νερού κλπ). Τα τοιχώματα της γεώτρησης σωληνώθηκαν προσωρινά, για την πρόληψη κατάπτωσής τους, με σωλήνωση Φ114/104 μέχρι βάθους 3.70 m.

Η διάτρηση έγινε αρχικά με μονή καρωταρία T114 και κοπτικό από widia, μέχρι βάθους 3.70 m, με τη μέθοδο του φραγμού. Στη συνέχεια η διάτρηση έγινε με διαιρούμενη καρωταρία T6S101 και κοπτικό διαμάντι, μέχρι βάθους 4.50 m, με

χρήση νερού. Ακολούθως, χρησιμοποιήθηκε μονή καρωταρία T10 και κοπτικό από widia, μέχρι βάθους 5.90 m, με τη μέθοδο του φραγμού Η διάτρηση ολοκληρώθηκε με εναλλασσόμενη χρήση διαιρούμενης καρωταρίας T6S86 και κοπτικό διαμάντι με χρήση νερού (σε μήκος 5.30 m) και μονής καρωταρίας T86 και κοπτικό από widia με τη μέθοδο του φραγμού (σε μήκος 3.80 m).

3.3.2 Στρωματογραφία υπεδάφους

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεώτρησης και των επί τόπου και των εργαστηριακών δοκιμών, η στρωματογραφική δομή της περιοχής της μελέτης έχει ως εξής:

- **Στρώση (I):** Καστανή Ιλυοαργιλώδης Άμμος (SC – SM/Τεχνητές Επιχώσεις) (χάλικες 6%, άμμος 62% και λεπτόκοκκα 32% - LL = 18,9%, PL = 14% και PI = 4,9%). Συναντάται από την επιφάνεια του εδάφους και μέχρι βάθους 1.25 m.
- **Στρώση (II):** Λευκότεφρη - Καστανή Άργιλος με Άμμο Μέσης Πλαστικότητας (CL) (χάλικες 4%, άμμος 20% και λεπτόκοκκα 76% - LL = 48%, PL = 18% και PI = 30%, w = 22,9%, $\gamma = 19,5 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_d = 15,9 \text{ kN/m}^3$, $G_s = 2,69$, e = 0,694, $S_r = 89\%$, $C_c = 0,126$, $C_v = 22,6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$, $E_{S1(0.05-0.10)} = 15,2 \text{ MPa}$, $E_{S2(0.1-0.2)} = 9,8 \text{ MPa}$, $E_{S3(0.2-0.4)} = 11,3 \text{ MPa}$, $E_{S4(0.4-0.8)} = 17,5 \text{ MPa}$, $p_s = 100 \text{ kPa}$). Ακολουθεί την προηγούμενη στρώση μέχρι βάθους 3,5m.
- **Στρώση (III):** Άργιλος (Μάργα) Καστανότεφρη πολύ Στιφρή-Σκληρή ως Μαλακός Βράχος, Υψηλής-πολύ Υψηλής Πλαστικότητας. Ακολουθεί την προηγούμενη στρώση και εκτείνεται μέχρι του πέρατος (15,45 m) της γεώτρησης.

Η διακύμανση των τιμών των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της στρώσης δίδεται στον Πίνακα.

Σημειώνεται ότι, με βάση τα αποτελέσματα της ήδη διεξαχθείσας γεωτεχνικής έρευνας στην περιοχή του ξενοδοχειακού συγκροτήματος, το υπεδάφος δομείται από στιφρές και συνεκτικές αργιλοαμμώδεις κλαστικές αποθέσεις (ασβεστομάργες και αμμομάργες) θαλάσσιας, κυρίως, ιζηματογένεσης και επιφανειακά (1 - 2 m) από τεχνητές επιχώσεις και φερτά αυτόχθονα υλικά (άμμοι από εκσκαφές), που έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της Γεώτρησης Γ5.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

C_r	> 1.00		0.75		0.50	
ΚΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	Σκληρό $c_u > 300$ kPa	Πολύ Στιφρό $c_u = 150 - 300$ kPa	Στιφρό $c_u = 75 - 150$ kPa	Συνεκτικό $c_u = 40 - 75$ kPa	Μαλακό $c_u = 20 - 40$ kPa	Πολύ Μαλακό $c_u < 20$ kPa

3.4 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά εδαφικών στρώσεων

Οι κύριες γεωτεχνικές ενότητες του υπεδάφους στην περιοχή μελέτης και τα αντίστοιχα γεωτεχνικά τους χαρακτηριστικά, μέχρι των ερευνημένων βαθών, συνοψίζονται ως ακολούθως:

⇒ **Στρώση (I)** : Ιλυοαργιλώδης Άμμος (Τεχνητές Επιχώσεις)

- Φυσική υγρασία $w = 11.6$ %
- Φαινόμενο ειδικό βάρος εδάφους $\gamma_b = 19$ kN/m³ (εκτιμώμενο)
- Αριθμός κρούσεων $N_{SPT} = 5$
- Γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi = 25^\circ$
- Μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s = 3.5$ MPa.

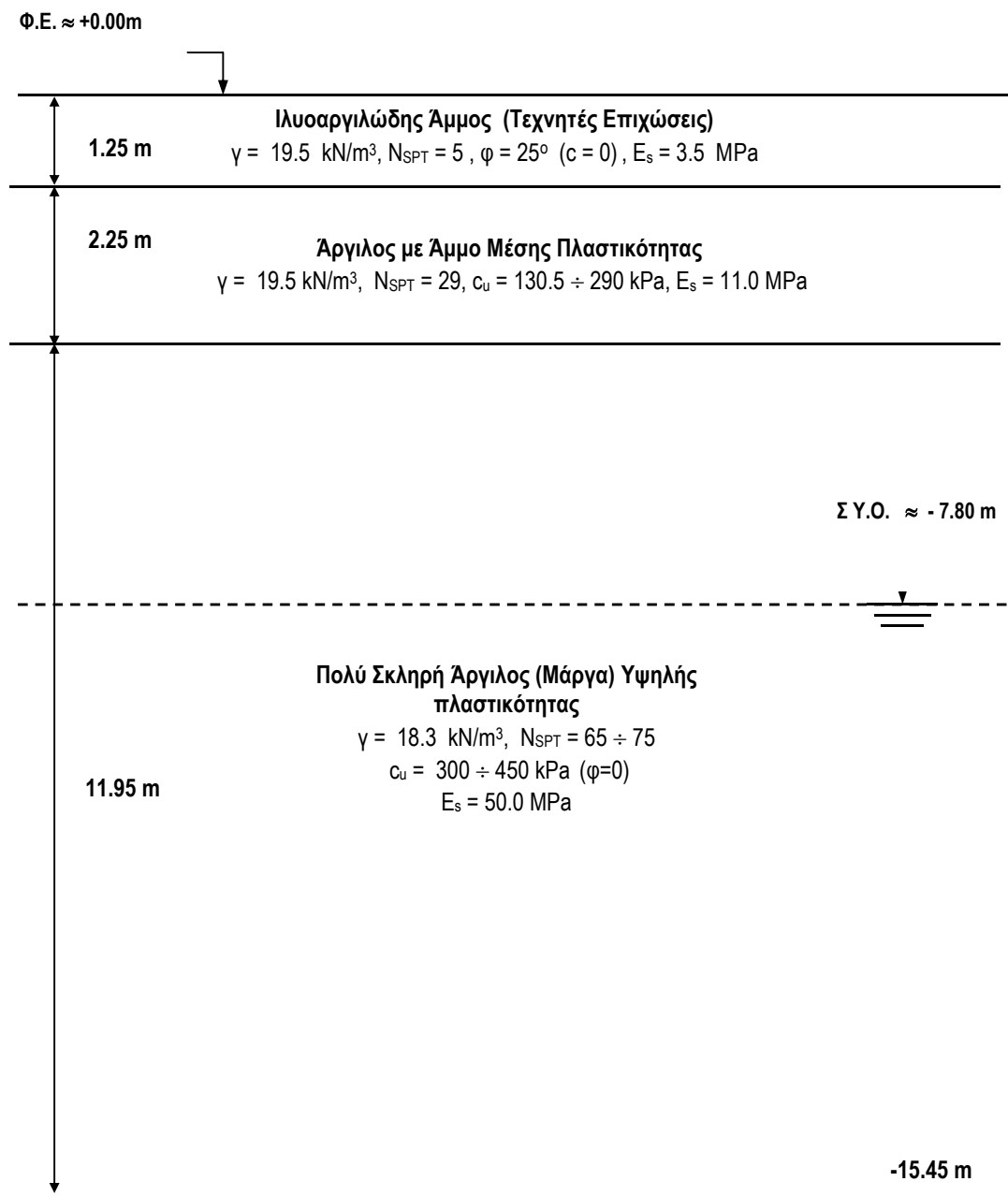
⇒ **Στρώση (II)** : Άργιλος με Άμμο Μέσης Πλαστικότητας

- Φυσική υγρασία $w = 22.9$ %
 - Φαινόμενο ειδικό βάρος εδάφους $\gamma_b = 19.5$ kN/m³
 - Αριθμός κρούσεων $N_{SPT} = 29$
 - Αστράγγιστη διατμητική αντοχή
 - $c_u = 130,5 \div 290$ kPa ($\varphi = 0$)
 - Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη
 - $q_u = 261 \div 580$ kPa
 - Συνοχή $c' = 0$ kPa
 - Γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi' = 30^\circ$
 - Μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s = 11.0$ MPa.
- } αντοχή σε αστράγγιστες συνθήκες
- } αντοχή σε στραγγιζόμενες συνθήκες

⇒ **Στρώση (III)** : Άργιλος Σκληρή (Ημιβραχώδης) Υψηλής – Πολύ Υψηλής Πλαστικότητας

- Φυσική υγρασία $w = 31.5 \%$
 - Φαινόμενο ειδικό βάρος εδάφους $\gamma_b = 18.3 \text{ kN/m}^3$
 - Αριθμός κρούσεων $N_{\text{SPT}} = 65 \div 75$
 - Αστράγγιστη διατμητική αντοχή
 $c_u = 300 \div 450 \text{ kPa}$ ($\varphi = 0$)
 - Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη
 - $q_u = 600 \div 900 \text{ kPa}$
 - Συνοχή $c = 0 \text{ kPa}$
 - Γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi = 31^\circ$
 - Μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $E_s = 50.0 \text{ MPa}$.
- } Αντοχή σε αστράγγιστες συνθήκες
 } Αντοχή σε στραγγιζόμενες συνθήκες

Στο Σχήμα 16 δίνεται ενδεικτική γεωτεχνική τομή του υπεδάφους στην περιοχή της Γεώτρησης Γ5 .



Σχήμα 16: Ενδεικτική Γεωτεχνική Τομή στην Περιοχή της Γεώτρησης Γ5

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογή στο μοντέλο

4.1 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής:

- Ύψος πρανούς = 13 μ
- Γωνία κλίσης πρανούς = 80°
- Μήκος ποδιού = 7 μ
- Γωνία κλίσης ποδιού = 8°

Τα παραπάνω δεδομένα έχουν βρεθεί από τα σχέδια ORMOS-LH και Y118-PR-07-TOMES 31-37.

Με βάση τα στοιχεία που παρέχονται από την γεωτεχνική έρευνα που έγινε, η στρωματογραφική δομή της περιοχής μελέτης έχει ως εξής:

- Στρώση I : Καστανή Ιλυοαργιλώδης Άμμος. Συναντάται από την επιφάνεια του εδάφους και μέχρι βάθους 1,25μ.
- Στρώση II : Λευκότεφρη – Καστανή Άργιλος με Άμμο Μέσης Πλαστικότητας. Ακολουθεί την προηγούμενη στρώση μέχρι βάθους 3,5μ.
- Στρώση III : Άργιλος (Μάργα) Καστανότεφρη πολύ στιφρή – Σκληρή ως Μαλακός Βράχος, Ύψηλης – πολύ υψηλής πλαστικότητας. Ακολουθεί την προηγούμενη στρώση και εκτείνεται μέχρι τους πέρατος (15,45μ) της γεώτρησης.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και το earth manual μπορούμε να εκτιμήσουμε ότι η μέση τιμή της γωνίας τριβής είναι 34°.

Χωρίζουμε το πρανές μας σε 5 επίπεδα με πάχος ως εξής:

- Επίπεδο 1 : 1,25 μ
- Επίπεδο 2 : 2,25 μ
- Επίπεδο 3 : 4 μ
- Επίπεδο 4 : 4 μ
- Επίπεδο 5 : 1,5 μ

Το βάθος του νερού κάτω από την στέψη του πρανούς είναι 8 μ.

4.2 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας για το πρανές

Αρχικά τοποθετούμε τα δεδομένα στο μοντέλο ώστε να εξάγουμε το προφίλ του πρανούς μας. Επιλέγουμε την επιλογή B και εισάγουμε τα δεδομένα ως εξής:

Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile

Option B

a) Input bank height (m)

b) Input bank angle (°)

c) Input bank toe length (m)

d) Input bank toe angle (°)

Either input shear surface angle;

Input shear surface angle

Or check box and have the model calculate shear surface angle from soil friction angle and bank angle

Calculate shear surface angle from soil friction

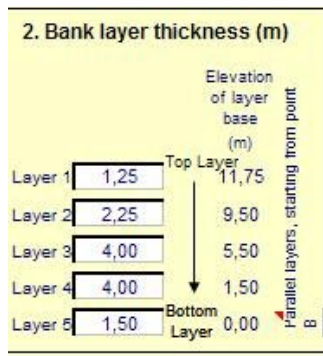
Input mean soil friction angle

Input mean bank angle

Recommended shear surface angle

Έχοντας εισάγει την μέση γωνία τριβής και την γωνία κλίσης του πρανούς, το μοντέλο υπολογίζει αυτόματα την γωνία κλίσης της επιφάνειας διάτμισης σε 57°.

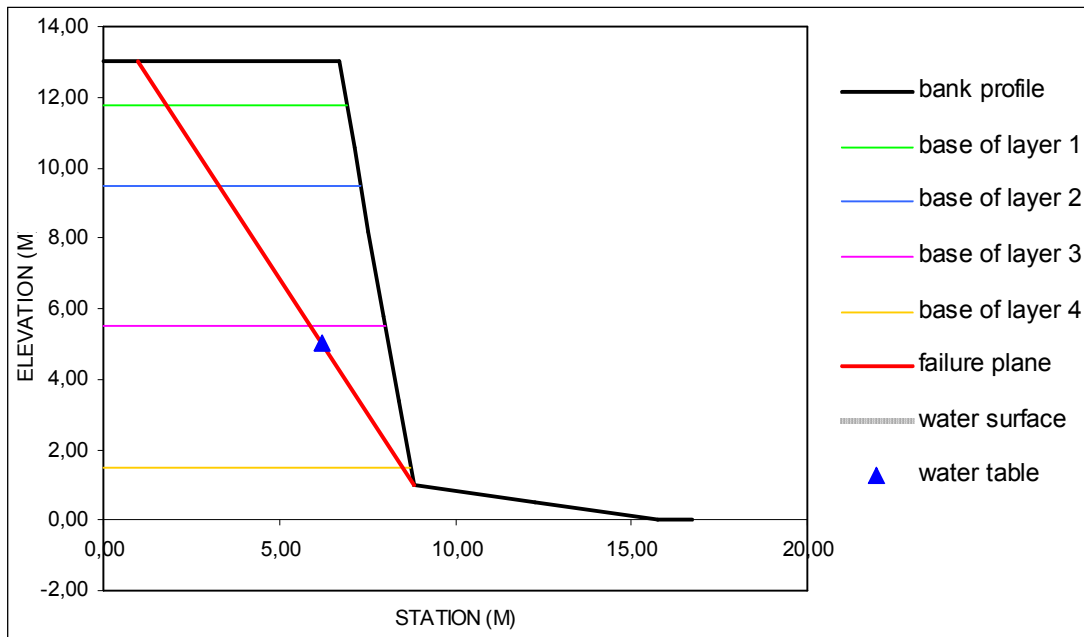
Στην συνέχεια εισάγουμε τα δεδομένα για τις στρώσεις του εδάφους:



Στην καρτέλα για το μοντέλο του πρανούς βήμα 2 εισάγουμε τις αντίστοιχες τιμές για το είδος του εδάφους σε κάθε στρώση:

- Επίπεδο 1 Γωνιώδης Αμμος (Angular Sand)
- Επίπεδο 2 Μαλακή Άργιλος (Soft Clay)
- Επίπεδο 3 Σκληρή Άργιλος (Stiff Clay)
- Επίπεδο 4 Σκληρή Άργιλος (Stiff Clay)
- Επίπεδο 5 Σκληρή Άργιλος (Stiff Clay)

Τέλος το βάθος ύδατος είναι 8μ. Τρέχουμε το πρόγραμμα και λαμβάνουμε το προφίλ του πρανού:



Σχήμα 17: Προφίλ πρανούς

Το μοντέλο υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας $FS = 0,86$. Εφόσον η τιμή είναι μικρότερη από 1, συμπεραίνουμε ότι το πρανές μας είναι ασταθές και επομένως θα χρειαστεί ενίσχυση.

Εύρος αστοχίας	5,69 m
Όγκος αστοχίας	3421 m ³
Μάζα υλικού κατολίσθησης	5195557 kg

Πίνακας 3: Στοιχεία υλικού αστοχίας

Select material types, vegetation cover and water table depth below bank top

(or select "own data" and add values in 'Bank Model Data' worksheet)

Layer 1: Gravel, Angular sand, Rounded sand, Silt, Stiff clay

Layer 2: Angular sand, Rounded sand, Silt, Soft clay

Layer 3: Gravel, Angular sand, Rounded sand, Silt, Stiff clay

Layer 4: Gravel, Angular sand, Rounded sand, Silt, Stiff clay

Layer 5: Gravel, Angular sand, Rounded sand, Silt, Stiff clay

Bank top vegetation cover (age): None

Vegetation safety margin: 50

Reach Length (m): 100

Constituent concentration (kg/kg): 0,001

Water table depth (m) below bank top: 8,00

Use water table Input own pore pressures (kPa)

Own Pore Pressures	kPa	Pore Pressure From Water Table
-6,79	Layer 1	-72,35
-12,71	Layer 2	-55,18
-12,71	Layer 3	-24,53
1,56	Layer 4	14,72
3,52	Layer 5	41,69

Factor of Safety: **0,86** Unstable

57,0 Shear surface angle used

Export Coordinates back into model

Failure width	5,69	m
Failure volume	3421	m ³
Sediment loading	5195557	kg
Constituent load	5196	kg

Σχήμα 18: Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας για πρανές

4.3 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας για διάφορα είδη φυτοκάλυψης

Στη συνέχεια δοκιμάζουμε διάφορα είδη φυτοκάλυψης. Όπως είναι γνωστό τα φυτά βοηθούν στην ενίσχυση της αντοχής του εδάφους και επομένως περιμένουμε να αυξηθεί ο συντελεστής ασφαλείας. Κάνουμε δοκιμές για δύο τιμές του Περιθωρίου Ασφαλείας Βλάστησης: για 50% και για 100%. Στον παρακάτω Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον συντελεστή ασφαλείας και την μάζα του υλικού κατολίσθησης:

	Συντελεστής Ασφαλείας		Μάζα υλικού κατολίσθησης (kg)
	Π. Α. Β. 50	Π. Α. Β. 100	
Φλαμουριά – Oregon (30 ετών)	1,02	1,2	5261532
Λεύκη δελτοειδής – ανατολική (4 ετών)	0,87	0,88	5228545
Λεύκη δελτοειδής – δυτική (14 ετών)	0,89	0,94	5261532
Douglas spirea (3 ετών)	0,87	0,87	5195557
Γρασίδι (5 ετών)	0,87	0,87	5195557
Βατομουριά Ιμαλαίων (5 ετών)	0,86	0,87	5195557
Μακρύφυλλο πεύκο (5 ετών)	0,86	0,87	5228545
Ποταμίσια σημύδα (7 ετών)	0,87	0,88	5228545
Sweetgum (10 ετών)	0,86	0,86	5261532
Switch grass – Alamo (5 ετών)	0,88	0,91	5195557
Συκομουριά (7 ετών)	0,86	0,87	5228545
Μαύρη ιτιά (5 ετών)	0,86	0,86	5228545
Ιτιά – Sandbar (4 ετών)	0,86	0,86	5228545

Πίνακας 4: Αποτελέσματα για διάφορα είδη φυτοκάλυψης

Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις το πρανές μας είναι ασταθές, εκτός από την περίπτωση της Φλαμουριάς όπου το πρανές είναι σταθερό υπό συνθήκες.

Στην περίπτωση όμως της περιοχής μελέτης μας η φλαμουριά δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ενίσχυση του εδάφους. Αυτό γιατί η φλαμουριά στην Ελλάδα φύεται στα δάση της Μακεδονίας και της Θράκης.

4.4 Διάβρωση ποδιού πρανούς

Στην συνέχεια θα διερευνήσουμε την επίδραση στο προφίλ του πρανούς που έχει η χρησιμοποίηση διαφόρων ειδών υλικού.

Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν είναι τα εξής:

- Ογκόλιθοι
- Στρογγυλές πλάκες
- Χαλίκι
- Χονδρόκοκκη άμμος
- Λεπτόκοκκη άμμος

Για να τρέξουμε το μοντέλο διάβρωσης ποδιού, θα πρέπει να εισάγουμε δεδομένα για την ροή όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5:

Ανύψωση ροής	1 m
Διάρκεια ροής	12 hr
Κλίση καναλιού	0,0035

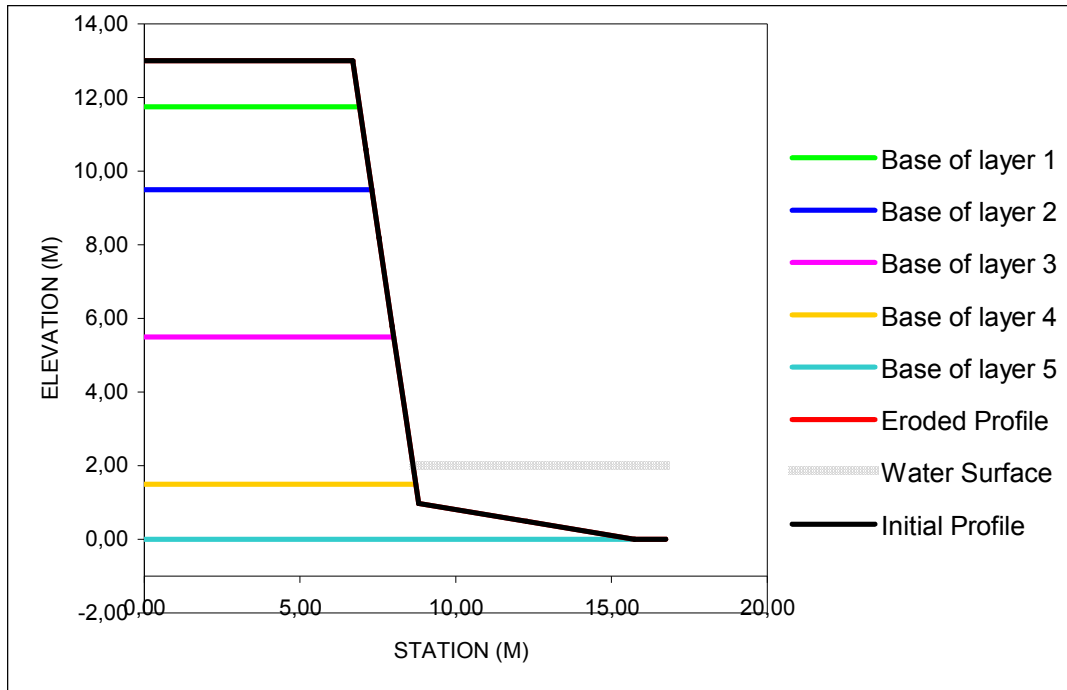
Πίνακας 5: Δεδομένα ροής

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα για τα 5 στρώματα του εδάφους:

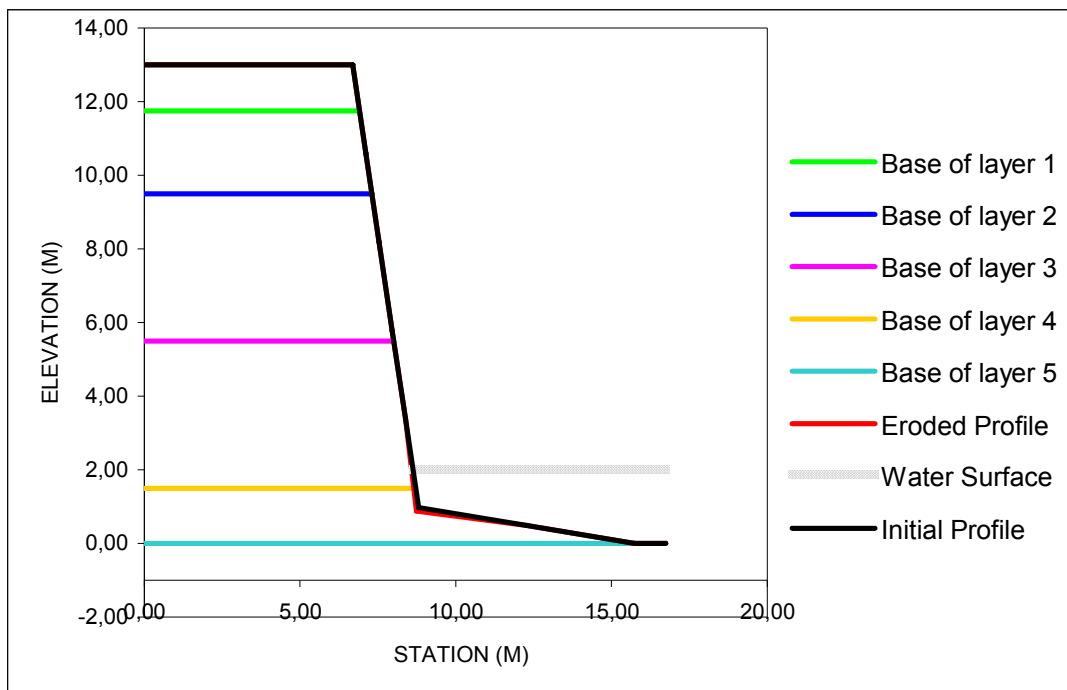
- Επίπεδο 1 Λεπτόκοκκη άμμος (Fine Sand)
- Επίπεδο 2 Διαβρώσιμο συνεκτικό (Erodible cohesive)
- Επίπεδο 3 Μέτρια συνεκτικό (Moderate cohesive)
- Επίπεδο 4 Μέτρια συνεκτικό (Moderate cohesive)
- Επίπεδο 5 Μέτρια συνεκτικό (Moderate cohesive)

Χρησιμοποιήθηκαν αυτές οι τιμές ώστε να έχουμε το χειρότερο δυνατό σενάριο, με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων που θα βοηθήσουν στην καλύτερη προστασία του πρανούς.

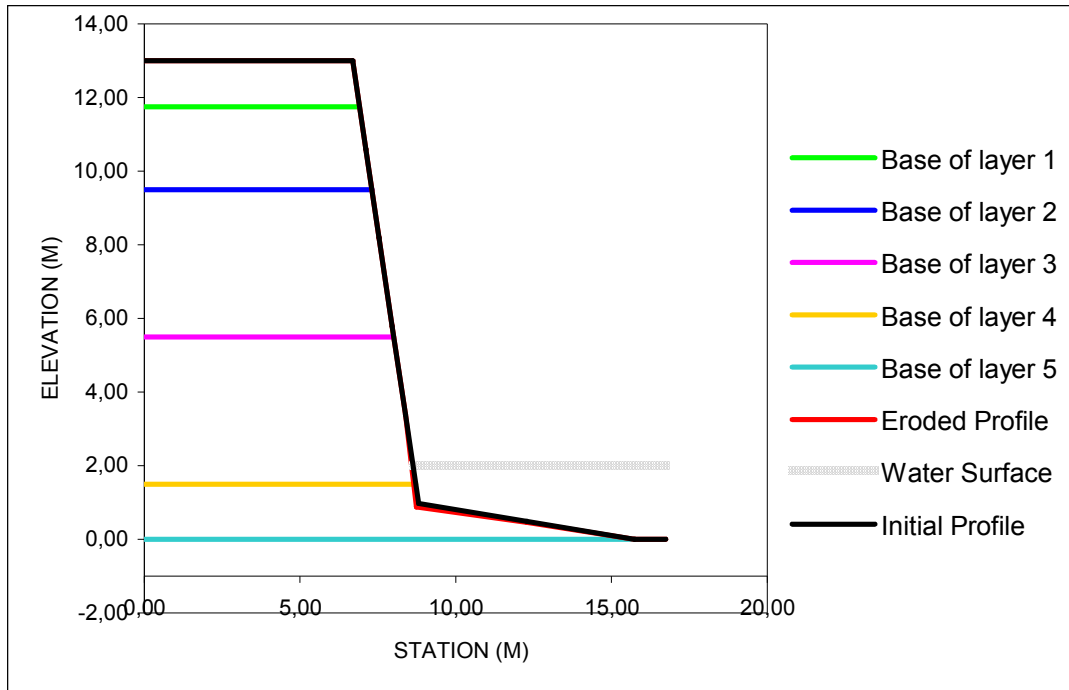
Τα διάφορα προφίλ που προκύπτουν παρουσιάζονται στα παρακάτω Σχήματα 19-23.



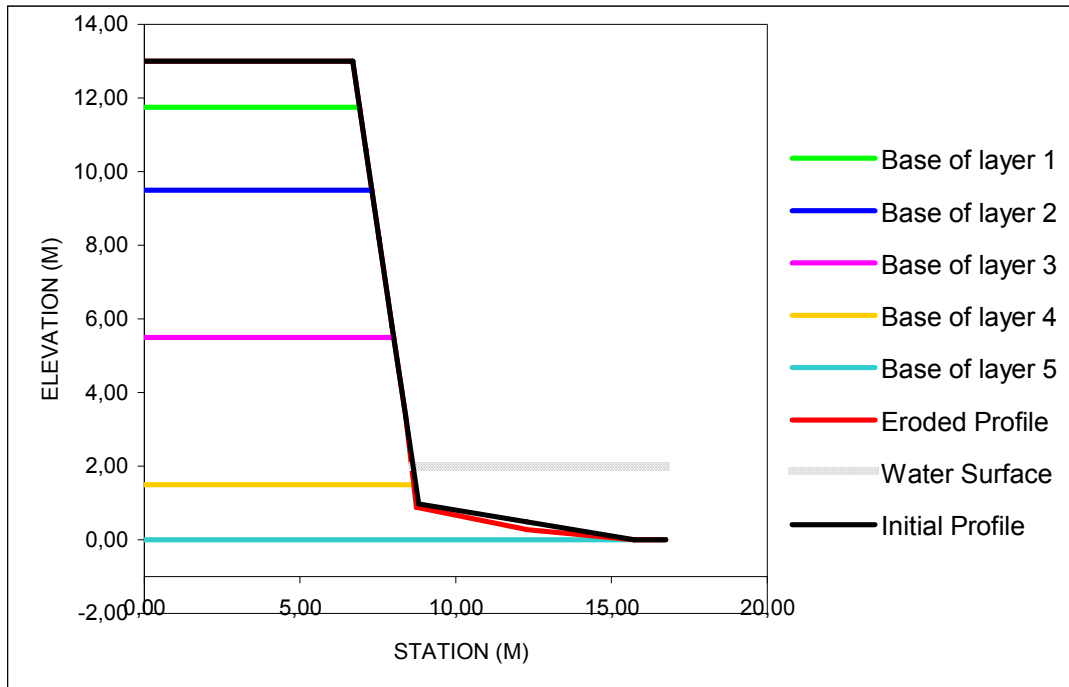
Σχήμα 19: Προφίλ πρανούς με χρήση ογκόλιθων ως υλικού ποδιού



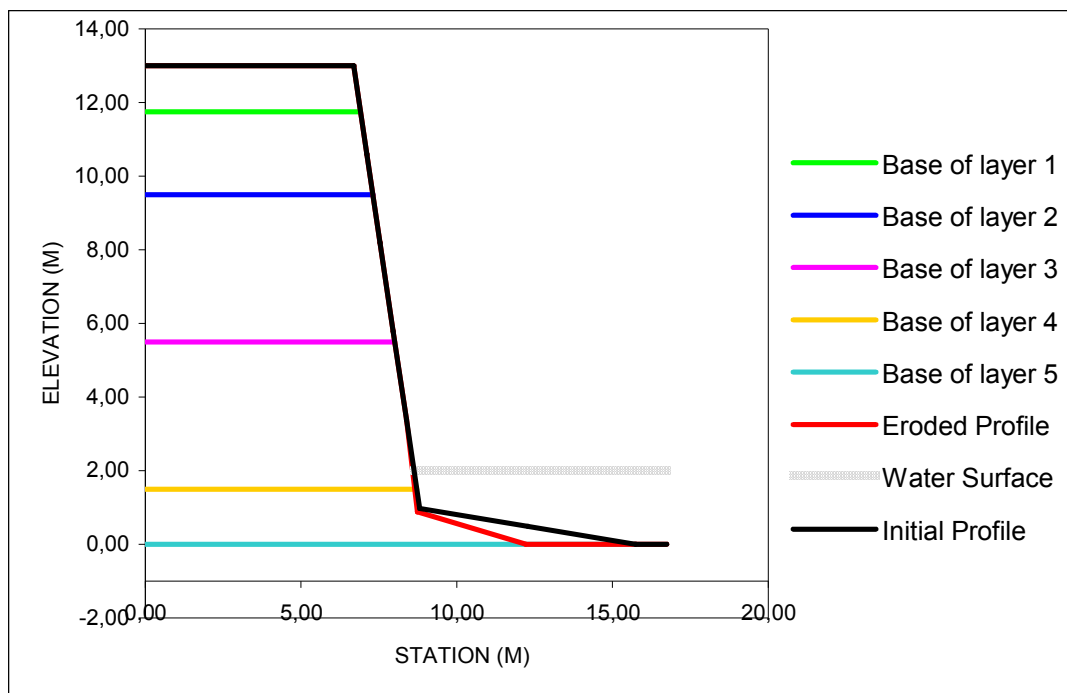
Σχήμα 20: Προφίλ πρανούς με χρήση στρογγυλών πλακών ως υλικού ποδιού



Σχήμα 21: Προφίλ πρανούς με χρήση χαλικιού ως υλικού ποδιού



Σχήμα 22: Προφίλ πρανούς με χρήση χονδρόκοκκης άμμου ως υλικού ποδιού



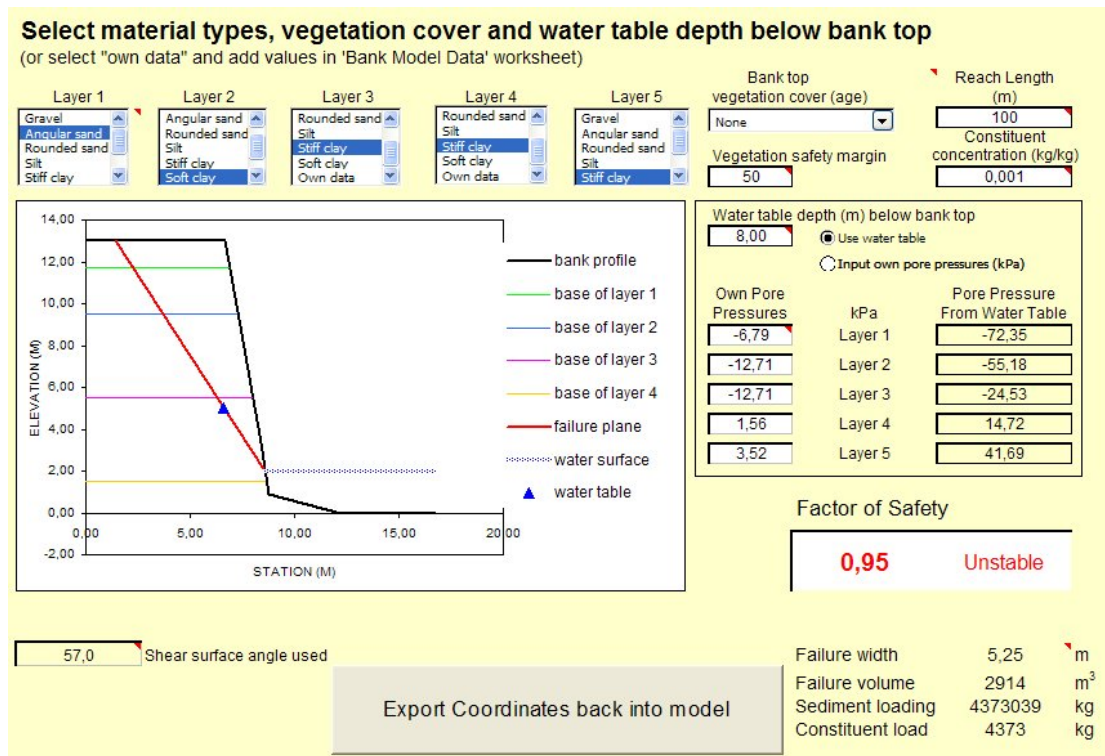
Σχήμα 23: Προφίλ πρανούς με χρήση λεπτόκοκκης άμμου ως υλικού ποδιού

Παρατηρούμε πως σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η διάβρωση του ποδιού είναι μικρή έως ανύπαρκτη. Η μόνη περίπτωση που υπάρχει σημαντική διάβρωση είναι όταν χρησιμοποιούμε λεπτόκοκκη άμμο ως υλικό ποδιού, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο. Επομένως επιλέγουμε αυτό το υλικό και εξάγουμε τα δεδομένα ώστε να τρέξουμε το μοντέλο διάβρωσης πρανούς και να υπολογίσουμε εκ νέου τον συντελεστή ασφαλείας.

Όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 24, ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίζεται από το μοντέλο του πρανούς είναι $FS = 0,95$. Και σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από 1, επομένως το πρανές είναι ασταθές.

Επομένως θα γίνει χρήση φυτοκάλυψης και σε αυτή την περίπτωση ώστε να διαπιστωθεί αν και κατά πόσο θα βελτιωθεί η τιμή του συντελεστή ασφαλείας.

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον συντελεστή ασφαλείας και πάλι για δύο τιμές του Περιθωρίου Ασφαλείας Βλάστησης: για 50% και για 100%.



Σχήμα 24: Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας για υλικό ποδιού λεπτόκοκκη άμμος

Είδη φυτοκάλυψης	Συντελεστής Ασφαλείας	
	Π. Α. Β. 50	Π. Α. Β. 100
Φλαμουριά – Oregon (30 ετών)	1,15	1,35
Λεύκη δελτοειδής – ανατολική (4 ετών)	0,96	0,97
Λεύκη δελτοειδής – δυτική (14 ετών)	0,99	1,04
Douglas spirea (3 ετών)	0,96	0,97
Γρασιδί (5 ετών)	0,96	0,97
Βατομουριά Ιμαλαίων (5 ετών)	0,96	0,97
Μακρύφυλλο πεύκο (5 ετών)	0,96	0,97
Ποταμίσια σημόδα (7 ετών)	0,96	0,97
Sweetgum (10 ετών)	0,95	0,96
Switch grass – Alamo (5 ετών)	0,98	1,01
Συκομουριά (7 ετών)	0,96	0,97
Μαύρη ιτιά (5 ετών)	0,95	0,95
Ιτιά – Sandbar (4 ετών)	0,95	0,96

Πίνακας 6: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για διάφορα είδη φυτοκάλυψης στην περίπτωση χρήσης λεπτόκοκκης άμμου ως υλικού ποδιού

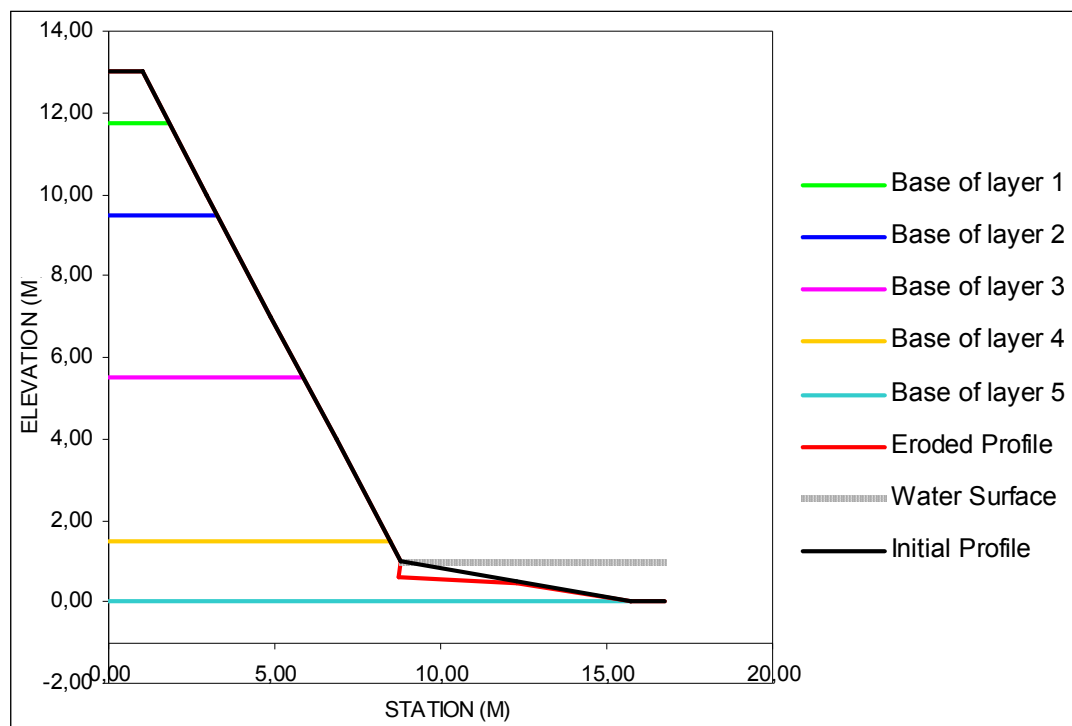
Παρατηρούμε λοιπόν ότι μόνο στην περίπτωση της φλαμουριάς και για ποσοστό φυτοκάλυψης 100% το πρανές αποκτά συντελεστή ασφαλείας 1,35 και είναι σταθερό.

Επίσης στις περιπτώσεις χρήσης Λεύκας 14 ετών και Switch grass – Alamo (5 ετών) και ποσοστό φυτοκάλυψης 100% το πρανές αποκτά συντελεστή ασφάλειας 1,04 και 1,01 αντίστοιχα και είναι σταθερό υπό συνθήκες.

Η λεύκα ίσως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση του εδάφους του συγκεκριμένου πρανούς καθώς φύεται σε υγρές περιοχές.

4.5 Διάβρωση ποδιού αφότου έχει κατολισθήσει υλικό πρανούς

Στην συνέχεια θεωρούμε ότι το πρανές μας έχει αστοχήσει. Εξετάζοντας το προφίλ του ποδιού που προκύπτει σε αυτήν την περίπτωση συμπεραίνουμε ότι θα έχουμε περαιτέρω διάβρωση του ποδιού όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 25:



Σχήμα 25: Διάβρωση ποδιού αφότου έχει γίνει κατολίσθηση

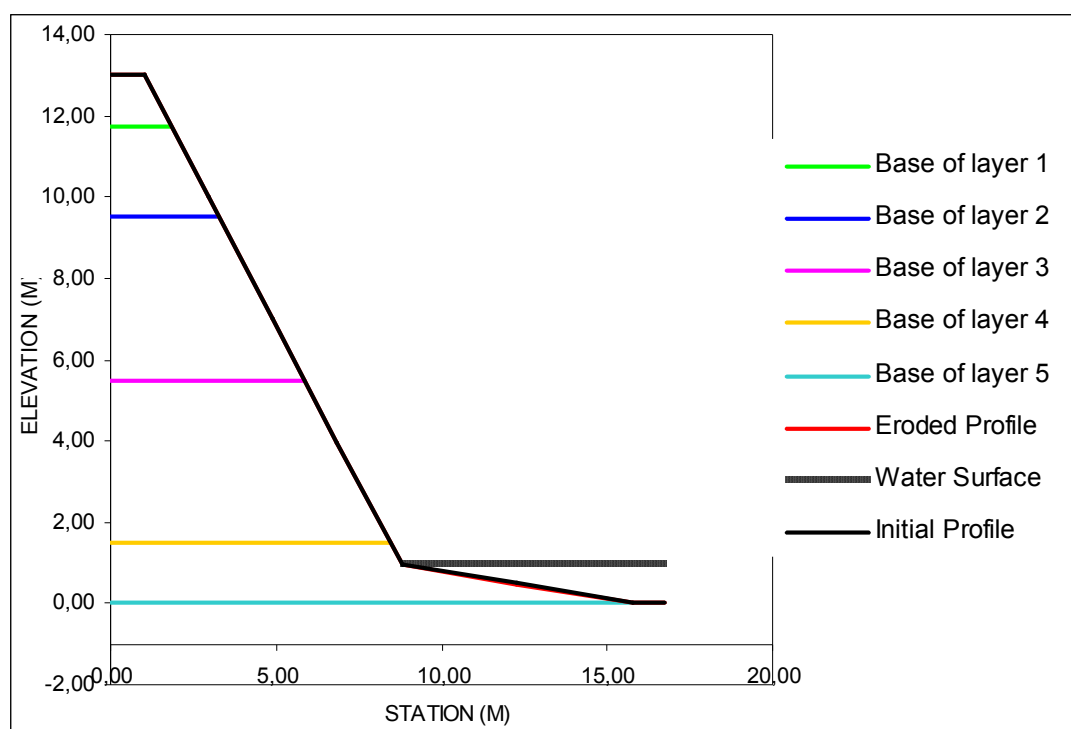
4.6 Διάβρωση ποδιού όταν υπάρχει προστασία πρανούς

Βλέποντας στο Σχήμα 25 ότι το πρανές μας θα υποστεί περαιτέρω διάβρωση, δοκιμάζουμε να ενισχύσουμε το έδαφος και να αποτρέψουμε την διάβρωση με την χρήση προστασίας πρανούς.

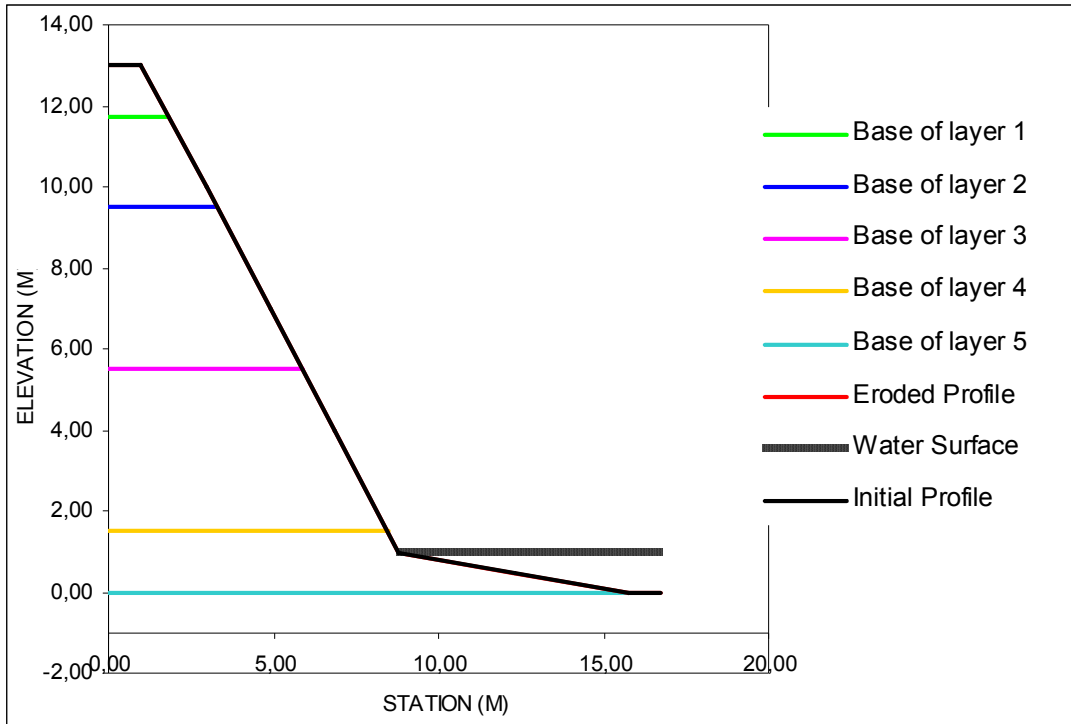
Χρησιμοποιούμε 7 διαφορετικά είδη προστασίας:

1. Κομμάτια φυτών (Plant cuttings)
2. Μεγάλα ξύλινα μπάζα (Large woody debris)
3. Rip rap
4. Σκληρές υφασμάτινες ίνες (Jute net)
5. Δέσμες ξύλων (Coir fiber)
6. Γεώφασμα (Geotextile synthetic)
7. Live fascine

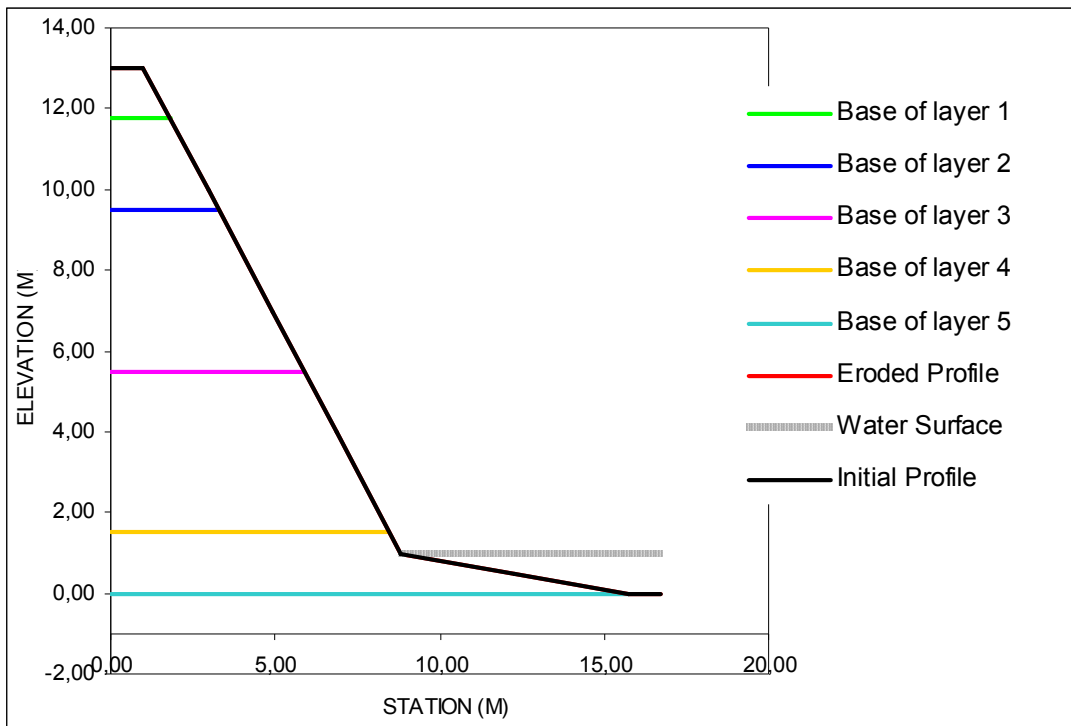
Στα Σχήματα 26-32 παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



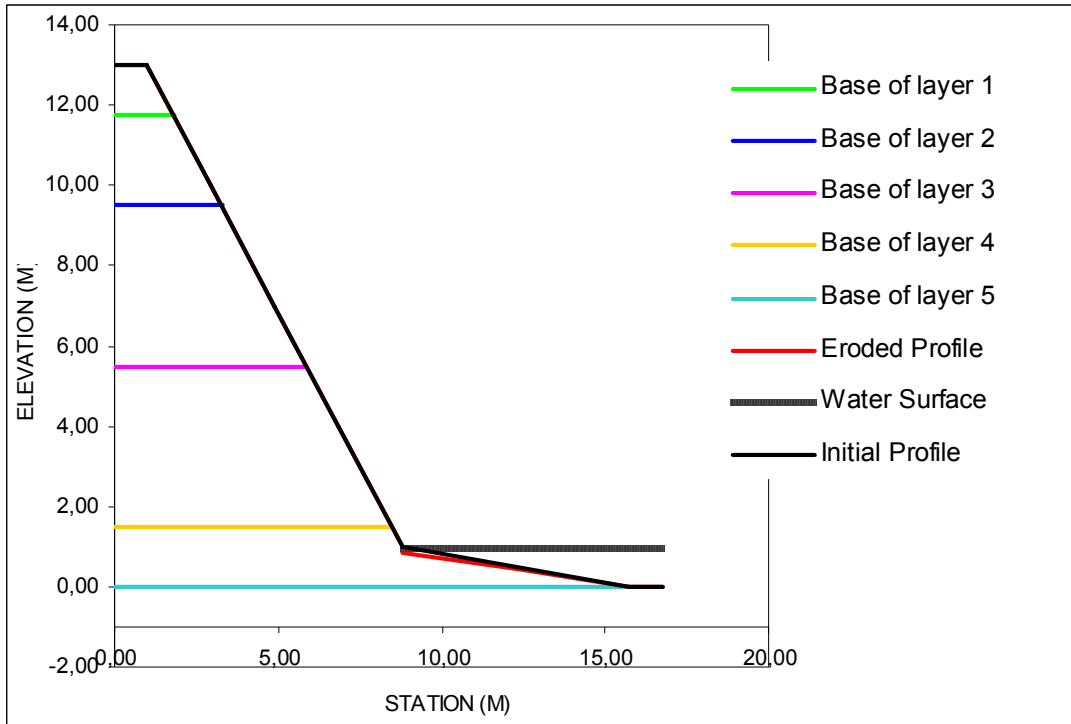
Σχήμα 26: Προφίλ πρανούς με χρήση plant cuttings ως προστασία πρανούς



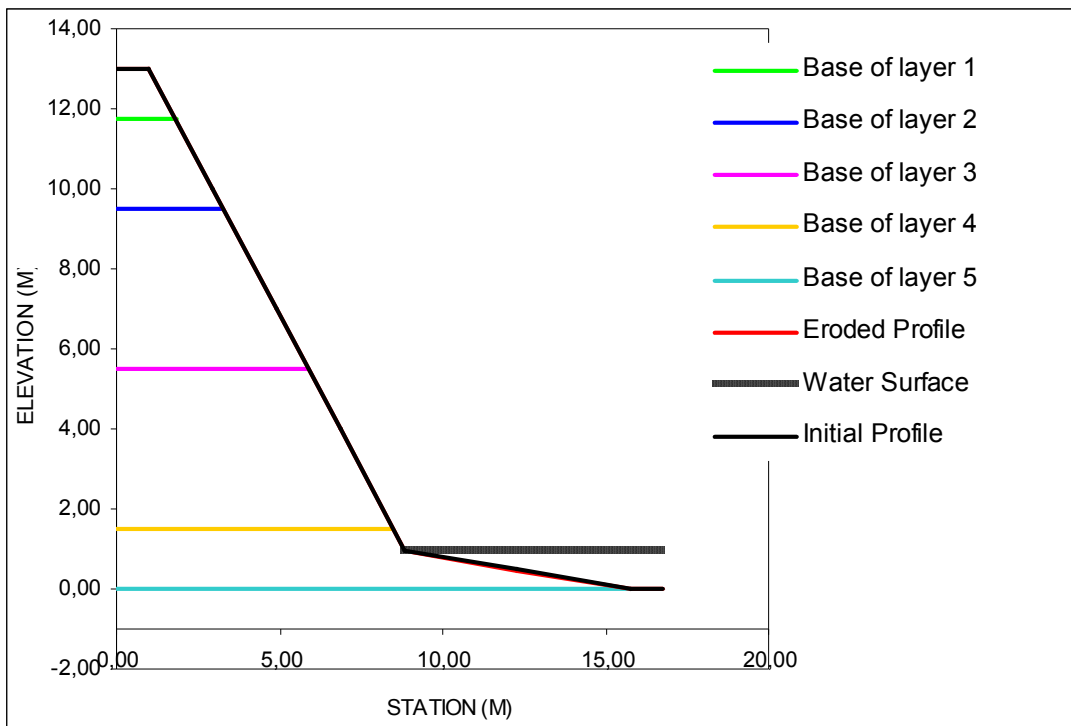
Σχήμα 27: Προφίλ πρανούς με χρήση large woody debris ως προστασία πρανούς



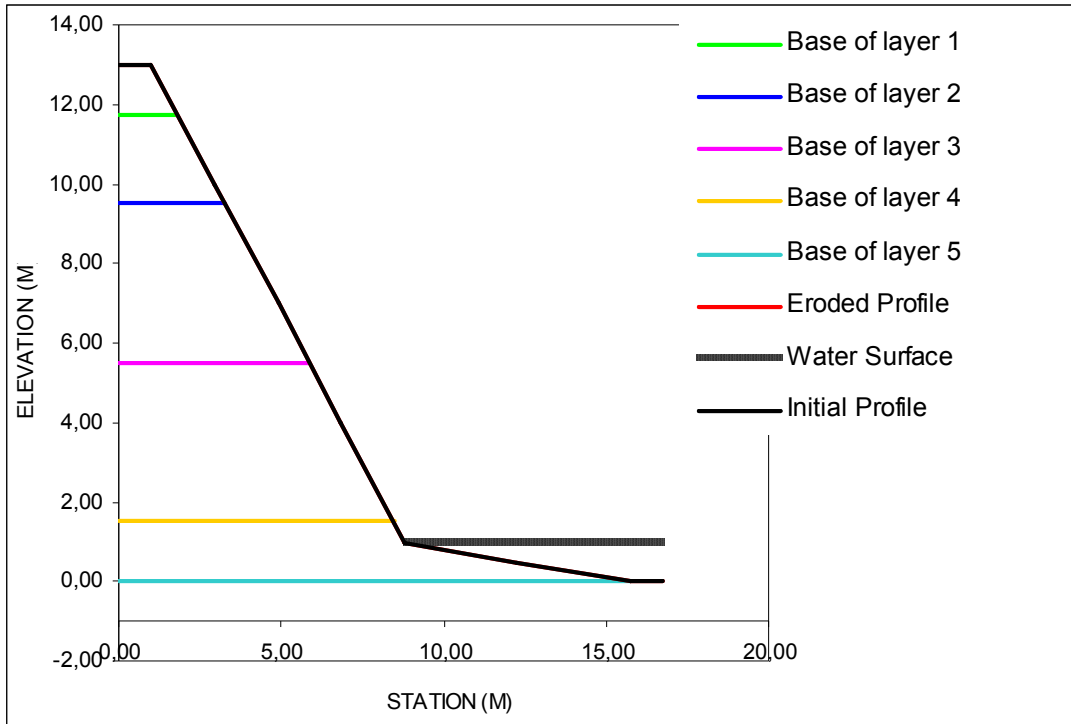
Σχήμα 28: Προφίλ πρανούς με χρήση rip rap ως προστασία πρανούς



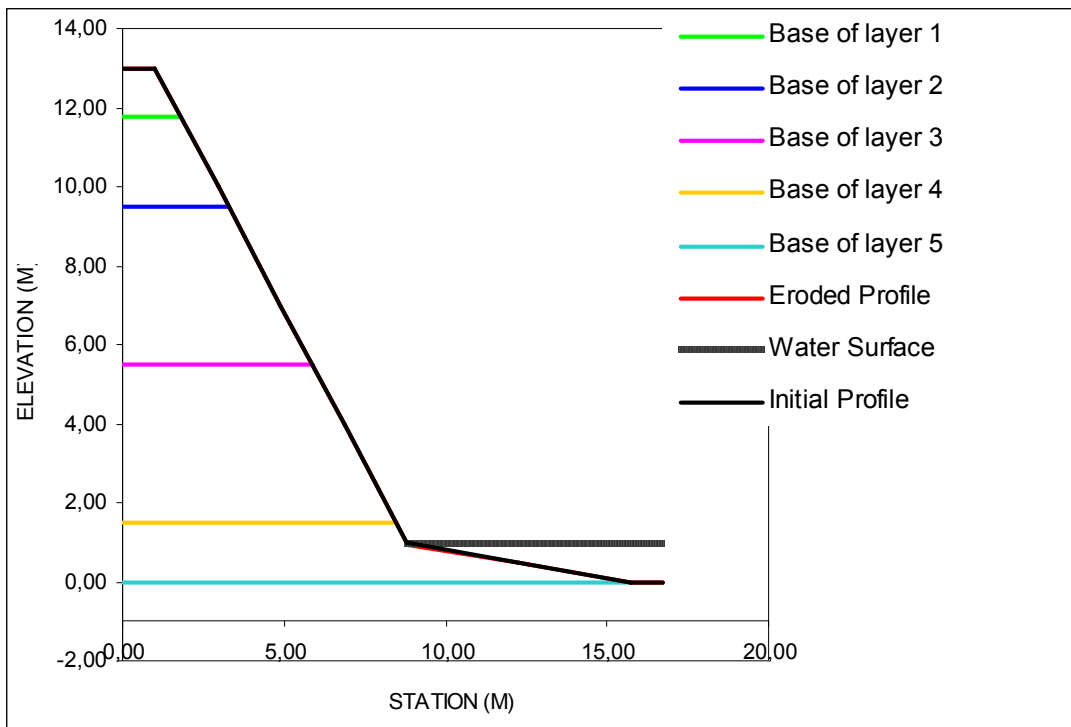
Σχήμα 29: Προφίλ πρανούς με χρήση jute net ως προστασία πρανούς



Σχήμα 30: Προφίλ πρανούς με χρήση coir fiber ως προστασία πρανούς



Σχήμα 31: Προφίλ πρανούς με χρήση Geotextile (synthetic) ως προστασία πρανούς



Σχήμα 32: Προφίλ πρανούς με χρήση live fascine ως προστασία πρανούς

Παρατηρούμε ότι σχεδόν όλα τα μέσα προστασίας είναι αποτελεσματικά στην αποφυγή διάβρωσης.

	Average applied boundary shear stress (Pa)	Maximum Lateral Retreat (cm)	Mean Eroded Area Bank (m ²)	Mean Eroded Area Bank Toe (m ²)	Mean Eroded Area Bed (m ²)	Mean Eroded Area Total (m ²)
Χωρίς προστασία	25,1	5,09	0,02	0	0	0,02
Plant cuttings	25,1	0,57	0	0	0	0
Large woody debris	25,1	0,41	0	0	0	0
Rip rap	25,1	0,41	0	0	0	0
Jute net	25,1	2,21	0	0	0	0
Coir fiber	25,1	0,5	0	0	0	0
Geotextile (synthetic)	25,1	0,41	0	0	0	0
Live fascine	25,1	0,57	0	0	0	0

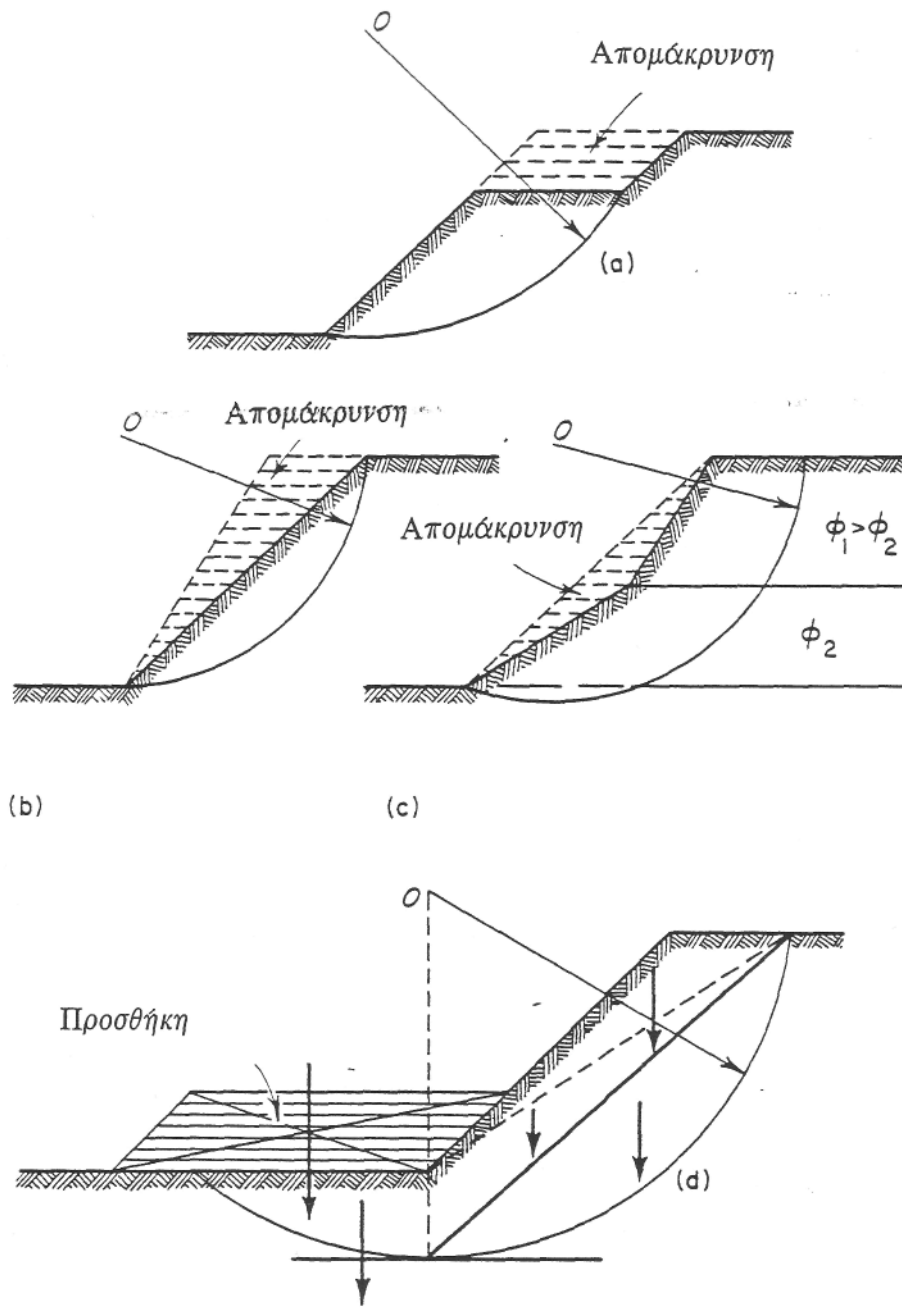
4.7 Τρόποι προστασίας πρανούς

Με βάση αυτό το μοντέλο διερευνήθηκαν διάφορες περιπτώσεις μελέτης στο πρανές της περιοχής μελέτης. Με βάση τα αποτελέσματα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο καταλληλότερος τρόπος προστασίας του πρανούς είναι η διαμόρφωσή του έτσι ώστε να μην μπορεί να κατολισθήσει.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι προστασίας πρανούς όπως:

1. Αφαίρεση μάζας εδάφους από την στέψη του πρανούς
2. Αφαίρεση εδάφους από το μέτωπο του πρανούς ώστε η κλίση να είναι ηπιότερη
3. Αφαίρεση εδάφους από το μέτωπο του πρανούς ώστε η κλίση να είναι συμβατή με την φύση του εδάφους
4. Τοποθέτηση χωμάτινου αντίβαρου στο πόδι του πρανούς.

Στο παρακάτω Σχήμα 33 παρουσιάζονται οι διάφοροι τρόποι προστασίας πρανούς. Στην μελέτη που έγινε από το γραφείο μελετών Παναγία Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ χρησιμοποιήθηκε ως λύση η διαμόρφωση του πρανούς με συνδυασμό προσθήκης και απομάκρυνσης μάζας εδάφους. Δηλαδή ένας συνδυασμός των περιπτώσεων (α) και (d) που παρουσιάζονται στο Σχήμα 33.



Σχήμα 33: Τρόποι προστασίας πρανούς

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα - Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Η διάβρωση των πρανών είναι ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο έχει πολλές αιτίες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια να μελετηθεί και κατά κάποιο τρόπο να προβλεφτεί η διάβρωση που μπορεί να υποστεί ένα πρανές. Αυτό έγινε με την βοήθεια ενός μοντέλου και υπολογίζοντας τον Συντελεστή Ασφαλείας. Για την μελέτη, επιλέχθηκε ένα πρανές στον όρμο Λη στο νησί της Ρόδου, όπου είχε ήδη γίνει κατολίσθηση.

Το μοντέλο επιβεβαίωσε την πραγματικότητα. Αυτό το καθιστά αξιόπιστο εργαλείο και για περαιτέρω μελέτες. Συγκεκριμένα προσομοιώθηκε καταρχάς το πρανές μας και υπολογίστηκε ο Συντελεστής Ασφαλείας ώστε να δούμε σε ποια κατηγορία ανήκει. Από την στιγμή που το πρανές κρίθηκε ασταθές, προχωρήσαμε σε περαιτέρω ενέργειες ώστε να δούμε πως αυτό θα ανταποκριθεί.

Αρχικά εξετάσαμε την επίδραση της φυτοκάλυψης. Ως γνωστόν το έδαφος ενισχύεται από την παρουσία ριζών. Από όλα τα είδη βλάστησης που χρησιμοποιήσαμε, μόνο η φλαμουριά βοήθησε αρκετά το έδαφος, ώστε να γίνει σταθερό το πρανές. Δυστυχώς όμως η φλαμουριά είναι ένα δέντρο το οποίο φύτευται στην Μακεδονία και την Θράκη και όχι στο νησί της Ρόδου. Επομένως η ιδέα της ενίσχυσης του εδάφους με φυτοκάλυψη εγκαταλείπεται.

Στην συνέχεια εξετάσαμε τα αποτελέσματα της βροχόπτωσης, συγκεκριμένα μια καταστρεπτικής βροχόπτωσης 12 ωρών, προσομοιώνοντας την ως μια ροή. Τα αποτελέσματα που πήραμε ήταν ότι θα υπάρχει περαιτέρω διάβρωση στο πόδι του πρανούς.

Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήσαμε διάφορα είδη προστασίας του πρανούς και ανακαλύψαμε ότι τα περισσότερα από αυτά είναι αρκετά αποτελεσματικά όσον αφορά την διάβρωση του ποδιού του πρανούς. Επίσης μελετήθηκαν διάφορα είδη υλικού ποδιού ώστε να δούμε την αντοχή τους στην διάβρωση.

5.2 Προτάσεις

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε από τους Andrew Simon, Andrea Curini, Robert Thomas και Eddy Langendoen. Πρόκειται για ένα μοντέλο το οποίο είναι ένα επαρκές εργαλείο, το οποίο ενσωματώνει την επίδραση πολλών παραμέτρων. Επίσης είναι εύκολο στη χρήση και αυτό του δίνει πλεονέκτημα έναντι άλλων.

Διευρύνοντας το υπό μελέτη θέμα ακολουθούν προτάσεις για την εξέλιξη του θέματος:

- Αυτό το μοντέλο θα μπορούσε να συνδυαστεί με άλλα μοντέλα, ώστε να ενσωματώσει και την επίδραση των καταστροφικών διαδικασιών θαλάσσιας προέλευσης, όπως η πρόσκρουση των κυμάτων στην ακτή. Η εναλλαγή περιόδων ξηρασίας και υγρασίας επιταχύνει την διάβρωση λόγω της ενέργειας των κυμάτων.
- Η μελέτη της επιρροής της φυτοκάλυψης στην ευστάθεια των πρανών μπορεί να γίνει και για άλλα είδη φυτών εισάγοντας τα κατάλληλα δεδομένα και έτσι να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο ώστε να εξαχθεί μια βάση δεδομένων για την επίδραση διαφόρων φυτών σε διάφορα είδη εδάφους.
- Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ώστε να μελετηθούν ακραία καιρικά φαινόμενα όπως προσομοίωση βροχόπτωσης πάνω από 12 ώρες.
- Επίσης το μοντέλο μπορεί να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την προμελέτη κατασκευής έργων, ώστε να αποφευχθεί τυχόν αστοχία πρανούς.

Βιβλιογραφία

Δουκάκης Ευστράτιος (2005), Ανάπτυξη Παράκτιας Ζώνης, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων», ΕΜΠ, Αθήνα.

Καραλής Κ. Θεόδωρος (2000), Εδαφομηχανική, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.

Κόναζη Α. Φωτεινή (2004), «Διερεύνηση της επιρροής του νετού και του σεισμού στην ευστάθεια των πρανών. Εφαρμογή στον Ν. Ευρυτανίας», Διπλωματική Εργασία Τομέα Έργων Υποδομής & Αγροτικής Ανάπτυξης, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα.

Παναγιωτίδης Παναγιώτης & Χατζημπίρος Κίμων (2004), Παράκτια Οικοσυστήματα & Ανθρωπογενείς πιέσεις στις ακτές, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων», ΕΜΠ, Αθήνα.

ΠΑΝΓΑΙΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ (2003), Γεωλογική Μελέτη στον όρμο Λη του δήμου Λινδίων της νήσου Ρόδου.

ΠΑΝΓΑΙΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ (2003), Γεωτεχνική Έρευνα στον όρμο Λη του δήμου Λινδίων της νήσου Ρόδου.

Σακελλαρίου Μ. Γ. (2003), Σημειώσεις Εδαφομηχανικής – Θεμελιώσεων, ΕΜΠ, Αθήνα.

Simon Andrew & Collison AJC (2002), Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability, Earth Surfaces Processes and Landforms, 27, pp527-546.

Simon Andrew, Curini Andrea, Langendoen Eddy & Thomas Robert, Bank Stability and Toe Erosion Model, USDA-ARS National Sedimentation Laboratory, Oxford, MS.

Simon Andrew, Curini Andrea, Darby SE, Langendoen EJ (2000), Bank and near-bank processes in an incised channel, Geomorphology, 35, pp 183-217.

Simon Andrew & Pollen Natasha, Monitoring of Streambank Erosion Processes: Hydraulic, Hydrologic and Geotechnical Controls, National Sedimentation Laboratory, USDA.

Fredlund D. G., Rahardjo H. (1993), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons INC.