



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΕΙΡΩΝ: ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΑ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Αθηνά Αντύπα

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΕΙΡΩΝ: ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Αθηνά Αντύπα

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 23/07/2021

Ζευγώλης Ιωάννης
Νομικός Παύλος
Μενεγάκη Μαρία

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
Καθηγητής ΕΜΠ
Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 2021

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η πραγματοποίηση αναλύσεων ευστάθειας σωρών απόθεσης μεταλλευτικών στείρων, οι οποίοι είναι οπλισμένοι με γεωσυνθετικά υλικά και συγκεκριμένα γεωπλέγματα. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας αύξησης της κλίσης πρανών σε σωρούς απόθεσης, που θα οδηγεί σε όφελος όσον αφορά τις εκτάσεις που καταλαμβάνουν οι εν λόγω σωροί.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το ζήτημα της ευστάθειας αναχωμάτων από ξηρά απόβλητα της εξορυκτικής βιομηχανίας και συγκεκριμένα μελετάται η δυνατότητα υλοποίησης περισσότερο απότομων κλίσεων των πρανών με τη χρήση γεωπλεγμάτων. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας για τη διερεύνηση της επίδρασης των ακόλουθων παραμέτρων στην ευστάθεια: ύψος και κλίση πρανού αναχώματος, διατμητική αντοχή των θρυμματισμένων στείρων υπερκειμένων και εφελκυστική αντοχή των γεωπλεγμάτων. Οι αναλύσεις υλοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος Slide2 της Rocscience σε δύο διαστάσεις (2Δ), στη βάση της μεθόδου οριακής ισορροπίας. Σκοπός της διπλωματικής είναι: (α) η διερεύνηση της δυνατότητας επίτευξης μεγαλύτερης κλίσης σε αναχώματα στείρων με τη χρήση γεωπλεγμάτων, έναντι «άοπλων» αναχωμάτων, και (β) η διερεύνηση οικονομοτεχνικών ζητημάτων που αφορούν στο κόστος των γεωπλεγμάτων σε σχέση με το όφελος σε όγκο ή επιφάνεια (έκταση) των αναχωμάτων λόγω της πιο απότομης κλίσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι κρίσιμες περιοχές του πρανού στις οποίες η χρήση γεωπλεγμάτων είναι απαραίτητη, εντοπίζονται κοντά στον πόδα και στη στέψη του πρανού. Από την άλλη, παρατηρήθηκε ότι η τοποθέτηση γεωπλεγμάτων σε ενδιάμεσες περιοχές δεν συμβάλει στην αύξηση του συντελεστή ασφαλείας.

Λέξεις Κλειδιά: ευστάθεια πρανών, σωροί απόθεσης μεταλλευτικών στείρων, γεωπλέγματα, μέθοδος οριακής ισορροπίας, συντελεστής ασφαλείας

Abstract

Rock waste dumps: improving slope stability using geosynthetics

by *Maria Athina Antypa*

Thesis Submitted for the Degree

Diploma (MEng) in Mining and Metallurgical Engineering

School of Mining and Metallurgical Engineering

National Technical University of Athens

Supervisor: Dr. Ioannis E. Zevgolis
Assistant Professor, NTUA

The present Diploma Thesis examines the problem of slope stability of mining waste dumps and in particular, investigates the possibility of increasing the inclination of the slope by using geogrids. In the context of the work, parametric analyzes were performed in order to study the effect on the stability of the following parameters: slope's height and inclination, shear strength of the geomaterial and tensile strength of the geogrids. Analyzes were performed using Slide2 by Rocscience, which solves slope stability problems in two dimensions (2D) using the limit equilibrium method. The scope of the Thesis is: (a) to investigate the possibility of achieving a steeper slope in waste embankments using geogrids, versus "unreinforced" embankments, and (b) to explore the economic and technical issues related to the cost of geogrids. According to the results, the critical areas of the slope where the use of geogrids is required are close to the foot and the crown of the slope. On the contrary, it was observed that the presence of geogrids in the intermediate areas does not contribute in achieving a higher safety factor.

Keywords: slope stability, mine rock waste dumps, geogrids, limit equilibrium method, safety factor

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
	1.1 Παρουσίαση προβλήματος	14
	1.2 Σκοπός εργασίας	15
	1.3 Δομή εργασίας	15
2	ΣΩΡΟΙ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΕΙΡΩΝ	16
	2.1 Γενικά περί μεταλλευτικών στείρων και σωρών απόθεσης.....	16
	2.1.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις σωρών απόθεσης	17
	2.2 Τύποι- κατηγορίες σωρών απόθεσης	18
	2.3 Σχεδιασμός χώρων απόθεσης	22
	2.3.1 Ευστάθεια πρανών.....	24
	2.3.1.1 Μηχανισμοί αστοχίας.....	25
	2.3.1.2 Παράγοντες επίδρασης της ευστάθειας	27
	2.3.1.2.1 Διατμητική αντοχή υλικών σωρών απόθεσης	29
	2.3.2 Καθιζήσεις	29
	2.3.3 Ροή και στραγγισή	30
	2.3.4 Διάβρωση	30
	2.4 Ο ρόλος της κλίσης των σωρών στην χωρητικότητα των επιχωμάτων αποθέσεων.....	31
3	ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΕΠΙΧΩΜΑΤΑ	33
	3.1 Εισαγωγή.....	33
	3.2 Χρήσεις γεωπλεγμάτων στην γεωτεχνική μηχανική.....	39
	3.3 Χαρακτηριστικά γεωπλεγμάτων.....	40
	3.3.1 Φυσικές ιδιότητες	40
	3.3.2 Μηχανικές ιδιότητες	41
	3.3.3 Ιδιότητες αντοχής.....	44

3.3.4	Προβλήματα υποβάθμισης.....	45
3.3.5	Εκτιμήσεις επιτρεπόμενης αντοχής/ δύναμης.....	46
3.4	Αρχές σχεδιασμού οπλισμένων επιχωμάτων.....	47
3.5	Χρήση γεωπλεγμάτων στο πρόγραμμα Slide 2 της Rocscience	50
3.6	Σχεδιασμός αναλύσεων στο SLIDE 2.....	53
4	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΟΠΛΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ	59
4.1.	Σχεδίαση μοντέλων.....	59
4.2.	Αποτελέσματα δοκιμών	61
5	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ	80
5.1.	Όπλιση επιχώματος ύψους 100 μέτρων.....	80
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	94

Κατάλογος Εικόνων:

Εικόνα 2-1: Από πάνω προς τα κάτω σωρός απόθεσης στείων ορυχείου χρυσού (Blight 2010), σελ.19

Εικόνα 2-2: Παλαιό μεταλλείου χρυσού, σελ.20

Εικόνα 3: Δομή απόθεσης αποβλήτων εγκάρσιας κοιλάδας (Blight 2010, σελ.22.

Εικόνα 2-4: Στο σχήμα φαίνονται οι διάφοροι τύποι μεταλλευτικών αποθέσεων ανάλογα με τον τρόπο απόθεσή τους στον χώρο (Orman et al 2011) , σελ.23

Εικόνα 2- 5: Οι δύο βασικές προσεγγίσεις κατασκευής (Hustrulid et al 2001) , σελ.26

Εικόνα 2- 6: Οι δύο βασικές προσεγγίσεις κατασκευής (Zevgolis 2018) , σελ.26

Εικόνα 2-7: Οι κυριότεροι μηχανισμοί αστοχίας του επιχώματος μεταλλευτικών αποθέσεων (Orman et al 2011) , σελ.29

Εικόνα 3-1: Διάφορα είδη γεωφασμάτων, σελ.38

Εικόνα 3-2: Γεωδίκτυα, σελ.38

Εικόνα 3-3: Γεωμεμβράνες, σελ.39

Εικόνα 3-4: Παράδειγμα γεωσυνθετικού αργιλικού φραγμού, σελ.39

Εικόνα 3-5: Είδη γεωσωλήνων, σελ.40

Εικόνα 3-6: Είδη γεωαφρών, σελ.40

Εικόνα 3-7 και 3-8: Συνδυασμοί διάφορων γεωσυνθετικών υλικών, σελ.40

Εικόνα 3-9: Κομμάτι γεωπλέγματος, σελ.41

Εικόνα 3-10: Παράδειγμα οπλισμένου επιχώματος (Koerner, 2005) , σελ.46

Σχήμα 3-11: Σχέδιο οπλισμένου επιχώματος, σελ.51

Εικόνα 3-12 : Σχηματική αποτύπωση μηχανισμού αγκύρωσης – αντοχή αγκύρωσης (Koerner, 2005) , σελ.56

Εικόνα 3-13: Παράθυρο Project Settings, σελ. 58

Εικόνα 3-14: Καθορισμός ιδιοτήτων υλικών, σελ.59

Εικόνα 3-15: Παράθυρο παραμέτρων επιφάνειας αστοχίας, σελ.60

Εικόνα 3-16: Παράθυρο επιλογής ιδιοτήτων υλικού ενίσχυσης, σελ.61

Εικόνα 3-17: Υπολογισμός αποτελεσμάτων, σελ.62

Εικόνα 3-18: Κύκλος αστοχίας και συντελεστής ασφαλείας με και χωρίς στοιχεία ενίσχυσης, σελ.62

Κατάλογος Πινάκων:

Πίνακας 1 – Σενάρια δοκιμών άοπλων επιχωμάτων, σελ.63

Πίνακας 2 – Πίνακας ύψους με γωνία τριβής, για κλίση πρανούς 30 μοίρες και συνοχή 10, γωνία τριβής 30 μοίρες, σελ.81

Πίνακας 3 – Πίνακας ύψους με γωνία τριβής, για κλίση πρανούς 30 μοίρες και συνοχή 10, γωνία τριβής 30 μοίρες, σελ.81

Πίνακας 4 – Αποτελέσματα γωνίας τριβής για συντελεστή ασφαλείας 1.4 και συνοχή 0.5, σελ.82

Πίνακας 5- Αποτελέσματα γωνίας τριβής για συντελεστή ασφαλείας 1.4 και συνοχή 10, σελ.82

Πίνακας 6 - Αποτελέσματα γωνίας τριβής για συντελεστή ασφαλείας 1 και συνοχή 0.5, σελ.83

Πίνακας 7 - Αποτελέσματα γωνίας τριβής για συντελεστή ασφαλείας 1 και συνοχή 10, σελ.83

Πίνακας 8 : Μήκος οπλισμού και συντελεστής ασφαλείας, σελ.94

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Παρουσίαση προβλήματος

Όλες οι μεταλλευτικές εταιρείες έρχονται αντιμέτωπες με το πρόβλημα των στειρών, μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμων υλικών, και την απόθεσή τους. Τα μεταλλευτικά απόβλητα αποτίθενται σε σωρούς, οι οποίοι προκυμμένοι να μην παρουσιάσουν αστοχία, έχουν περιορισμένο ύψος και κλίση πρανούς και άρα είναι επιτακτική ανάγκη η εύρεση όλο και περισσότερων χώρων (στρεμμάτων γης) απόθεσης.

Η ευστάθεια των αποθέσεων αυτών είναι πολύ σημαντικό στις μεγάλες εκμεταλλεύσεις, καθώς τα προϊόντα θα πρέπει να συσσωρεύονται, χωρίς να επιβαρύνουν το περιβάλλον και να καταλαμβάνουν όσο δυνατόν λιγότερες εκτάσεις γης. Όμως μέχρι τώρα αυτοί οι «σωροί» απόθεση δεν είχαν το απαιτούμενο ύψος ώστε να αποθηκεύσουν αρκετή ποσότητα, για αποφυγή ενδεχόμενων αστοχιών του εδάφους, με αποτέλεσμα την ανάγκη για περισσότερες εκτάσεις απόθεσης και άρα το αυξημένο κόστος της διαδικασίας αυτής.

Έτσι προέκυψε η ανάγκη για όπλιση αυτών των επιχωμάτων με χρήση γεωπλεγμάτων (γεωσυνθετικών υλικών), ανάμεσα από τις στρώσεις των οποίων, μπορεί να υπάρξει βλάστηση και ροή των υδάτων ώστε να μην υπάρχουν πιέσεις από συσσωρευμένη υδάτινη μάζα. Ο κύριος στόχος των γεωσυνθετικών υλικών είναι με διάφορες τεχνικές να βελτιώσουν την ασφάλεια, αυξάνοντας την γωνία κλίσης, και το ύψος της απόθεσης ενώ θα μειώνεται ο κίνδυνος για αστοχία.

Τα γεωπλέγματα είναι οριζόντια στρώματα μέσα στην πλαγιά της απόθεσης για να αντιστέκονται σε οποιαδήποτε κινητικότητα της ενδυναμωμένης μάζας του εδάφους. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του γεωσυνθετικού υλικού και του εδάφους εξαρτάται από το μέγεθος του γεωπλέγματος. Ουσιαστικά τα γεωπλέγματα μεταφέρουν τις δυνάμεις στο έδαφος διάχυτες σε όλη την έκταση του εδάφους και όχι σε ένα συγκεκριμένο σημείο ώστε να μην υπάρξει αστοχία. Κατά τη διάρκεια άσκησης ισχυρών πιέσεων τα γεωπλέγματα τεντώνονται λόγω της σύνδεσής τους με το έδαφος και η αστοχία εμποδίζεται. Τέτοιες διαδικασίες μπορούν να προσομοιωθούν και να αποτυπωθούν αριθμητικά λαμβάνοντας τις κατάλληλες τιμές. Η επιλογή των γεωπλεγμάτων εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της απόθεσης.

Ο έλεγχος της αποδοτικότητας ενός αριθμού γεωπλεγμάτων πάνω σε κάποιο επιχώμα αποτελούμενο από εδαφικό υλικό, γίνεται μέσω προσομοιώσεων και δοκιμών αστοχίας.

1.2. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη των τρόπων όπλισης με την βοήθεια των γεωπλεγμάτων, αύξηση της κλίσης του πρανούς και διατήρηση του συντελεστή ασφαλείας πάνω από την επιθυμητή τιμή. Παράλληλα με την βελτίωση της ευστάθειας του επιχώματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και ο παράγοντας του κόστους των οπλισμών αυτών, και άρα αναζητούμε μια οικονομικά αποδοτική λύση οπλισμένου επιχώματος.

1.3. Δομή της εργασίας

Στην παρούσα εργασία στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα διάφορα είδη σωρών απόθεσης, αποβλήτων που προκύπτουν από την μεταλλευτική δραστηριότητα. Στο τρίτο κεφάλαιο εξηγούνται τα διάφορα γεωσυνθετικά υλικά που υπάρχουν καθώς και οι λειτουργίες που επιτελούν και επικεντρώνεται στα γεωπλέγματα, για τα οποία περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας τους. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τους τρόπους χρήσης και τις αρχές σχεδίασης τέτοιων οπλισμένων επιχωμάτων. Στην συνέχεια πραγματοποιούνται οι αναλύσεις και προσομοιώσεις των αόπλων επιχωμάτων προκειμένου να καταλήξουμε στο τελικό μοντέλο ενίσχυσης με γεωσυνθετικά υλικά. Συνεχίζουμε με την προσθήκη γεωπλεγμάτων και δοκιμάζοντας την σημασία της μεταξύ τους απόστασης, του μήκους του γεωπλέγματος και της επιλογής της εφελκυστικής του αντοχής σε κάθε σημείο του επιχώματος. Ύστερα γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και της συμπεριφοράς του οπλισμού. Τέλος, υπολογίζοντας και το κόστος των γεωπλεγμάτων του τελικού οπλισμένου επιχώματος καταλήγουμε στο τελικό όφελος όγκου που θα έχουμε από την μεταβολή της κλίσης του πρανούς.

2. ΣΩΡΟΙ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΕΙΡΩΝ

2.1. Εισαγωγή στα μεταλλευτικά στείρα και στους σωρούς απόθεσης

Οι όροι μεταλλευτικοί σωροί και αποθέσεις αναφέρονται σε σωρούς από απόβλητα πετρώματα, μεταλλεύματα ή άλλα υλικά που έχουν υποστεί έκπλυση που έχουν μικρή ή καθόλου οικονομικό ενδιαφέρον/ αξία την δεδομένη στιγμή που εξορύχθηκαν. Τα υλικά αυτά σε περιπτώσεις που η αξία του προϊόντος ανέβει, επαναπροσδιορίζονται οι μέθοδοι επεξεργασία του και θα μπορούσαν αυτές οι αποθέσεις να θεωρηθούν χρήσιμα μεταλλεύματα. Για αυτό τον λόγο πολλές φορές δεν μιλάμε για διάθεση των αποβλήτων αλλά για αποθήκευση των αποβλήτων των ορυχείων.

Από τότε που οι άνθρωποι εξορύσσαν υλικά αξίας από πετρώματα, προκύπταν και μη χρήσιμα υλικά τα οποία δεν είχαν καμία οικονομική αξία. Οι αποθέσεις αυτές ήταν απλά τα μεταλλευτικά απόβλητα, στερεά ή υγρά, τα οποία απλά απομάκρυναν χωρίς να αποτελούν πρόβλημα χώρου. Συχνά κατέληγαν σε όχθες ποταμών, σε αποξηραμένους χειμάρρους και λίμνες στα οποία όμως προκαλούσαν μεγάλη περιβαλλοντική ζημιά. Όσο αναπτυσσόταν η μεταλλευτική δραστηριότητα τόσο αρχίσαν να γίνονται και να εφαρμόζονται νομοθεσίες προστασίας του περιβάλλοντος από αυτού του είδους τα απόβλητα, και απόθεσης τους με υπευθυνότητα, ειδικά σε περιπτώσεις που τα απόβλητα θα προκαλούσαν έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Παρ όλα αυτά σήμερα, με την ραγδαία αναπτυσσόμενη αγορά ορυκτών προϊόντων (χρώμιο, άνθρακας, χαλκός, διαμάντια, φθοριούχος άνθρακας, χρυσός, σίδηρος, μαγγάνιο, ψευδάργυρος, κ.α.), αυτό παραμένει ένα πρόβλημα στον τομέα της μεταλλευτικής δραστηριότητας, το οποίο επιβαρύνει ακόμα περισσότερο τον πλανήτη, με συνεχώς αυξανόμενους όγκους αποβλήτων.

Ένα πολύ συνηθισμένο είδος μεταλλευτικού σωρού απόθεσης είναι αυτός που προκύπτει από την έκπλυση του μεταλλεύματος, οι οποίοι προκύπτουν μετά την αποστράγγιση του αρχικού υλικού που εξορύσσεται. Οι σύγχρονες μονάδες έκπλυσης μπορεί να καλύπτουν εκατοντάδες εγκαταστάσεις με δεκάδες μέτρα ύψος, καλύπτοντας πολλά τετραγωνικά μέτρα χώρου για την απόθεσή τους. Αυτό το γεγονός οδηγεί πρώτον σε αρκετές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τυχόν βλαβερά στοιχεία που μπορεί να περιέχονται στα υλικά απόθεσης και δεύτερον σε υπερβολική κατανάλωση χώρου ώστε ο σωρός να έχει ασφαλή κλίση πρανούς.

Κύριος λόγος του τόσο μεγάλου όγκου αποβλήτων είναι χαμηλή περιεκτικότητα των ορυκτών σε χρήσιμο μέταλλο. Για παράδειγμα σε ένα ορυχείο χρυσού χρησιμοποιείται η τεχνολογία έκπλυσης, για μεταλλεύματα τα οποία περιέχουν περίπου 0,5 g χρυσού ανά για κάθε τόνο που εξορύσσεται. Εδώ φαίνεται καθαρά το μέγεθος του όγκου πετρώματος που αποτίθεται. Ακόμα και στις ανοιχτού τύπου εκμεταλλεύσεις υπάρχει ένα σημαντικό ποσοστό αποβλήτων από υλικό το οποίο δεν έχει οικονομική αξία.



Εικόνα 2-1: Από πάνω προς τα κάτω σωρός απόθεσης στείρων ορυχείου χρυσού (Blight 2010).

Έτσι η απόθεση αυτών των αποβλήτων αποτελεί το κύριο και σημαντικότερο έξοδο των εκμεταλλεύσεων, και επιδιώκεται πάντα να είναι όσο πιο χαμηλό αυτό το κόστος με αποτέλεσμα σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Είναι απαραίτητο λοιπόν να αναλυθούν κάποιες τεχνικές βελτίωσης αυτών των κύριων τύπων αποθέσεων.

2.1.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις σωρών απόθεσης

Τα απορρίμματα και οι σωροί αποβλήτων έχουν πολλές επιπτώσεις στο περιβάλλον, άμεσες και έμμεσες, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό τους. Μπορούν να προκαλέσουν διαταραχές του εδάφους, καθώς αλλάζει το φυσικό περιβάλλον με κυριότερο τον αποκλεισμό φυσικών υδάτινων οδών. Επίσης πολύ σοβαρό αντίκτυπο έχουν και στην

ποιότητα του νερού που ρέει κατά μήκος τέτοιων αποθέσεων, καθώς μολύνεται από διάφορα επικίνδυνα στοιχεία που μπορεί να περιέχονται στο στείρο μέταλλευμα. Για αυτό τον λόγο σε περιοχές που υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης των υδάτων θα πρέπει να τελούνται δειγματοληπτικοί έλεγχοι. Ακόμα, δεν είναι λιγότερο σημαντικές οι οπτικές επιπτώσεις που προκαλούν στο γενικότερο τοπίο και την φύση. Μπορούν να οδηγήσουν στην καταστροφή κατοικημένων περιοχών, όπου οι εγκαταστάσεις είναι ορατές από το οδικό δίκτυο και του οικισμού. Σε περιοχές όπου το χρώμα του πετρώματος είναι κοντινό με το φυσικό περιβάλλον, οι επιπτώσεις είναι λιγότερες από εκείνες που έχουν έντονες χρωματικές αντιθέσεις. Σε επίπεδες περιοχές εμφανίζονται λόφοι, σε ορεινά εδάφη είναι ορατές οι αποθέσεις σαν ξεχωριστές κορυφές, διαταράσσοντας το φυσικό ανάγλυφο και οι κοιλάδες θάβονται κάτω από τους σωρούς.



Εικόνα 2-2: Παλιό μεταλλείου χρυσού.

2.2. Τύποι – κατηγορίες σωρών και χώρων απόθεσης

Όπως αναφέραμε και παραπάνω οι μεταλλευτικές αποθέσεις χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα μεταλλευτικά απόβλητα και του σωρούς έκπλυσης. Τα μεταλλευτικά απόβλητα συνήθως αποθηκεύουν τα άγονα υλικά, υλικά χαμηλής οικονομικής αξίας που δεν μπορούν να λάβουν περαιτέρω επεξεργασία. Αυτός ο τύπος χαρακτηρίζεται από την εναπόθεση ουσιαστικά αυτών των μη εκμεταλλεύσιμων υλικών. Τα πλεονεκτήματα αυτής

της μεθόδου είναι αρκετά, αφού χρησιμοποιείται ευρέως στην μεταλλευτική δραστηριότητα, ενώ όμως υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα. Αρχικά το υλικό εναποτίθεται σε πολύ «χαλαρή» μορφή με αποτέλεσμα την διαπερατότητά του από την υγρασία, κάτι που επιδρά επιβαρυντικά σε ένα μη ενισχυμένο σωρό απόθεσης. Επίσης, λόγω του μεγάλου ύψους που αναπτύσσεται σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, προκύπτουν διατμητικές τάσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία της βάσης της απόθεσης. Ακόμα η διαπερατότητα που μπορεί να έχει το εδαφικό υλικό, μπορεί να οδηγήσει σε συνδυασμό με τα υγρά στοιχεία (νερό) σε ρύπανση του εδάφους. Βέβαια, στις περιπτώσεις όπου τα χωματοουργικά αυτοκίνητα (dumpers), εναποθέτουν τα απόβλητα σε στρώματα, τότε κάθε στρώση τέτοιου υλικού συμπιέζεται κατά την απόθεση των επόμενων και αυτό το κάνει λιγότερο διαπερατό στην υγρασία.

Οι αποθέσεις μεταλλευτικών αποβλήτων χωρίζονται και σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα τον τύπο των αποβλήτων, και την διάταξη τους σύμφωνα με τους φυσικούς περιορισμούς που θα υπάρχουν σε κάθε περίπτωση.

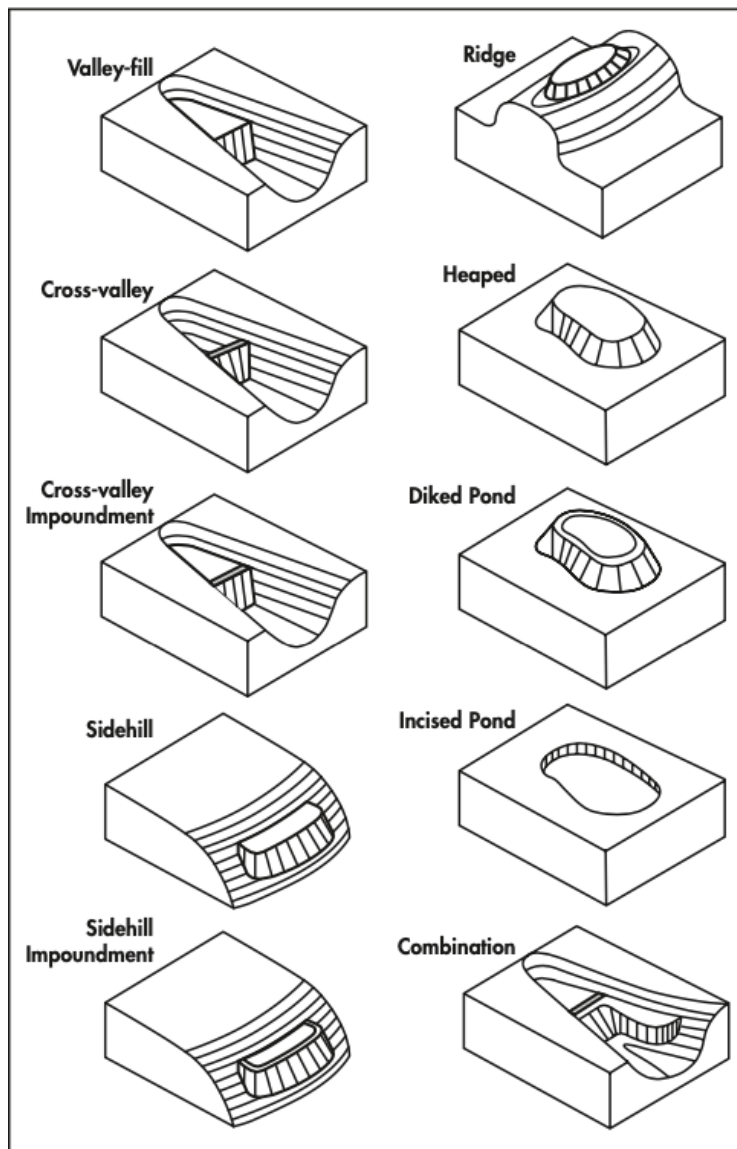
- ◇ Η «γέμιση κοιλάδας» είναι όπως περιγράφεται και από την ονομασία του η πλήρωση με υλικό απόθεσης μιας κοιλάδας. Η απόθεση ξεκινά συνήθως από τον ένα ανώτερο άκρο της κοιλάδας (ανάντη) και προχωρά προς την μέση (κατάντη), με την άνω επιφάνεια του σωρού να είναι συνήθως κεκλιμένη ώστε να μη συσσωρεύεται το νερό. Η δομή αυτή λόγω της τοποθέτησής της προσδίδει μεγάλη σταθερότητα.
- ◇ Η δομή «εγκάρσιας κοιλάδας», η οποία διασχίζει την κοιλάδα κατά μήκος. Αυτή η μέθοδος σχεδιάζεται συνήθως με αποχέτευση βράχου στην βάση της απόθεσης για την απορροή των υδάτων της βροχής, και να είναι σε κλίση ώστε να γίνεται αποστράγγιση. Αυτός ο τύπος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως φράγμα για λεπτούς άνθρακες και απόβλητα.
- ◇ Η «πλευρική δομή» βρίσκεται κατά μήκος της πλαγιάς αλλά δεν διασχίζει τον πυθμένα της κοιλάδας. Αυτή η δομή μπορεί να κατασκευαστεί από υγρά και στερεά απόβλητα ορυχείου, και θα πρέπει να έχει κανάλι απορροής των όμβριων υδάτων. Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτή η διάταξη χρειάζεται υποστήριξη στην βάση της απόθεσης ώστε να βελτιωθεί η ευστάθεια του σωρού.
- ◇ «Ανάχωμα κορυφογραμμής» το οποίο εκτείνεται κατά μήκος όλης της κορυφογραμμής, και το υλικό απόθεσης τοποθετείται και από τις δύο πλαγιές. Αυτός ο τύπος σε αντίθεση

με τις προηγούμενες μεθόδους δεν χρησιμοποιείται για λεπτόκοκκα ή υλικού με νερό/υγρασία. Σε πολλές περιπτώσεις κάποια από τις πλαγιές της κορυφογραμμής χρειάζονται ενίσχυση/στήριξη, για να αυξηθεί η σταθερότητα της απόθεσης.

- ◇ «Υπερυψωμένο ανάχωμα» κατασκευάζεται σε σχεδόν επίπεδο έδαφος και μπορεί να συγκρατήσει είτε τα λεπτόκοκκα είτε τα χονδροειδή απόβλητα των ορυχείων. Αυτή η μέθοδος αποτελείται από δύο μέρη, ένα ανάχωμα συγκράτησης με κλίση, και το ίδιο το ανάχωμα ή απόθεση. Στην περίπτωση που το ανάχωμα που δημιουργείται είναι ομοιογενές ή χονδροειδές, τότε ονομάζεται σωρός.



Εικόνα 2-3: Δομή απόθεσης αποβλήτων εγκάρσιας κοιλιάδας (Blight 2010).



Εικόνα 2-4: Στο σχήμα φαίνονται οι διάφοροι τύποι μεταλλευτικών αποθέσεων ανάλογα με τον τρόπο απόθεσή τους στον χώρο (Orman et al 2011).

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία αποθέσεων και σωρών είναι για αποθήκευση υλικών «αποστράγγισης» ή αλλιώς έκπλυσης των σωρών. Αποτελούνται από υλικά χαμηλής περιεκτικότητας σε ωφέλιμο μέταλλο, από τα οποία ανακτάται το προϊόν αξίας. Αυτά έχουν διάφορες μορφές αλλά κύριος σκοπός είναι η συγκράτηση και εμποδισμός του λεπτόκοκκου υλικού να διαρρεύσει μαζί με τα υγρά στοιχεία. Ουσιαστικά οι σωροί έκπλυσης είναι μεταλλευτικό υλικό αποθεμένο σε πλατφόρμες το οποίο εμποτίζεται με διαλύματα έκπλυσης για να ανακτηθεί το προϊόν αξίας. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται όχι μόνο για μεταλλεύματα χαλκού αλλά πλέον και στο ουράνιο και το νικέλιο. Οι σωροί αυτοί τοποθετούνται σε αδιαπέραστα χιτώνια φυσικών και συνθετικών υλικών ώστε να γίνεται ο

επιθυμητός διαχωρισμός. Και μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας προκύπτουν οι τελικοί σωροί απόθεσης.

Εκτός από τους χώρους στους οποία τα υλικά είναι μεταλλευτικά απορρίμματα και αποτίθενται μόνιμα χωρίς συνήθως να υπάρχει δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τους, υπάρχουν και σωροί αποθήκευσης στους οποίους τα υλικά τοποθετούνται για μελλοντική χρήση, καθώς έχουν δυνητική αξία.

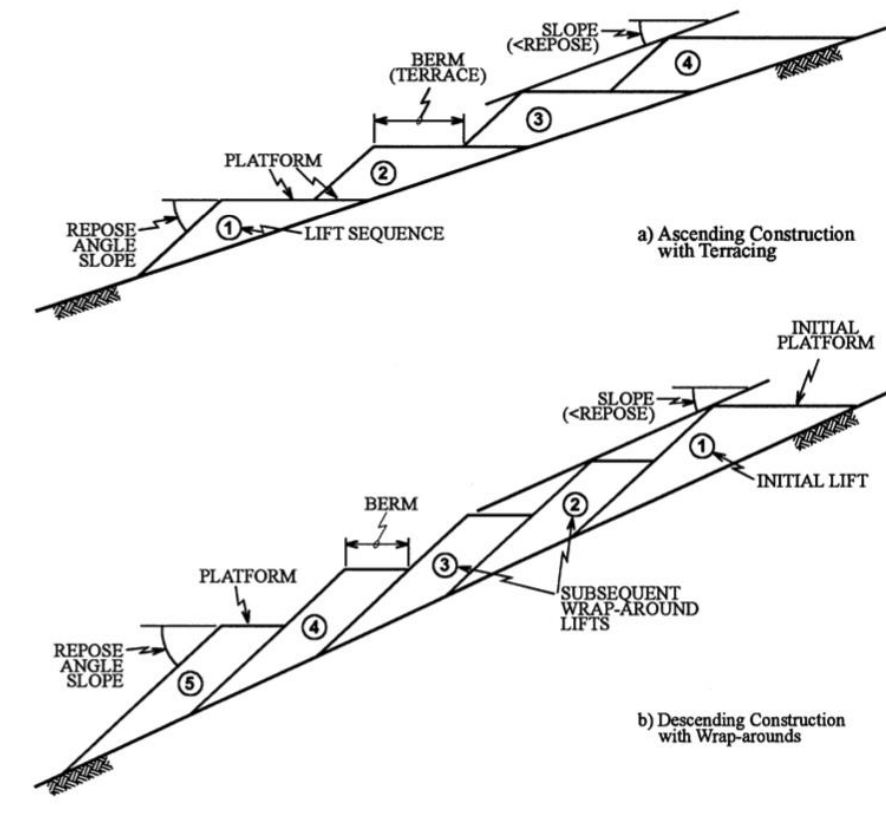
2.3. Σχεδιασμός χώρων απόθεσης

Για τον σωστό σχεδιασμό των αποθέσεων μεταλλευτικών αποβλήτων θα πρέπει να ληφθούν καλά υπόψιν όλες οι ιδιότητες και χαρακτηριστικά του υλικού, που πρόκειται να αποτεθεί και οι ενδεδειγμένοι τρόποι θεμελίωσης. Στην περίπτωση της έκπλυσης σωρών θα πρέπει να υπολογισθεί και η εγκατάσταση κατασκευής διαρροής των υπόγειων υδάτων. Οι μελέτες που γίνονται πριν την κατασκευή των αποθέσεων περιλαμβάνουν έρευνα του πεδίου με χαρτογράφηση του εδάφους και των πετρωμάτων, με γεωτρήσεις. Θα πρέπει να εγκατασταθούν φρεάτια για την ροή των υδάτων και πριν την κατασκευή του σωρού γίνεται ανασκαφή ενός δοκιμαστικού λάκκου. Τέλος θα γίνεται δειγματοληπτικός έλεγχος και εργαστηριακές αναλύσεις από τα πετρώματα, τα μεταλλεύματα και των υλικών που θα θεμελιωθεί η απόθεση.

Όταν επιλεγεί ο χώρος που πρόκειται να γίνει η διάθεση των αποβλήτων, θα πρέπει να εξετασθεί ο τρόπος σχεδιασμού. Μπορεί να είναι εφικτό να εφαρμοστούν περισσότερες από μια μεθόδους σχεδιασμού. Πρόκειται για τον σχεδιασμό ενός επιχώματος, το οποίο ορίζεται ως μια υπερυψωμένη κατασκευή που δημιουργείται με διάστρωση και συμπύκνωση κατάλληλων εδαφικών υλικών σε στρώσεις πάχους τέτοιου ώστε να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη συμπύκνωση, χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο μηχανικό εξοπλισμό.

Πιο αναλυτικά, θα πρέπει αρχικά να καθοριστούν ποιοι τύποι επιχωμάτων είναι «συμβατοί» με το πεδίο που έχει επιλεγεί. Τα περισσότερα είδη επιχωμάτων ταξινομούνται ανάλογα με το τύπο θεμελίωσης και την συνολική διαμόρφωση τους. Μόλις επιλεγεί ο βασικός τύπος επιχώματος, λαμβάνεται η απόφαση σχετικά με τον τρόπο κατασκευής του. Δηλαδή, είτε με ανερχόμενη κατασκευή όπου κατασκευάζεται από κάτω προς τα πάνω, είτε καθοδική κατασκευή, όπου ξεκινάει από πάνω και με φθίνουσες πλατφόρμες υλικού κατεβαίνει προς τα κάτω. Η βέλτιστη προσέγγιση για την σωστή κατασκευή ενός επιχώματος εξαρτάται από

πολλούς παράγοντες, όπως η γεωμετρία του χώρου απόθεσης, το περιθώριο ανύψωσης που υπάρχει, το ίδιο το υλικό και η θεμελίωση. Σε ορεινές περιοχές που ο χώρος της απόθεσης είναι σε πιο χαμηλό υψόμετρο, η κατασκευή του από πάνω προς τα κάτω είναι συνήθως η πιο οικονομική λύση. Βεβαίως, η ποιότητα των αποβλήτων και τα χαρακτηριστικά της θεμελίωσης μπορεί να περιορίζουν τον τρόπο κατασκευής του.



Εικόνα 2- 5: Οι δύο βασικές προσεγγίσεις κατασκευής (Hustrulid et al 2001).

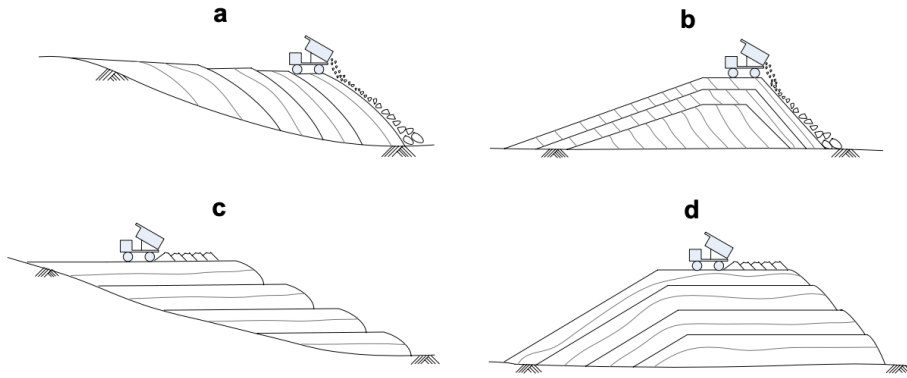


Fig. 5 Typical construction methods of mine waste dumps: **a** top-down on inclined topography, **b** top-down on horizontal topography, **c** bottom-up on inclined topography, **d** bottom-up on horizontal topography

Εικόνα 2- 6: Οι δύο βασικές προσεγγίσεις κατασκευής (Zevgolis 2018).

2.3.1. Ευστάθεια πρανών

Ο σημαντικότερος παράγοντας σε ένα σωρό/ επίχωμα μεταλλευτικών αποβλήτων είναι η ευστάθεια του πρανούς σε σχέση με την κλίση του. Η αστάθεια και η αστοχία των πρανών αποτελούν μείζονα ζητήματα για όλους τους τύπους απορρίψεων αποβλήτων ορυχείων και λειτουργιών έκπλυσης σωρών. Η επιλογή του χώρου απόθεσης θα πρέπει να γίνεται βάσει του κινδύνου που υπάρχει να αστοχήσει το επίχωμα. Για παράδειγμα όταν είναι κατασκευασμένα σε απότομα θεμέλια συνήθως υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την κατασκευή των επιχωμάτων και την σταθερότητα τους. Κάποιοι από αυτούς είναι:

- Τοπογραφία τοποθεσίας
- Γεωμετρία απορρίψεων
- Ρυθμός στοιβαξης
- Πάχος ανύψωσης / ύψος
- Γεωτεχνικές ιδιότητες
- Μέθοδος κατασκευής
- Φορτία εξοπλισμού
- Φρεατική επιφάνεια
- Σεισμικές δυνάμεις

Όμως πολύ σημαντικοί είναι και οι παράγοντες από το ίδιο το υλικό, όπως η φύση του πετρώματος και ο βαθμός του κατακερματισμού που προκαλείται κατά την εξόρυξη, το σχήμα των σωματιδίων του υλικού, το πόσο ισχυρά ή ασθενή είναι και τέλος η αντοχή του πετρώματος σε εξωγενείς παράγοντες όπως οι ταχείες αλλαγές στις φυσικές τους ιδιότητες και η έκθεση στα καιρικά φαινόμενα.

Γενικά χρησιμοποιείται η ανάλυση της οριακής ισορροπίας, η οποία είναι μια από πολλές επικρατούσες προσεγγίσεις, και είναι κατάλληλη και επαρκής για την αξιολόγηση της σταθερότητας της κλίσης των απορρίψεων των αποβλήτων. Σκοπός της μεθόδου ανάλυσης της ευστάθειας είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας (Factor of Safety – FS). Ως συντελεστής ασφαλείας ορίζεται ο λόγος των δυνάμεων / ροπών αντίστασης προς τις δυνάμεις / ροπές που τείνουν να προκαλέσουν την μετακίνηση κατά μήκος μιας πιθανής επιφάνειας ολίσθησης.

$$FS = \frac{\text{Δυνάμεις/ροπές αντίστασης}}{\text{Δυνάμεις/ροπές καταπόνησης}}$$

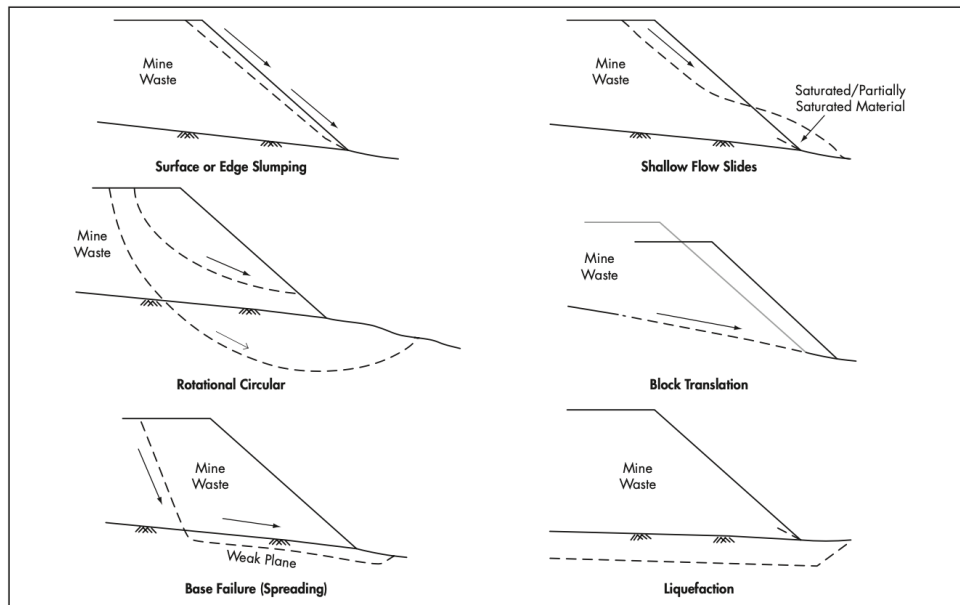
Όταν ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με την μονάδα τότε το πρηνές είναι σε κατάσταση οριακής ισορροπίας και μπορεί να παρουσιάσει αστοχία εάν γίνει μικρότερος της μονάδας. Η αστοχία των επιχωμάτων συμβαίνει συνήθως αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής τους, καθώς δέχεται την μέγιστη τάση. Με την πάροδο του χρόνου συνήθως γίνεται αποστράγγιση του νερού και την μείωση της πίεσης, αυξάνεται η διατμητική αντοχή και μειώνονται οι πιθανότητες αστοχίας.

2.3.1.1. Μηχανισμοί αστοχίας

Οι βασικοί τρόποι με τους οποίους αστοχούν οι αποθέσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για τον σχεδιασμό της σταθερότητας του σωρού. Οι μηχανισμοί αστοχίας εξαρτώνται από παράγοντες όπως ο προσανατολισμός των συνεχειών και τις διευθύνσεις των φορτίων, την συχνότητά τους και τα χαρακτηριστικά τους. Έτσι έχουμε τους τρεις βασικούς μηχανισμούς:

- Διατμητική ολίσθηση
- Περιστροφική διάτμηση
- Εφελκυστική αποκόλληση

Στην συνέχεια έχουμε πιο συγκεκριμένα τους τρόπου αστοχίας του πρανού, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2-7: Οι κυριότεροι μηχανισμοί αστοχίας του επιχώματος μεταλλευτικών αποθέσεων (Orman et al 2011).

- Ο πιο συνηθισμένος τρόπος αστοχίας είναι η **πτώση της κορυφής** στην άκρη του σωρού. Η αστοχία αυτή συνήθως συμβαίνει κοντά στην κορυφή, καθώς τα απόβλητα χαμηλής διαπερατότητας επιτρέπουν την ανάπτυξη υψηλών κλίσεων. Συνήθως οι αστοχίες συμβαίνουν μετά από έντονες βροχοπτώσεις.
- Η «**αστοχία αεροπλάνου**» είναι παρόμοια με την πτώση των άκρων. Σε αυτή την περίπτωση όμως η ολίσθηση εμφανίζεται κατά μήκος ενός μόνο επιπέδου αστοχίας, το οποίο μπορεί να προκληθεί από μια ζώνη αποβλήτων χαμηλότερης ποιότητας ή την απόρριψη αποβλήτων πάνω από χιόνι ή πάγο.
- Η **ρηγή ρέουσα ολίσθηση** είναι ρηχές αποτυχίες κορεσμένων ή μερικών κορεσμένων αποβλήτων, η οποία προκαλείται από βροχόπτωση ή χιονοστιβάδα.
- Η **περιστροφική κυκλική αστοχία**, είναι αστοχία της μάζας κατά μήκος μια καμπύλης επιφάνειας. Μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα υπερβολικού ύψους απορρίψεων και πρόσθετης φόρτισης από σεισμικές δραστηριότητες και ασθενών λεπτόκοκκων

απορριμμάτων. Για παράδειγμα η αστοχία ερπυσμού είναι ένα ένας τύπος περιστροφικής αστοχίας.

- Ακόμα έχουμε την αστοχία με μορφή βαθιάς θραύσης στην βάση του επιχώματος. Αυτό συμβαίνει όταν τοποθετείται αδύναμο ένα λεπτό αδύναμο στρώμα κοντά στην θεμελίωση, ειδικά εάν έχει κλίση. Αυτό οδηγεί σε συνολική αποτυχία της απόρριψης.
- Η **επίπεδη ολίσθηση** μπορεί να προκύψει από οποιοδήποτε από τους παραπάνω παράγοντες που αναφέρονται στην περιστροφική αστοχία και συμβαίνει συνήθως σε απότομα πρανή. Το μεγαλύτερο μέρος του εδαφικού υλικού ολισθαίνει ως ένα μπλοκ κατά μήκος του επιπέδου αδυναμίας.
- Με την **υγροποίηση** έχουμε αστοχία που προκαλείται από υλικά τα οποία είναι υγροποιήσιμα και υφίστανται υψηλές πιέσεις νερού. Κυρίως εάν η αστοχία αυτή εμφανιστεί στην βάση του, τότε μπορεί να επηρεάσει προοδευτικά όλη την απόθεση.

2.3.1.2. Παράγοντες επίδρασης της ευστάθειας

Οι παράγοντες που αναφέραμε και παραπάνω οι οποίοι επηρεάζουν την ευστάθεια της κλίσης είναι σημαντικοί για τον ασφαλή σχεδιασμό του επιχώματος. Το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του κάθε έργου καθορίζουν και το μέγεθος της έρευνας που γίνεται. Η επιλογή του χώρου απόθεσης συνήθως γίνεται βάση της απόστασης από εκεί που είναι τα απόβλητα και του χώρου διάθεσης, για μικρότερο κόστος μεταφοράς. Όμως θα πρέπει να ληφθούν και όλες οι τοπογραφικές πληροφορίες για όλη την περιοχή που μπορεί να επηρεάσει την απόθεση, αλλά και των περιοχών που θα επηρεασθούν σε περίπτωση αστοχίας. Σε τέτοιες περιπτώσεις η κλίση της βάσης είναι σημαντικός παράγοντας στην σταθερότητα του επιχώματος. Συνήθως οι κλίση θεμελίωσης όταν είναι πάνω από 25 μοίρες οδηγεί σε χαμηλότερο συντελεστή ασφαλείας για την ευστάθεια του πρανούς. Επίσης τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά παρέχουν πληροφορίες που αφορούν πλευρική υποστήριξη με σκοπό την βελτίωση της ευστάθειας.

Στη συνέχεια, ελέγχεται η γεωμετρία της απόρριψης, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την μέθοδο που θα επιλεγεί, αλλά και από την τοπογραφία. Γενικά οι αποθέσεις που κατασκευάζονται με στρώσεις διατηρούν υψηλότερο συντελεστή ασφαλείας, αφού η απόρριψη γίνεται με ελεγχόμενο τρόπο από κάτω προς τα πάνω. Η απόρριψη επιδιώκεται να έχει όσο πιο μεγάλες πλαγιές επιτρέπουν οι συνθήκες με σκοπό την μεγιστοποίηση της

χωρητικότητας στους χώρους απόθεσης. Γενικά έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος της απόρριψης από πάνω προς τα κάτω έχει μικρότερη ευστάθεια σε αντίθεση με την δημιουργία του σωρού σε στρώσεις από κάτω προς τα πάνω.

Κύριος παράγοντας στην κατασκευή των επιχωμάτων αυτών είναι τα μεταλλευτικά απόβλητα και οι ιδιότητές τους. Η πυκνότητα, ο κορεσμός και η διατμητική αντοχή του υλικού επηρεάζουν τον τρόπο αστοχίας και καθορίζουν τον συντελεστή ασφαλείας (FS) κατά της ολίσθησης. Χρήσιμες πληροφορίες είναι και το ειδικό βάρος του υλικού, η διαπερατότητα, ο δείκτης συμπίεσης, και άλλες παράμετροι που προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές. Πολλές φορές η επαλήθευση γίνεται κατά την κατασκευή του επιχώματος και ο έλεγχος της ακρίβειας του σχεδιασμού. Είναι πολύ σημαντική η κατανόηση της διατμητικής αντοχής του υλικού και της συμπεριφοράς του, όπως κι η γωνία τριβής του που αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από την βάση του. Μια άλλη πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η επίδραση του καιρού στις γεωτεχνικές ιδιότητες του υλικού. Η διαφορετική «αντίδραση» των υλικών ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, μειώνει την ευστάθεια των πρανών.

Οι γεωτεχνικές ιδιότητες της θεμελίωσης είναι εξίσου σημαντικές για τον σχεδιασμό του πρανού. Η βάση αποτελεί το πιο κρίσιμο παράγοντα για την συνολική ευστάθεια του πρανού. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην παρουσία υπόγειων υδάτων κοντά στην επιφάνεια της θεμελίωσης για ενδεχόμενες κατολισθήσεις ή καθιζήσεις. Η εξερεύνηση αυτή γίνεται με δειγματοληπτικούς ελέγχους και επιτόπιες δοκιμές. Η διατμητική αντοχή του υλικού θεμελίωσης αλλά και η διαπερατότητα του είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες για την αποφυγή αστοχίας. Ακόμα ένας παράγοντας που επηρεάζει τον σχεδιασμό των μεταλλευτικών αποθέσεων είναι οι υδροφόροι ορίζοντες. Οι επιπτώσεις του νερού και κυρίως των υπόγειων υδάτων στην ευστάθεια των επιχωμάτων είναι δύσκολο να εκτιμηθούν αλλά πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την αποφυγή εισόδου νερού στην περιοχή της απόθεσης. Η συσσώρευση νερού εντός της περιοχής της απόθεσης μειώνει σημαντικά τον συντελεστή ασφαλείας και είναι αναγκαίο να ληφθούν μέτρα για την αντιμετώπιση και αποστράγγιση των υδάτων. Μια αύξηση του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία όλη την κατασκευή. Τέλος, μεγάλη επιρροή έχουν οι σεισμικές δυνάμεις που μπορεί να υπάρχουν σε σεισμικά ενεργές περιοχές. Η σεισμική φόρτιση, η οποία επηρεάζει την ευστάθεια του πρανού, και αντιμετωπίζεται συνήθως σαν στατικό φορτίο. Ο μεγαλύτερος

κίνδυνος είναι η ρευστοποίηση των υλικών θεμελίωσης αλλά και ευαίσθητων υλικών αποβλήτων.

2.3.1.2.1. Διατμητική αντοχή υλικών σωρών απόθεσης

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του πετρώματος των αποβλήτων επηρεάζουν την ευστάθεια του επιχώματος/ απόθεσης. Η διατμητική τους αντοχή μέσω της γωνίας τριβής και της συνοχής, είναι κρισιμότερη παράμετρος για να προσδιορίσουμε την μηχανική συμπεριφορά του υλικού απόθεσης. Η συνοχή παίζει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια του επιχώματος, όμως σημαντικότερη είναι γωνία τριβής του υλικού. Κατά την διερεύνησή της ευστάθειας των αποθέσεων, έχουν προκύψει διάφορα συμπεράσματα. Ο Blight (2010) προτείνει ως ασφαλείς τιμές που κυμαίνονται από 35 μοίρες έως 45 μοίρες. Οι Caldwell και Moss μιλούν για αποτελεσματική γωνία τριβής περίπου 37 μοίρες, εάν το πέτρωμα είναι ικανό. Όπως και ο Piteau(1991) πρότεινε την ίδιο τιμή ως μια μέση γωνία. Πιο απότομες γωνίες μπορούν αν προκύψουν στην περίπτωση που έχουμε αρκετά συνεκτικό υλικό, αν και διατρέχει τον κίνδυνο εξομάλυνσης με την πάροδο του χρόνου λόγω υποβάθμισης του υλικού.

Η γωνία τριβής, η οποία καθορίζει και την διατμητική αντοχή, προκύπτει από τον παρακάτω τύπο.

$$\tan\phi' = \frac{\tan\phi k'}{\gamma M \gamma m}$$

Όπου γ επιμέρους συντελεστές ασφαλείας σύμφωνα με τον «Ευρωκώδικα»

2.3.2. Καθιζήσεις

Οι καθιζήσεις των μεταλλευτικών αποβλήτων οφείλονται σε αλλαγή του προσανατολισμού των σωματιδίων του υλικού, στις καιρικές συνθήκες όπου επηρεάζονται πολύ υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο, εξασθενεί η συνεκτικότητα μεταξύ των σωματιδίων λόγω της ύπαρξης νερού. Με τον κορεσμό των υλικών, υπάρχει μείωση της αντοχής και προκαλείται καθίζηση, ειδικά στους μη συνεκτικούς σωρούς αποβλήτων. Ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η καθίζηση συνήθως εξαρτάται από το ύψος του επιχώματος και τον ρυθμό απόθεσης. Το φαινόμενο είναι πιο ήπιο όταν έχουμε στρώσεις υλικού και όχι απότομες επιχωματώσεις. Συνήθως η καθίζηση συμβαίνει αμέσως μετά την ολοκλήρωση του επιχώματος και μπορεί να συνεχίζεται για αρκετό καιρό με αργό ρυθμό. Οι πιθανότητες

κατάρρευσης μπορούν αν ελαχιστοποιηθούν με καλή συμπίεση του υλικού κατά την κατασκευή του. Για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων των σωρών υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, οι οποίες επιλέγονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε επιχώματος (ύψος, υλικό, μέθοδος κατασκευής).

2.3.3. Ροή και στράγγιση

Η κατανόηση των ροών των υγρών κατά μήκος των αποθέσεων είναι αρκετά σημαντική για την κατανόηση της σταθερότητας του επιχώματος αλλά και των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών κινδύνων (μόλυνση των υδάτων). Τα περισσότερα μεταλλευτικά απόβλητα είναι ακόρεστα και η ακριβής συμπεριφορά του εδάφους για την μεταφορά των ρύπων είναι πιο δύσκολο να προβλεφθεί από ότι στα κορεσμένα. Η υδραυλική αγωγιμότητα αντιπροσωπεύει την αγωγιμότητα του ακόρεστου υλικού στα διάφορα περιεχόμενα του νερού. Αυτό μπορεί να μετρηθεί στο εργαστήριο και να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους.

Τα στοιχεία σχεδιασμού μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ροή και στράγγιση μέσω των απορρίψεων των αποβλήτων. Η άνω επιφάνεια της απόθεσης θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την ροή των επιφανειακών υδάτων στις πλαγιές. Συνήθως κατά την απόρριψη το πιο χονδροειδές υλικό καταλήγει στο κάτω μέρος του επιχώματος, δημιουργώντας μια «αποχέτευση» από πετρώματα στην βάση του. Ανάλογα και με την τοπογραφία της περιοχής τέτοια τμήματα αποστράγγισης μπορούν να είναι χρήσιμα για τον έλεγχο της ροής, ειδικά σε περιοχές που ήδη τα διέπει κάποιος ποταμός. Σε περίπτωση που σταματήσει η αποστράγγιση του επιχώματος, τότε υπάρχει κίνδυνος να μειωθεί η ευστάθεια της απόθεσης.

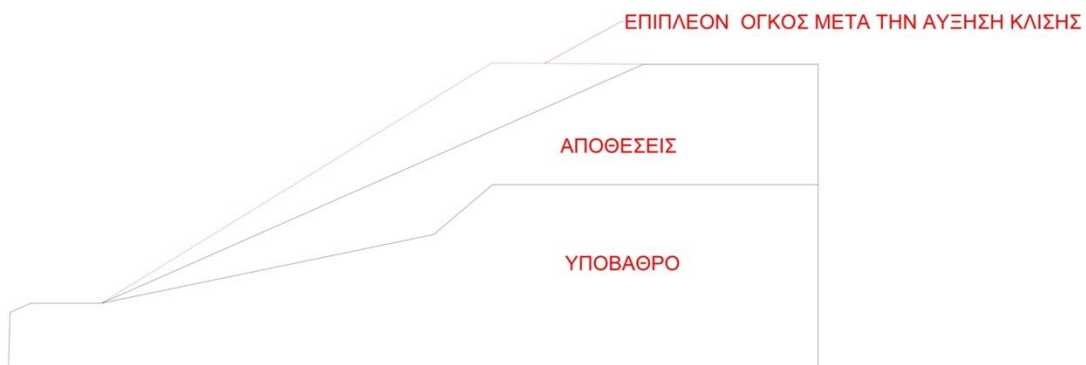
2.3.4. Διάβρωση

Η διάβρωση είναι μια φυσική διαδικασία η οποία δεν μπορεί να σταματήσει να υφίστανται αλλά μπορεί μόνο να ελέγχεται. Η διαπύρωση σε υλικά που στοιβάζονται υπό γωνία όπως στην περίπτωση των αποθέσεων μεταλλευτικών αποβλήτων, μπορεί να είναι επικίνδυνη. Αυτό συμβαίνει διότι ο κίνδυνος αστοχίας του υλικού είναι αυξημένος λόγω της καθοδικής κίνησης που έχει το υλικό, της καθίζησης που υφίσταται. Από την διάβρωση μπορεί να προκληθεί ακόμα και μόλυνση των κατάντι υδάτων, αφού χάνεται η συνεκτικότητά του. Για

την αποφυγή αυτών θα ήταν σκόπιμο σε τέτοιες περιπτώσεις η μείωση της κλίσης και η ενίσχυσή του επιχώματος με βλάστηση, κάτι που θα οδηγήσει στην δραματική μείωση της διάβρωσης. Είναι λοιπόν σημαντικό να γίνεται ο σχεδιασμός έτσι ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση, καθώς είναι πολύ πιο ακριβή διαδικασία αν έχει ήδη συμβεί η διάβρωση και ως αποτέλεσμα η μόλυνση. Θα πρέπει λοιπόν να χαρακτηρίζεται ένα υλικό ευαίσθητο σε διάβρωση, και θα πρέπει εκείνο με το υψηλότερο ποσοστό να καλύπτεται με υλικό χαμηλότερης κλίμακας διάβρωσης.

2.4. Ο ρόλος της κλίσης των σωρών στην χωρητικότητα των επιχωμάτων απόθεσης

Για την καλύτερη διαχείριση των εξορυκτικών αποβλήτων λοιπόν είναι αναγκαίο να αυξηθεί ο όγκος του επιχώματος χωρίς όμως να αυξάνεται ο εδαφικός χώρος που απαιτείται. Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση της κλίσης του σωρού απόθεσης, ώστε η «χωρητικότητά» του να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Στο παρακάτω σχηματικό παράδειγμα είναι εμφανής η σημασία της κλίσης στους σωρούς αποθέσεων, όπου φαίνεται ο όγκος πριν και μετά την αύξηση της κλίσης πρανούς.



Σχήμα 1: Σχηματικό παράδειγμα σημασίας της κλίσης για την αύξηση του όγκου χωρητικότητας.

Γενικά αυτό που θέλουμε να επιτευχθεί είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη κλίση του επιχώματος με γωνία όμως τέτοια ώστε ο συντελεστής ασφάλειας να είναι περίπου στο 1.4

για να είναι ασφαλές το πρανές και να μην υπάρξει αστοχία. Όποτε θα πρέπει να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός κλίσης πρανούς και καλού συντελεστή ασφαλείας. Σε πολλές περιπτώσεις προκειμένου να επιτευχθεί αυτό ενισχύουμε το επίχωμα με γεωσυνθετικά υλικά για μεγαλύτερη ευστάθεια.

3. ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΠΛΕΩΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΕΠΙΧΩΜΑΤΑ :

3.1 Εισαγωγή

Οπλισμένη γη ή γεωσυνθετικά υλικά όπως ονομάζονται είναι ένα επίπεδο προϊόν κατασκευασμένο από πολυμερή υλικά που εφαρμόζονται σε συνδυασμό με το έδαφος, πετρώματα και άλλα γαιώδη υλικά που συνδέονται με την επιστήμη της γεωτεχνολογίας, σε διάφορα κατασκευαστικά έργα.

Στόχος των γεωσυνθετικών υλικών είναι:

1. Να εκτελούν καλύτερα κάποια κατασκευή, χωρίς αλλοίωση του υλικού ή υπερβολική διαρροή.
2. Να είναι πιο οικονομικά από τα παραδοσιακά υλικά και λύσεις – κυρίως λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής που έχουν, και άρα μειωμένου κόστους συντήρησης και αντικατάστασης.

Τα γεωσυνθετικά υλικά είναι μηχανικά υλικά με ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών σε κατασκευές που αφορούν τις μεταφορές, γεωτεχνικές εφαρμογές, περιβαλλοντικές και υδραυλικές εφαρμογές, εφαρμογές σχετιζόμενες με την οδοποιία και πολλές άλλες. Η ανάπτυξη αυτών των υλικών τα τελευταία 25 χρόνια ήταν ραγδαία, καθώς σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα έχει αναπτυχθεί ένα υλικό τόσο ισχυρό και οι λόγοι για τους οποίους υπήρξε αυτή η έκρηξη σε νέα προϊόντα είναι πολλοί και αναφέροντα παρακάτω:

- Η κατασκευή τους γίνεται σε εγκαταστάσεις εργοστασίου, με ελέγχους ποιότητας
- Μπορούν αν τοποθετηθούν γρήγορα
- Αντικαθιστούν πολλά υλικά κάνοντας πιο εύκολη την κατασκευή.
- Εξοικονόμηση χρόνου εργασίας
- Πλέον η χρήση τους σε συγκεκριμένες περιπτώσεις απαιτείται από τη νομοθεσία
- Είναι πολύ ανταγωνιστικά ως προς το κόστος σε σχέση με άλλα εδαφικά υλικά ή άλλα κατασκευαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται για σκοπούς ενίσχυσης – οπότε και μειώνουν αρκετά το κόστος κατασκευής
- Διατίθενται ενεργά στη αγορά.
- Μέχρι τώρα κάνουν αδύναμες κατασκευές δυνατές.
- Η απόδοση και τα χαρακτηριστικά τους έχουν πλέον περάσει από πολλές δοκιμές, και έχει δημιουργηθεί βάση δεδομένων για τον σχεδιασμό τους [Koerner, 2005].

Η βιομηχανία των γεωσυνθετικών υλικών βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στην βιομηχανία των πλαστικών, δηλαδή μιλάμε για πολυμερή υλικά κατασκευασμένα από υδρογονάνθρακες και υαλοβάμβακες, καουτσούκ και κάποια φυσικά υλικά που χρησιμοποιούνται μερικές φορές.

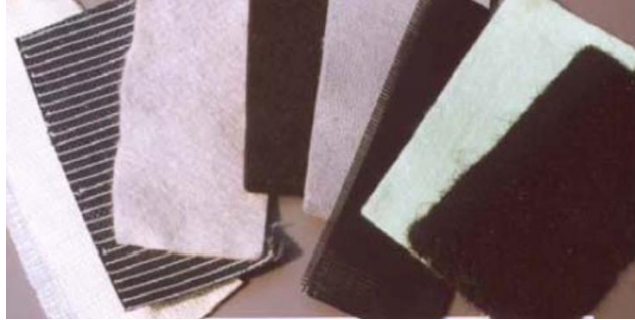
Οι πρώτες προσπάθειες ενίσχυσης του εδάφους ξεκινούν πολλά χρόνια πριν, με προσθήκη υλικών για να ενισχύσουν την συμπεριφορά του εδάφους. Οι πρώτες προσπάθειες αφορούσαν την σταθεροποίηση βάλτων και ελωδών εδαφών, με τη χρήση κορμών δέντρων. Οι προσπάθειες σταθεροποίησης τους εδάφους συνεχίστηκαν μέχρι σήμερα και αναπτύχθηκε μια πιο σύνθετη προσέγγιση με τη δημιουργία επιφανειακών στρώσεων. Η πρώτη χρήση υφασμάτων και υλικών για την ενίσχυση ήταν για την ενίσχυση δρόμων, έγινε το 1926 στη Νότια Καρολίνα. Εκτός από ενισχυτικές και στηρικτικές ικανότητες τα γεωσυνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται και ως «φράγματα» διαχωρισμού μεταξύ δύο ανόμοιων υλικών για την αποστράγγιση των υγρών (νερού), και φιλτράρισμα του εδάφους, καθώς και η ικανότητα να αποτελέσουν ένα αδιαπέραστο φράγμα που θα εμποδίζει κάθε είδους κίνηση μεταξύ των δύο στρώσεων τους εδάφους. Οι κύριες λοιπόν λειτουργίες που διαχωρίζουν τους διάφορους τύπους γεωσυνθετικών υλικών είναι:

- Διαχωρισμός
- Ενίσχυση
- Φιλτράρισμα
- Αποξήρανση – σύστημα απορροής
- Συνοχή – συγκράτηση (υγρών και αερίων).

Από τις παραπάνω λειτουργίες, προκύπτουν και τα διάφορα είδη γεωσυνθετικών υλικών ανάλογα με το έργο που επιτελούν. Τα οποία είναι:

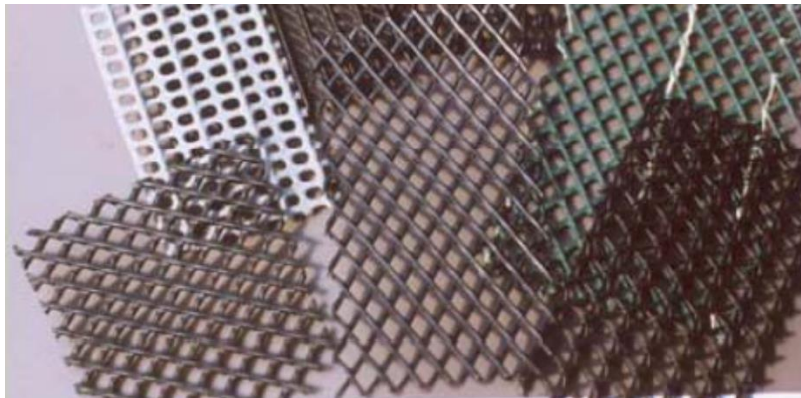
Γεωυφάσματα: τα οποία είναι μια από τις δύο μεγαλύτερες κατηγορίες τέτοιου είδους υλικών. Είναι υφάσματα, που αποτελούνται από συνθετικές ίνες οι οποίες είναι κατασκευασμένες από εύκαμπτα, πορώδη υλικά από μηχανές ύφανσης, πλεγμένα με τέτοιο τρόπο που δημιουργούν μια εικόνα υφάσματος. Τα γεωυφάσματα είναι πορώδη υλικά και επιτρέπουν την ροή των υγρών κατά μήκος τους και εντός του πάχους τους. Υπάρχουν πάνω από 100 πεδία εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιήσουν γεωυφάσματα, και εκτελούν

τουλάχιστον μια από τις λειτουργίες διαχωρισμού, ενίσχυσης, φιλτραρίσματος, και απορροής.



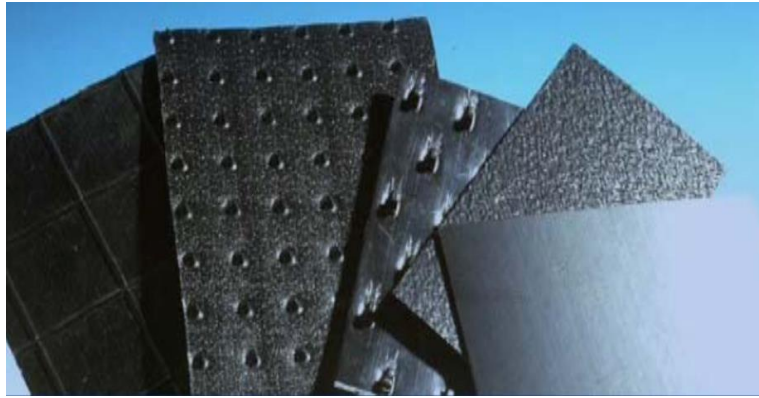
Εικόνα 3-1: Διάφορα είδη γεωφασμάτων.

Γεωδίκτυα: αποτελούν άλλο ένα εξειδικευμένο τμήμα την οικογένεια των γεωσυνθετικών. Η εφαρμογή τους είναι σε παράλληλες σειρές από πολυμερής ίνες σε οξεία γωνία η μία από την άλλη. Η χρήση των γεωδικτύων γίνεται αποκλειστικά για την μεταφορά υγρών όλων των τύπων.



Εικόνα 3-2: Γεωδίκτυα.

Γεωμεμβράνες: οι οποίες αναπτύχθηκαν πρώτα στις Ηνωμένες Πολιτείες και στη Γερμανία, μέσα στο 1980. Είναι σχετικά λεπτά υλικά, αδιαπέραστα φύλλα από πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως για την επένδυση ή κάλυψη υγρών ή και στερεών σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης. Χώρους υγειονομικής ταφής, δεξαμενές, κανάλια, και γενικά εγκαταστάσεις περιορισμού υγρών, ατμών. Οι εφαρμογές τους έχουν περιβαλλοντικό κυρίως χαρακτήρα αν και συναντώνται ευρέως και σε άλλες μεγάλες κατηγορίες κατασκευών.



Εικόνα 3-3: Γεωμεμβράνες.

Γεωσυνθετικοί αργιλικόι φραγμοί: είναι συνδυασμός πολυμερών και φυσικών εδαφικών υλικών, που έχουν τη μορφή εργοστασιακών κατασκευασμένων ρολών, από λεπτά στρώματα μπετονίτη αργίλου τοποθετημένο μεταξύ δύο γεωφασμάτων ή συνδεδεμένα με γεωμεμβράνη. Χρησιμοποιούνται σύνθετα κάτω από μεμβράνες ή μόνα τους σε περιβαλλοντικές εφαρμογές καθώς και περιορισμού, και σε πολλές άλλες.



Εικόνα 3-4: Παράδειγμα γεωσυνθετικού αργιλικού φραγμού.

Γεωσωλήνες: αλλιώς θαμμένοι πλαστικοί σωλήνες, είναι υλικά που χρησιμοποιούνται σε όλες τις εφαρμογές, κάτι που αποτελεί πρόκληση λόγω των υψηλών συμπιεστικών φορτίων που ασκούνται. Επικεντρώνονται αποκλειστικά στην λειτουργία της απορροής.



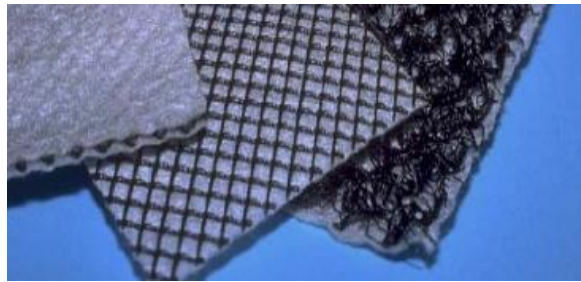
Εικόνα 3-5: Είδη γεωσωλήνων.

Γεωαφροί: είναι ένα «αφρώδες» πολυμερές αποτελούμενο από πολλά κλειστά αέρια κελιά, δημιουργώντας μεγάλα αλλά ελαφριά κομμάτια που στοιβάζονται το ένα δίπλα στο άλλο προσδίδοντας μια πολύ ελαφριά πλήρωση σε πολλές εφαρμογές.



Εικόνα 3-6: Κομμάτι γεωαφρού.

Γεωσύνθετα υλικά: είναι ένας συνδυασμός όλων των γεωσυνθετικών υλικών ή κάποιων από αυτά μαζί με το έδαφος.



Εικόνα 3-7 και 3-8: Συνδυασμοί διάφορων γεωσυνθετικών υλικών.

Γεωπλέγματα:

Η τελευταία ομάδα γεωσυνθετικών υλικών είναι τα Γεωπλέγματα, η οποία είναι η δεύτερη μεγαλύτερη κατηγορία γεωσυνθετικών υλικών, με τα οποία θα ασχοληθούμε και εμείς στη συγκεκριμένη εργασία. Είναι γεωσυνθετικό υλικό το οποίο αποτελείται από ένα κάρβουνο στοιχείων εφελκυσμού, κατάλληλα πλεγμένα μεταξύ τους σε εγκάρσια και διαμήκη μέλη .



Εικόνα 3-9: Κομμάτι γεωπλέγματος.

Είναι πλαστικά υλικά που διαμορφώνονται σαν πολύ ανοικτό πλέγμα, με μεγάλες οπές, 10 έως 100 mm, και έχουν μορφή είτε μονοαξονικών είτε διαξονικών πλεγμάτων. Τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ τους θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να διευκολύνεται η αλληλεπίδραση με το έδαφος. Τα μονοαξονικά γεωπλέγματα ενδείκνυνται για εφαρμογές όπου η διεύθυνση του πεδίου των κύριων τάσεων είναι γνωστή εκ των προτέρων, ενώ τα διαξονικά για περιπτώσεις όπου οι επιτόπου τάσεις είναι εν γένει ανομοιόμορφες. Επίσης μεγάλη σημασία έχει και το υλικό κατασκευής τους, από υψηλής πυκνότητας Πολυαιθυλένιο (HDPE) και από πολυεστέρα επενδυμένο με PVC (PET). Οι τρόποι σχηματισμού τους ποικίλουν. Δημιουργούνται είτε με τεντωμένες τη μια από τις δύο κατευθύνσεις για βελτιωμένες φυσικές ιδιότητες, είτε κατασκευασμένα σε μηχανή ύφανσης ή πλεξίματος, ή με τη συγκόλληση ράβδων ή ιμάντων μαζί. Έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών και η κύρια λειτουργία τους είναι ενισχυτικά υλικά. Χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του εδάφους, για τοίχους, απότομες πλαγιές, βάσεις αυτοκινητοδρόμων, και εδαφικά θεμέλια.

Σε αντίθεση με άλλα γεωσυνθετικά υλικά, τα γεωπλέγματα ενεργοποιούνται πλήρως σε παραμορφώσεις που είναι συμβατές με αυτές της μέγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους. Για την καλύτερη ενίσχυση του εδάφους, εξυπηρετούν καλύτερα αυτά με υψηλό μέτρο ελαστικότητας, σε σχέση με τα άλλα, και αυτό συμβαίνει γιατί αλληλοεπιδρούν καλύτερα με τις παραμορφώσεις του εδάφους.

Όλα τα γεωπλέγματα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής όταν βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, και διατηρούν τις μηχανικές ιδιότητές τους για δεκαετίες, ακόμα και όταν είναι εκτεθειμένα στο φως του ήλιου. Επιπλέον η μοριακή σύσταση του πολυμερούς, προσδίδει υψηλή αντοχή

σε συγκεκριμένες διευθύνσεις φόρτισης και μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, κάτι που εξασφαλίζει υψηλή εφελκύστηκά αντοχή με μικρές παραμορφώσεις με ταυτόχρονη μικρή τάση για ερπυσμό.

Οι πωλήσεις ανά τον κόσμο ανέρχονται σε 100,000,000 m² με διαρκώς αυξανόμενες τάσεις. Παραδείγματος χάριν, το 90% των τοίχων αντιστήριξης που κατασκευάστηκαν στην Βόρεια Αμερική το 1998 ενισχυθήκαν με γεωπλέγματα. [Koerner, 2005]

3.2 Χρήσεις γεωπλεγμάτων στην γεωτεχνική μηχανική

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους (με υψηλή θλιπτική αντοχή) και των γεωπλεγμάτων, και γενικά των γεωσυνθετικών υλικών (με υψηλή εφελκυστική αντοχή), έχουν οδηγήσει στη βελτίωση πολλών κατασκευών αλλά και τον σχεδιασμό νέων. Χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές των τεχνικών έργων, κυρίως όμως στην οδοποιία με σκοπό την ενίσχυση και τον οπλισμό εδαφών. Δεδομένου ότι η αντοχή τους είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα γεωυφάσματα, έχουν χρησιμοποιηθεί στο χώρο των γεωκατασκευών για οπλισμένα επιχώματα, στο χώρο των ασφαλτικών για οπλισμένες στρώσεις ασφαλτοταπήτων, στο χώρο των οδοστρωμάτων για ενισχυμένες στρώσεις έδρασης, για θεμελιώσεις κ.λπ. Σπάνια αναλαμβάνουν και τον διαχωρισμό των εδαφών.

Πιο κάτω έχουμε μερικές από άλλες συνηθισμένες χρήσεις τους:

- Για οδοποιία χωρίς οδόστρωμα, (εννοούμε την τοποθέτηση των γεωυλικών πάνω σε ασθενή υπόβαση).
- Για οδοποιία με οδόστρωμα, (στα έργα οδοποιίας όπου αναμένεται η τελική διάστρωση με σκυρόδεμα ή άσφαλτο).
- Θεμελιώσεις, (χρειάζονται σε περιοχές κοντά σε κοίτες ποταμών ή ακτές θαλασσών, που αποτελούνται κυρίως από μαλακά ή χαλαρά εδάφη).
- Επιχώματα, (χαρακτηρίζονται τα εδάφη με κλίση πρανούς από 70 μοίρες και τα γεωπλέγματα τοποθετούνται σε οριζόντιες στρώσεις μέσα στο εδαφικό υλικό).
- Τοίχοι αντιστήριξης, (συμβατικοί τοίχοι βαρύτητας που αποτελούνται από σκυρόδεμα).

Άλλες χρήσεις των γεωπλεγμάτων και γενικά των γεωσυνθετικών υλικών είναι, κάτω ή εντός έρματος στην κατασκευή σιδηροδρόμου, χρήση σε προσωρινά εργοτάξια, για την επισκευή αστοχιών και κατολισθήσεων, ως βασική ενίσχυση μαλακών εδαφών, ως συρματοκυβώτια για δομές ελέγχου διάβρωσης, για οπλισμό τσιμέντου ή σκυροδέματος, σαν εισαγωγές ανάμεσα από γεωφάσματα, για την ενίσχυση χώρων υγειονομικής ταφής, για την ενίσχυση διαχωρισμένων τμημάτων βράχων, για την σταθεροποίηση σωρών έκπλυσης.

3.3 Χαρακτηριστικά γεωπλεγμάτων

Τα γεωπλέγματα έχουν ιδιότητες που σχετίζονται με την ενίσχυση, οπότε δεν επιτελούν τόσο εφαρμογές για τον διαχωρισμό, φιλτράρισμα, αποστράγγιση, και εφαρμογές σαν εμπόδια.

3.3.1. Φυσικές ιδιότητες

Πολλές από τις φυσικές ιδιότητες των γεωπλεγμάτων, συμπεριλαμβανομένων του τύπων της κατασκευής, διαστάσεις πλευρών, τύπος διασταύρωσης, μέγεθος ανοίγματος, και πάχος, μπορούν να μετρηθούν απευθείας προς τα εμπρός. Άλλες ιδιότητες που μας φορούν είναι η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας, και ποσοστό ανοικτού χώρου. Πιο αναλυτικά έχουμε τις φυσικές ιδιότητες παρακάτω :

- i. **Πυκνότητα** : Ορίζεται ως το ποσοστό βάρους όγκου μονάδων υλικού (χωρίς κενά), προς το αντίστοιχο ποσοστό αποταγμένου και χωρίς αέρα νερού στους 4°C. Εξαρτάται από το πολυμερές από το οποίο έχει κατασκευαστεί, πάντως οι τιμές θα είναι σίγουρα χαμηλότερες από την μονάδα. Τα ομογενή γεωπλέγματα κατασκευάζονται από HDPE (High density polyethylene) και PP (πολυπροπυλένιο). Σε άλλες περιπτώσεις, όταν είναι κατασκευασμένα από κάποιο άλλο υλικό μπορεί να είναι και περισσότερο από την πλήρη τιμή.
- ii. **Ακαμψία εκτός επιπέδου** : είναι μια άλλη ιδιότητα που έχει άμεση σχέση με την κατασκευή του γεωπλέγματος. Η τιμή της ακαμψίας του σχετίζεται με το βάρος του πλέγματος ή με τη μάζα του ανά μονάδα κατασκευής επιφάνειας. Αυτό μπορεί να εξετασθεί με δοκιμή ακαμψίας. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι κυρίως σκληρά και άκαμπτα και έχουν κατηγοριοποιηθεί ότι έχουν τιμή ακαμψίας περισσότερο από 1000 g-cm κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Σε διαφορετική περίπτωση το γεωπλέγμα χαρακτηρίζεται ως εύκαμπτο.

- iii. **Δυστρεψία εκτός επιπέδου :** Αν και δεν είναι τυποποιημένη μέθοδος δοκιμής, μπορούμε να δοκιμάσουμε τη συμπεριφορά του γεωπλέγματος, εφαρμόζοντας ροπή και μετράμε την γωνιακή στρέψη έναντι της αντίστασης τους υλικού. Τα αποτελέσματα δείχνουν συνήθως μια γραμμική απόδοση για τα άκαμπτα γεωπλέγματα, ενώ για τα πιο ελαστικά η αντίδραση είναι σχετικά χαμηλά, αλλά μετά από περιστροφή 5 έως 0 μοιρών, η δύναμη αντίστασης αυξάνεται σημαντικά.

3.3.2. Μηχανικές ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες των γεωπλεγμάτων, και που μας αφορούν, είναι εκείνες που αφορούν εφαρμογές ενίσχυσης. Συνήθως όταν ένα γεωσυνθετικό υλικό συνεχή ελαστική φόρτιση θα αστοχήσει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα λόγω εξόλκευσης. Ο χρόνος από τη στιγμή της φόρτισης έως της αστοχίας ποικίλει, και εξαρτάται εκτός από τον τύπο του πολυμερούς, και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, την θερμοκρασία αλλά και την φόρτιση η οποία θα του ασκηθεί.

- I. **ΑΝΤΟΧΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΣΤΕΛΕΧΟΥΣ ΚΑΙ ΚΟΜΒΩΝ:** Για την δοκιμή αυτή εφαρμόζουμε εφελκυστική δύναμη σε ένα από τα δύο στελέχη έως τη στιγμή της αστοχίας, και καταγράφουμε τη συμπεριφορά του. Για την εκτίμηση της αντοχής ενός κόμβου, βγάζουμε ένα από τα διαμήκη μέλη από το αντίστοιχο εγκάρσιο στο σημείο ένωσης (κόμβος). Έτσι κατά το πείραμα δεν θα ασκηθούν ορθές τάσεις σε αυτό τον κόμβο, κάθετα στη διεύθυνση του διαμήκους στελέχους.
- II. **ΕΦΕΛΚΙΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ :** Η εφελκυστική αντοχή είναι πολύ μεγάλης σημασίας τόσο στα μονοαξονικά γεωπλέγματα (μια διεύθυνση), όσο και στα διαξονικά γεωπλέγματα (δύο διευθύνσεις), για την χρήση των γεωπλεγμάτων ως μέσα όπλισης. Ορίζεται ως η μέγιστη εφελκυστική τάση την οποία μπορεί να αντέξει ένα γεωπλεγμα μέχρι την αστοχία του. Οι δοκιμές μέσω των οποίων προκύπτει η μέγιστη εφελκυστική τάση, η μέγιστη παραμόρφωση (μέχρι την στιγμή της αστοχίας), το μέτρο ελαστικότητας, η εφελκυστική τάση σε διάφορες τιμές επιμήκυνσης πριν την αστοχία, γίνονται χωρίς την παρουσία εδαφικού υλικού.
- III. **ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ :** Για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής των γεωπλεγμάτων γίνονται δοκιμές με δοκιμές άμεσης διάτμησης. Το υλικό τοποθετείται σε μια συσκευή όπου δέχεται ορθές τάσεις στην επιφάνειά του και υποβάλλεται σε

ολίσθηση με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής στην διεπιφάνεια του εδάφους. Από τα πειράματα προκύπτει η μέγιστη διατμητική τάση ή αλλιώς διατμητική αντοχή, αλλά και οι παράμετροι διατμητικής αντοχής C και δ που απεικονίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και του γεωπλέγματος. Έτσι ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις, οι οποίες δίνουν συντελεστές συνοχής και εσωτερικής γωνίας τριβής.

$$E_c = (c_a/c) \times 100$$

$$E_\phi = (\tan \delta / \tan \phi) \times 100$$

Όπου:

$E_c \rightarrow$ αποτελεσματικότητα συνοχής

$E_\phi \rightarrow$ αποτελεσματικότητα τριβής

$c_a \rightarrow$ πρόσφυση μεταξύ εδάφους και γεωπλέγματος

$c \rightarrow$ συνοχή μεταξύ των εδαφών του γεωπλέγματος

$\delta \rightarrow$ γωνία τριβής εδάφους - γεωπλέγματος

$\phi \rightarrow$ γωνία τριβής εδάφους – εδάφους

Οι τιμές των συντελεστών είναι αρκετά υψηλές, καθώς και η διαμόρφωση τους, με τα μεγάλα ανοίγματα και πυκνά μέλη, αναγκάζει την επιφάνεια αστοχίας να συμπέσει με αυτή του μη σπλισμένου εδάφους.

Διατίθεται έρευνα που μελετά την επίδραση του ανοίγματος των γεωπλεγμάτων σε σχέση με το μέγεθος των εδαφικών σωματιδίων στον συντελεστή τριβής. Σύμφωνα με την οποία, η βέλτιστη μεταφορά διατμητικής τάσης που αστοχεί και στον μέγιστο συντελεστή τριβής, συμβαίνει όταν: $B_{GG} > 3.5d_{50}$

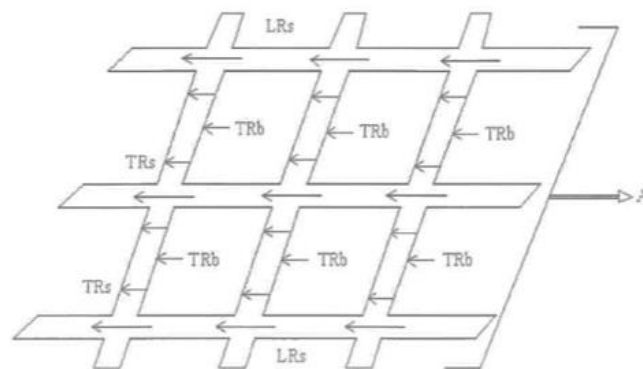
Όπου B_{GG} είναι το ελάχιστο πλάτος ανοίγματος ενός γεωπλέγματος, και

d_{50} είναι το κατά μέσον όρο μέγεθος κόκκων εδάφους.

Η παραπάνω σχέση παρουσιάζει μεγάλη χρησιμότητα για την επιλογή του εδαφικού υλικού.

- IV. **ΑΝΤΟΧΗ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ** : Αναφορικά με τα γεωπλέγματα η αντοχή αγκύρωση ξεπερνά κατά πολύ την διατμητική αντοχή που μόλις αναφέραμε. Αυτό συμβαίνει διότι τα γεωπλέγματα έχουν αρκετά μεγάλα ανοίγματα και το έδαφος εισχωρεί από τη μια πλευρά στην άλλη, σε συνδυασμό με το επαρκές μικρό μέγεθος των σωματιδίων του εδάφους, για να επιτρέπει την πλήρη διείσδυση στα κενά του πλέγματος. Οπότε στην προηγούμενη σχέση το d_{50} προσδιορίζει το απαιτούμενο μέγεθος κόκκων για συγκεκριμένο πλάτος ανοίγματος.

Η αντοχή της αγκύρωσης/αντίσταση εξόλκευσης, είναι αποτέλεσμα τριών διαφορετικών μηχανισμών. Αρχικά εξαρτάται από την διατμητική αντοχή κατά μήκος του επάνω και κάτω τμήματος των διαμηκών μελών ενός γεωπλέγματος. Δεύτερον, η διατμητική αντοχή επάνω και κάτω των εγκάρσιων μελών του γεωπλέγματος. Και ο τρίτος είναι η παθητική αντίσταση στο μπροστινό τμήμα επίσης των εγκάρσιων μελών, όπου το έδαφος υποβάλλεται σε μια παθητική κατάσταση αστοχίας και αντιστέκεται στην εξόλκευση με τη βοήθεια της φέρουσας ικανότητας του, η οποία συνεισφέρει σημαντικά στην συνολική αντοχή αγκύρωσης ενός γεωπλέγματος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται και ο μηχανισμός αυτός.



Εικόνα 3-10 : Σχηματική αποτύπωση μηχανισμού αγκύρωσης – αντοχή αγκύρωσης (Koerner, 2005).

Οι παρακάτω προϋποθέσεις είναι αρκετά σημαντικές για τη δοκιμή εξόλκευσης του εδάφους για να καθορίσουμε την δύναμη αγκύρωσης.

- Ο κánaβος δοκιμής θα πρέπει να έχει το απαιτούμενο βάθος για να επιτρέπει την μεταβολή του εδάφους πάνω και κάτω από το γεωπλέγμα.
- Επίσης πρέπει να είναι αρκετά μακρύς για να επιτρέπει την εφαρμοζόμενη δύναμη στο γεωπλέγμα αναλωθεί πλήρως. Ο αριθμός των διασταυρούμενων λωρίδων που απαιτούνται, εξαρτάται και στο γεωπλέγμα αλλά και στο είδος του εδάφους. Ο κánaβος θα πρέπει να έχει τουλάχιστον ένα μέτρο μήκος.

V. **ΑΝΤΟΧΗ ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕ ΤΟΙΧΟ:** Όταν χρησιμοποιούμε τα γεωπλέγματα για την κατασκευή ενισχυμένων τοίχων αντιστήριξης, η μπροστινή όψη τελειώνει με ένα πάνελ (μηχανική ένωση) ή με αρθρωτή συγκόλληση. Η ικανότητα σύνδεσης ενός

γεωπλέγματος με την οποιαδήποτε προστατευτική επένδυση τοίχων πρέπει γενικών να εκτιμάται.

3.3.3. Ιδιότητες αντοχής

Τα γεωπλέγματα χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση σε κρίσιμες εφαρμογές, κάποιες από τις οποίες απαιτούν μακροχρόνια διάρκεια ζωής. Έτσι είναι σημαντικό να υπολογίζουμε ορισμένες ιδιότητες αντοχής. Φθορά λόγω εγκατάστασης, ερπυσμός, και θα αντιμετωπισθούν οι επιτυγχανόμενες δοκιμές.

ΦΘΟΡΑ ΛΟΓΩ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ: Κατά την τοποθέτηση των γεωπλεγμάτων ενδέχεται να προκληθούν φθορές και γι' αυτό το λόγο απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή. Τα βαριά μηχανήματα, οι τυχόν απροσεξίες των συνεργείων, η πτώση αντικειμένων και ατυχήματα που μπορεί να συμβούν πριν την κάλυψη του γεωτεχνικού υλικού είναι μερικοί από τους λόγους που μπορούν να προκαλέσουν φθορές. Μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με την φθορά λόγω εγκατάστασης, έχουν δείξει ότι μειώνεται η αντοχή του γεωπλέγματος, σε ποσοστό 0% έως 30%, από την αρχική αντοχή. Με σκοπό τη μείωση αυτό του ποσοστού συνηθίζεται η διάστρωση άμμου πάνω από το πλέγμα.

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΤΑΣΗΣ ΕΡΠΥΣΜΟΥ: Μία άλλη ιδιότητα αντοχής είναι η παραμόρφωση λόγω παρατεταμένου φορτίου ή τάση ερπυσμού. Καθώς όλα τα γεωσυνθετικά υλικά είναι πολυμερή, συνίστανται από μακρομόρια. Αυτά βρίσκονται σε περιοχές κρυσταλλικής δομής και σε περιοχές άμορφης δομής, που εναλλάσσονται μέσα στο υλικό. Το ποσοστό της κρυσταλλικής δομής καθορίζει και την ερπυστική συμπεριφορά του υλικού. Επίσης καθορίζεται και από την τάση που αναπτύσσεται, τον χρόνο, τη θερμοκρασία, και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Μέχρι τώρα δεν έχουμε τυποποιημένη πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό της αντοχής σε ερπυσμό των γεωσυνθετικών υλικών.

ΡΗΞΗ ΛΟΓΩ ΕΡΠΥΣΜΟΥ: Η διαδικασία ρήξης ερπυσμού περιεγράφηκε και προηγουμένως. Σε αυτή τη διαδικασία επιβάλλονται υψηλές τάσεις στα δοκίμια, προκαλώντας αστοχία σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Μετά από μερικές δοκιμές μπορούμε να δημιουργήσουμε και μια γραφική παράσταση – διάγραμμα φορτίου-χρόνος αστοχίας.

3.3.4. Ζητήματα υποβάθμισης

Για όλα τα γεωπλέγματα που χρησιμοποιούνται σε μόνιμες εφαρμογές ενίσχυσης, χρειάζεται να λάβουμε υπόψιν ορισμένους παράγοντες υποβάθμισης. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες είναι:

1. Επίδραση της θερμοκρασίας: με δεδομένες τις μεταβολές της θερμοκρασίας σε κάποια περιβάλλοντα, οι οποίες είναι ακραίες (πολύ ζεστές ή ψυχρές) θα πρέπει να μην επηρεάζουν σημαντικά τα γεωπλέγματα. Το μόνο που μπορεί να τα επηρεάσει είναι σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, μπορούν να επηρεαστούν τα στελέχη που προκύπτουν από την ρήξη ερπυσμού και την χαλάρωση της δύναμης.
2. Επίδραση της οξείδωσης: αυτός ο μακροχρόνιος μηχανισμός οφείλεται στην αποικοδόμηση της πολυολεφίνης, λόγω εξωτερικών παραγόντων.
3. Επιδράσεις υδρόλυσης: αυτό οφείλεται στην αποικοδόμηση/ υποβάθμιση του πολυεστέρα.
4. Χημικές επιδράσεις : πολλά γεωπλέγματα που είναι κατασκευασμένα από υψηλής πυκνότητας πολυολεφίνες και πολυεστέρα, παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στις χημικές επιρροές. Σε περιπτώσεις όμως που στην περιοχή του έργου επικρατούν συνθήκες ασυνήθιστες/ ακραίες, τότε εκτελούμε τέτοιου είδους δοκιμή. Για παράδειγμα τέτοιες συνθήκες είναι πολύ χαμηλή ή υψηλή αλκαλικότητα του εδάφους και παρουσία υδρογονανθράκων από τα διάφορα άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στα έργα (ειδικά της οδοποιίας).
5. Ραδιενεργές επιδράσεις : εκτός από την περίπτωση παρουσίας υψηλού επιπέδου, η παρουσία χαμηλού επιπέδου ραδιενεργών υλικών δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα στην απόδοση του γεωπλέγματος.
6. Βιολογικές επιδράσεις : τα υλικά όπως το λάτεξ, πίσσα, ή πλαστικά όπως PVC μπορεί να είναι ευαίσθητα στους μικροοργανισμούς, όμως δεν υπάρχουν διαθέσιμες μελέτες σχετικά με αυτό. Ακόμα και σε μια τέτοια περίπτωση ο υψηλής ποιότητας πολυεστέρα που συνήθως είναι κατασκευασμένα τα γεωπλέγματα θα παρέμενε ανεπηρέαστος.
7. Επιδράσεις της ηλιακής ακτινοβολίας (UV): σε όλα τα πολυμερή υλικά μπορεί να υπάρξει αποικοδόμηση λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, με την πάροδο του χρόνου. Τα γεωπλέγματα σε σχέση με άλλα γεωσυνθετικά υλικά μπορεί να εκτεθεί περισσότερο

χρόνο στην ακτινοβολία χωρίς μεγάλη διάβρωση. Βέβαια δεν συνίσταται περισσότερο από 30 ημέρες έκθεσης πριν να ολοκληρωθεί η κάλυψη.

8. Αντοχή στη διάβρωση / ρωγμάτωση: τα έντονα κρυσταλλικά πολυμερή είναι ευαίσθητα στην ρωγμάτωση όταν τους ασκείται πίεση.

3.3.5. Επιτρεπόμενες – μακροχρόνιες εκτιμήσεις αντοχής

Η βάση για τον σχεδιασμό ενός σεναρίου που να μπορεί να λειτουργήσει είναι να θέσουμε ένα συντελεστή ασφαλείας. Για τα γεωπλέγματα που η ενίσχυση είναι η κύρια λειτουργία τους, ο συντελεστής ασφαλείας ορίζεται ως:

$$FS = T_{allow} / T_{reqd}$$

Όπου, FS = συντελεστής ασφαλείας, T_{allow} = η επιτρεπόμενη εφελκυστική αντοχή για πειραματικές δοκιμές, T_{reqd} = απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή για τον σχεδιασμό μια συγκεκριμένης δοκιμής.

Η επιτρεπόμενη τιμή προκύπτει από τεστ εφελκυστικής αντοχής, όπου θα πρέπει να γίνονται με βάση τις ιδανικές συνθήκες, των οποίων τα αποτελέσματα αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές της εφελκυστικής αντοχής (T_{ult}). Αυτές οι τιμές θα πρέπει στη συνέχεια να προσαρμοστούν στις πραγματικές συνθήκες, στις οποίες θα χρησιμοποιηθούν τα γεωπλέγματα. Αυτό γίνεται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$T_{allow} = T_{ult} \left[\frac{1}{RF(LD) \times RF(CR) \times RF(CBD)} \right]$$

όπου:

T_{allow} = μακροχρόνια εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού

RFIO = μειωτικός συντελεστής λόγω φθορών κατά την τοποθέτηση

RFRCR = μειωτικός συντελεστής λόγω ερπυσμού γεωσυνθετικών υλικών

RFCBD = μειωτικός συντελεστής ενάντια στην χημική και βιολογική υποβάθμιση των γεωσυνθετικών υλικών.

Σε όλες τις περιπτώσεις ισχύει πάντα η παρακάτω σχέση:

$$T_{allow} < T_{ult}$$

3.4 Αρχές σχεδιασμού οπλισμένων επιχωμάτων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μια από τις βασικές χρήσεις των γεωπλεγμάτων είναι η ενίσχυση επιχωμάτων και των πρανών απότομων κλίσεων (λιγότερο από 70 μοίρες πρανή), τοποθετώντας τα υλικά σε παράλληλες στρώσεις ανάμεσα στο εδαφικό υλικό. Η χρήση της μεθόδου οριακής ισορροπίας όπου προκύπτει το επίπεδο αστοχίας σε μορφή κυκλικού τόξου. Έτσι προκύπτει ο συντελεστής ασφαλείας όπου ορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$FS = \frac{M_R + \sum_{i=1}^n T_i y_i}{M_D}$$

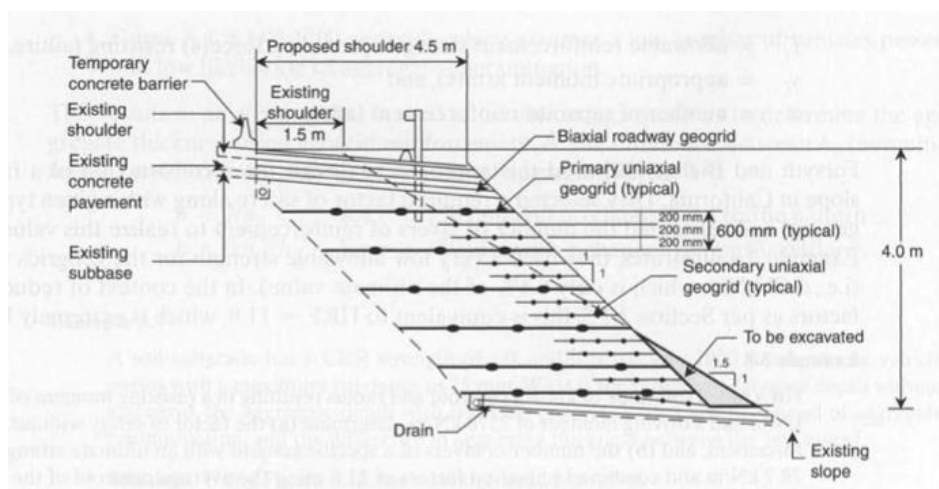
M_R = στιγμές αντίστασης στην αστοχία λόγω της διατμητικής αντοχής του εδάφους.

M_D = στιγμές που προκαλείται αποτυχία λόγω βαρύτητας, διαρροής, σεισμικής δραστηριότητας, νεκρά και ενεργά φορτία.

T_i = επιτρεπόμενη ενισχυτική τάση, παρέχοντας δύναμη αντίστασης της αστοχίας.

y_i = κατάλληλη στιγμή όπλισης

n = αριθμός ξεχωριστών στρωμάτων ενίσχυσης



Εικόνα 3-11: Παράδειγμα οπλισμένου επιχώματος (Koerner, 2005).

Ο σωστό σχεδιασμός με την έννοια της ανεμπόδιστης λειτουργίας, ασφάλειας και οικονομίας στοιχειοθετείται από τον συντελεστή ασφαλείας.

Στις μέρες μας διατίθεται πολλές μέθοδοι σχεδιασμού ή ακόμα και συνδυασμοί μεθοδολογιών. Υπάρχουν τρεις βασικές κατευθύνσεις βάσει των οποίων λαμβάνεται η τελική μέθοδος που θα ακολουθηθεί. Είναι ο σχεδιασμός ανάλογα με το κόστος και τη διαθεσιμότητα, σχεδιασμός ανάλογα με τις προδιαγραφές, και σχεδιασμός ανάλογα με την λειτουργία.

Η βάση της ιδέας σχεδιασμού είναι η εκτίμηση της κύριας λειτουργίας που το γεωσυνθετικό θα κληθεί να επιτελέσει και η εισαγωγή ενός συντελεστή ασφαλείας, που στην περίπτωση των γεωφασμάτων και των γεωπλεγμάτων, που εν προκειμένω ενδιαφέρουν, ορίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{T_{allow}}{T_{reqd}}$$

Όπου:

FS = συντελεστής ασφαλείας έναντι άγνωστων φορτίων και άλλων αβεβαιοτήτων κατά τον σχεδιασμό

Tallow = επιτρεπόμενη εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού όπως προκύπτει από εργαστηριακές μετρήσεις και απομειώσεις με βάση επιμέρους συντελεστές ασφαλείας

Treqd = απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού για την εκάστοτε κατάσταση

Εάν ο συντελεστής ασφαλείας FS είναι μεγαλύτερος της μονάδας τότε το υποψήφιο γεωσυνθετικό γίνεται αποδεκτό.

Οι γεωκατασκευές από μόνες τους δεν έχουν αντοχή σε εφελκυσμό, και βασίζονται για την ευστάθειά τους στην αντοχή τους σε θλίψη και διάτμηση. Εισάγοντας εφελκυσμένο οπλισμό στο έδαφος κατά τη διεύθυνση των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων, οι οποίες είναι συνήθως κατά την οριζόντια διεύθυνση, δίνεται η δυνατότητα στις κατακόρυφες επιφάνειες της γεωκατασκευής να παραμένουν ευσταθείς. Ένας τοίχος οπλισμένου εδάφους

κατασκευάζεται με τη χρήση στρώσεων από συμπυκνωμένο υλικό επίχωσης, και οριζόντια τοποθετημένο οπλισμό σε κατάλληλες κατακόρυφες αποστάσεις, έναν οπλισμό που αλληλοσυνδέεται στην πρόσοψη με προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, με πλήρωση των αρμών ανάμεσα στα στοιχεία. Γενικώς το υλικό επίχωσης πρέπει να έχει επαρκώς μεγάλη γωνία τριβής ώστε να παρέχει επαρκή αντίσταση σε ολίσθηση του οπλισμού σε σχέση με το έδαφος. Εκτός από επαρκή συντελεστή τριβής, ο οπλισμός πρέπει να έχει και ικανοποιητική εφελκύστηκά αντοχή. [Barnes, 2005]. Στην περίπτωση ενός τοίχου αντιστήριξης, η ιδιότητα αυτή αποτρέπει τις μάζες εδάφους να αστοχήσουν, καθώς ενισχύεται η πιο κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας. [Nordic Guidelines for Reinforced Soils and Fills]. Επίσης, είναι σημαντικό να μην εισέρχεται στην γεωκατασκευή νερό, ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη πιέσεων πόρων οι οποίες θα μειώσουν τις ενεργές τάσεις, με συνέπεια την επιδείνωση της ευστάθειας και την αύξηση των παραμορφώσεων της γεωκατασκευής. Περαιτέρω, η μη εισροή νερού αποτρέπει τη διάβρωση του οπλισμού και της επικάλυψης, ειδικά αν το νερό περιέχει διαβρωτικά χημικά. Πρακτικώς το νερό μπορεί να εισέλθει στην κατασκευή από την επιφάνεια, οπότε πρέπει να εξασφαλίζεται ένα επαρκές επιφανειακό σύστημα αποστράγγισης. [Barnes, 2005]. Συχνά η ίδια η ενίσχυση χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση και διαμόρφωση της όψης του τοίχου και η τοποθέτησή της πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή για την αποφυγή διάρρηξης, σε διεύθυνση παράλληλη με τον τοίχο. Σχισμή τέτοιου τύπου καταλήγει σε μείωση του μεγέθους των εφελκυστικών τάσεων που τα γεωπλέγματα ή τα γεωυφάσματα μπορούν να φέρουν. Τέλος, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι μικρές παραμορφώσεις του τοίχου είναι αποδεκτές και μάλιστα απαιτούνται για την ενεργοποίηση των εφελκυστικών τάσεων στην ενίσχυση. [Bowles, 1995]

Κάθε μέθοδος σχεδιασμού περιλαμβάνει δύο στάδια:

- Μελέτη της εσωτερικής ευστάθειας για τον καθορισμό της κατακόρυφης απόστασης μεταξύ των οπλισμών, του μήκους του γεωσυνθετικού και του μήκους υπερκάλυψης (αν δεν χρησιμοποιείται προστατευτική επένδυση).
- Μελέτη της εξωτερικής ευστάθειας που εμπεριέχει τους ελέγχους σε ολίσθηση, ανατροπή και φέρουσα ικανότητα του τοίχου, οι οποίοι είναι αντίστοιχοι με εκείνους των "κλασικών" τοίχων βαρύτητας. [Koemer, 2005]

3.5. Χρήση γεωσυνθετικών (γεωπλεγμάτων) στο πρόγραμμα Slide 2 της Rocscience

Προκειμένου λοιπόν να εφαρμόσουμε όλες τις παραμέτρους και τους προβληματισμούς που αναφέραμε παραπάνω, θα κάνουμε χρήση του προγράμματος Slide 2 της Rocscience, με το οποίο μπορούμε να πραγματοποιήσουμε προσομοιώσεις αστοχίας του επιχώματος. Μια βασική μέθοδος ελέγχου την οποία θα χρησιμοποιήσουμε κι εμείς είναι η μέθοδος της οριακής ισορροπίας. Η μέθοδος της οριακής ισορροπίας, χρησιμοποιεί διάφορες κλασικές μεθόδους οριακών ελέγχων τις οποίες ορίζουμε εμείς, όπως η Bishop, Janbu, Spencer, κ.α. σε συνδυασμό με τις εδαφικές παραμέτρους, τις αντοχές και τις τριβές των οπλισμών. Στη συνέχεια μπορούμε να δοκιμάσουμε την βέλτιστη ενίσχυση της απόθεσης των μεταλλευτικών αποβλήτων με την κατάλληλη επιλογή γεωπλεγμάτων (στοιχεία όπλισης), η οποία θα πρέπει να πληροί τις προϋποθέσεις σχεδιασμού, και να μας οδηγεί στο βέλτιστο αποτέλεσμα. Ουσιαστικά τα στοιχεία όπλισης συνεισφέρουν στην αύξηση του γενικού συντελεστή ασφαλείας, ο οποίος θα πρέπει να είναι περίπου στο 1.4 και πάνω για να θεωρείται ασφαλές το στοιχείο όπλισης. Παράλληλα θα πρέπει να υπάρχει ισορροπία μεταξύ επιλογής όσο το δυνατόν πιο ισχυρής ενίσχυσης αλλά και να είναι οικονομικά συμφέρουσα.

Η θεωρία της οριακής ισορροπίας χρησιμοποιείται δεκαετίες στο σχεδιασμό εδαφικών πρανών. Η χρήση της μεθόδου οριακής ισορροπίας για τον έλεγχο οπλισμένων επιχωμάτων, θεωρείται από πολλούς ενδεδειγμένη. Αυτό συμβαίνει όχι μόνο γιατί υπάρχει σημαντική μελετητική και κατασκευαστική εμπειρία, αλλά και λόγω της απλότητας των παραμέτρων, που χρησιμοποιεί και των αποτελεσμάτων της, η ορθότητα των οποίων εύκολα μπορεί να διασταυρωθεί είτε με άλλες αναλύσεις είτε ακόμη και με απλουστευμένους υπολογισμούς. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου οριακής ισορροπίας είναι η αδυναμία της να προσδιορίσει μετακινήσεις και παραμορφώσεις, λαμβανομένου υπόψη ότι ο πλέον δόκιμος και αξιόπιστος τρόπος για τον υπολογισμό τους, είναι ο σχεδιασμός με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών. Ωστόσο εφόσον επιλέγονται κατάλληλες παράμετροι σχεδιασμού των εδαφικών υλικών κατασκευής των οπλισμένων επιχωμάτων και υιοθετούνται κατάλληλοι συντελεστές ασφάλειας, δεν απαιτείται υπολογισμός των πλαστικών παραμορφώσεων και των καθιζήσεων.

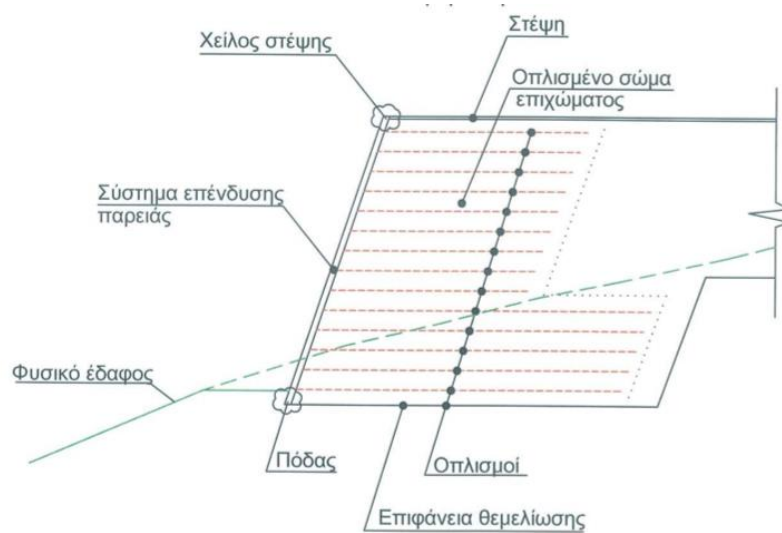
Η οριακή ισορροπία αναφέρεται στην κατάσταση εκείνη κατά την οποία η οπλισμένη εδαφική κατασκευή βρίσκεται λίγο πριν την αστοχία. Η αστοχία μπορεί να επέλθει από εξόλκευση ή από διάρρηξη των οπλισμένων στρώσεων ή ακόμη και από ολίσθηση της οπλισμένης ζώνης κατά μήκος της διεπιφάνειας γεωπλέγματος εδάφους. Για να εκτιμηθεί ο κίνδυνος εξόλκευσης και διάρρηξης των οπλισμένων ζωνών, λαμβάνεται περιστροφικός μηχανισμός αστοχίας κατά τον οποίο πιθανές επιφάνειες αστοχίας ξεκινούν από τον πόδα του πρανούς και φτάνουν έως το αντιστηριζόμενο έδαφος. Θεωρώντας δυνητικές ολισθήσεις του οπλισμένου τμήματος του επιχώματος κατά μήκος της επιφάνειας θεμελίωσης του ή κατά μήκος οποιουδήποτε άλλου επιπέδου όπλισης εκτιμάται ο κίνδυνος ολίσθησης. Με έλεγχο έναντι βαθιάς ολίσθησης εξετάζεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους έδρασης του επιχώματος. Όλοι οι παραπάνω έλεγχοι εξασφαλίζουν εμμέσως την λειτουργικότητα κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου εφόσον γίνει χρήση κατάλληλων συντελεστών ασφάλειας.

Ο συνυπολογισμός της επίδρασης του γεωπλέγματος στην ευστάθεια του πρανούς είναι μία απλή διαδικασία, κατά την οποία η εφελκυστική δύναμη του υλικού του γεωπλέγματος μπαίνει απευθείας στις εξισώσεις οριακής ισορροπίας. Ωστόσο πρέπει να εκτιμηθεί η γωνία κλίσης αυτής της εφελκυστικής δύναμης ως προς την οριζόντιο, αφού μπορεί να κυμαίνεται από τη γωνία τοποθέτησης του γεωπλέγματος ως προς τον οριζόντιο άξονα, έως τη γωνία, που σχηματίζεται από την εφαπτομένη σε ένα πιθανό κύκλο ολίσθησης και τον οριζόντιο άξονα.

Εφόσον στο σχεδιάσμα των τεχνητών επιχωμάτων χρησιμοποιείται η παραμένουσα τιμή της συνοχής, η οποία είναι μικρή, η κλίση της εφελκυστικής δύναμης μπορεί να θεωρηθεί μηδενική (οριζόντια).

Για τον σχεδιασμό ενός οπλισμένου επιχώματος ενισχυμένο με γεωπλέγματα θα πρέπει να ακολουθούμε κάποιες βασικές αρχές, οι οποίες ισχύουν και στο Slide 2 της Rocscience. Αρχικά οι αποστάσεις καθ' ύψος των στοιχείων όπλισης θα πρέπει να είναι ακέραια πολλαπλάσια του καθοριζόμενου συμπυκνωμένου πάχους των επιμέρους στρώσεων του γεωπλέγματος, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική συμπύκνωση. Συνίσταται γενικά οι αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών να είναι ανάμεσα από το 0,20m έως 0,80m και να μην ξεπερνούν τι 1m. Έτσι εξασφαλίζεται η μηχανική λειτουργία του ως «σύνθετου» υλικού στο

οπλισμένο τμήμα, και να αλληλοεπιδρά το έδαφος με το γεώπλεγμα. Επίσης για τον ίδιο λόγο τα μήκη και οι εφελκυστικές αντοχές των οπλισμών θα πρέπει να είναι αρμονικά μεταβαλλόμενα καθ ύψος, δηλαδή να υπάρχουν ομαλές μεταβολές στην επιλογή του είδους και μήκους του οπλισμού. Ακόμα πολύ σημαντική είναι η επιλογή του βάθους θεμελίωσης των οπλισμένων επιχωμάτων, ειδικά εκείνα με έντονη εγκάρσια κλίση εδάφους ή του πρανούς.



Εικόνα 3-12: Σχέδιο οπλισμένου επιχώματος

Ο προσδιορισμός του ολικού συντελεστή ασφαλείας ενός οπλισμένου επιχώματος, στο Slide 2, γίνεται με βάση την παρακάτω σχέση, στην οποία η εφελκυστική δύναμη του στοιχείου όπλισης εισάγεται στον αριθμητή και συνεισφέρει στην αύξηση των ροπών αντοχής M_R .

$$FS_{\text{οπλισμένο}} = M_R + T_s R / M_D$$

Όπου:

$FS_{\text{οπλισμένο}}$: Συντελεστής ασφαλείας οπλισμένου πρανούς

$M_R(\phi, c, R, T_s)$: Άθροισμα ροπών αντοχής (Συνάρτηση διατμητικής αντοχής εδάφους και εφελκυστικών δυνάμεων αντίστασης)

M_D : Άθροισμα ροπών ολίσθησης

T_s : Άθροισμα εφελκυστικών δυνάμεων αντίστασης (ανά μέτρο πλάτους) όλων των στοιχείων όπλισης τα οποία τέμνει ο κύκλος ολίσθησης.

R : Βραχίονας ροπών της εφελκυστικής δύναμης T_s γύρω το υπολογιστικό κέντρο του κύκλου ολίσθησης.

Στις συνθήκες οριακής ισορροπίας, δηλαδή με $FS=1$, ο συντελεστής ασφαλείας εφαρμόζεται ως συντελεστής απομείωσης, και ισχύει:

$$1 = (M_R / FS_{\text{οπλισμένο}}) + (T_s R / FS_{\text{οπλισμένο}}) / (M_D)$$

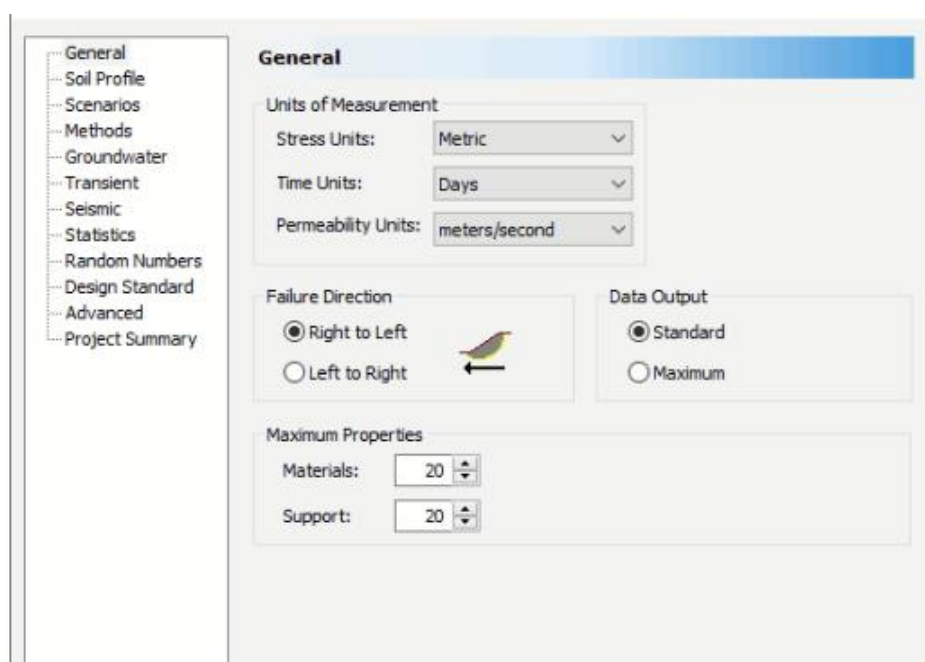
3.6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΣΤΟ SLIDE 2:

Το Slide 2 είναι ένα λογισμικό γεωτεχνικής μηχανικής που χρησιμοποιεί τη μέθοδο οριακής ισορροπίας (limit equilibrium method), η οποία επιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η απεικόνιση γίνεται σε δύο διαστάσεις (2D) και χρησιμοποιείται για την ανάλυση της ευστάθειας των εδαφικών ή βραχωδών πρηνών. Το πρόγραμμα υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας (safety factor - SF), αλλά και την πιθανότητα αστοχίας (probability of failure – PF), σε κυκλικές και σύνθετες επιφάνειες. Το πρόγραμμα αναλύει τη σταθερότητα των επιφανειών ολίσθησης χρησιμοποιώντας μεθόδους κάθετης ισορροπίας ορίου φετών. Μπορούν να αναλυθούν μεμονωμένες επιφάνειες ολίσθησης ή να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι αναζήτησης για τον εντοπισμό της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης για μια δεδομένη κλίση.

Για τον σχεδιασμό ενός οπλισμένου επιχώματος στο Slide 2, και ελέγχου της αντοχής του και του συντελεστή ασφαλείας θα πρέπει να ακολουθήσουμε μια σειρά ενεργειών για την δημιουργία του μοντέλου που θα γίνει η δοκιμή. Θα μπορούσαμε να διαχωρίσουμε την διαδικασία αυτή σε κάποια βήματα:

Βήμα 1^ο: Analysis → Project Settings

Αρχικά θα πρέπει να γίνει ο προσδιορισμός των βασικών παραμέτρων της ανάλυσης. Επιλέγουμε την εντολή Analysis και στην συνέχεια Project Settings, όπου ορίζονται οι μονάδες μέτρησης, η διεύθυνση αστοχίας. Στην συνέχεια επιλέγεται εάν η ανάλυση θα γίνει με ένα μοναδικό σενάριο ή θα έχει πολλαπλά (έως τρία σενάρια), και ορίζονται οι μέθοδοι ανάλυσης ανάλογα με το αντικείμενο μελέτης. Εάν υπάρχει υδροφόρος ορίζοντας συμπληρώνουμε τις απαιτούμενες παραμέτρους και προχωράμε στις σεισμικές δυνάμεις, και πάλι αν υπάρχουν. Έπειτα, επιλέγουμε αν θέλουμε και στατιστική ανάλυση ευστάθειας ή πιθανοτική ανάλυση, με ένα εύρος τιμών σε κάποιους συντελεστές που θα ορίσουμε στη συνέχεια αφού σχεδιάσουμε το επίχωμα και ορίσουμε τις ιδιότητές του. Αυτό θα γίνει για τις μεταβλητές που θα επιλέξουμε εμείς (συνοχή, γωνία τριβής, ειδικό βάρος, κ.α.), ορίζοντας μια μέση τιμή, μια ελάχιστη και μια μέγιστη τιμή.



Εικόνα 3-13: Παράθυρο Project Settings.

ΒΗΜΑ 2^ο : BOUNDARIES

Το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός της γεωμετρίας του επιχώματος και των συνόρων του. Στην πραγματικότητα δημιουργούμε/ σχεδιάζουμε το επίχωμα και προσθέτουμε και τα όρια των

διάφορων υλικών. Επίσης, στην περίπτωση ύπαρξης υδροφόρου ορίζοντα ορίζουμε και αυτά τα όρια, καθώς και της επιφάνειας ολίσθησης.

ΒΗΜΑ 3^ο : LOADINGS

Μετά τον σχεδιασμό είναι αναγκαίο να ορίσουμε, αν υπάρχουν, τα φορτία (είδος, προσανατολισμός, μέγεθος), γραμμικά, σεισμικά ή κατανεμημένο φορτίο.

ΒΗΜΑ 4^ο : PROPERTIES

Ο καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού απόθεσης είναι καθοριστικό μαζί με την γεωμετρία του επιχώματος για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας. Ορίζουμε το ή τα υλικά, το ειδικό βάρος και την διατμητική αντοχή, δηλαδή την γωνία τριβής και την συνοχή του.

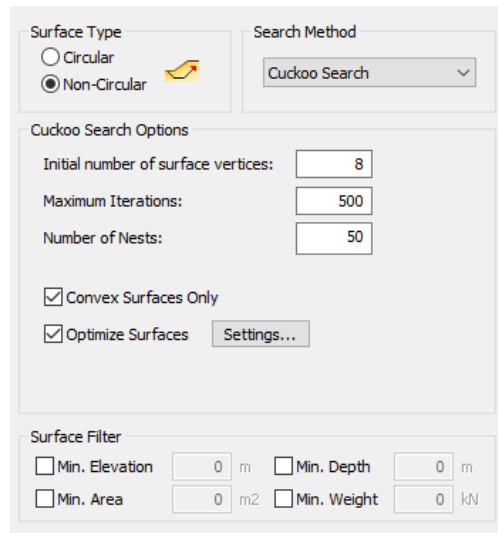
The screenshot shows a software window titled 'FILL' with the following settings:

- Name:** FILL
- Fill:** FILL (yellow)
- Hatch:** (empty)
- Unit Weight:** 20 kN/m³
- Saturated U.W.:** 20 kN/m³
- Strength Type:** Mohr-Coulomb (Equation: $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$)
- Strength Parameters:**
 - Cohesion:** 10 kPa
 - Phi:** 28 degrees
 - Tensile Strength:** 0 kPa
- Water Parameters:**
 - Water Surface:** None
 - Ru Value:** 0
 - Specify alternate strength type above water surface
 - Use strength type from:** FILL

Εικόνα 3-14: Καθορισμός ιδιοτήτων υλικών.

ΒΗΜΑ 6^ο : SURFACE ORTIONS

Προσδιορισμός της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας και τύπος αυτής (κυκλικής ή μη κυκλικής). Συνήθως ο κυκλικός τύπος επιφάνειας αναφέρεται σε ομογενή πρανή. Επιλέγουμε μέθοδο αναζήτησης, προσδιορίζουμε την ακτίνα κύκλου αστοχίας.



Surface Type

Circular

Non-Circular

Search Method

Cuckoo Search

Cuckoo Search Options

Initial number of surface vertices: 8

Maximum Iterations: 500

Number of Nests: 50

Convex Surfaces Only

Optimize Surfaces Settings...

Surface Filter

Min. Elevation 0 m

Min. Depth 0 m

Min. Area 0 m²

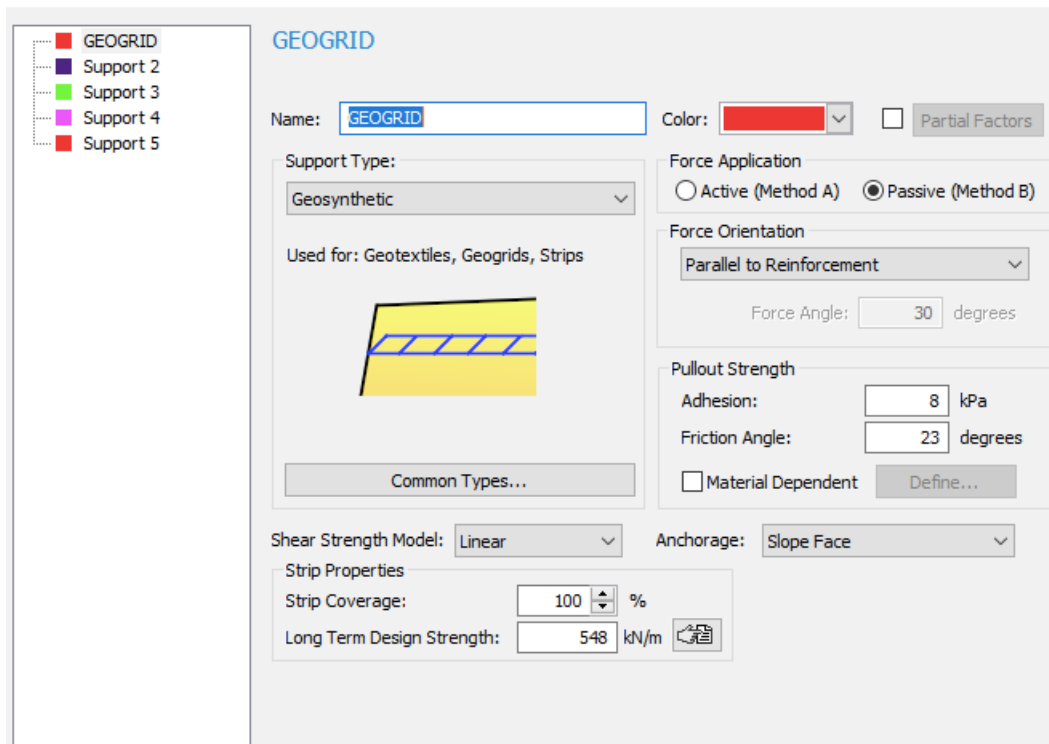
Min. Weight 0 kN

Εικόνα 3-15: Παράθυρο παραμέτρων επιφάνειας αστοχίας.

ΒΗΜΑ 7^ο : SUPPORT

Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού εισάγουμε τα στοιχεία ενίσχυσης, τα οποία είναι τα γεωπλέγματα στην περίπτωσή μας, και ορίζουμε :

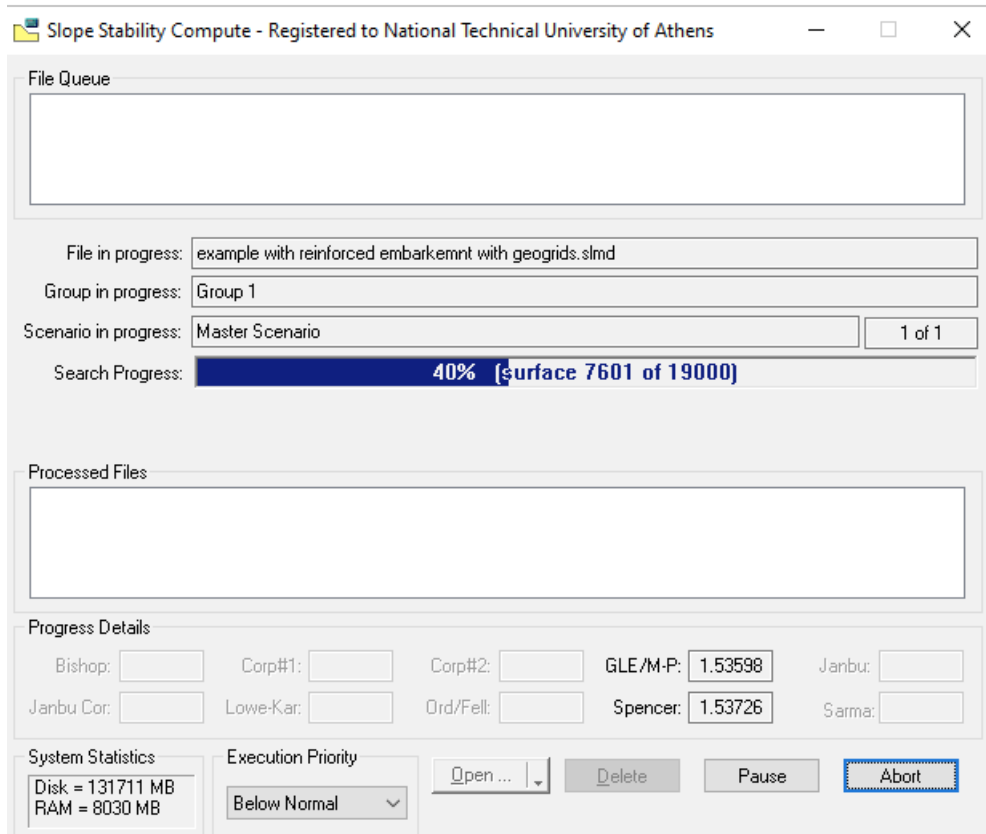
- Είδος υλικού στήριξης (εταιρεία, εφελκυστική αντοχή υλικού)
- Μέθοδος στήριξης
- Προσανατολισμός
- Γωνία
- Αποστάσεις μεταξύ των υλικών ενίσχυσης
- Μήκος ενισχυτικών



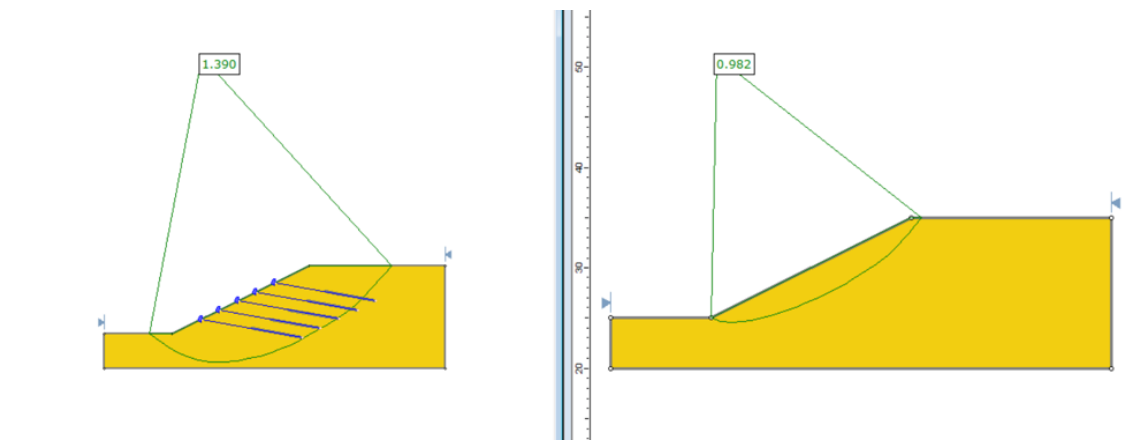
Εικόνα 3-16: Παράθυρο επιλογής ιδιοτήτων υλικού ενίσχυσης.

ΒΗΜΑ 8^ο : COMPUTE AND RESULTS

Τέλος αφού ολοκληρώσουμε την σχεδιαστική διαδικασία, πρέπει να γίνει ο υπολογισμός και προβολή των αποτελεσμάτων. Στα αποτελέσματα εμφανίζεται ο κύκλος αστοχίας και ο συντελεστής ασφαλείας, καθώς και τα διαγράμματα στις περιπτώσεις που έχουμε τις στατιστικές αναλύσεις ευστάθειας. Μπορούμε μόλις ολοκληρώσουμε όλη τη διαδικασία να εξάγουμε όλη τα στοιχεία σχεδιασμού, τις δοκιμές και τα αποτελέσματα σε ένα αρχείο (report generator) που δημιουργείται από το ίδιο το πρόγραμμα.



Εικόνα 3-17: Υπολογισμός αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3-18: Κύκλος αστοχίας και συντελεστής ασφαλείας με και χωρίς στοιχεία ενίσχυσης.

4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΟΠΛΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ

ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ:

4.1. Σχεδίαση μοντέλων:

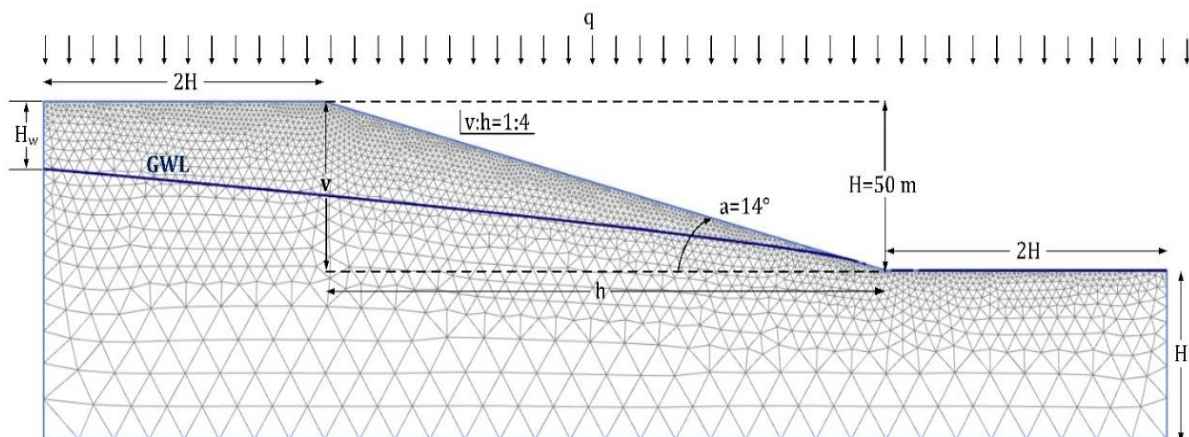
Κατά το πρώτο στάδιο των δοκιμών γίνει χρήση των παραμετρικών αναλύσεων, με σκοπό τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας άρα και του κύκλου αστοχίας σε 9 διαφορετικά μοντέλα άοπλων επιχωμάτων. Στην συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα προχωρήσουμε σε όπλιση των μοντέλων με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1.4 (της ασφαλούς τιμής). Οι δοκιμές θα είναι με σενάρια συνδυασμών για τρία διαφορετικά ύψη (H), 20 μέτρα, 100 μέτρα, 200 μέτρα, και τριών κλίσεων πρανούς (β), 25 μοίρες, 35 μοίρες και 45 μοίρες. Για κάθε σενάριο θα εξετάσουμε συνοχές (c) με τιμές 0.5 Kpa (καθώς με μηδενική συνοχή τα αποτελέσματα δεν θα είναι αντιπροσωπευτικά) και 10 Kpa, ενώ οι υπόλοιποι συντελεστές, δηλαδή το ειδικό βάρος (γ) και γωνία τριβής (ϕ) θα παραμένουν σταθεροί. Όλες οι τιμές του κάθε σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

	H (m)	β (μοίρες)	γ (KN/M ³)	Φ (μοίρες)	C1 (Kpa)	C2 (Kpa)
1 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ	20	25	20	M.T. 30 (από 15 έως 45)	0.5	10
2 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ	20	25	20	M.T. 30 (από 15 έως 45)	0.5	10
3 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ	20	25	20	M.T. 30 (από 15 έως 45)	0.5	10
4 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ	100	35	20	M.T. 30 (από 15 έως 45)	0.5	10
5 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ	100	35	20	M.T. 30 (από 15 έως 45)	0.5	10
6 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ	100	35	20	M.T. 30 (από 15 έως 45)	0.5	10

7° ΣΕΝΑΡΙΟ	200	45	20	Μ.Τ. 30 (από 15 έως 45)	0.5	10
8° ΣΕΝΑΡΙΟ	200	45	20	Μ.Τ. 30 (από 15 έως 45)	0.5	10
9° ΣΕΝΑΡΙΟ	200	45	20	Μ.Τ. 30 (από 15 έως 45)	0.5	10

Πίνακας 1 – Σενάρια δοκιμών άοπλων επιχωμάτων.

Το επίχωμα θα αποτελείται από ένα γαιώδες, σχετικά χονδρόκοκκο υλικό μεταλλευτικών στείρων, με ξηρές περιβαλλοντικές συνθήκες χωρίς την παρουσία υγρού στοιχείου, με συνοριακές συνθήκες προσομοιωμάτων (μοντέλων), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5

Για να βρούμε το μήκος της βάσης (πλευρά αι ή h όπως το έχει στο σχήμα) του σωρού για τα διάφορα ύψη και γωνίες κλίσης πρσανούς εφαρμόζουμε τον παρακάτω τύπο:

$$\tan\beta_i = \frac{H}{a_i}$$

Οπότε:

Για H=20m:

- Για $\beta_2 = 25$ μοίρες $\Rightarrow \alpha = 43$ μέτρα

- Για $\beta_4 = 35$ μοίρες $\Rightarrow \alpha = 28,6$ μέτρα
- Για $\beta_6 = 45$ μοίρες $\Rightarrow \alpha = 20$ μέτρα

Για $H=100\text{m}$:

- Για $\beta_2 = 25$ μοίρες $\Rightarrow \alpha = 214,6$ μέτρα
- Για $\beta_4 = 35$ μοίρες $\Rightarrow \alpha = 142,8$ μέτρα
- Για $\beta_6 = 45$ μοίρες $\Rightarrow \alpha = 100$ μέτρα

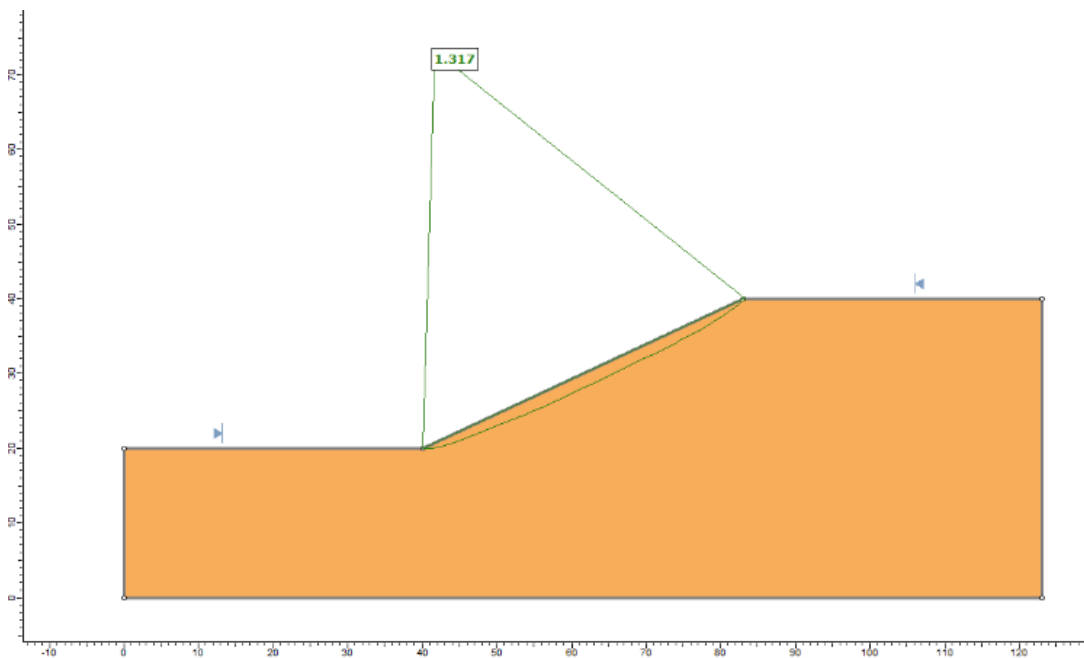
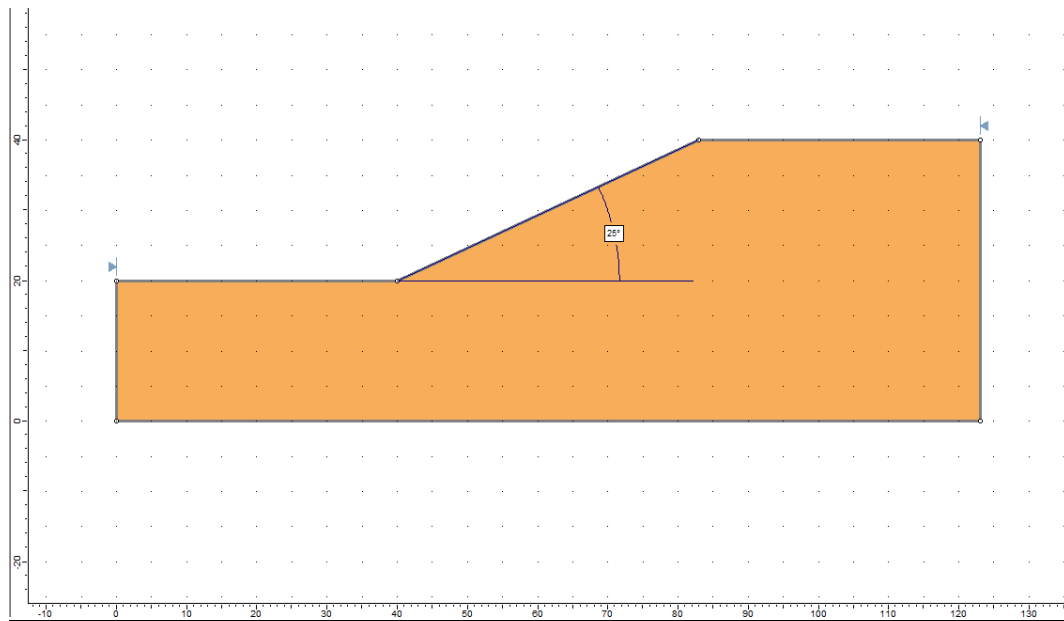
Για $H=200\text{m}$:

- Για $\beta_2 = 25$ μοίρες $\Rightarrow \alpha = 429,2$ μέτρα
- Για $\beta_4 = 35$ μοίρες $\Rightarrow \alpha = 285,7$ μέτρα
- Για $\beta_6 = 45$ μοίρες $\Rightarrow \alpha = 200$ μέτρα

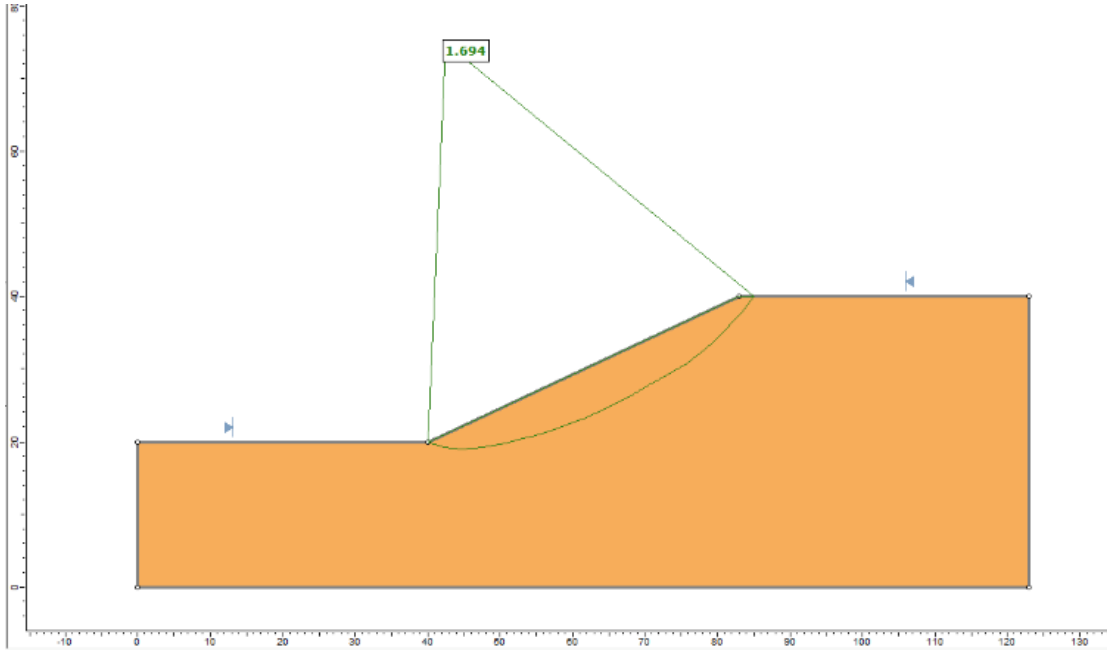
Στις βασικές ρυθμίσεις που κάνουμε αρχικά στο Slide 2, επιλέγουμε τα πολλαπλά σενάρια, τις μεθόδους ανάλυσης Bishop και Jambu και το Sensitivity Analysis για να μπορέσουμε να ορίσουμε ένα εύρος τιμών για την συνοχή και την γωνία τριβής. Στην συνέχεια σχεδιάζουμε το επίχωμα ορίζοντας τα όρια του, ανάλογα με το ύψος του. Καθορίζουμε τα χαρακτηριστικά του υλικού, ειδικό βάρος, και την διατμητική αντοχή, συνοχή και γωνία τριβής. Επιλέγουμε για την στατιστική ανάλυση των τιμών που θέλουμε, την μέση τιμή αλλά και την μέγιστη και ελάχιστη τιμή της συνοχής και της γωνίας τριβής. Επίσης, η επιφάνεια αστοχίας θα είναι μη κυκλική και θα επιλέξουμε την μέθοδο Cuckoo Search για την ανάλυση. Τέλος θα μετακινήσουμε τα όρια του πρσανούς για να ορίσουμε τα όρια του κύκλου της αστοχίας. Το τελευταίο βήμα είναι να γίνουν οι υπολογισμοί και εμφάνιση αποτελεσμάτων, συντελεστή ασφαλείας και διάγραμμα με την γωνία τριβής.

4.2. Αποτελέσματα δοκιμών

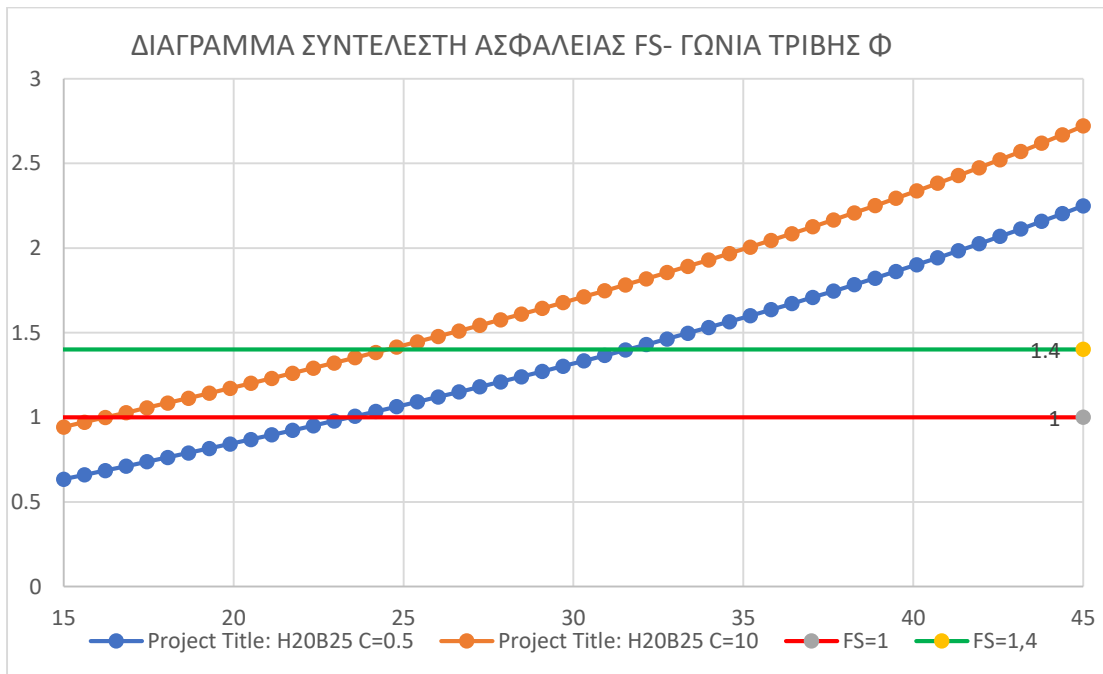
1^ο ΣΕΝΑΡΙΟ:



Σχήμα 6: Αποτελέσματα για $c=0.5$

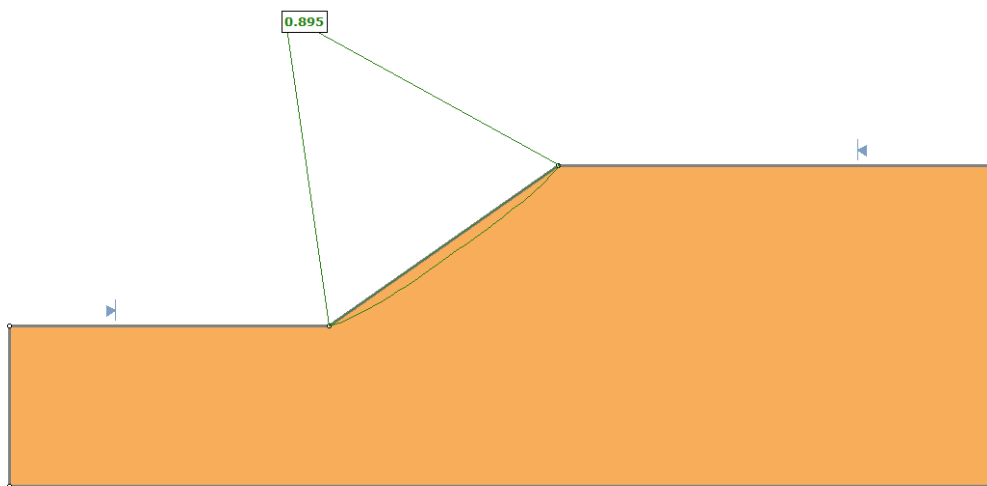


Σχήμα 7: Αποτελέσματα για $c=10$

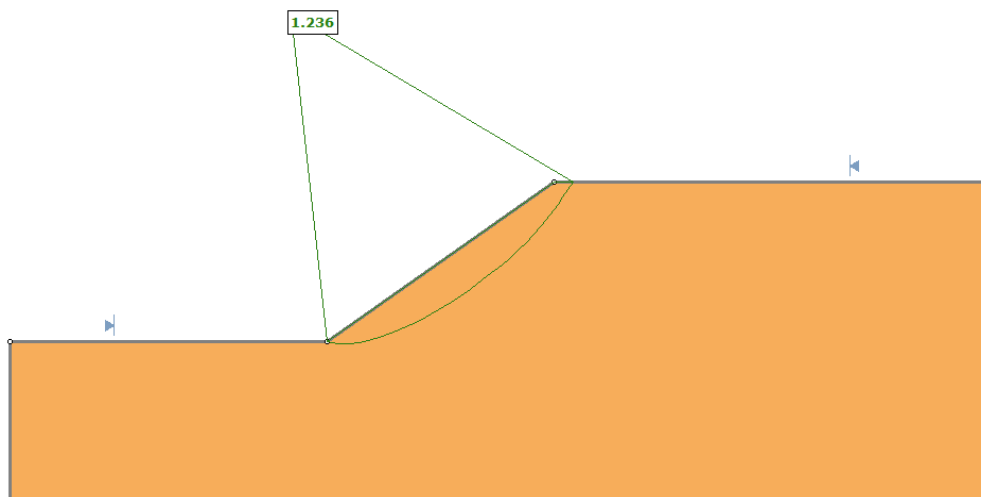


Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας και γωνίας τριβής

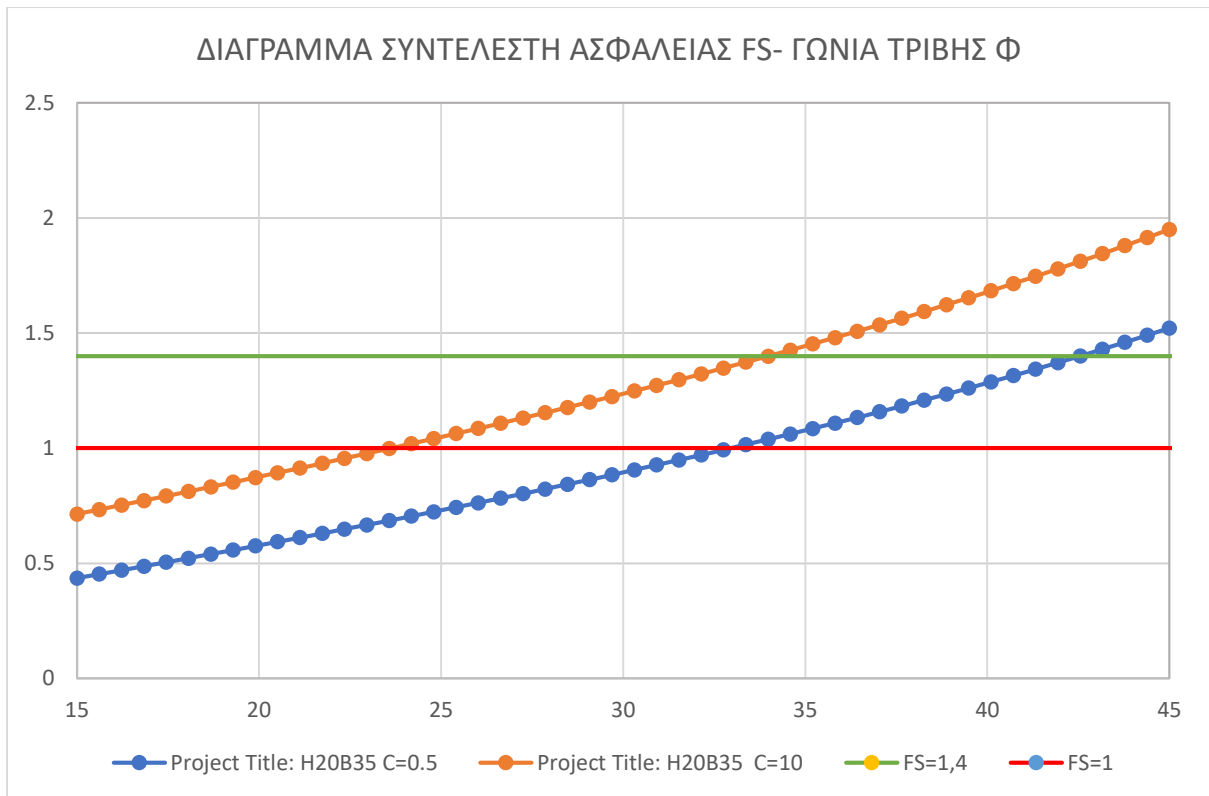
2° ΣΕΝΑΡΙΟ:



Σχήμα 8: Αποτελέσματα για $c=0.5$

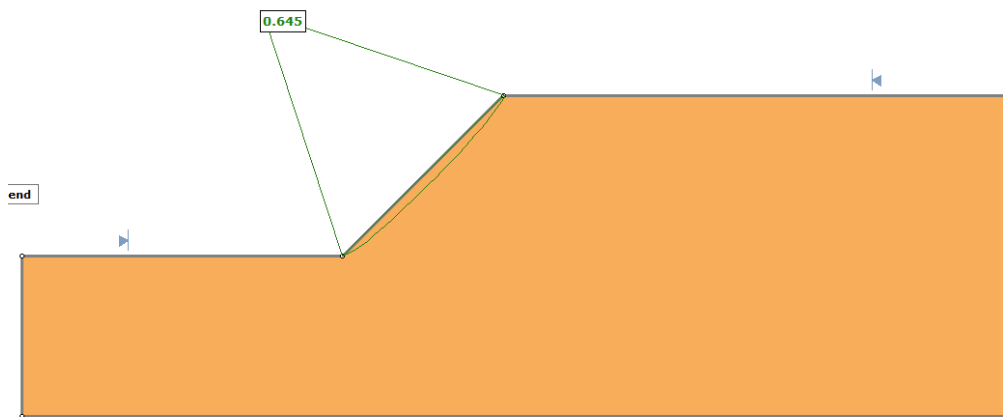


Σχήμα 9: Αποτελέσματα για $c=10$

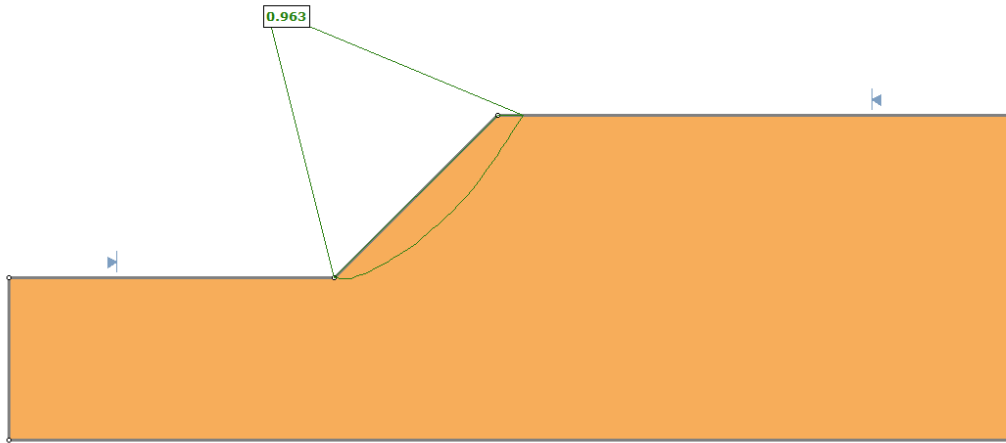


Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας με την γωνία τριβής

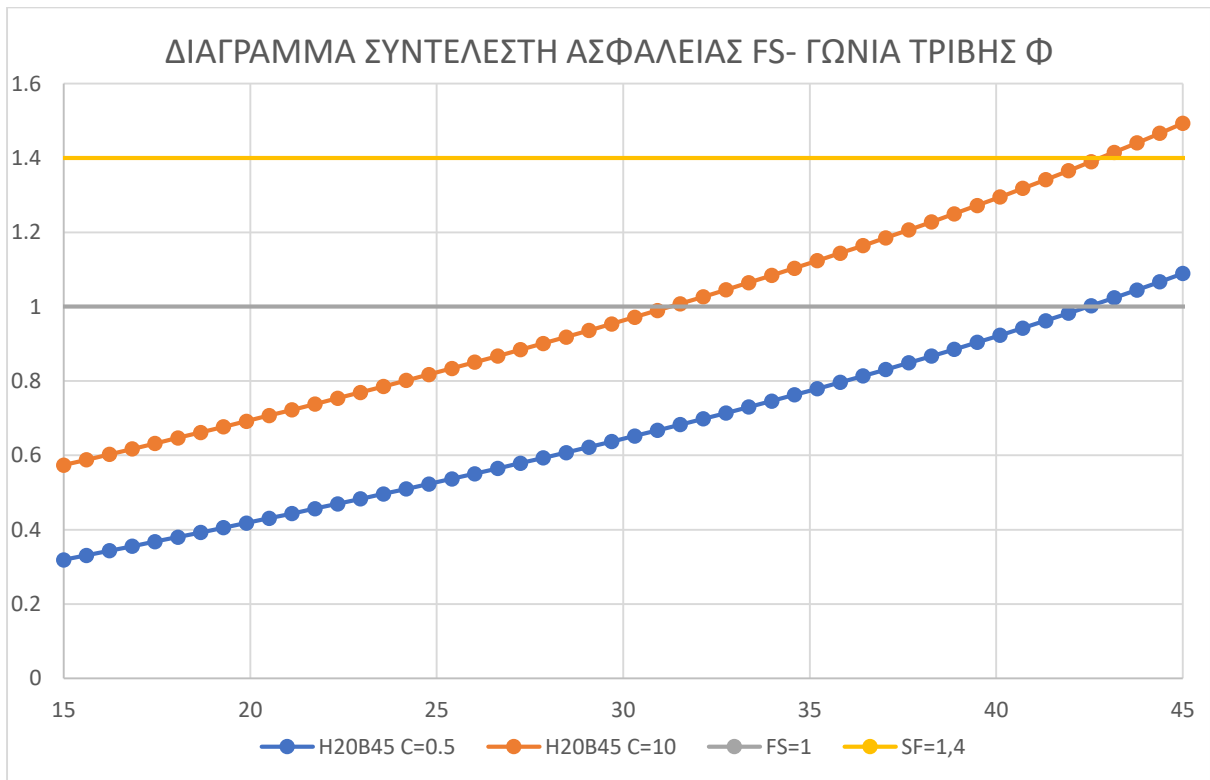
3^ο ΣΕΝΑΡΙΟ :



Σχήμα 10: Αποτελέσματα για c=0.5

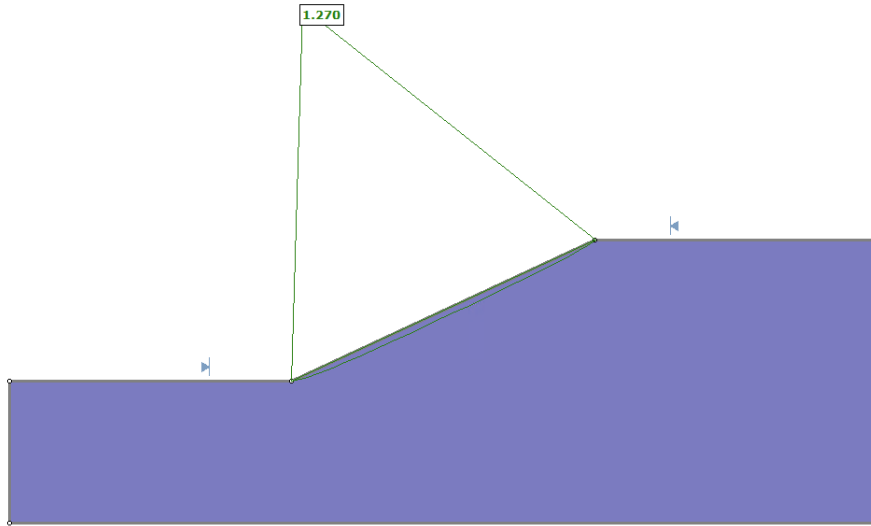


Σχήμα 11: Αποτελέσματα για $c=10$

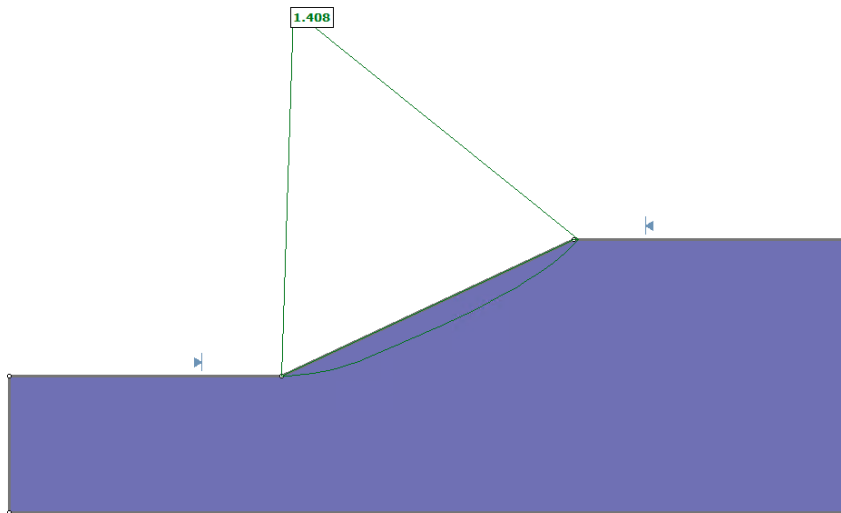


Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας και γωνίας τριβής

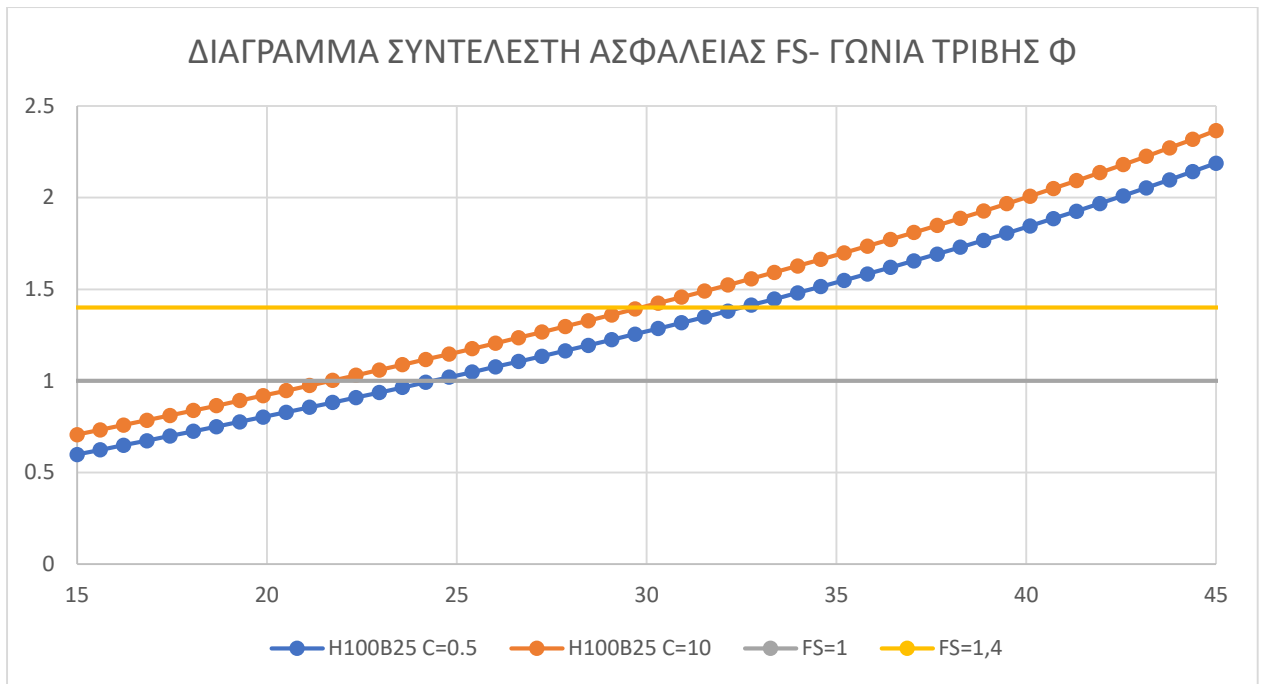
4ο ΣΕΝΑΡΙΟ:



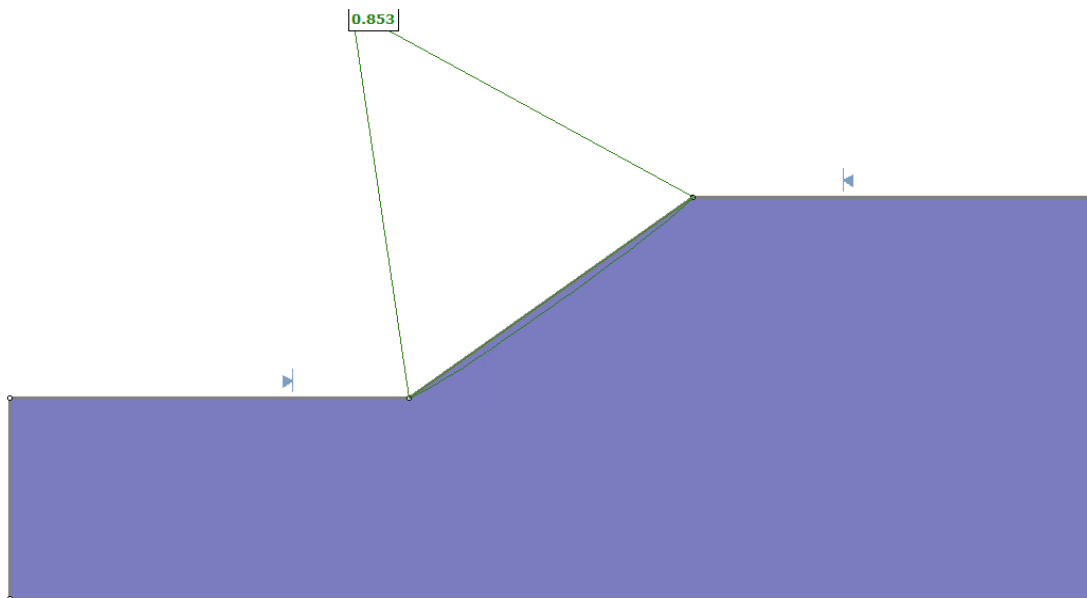
Σχήμα 13: Αποτελέσματα για $c=0.5$



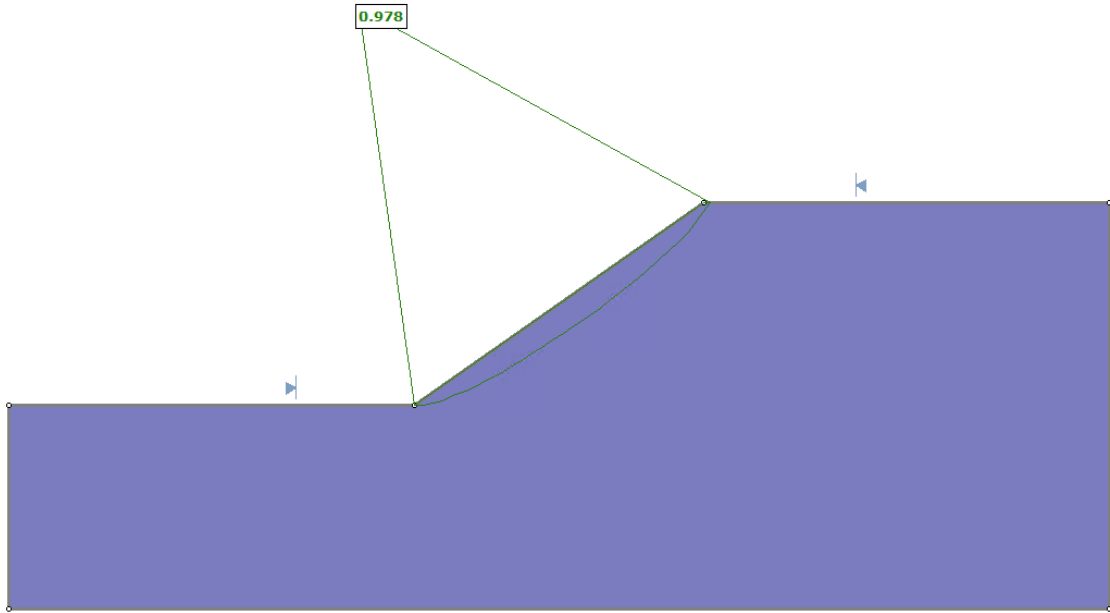
Σχήμα 14: Αποτελέσματα για $c=10$



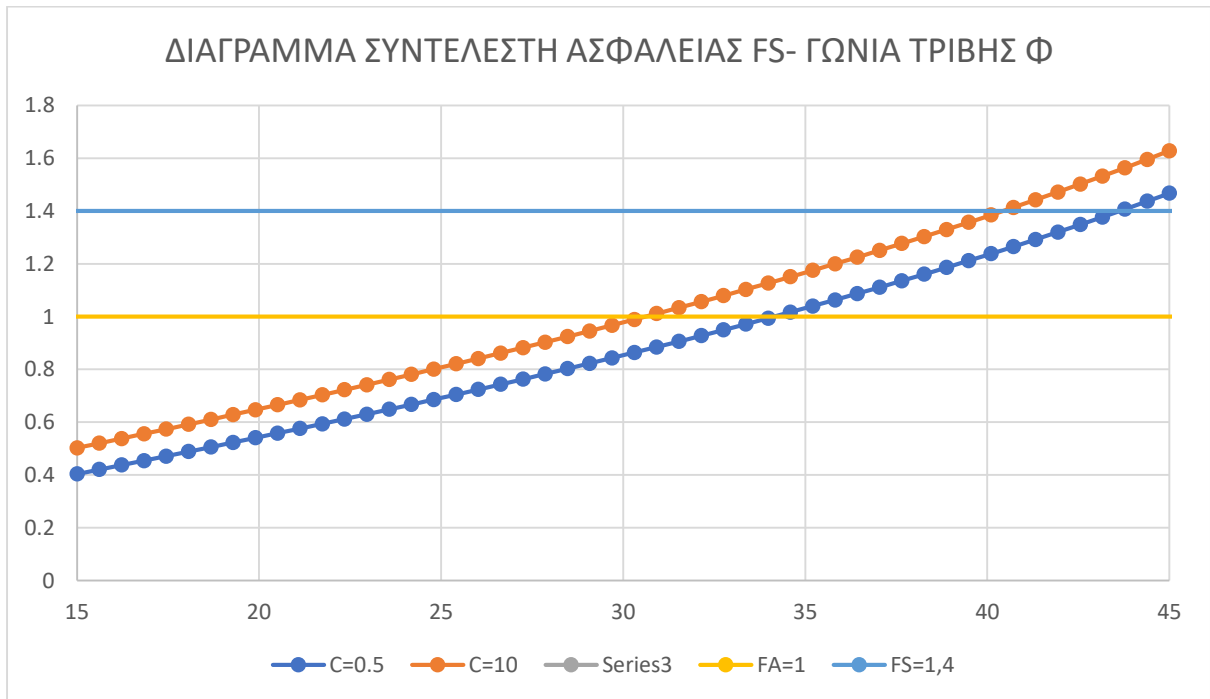
5^ο ΣΕΝΑΡΙΟ :



Σχήμα 15: Αποτελέσματα για c=0.5

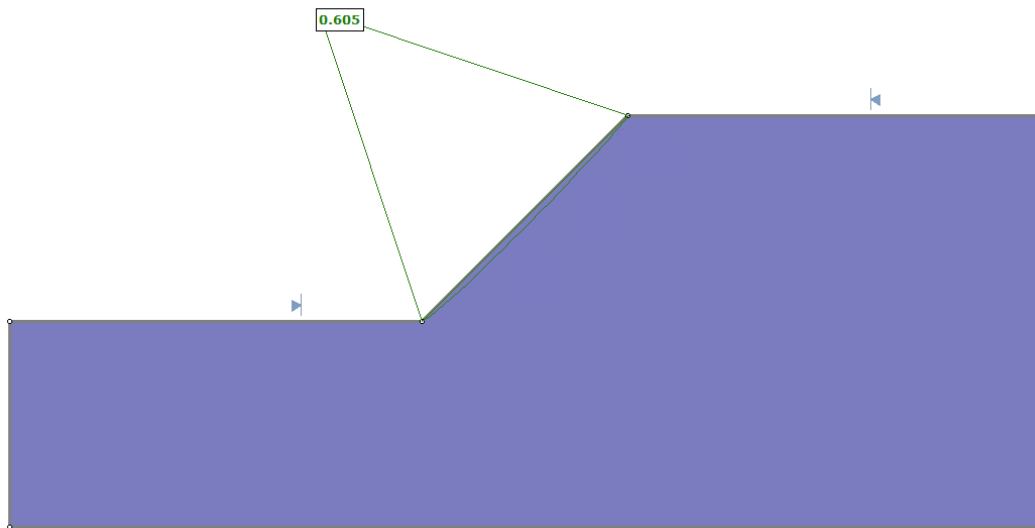


Σχήμα 16: Αποτελέσματα για $c=10$

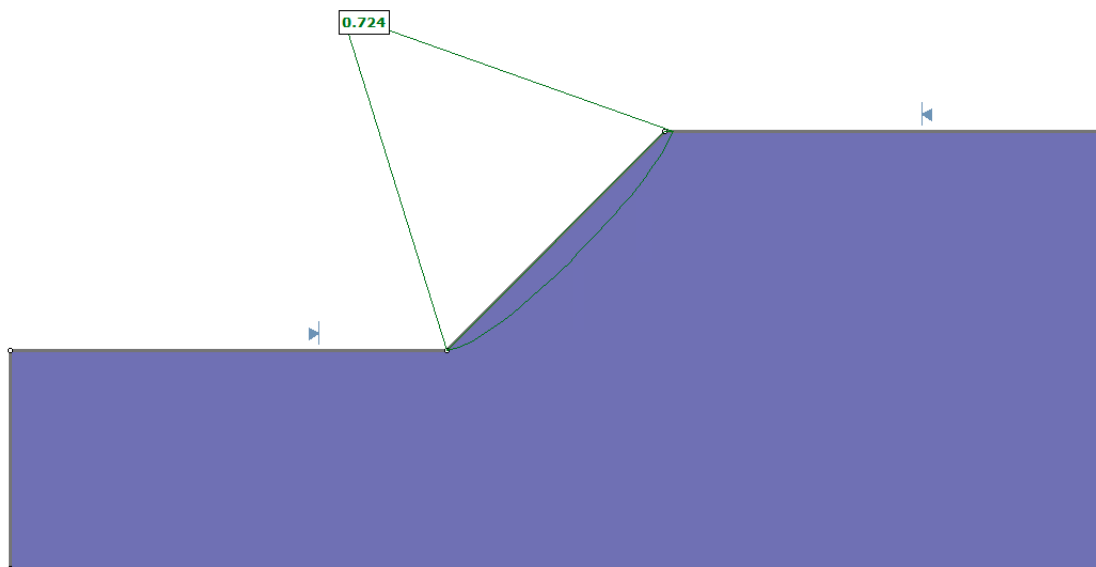


Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας και γωνίας τριβής

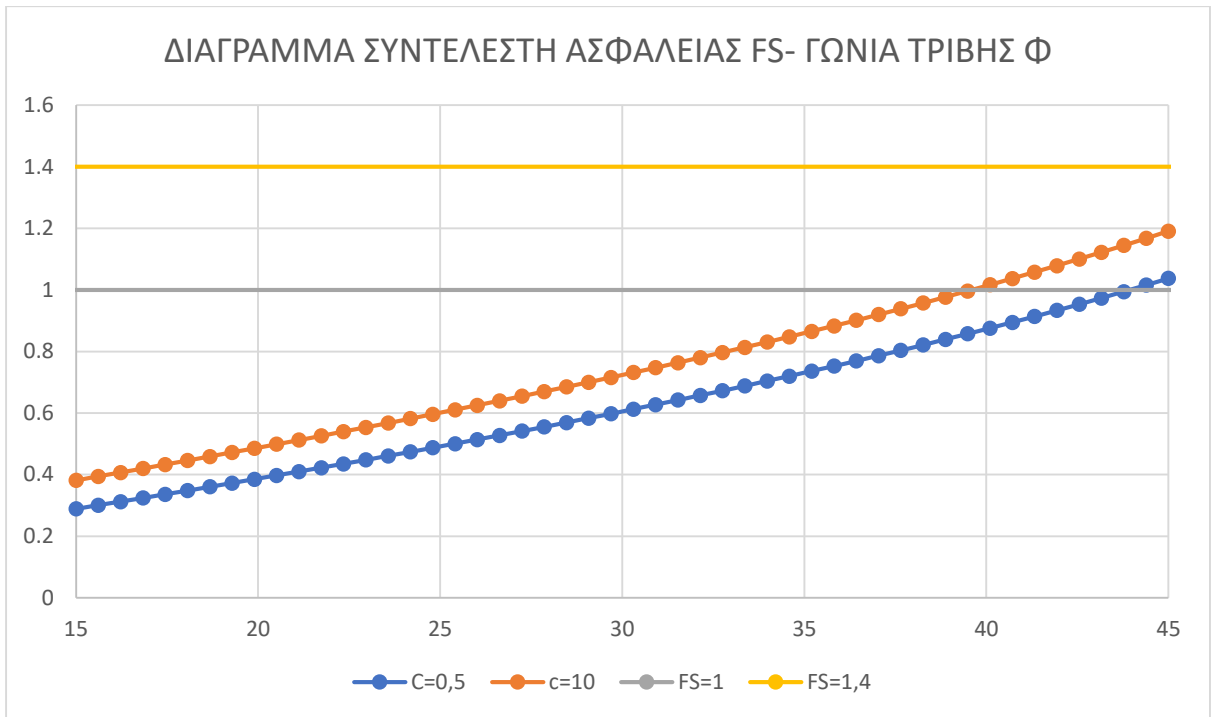
6° ΣΕΝΑΡΙΟ:



Σχήμα 17: Αποτελέσματα για $c=0.5$

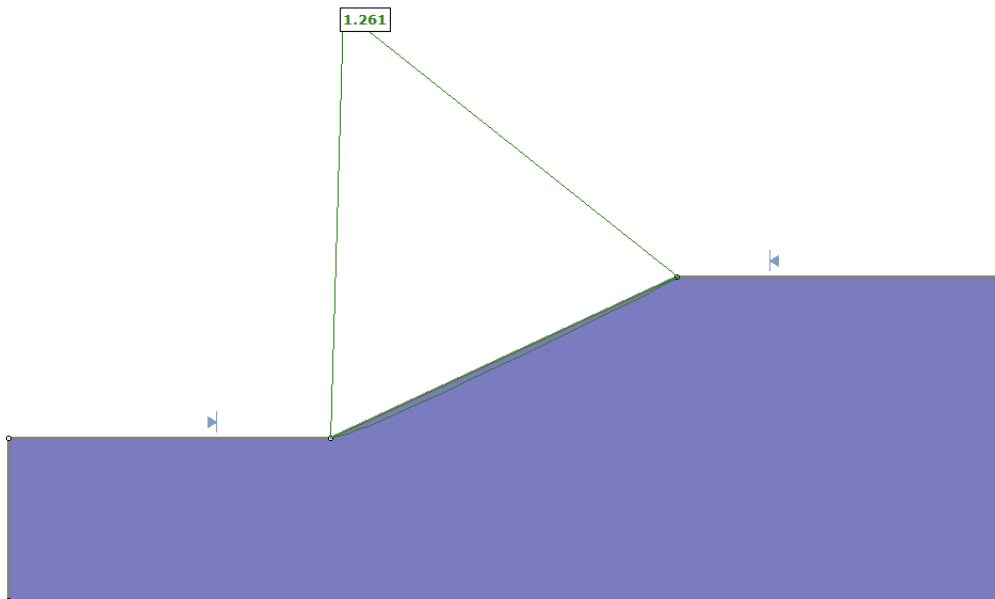


Σχήμα 18: Αποτελέσματα για $c=10$

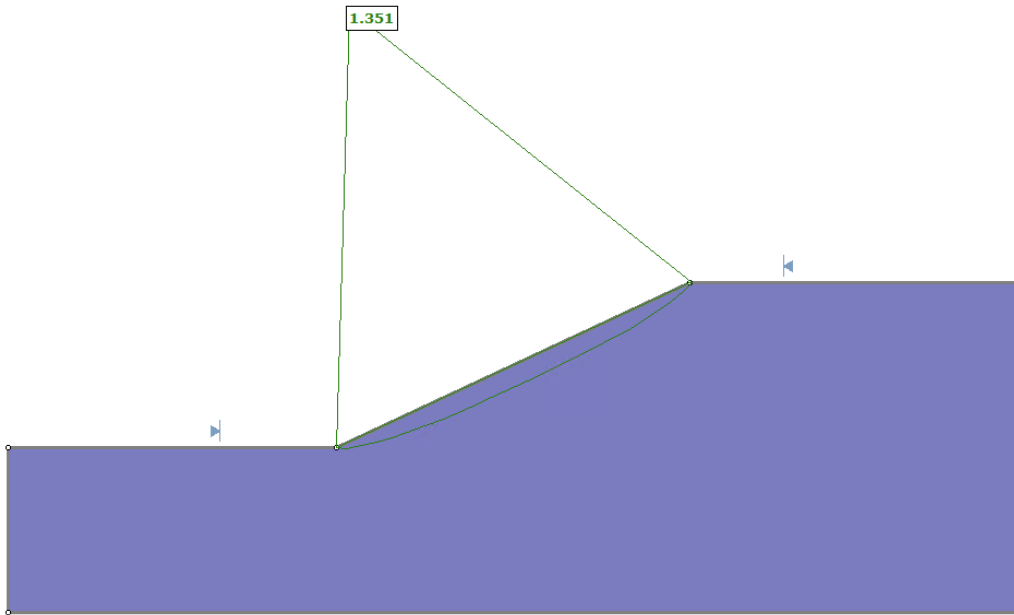


Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας και γωνίας τριβής

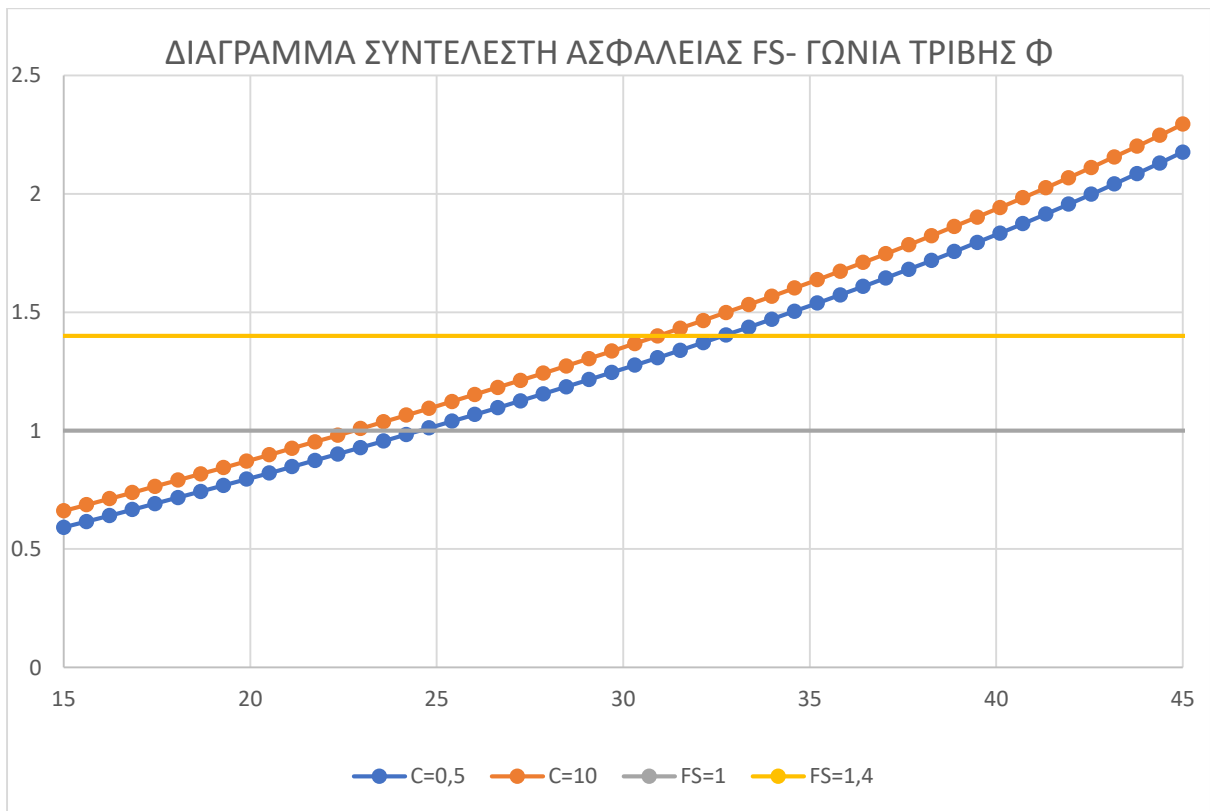
7^ο ΣΕΝΑΡΙΟ:



Σχήμα 19: Αποτελέσματα για $c=0.5$

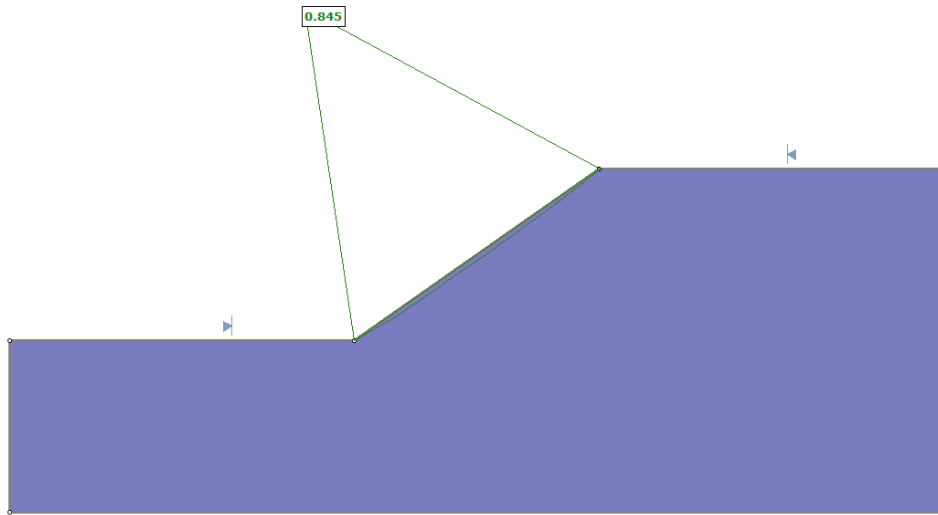


Σχήμα 20: Αποτελέσματα για $c=10$

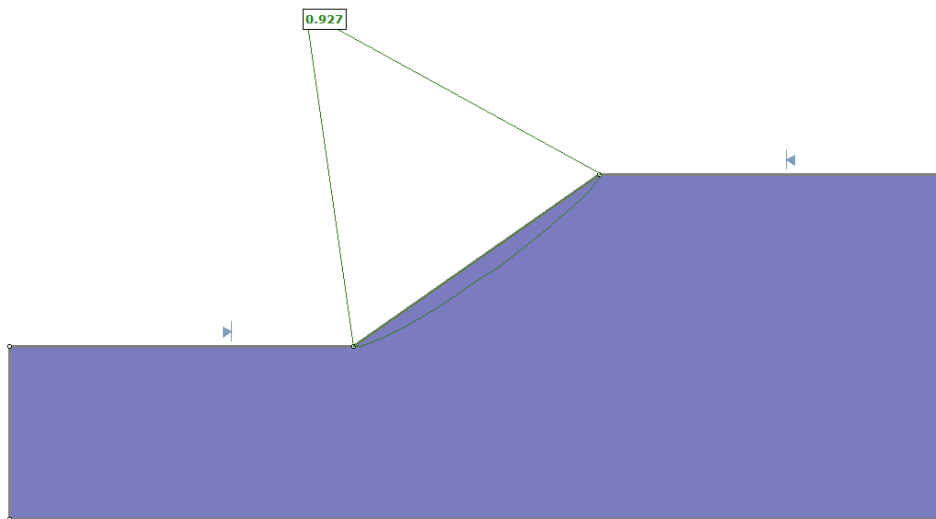


Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας και γωνίας τριβής

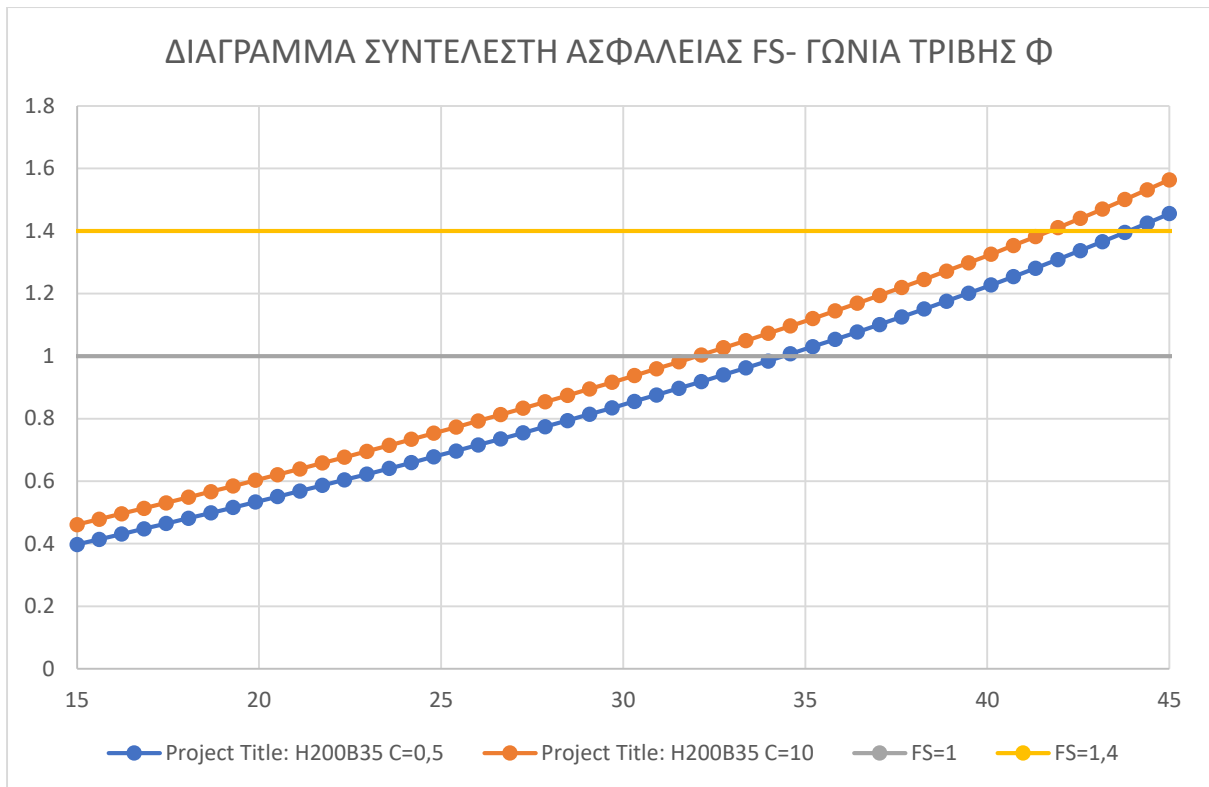
8^ο ΣΕΝΑΡΙΟ:



Σχήμα 21: Αποτελέσματα για $c=0.5$

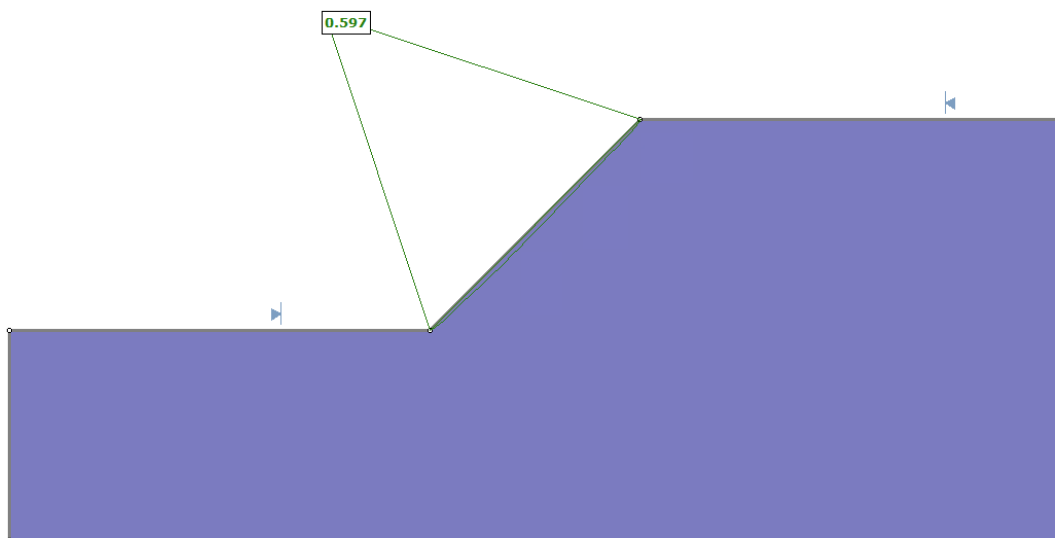


Σχήμα 22: Αποτελέσματα για $c=10$

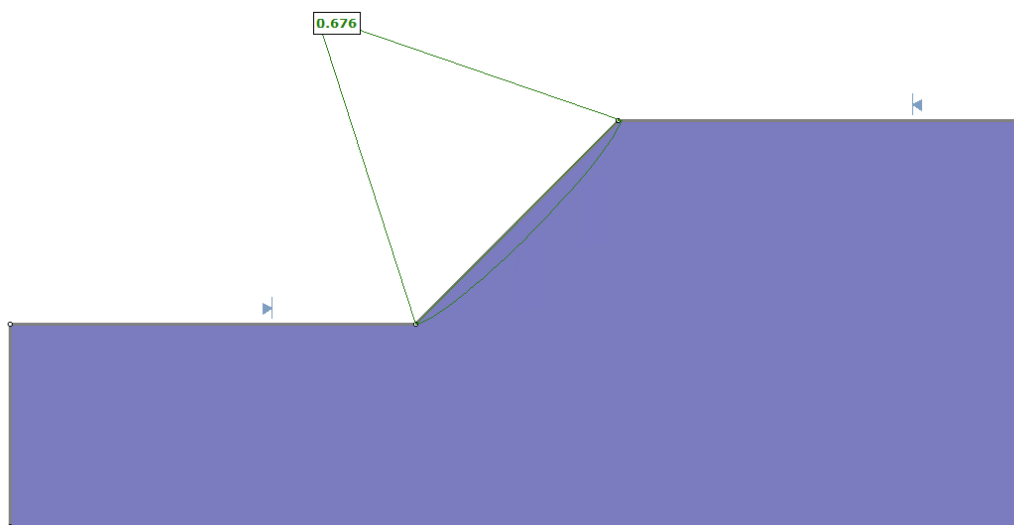


Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας και γωνίας τριβής

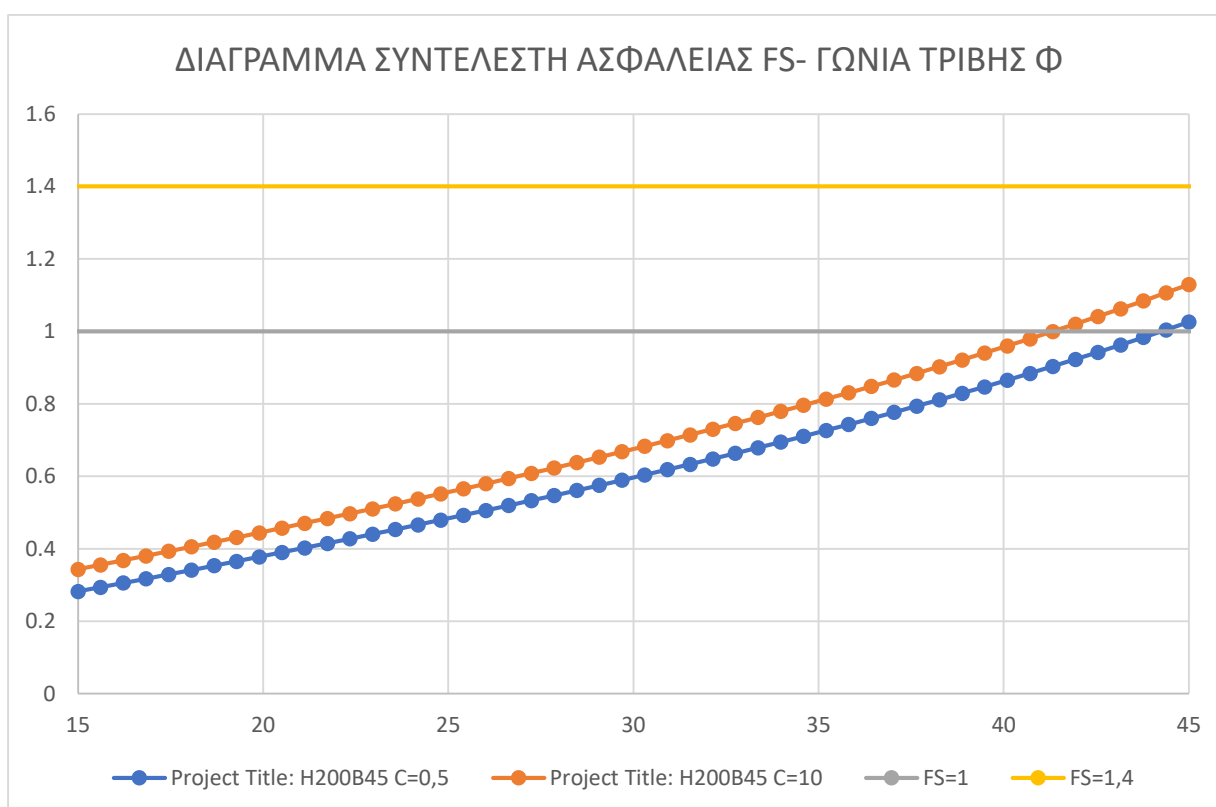
9^ο ΣΕΝΑΡΙΟ:



Σχήμα 23: Αποτελέσματα για c=0.5

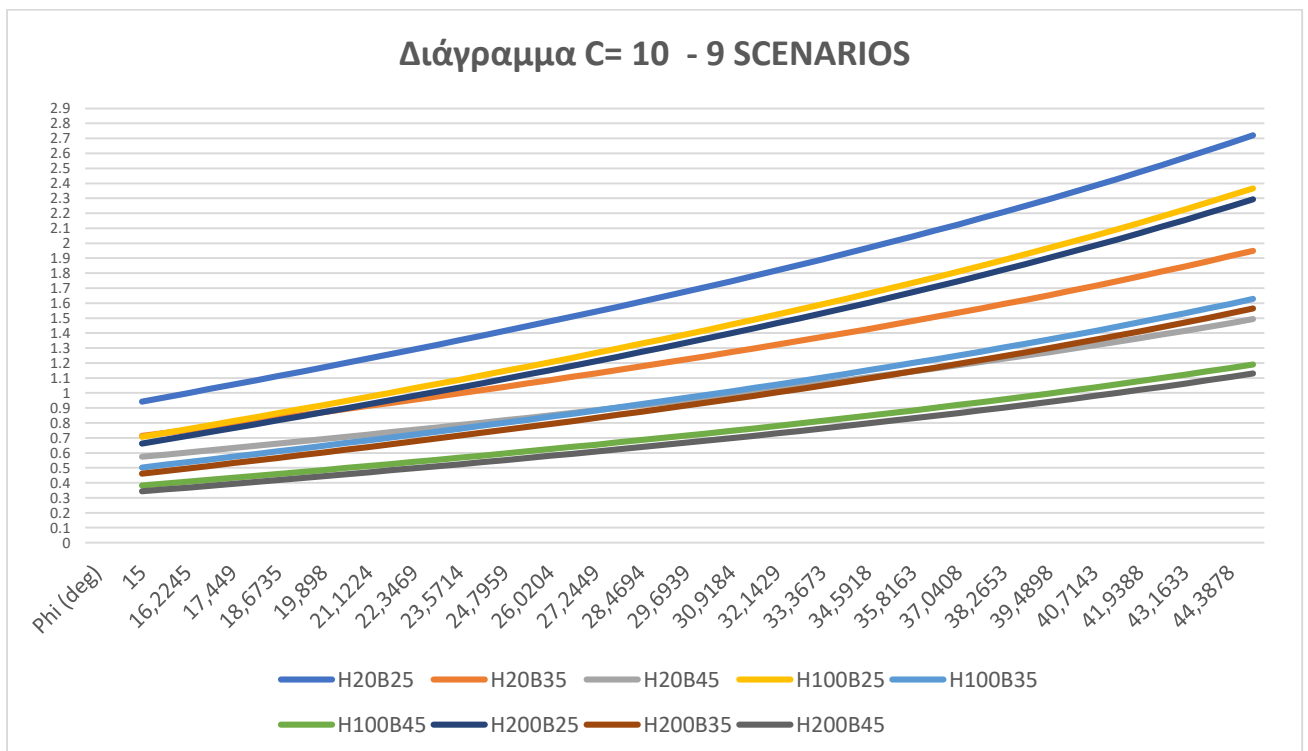
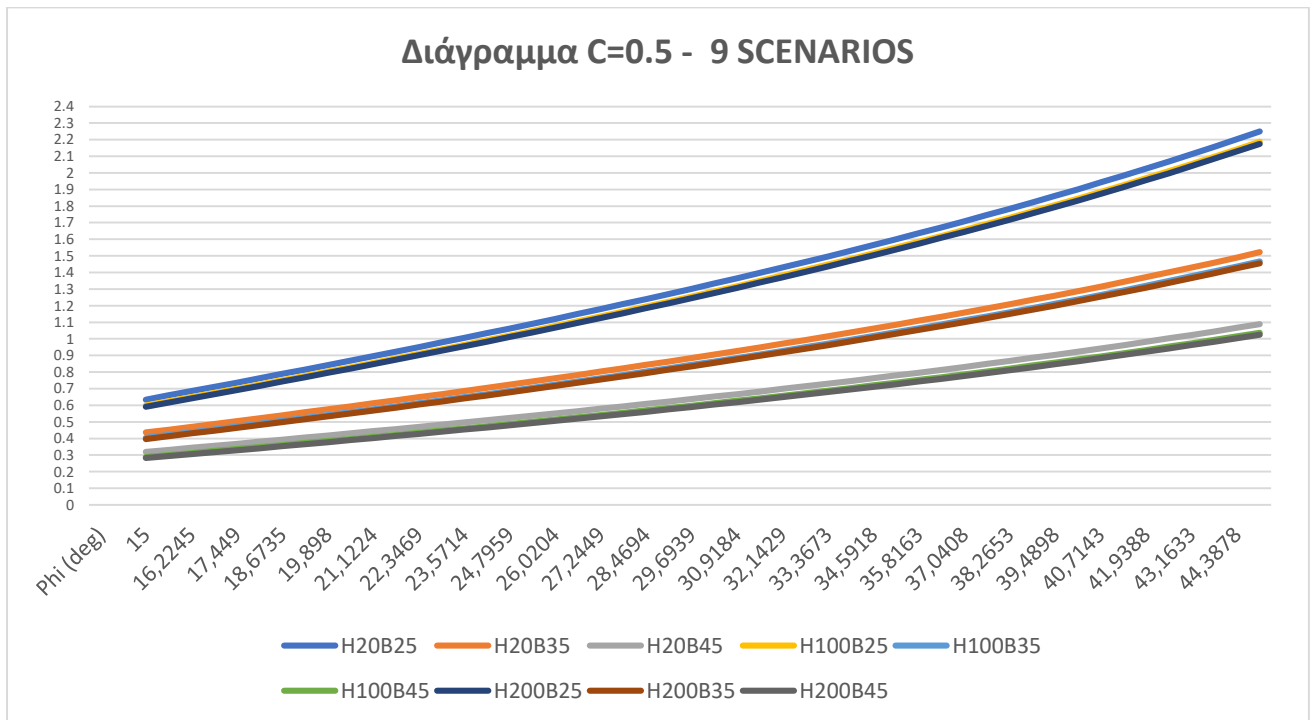


Σχήμα 24: Αποτελέσματα για $c=10$



Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας και γωνίας τριβής

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συνολικά για τα 9 σενάρια για τα οποία έγινε η προσομοίωση, ένα για συνοχή 0.5 και ένα για συνοχή 10.



Από τα διαγράμματα φαίνεται η επίδραση της κλίσης του πρανούς αλλά και του ύψους του επιχώματος, στην συντελεστή ασφαλείας. Όσο πιο μεγάλη είναι η γωνία τριβής τόσο μεγαλύτερες είναι και οι διαφορές στον συντελεστή ασφαλείας. Γενικά όλα τα μοντέλα έχουν την ίδια συμπεριφορά απλά οι συντελεστές ασφαλείας μειώνονται όσο αυξάνεται η γωνία και το ύψος. Τέλος, φαίνεται και στα διαγράμματα η σημασία του συντελεστή της συνοχής, η οποία έχει πολύ μεγάλη επίδραση στον συντελεστή ασφαλείας, δηλαδή η σχεδόν μηδενική συνοχή οδηγεί σε πολύ πιο χαμηλό συντελεστή από ότι η συνοχή με τιμή 10, με τα ίδια δεδομένα. Στους πίνακες 2 και 3 παρουσιάζονται και οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας κάθε σεναρίου και για σταθερή γωνία τριβής $\phi=30$ μοίρες.

H-β	25	35	45
20	<i>1,317</i>	<i>0,895</i>	<i>0,645</i>
100	<i>1,270</i>	<i>0,853</i>	<i>0,605</i>
200	<i>1,261</i>	<i>0,845</i>	<i>0,597</i>

Πίνακας 2 – Πίνακας ύψους με γωνία τριβής, για κλίση πρανούς 30 μοίρες και συνοχή 10, γωνία τριβής 30 μοίρες.

Σε αυτόν τον πίνακα παρατηρούμε ότι οι συντελεστές ασφαλείας είναι αρκετά χαμηλοί ειδικά στα πιο ψηλά επιχώματα λόγω της χαμηλής συνοχής του εδάφους, καθώς είναι σχεδόν μηδενική. Όλοι οι συντελεστές είναι κάτω του επιτρεπόμενου ορίου (1.4) για να είναι ασφαλές ένα επίχωμα προκειμένου να μην υπάρχει ο κίνδυνος αστοχίας. Επίσης στις γωνίες κλίσης πρανούς 35 και 45 είναι χαμηλότεροι της μονάδας που σημαίνει ότι είναι πιο χαμηλοί από την οριακή κατάσταση και αστοχούν.

H-β	25	35	45
20	<i>1,694</i>	<i>1,236</i>	<i>0,963</i>
100	<i>1,408</i>	<i>0,978</i>	<i>0,724</i>
200	<i>1,351</i>	<i>0,927</i>	<i>0,676</i>

Πίνακας 3 – Πίνακας ύψους με γωνία τριβής, για κλίση πρανούς 30 μοίρες και συνοχή 10, γωνία τριβής 30 μοίρες.

Στα μοντέλα όπου η συνοχή είναι 10, ο συντελεστής ασφαλείας έχει πιο μεγάλη τιμή, με κάποιες περιπτώσεις να είναι 1.4 ή και αρκετά πιο υψηλός. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι σε υψηλές κλίσεις και όσο αυξάνεται και το ύψος του επιχώματος υπάρχει αστοχία. Οι τιμές του FS σε αυτόν τον πίνακα είναι μεγαλύτερες λόγω της μεγαλύτερης συνεκτικότητας του εδαφικού υλικού.

Στην συνέχεια από τα διαγράμματα καταγράφουμε και τις γωνίες κλίσης πρανούς, με γωνία τριβής $\phi=30$, για συνοχές 0.5 και 10 και συντελεστές ασφαλείας 1.4 και 1 αντίστοιχα, όπως φαίνεται στους Πίνακες 4, 5, 6, και 7.

C=0.5 , FS = 1.4				
		β		
		25	35	45
H	20	31.5	42.5	-
	100	32.24	43.7	-
	200	32.76	43.8	-

Πίνακας 4

C=10 , FS = 1.4				
		β		
		25	35	45
H	20	24.5	33.9	42.7
	100	29.7	40.4	
	200	30.9	41.5	

Πίνακας 5

C=0 , FS = 1				
		β		
		25	35	45
H	20	23.5	32.8	42.6
	100	24.2	34.6	43.7
	200	24.8	34.6	44.4

Πίνακας 6

C=10 , FS = 1				
		β		
		25	35	45
H	20	16.2	23.6	31.5
	100	21.7	30.3	39.4
	200	22.9	32.14	41.3

Πίνακας 7

5. ΟΠΛΙΣΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΓΕΩΠΛΕΓΜΑΤΑ

Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών πάνω σε άοπλα επιχώματα θα ξεκινήσουμε να προσθέτουμε γεωπλέγματα στο επίχωμα που θα επιλέξουμε για να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά τους ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και την εφελκυστική τους αντοχή.

Θα ακολουθήσουμε την προσέγγιση που αναλύει και στο άρθρο του ο Rajesh Rai, ο οποίος ακολούθησε μια διαδικασία σταδιακής όπλισης του επιχώματος. Ξεκίνησε δηλαδή από την βάση του επιχώματος και πρόσθετε ένα τα γεωπλέγματα παρατηρώντας κάθε φορά την πορεία του συντελεστή ασφαλείας, και στην συνέχεια θα τα παραθέσουμε σε ένα διάγραμμα να δούμε την καμπύλη της επίδρασης του FS.

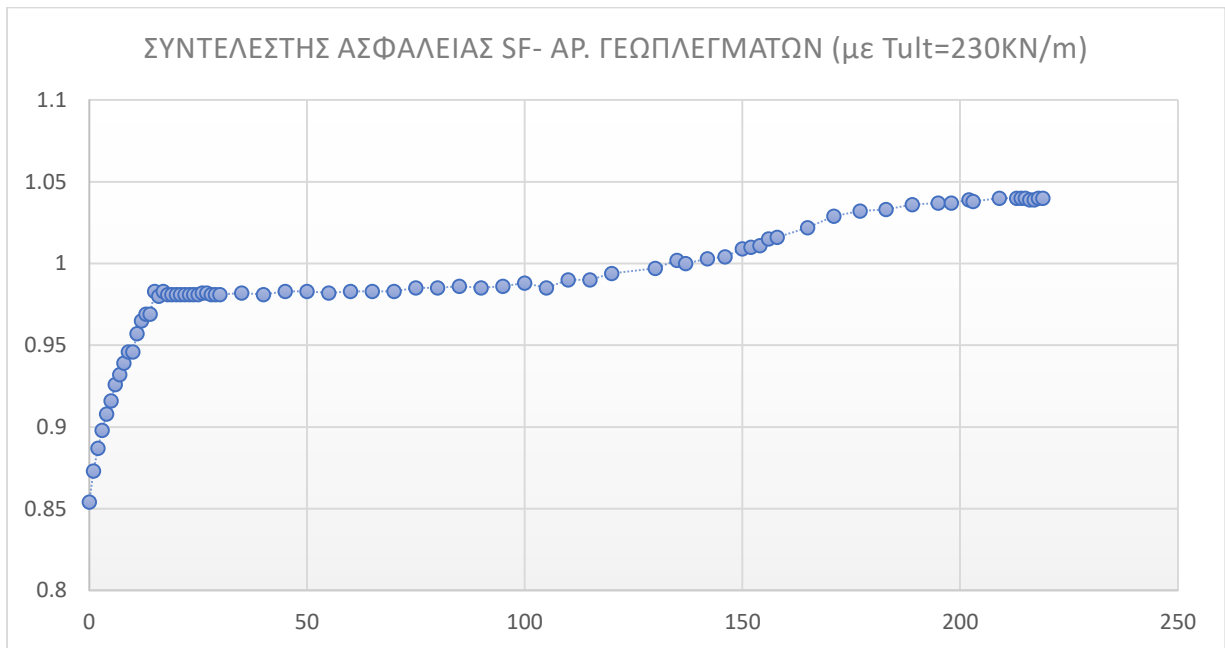
Αναλύοντας τους συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν από τα άοπλα επιχώματα, στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιλέγουμε το επίχωμα που θα ξεκινήσουμε να οπλίζουμε και είναι δυνατόν να μας οδηγήσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Θα πρέπει να το άοπλο μοντέλο που θα επιλέγουμε να είναι σίγουρα κάτω του 1.4 (συντελεστής ασφαλείας), αλλά και να μην είναι τόσο χαμηλός ώστε να μην μπορέσουμε να δημιουργήσουμε ένα ευσταθές επίχωμα.

5.1. Όπλιση επιλεγμένου μοντέλου

Κατά την διαδικασία όπλισης θα ακολουθήσουμε τις βασικές αρχές σχεδιασμού που ορίζει ο Νάσκος, με μήκος γεωπλεγμάτων μεγαλύτερο ή ίσο του 40% του ύψους. Στην ενδιάμεση απόσταση θα επιλέξουμε μεγαλύτερη από εκείνη που ορίζεται, δηλαδή από 0.2 έως 0.8 και όχι μεγαλύτερη του 1 μέτρου, καθώς είναι μια συντηρητική προσέγγιση και ο οπλισμός θα είναι πολύ πυκνός. Το πρώτο γεώπλεγμα θα τοποθετηθεί στην βάση του επιχώματος.

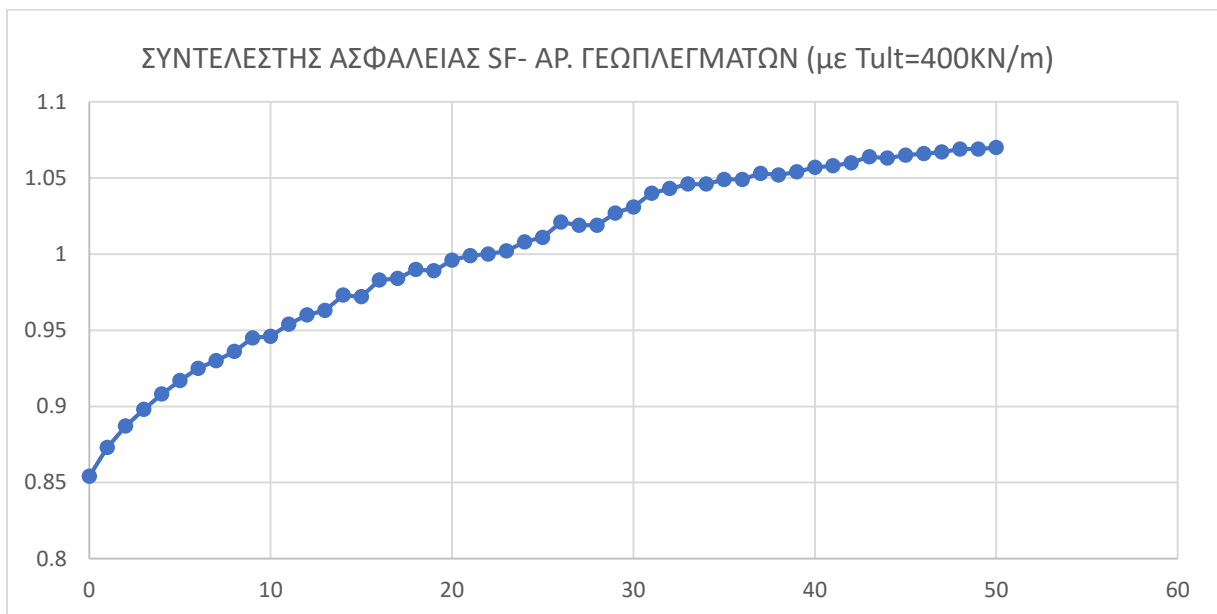
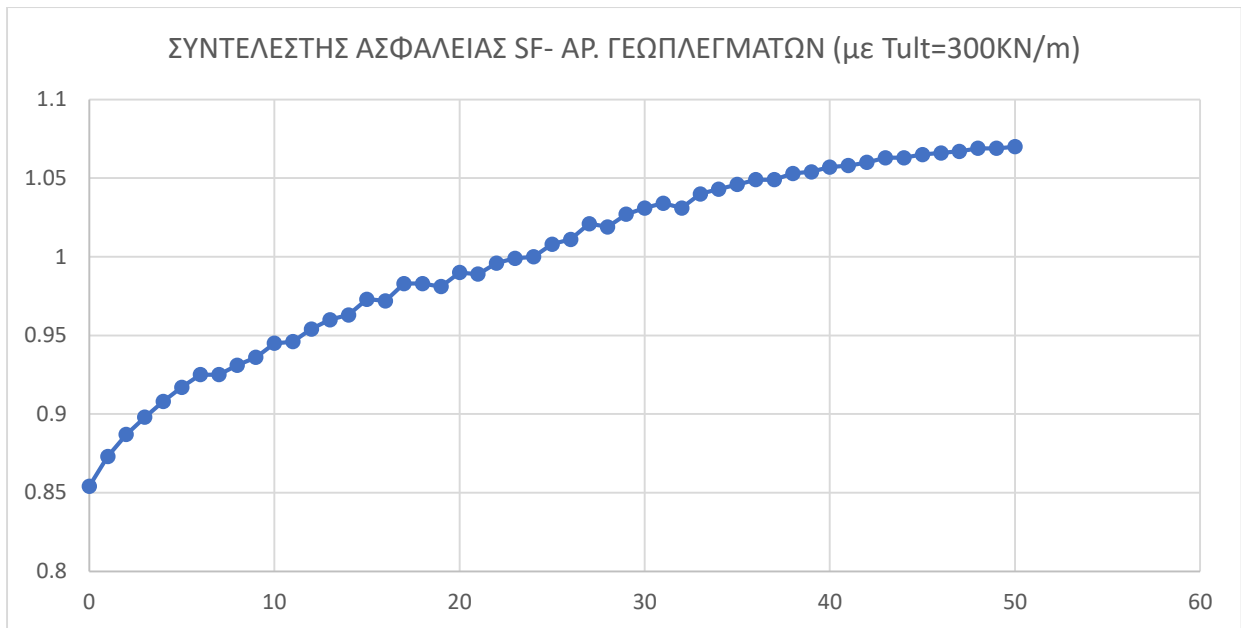
Αρχικά επιλέγουμε το επίχωμα με ύψος 100 μέτρα και κλίση πρανούς 35 μοίρες. Τοποθετούμε τα γεωπλέγματα με απόσταση ανά 0.8m και μήκος 40 μέτρα, δηλαδή ίσο με

το 40% του ύψους, την ελάχιστη τιμή που προτείνει ο Νάσκος. Τα γεωπλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι της Tensar, ο τύπος (UX) 1900, με εφελκυστική αντοχή 230 KN/m και συντελεστές ανομοίωσης 1.1. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα .



Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι πάνω από το όριο αστοχία ($FS=1$) αλλά δεν βρίσκεται πάνω από την ασφαλή τιμή του 1.4, η ανώτατη τιμή που παίρνει είναι 1.04.

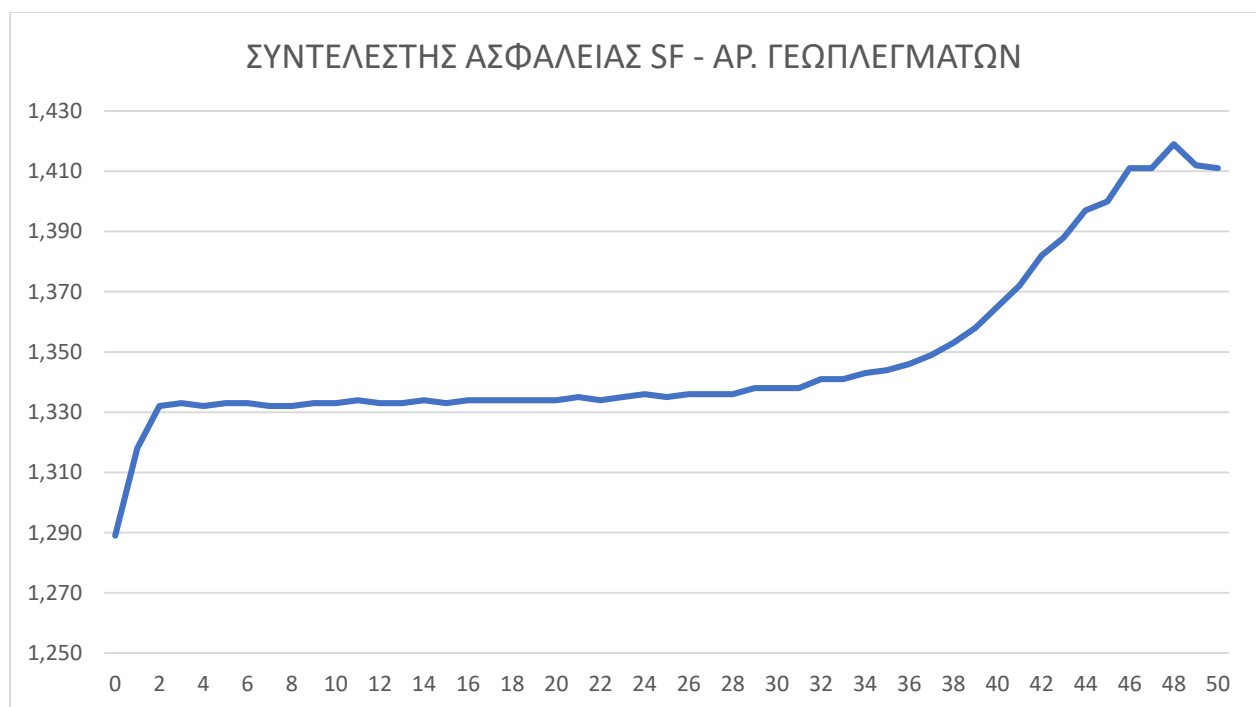
Στη συνέχεια αυξάνουμε την απόλυτη αντοχή σε εφελκυσμό σε 300 KN/m και στη συνέχεια 400 KN/m, το μήκος του οπλισμού σε 50m, και την κάθετη απόσταση μεταξύ των γεωπλεγμάτων σε 2m. Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας παραμένει χαμηλή και πολύ πιο κάτω από το 1.4, με πλήρη οπλισμό. Η πρώτη προσομοίωση είχε ανώτατη τιμή συντελεστή ασφαλείας 1.07 και το δεύτερο 1.072. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



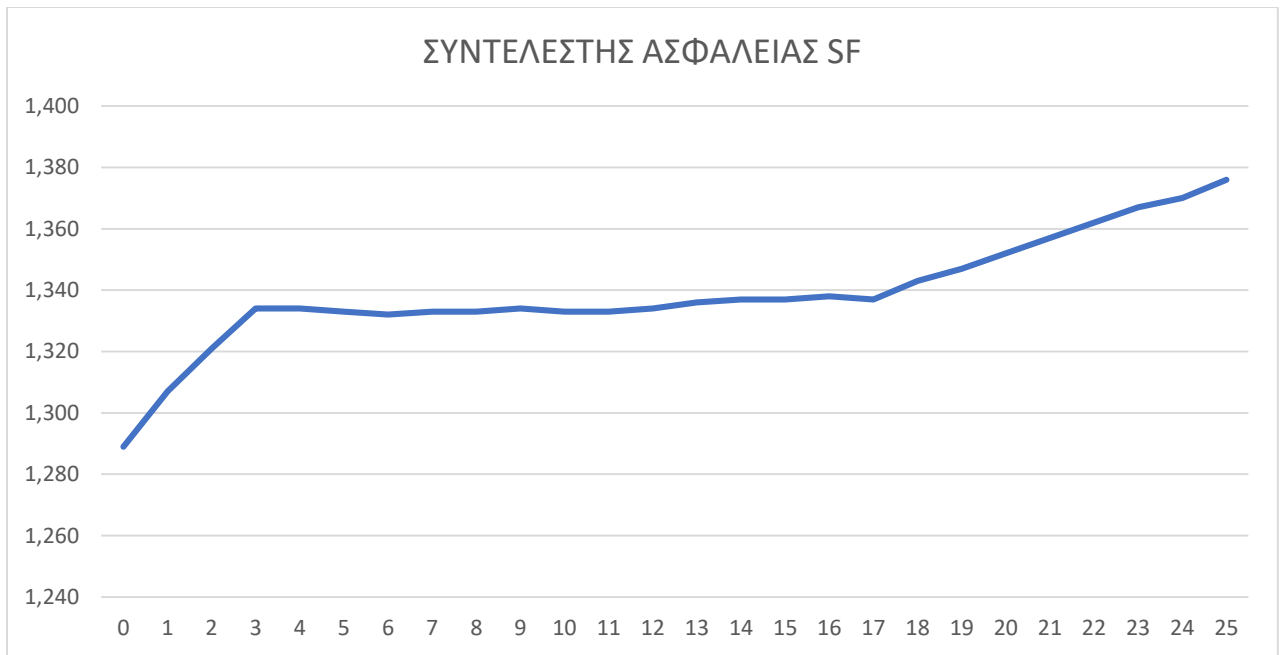
Οπότε επιλέγουμε να δοκιμάσουμε να σπλίσουμε το ίδιο ύψος επιχώματος αλλά αλλάζουμε την γωνία κλίσης πρανούς, ώστε ο συντελεστής ασφαλείας του άοπλου μοντέλου να είναι λίγο πιο κοντά στο 1.4. Έτσι όλες οι επόμενες δοκιμές θα αφορούν το ίδιο επίχωμα, δηλαδή Η100β25, 100 μέτρα ύψος και κλίση πρανούς 25, με τα γεωπλέγματα Tensar (UX) 1900 και συντελεστές απομείωσης 1.1.

Στις τρεις πρώτες προσεγγίσεις θα σπλίσουμε με γεωπλέγματα μήκους 40 μέτρων και κάθετη απόσταση 2m στο πρώτο και 4m στα άλλα δύο. Τα γεωπλέγματα θα είναι της Tensar πάλι (UX) 1900, με αντοχή σε εφελκυσμό 400 KN/m στα δύο πρώτα και 500 KN/m στο τρίτο.

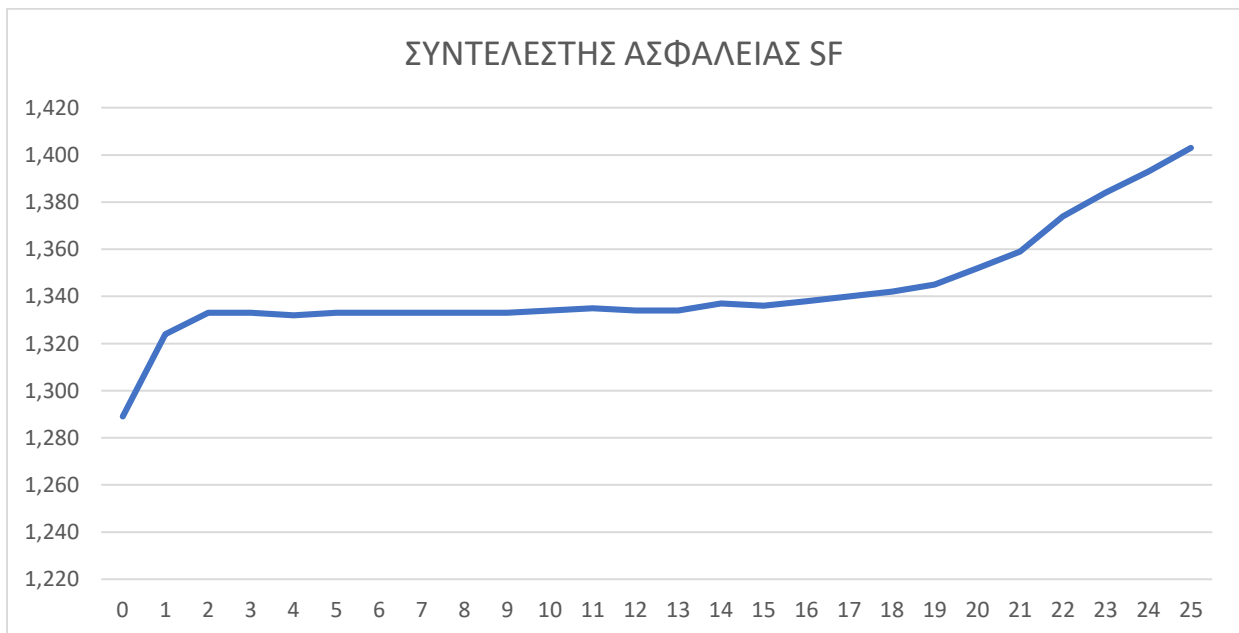
Πιο κάτω φαίνεται τα διάγραμμα που προέκυψαν από τις δοκιμές, και δείχνουν τον συντελεστή ασφαλείας σε συνάρτηση με τον αριθμό των γεωπλεγμάτων που έχουμε οπλίσει το επίχωμα. Ο μέγιστος αριθμός γεωπλεγμάτων που τοποθετήθηκε στο επίχωμα ήταν 50 και η μέγιστη τιμή του συντελεστή ασφαλείας ήταν 1.411, ενώ ξεκίνησε από 1.27 χωρίς οπλισμό. Πιο αναλυτικά μέγιστη τιμή του συντελεστή ασφαλείας σε κάθε περίπτωση είναι 1.411 , 1.376 και 1.403 αντίστοιχα.



Μετά με το ίδιο επίχωμα και με τα ίδια χαρακτηριστικά, ίδια γεωπλέγματα όμως η απόσταση μεταξύ των οπλισμών αυξάνεται ακόμα περισσότερο και γίνεται 4 μέτρα και η εφελκυστική αντοχή παραμένει 400 KN/m, το μήκος των οπλισμών είναι 40m. Το διάγραμμα που δημιουργήθηκε από τα αποτελέσματα παρουσιάζεται παρακάτω. Η όπλιση έγινε με 25 γεωπλέγματα και η ανώτατη τιμή του συντελεστή ασφαλείας ήταν 1.376.



Τέλος, οπλίσαμε πάλι το επίχωμα 100 μέτρων με κλίση πρανούς 25 μοίρες, με γεωπλέγματα μήκους 40 μέτρων και απόσταση μεταξύ τους 4 μέτρα. Ο οπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι Tensar (UX) 1900 με εφελκυστική αντοχή 500 KN/m. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα, με 25 γεωπλέγματα και μέγιστο συντελεστή ασφαλείας 1.403.



Από όλες τις παραπάνω δοκιμές ευστάθειας παρατηρούμε αρχικά ότι το οπλισμένο επίχωμα με κλίση πρανούς 35 δεν είναι τόσο εύκολο να στηριχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι

ασφαλές. Θα έπρεπε να προσπέσουμε πολύ βαρύ οπλισμό με πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ τους και μεγάλο μήκος γεωπλεγμάτων, κάτι που δεν θα ήταν οικονομικά αποδεκτό. Αντίθετα η προσομοίωση οπλισμένου επιχώματος με γωνία κλίσης πρανούς 25 μοίρες είναι πολύ πιο αποδοτική καθώς επιτυγχάνεται ο συντελεστής ασφαλείας ίσο με 1.4. Συμπεραίνουμε ότι σε όλα τα διαγράμματα και πιο πολύ στα τρία τελευταία διαγράμματα, η συμβολή των γεωπλεγμάτων δεν είναι σε όλα τα σημεία του επιχώματος η ίδια. Στα πρώτα γεωπλέγματα της βάσης φαίνεται να αυξάνεται σχεδόν κάθετα ο συντελεστής ασφαλείας και στην συνέχεια μέχρι πριν τα τελευταία από την κορυφή παραμένει σταθερός στην ίδια τιμή. Στα πάνω τελευταία πλέγματα πάλι η αύξηση του συντελεστή ασφαλείας είναι μεγάλη. Δηλαδή ο οπλισμός είναι πιο χρήσιμος στα τέσσερα πρώτα γεωπλέγματα και μετά στα έξι τελευταία. Ο οπλισμός στην μέση του επιχώματος δεν προσφέρει ιδιαίτερη ενίσχυση και η τελική βελτίωση που προσδίδουν τα γεωπλέγματα στο μέσο του επιχώματος είναι πολύ μικρή κάτι που δεν τα καθιστά απαραίτητα για την γενικότερη ευστάθειά του.

Στους αντίστοιχους πίνακες που υπάρχει η ίδια προσέγγιση, από τον Ραή, η αύξηση του συντελεστή ασφαλείας από άοπλο επίχωμα σε πλήρως οπλισμένο επίχωμα είναι αρκετά πιο μεγάλη από εκείνη που διαπιστώσαμε εμείς στις δικές μας δοκιμές και με διαφορετικό ρυθμό, πιθανόν λόγω διαφορετικών εδαφικών παραμέτρων.

Συμπεραίνουμε ότι, αφού δεν υπάρχει κάποια εμφανής βελτίωση με τα γεωπλέγματα στο μέσο του επιχώματος, ενώ είναι εμφανής τα αποτελέσματα στα πρώτα στρώματα και στα τελευταία κοντά στην κορυφή, θα δοκιμάσουμε μόνο την ενίσχυση σε αυτά τα σημεία του επιχώματος. Με αυτό τον τρόπο θα προσεγγίσουμε το θέμα και με μια πιο αποδοτική και προσιτή οικονομικά λύση, καθώς το κόστος των γεωπλεγμάτων αποτελεί και αυτό έναν πολύ σημαντικό παράγοντα στην επιλογή του κατάλληλου οπλισμού.

Προχωρώντας, δοκιμάζουμε να οπλίσουμε με τέσσερις στρώσεις στο κάτω μέρος και μετά αφήνουμε τις 8 τελευταίες στρώσεις στο επίχωμα με 100 μέτρα ύψος και γωνία κλίσης πρανούς 25 μοίρες. Έχουμε οπλισμό με τα ίδια χαρακτηριστικά σε όλο το επίχωμα για να ελεγχθεί η συμπεριφορά του στα συγκεκριμένα σημεία ενίσχυσης. Από τις πρώτες δοκιμές παρατηρούμε γενικά ότι ο συντελεστής ασφαλείας διατηρείται πάνω από το 1.4, με εφελκυστική αντοχή πάνω από το 500 KN/m και μήκος γεωπλέγματος 40m.

Στην δεύτερη δοκιμή ξεκινώντας από την βάση έχουμε γεωπλέγματα 40 μέτρων με αποστάσεις μεταξύ τους 4 μέτρα και εφελκυστικές αντοχές:

1^ο γεώπλεγμα → 900 KN/m

2° γεώπλεγμα → 900 KN/m

3° γεώπλεγμα → 900 KN/m

Και τα υπόλοιπα 500 KN/m όπως και στις προηγούμενες δοκιμές.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προέκυψε είναι 1.41, δηλαδή και πάλι έχουμε τον επιθυμητό συντελεστή ασφαλείας με ακόμα λιγότερο σπλισμό. Το κόστος φαίνεται παρακάτω:

Κόστος = στρώσει γεωπλεγμάτων X μήκος γεωπλεγμάτων X τιμή γεωπλέγματος για συγκεκριμένη εφελκυστική αντοχή. Η τιμή των γεωπλεγμάτων προκύπτει από το περιγραφικό τιμολόγιο δημοσίων έργων οδοποιίας.

Οπότε :

Κόστος = [3X40X26,4] + [8X40X18,5] = 3168 + 5920 = 9088 € / τρέχον μέτρο. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα επίχωμα μήκους 100 μέτρων, τότε το κόστος διαμορφώνεται 908800 €.

Συνεχίζοντας, αυξάνουμε το μήκος των σπλισμών στα 60 μέτρα με 3 γεωπλέγματα εφελκυστικής αντοχής 900 KN/m στην βάση και 3 γεωπλέγματα με $T_{ult} = 900$ KN/m στην κορυφή και τα δύο τελευταία από κορυφή με εφελκυστική αντοχή 500 KN/m. Ο συντελεστής ασφαλείας και σε αυτή την περίπτωση είναι ικανοποιητικός, δηλαδή $FS=1.435$.

Οπότε :

Κόστος = [6X60X26,4] + [2X60X18,5] = 9504 + 2220 = 11724 € / τρέχον μέτρο. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα επίχωμα μήκους 100 μέτρων, τότε το κόστος διαμορφώνεται 1172400 €.

Διαπιστώνεται ο συντελεστής ασφαλείας είναι πάνω του 1.4 και εξετάζεται το ενδεχόμενο να μειώσουμε τον αριθμό των γεωπλεγμάτων σε 3 στην βάση και 3 στο επάνω μέρος του επιχώματος με εφελκυστική αντοχή 900 KN/m. Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι $FS=1.421$.

Οπότε :

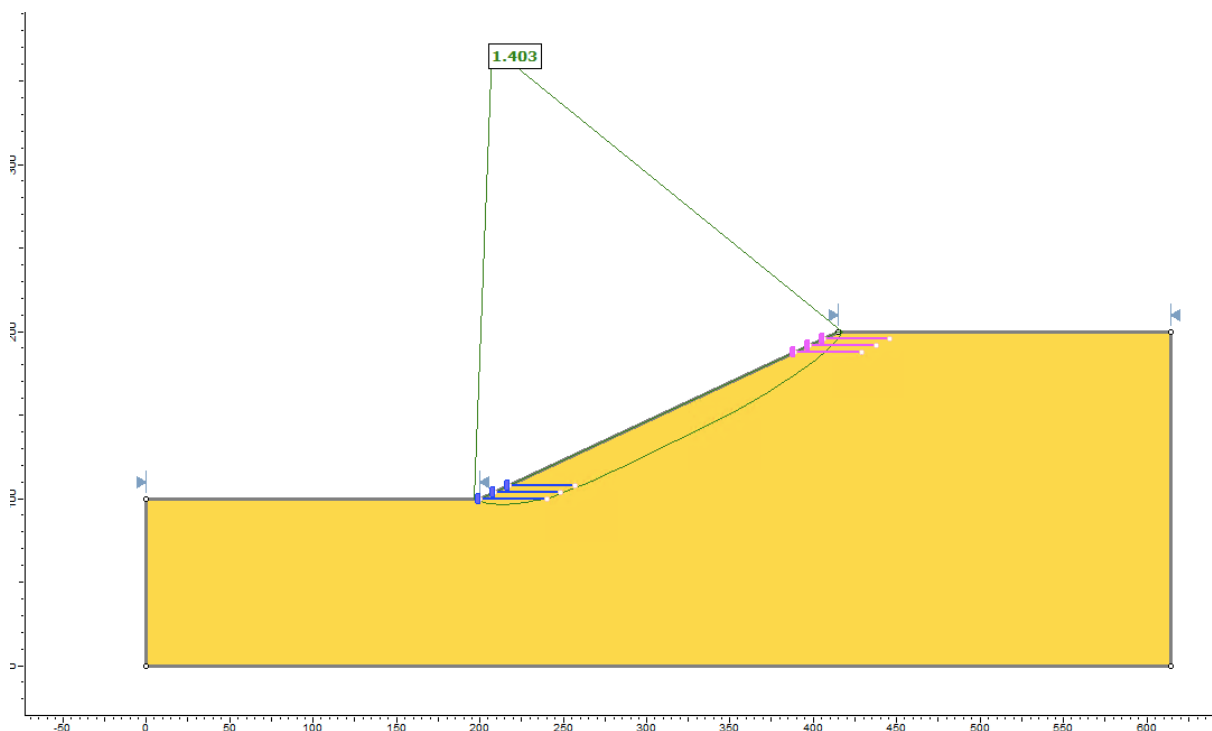
Κόστος = [6X60X26,4] = 9504 € / τρέχον μέτρο. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα επίχωμα μήκους 100 μέτρων, τότε το κόστος διαμορφώνεται 950400 €.

Στην συνέχεια δοκιμάζουμε να σπλίσουμε με την ίδια διάταξη και αριθμό γεωπλεγμάτων, με 40 μέτρα όμως σπλισμού για να εξετάσουμε αν διατηρείται ο συντελεστής ασφαλείας, με

αποτέλεσμα έναν οριακό συντελεστή ασφαλείας 1.391, ο οποίος θα μπορούσε βελτιωθεί με κάποια μικρή αύξηση της εφελκυστικής αντοχής.

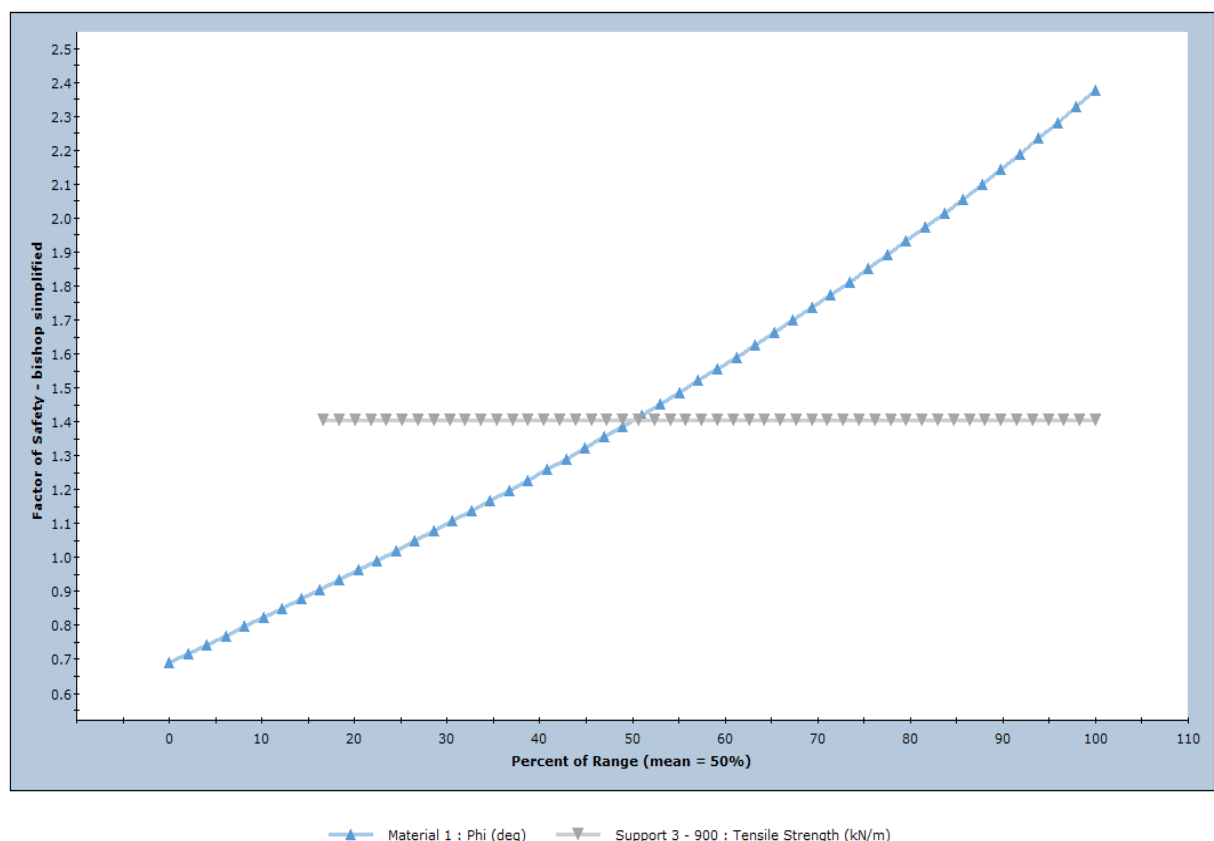
Αφού πειραματιστήκαμε με τα γεωπλέγματα, εξετάζουμε την σημασία της εφελκυστικής αντοχής καθώς παρατηρήθηκε μικρή αλλαγή στον συντελεστή ασφαλείας ενώ πραγματοποιήσαμε μεγάλες αυξομειώσεις στην αντοχή σε εφελκυσμό.

Έτσι κάνουμε μια παραμετρική ανάλυση με Sensitivity Plot για την επίδραση της εφελκυστικής αντοχής πάνω στον συντελεστή ασφαλείας. Ορίζουμε διάφορες τιμές εφελκυστικής αντοχής για κάθε πλέγμα ώστε να δούμε το ρόλο της. Τα αποτελέσματα μας έδειξαν ότι στην βάση του επιχώματος επειδή τελικά δεν έχουμε τόσο μεγάλες δυνάμεις τελικά δεν υπάρχει μεγάλη επιρροή στην γενικότερη ευστάθεια του επιχώματος και δεν αυξάνει ιδιαίτερα τον συντελεστή ασφαλείας. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μπορούμε να μειώσουμε την εφελκυστική αντοχή των οπλισμών της βάσης αρκετά, έχοντας έτσι και ένα πιο οικονομικό αποτέλεσμα. Αντίστοιχα μπορούμε να ενισχύσουμε την κορυφή στην οποία η εφελκυστική αντοχή των γεωπλεγμάτων είναι αρκετά πιο σημαντική.



Δοκιμάζοντας και με διάφορα παραδείγματα αυτή την πρακτική, καταλήγουμε στην ίδια διαπίστωση, ότι δηλαδή μπορούμε να έχουμε χαμηλότερες τιμές εφελκυστικής αντοχής στα γεωπλέγματα της βάσης και να δώσουμε περισσότερη όπλιση στην κορυφή, χωρίς να

επηρεάζεται η συνολική ευστάθεια. Επίσης, καταφέραμε από τα 25 γεωλέγματα που είχαμε αρχικά να μειώσουμε τον αριθμό τους στα 6 και να σπλίσουμε εκεί που πραγματικά βελτιώνει την γενικότερη ευστάθεια, αυξάνοντας τον συντελεστή ασφαλείας ενώ έγινε και οικονομικά πιο αποδοτικό. Ενδεικτικά επισυνάπτεται και ένα διάγραμμα με τις εφελκυστικές αντοχές στην βάση του επιχώματος, που φαίνεται ότι παραμένει σταθερός ο συντελεστής ασφαλείας σε οποιαδήποτε τιμή αντοχής.

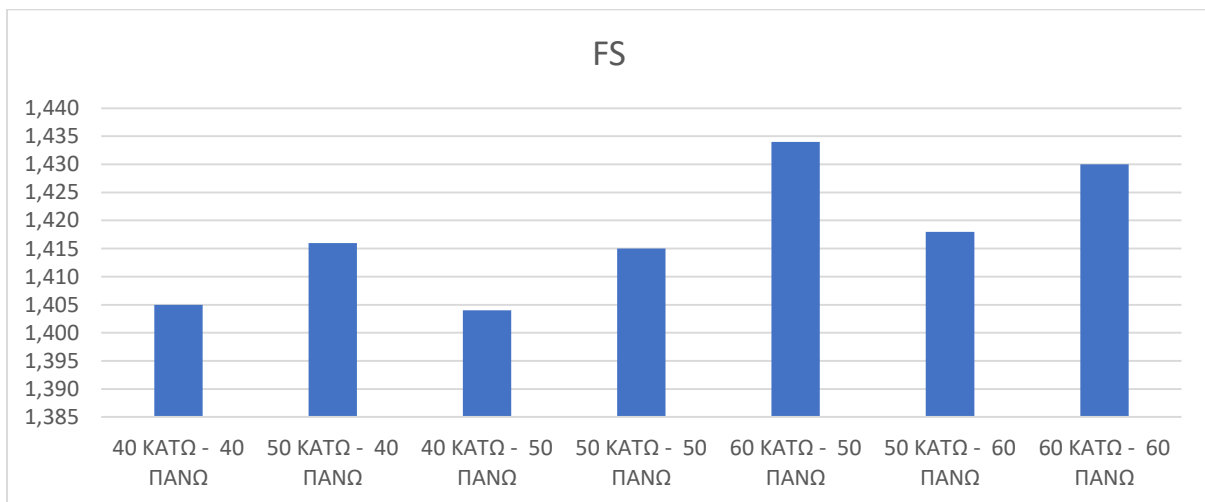


ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΗ ΤΟΥ ΡΟΛΟΥ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΓΕΩΠΛΕΓΜΑΤΟΣ:

Ένα άλλον χαρακτηριστικό που πρέπει να διαπιστωθεί είναι ο ρόλος του μήκους των γεωπλεγμάτων. για να το διαπιστώσουμε αυτό, σπλίσαμε ακριβώς το ίδιο μοντέλο με 3 γεωπλέγματα στην βάση με εφελκυστική αντοχή 1100 KN/m και 3 γεωπλέγματα στην κορυφή με εφελκυστική αντοχή 1100 KN/m πάλι, με απόσταση 4 μέτρα και μεταβάλλοντας μόνο το μήκος του σπλισμού στην βάση, στην κορυφή ή στα δύο για να παρατηρήσουμε τα αποτελέσματα, τα οποία φαίνονται στον πίνακα 8 και στο διάγραμμα.

ΜΗΚΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ	FS
40 ΚΑΤΩ - 40 ΠΑΝΩ	1.405
50 ΚΑΤΩ - 40 ΠΑΝΩ	1.416
40 ΚΑΤΩ - 50 ΠΑΝΩ	1.404
50 ΚΑΤΩ - 50 ΠΑΝΩ	1.415
60 ΚΑΤΩ - 50 ΠΑΝΩ	1.434
50 ΚΑΤΩ - 60 ΠΑΝΩ	1.418
60 ΚΑΤΩ - 60 ΠΑΝΩ	1.430

Πίνακας 8 : Μήκος οπλισμού και συντελεστής ασφαλείας



Ένα πιθανό συμπέρασμα είναι ότι το μήκος του οπλισμού έχει μεγαλύτερη ενισχυτική ικανότητα στην βάση του επιχώματος και δεν επηρεάζει τόσο στην κορυφή. Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας αυξάνεται είτε αυξήσουμε το μήκος στα κάτω γεωπλέγματα είτε σε όλα, ενώ αν αυξήσουμε στην κορυφή δεν παρατηρείται τόσο μεγάλη βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας.

Έχοντας δημιουργήσει μια εικόνα της συμπεριφορά της εφελκυστικής αντοχής των γεωπλεγμάτων και του μήκους οπλισμού πραγματοποιούμε μερικές επιπλέον πιο στενευμένες αναλύσεις – δοκιμές, πάνω στο επίχωμα ύψους 100 μέτρων, και γωνίας κλίσης πρανούς 25 μοίρες. Θα χρησιμοποιηθούν και πάλι τα γεωπλέγματα Tensar (UX) 1900, με κάθετη απόσταση μεταξύ τους 4 μέτρα.

Κατά την 1^η δοκιμή, θα οπλίσουμε με τρία γεωπλέγματα στην βάση του επιχώματος, με μήκος 40 μέτρα και $T_{ult.} = 500 \text{ kN/m}$ και την κορυφή του επιχώματος πάλι τρία γεωπλέγματα με το ίδιο μήκος αλλά $T_{ult.} = 1100 \text{ kN/m}$. Ο συντελεστής ασφαλείας είναι $FS=1.405$ και το κόστος διαμορφώνεται ως εξής:

Κόστος = $[3 \times 40 \times 30,9] + [3 \times 40 \times 18,5] = 3708 + 2220 = 5928 \text{ € / τρέχον μέτρο}$. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα επίχωμα μήκους 100 μέτρων, τότε το κόστος διαμορφώνεται 592800 €.

Στην 2^η δοκιμή, θα οπλίσουμε με τρία γεωπλέγματα στην βάση του επιχώματος, με μήκος 50 μέτρα και $T_{ult.} = 300 \text{ kN/m}$ και την κορυφή του επιχώματος πάλι τρία γεωπλέγματα με μήκος 40 μέτρα αλλά $T_{ult.} = 900 \text{ kN/m}$. Ο συντελεστής ασφαλείας είναι $FS=1.401$ και το κόστος διαμορφώνεται ως εξής:

Κόστος = $[3 \times 50 \times 14,8] + [3 \times 40 \times 26,4] = 2220 + 3168 = 5388 \text{ € / τρέχον μέτρο}$. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα επίχωμα μήκους 100 μέτρων, τότε το κόστος διαμορφώνεται 538800 €.

Τέλος στην 3^η δοκιμή, θα οπλίσουμε με τρία γεωπλέγματα στην βάση του επιχώματος, με μήκος 60 μέτρα και $T_{ult.} = 200 \text{ kN/m}$ και την κορυφή του επιχώματος πάλι τρία γεωπλέγματα με μήκος 50 μέτρα αλλά $T_{ult.} = 700 \text{ kN/m}$. Ο συντελεστής ασφαλείας είναι $FS=1.388$, μη επαρκής δηλαδή, υπολογίζουμε όμως το κόστος και σε αυτήν την περίπτωση το οποίο διαμορφώνεται ως εξής:

Κόστος = $[3 \times 60 \times 12,8] + [3 \times 50 \times 22,4] = 2304 + 3360 = 5664 \text{ € / τρέχον μέτρο}$. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα επίχωμα μήκους 100 μέτρων, τότε το κόστος διαμορφώνεται 566400 €.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΓΩΝΙΑΣ - ΩΦΕΛΙΜΟΣ ΟΓΚΟΣ:

Το αρχικό άοπλο επίχωμα με συντελεστή ασφαλείας 1.4 και ύψος 100 μέτρα είχε κλίση πρανούς 22.5 μοίρες. Οπότε υπολογίζουμε τον όγκο του αρχικού και τον όγκο του επιχώματος με κλίση 25 μοίρες. Αρχικά βρίσκουμε την πλευρά α όπως κάναμε και στα άοπλα επιχώματα κατά τον σχεδιασμό τους.

$$\tan 22.5^\circ = 100 / \alpha_{\text{αρχικό}} \Rightarrow \alpha_{\text{αρχικό}} = 100 / 0,414 = 241,55 \text{ m}$$

$$\tan 25^\circ = 100 / \alpha_{\text{τελικό}} \Rightarrow \alpha_{\text{τελικό}} = 100 / 0,47 = 212,8 \text{ m}$$

$$A_{\text{οφέλ.}} = 241,55 - 212,8 = 28,75 \text{ m}$$

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν για την συμπεριφορά των γεωπλεγμάτων στον σωρό απόθεσης ήταν τα εξής:

- Σε γενικό επίπεδο πολύ σημαντική είναι η επιλογή των μονοαξονικών γεωπλεγμάτων, και οι ιδιότητες του εδαφικού υλικού με το οποίο θα αλληλοεπιδράσουν. Για τον οπλισμό οι παράγοντες που το επηρεάζουν είναι το μήκος τους, η εφελκυστική τους αντοχή, η απόλυτη τιμή εφελκυστικής αντοχής η οποία επηρεάζεται κυρίως από τις τιμές υποβάθμισης, την κάθετη απόσταση μεταξύ των υλικών. Για το υλικό του επιχώματος κύριος παράγοντας είναι η συνοχή, και μετά η γωνία τριβής, η κλίση πρανούς, το ύψος και οι συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον.
- Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μετά από μερικές δοκιμές με πλήρη όπλιση του επιχώματος, δηλαδή από την βάση έως την κορυφή δηλαδή, και αλλαγές της απόλυτης εφελκυστικής αντοχής κυρίως και του μήκους των γεωπλεγμάτων, ότι στο διάγραμμα ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται πιο απότομα στην βάση και στην κορυφή ενώ ενδιάμεσα παραμένει σταθερός χωρίς να επηρεάζεται καθόλου με την προσθήκη οπλισμού.
- Στη συνέχεια, από μεγαλύτερη ανάλυση, με την αύξηση της απόλυτης τιμής της εφελκυστικής αντοχής, προκύπτει ότι τα γεωπλέγματα στην κορυφή αυξάνουν τον συντελεστή ασφαλείας όσο αυξάνεται η αντοχή τους, ενώ στην βάση δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα παρά μόνο εάν μειώσουμε πάρα πολύ την τιμή της.
- Ακόμα, το μήκος των γεωπλεγμάτων ενισχύει πιο πολύ το επίχωμα στην βάση βοηθάει στην αύξηση του συντελεστή ασφαλείας, ενώ στην κορυφή όχι τόσο πολύ.

Οπότε καταλήγουμε ότι από το άοπλο επίχωμα με κλίση πρανούς 22.5 μοίρες και ύψος 100 μέτρα, μηδενική σχεδόν συνοχή και συντελεστή ασφαλείας 1.4, καταφέραμε να αυξήσουμε την κλίση σε 25 μοίρες, παραμένοντας το ύψος στα 100 μέτρα και διατηρώντας τον συντελεστή ασφαλείας στο 1.4. Επίσης από την αρχική όπλιση που είχαμε 25 γεωπλέγματα μειώσαμε τον αριθμό στα 6 διατηρώντας την ευστάθεια και αυξάνοντας τον ωφέλιμο όγκο του επιχώματος. Παράλληλα διατηρήσαμε το κόστος του έργου σε ένα λογικό επίπεδο μειώνοντας εκεί που ήταν επιτρεπτό, κυρίως στην βάση, την εφελκυστική αντοχή και αυξάνοντας το μήκος των γεωπλεγμάτων, μειώνοντας έτσι το κόστος σχεδόν στην μισή αξία.

Επίσης για να διατηρηθεί ο συντελεστής ασφαλείας μέσα στα ασφαλή επίπεδα αυξήσαμε λίγο την αντοχή του οπλισμού στην κορυφή χωρίς όμως να φτάσουμε στην μέγιστη.

Το τελικό μοντέλο που προτείνεται από αυτή την μελέτη είναι η οπλισμός του επιχώματος ύψους 100 και κλίσης πρανούς 25 μοίρες, με γεωπλέγματα Tensar (UX) 1900. Τοποθετούμε τρεις στρώσεις στην βάση με $T_{ult} = 300 \text{ kN/m}$ και μήκος 50 μέτρα και στο επάνω μέρος 3 οπλισμούς με $T_{ult} = 900 \text{ kN/m}$ και μήκος 40 μέτρα. Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι 1.401 και το κόστος 538800 € για επίχωμα μήκους 100 μέτρων ή αλλιώς 5388 € ανά τρέχον μέτρο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ :

- [1] Baecher, G. B., and Christian, J. T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering, John Wiley & Sons.
- [2] Barton, N. R., and Kjaernsli, B. (1981). "Shear Strength of Rockfill." Journal of the Geotechnical Engineering Division, 107(7), 873-891.
- [3] Blight, G. E. (2010). Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities, Taylor & Francis.
- [4] Daniel, D. E. (1993). Geotechnical Practice for Waste Disposal, Springer.
- [5] Elias, V., Christopher, B. R., and Berg, R. R. (2001). Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes – Design & construction guidelines (FHWA-NHI-00-043), US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C., USA.
- [6] Hustrulid, W. A., McCarter, M. K., and Van Zyl, D. J. A. (2001). Slope Stability in Surface Mining (Section 3: Stability of Waste Rock Embankments), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- [7] Koerner, R. M. (2012). Designing with Geosynthetics.
- [8] Orman, M., Peevers, R., and Sample, K. (2011). "Waste Piles and Dumps." SME Mining Engineering Handbook, 3rd ed., P. Darling, ed., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 667-680.
- [9] Rai, R., Khandelwal, M., and Jaiswal, A. (2012). "Application of geogrids in waste dump stability: a numerical modeling approach." Environmental Earth Sciences, 66(5), 1459-1465.
- [10] Spitz, K., and Trudinger, J. (2008). Mining and the environment: from ore to metal, CRC Press.
- [11] Williams, D. (2000). "Assessment of embankment parameters." Slope Stability in Surface Mining, W. A. Hustrulid, M. K. McCarter, and D. J. A. v. Z. Littleton, eds., SME.
- [12] Zavodni, Z., Trexler, B., and Pilz, J. (1981). "Waste Dump Foundation Investigations and Treatment." Workshop on Design of Non-Impounding Mine Waste Dumps, SME.
- [13] Zevgolis, I. E. (2018). "Geotechnical characterization of mining rock waste dumps in central Evia, Greece." Environmental Earth Sciences, 77(16), 566.
- [14] Ένωση Επιστημόνων της Εγνατία Οδός ΑΕ (2007). "Οδηγίες Σύνταξης Μελετών Οπλισμένων Επιχωμάτων." Θεσσαλονίκη.
- [15] Κωμοδρόμος, Α. (2019). Θεμελιώσεις - Αντιστηρίξεις, Κλειδάριθμος.

[16] Νάσκος, Ν. (2007). "Όπλισμένα επιχώματα - Στοιχεία σχεδιασμού, κατασκευής και ελέγχων ευστάθειας." Γεωτεχνικές εφαρμογές γεωσυνθετικών υλικών, 11 Ιανουαρίου 2007, ΤΕΕ, Αθήνα.