



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διαστασιολόγηση Επιχωμάτων Οπλισμένης Γης**

**Μαλισιόβα Φωτεινή**

**A.M.: 44367310226**

**Επιβλέπων:**

**Αστερίου Παύλος, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός**

Αιγάλεω, Ιούλιος 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: **ΜΑΛΙΣΙΟΒΑ ΦΩΤΕΙΝΗ**

Τίτλος  
Διπλωματικής Εργασίας:

**Σχεδιασμός επιχωμάτων οπλισμένης γης**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι  
Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

**Πάυλος Αστερίου**  
Επισκέπτης Καθηγητής  
Επιβλέπων

**Γεώργιος Μπελόκας**  
Επίκουρος Καθηγητής  
Μέλος

**Ελένη Καπόγιαννη**  
Επισκέπτης Καθηγητής  
Μέλος



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη *Μαλισιόβα Φωτεινή* του *Γαβριήλ*, με αριθμό μητρώου *44367310226* φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Η Δηλούσα

Μαλισιόβα Φωτεινή





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: **ΦΩΤΕΙΝΗ ΜΑΛΙΣΙΟΒΑ**

Τίτλος Διπλωματικής εργασίας:

**ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΓΗΣ**

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των επιχωμάτων οπλισμένης γης και ορισμένα παραδείγματα επιχωμάτων που κατασκευάστηκαν στην Ελλάδα. Γίνεται ανασκόπηση των μεθόδων διαστασιολόγησης επιχωμάτων οπλισμένης γης βάσει του αμερικανικού και βρετανικού κανονισμού και της μεθόδου των λωρίδων.

Στη συνέχεια, αναπτύσσεται υπολογιστικό φύλλο excel, το οποίο υπολογίζει τη συνολική απαιτούμενη δύναμη ενίσχυσης επιχωμάτων χονδρόκοκκου και λεπτόκοκκου υλικού με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας του βρετανικού κανονισμού, γνωστή ως τη μέθοδο δύο σφηνών.

Για την αξιολόγηση της μεθόδου έγιναν παραμετρικές αναλύσεις σε πρηνή ύψους  $H=10\text{m}$ ,  $15\text{m}$ ,  $20\text{m}$ , μεταβάλλοντας τις αναγκαίες στρώσεις ενίσχυσης με γεωπλέγματα διαφορετικής εφελκυστικής αντοχής  $80\text{kN/m}$  και  $110\text{kN/m}$  σε χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα υλικά.

Έπειτα, τα παραπάνω προσομοιώματα, αναλύονται με τη βοήθεια του προγράμματος slide και προκύπτουν οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η ευστάθεια κάθε ενός από τα παραπάνω επιχώματα, μετά την τοποθέτηση των ενισχύσεων που λαμβάνονται από τους αντίστοιχους υπολογισμούς του προγράμματος excel. Η ελάχιστη αποδεκτή τιμή του συντελεστή ασφαλείας βάσει του βρετανικού κανονισμού είναι  $FS \geq 1.3$ .

Καταλήγοντας, συγκρίνονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτουν τα ανάλογα συμπεράσματα και προτείνονται ορισμένες λύσεις αντιμετώπισης ενδεχόμενης αστοχίας πρηνών.

**Λέξεις κλειδιά:** επιχώματα οπλισμένης γης, μέθοδος δύο σφηνών, γεωπλέγματα



UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
ENGINEERING SCHOOL  
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT

*Student's Name:* FOTEINI MALISIOVA

*Title of Diploma Thesis:*

## DESIGN OF REINFORCED SOIL EMBANKMENTS

### *ABSTRACT*

In this diploma thesis, the basic principles of reinforced soil embankments are presented, as well as some examples of embankments built in Greece. The methods of dimensioning of reinforced soil embankments, based on the American and British regulations and the strips method.

Subsequently, an excel spreadsheet is developing, which calculates the total required reinforcement strength of embankments of coarse-grained and fine-grained material by the method of marginal equilibrium of the British regulation, known as the two-part wedge method.

For the evaluation of the method, parametric analyzes are made on slopes of height  $H=10\text{m}$ ,  $15\text{m}$  and  $20\text{m}$ , changing the necessary reinforcement layers with geogrids of different tensile strength  $80\text{ kN/m}$  and  $110\text{ kN/m}$  in coarse-grained and fine-grained materials.

Then, the above simulations are analyzed with the help of the Slide program and the corresponding safety factors are obtained, in order to determine the stability of each of the above embankments, after the placement of the reinforcements obtained from the respective calculations of the Excel program. The minimum acceptable value of the safety factor under the UK Regulation is  $FS \geq 1.3$ .

In conclusion, the results of the analyses carried out are compared and evaluated, the corresponding conclusions are drawn and some solutions are proposed to deal with possible slope failure.

**Keywords:** reinforced soil embankments, two-part wedge method, geogrids

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
Περιεχόμενα.....	6
Εισαγωγή.....	8
<b>1. Βασικές Αρχές στα Οπλισμένα Επιχώματα.....</b>	<b>10</b>
1.1. Ορισμός.....	10
1.2. Αρχή Λειτουργίας.....	10
1.3. Πεδίο Εφαρμογής.....	13
1.4. Κανονιστικό Πλαίσιο.....	13
1.5. Χρησιμοποιούμενα Υλικά.....	14
1.5.1.Εδαφικά Υλικά.....	14
1.5.2.Κατηγορίες οπλισμών.....	17
1.5.3.Επιφανειακή Επικάλυψη.....	20
1.6. Μέθοδος Κατασκευής.....	22
1.7. Παραδείγματα Εφαρμογής.....	24
<b>2. Αρχές Σχεδιασμού και Διαστασιολόγησης.....</b>	<b>34</b>
2.1. Αμερικανικός Κανονισμός.....	34
2.2. Βρετανικός Κανονισμός.....	50
2.3. Ευρωκώδικας.....	73
2.4. Συμβατικές Μέθοδοι Ευστάθειας Πρανών.....	74
2.5. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων.....	78
<b>3. Μέθοδος Δύο Σφηνών.....</b>	<b>84</b>
3.1. Ανάπτυξη Υπολογιστικού Φύλλου (Excel) για την Εφαρμογή της Μεθόδου δύο Σφηνών.....	84
3.2. Παραμετρικές Αναλύσεις Τυπικών Εφαρμογών.....	89
3.2.1. Χονδρόκοκκο Υλικό.....	90
3.2.2.Λεπτόκοκκο Υλικό.....	102
3.3. Σύγκριση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	115

<b>4. Συμβατικές Μέθοδοι Ευστάθειας Πρανών</b> .....	116
4.1. Υπολογιστικό Προσομοίωμα Ευστάθειας Πρανών Slide.....	116
4.2. Παραμετρικές Αναλύσεις Τυπικών Εφαρμογών με Θεώρηση Κυκλικής Επιφάνειας Ολίσθησης.....	125
4.2.1. Χονδρόκοκκο Υλικό.....	126
4.2.2. Λεπτόκοκκο Υλικό.....	134
4.3. Παραμετρικές Αναλύσεις Τυπικών Εφαρμογών με Θεώρηση Τεθλασμένης Επιφάνειας Ολίσθησης.....	142
4.3.1. Χονδρόκοκκο Υλικό.....	143
4.3.2. Λεπτόκοκκο Υλικό.....	148
4.4. Σύγκριση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	154
<b>5. Συγκριτική Αξιολόγηση – Συμπεράσματα</b> .....	155
5.1. Συγκριτική Αξιολόγηση.....	155
5.2. Συμπεράσματα.....	157
5.3. Προτάσεις.....	158
<b>Κατάλογος Πινάκων</b> .....	160
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	161



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της εργασίας είναι ο σχεδιασμός επιχωμάτων διαφορετικής σύστασης εδάφους και διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών με χρήση μεταλλικού οπλισμού. Διερευνάται η συμπεριφορά και ο κίνδυνος αστοχίας τους και επιλέγεται ο απαραίτητος αριθμός γεωπλεγμάτων για την ευστάθεια τους.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις βασικές αρχές των οπλισμένων επιχωμάτων με αναφορά στην αρχή λειτουργίας αυτών και στα χρησιμοποιούμενα εδαφικά υλικά και οπλισμούς βάσει ορισμένων κανονισμών. Αναλύονται οι μέθοδοι κατασκευής οπλισμένων επιχωμάτων και τέλος, παρουσιάζονται δύο παραδείγματα εφαρμογής στην Ελλάδα.

Έπειτα, στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αρχές σχεδιασμού και διαστασιολόγησης των επιχωμάτων οπλισμένης γης, όπως ορίζονται από τον αμερικανικό και βρετανικό κανονισμό και τον ευρωκώδικα. Ακόμη, αναλύεται η διαστασιολόγηση οπλισμένων επιχωμάτων με τη μέθοδο των λωρίδων και τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναπτύσσεται υπολογιστικό φύλλο excel όπου αναλύεται η μέθοδος δύο σφηνών του βρετανικού κανονισμού, όπως περιγράφεται στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Με τη βοήθεια του φύλλου excel υπολογίζεται η δύναμη οπλισμού που είναι απαραίτητη για την αποφυγή αστοχίας επιχωμάτων τριών διαφορετικών υψών και διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών για χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο γεωϋλικό. Ακόμη, υπολογίζονται οι απαιτούμενες στρώσεις ενίσχυσης για κάθε ένα από τα πρηνή, λαμβάνοντας υπόψη για τον υπολογισμό τους γεωπλέγματα εφελκυστικής αντοχής 80kN/m και 110kN/m. Συμπεραίνεται πως όσο το ύψος του πρηνούς αυξάνεται αυξάνει και ο αριθμός των αναγκαίων ενισχύσεων, ενώ οι αναλύσεις με γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m απαιτούν λιγότερο οπλισμό από τις αναλύσεις των 80kN/m. Τέλος, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως ο αριθμός των ενισχυτικών στρώσεων δεν εξαρτάται άμεσα από τη σύσταση του εδάφους (χονδρόκοκκο ή λεπτόκοκκο) αλλά, από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε επιχώματος.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 4 αναλύονται τα επιχώματα με τη βοήθεια του προγράμματος slide, αρχικά χωρίς την τοποθέτηση οπλισμού και στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τις ενισχυτικές στρώσεις που υπολογίζονται στο κεφάλαιο 3 βάσει του βρετανικού κανονισμού και της μεθόδου των δύο σφηνών. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτουν τα ανάλογα συμπεράσματα σχετικά με τις πιθανότητες που έχει κάποιο από τα επιχώματα να αστοχήσει ή όχι με ή χωρίς οπλισμό. Τα αποτελέσματα κρίνονται από το slide μέσω των συντελεστών ασφαλείας. Έτσι, εάν ο συντελεστής είναι μικρότερος της μονάδας το πρηνές κινδυνεύει από αστοχία και κρίνεται απαραίτητη η ενίσχυση. Σε διαφορετική περίπτωση,

δηλαδή εάν ο συντελεστής είναι μεγαλύτερος της μονάδας, και συγκεκριμένα μεγαλύτερος του 1.3 όπως προτείνει ο κανονισμός, τότε η ενίσχυση είναι περιττή.

Στα κεφάλαια 5 και 6 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων του τρίτου και τέταρτου κεφαλαίου, αξιολογείται η επάρκεια των γεωπλεγμάτων όσον αφορά την ευστάθεια των επιχωμάτων μέσω του συντελεστή ασφαλείας και τέλος, προτείνονται εναλλακτικές μέθοδοι για την ενίσχυση πρανών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΤΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΕΠΙΧΩΜΑΤΑ

#### 1.1 Ορισμός

Οπλισμένα επιχώματα ονομάζονται όλα τα επιχώματα με κλίση έως  $70^\circ$ , τα οποία περιλαμβάνουν οποιονδήποτε, αποδεκτού τύπου, οπλισμό, είτε στο σύνολο του ύψους τους, είτε τοπικά στη βάση ή στην στέψη τους. Το επίχωμα αποτελείται από κοκκώδη ή λεπτόκοκκα υλικά και οπλίζεται με διαδοχικές στρώσεις μεταλλικών ή συνθετικών πλεγμάτων, ταινιών ή φύλλων, τα οποία στερεώνονται μέσω σύνδεσης ή/και τριβής με επέκτασή τους σε κατάλληλο μήκος όπισθεν της ενεργού ζώνης μετακινήσεων αυτού. Τα πρανή του επιχώματος σχεδιάζονται με απότομες κλίσεις ή ακόμα και κατακόρυφα. Σε περιπτώσεις πρανών με πολύ απότομες κλίσεις (γενικά  $>35^\circ$ - $45^\circ$  ανάλογα και με τη φύση των υλικών του επιχώματος), το υλικό του επιχώματος μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων, συγκρατείται είτε με την αναδίπλωση του οπλισμού στο μέτωπο του πρανού και αγκύρωσή του στην υπερκείμενη στρώση, είτε με προκατασκευασμένα στοιχεία που συγκρατούνται στη θέση τους μέσω δευτερεύοντος οπλισμού αγκύρωσης μικρού μήκους, είτε με συρματοκιβώτια, τα οποία τοποθετούνται κλιμακωτά προς τα πίσω και συγκρατούνται στη θέση τους μέσω τριβής λόγω του ίδιου βάρους τους. Τα οπλισμένα επιχώματα αποτελούν μία σύγχρονη μέθοδο ενίσχυσης του πρανών με ευρεία εφαρμογή στο εξωτερικό αλλά και σε μεγάλα έργα στην Ελλάδα. Διακρίνονται:

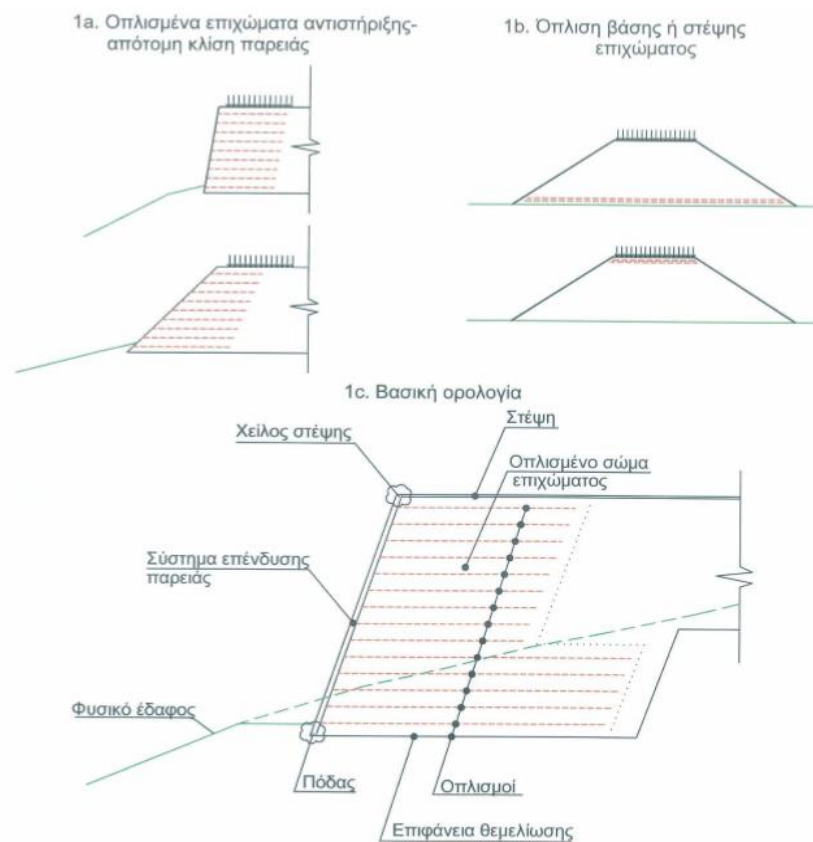
- α) σε οπλισμένα επιχώματα με απότομες έως και κατακόρυφες κλίσεις πρανών, τα οποία δεν ευσταθούν χωρίς όπλιση και ονομάζονται οπλισμένα επιχώματα αντιστήριξης ή τοίχοι οπλισμένης γης.
- β) τα επιχώματα ήπιας κλίσης πρανών με οπλισμό είτε στη θεμελίωσή τους, είτε στη στέψη τους, για λόγους π.χ. ενίσχυσης φέρουσας ικανότητας ή αντιμετώπισης καθιζήσεων και συνιζήσεων.

#### 1.2 Αρχή λειτουργίας

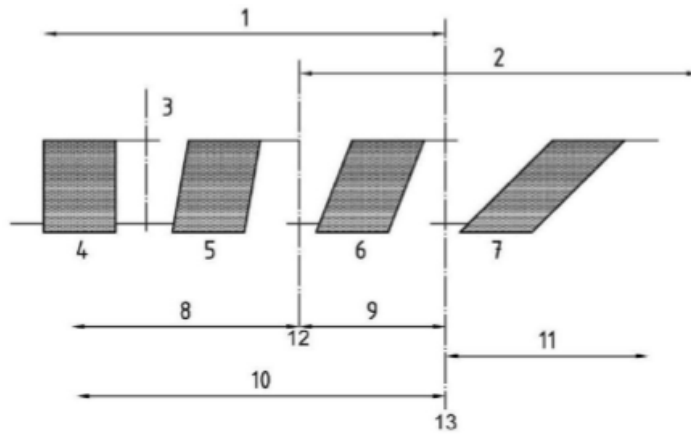
Εξαιτίας της τριβής μεταξύ των κόκκων, όταν αυτοί είναι υπό θλίψη, αναπτύσσεται η διατμητική αντοχή του εδάφους. Προκειμένου να αναπτυχθεί η διατμητική αντίσταση του εδάφους, όταν αυτό θλίβεται, οι κόκκοι αναμοχλεύονται κατά μήκος της διεύθυνσης των διατμητικών δυνάμεων, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται διατμητικές παραμορφώσεις. Με την τοποθέτηση μεταλλικού ή γεωσυνθετικού οπλισμού σε οριζόντιες στρώσεις στο εσωτερικό ενός πρανού, στη διεύθυνση των εφελκυστικών τάσεων, αναπτύσσεται τριβή μεταξύ των

κόκκων του εδάφους και του οπλισμού παραλαμβάνοντας έτσι θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η αστοχία καθώς, το έδαφος θα παραλάβει μικρότερες δυνάμεις ενώ, παράλληλα, αυξάνονται και οι δυνάμεις αντίστασης με την προσθήκη του οπλισμού.

Τυπικά παραδείγματα οπλισμένων επιχώματων φαίνονται παρακάτω στο σχήμα 1.1. Στο σχήμα 1.2 διακρίνονται τα οπλισμένα επιχώματα αντιστήριξης σε σχέση με τις κλίσεις των πρανών τους, όπως ορίζεται από το EN14475-2006. Τέλος, στο σχήμα 1.3 παρατίθεται σκαρίφημα οπλισμένου επιχώματος αντιστήριξης για την συνεισφορά της λειτουργίας του οπλισμού στο θέμα ευστάθειας. Χωρίς τον οπλισμό (αριστερό σχήμα), η ισορροπία είναι αποτέλεσμα των συνιστωσών του βάρους του πρίσματος και της κάθετης δύναμης που ασκείται από το έδαφος. Από τις δυο αυτές δυνάμεις, το βάρος του πρίσματος τείνει να προκαλέσει αστοχία ενώ, η κάθετη δύναμη να συγκρατήσει το πρίσμα στη θέση του. Για το λόγο αυτό τοποθετείται ο οπλισμός (δεξί σχήμα), η δύναμη του οποίου εισάγεται στις εξισώσεις ισορροπίας για να συμβάλλει με την κάθετη δύναμη, ώστε να μην αστοχήσει το πρίσμα. Έτσι, ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει από τη διαίρεση των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση προς τις δυνάμεις που συμβάλλουν στην ολίσθηση αυξάνεται όταν προστίθεται οπλισμός στο πρίσμα.



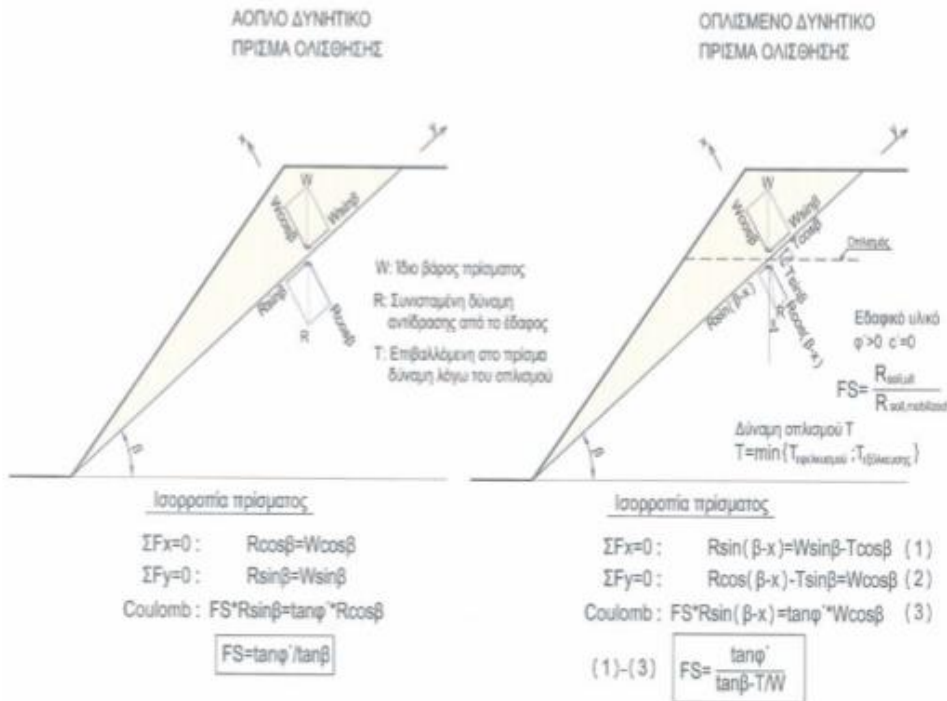
Σχήμα 1.1: Οπλισμένα επιχώματα - Βασικοί ορισμοί και ορολογία (πηγή: Νάσκος Α. Ν.)



**Υπόμνημα:**

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. Κατασκευές διατήρησης γης</li> <li>2. Οπλισμένα πρανή</li> <li>3. Κάθετος</li> <li>4. Κατακόρυφος τοίχος</li> <li>5. Κεκλιμένος τοίχος</li> <li>6. Κεκλιμένος τοίχος με απότομη κλίση</li> <li>7. Ήπιο πρανές</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>8. Μερικοί ειδικοί τύποι πρόσοψης: πάνελ, μπλοκ, 1/2 ελλειπτικές μονάδες χάλυβα, συρματοκιβώτια</li> <li>9. Ειδικοί τύποι κεκλιμένου πάνελ, π.χ. για αποθήκευση όγκου</li> <li>10. Μερικοί κοινοί τύποι πρόσοψης: καλλιεργήσιμες μονάδες, συρματοπλέγμα, τύλιγμα</li> <li>11. Χωρίς πρόσοψη, ίσως απαιτείται προστασία από διάβρωση</li> <li>12. Γραμμή γωνίας κλίσης πρόσοψης 4:1</li> <li>13. Γραμμή γωνίας κλίσης πρόσοψης 1:1</li> </ul> |
|--|---|

Σχήμα 1.2: Διάκριση - ορολογία οπλισμένων επιχωμάτων αντιστήριξης σε σχέση με την κλίση πρανούς (κατά EN 14475-2006) (πηγή: Νάσκος Α. Ν.)



Συμπέρασμα : Ο συντελεστής ασφαλείας FS αυξάνεται με την αύξηση της δύναμης του οπλισμού T

Σχήμα 1.3: Βασική αρχή λειτουργίας οπλισμού επιχωμάτων αντιστήριξης (πηγή: Νάσκος Α. Ν.)

### 1.3 Πεδίο Εφαρμογής

Τα οπλισμένα επιχώματα εφαρμόζονται για:

- βελτίωση ευστάθειας πρανών έναντι περιστροφικής ολίσθησης
- βελτίωση ευστάθειας πρανών έναντι επίπεδης ολίσθησης
- ενίσχυση σώματος πρανούς για μείωση συνίζησης
- ενίσχυση έδρασης πρανούς για μείωση καθιζήσεων και βελτίωση ευστάθειας

Πλεονεκτήματα οπλισμένων επιχωμάτων είναι τα εξής:

- χαμηλό κόστος κατασκευής
- δυνατότητα αποστράγγισης
- σχετικά εύκολη τοποθέτηση
- δυνατότητα παραλαβής παραμορφώσεων και καθιζήσεων, αφού πρόκειται για εύκαμπτη κατασκευή
- περιορίζεται η κατάληψη γης
- απαιτείται μικρότερη ποσότητα απαιτούμενων υλικών επίχωσης
- δυνατότητα χρήσης των επί τόπου υλικών
- πλήρης εναρμόνιση της κατασκευής με το περιβάλλον

### 1.4 Κανονιστικό πλαίσιο

Ο ισχύων ελληνικός κανονισμός για τα οπλισμένα επιχώματα είναι το πρότυπο EN 14475-2006 (Execution of special geotechnical works – Reinforced fill) όπως υιοθετήθηκε από τον ΕΛΟΤ. Άλλοι κανονισμοί και οδηγίες που αναφέρονται στη μέθοδο ανάλυσης και ελέγχου των οπλισμένων επιχωμάτων είναι:

- Η Γαλλική NF P94-220 (1998)
- Η Γαλλική NFG Γαλλική NFG 38064
- Ο Βρετανικός κανονισμός BS 8006:1995
- Οδηγίες της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Αυτοκινητοδρόμων των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής FHWA-NHI-00-043 (2001)

Ανάλογα με τη χρονική διάρκεια ωφέλιμης χρήσης του έργου και τις αστοχίες που συμβαίνουν προκύπτει η σπουδαιότητα αυτού (π.χ. ένα επίχωμα με χρονική διάρκεια ωφέλιμης χρήσης 50 έτη και μέτριες συνέπειες από αστοχία κατατάσσεται στη δεύτερη κατηγορία σπουδαιότητας). Έτσι, τα οπλισμένα επιχώματα διακρίνονται, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 7 και το EN 14475, στις εξής κατηγορίες

Πίνακας 1.1: Κατηγοριοποίηση σε σχέση με την διάρκεια ωφέλιμης χρήσης και την σπουδαιότητα

Διάρκεια ωφέλιμης χρήσης Κατηγορία	Κατηγορία Σπουδαιότητας		
	1 (περιορισμένες συνέπειες από αστοχία)	2 (μέτριες συνέπειες από αστοχία)	3 (σοβαρές συνέπειες από αστοχία)
0 (2 έτη) Κατά την κατασκευή			
1 (10 έτη) Προσωρινό έργο			
2 (25 έτη) Αντικαταστάσιμα μέλη κατασκευής			
3 (25 έτη) Αγροτικές και δευτερεύουσες κατασκευές			
4 (50 έτη) Συνήθη δομικά έργα			
5 (100 έτη) Υψηλών απαιτήσεων έργα			

## 1.5 Χρησιμοποιούμενα Υλικά

### 1.5.1 Εδαφικά Υλικά

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τα οπλισμένα επιχώματα είναι, γενικώς, τα υλικά εκείνα που θεωρούνται κατάλληλα και για τα άοπλα επιχώματα (δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται οργανικά, διογκούμενα ή υδατοδιαλυτά γεωυλικά). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις ελληνικές τεχνικές προδιαγραφές, προέρχονται από εκσκαφές, δανειοθαλάμους και λατομεία από τα οποία έχει αφαιρεθεί η φυτική γη και επιβλαβείς προσμίξεις που μπορούν να προκαλέσουν φθορές στον οπλισμό και, κατά συνέπεια, θα μειώσουν τη διάρκεια ζωής του έργου. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την κατασκευή οπλισμένου επιχώματος, αρχικά, θα εξετάζονται προϊόντα εκσκαφής ορυγμάτων και αν κριθούν ακατάλληλα ή ανεπαρκή θα πραγματοποιείται δανειοληψία για την κατασκευή του έργου. Δεν χρησιμοποιούνται υλικά από βάλτους ή υλικά με ποσοστό υγρασίας μεγαλύτερο από το μέγιστο επιτρεπόμενο, υλικά που φθείρονται ή αναφλέγονται καθώς, και υλικά που βρίσκονται σε παγωμένη κατάσταση. Το υλικό της επίχωσης πρέπει να συμβαδίζει με το πάχος των στρώσεων ως προς τη διαβάθμιση, να συμπυκνώνεται επαρκώς καθώς, δεν θα πρέπει να περιλαμβάνει κόκκους μεγαλύτερους των 250mm.

Σύμφωνα με τις ΠΕΤΕΠ 11-02-05-00:2006, τα εδαφικά υλικά επίχωσης πρέπει να πληρούν ορισμένα κριτήρια ώστε να γίνουν αποδεκτά για την κατασκευή του έργου. Τα κριτήρια αυτά σχετίζονται με:

- την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού (κοκκώδη υλικά, καλά διαβαθμισμένα)

- προέλευση (το υλικό θα υπόκειται σε δοκιμές ποιοτικού ελέγχου και δεν πρέπει να προέρχεται από εύθρυπτα υλικά εκτός κι αν αυτό αντιμετωπίζεται με κατάλληλη διάστρωση, ύγρανση και συμπίκνωση, κατάλληλα αργιλικά υλικά)
- χημικές/ηλεκτροχημικές ιδιότητες (για αποφυγή δυσμενών επιδράσεων θα πρέπει οι ιδιότητες του υλικού να ταιριάζουν με τις ιδιότητες του οπλισμού και της επιφανειακής επικάλυψης του επιχώματος)
- υγρασία (θα πρέπει να ελέγχεται η συμβατότητα του υλικού επίχωσης με το φυσικό έδαφος, σε περιπτώσεις υπόγειας ροής νερού).

Επιπλέον, κατά τη μελέτη, πρέπει να εξετάζονται το φαινόμενο βάρος του υλικού  $\gamma_k$ , τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής  $\varphi'_k$  και οι συνθήκες διάστρωσης - συμπίκνωσης (πάχος στρώσης, υγρασία και πυκνότητα συμπίκνωσης).

Στους πίνακες που ακολουθούν διακρίνονται τα κριτήρια αποδοχής εδαφικού υλικού σύμφωνα με τον ελβετικό κανονισμό SN 670 010 καθώς και οι ηλεκτροχημικές ιδιότητες των υλικών επίχωσης σε συνδυασμό με τους διάφορους τύπους μεταλλικού και χαλύβδινου οπλισμού σύμφωνα με το Βρετανικό πρότυπο BS 8006:1995 και το πρότυπο EN14475-2006 αντίστοιχα.

Πίνακας 1.2: Κριτήρια αποδοχής εδαφικών υλικών επίχωσης βάσει των Ελβετικών κανονισμών SN 670 010

Τύπος Κατασκευής Τύπος επένδυσης	Συμπίεση- Συνθήκες		Τύποι εδάφους Ταξινόμηση σύμφωνα με SN 670 010 (1998) Ελάχιστη γωνία λόγω συνολικής αντοχής σε διάτμηση $\varphi^*$			
			GW, GP, GM, SW	GC, GM-ML, GM-GC, SP	GC-CL, SC, SM-ML	CL, ML
	Δείκτης Επένδυσης	Δείκτης Εδάφους Θεμελίωσης	$\varphi^* \geq 35^\circ$	$\varphi^* \geq 32,5^\circ$	$\varphi^* \geq 30^\circ$	$\varphi^* \geq 27,5^\circ$
Υποστήριξη κατασκευής: Άκαμπτη επένδυση Γωνία $80^\circ - 90^\circ$ Θεμελίωση Κυκλοφορία	>60 >50	>45 >40	+++ +++	+ ++	o o	o o
Εύκαμπτη επένδυση Γωνία $75^\circ - 85^\circ$ Θεμελίωση Κυκλοφορία	>50 >40	>40 >30	+++ +++	++ +++	o +	o o
Απότομες κλίσεις $65^\circ - 75^\circ$ Άκαμπτη επένδυση H $\geq$ 3m, με κυκλοφορία H<3m, με κυκλοφορία	>40 >30	>30 >26	+++ +++	+++ +++	+ ++	o o
Εύκαμπτη επένδυση H $\geq$ 3m, χωρίς κυκλοφορία H<3m, χωρίς κυκλοφορία	>25 >20	>20 >15	+++ +++	+++ +++	++ ++	o +
Απότομες κλίσεις $55^\circ - 65^\circ$ Εύκαμπτη επένδυση H $\geq$ 3m, με κυκλοφορία H<3m, με κυκλοφορία H $\geq$ 3m, χωρίς κυκλοφορία H<3m, χωρίς κυκλοφορία	>20 >20 >15 >10	>15 >15 >12 >8	+++ +++ +++ +++	+++ +++ +++ +++	++ ++ +++ +++	+ + ++ ++
Απότομες κλίσεις $45^\circ - 65^\circ$ Άκαμπτη επένδυση H $\geq$ 3m, με κυκλοφορία H<3m, με κυκλοφορία H $\geq$ 3m, χωρίς κυκλοφορία H<3m, χωρίς κυκλοφορία	>20 >15 >15 >10	>15 >12 >12 >8	+++ +++ +++ +++	+++ +++ +++ +++	++ ++ +++ +++	+ + ++ ++



Όπου η καταλληλότητα των υλικών είναι: +++ : καλό έως πολύ καλό + : οριακά κατάλληλο  
 ++ : κατάλληλο ○ : ακατάλληλο

Πίνακας 1.3: Ηλεκτροχημικές ιδιότητες γεωϋλικών επίχωσης (περίπτωση χαλύβδινων οπλισμών κατά EN14475-2006)

STEEL REINFORCEMENTS				Strips,				Welded meshes, ladders, rods		Woven wire meshes	
Criteria based on corrosivity				Non-coated "black" steel	Continuously hot-dip galvanised (35 µm)	Hot dip galvanised (70 µm)	Zinc/Aluminium coated (Zn65Al15, thermal spray coated 70 µm)	Non coated black steel	Hot dip galvanised (70µm)	Zinc/Aluminium coated (Zn65Al15, hot dip coated 35µm)	Zinc/Aluminium coated (Zn65Al15, hot dip coated 35µm) + polymer coated (PVC/U or PE, 0.5 mm)
Notes											
Commonly used sizes				3 to 6 mm	3 mm thick	4 to 6 mm thick		bars Ø8 mm to 12 mm		Wire φ 2 mm to 3 mm	
Usual field of application – Class of structure (related to design life)				(1) Class 3 or 4	Class 4	Class 4 or 5	Class 4 or 5	Class 4	Class 4 or 5	Class 1	Class 4 for steep slopes up to 70°
Electro-chemical characteristics compatible with routine design				(2)							
ENVIRONMENT	Land based, out of water	pH	(3)	5 to 10	5 to 10	5 to 10	A (9)	5 to 10	5 to 10	5 to 10	3 to 10
		Resistivity Ω cm	(4)	> 1 000	> 1 000	> 1 000		> 1 000	> 1 000	> 1 000	B (7)
		Chlorides Cl ppm	(5)	< 200	< 200	< 200		< 200	< 200	< 200	
		Sulfates SO <sub>4</sub> ppm	(6)	< 1 000	< 1 000	< 1 000		< 1 000	< 1 000	< 1 000	
	In fresh water (8)	pH	(3)	5 to 10	5 to 10	5 to 10	A (9)	5 to 10	5 to 10	5 to 10	3 to 10
		Resistivity Ω cm	(4)	> 3 000	> 3 000	> 3 000		> 3 000	> 3 000	> 3 000	B (7)
		Chlorides Cl ppm	(5)	< 100	< 100	< 100		< 100	< 100	< 100	
		Sulfates SO <sub>4</sub> ppm	(6)	< 500	< 500	< 500		< 500	< 500	< 500	
Non-routine, unusual design											
ENVIRONMENT	Marine environment, or fill of marine origin			Specific study required. Thicker strips or larger bars generally needed			pH 5 to 10 No other requirement	Specific study required. Larger bars generally needed	C	Specific study required	
	Industrial waste fills, & environments of high aggressivity			Specific study required				Specific study required		Specific study required	

Key :  Material normally used  Test relevant  Material not normally applicable

Πίνακας 1.4: Ηλεκτροχημικές ιδιότητες των υλικών επίχωσης σε συνδυασμό με τους διάφορους τύπους μεταλλικού οπλισμού σύμφωνα με το Βρετανικό πρότυπο BS 8006:1995

Electrochemical properties of fill used with plain steel, galvanized steel and stainless steel materials											
Reinforcing element material	Location	Properties of fill									
		Tests required for all fills						Additional test required in some cases			
		pH <sup>(2)</sup>		Maximum chloride content <sup>(3)</sup>	Maximum soluble sulfate content <sup>(4)</sup>	Minimum resistivity (saturated) <sup>(5)</sup>	Maximum organic content <sup>(6)</sup>	Minimum redox potential <sup>(7)</sup>	Maximum microbial activity Index <sup>(7)</sup>	Minimum resistivity (in situ) <sup>(8)</sup>	Maximum sulfide content <sup>(9)</sup>
Min.	Max.	%	%	ohm·cm	%	volts		ohm·cm	%		
Galvanized or ungalvanized steel	OUT	5	10	0.02	0.10	1000	0.2	0.4	5	5000	0.03
Stainless steel		5	10	0.025	0.10	1000	0.2	0.35	5	3000	0.03
Galvanized or ungalvanized steel	IN	5	10	0.01	0.05	3000	0.2	0.4	5	5000	0.01
Stainless steel		5	10	0.01	0.05	3000	0.2	0.35	5	3000	0.01

<sup>(1)</sup> In water refers to permanently or regularly submerged.  
<sup>(2)</sup> The measurement of pH (test 9 in BS 1377 : Part 3 : 1990) should be carried out in all cases.  
<sup>(3)</sup> The measurement of chloride content (test 7.2 in BS 1377 : Part 3 : 1990) should be carried out in all cases.  
<sup>(4)</sup> The measurement of water soluble sulfate SO<sub>4</sub> (test 5 in BS 1377 : Part 3 : 1990) should be carried out in all cases.  
<sup>(5)</sup> The measurement of resistivity of a saturated sample (test 10.4 in BS 1377 : Part 3 : 1990) should be carried out in all cases.  
<sup>(6)</sup> The measurement of organic content (test 3 in BS 1377 : Part 3 : 1990) should be carried out for clayey soils where more than 15 % passes a 63 micron sieve.  
<sup>(7)</sup> For clayey soils with an organic content in excess of the specified level then the measurement of redox potential (test 10 in BS 1377 : Part 9 : 1990) or microbial activity index (see annex B) should be carried out.  
<sup>(8)</sup> The measurement of resistivity of a saturated sample of fill provides an indication of the soil corrosion characteristics and is carried out in all cases. However for comparative purposes the designer may require, in some cases, the in situ measurement of apparent resistivity (test 9 in BS 1377 : Part 9 : 1990).  
<sup>(9)</sup> The measurement of sulfide content should be carried out if the origin of the fill raises the possibility of its presence. The measurement should be carried out by a competent laboratory using a method such as that given in the *Encyclopedia of Industrial Chemical Analysis* by Snell and Hilton (Wiley Interscience Publishing, London 1974).

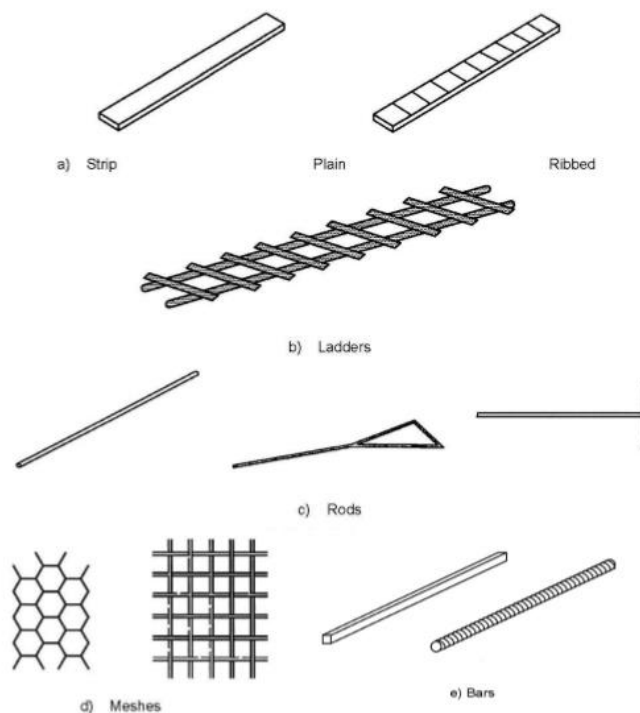
Συγκρίνοντας τους πίνακες 1.3 και 1.4 (ηλεκτροχημικές ιδιότητες υλικών επίχωσης σε σχέση με το χαλύβδινο οπλισμό κατά τα ευρωπαϊκά πρότυπα και το βρετανικό κανονισμό αντίστοιχα), καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως οι δύο πίνακες συμφωνούν όσον αφορά το pH του χάλυβα σε συνθήκες υγρασίας ή μη, με ελάχιστη τιμή 5 και τη μέγιστη 10. Επιτρέπουν την ίδια μέγιστη περιεκτικότητα σε χλώριο, όπου σε συνθήκες υγρασίας είναι 0.01% και χωρίς υγρασία είναι 0.02%. Ακόμη, η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή θεικών είναι η ίδια και για τους δύο κανονισμούς με 0.10% χωρίς υγρασία και 0.05% με υγρασία. Τέλος, και οι δύο κανονισμοί επιτρέπουν ελάχιστη αντίσταση σε συνθήκες υγρασίας 3000 Ω·cm και για συνθήκες χωρίς υγρασία 1000 Ω·cm.

### 1.5.2 Κατηγορίες οπλισμών

Υπάρχουν δύο είδη οπλισμών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οπλισμένων επιχωμάτων και είναι οι εξής:

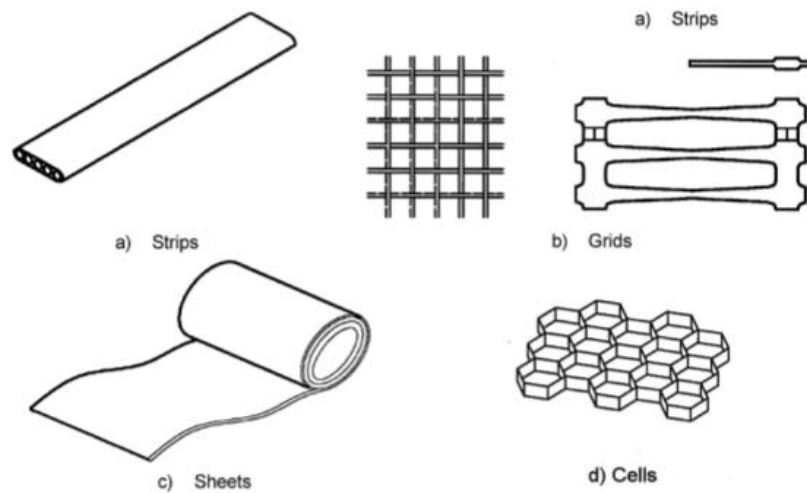
- I. Οι χαλύβδινοι οπλισμοί. Σε αυτή την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται λωρίδες, ράβδοι και πλέγματα, τα οποία είναι γαλβανισμένα ανάλογα με τον τύπο τους και τη διάρκεια χρήσης του έργου. Τα συρματοπλέγματα όπλισης, θα πρέπει να είναι γαλβανισμένα με κράμα Zn95Al5 και με επικάλυψη PVC. Αποφεύγεται η χρήση ανοξειδωτού χάλυβα και κράματος αλουμινίου. Είναι απαραίτητο να δίνεται αντοχή σε εφελκυσμό έναντι θραύσης του χάλυβα, που διαθέτουν οι χαλύβδινοι οπλισμοί, καθώς και διάφοροι παράμετροι για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής του οπλισμού σε εξόλκευση, έχοντας δεδομένη τη γωνία τριβής του υλικού επίχωσης. Προδιαγραφές που αφορούν

τους χαλύβδινους οπλισμούς (κατά EN 14475-2006) : EN 10025, EN 10080, EN 10218, EN 10223, EN ISO 1461, EN 10326, EN 10244.



Εικόνα 1.1: Χαλύβδινοι οπλισμοί (κατά EN 14475-2006) (πηγή: Νάσκος Α. Ν.)

- II. Οι πολυμερικοί οπλισμοί. Σε αυτή την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται πολυμερικές λωρίδες, πολυμερικά γεωπλέγματα ή φύλλα, που συνήθως, είναι πολυεστερικής ή πολυαιθυλενικής σύστασης. Σε ερευνητικό επίπεδο έχουν χρησιμοποιηθεί οπλισμοί από ίνες (fiber, carbon) σε προσωρινές κατασκευές. Είναι απαραίτητο να δίνεται η αντοχή σε εφελκυσμό για δεδομένες συνθήκες τοποθέτησης, περιβάλλοντος και θερμοκρασίας όπως, επίσης και το όριο αντοχής σε ερπυσμό που αντιστοιχεί σε ταχείες και αργές φορτίσεις. Ακόμη, πρέπει να δίνονται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για διάφορες τιμές φορτίου εφελκυσμού, καθώς και διάφοροι παράμετροι για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής του οπλισμού σε εξόλκευση, έχοντας δεδομένη τη γωνία τριβής του υλικού επίχωσης. Προδιαγραφές που αφορούν τους πολυμερικούς οπλισμούς (κατά EN 14475-2006): EN 13251, EN ISO 13431, ENV ISO 10722, EN ISO 12957, EN 12224, EN 12225.



Εικόνα 1.2: Πολυμερικοί οπλισμοί (κατά EN 14475-2006) (πηγή: Νάσκος Α. Ν.)

Σύμφωνα με τις γαλλικές οδηγίες, με τον έλεγχο ευστάθειας θα υπολογιστεί το κατάλληλο μήκος οπλισμού που απαιτείται για την κατασκευή, με το ελάχιστο μήκος να είναι  $L \geq 0,4H_m$  στον πόδα ή μέσο  $L \geq 0,4H_m$  για κατακόρυφη παρειά ( $H_m$ =το στατικό ύψος του επιχώματος). Κατά το σχεδιασμό θα πρέπει δημιουργείται κατά το δυνατόν ένα γεωμετρικώς κανονικό οπλισμένο πρίσμα. Μεταξύ δύο διαδοχικών οπλισμών, η διαφορά του μήκους δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο του  $\Delta L=0,15H_m$ . Εάν η θεμελίωση ή το άοπλο τμήμα το επιτρέπει μπορεί να εφαρμοσθεί μικρό μήκος οπλισμού. Τέλος, συνίσταται δύο διαδοχικοί οπλισμοί να μην απέχουν μεταξύ τους απόσταση καθ' ύψος μεγαλύτερη των 0,80m, αλλά ούτε και μικρότερη των 0,20m ώστε, το επίχωμα να διατηρεί ομογενή συμπεριφορά.

Σύμφωνα με τις ΠΕΤΕΠ 11-02-05-00:2006, οι οπλισμοί πρέπει να πληρούν ορισμένα κριτήρια ώστε να γίνουν αποδεκτά για την κατασκευή του έργου. Τα κριτήρια αυτά σχετίζονται με την αντοχή, παραμορφωσιμότητα, μακροχρόνια ερπυστική συμπεριφορά, καθώς και με την διαβρωσιμότητα και ανθεκτικότητα. Υπάρχει δυνατότητα καθορισμού των απαιτήσεων αντιδιαβρωσιμότητας των μεταλλικών οπλισμών εντός του εδάφους εξαιτίας της συχνής χρήσης χάλυβα για κατασκευές πασσάλων και αγωγών, ενώ, είναι άγνωστη η ερπυστική συμπεριφορά των πολυμερικών οπλισμών. Είναι απαραίτητος ο έλεγχος των στοιχείων του οπλισμού μέσα από τα πιστοποιητικά έγκρισης, τα οποία παρέχονται από την εταιρεία και περιγράφουν όλες τους ποιοτικούς ελέγχους. Είναι απαραίτητη η προστασία των οπλισμών από την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες κατά τους θερινούς μήνες, από υπεριώδη ακτινοβολία, βιολογική ή χημική δράση και η αποθήκευσή τους σε κλειστούς στεγασμένους χώρους. Για τους παραπάνω λόγους, η τοποθέτησή τους και η κάλυψή τους από το εδαφικό υλικό στην κατασκευή πρέπει να γίνεται σε μικρό χρονικό διάστημα.

Πίνακας 1.5: Παραδείγματα τύπων χάλυβα μεταλλικών στοιχείων σύμφωνα με το βρετανικό πρότυπο BS 8006:1995

Minimum properties of some different types of steel reinforcement				
Type of steel reinforcement	Maximum thickness to which stresses apply mm	Tensile strength $\sigma_t$ N/mm <sup>2</sup>	Shear strength $\sigma_s$ N/mm <sup>2</sup>	Bearing strength $\sigma_{bc}$ N/mm <sup>2</sup>
Carbon steel to BS EN 10025 : 1993 S 235 JR	16	340	205	340
Carbon steel to BS EN 10025 : 1993 S 355 JR	16	490	295	490
Stainless steel to BS 1449 : Part 2 : 1983 316S31, 316S33	10	510	305	510
Stainless steel to BS 1449 : Part 2 : 1983 316S31 CR temper rolled to a minimum 0.2 % proof stress of 310 N/mm <sup>2</sup>	6	650	390	650
Carbon steel rod to BS 4449 : 1988	40 diameter	485	290	485

### 1.5.3 Επιφανειακή επικάλυψη

Χρησιμοποιείται για λόγους εξωτερικής αγκύρωσης και προστασίας του οπλισμού και του επιχώματος από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. διάβρωση), αλλά και για λόγους αισθητικής. Το είδος της επικάλυψης εξαρτάται κάθε φορά από τα χαρακτηριστικά του έργου (κλίση, χρήση κλπ.) και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (θερμοκρασία κλπ.). Διακρίνονται τρεις κατηγορίες επενδύσεων:

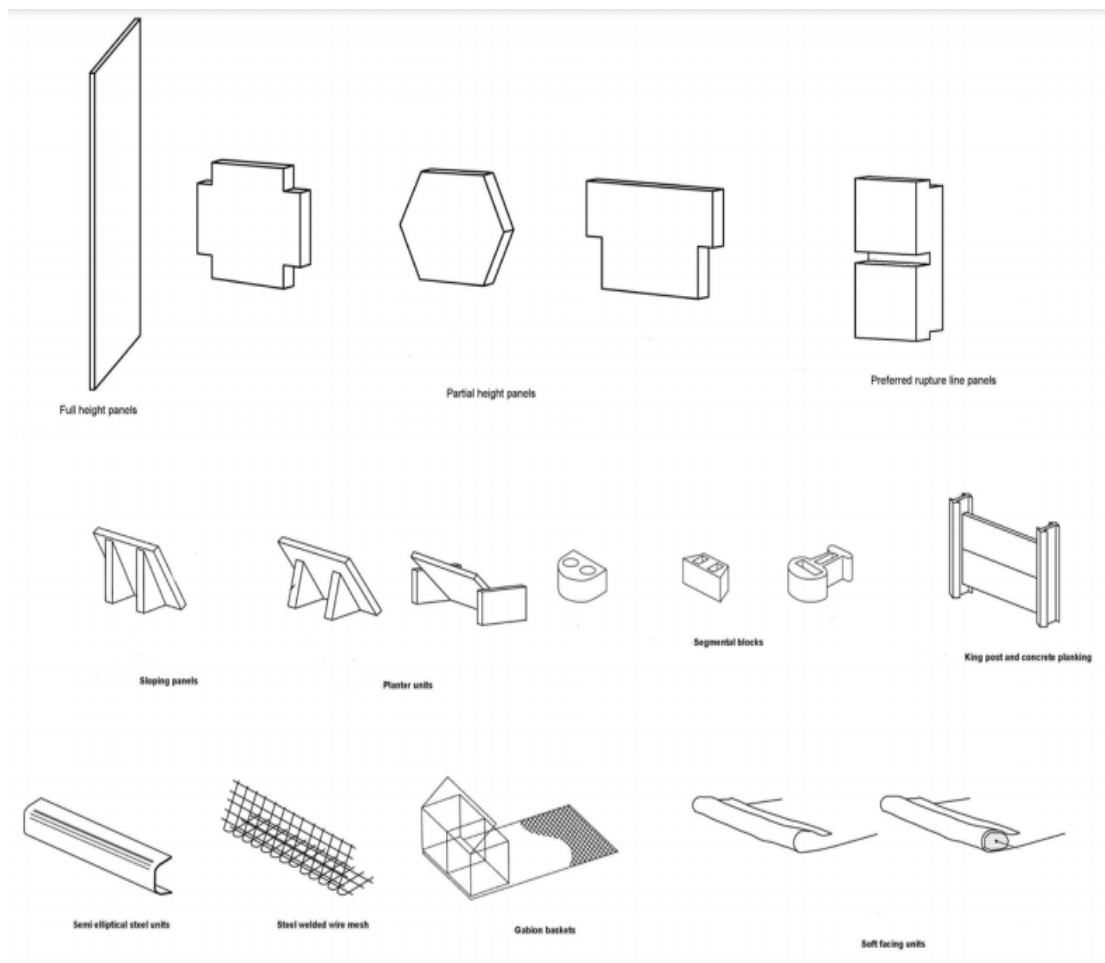
- 1) εύκαμπτες επενδύσεις με αναδιπλώσεις γεωπλεγμάτων
- 2) ημιεύκαμπτες επενδύσεις από συνθετικά υλικά (πολυμερή), συρματοπλέγματα ή συρματοκιβώτια, χαλύβδινα πλέγματα και ελάσματα
- 3) δύσκαμπτες επενδύσεις από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλάκες σκυροδέματος, μεταλλικά φύλλα και πλέγματα, ξύλο.

Σύμφωνα με τις ΠΕΤΕΠ 11-02-05-00:2006, η επιφανειακή επικάλυψη πρέπει να πληροί ορισμένα κριτήρια ώστε να γίνει αποδεκτή για την κατασκευή του έργου. Θα πρέπει να έχει την κατάλληλη αντοχή και ευκαμψία ώστε, πρώτον, να μπορεί να αναλάβει τις αναμενόμενες καθιζήσεις χωρίς την εμφάνιση αστοχίας στον οπλισμό και δεύτερον, να επιτρέπει τις απαιτούμενες οριζόντιες και κατακόρυφες αποκλίσεις.

Πίνακας 1.6: Απαιτήσεις των συστημάτων επένδυσης (κατά EN 14475-2006)

REQUIREMENTS	FACING SYSTEMS					
	Concrete panel	Segmental block wall	Welded steel mesh facing	Woven steel mesh facing and gabions	Semi elliptical steel facing	Wrap around facing
Concrete quality	EN 206	EN 771-3				
Steel reinforcement (in panel)	EN 10080/ EN 1992-1-1					
Dimension tolerances	a	a				
Compressive strength at installation	a	a				
Surface quality	a	a				a
Steel quality			EN 10079/ EN 10080	EN 10218-1&2 EN 10223-3	EN 10025-2	a
Galvanizing quality			EN ISO 1461	EN 10244-1&2	EN ISO 1461	
Organic coating quality				EN 10245-1,2&3		

a: Requirements are needed but no relevant standard is available



Εικόνα 1.3: Παραδείγματα στοιχείων επένδυσης πρανών οπλισμένων επιχωμάτων (κατά EN 14475-2006) (πηγή: Νάσκος Α. Ν.)

## 1.6 Μέθοδος κατασκευής

Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-02-07-04-00:2009, αφού πραγματοποιηθεί η μελέτη ευστάθειας πρανών, χρησιμοποιείται ξυλότυπος για την υλοποίηση της κλίσης του επιχώματος, το οποίο θα κατασκευασθεί σταδιακά ξεκινώντας από τη χαμηλότερη και καταλήγοντας στην υψηλότερη στρώση όπου θα τοποθετηθεί οριζόντια ο οπλισμός. Είναι πιθανό, το πάχος της κάθε στρώσης να διαφοροποιηθεί και να αυξηθεί από την ειδική μελέτη εάν απαιτείται από την οικονομοτεχνική ανάλυση. Γενικά, τα βήματα που ακολουθούνται για την κατασκευή ενός οπλισμένου επιχώματος είναι τα εξής:

- 1) Αφαιρείται στρώμα φυτικής γης με πάχος που προκύπτει από τη μελέτη (περίπου 0,30-0,50m). Εάν δεν υπάρχουν προβλήματα με όμβρια ύδατα προτείνεται η διεξαγωγή μιας επιπλέον εκσκαφής ώστε να αφαιρεθούν ακατάλληλα εδάφη. Η εκσκαφή αυτή θα είναι βάθους περίπου 0,80-1,00m ώστε να αποφευχθεί η επέκτασή της σε τυχόν στάθμη υπόγειου ύδατος. Εάν τα σκάμματα περιέχουν λιμνάζοντα ύδατα, τα οποία δεν δύναται να αποστραγγιστούν ή το έδαφος είναι χαλαρό λόγω αναβλύζοντος ύδατος, τότε είναι ανέφικτος ο καθαρισμός και η διάστρωση του γεωπλέγματος. Για το λόγο αυτό προτείνεται η τοποθέτηση κροκάλας ή σκύρων στη βάση με μέγεθος κόκκων 5-8cm (με μέγιστο 15cm) που θα διαστρωθεί με ελαστικοφόρο ή ερπυστριοφόρο για να διεισδύσει πλήρως στο μαλακό υπέδαφος. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν είναι δυνατή η συμπύκνωση της σκάφης. Τέλος, η βάση του επιχώματος θα κατασκευαστεί επί του γεωπλέγματος σύμφωνα με τη μελέτη.
- 2) Ακολουθεί η διάστρωση των γεωπλεγμάτων, χειρωνακτικά ή με άλλο τρόπο της έγκρισης της Υπερησίας και επί αυτού η διάστρωση του γεωϋλικού με ελαστικοφόρα μηχανήματα. Οι στρώσεις του γεωϋλικού θα είναι από 25 έως 65cm (εξαρτάται από τη μελέτη και τα διαθέσιμα μέσα). Στην ακραία ζώνη επίχωσης οι στρώσεις θα έχουν πάχος 20-25cm.
- 3) Μετά τη διάστρωση έπεται η δονητική συμπύκνωση, με την οποία επιτυγχάνεται βαθμός συμπύκνωσης υψηλότερος από 95% της βέλτιστης εργαστηριακής πυκνότητας του υλικού κατά Ε 106-86/2. Στην ακραία ζώνη επίχωσης εφαρμόζεται ελαφρά δόνηση (ελαφριές ή βαριές δονητικές πλάκες), ώστε να επιτευχθεί ο ίδιος βαθμός συμπύκνωσης με την υπόλοιπη κατασκευή (>95%). Η διάστρωση και η συμπύκνωση γίνονται βάσει του ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-02-07-01-00 και ΕΛΟΤ 1501-02-07-02-00
- 4) Ύστερα διαμορφώνεται η εξωτερική παρειά με τη βοήθεια ξυλοτύπων ή με ειδικά εξαρτήματα από ανοξείδωτο χάλυβα (αγκυρώσεις, μεταλλικά πλέγματα, τένοντες κλπ.). Ο τρόπος που θα υιοθετηθεί εξαρτάται από τη μελέτη.

- 5) Τοποθετούνται, εξωτερικά του επιχώματος, γεωκυψέλες, οι οποίες αποτελούνται από λωρίδες πολυαιθυλενίου με πάχος 1,0-1,4mm, που θα είναι συγκολλημένες μεταξύ τους σχηματίζοντας τετραγωνικές ή εξαγωνικές κυψέλες. Κάθε φύλλο θα έχει πλάτος 2,5m και μήκος 6,0m. Τα φύλλα των κυψελών θα συρράπτονται μεταξύ τους και θα σταθεροποιούνται με σιδηροπασσάλους μορφής J από χάλυβα Φ12 ή Φ14. Οι γεωκυψέλες θα πληρωθούν με φυτική γη όπου θα γίνει σπορά με κατάλληλο μίγμα σπόρων.

Το γεωυλικό θα πρέπει να είναι αμμοχαλικώδες (όπως περιγράφεται στην παράγραφο 1.4.1) ενώ, η βάση του επιχώματος όπως, και η άνω στρώση θα πρέπει να είναι με υλικό κατηγορίας τουλάχιστον E3, όπως ορίζει ο ΥΠΕΧΩΔΕ.

Υστερα, ακολουθούν τα κριτήρια αποδοχής των παραπάνω εργασιών:

- Έλεγχος και παραλαβή. Σύμφωνα με τα υψόμετρα μελέτης, η ανώτατη στάθμη του επιχώματος δεν μπορεί να παρουσιάζει απόκλιση μεγαλύτερη από  $\pm 30\text{m}$ . Στην άνω διατομή θα χωροσταθούν τα χαρακτηριστικά και ενδιάμεσα σημεία για να μην προκύπτει οριζόντια απόσταση μεγαλύτερη των 5,0m. Πρέπει, οι μέγιστες αποστάσεις μεταξύ των διατομών κατά μήκος του επιχώματος να είναι ανά 5,0m, ενώ, σε περιπτώσεις όπου τροποποιήθηκε το ύψος του επιχώματος πρέπει να διατυπώνονται και οι διατομές αλλαγής.
- Δοκιμές. Στον πίνακα 7 αναγράφονται οι δοκιμές που είναι απαραίτητο να γίνουν για τα εδαφικά υλικά βάσει των αντίστοιχων προτύπων. Κατά τη διάρκεια των εργασιών θα εκτελούνται ποιοτικοί έλεγχοι στα υλικά και την κατασκευή.

*Πίνακας 1.7: Είδος και αντίστοιχη μέθοδος εκτέλεσης δοκιμών ποιοτικού ελέγχου*

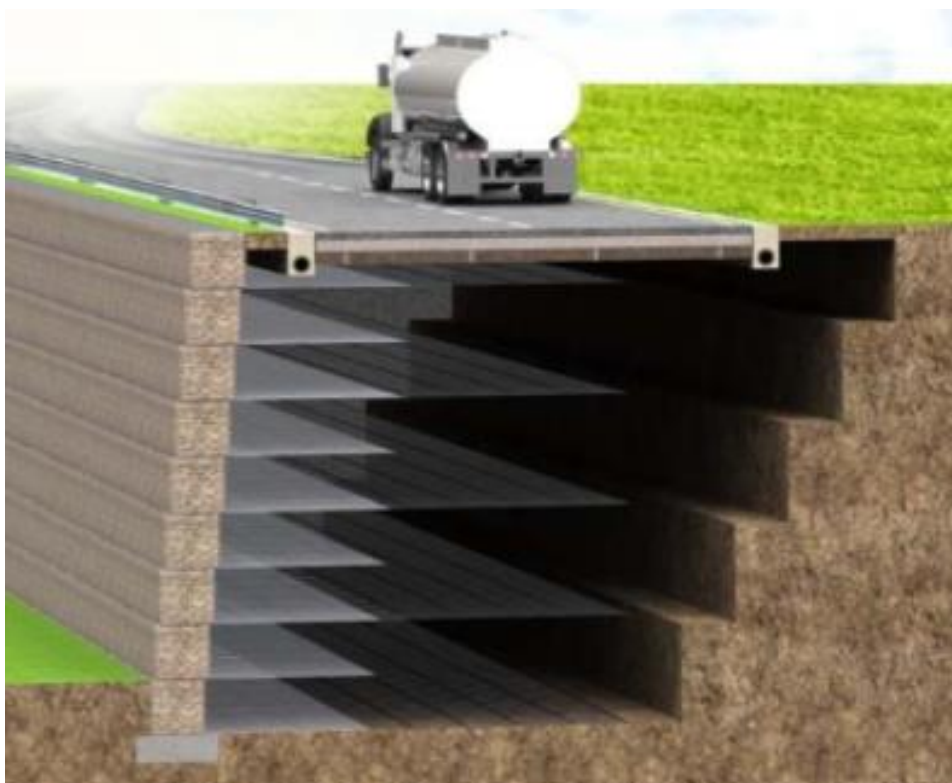
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΔΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	
ΔΟΚΙΜΗ	ΠΡΟΤΥΠΟ
Δειγματοληψία αργών υλικών	Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 932-1
Αναγνώριση και Δειγματοληψία εδαφών	Πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 14688-2
Προπαρασκευη διατεταγμένων δειγμάτων εδαφών	Πρότυπα ΕΛΟΤ EN ISO 22475-1 και ΕΛΟΤ EN 13286.51
Κοκκομετρική ανάλυση	Πρότυπα ΕΛΟΤ EN 933.01-933.08
Όριο υδαρότητας	Προδιαγραφή ΥΠΕΧΩΔΕ Ε 105-86/5
Όριο πλαστικότητας	Προδιαγραφή ΥΠΕΧΩΔΕ Ε 105-86/6
Δείκτης πλαστικότητας	Προδιαγραφή ΥΠΕΧΩΔΕ Ε 105-86/6
Κατάταξη εδαφών	Πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 14688-2
Σχέση υγρασίας-πυκνότητας	Πρότυπα ΕΛΟΤ EN 13286.02 και ΕΛΟΤ EN 13286.04
Έλεγχος συμπύκνωσης	Προδιαγραφή ΥΠΕΧΩΔΕ Ε 106-86/2
Δοκιμή CBR	Προδιαγραφή ΥΠΕΧΩΔΕ Ε 105-86/12 και Πρότυπα AASHTO T193-ASTM 1883
Δοκιμαστική φόρτιση (Μέθοδος Φορτιζόμενης Πλάκας)	Πρότυπο prEN-ISO 22476-13



## 1.7 Παραδείγματα εφαρμογής

Ένα παράδειγμα εφαρμογής οπλισμένου επιχώματος είναι στον αυτοκινητόδρομο της Εγνατίας οδού τα έτη 2003-2006. Η Εγνατία οδός έχει μήκος 670km και διασχίζει την Βόρεια Ελλάδα από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Ξεκινάει από την Ηγουμενίτσα και διασχίζει τους νομούς Θεσπρωτίας, Ιωαννίνων, Γρεβενών, Κοζάνης, Ημαθίας, Θεσσαλονίκης, Καβάλας, Ξάνθης, Ροδόπης και καταλήγει στο χωριό Κήποι στα τουρκικά σύνορα.

Εξαιτίας της απότομης τοπογραφίας της περιοχής, η οποία είναι πολύ ορεινή, στο τμήμα Ανθοχωρίου-Μετσόβου ήταν αναγκαία η κατασκευή αρκετών οδογεφυρών, επιχώματων και σιράγγων. Έτσι, μελετήθηκε οπλισμένο επίχωμα ύψους 50m για την υποστήριξη του δρόμου έως την οδική σιράγγα. Το έργο ανατέθηκε στην εταιρεία κατασκευών J&P ΑΒΑΞ. Το οπλισμένο επίχωμα αποτελείται από δύο τμήματα: το χαμηλό τμήμα 30m (3 x 10m μεγάλης κλίσης πρηνή με ενδιάμεσες μπαγγίνες) και το άνω τμήμα 20m (επίχωμα οπλισμένης γης το οποίο θεμελιώνεται στα κάτω πρηνή). Ο σχεδιασμός του επιχώματος ήταν της εταιρίας Maccaferri και ο οπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν τα Terramesh, (ως δευτερεύων οπλισμός στο οπλισμένο επίχωμα ύψους 20m στο άνω τμήμα λόγω ευκαμψίας του και αποτελείται από συρματοκιβώτια για την επιφανειακή επικάλυψη, η ουρά των οποίων εκτείνεται κάθετα στο πρηνές), Paralink (επίσης στο οπλισμένο επίχωμα ύψους 20m στο άνω τμήμα με εφελκυστική αντοχή 400kN/ m, που χρησιμοποιήθηκαν ως κύριος οπλισμός) και MacMat (που προστατεύει από τη διάβρωση και επιταχύνει την αναβλάστηση επί της επιφάνειας του πρηνούς). Τα γεωπλέγματα ParaLink και Terramesh φέρουν πιστοποίηση BBA. Τα χαμηλότερα πρηνή εξομαλύνθηκαν ως θεμελίωση για το άνωθεν οπλισμένο επίχωμα. Στις επιφάνειες με απότομη κλίση χρησιμοποιήθηκε επένδυση MacMat R. Το γεώπλεγμα Paralink τοποθετήθηκε κάτω από τα συρματοκιβώτια Terramesh και το υλικό επίχωσης συμπυκνώθηκε από πάνω του ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ευστάθεια πρηνών, αύξηση της φέρουσας ικανότητας, μείωση των φαινόμενων καθιζήσεων σε σχέση με την άοπλη γη. Παρακάτω υπάρχει φωτογραφικό υλικό από τις ενδιάμεσες εργασίες και την τελική όψη του επιχώματος.



Εικόνα 1.4: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος οπλισμού (πηγή:[www.macafferri.com](http://www.macafferri.com))



Εικόνα 1.5: Διάστρωση γεωπλέγματος Paralink (πηγή:[www.macafferri.com](http://www.macafferri.com))



Εικόνα 1.6: Συμπύκνωση ολικού επίχωσης στο γεώπλεγμα Paralink (πηγή:[www.macafferri.com](http://www.macafferri.com))



Εικόνα 1.7: Επένδυση εξωτερικής επιφάνειας με MacMat R (πηγή:[www.macafferri.com](http://www.macafferri.com))



Εικόνα 1.8: Τελικό ύψος επιχώματος (πηγή:[www.macafferri.com](http://www.macafferri.com))



Εικόνα 1.9: Τελική μορφή του επιχώματος με αναβλάστηση της επιφάνειας του πρανούς (πηγή:[www.macafferri.com](http://www.macafferri.com))

Ένα ακόμα παράδειγμα οπλισμένου επιχώματος είναι ξανά στον αυτοκινητόδρομο της Εγνατίας οδού σε Χ.Θ.: 26+393,18 έως Χ.Θ.: 27+117,97 στο τμήμα 1.1.5/6 και μελετήθηκε με βάση τον αμερικάνικο κανονισμό. Το επίχωμα έχει ύψος 32,0 m και κλίση 70°. Το επίχωμα κατασκευάστηκε από την τεχνική εταιρία “ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ Α.Ε.”.

Το υλικό επίχωσης που επιλέχθηκε με ΡΗ από 3-9 ήταν κατηγορίας Ε3 και Ε4 κατά ΟΣΜΕΟ, με προδιαγραφές το ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού να είναι λιγότερο από 25%, ο μέγιστος κόκκος να έχει διάμετρο 80mm, το όριο υδαρότητας να είναι μικρότερο από 20, ο δείκτης

πλαστικότητα μικρότερος από 10 και ο Καλιφορνιακός λόγος φέρουσας ικανότητας μεγαλύτερος του 10, και τέλος, το ποσοστό των οργανικών και η διόγκωση να είναι πρακτικά μηδέν.

Τα γεωπλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν, επίσης με PH 3-9, δεν επηρεάστηκαν ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, είτε μακροχρόνια είτε βραχυχρόνια, από τη χημική σύσταση του γεωϋλικού, ήταν ανθεκτικά στην ηλιακή ακτινοβολία UV και ανεπηρέαστα για θερμοκρασίες μεταξύ 0°C και 30°C. Τα γεωπλέγματα είχαν ονομαστική αντοχή 200kN/m, 150kN/m, 110kN/m, 80kN/m και 55kN/m στη θερμοκρασία 20°C, όπου με την επιβολή των κατάλληλων συντελεστών απομείωσης για μακροχρόνια φόρτιση ( $t=120$  έτη) υπολογίστηκε η χαρακτηριστική αντοχή σε εφελκυσμό ( $T_{t,ult}$ ) ίση με 101,8kN/m, 76,3kN/m, 56kN/m, 33,5kN/m και 25,2kN/m, αντίστοιχα και η χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής παραμόρφωσης στους 20°C στο ονομαστικό όριο θραύσης ( $T_{ult}$ ) δεν υπερβαίνει την τιμή του 12,5%. Οι οπλισμοί τοποθετήθηκαν σε οριζόντιες στρώσεις με κατακόρυφη μεταξύ τους απόσταση  $S_v=0,5m$  στις αρχικές στρώσεις και 1,0m στις υψηλότερες. Στον πόδα χρησιμοποιήθηκε αποστραγγιστική-εξυγιαντική στρώση πάχους 0,50m από θραυστό καθαρό αμμοχάλικο ή χαλίκι.

Ως δευτερεύον οπλισμός, τοποθετήθηκαν στην εξωτερική επιφάνεια συρματοκιβώτια πληρωμένα με λιθορριπή, διαστάσεων 2 x 1 x 1m (μήκος x πλάτος x ύψος), με προεξέχον τμήμα μήκους 4m.

Στη συνέχεια, ακολούθησαν οι έλεγχοι ευστάθειας με χρήση του λογισμικού Ressa V2.0 της εταιρίας Adama Engineering, Inc, σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες Σχεδιασμού και Κατασκευής Οπλισμένων Επιχωμάτων (U.S. Department of Transportation / FHWA-NHI-003-043, March 2001).

Στο πρώτο στάδιο της κατασκευής έγιναν οι απαραίτητες εκσκαφές για την απομάκρυνση της φυτικής και χαλαρής γης βάθους 30cm, για δημιουργία των απαιτούμενων αναβαθμών αγκύρωσης, για την εξυγιαντική-αποστραγγιστική στρώση και για τη σωστή τοποθέτηση των γεωσυνθετικών οπλισμών. Ακολούθησε η κατασκευή της εξυγιαντικής – αποστραγγιστικής στρώσης γίνεται και η τοποθέτηση του 1<sup>ου</sup> συρματοκιβωτίου, με προεξέχον τμήμα μήκους 4m προς το εσωτερικό του επιχώματος και τοποθετήθηκε απαραίτητο τμήμα γεωϋφάσματος στην πίσω όψη του συρματοκιβωτίου. Στη συνέχεια ο 1ος γεωσυνθετικός οπλισμός τοποθετήθηκε κατά την κύρια διεύθυνση όπλισης και αγκυρώθηκε στα άκρα με μικρού μήκους σιδηρές ράβδους (J-pin, ύψους 0,50m) για εξασφάλιση της επιπεδότητας και τάνυσής τους. Μετά ακολούθησε η διάστρωση και συμπίκνωση του γεωϋλικού σε στρώσεις των 50cm. Έπεται τοποθετήθηκε ο 2ος γεωσυνθετικός οπλισμός, σε καθ' ύψος απόσταση 0,5m από τον προηγούμενο, με τον ίδιο τρόπο και έγινε εκ νέου διάστρωση πάχους 50cm. Τέλος, έγινε η

συναρμολόγηση του επόμενου συρματοκιβωτίου και ακολούθησαν νέοι κύκλοι τοποθέτησης των γεωσυνθετικών οπλισμών και γεωϋλικού.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται τα στάδια κατασκευής του επιχώματος.



*Εικόνα 1.10: Θέση κατασκευής επιχώματος (πηγή: Εφραιμίδης Χ. Φ.)*



*Εικόνα 1.11: Εκσκαφές αναβαθμών ακύρωσης (πηγή: Εφραιμίδης Χ. Φ.)*



*Εικόνα 1.12: Εκσκαφή επιχώματος (πηγή: Εφραιμίδης Χ. Φ.)*



*Εικόνα 1.13: Πλήρωση συρματοκιβωτίου (πηγή: Εφραιμίδης Χ. Φ.)*



*Εικόνα 1.14: Τοποθέτηση 1ου γεωπέγματος (πηγή: Εφραιμίδης Χ. Φ.)*



*Εικόνα 1.15: Τοποθέτηση 1ου γεωπέγματος (πηγή: Εφραιμίδης Χ. Φ.)*





*Εικόνα 1.16: Αγκύρωση γεωπλέγματος με σιδηρές ράβδους (J-pin) (πηγή: Εφραιμίδης Χ. Φ.)*



*Εικόνα 1.17: Διαστρωση και συμπίκνωση υλικού επίχωσης (πηγή: Εφραιμίδης Χ. Φ.)*



*Εικόνα 1.18: Όψη επιχώματος κατά την κατασκευή (πηγή: Εφραιμίδης Χ. Φ.)*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

#### 2.1 Αμερικανικός Κανονισμός

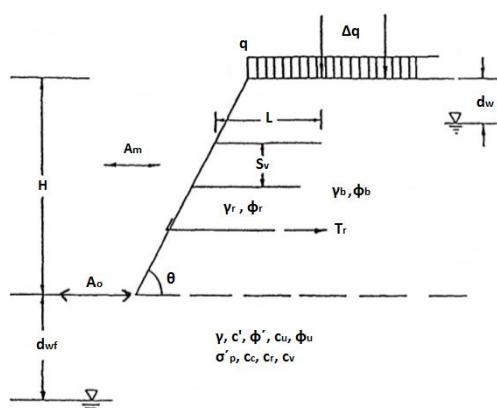
1) Σύμφωνα με τον Αμερικανικό Κανονισμό σχεδιασμού και κατασκευής οπλισμένων επιχωμάτων, (FHWA, 2001), στο πρώτο στάδιο καθορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά με βάση τις απαιτήσεις, δηλαδή το ύψος ( $H$ ) και η κλίση ( $\theta$ ) του πρανούς καθώς, και τα εξωτερικά φορτία, δηλαδή την προσαύξηση ( $q$ ), τα κινητά φορτία ( $\Delta q$ ), και το φορτίο σεισμού με επιτάχυνση  $A_m$ . Ακόμα, προσδιορίζονται οι παρακάτω συντελεστές ασφαλείας για εσωτερική ευστάθεια πρανούς για:

- κυκλική ολίσθηση ( $FS > 1.3$ )
- μεταφορική ολίσθηση ( $FS > 1.3$ )

και εξωτερική ευστάθεια για:

- ολίσθηση βάσης ( $FS \geq 1.3$ )
- βαθιά έδραση ( $FS \geq 1.3$ )
- τοπική φέρουσα ικανότητα ( $FS \geq 1.3$ )
- δυναμική φόρτιση ( $FS > 1.1$ )
- σύνθετη αστοχία ( $FS \geq 1.3$ )

2) Στη συνέχεια, ερευνώνται οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, οι οποίες αφορούν τη θεμελίωση, τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής ( $C_u$  και  $\phi_u$  ή  $c'$  και  $\phi'$  για οποιαδήποτε εδαφική στρώση), το ειδικό βάρος ( $\gamma_{wet}$  και  $\gamma_{dry}$ ), τις παραμέτρους συμπίεστικότητας/στερεοποίησης ( $C_c$ ,  $C_r$ ,  $C_v$  και  $\sigma_p'$ ), τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα  $d_w$  και την πιεζομετρική επιφάνεια. Σε περίπτωση προηγούμενης αστοχίας, απαιτείται αναγνώριση της τοποθεσίας και της επιφάνειας της αστοχίας καθώς και τα αίτια της αστοχίας αυτής.



Σχήμα 2.1: Γεωμετρικά δεδομένα και εδαφικές παράμετροι πρανούς (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

- 3) Στο επόμενο στάδιο, καθορίζονται και αξιολογούνται οι ιδιότητες του οπλισμένου επιχώματος δηλαδή, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η πλαστιμότητα, τα χαρακτηριστικά συμπίκνωσης βασισμένα στο 95% του  $\gamma_d$  και  $\pm 2\%$  βέλτιστης υγρασίας  $W_{opt}$  κατά AASHTO, το πάχος συμπτυκνωμένης στρώσης, οι παράμετροι διατμητικής αντοχής  $C_u$ ,  $\phi_u$ , ή  $c'$  και  $\phi'$  και, τέλος, η χημική σύσταση του εδάφους (pH).
- 4) Υπολογίζεται η επιτρεπόμενη δύναμη οπλισμού βάσει της διάρκειας ζωής σχεδιασμού:

$$T_{al} = \frac{T_{ult}}{RF} \quad (2.1)$$

όπου:  $T_{ult}$ = απόλυτη δύναμη οπλισμού

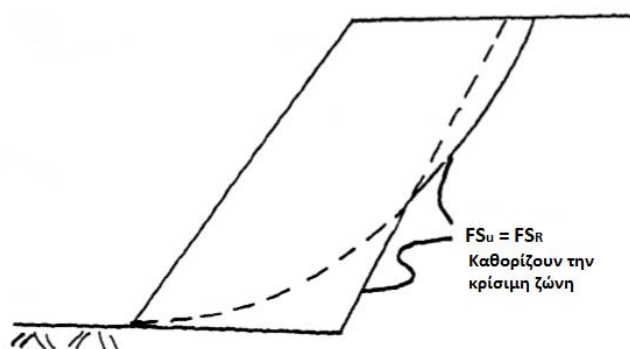
$RF$ = συντελεστές μείωσης αντοχής για τον ερπυσμό, τη βλάβη κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία.

Ο συντελεστής ασφαλείας για αντίσταση σε εξόλκευση για τα κοκκώδη εδάφη είναι  $FS=1,5$  ενώ, για συνεκτικά εδάφη είναι  $FS=2$  και το ελάχιστο μήκος αγκυρίου είναι  $L_e=1m$ .

- 5) Γίνεται έλεγχος ευστάθειας του επιχώματος χωρίς ενίσχυση ώστε να αποφασιστεί εάν απαιτείται οπλισμός. Υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας, ερευνώνται προβλήματα πιθανής αστοχίας καθώς, ο τύπος αυτής και εκτιμάται η ενισχυμένη ζώνη. Ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

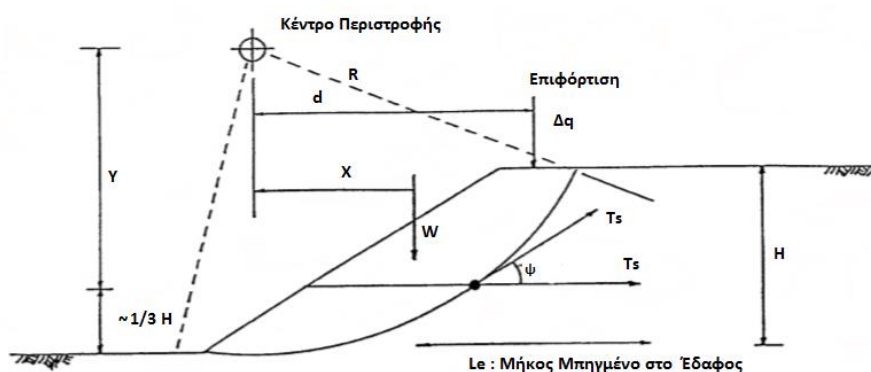
- Προσδιορίζονται συντελεστές ασφαλείας και ροπές ανατροπής στις πιθανές επιφάνειες αστοχίας με χρήση συμβατικών μεθόδων ανάλυσης
- Λαμβάνονται υπόψη η αστοχία στην έδραση, κάτω από την έδραση καθώς, και η αστοχία στην μπροστινή όψη του πρανούς χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των λωρίδων με επιφάνεια αστοχίας ανά κυκλικό τόξο και τη μέθοδος ολισθαίνουσας σφήνας.

Για την εκτίμηση της ενισχυμένης ζώνης εξετάζονται πλήρως οι επιφάνειες αστοχίας που μπορεί να προκύψουν. Σε αυτές τις επιφάνειες θα ισχύει: συντελεστής ασφαλείας μη ενισχυμένης ζώνης  $\leq$  απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας ( $FS_u \leq FS_R$ ). Έπειτα, σχεδιάζονται αυτές οι επιφάνειες στις διατομές του πρανούς, όπου τα όρια της κρίσιμης ζώνης (δηλαδή τα όρια της ενισχυμένης ζώνης) προκύπτουν από τις επιφάνειες που ισχύει  $FS_u = FS_R$ . Για βαθιές επιφάνειες είναι πιθανό η κρίσιμη ζώνη να επιμηκύνεται πίσω από τα όρια του πρανούς.



Σχήμα 2.2: Κρίσιμη ζώνη που καθορίζεται από τους κύκλους ολίσθησης (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

Όταν επιφάνειες αστοχίας εκτείνονται κάτω από τον πόδα του πρανούς σχετίζονται με τη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης και έχουν προτεραιότητα κατά το σχεδιασμό, όπου αναλύεται περαιτέρω η επάρκεια της θεμελίωσης και μελετάται η πιθανή βελτίωση της ενίσχυσης θεμελίωσης για σταθεροποίηση.



Σχήμα 2.3: Περιστροφική αστοχία (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

#### 6) Σχεδιασμός οπλισμού

Για τον σχεδιασμό του οπλισμού, αρχικά, υπολογίζεται η ολική τάση ανά μονάδα πλάτους του πρανού ( $T_s$ ), ώστε ο συντελεστής ασφαλείας ( $FS_R$ ) να βρίσκεται μέσα στα όρια όπου κάθε πιθανή επιφάνεια (που εκτείνεται κάτω ή δια μέσου του πόδα) να είναι εντός της κρίσιμης ζώνης, με τον τύπο:

$$T_s = (FS_R - FS_U) \frac{M_D}{D} \quad (2.2)$$

όπου:  $T_s$  = η απαιτούμενη ελαστική δύναμη οπλισμού ανά μονάδα πλάτους

$M_D$  = ροπή ανατροπής από το κέντρο του κύκλου αστοχίας

$D$  = ο μοχλοβραχίονας του  $T_s$  ως προς το κέντρο του κύκλου αστοχίας, ή

= η ακτίνα του κύκλου R για συνεχή και όλκιμο τύπο ενίσχυσης, ή  
 η κάθετη απόσταση Y από το κέντρο μάζας του T<sub>S</sub> για διακριτά στοιχεία  
 FS<sub>R</sub> = ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας που απαιτείται  
 FS<sub>U</sub> = συντελεστής ασφαλείας χωρίς ενίσχυση

Από την παραπάνω σχέση θα προκύψει η τιμή T<sub>S-MAX</sub>, η οποία είναι η μέγιστη τιμή T<sub>S</sub> που επαληθεύει την ολική τάση σχεδιασμού. Η τιμή T<sub>S-MAX</sub> δεν προσδιορίζεται συνήθως από τον μικρότερο συντελεστή αλλά, η επιφάνεια με το μεγαλύτερο αριθμό οπλισμών αποτελεί την κρίσιμη περιοχή.

Η σχέση που δίνει το συντελεστή ασφαλείας για μη οπλισμένα επιχώματα είναι:

$$FS_U = \frac{\text{Ροπή αντίστασης}}{\text{Ροπή ανατροπής}} = \frac{M_R}{M_D} = \frac{\int_0^{L_{SP}} T_f \times R \times dL}{(W \times x + \Delta q \times d)} \quad (2.3)$$

όπου: W = βάρος της ολισθαίνουσας εδαφικής μάζας

L<sub>SP</sub> = μήκος της ολισθαίνουσας επιφάνειας

Δq = προσαύξηση επιφόρτισης

T<sub>f</sub> = διατμητική αντοχή του εδάφους

Ενώ, ο συντελεστής ασφαλείας για οπλισμένα επιχώματα είναι:

$$FS = FS_U + \frac{T_S \times D}{M_D} \quad (2.4)$$

όπου : T<sub>S</sub> = σύνολο της υπάρχουσας ελαστικής δύναμης ανά πλάτος των οπλισμών

D = μοχλοβραχίονας της ροπής του T<sub>S</sub> από το κέντρο της περιστροφής, ή R για συνεχείς όλκιμες και μη ενισχύσεις, ή Y για μη συνεχείς ή δύσκαμπτες ενισχύσεις.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ολική τάση σχεδιασμού ανά μονάδα πλάτους T<sub>S-MAX</sub>, με τη βοήθεια των γραφημάτων στο Σχήμα 2.4 και συγκρίνεται με το T<sub>S-MAX</sub> από τη σχέση 2.2. Εάν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων επαναλαμβάνεται η διαδικασία 5, αφού ελεγχθούν οι παραδοχές των γραφημάτων.

#### Κατανομή οπλισμού

- Όταν το ύψος του πρανούς είναι μικρότερο ή ίσο από 6m (H ≤ 6m), η κατανομή του οπλισμού είναι ομοιόμορφη και η μεταξύ τους απόσταση ή η τάση όπου απαιτείται T<sub>max</sub> υπολογίζεται με τη βοήθεια του T<sub>S-MAX</sub>.

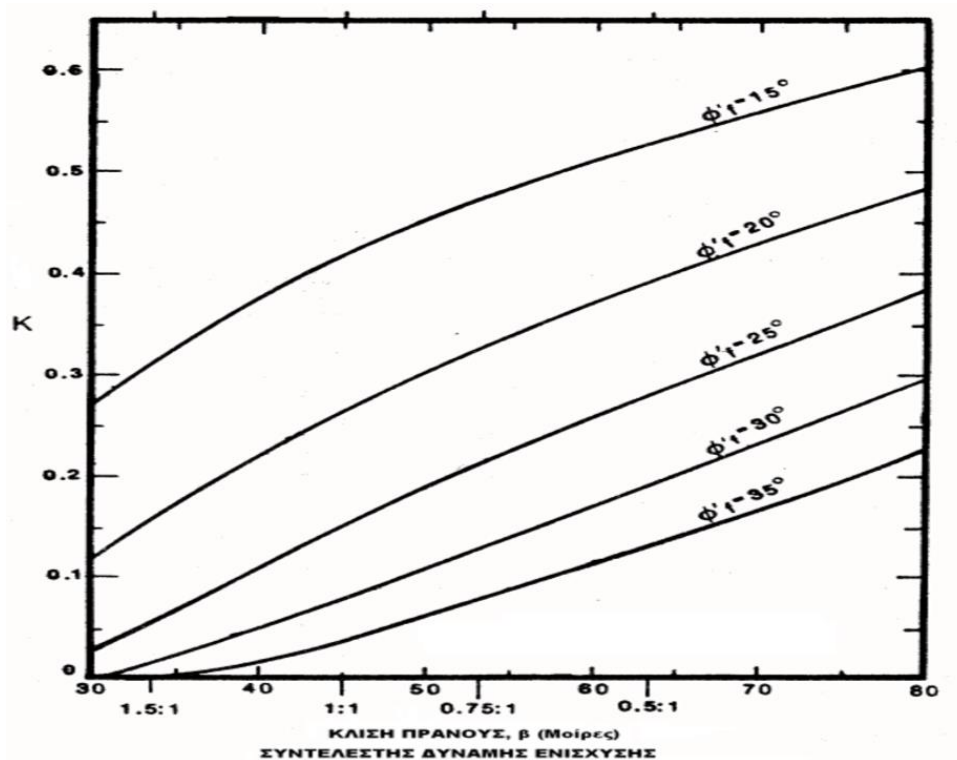
- Όταν το ύψος του πρανούς είναι μεγαλύτερο από 6m ( $H > 6m$ ), τότε το πρανές διαιρείται σε δύο (πάνω και κάτω) ή τρεις (πάνω, μεσαία και κάτω) ζώνες οπλισμού με ίσο ύψος ενώ, οι αποστάσεις μεταξύ τους και οι απαιτήσεις σχεδιασμού των τάσεων των οπλισμών υπολογίζονται βάσει του  $T_{MAX}$  με τη δύναμη να κατανέμεται ομοιόμορφα σε ολόκληρη το εύρος των οπλισμών.

Για δύο ζώνες οπλισμού, η τάση κατανέμεται ως εξής:

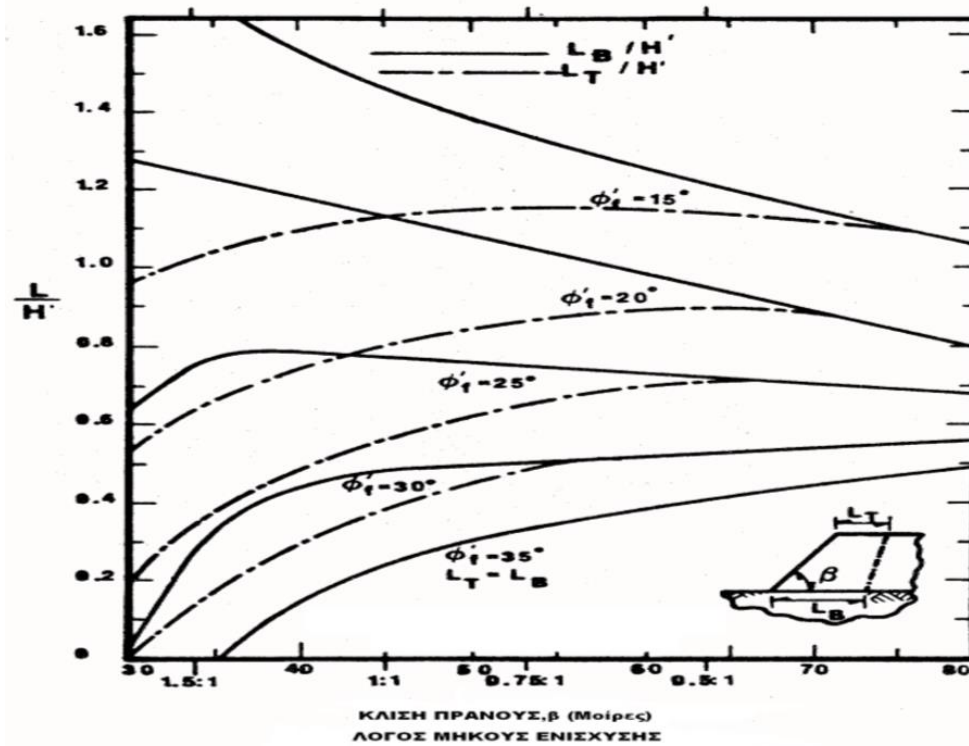
- $T_{bottom} = 3/4 T_{S-MAX}$
- $T_{top} = 1/4 T_{S-MAX}$

Ενώ για τρεις ζώνες, η τάση κατανέμεται ως εξής:

- $T_{bottom} = 1/2 T_{S-MAX}$
- $T_{middle} = 1/3 T_{S-MAX}$
- $T_{top} = 1/6 T_{S-MAX}$



(α)



(β)

Σχήμα 2.4: Γραφήματα σχεδιασμού για τον υπολογισμό της δύναμης των οπλισμών (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

Σχεδιασμός βάσει των διαγραμμάτων

Αρχικά, επιλέγεται ο συντελεστής K, από το Σχήμα 2.4.α όπου  $\varphi_r$  είναι η γωνία τριβής του οπλισμένου εδάφους και:

$$\varphi_f = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \varphi_r}{FS_R} \right) \quad (2.5)$$

Κατόπιν, υπολογίζεται η συνολική δύναμη οπλισμού  $T_{S-MAX}$ :

$$T_{S-MAX} = 0.5 \times K \times \gamma_r \times (H')^2 \quad (2.6)$$

όπου:  $H' = H + q/\gamma_r$

$q$  = ομοιόμορφη φόρτιση

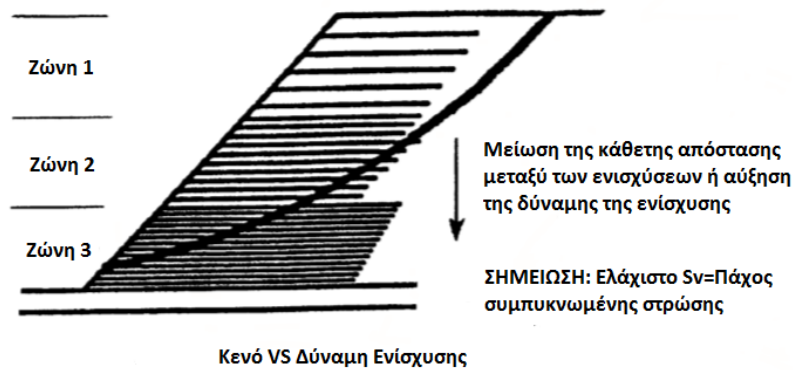
Με τη βοήθεια του Σχήματος 2.4.β επιλέγεται το κατάλληλο μήκος οπλισμού στη βάση ( $L_B$ ) και στην κορυφή ( $L_T$ )

Οι παραδοχές που γίνονται στην παρακάτω διαδικασία είναι οι εξής:

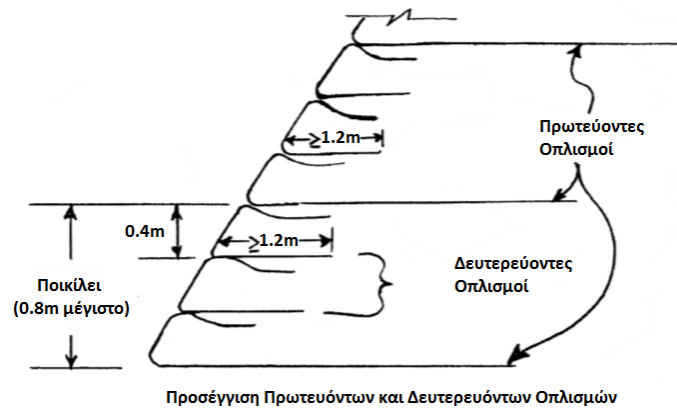
- Ο οπλισμός επιμηκώνεται



- Τα πρανή κατασκευάζονται σε ομοιόμορφο, χωρίς συνοχή έδαφος  $c=0$
- Δεν υπάρχουν πιέσεις πόρων
- Επαρκής αντοχή του εδάφους θεμελίωσης
- Δεν υπάρχει σεισμική δύναμη
- Η ομοιόμορφη προσαύξηση δεν είναι μεγαλύτερη από  $0.2 \times \gamma_r \times H$
- Σχέση των οπλισμών με την γωνία τριβής  $\varphi_{sg} = 0.9 \times \varphi_r$



Σχήμα 2.5: Ποιοτική απεικόνιση των οπλισμών του πρανούς (πηγή: FHWA-NHI-00-043)



Σχήμα 2.6: Αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών για πρανή μεγάλου ύψους (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

Επιλέγεται η κάθετη απόσταση μεταξύ των οπλισμών ( $S_v$ ) ή των μέγιστων απαιτήσεων σχεδιασμού για την τάση  $T_{MAX}$  σε κάθε οπλισμό.

Γίνεται υπόθεση μιας αρχικής απόστασης  $S_v$  μεταξύ των οπλισμών και βάσει αυτού υπολογίζεται η δύναμη  $T_{MAX}$  για κάθε ζώνη οπλισμού και αφού η επιτρεπόμενη δύναμη οπλισμού είναι γνωστή, υπολογίζεται η ελάχιστη κάθετη απόσταση και ο αριθμός των

οπλισμών που απαιτούνται για κάθε ζώνη με την παρακάτω σχέση:

$$T_{MAX} = \frac{T_{zone} \times S_V}{H_{zone}} = \frac{T_{zone}}{N} \leq T_a \times R_c \quad (2.7)$$

όπου :  $R_c$  = λόγος κάλυψης του οπλισμού που ισούται με το πλάτος του οπλισμού  $b$

διαιρεμένο με την οριζόντια απόσταση  $S_h$

$S_V$  = κάθετη απόσταση μεταξύ οπλισμών σε μέτρα.

$T_{zone}$  = η μέγιστη τάση του οπλισμού που απαιτείται για κάθε ζώνη

=  $T_{S-MAX}$  για χαμηλά πρανή ( $H < 6m$ )

$H_{zone}$  = ύψος της ζώνης

=  $T_{top}$ ,  $T_{middle}$ , και  $T_{bottom}$  για υψηλά πρανή ( $H > 6m$ )

$N$  = αριθμός οπλισμών

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευστάθεια της πρόσοψης και η ποιότητα της συμπίκνωσης επιλέγονται μικρά μήκη (από 1.2 - 2m) για τις μεσαίες στρώσεις οπλισμού ώστε να διατηρηθεί η μέγιστη απόσταση στην τάξη των 400mm ή λιγότερο.

Για ήπια πρανή με κλίση 1:1 (οριζόντια : κατακόρυφα) και σχετικά μικρές αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών, η κάλυψη της πρόσοψης δεν μπορεί να γίνει με κοκκώδη εδάφη όπως αμμώδες χαλίκι. Για απότομα πρανή με ομοιόμορφα διαβαθμισμένα εδάφη απαιτείται επικάλυψη της πρόσοψης για αποφυγή θρυμματισμού της. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάθετες αποστάσεις για αποφυγή ολισθήσεων και θρυμματισμών στην πρόσοψη, όμως, απαιτείται ανάλυση ευστάθειας στην πρόσοψη. Σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται ένα απειρομήκης πρανές και ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$FS = \frac{c'H + (\gamma_g - \gamma_w)H z \cos^2 \beta \tan \varphi' + F_g (\cos \beta \sin \beta + \sin^2 \beta \tan \varphi')}{\gamma_g H z \cos \beta \sin \beta} \quad (2.8)$$

όπου :  $c$  = συνοχή του εδάφους

$\varphi'$  = γωνία τριβής του εδάφους

$\gamma_g$  = κορεσμένο ειδικό βάρος

$\gamma_w$  = ειδικό βάρος νερού

$z$  = κατακόρυφο βάθος της επιφάνειας αστοχίας

$H$  = κατακόρυφο ύψος του πρανούς

$\beta$  = γωνία πρανούς

$F_g$  = συνολική δύναμη αντίστασης των οπλισμού

Οι μεσαίοι οπλισμοί τοποθετούνται σε συνεχείς στρώσεις με επαρκή ανθεκτικότητα για την εγκατάσταση και δυνατότητα τοπικής ελαστικής ενίσχυσης στην επιφάνεια του εδάφους, χωρίς να υπάρχει απαίτηση για δυσκαμψία ίση με τον πρωτεύοντα οπλισμό.

Εάν η αλληλεπίδραση της γωνίας τριβής στις μεσαίες στρώσεις οπλισμού του πρανούς ( $\rho_{sr}$ ) είναι μικρότερη από εκείνη του πρωτεύοντος οπλισμού ( $\rho_r$ ) τότε στην ανάλυση για τον προσδιορισμό της επιφάνειας αστοχίας όσον αφορά την οπλισμένη εδαφική ζώνη θα λαμβάνεται υπόψη το  $\rho_{sr}$ .

Για τις κρίσιμες ή πολύπλοκες κατασκευές υπολογίζεται ξανά το  $T_s$  με τη βοήθεια της εξίσωσης (2.2) έτσι ώστε, να επιλεγεί μια πιθανή επιφάνεια αστοχίας για κάθε στρώση πρωτεύοντα οπλισμού προκειμένου να διασφαλιστεί η ικανότητα της δύναμης των οπλισμών σε αυτές.

Για να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη δύναμη εξόλκευσης πίσω από την κρίσιμη επιφάνεια για κάθε στρώση οπλισμού πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή μήκους  $L_e$ , το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_e = \frac{T_{max} \times FS}{F^* \times \alpha \times \sigma'_v \times 2 \times R_c \times C} \quad (2.9)$$

όπου:  $F^*$  = συντελεστής αντίστασης εξόλκευσης

$\alpha$  = συντελεστής διόρθωσης για τις συνέπειες της κλίμακας για τον υπολογισμό της μη γραμμικής μείωσης της πίεσης πίσω από το πακτωμένο μήκος των οπλισμών, βάσει εργαστηριακών δεδομένων (γενικά η τιμή του  $\alpha=1.0$  για μεταλλικό οπλισμό και  $\alpha=0.6 - 1.0$  για γεωσυνθετικό οπλισμό).

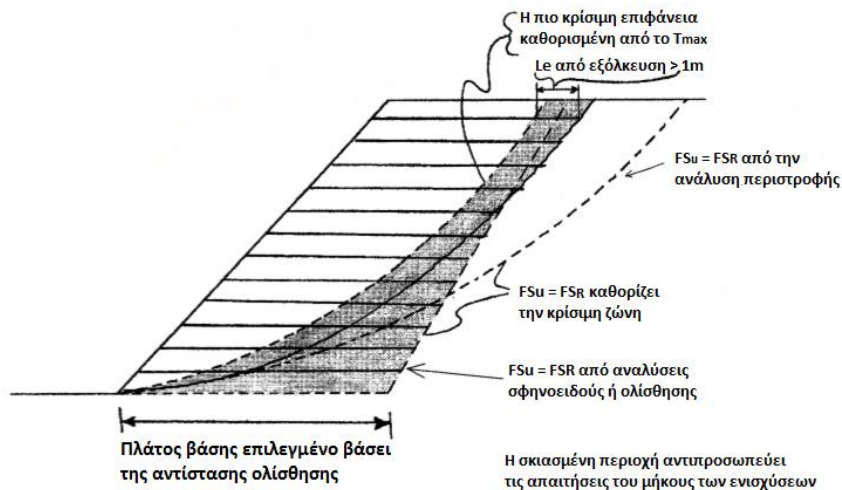
$C$  = το ενεργό μήκος της περιμέτρου των οπλισμών

$\sigma'_v$  = η ενεργή κάθετη τάση στην αλληλεπίδραση εδάφους – οπλισμού

Η μικρότερη τιμή του  $L_e$  είναι 1m. Όταν χρησιμοποιούνται οι μερικές εμπειρικές εξισώσεις για την εύρεση του  $F^*$ , ελέγχονται οι συνθήκες εξόλκευσης για μακροχρόνιο και βραχυχρόνια φόρτιση για συνεκτικά εδάφη.

Για μακροχρόνιες συνθήκες χρησιμοποιείται  $\phi'_r$  με  $c_r=0$ . Για βραχυχρόνιες συνθήκες, συντηρητικά χρησιμοποιείται  $\phi'_r$  με  $c_r=0$  από τριαξονικές δοκιμές, ή δοκιμές άμεσης διάτμησης ή από δοκιμές εξόλκευσης.

Μετά τον υπολογισμό των μηκών  $L_e$  σχεδιάζονται σε μια διατομή του πρανού, στην οποία υπάρχουν τα όρια της κρίσιμης ζώνης, όπως υπολογίστηκε στο 5. Το μήκος των χαμηλότερων οπλισμών δίνει σε γενικές γραμμές το μήκος που απαιτείται για την ευστάθεια έναντι ολίσθησης στη βάση. Οι οπλισμοί στα χαμηλότερα σημεία θα πρέπει να εκτείνονται έως την κρίσιμη ζώνη και ίσως να απαιτηθεί να επεκταθούν ώστε να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα αστοχίας, ενώ στα ψηλότερα σημεία είναι πιθανό να μην απαιτείται η προέκταση του οπλισμού έως την κρίσιμη ζώνη διότι, τα κατώτερα επίπεδα παρέχουν ικανοποιητική ενίσχυση λόγω του  $FS_R$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Σχηματική απεικόνιση του τρόπου υπολογισμού του μήκους των οπλισμών (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

Στη συνέχεια, ελέγχεται εάν το σύνολο των δυνάμεων των οπλισμών διέρχονται μέσα από την επιφάνεια αστοχίας, και ότι το  $T_S$  επαρκεί για αυτή την επιφάνεια. Υπολογίζεται ο οπλισμός ο οποίος εκτείνεται 1m εκτός της επιφάνειας ώστε να επαρκεί η αντίσταση εξόγκωσης. Εάν οι υπάρχουσες δυνάμεις οπλισμού δεν επαρκούν πρέπει να αυξηθεί είτε το μήκος είτε η δύναμη των κατώτερων στρώσεων οπλισμού. Για λόγους διευκόλυνσης της κατασκευής και επιθεώρησης αυξάνονται τα μήκη ορισμένων οπλισμών ώστε να δημιουργηθούν ομάδες οπλισμών με ίσα μήκη. Πέρα από την χαμηλότερη στάθμη οπλισμού, οι υπόλοιπες στρώσεις δεν είναι απαραίτητο να φτάνουν έως την κρίσιμη ζώνη. Ελέγχεται το μήκος που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το Σχήμα 2.4.

Σημείωση: το  $L_e$  περιέχεται μέσα στο συνολικό μήκος  $L_T$  και  $L_B$  από το Σχήμα 2.4.β

Σε διατάξεις με διαφορετικά μήκη οπλισμών, οι χαμηλότερες στρώσεις είναι πιθανό να είναι οπλισμένες έτσι ώστε να επιτρέπουν στις ανώτερες στρώσεις να έχουν μικρότερα μήκη. Πρέπει να αξιολογούνται οι απαιτήσεις των μηκών και να ελέγχεται προσεκτικά για

κάθε ζώνη η αντίσταση σε εξόλκευση για τους οπλισμούς στις κρίσιμες επιφάνειες, οι οποίες περνούν από τη στρώση οπλισμού της βάσης.

### 7) Έλεγχοι εξωτερικής ευστάθειας

→ Αρχικά, γίνεται ο έλεγχος ολίσθησης. Για κάθε στρώση οπλισμού υπολογίζεται το πλάτος του εδάφους για να αποφεύγεται η αστοχία σε ολίσθηση κατά μήκος του οπλισμού. Η σφηνοειδής αστοχία καθορίζεται από τα όρια του οπλισμού. Οι υπολογιστικές μέθοδοι που λαμβάνουν υπόψη όλες τις εδαφικές στρώσεις και τις τιμές αλληλεπίδρασης της τριβής δίνουν μια καλύτερη ανάλυση. Επιλέγεται η ηπιότερη τιμή ανάμεσα στην τιμή  $45 + \varphi/2$  και στο να είναι παράλληλη στο πίσω μέρος της οπλισμένης ζώνης σαν γωνία στο πίσω μέρος της σφήνας. Στην απλή μέθοδο ολισθαίνουσας σφήνας, θεωρείται μια γωνία περίπου  $45 + \varphi/2$  στο πίσω μέρος του οπλισμένου εδάφους με το πίσω μέρος της σφήνας. Βάσει αυτής της υπόθεσης, η ενεργητική εδαφική ώθηση ισούται με την επιβαλλόμενη δύναμη και η δύναμη αντίστασης είναι η αντίσταση τριβής που προκύπτει από την πιο ασθενή στρώση, ή από το οπλισμένο έδαφος, το έδαφος θεμελίωσης ή την αλληλεπίδραση εδάφους – οπλισμού. Ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

*Δύναμη αντίστασης = Συντελεστής Ασφαλείας (F.S.) x Δύναμη ολίσθησης*

$$(W + P_a \sin\varphi_b) \times \tan\varphi_{min} = FS \times P_a \times \cos\varphi_b \quad (2.10)$$

$$W = \frac{1}{2} \times L^2 \times \gamma_r \times \tan\theta \quad \text{για } L < H$$

$$W = \left[ L \times H - \frac{H^2}{(2 \times \tan\theta)} \right] \times \gamma_r \quad \text{για } L > H$$

$$P_a = \frac{1}{2} \times \gamma_b \times H^2 \times K_a$$

όπου: L = το μήκος του κατώτερου οπλισμού σε κάθε στάθμη όπου υπάρχει μια αλλαγή στο μήκος των οπλισμών

H = Ύψος του πρανούς

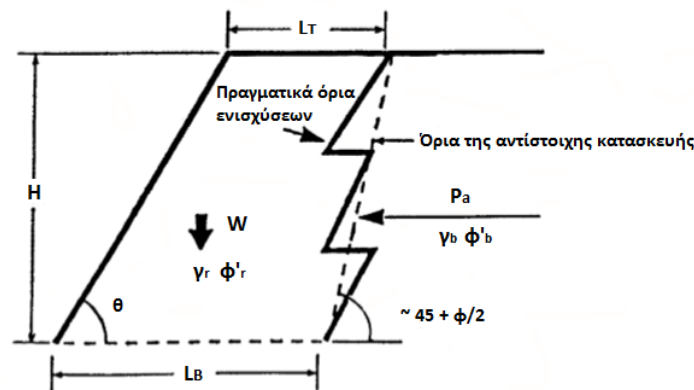
FS = συντελεστής ασφαλείας ολίσθησης (>1.3)

$P_a$  = ενεργητική ώθηση εδάφους

$\varphi_{min}$  = ελάχιστη γωνία τριβής μεταξύ του οπλισμένου εδάφους και του

οπλισμού ή /και ελάχιστη γωνία τριβής του εδάφους θεμελιώσεων  
 $\theta$  = γωνία πρανούς  
 $\gamma_r$  = το ειδικό βάρος της οπλισμένης επίχωσης  
 $\gamma_b$  = το ειδικό βάρος της υφιστάμενης επίχωσης  
 $\phi_b$  = γωνία τριβής του υλικού επίχωσης

Σε περίπτωση τοποθέτησης στραγγιστηριών ή φίλτρων στο πίσω μέρος του πρανούς, τότε ως  $\phi_b$  λαμβάνεται η γωνία τριβής αλληλεπίδρασης μεταξύ του οπλισμού και του υλικού επίχωσης.



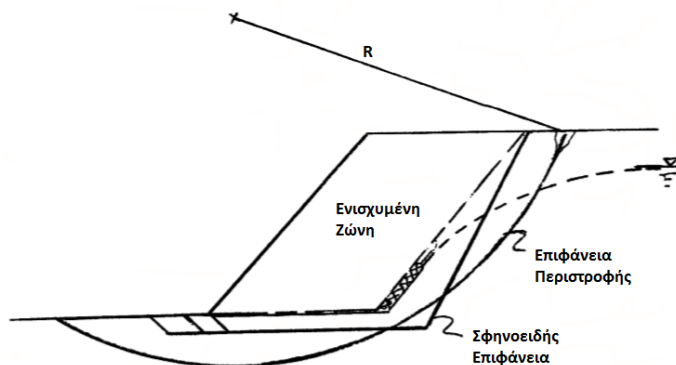
Σχήμα 2.8: Ανάλυση ευστάθειας ολισθαίνουσας μάζας (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

→ Ακολουθεί ο **έλεγχος σε βαθιά αστοχία**. Αξιολογούνται οι πιθανές επιφάνειες βαθιάς αστοχίας πίσω από το οπλισμένο πρανές ώστε να ισχύει:

$$FS = \frac{M_D}{M_R} > 1.3 \quad (2.11)$$

Επαναλαμβάνεται η ίδια ανάλυση όπως και στο 5<sup>ο</sup> στάδιο με τις ίδιες πληροφορίες.

Σύμφωνα με τον Kramer (1996) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο, κλασσικές μέθοδοι ευστάθειας περιστροφικής αστοχίας, όπως η απλουστευμένη Bishop, Morgenstern και Price, Spencer, ή κάποια άλλη, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα προγράμματα λογισμικού.



Σχήμα 2.9: Αστοχία θεμελίωσης πρανούς ανάλυση βαθιάς ευστάθειας (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

→ Στη συνέχεια, πραγματοποιείται έλεγχος τοπικής φέρουσας αστοχίας στο πόδι του πρανού. Εάν το πλάτος του πρανού είναι μικρότερο από το βάθος  $D_s$  μιας ασθενούς εδαφικής στρώσης του πρανού, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας για αστοχία λόγω πίεσης χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$FS_{squeezing} = \frac{2 \times c_u}{\gamma \times D_s \times \tan\theta} + \frac{4.14 \times c_u}{H \times \gamma} \geq 1.3 \quad (2.12)$$

όπου:  $\theta$  = κλίση του πρανού

$\gamma$  = ειδικό βάρος του εδάφους του πρανού

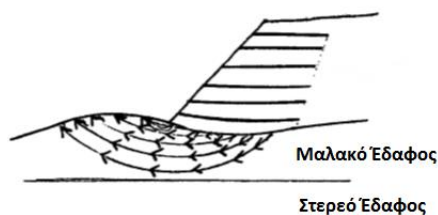
$D_s$  = βάθος του μαλακού εδάφους κάτω από τη βάση του επιχώματος

$H$  = ύψος του πρανού

$c_u$  = διατμητική αντοχή του μαλακού εδάφους κάτω από το πρανές

Σε περιπτώσεις όπου ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει μικρότερος από 2 ( $FS < 2$ ), η ανάλυση θα πρέπει να είναι πιο λεπτομερής. Η παραπάνω προσέγγιση θεωρείται συντηρητική γιατί δε λαμβάνει υπόψη την επίδραση των οπλισμών.

Όταν το βάθος της ασθενούς στρώσης,  $D_s$  είναι μεγαλύτερο από το πλάτος της βάσης του πρανού,  $b'$ , τότε θα εξετάζεται προσεκτικά η γενική ευστάθεια κατά τον σχεδιασμό.



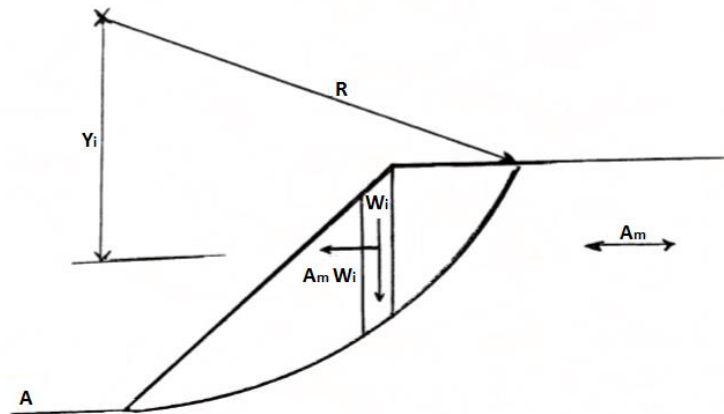
Σχήμα 2.10: Αστοχία θεμελίωσης πρανούς σε τοπική φέρουσα αστοχία στον πόδα του πρανού (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

→ Τελευταίος έλεγχος εξωτερικής ευστάθειας που γίνεται είναι στη **θεμελίωση πρανούς**. Ο έλεγχος της θεμελίωσης, για την μελέτη και κατασκευή της πραγματοποιείται με τη βοήθεια κλασικών προσεγγίσεων. Πρέπει, επίσης, να εξετάζεται και η πιθανότητα ύπαρξης νερού στη θεμελίωση.

#### 8) Σεισμική ευστάθεια

Σε επόμενο στάδιο, επιλέγεται σεισμικός συντελεστής και σεισμική επιτάχυνση ( $A_m=A/2$ ) βασισμένα στον κατάλληλο αντισεισμικό σχεδιασμό και εκτελείται μια ψευδοστατική ανάλυση. Τα οπλισμένα επιχώματα είναι όλκιμες κατασκευές. Στις ΗΠΑ το  $A_m$  μπορεί να θεωρηθεί ως  $A/2$  εφόσον επιτρέπεται από το AASHTO (Standard specifications for highway bridges). Για τον συντελεστή ασφαλείας πρέπει να ισχύει:  $FS_{dynamic} \geq 1$ .

Στην ψευδοστατική ανάλυση, για την εξίσωση ισορροπίας προστίθεται μια οριζόντια ή/και κατακόρυφη δύναμη στο κέντρο βάρους κάθε επιφάνειας, η οποία προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του σεισμικού συντελεστή με το συνολικό βάρος της ολισθαίνουσας μάζας. Γίνεται η παραδοχή ότι η δύναμη αυτή δεν επηρεάζει καμία άλλη δράση που να λαμβάνει μέρος στην ανάλυση ευστάθειας.



Σχήμα 2.11: Ανάλυση σεισμικής ευστάθειας (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

#### 9) Έλεγχος υπόγειων υδάτων

Μελετώντας την κατεύθυνση ροής, την τοποθεσία ,το ρεύμα εκροής καθώς και το φίλτράρισμα σχεδιάζεται η υπόγεια αποστράγγιση.

Τοποθετούνται στραγγιστήρια στο πίσω μέρος του οπλισμένου επιχώματος, τα οποία μπορούν να είναι κοκκώδη εδαφικά υλικά ή αποστραγγιστική τάφρος ή στραγγιστήρια από γεωσυνθετικό υλικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12.



Βάσει της γεωμετρίας της τοποθεσίας, της ροής και άλλων κριτηρίων επιλέγονται τα πλευρικά κενά απορροής. Ακόμη, για τον σχεδιασμό της απορροής λαμβάνεται υπόψη η μακροχρόνια λειτουργία και συντήρηση του επιχώματος.

Τα χαρακτηριστικά με τα οποία σχεδιάζονται τα γεωσυνθετικά στραγγιστήρια στο σχεδιασμό της υπόγειας αποστράγγισης είναι τα εξής:

- Πρέπει να διαθέτουν λειτουργία φίλτρου
- Να παρέχουν μακροχρόνια αντοχή σε θλίψη του πολυμερικού πυρήνα
- Να μειώνεται η επιτρεπόμενη ροή κατά την τοποθέτηση του οπλισμού στην επίχωση
- Να επιτρέπονται μακροχρόνιες εισροές και εκροές

Λαμβάνονται υπόψη αναλύσεις ευστάθειας στο πρανές για την αλληλεπίδραση της διατμητικής αντοχής κατά μήκος του στραγγιστηρίου. Είναι πιθανό η γωνία τριβής στραγγιστηρίου-εδάφους να είναι μικρότερη από τη γωνία τριβής του εδάφους. Αυτό μπορεί να έχει ως συνέπεια μια επιφανειακή αστοχία κατά μήκος της διεπιφάνειας μεταξύ αυτών.

Όλοι οι οπλισμοί (πρωτεύοντες και δευτερεύοντες) πρέπει να έχουν μεγαλύτερη διαπερατότητα από το υλικό επίχωσης ώστε να μην αναπτύσσονται υπερπίεσεις νερού πάνω από τις στρώσεις των οπλισμών κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης.

Σε περιπτώσεις όπου η στράγγιση αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ευστάθεια του πρανούς πρέπει να σχεδιάζονται αρκετά προσεκτικά τα υπόγεια στραγγιστήρια, έως και να υπερδιαστασιολογούνται.

#### Έλεγχος επιφανειακής απορροής νερού

Το οπλισμένο επίχωμα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε τα επιφανειακά νερά να συλλέγονται και να κατευθύνονται στη βάση του με τη βοήθεια σωληνώσεων ή τάφρου.

Για την αποστράγγιση πρέπει να ακολουθούνται οι προδιαγραφές λεπτομερώς.

Είναι πιθανό, για λόγους αποφυγής θρυμματισμών, να απαιτείται επικάλυψη στην πρόσοψη ή και προέκταση των δευτερευόντων οπλισμών στη πρόσοψη του πρανούς. Με τη βοήθεια των δευτερευόντων οπλισμών επιτυγχάνεται η συμπίκνωση στην πρόσοψη, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διατμητική αντοχή του εδάφους και η αντίσταση κατά της διάβρωσης. Επίσης, ο δευτερεύον οπλισμός δρα σαν ενίσχυση εναντίον αβαθών αστοχιών.

Οι μεσαίες στρώσεις οπλισμού τοποθετούνται σε εδαφικές στρώσεις, όπου δεν υπάρχουν πρωτεύοντες οπλισμοί. Ακόμη, ένας δευτερεύον οπλισμός μπορεί να τοποθετηθεί οριζοντίως και γειτονικά με έναν πρωτεύοντα και στην ίδια στάθμη με αυτή του πρωτεύοντα. Επιμηκύνεται η μεσαία ενίσχυση (από 1.2 έως 2m) μέσα στο υλικό επίχωσης πίσω από την πρόσοψη.

Επιλέγεται μία πρόσοψη που να παρέχει προστασία ή να ελαχιστοποιεί την διάβρωση κατά την διάρκεια μιας βροχής και έπειτα από το λιώσιμο των πάγων σε μακροχρόνια βάση. Η εφελκυστική διατμητική τάση λόγω ροής στην πρόσοψη υπολογίζεται με τον τύπο:

$$\lambda = d \times \gamma_w \times s \quad (2.13)$$

όπου:  $\lambda$  = εφελκυστική διατμητική τάση (kPa)

$d$  = βάθος της ροής του νερού (m)

$\gamma_w$  = ειδικό βάρος του νερού (kN/m<sup>3</sup>)

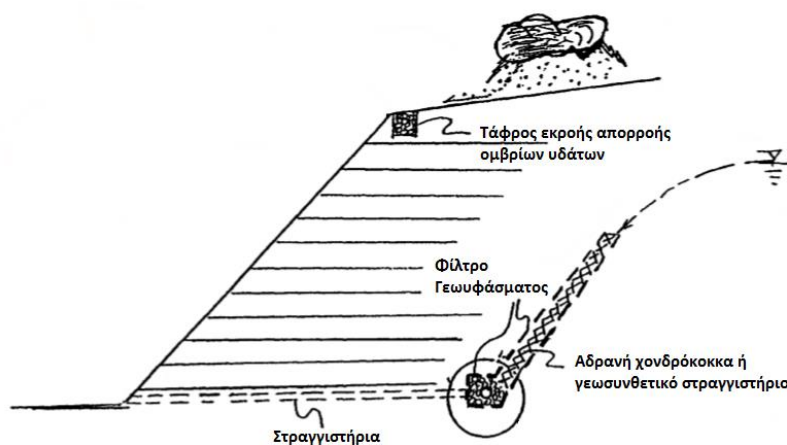
$s$  = η κάθετη ή οριζόντια γωνία της πρόσοψης του πρανού (m/m)

Για  $\lambda < 100$  Pa, τοποθετείται βλάστηση με προσωρινό ή μόνιμο πλέγμα ελέγχου διάβρωσης. Για  $\lambda > 100$  Pa, τοποθετείται βλάστηση με προσωρινό πλέγμα ελέγχου διάβρωσης ή άλλο τύπο συστημάτων προστασίας επένδυσης της πρόσοψης (όπως λιθορριπή, εκτοξευμένο σκυρόδεμα, προκατασκευασμένα σπονδυλωτά συστήματα, κ.α.).

Επιλέγεται βλάστηση που πρέπει να είναι συμβατή με τα τοπικά φυτοκομικά και αγρονομικά κριτήρια καθώς και με κριτήρια για την συντήρηση της.

Επιλέγεται συνθετικό (μόνιμο) πλέγμα ελέγχου διάβρωσης το οποίο τοποθετείται για την προστασία του πρανού ενάντια στην υπεριώδη ακτινοβολία και είναι αδρανές σε φυσικές και χημικές ουσίες εδαφικής προελεύσεως.

Τα πλέγματα ελέγχου διάβρωσης και οι επικαλύψεις ποικίλουν ευρύτητα ανάλογα με τον τύπο, το κόστος και κυρίως την καταλληλότητα και τις συνθήκες του έργου. Η προστασία του πρανού πρέπει να προδιαγράφεται ρητώς.



Σχήμα 2.12: Υπόγεια αποστράγγιση (πηγή: FHWA-NHI-00-043)

## 2.2 Βρετανικός Κανονισμός

Σύμφωνα με το βρετανικό κανονισμό υιοθετείται μια προσέγγιση οριακής ισορροπίας βάσει ενός μηχανισμού δύο σφηνών, ο οποίος προτιμάται, επειδή αποτελεί μια απλή μέθοδο εύρεσης ασφαλών και οικονομικών λύσεων για οπλισμένο έδαφος. Είναι μια συντηρητική μέθοδος συγκριτικά με άλλες μεθόδους καθώς στηρίζεται στην υπόθεση πως ο οπλισμός του εδάφους δίνει μόνο αξονικά φορτία και όχι καμπτικά. Τα οπλισμένα πρανή σχεδιάζονται με διάρκεια ζωής 60 χρόνια. Ο υπολογισμός της οριακής ισορροπίας βασίζεται στη ισότητα μεταξύ ενός συνόλου κινητήριων δυνάμεων με ένα σύνολο δυνάμεων αντίστασης.

### Ορισμός του μηχανισμού δύο σφηνών

Η γεωμετρία του μηχανισμού δύο σφηνών φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Είναι αναγκαίο το όριο μεταξύ σφηνών να είναι κατακόρυφο και η βάση της κάτω σφήνας πρέπει να τέμνει τον πόδα του πρανού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15, το όριο μεταξύ σφηνών μπορεί να βρίσκεται αριστερά ή δεξιά της κορυφής του πρανού και η άνω σφήνα μπορεί να προεξέχει προς τα αριστερά ή δεξιά της κορυφής του πρανού. Στο Σχήμα 2.14 φαίνονται οι δρώσες δυνάμεις, όπου με επίλυση όλων των δυνάμεων προκύπτει ένας γενικός τύπος που δεν μπορεί, όμως, να δώσει τη συνολική δύναμη οπλισμού  $T_{tot}$ , δίχως παραδοχή σχετικά με την κατανομή της (π.χ. ομοιόμορφη κατανομή, ή αύξηση γραμμικά με βάθος). Ωστόσο, ο αυτός τύπος απλοποιείται σημαντικά από την υπόθεση ότι η γωνία τριβής μεταξύ σφηνών είναι μηδενική, έτσι η τιμή του  $T_{12}$  στο Σχήμα 2.14 μηδενίζεται. Ο απλοποιημένος τύπος για την δύναμη οπλισμού είναι:

$$T_{tot} = T_1 + T_2 =$$

$$\frac{\left[ (W_1 + Q_1)(\tan\theta_1 - \tan\varphi'_1) + \frac{U_1 \tan\varphi'_1 - K_1}{\cos\theta_1} \right]}{(1 + \tan\theta_1 \tan\varphi'_1)} + \frac{\left[ (W_2 + Q_2)(\tan\theta_2 - \lambda_s \tan\varphi'_2) + \lambda_s \frac{U_2 \tan\varphi'_2 - K_2}{\cos\theta_2} \right]}{(1 + \lambda_s \tan\theta_2 \tan\varphi'_2)}$$

όπου:  $W_1$ = βάρος σφήνας 1

$W_2$ = βάρος σφήνας 2

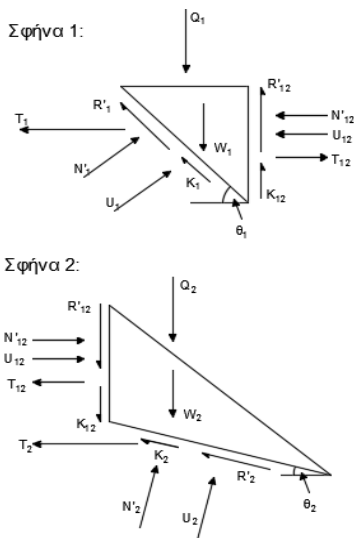
$Q_1$ = επιπρόσθετο βάρος σφήνας 1

$Q_2$ = επιπρόσθετο βάρος σφήνας 2

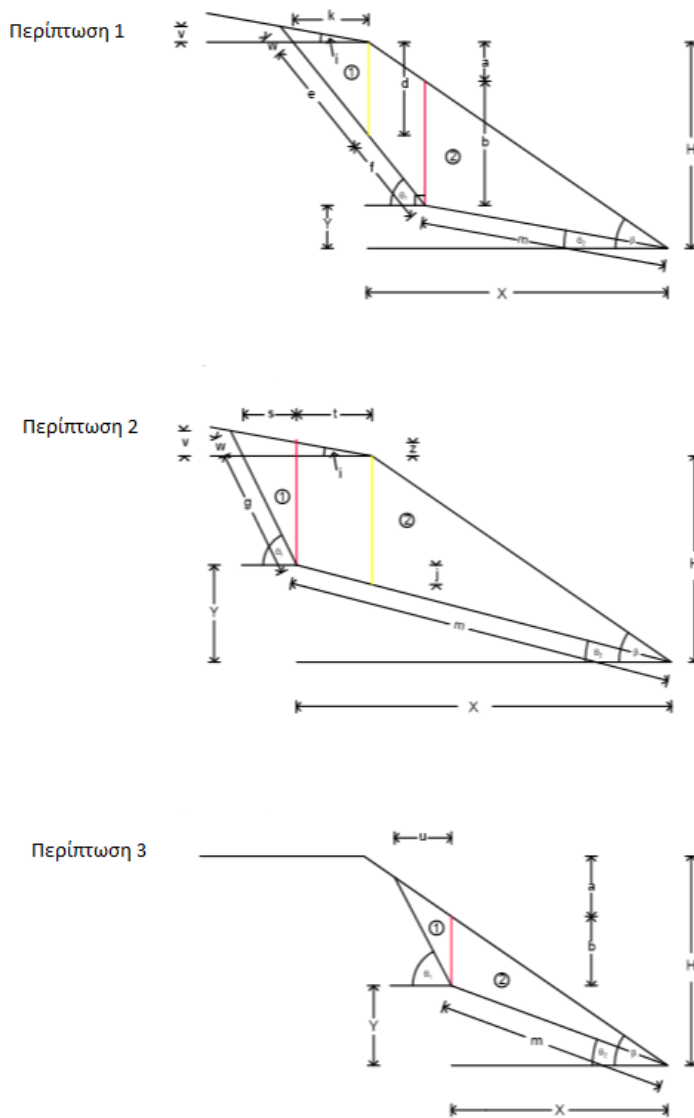
$U_1$ = πίεση πόρων στη βάση σφήνας 1

$U_2$ = πίεση πόρων στη βάση σφήνας 2





Σχήμα 2.14: Δυνάμεις που ασκούνται στις σφήνες (πηγή: ΗΑ 68/94)



Σχήμα 2.15: Ορισμός της γεωμετρίας δύο σφηνών (3 περιπτώσεις) (πηγή: ΗΑ 68/94)

➤ Κοκκώδη εδάφη (και συνεκτικά εδάφη με  $PI < 25\%$ )

Για την επιλογή  $\phi'_{cv}$ ,  $c'_{cv}$  στα κοκκώδη και συνεκτικά εδάφη με  $PI < 25\%$  πρέπει να γίνονται δοκιμές άμεσης διάτμησης σε μεγάλες μετατοπίσεις ή αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές έως ότου εντοπιστεί η ισορροπία και είναι πιθανό οι τιμές του  $\phi'_{cv}$  από αυτές τις δοκιμές να είναι συντηρητικές. Εναλλακτικά, μια εκτίμηση της τιμής του  $\phi'_{cv}$  μπορεί να βασίζεται στις τιμές του  $\phi'_{pk}$  και  $\psi$  (γωνία διαστολικότητας) που λαμβάνεται από δοκιμές άμεσης διάτμησης, από τη σχέση  $\phi'_{cv} = \phi'_{pk} - 0,8\psi$  (Bolton, 1986). Το εύρος τιμών της γωνίας  $\phi'_{cv}$  είναι μεταξύ  $30^\circ-35^\circ$  για κοκκώδη επιχώματα και στην περιοχή  $20^\circ-25^\circ$  για χαμηλής πλαστικότητας αργιλικά επιχώματα. Για τις τιμές σχεδιασμού πρέπει να ισχύει:

$$\tan \phi'_{des} = \tan \phi'_{cv}$$

$$c'_{des} = c'_{cv} \quad (\text{συνήθως ισούται με } 0)$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις λαμβάνουμε τις παρακάτω υπερβολικά συντηρητικές τιμές σχεδιασμού, εάν αυτές δίνουν μεγαλύτερη τιμή από τις παραπάνω σχέσεις:

$$\tan \phi'_{des} = \tan \phi'_{pk} / f_s$$

$$c'_{des} = c'_{pk} / f_s$$

όπου ο συντελεστής  $f_s$  παίρνει τιμές μεταξύ 1.3-1.5 ανάλογα τον τύπο του επιχώματος και την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής (π.χ. 1.3 για καλά κατανοητές συνθήκες εδάφους ή προσωρινές εργασίες, 1,5 για μακροχρόνιες μόνιμες εργασίες). Η τιμή του  $c'_{des}$  δεν θα είναι μεγαλύτερη από 5kPA.

➤ Συνεκτικά εδάφη (με  $PI > 25\%$ )

Στην περίπτωση συνεκτικού πλάστιμου εδάφους με  $PI > 25\%$ , διεξάγονται δοκιμές άμεσης διάτμησης μεγάλης μετατόπισης (είτε δοκιμές διάτμησης δακτυλίου είτε επαναλαμβανόμενες τυπικές δοκιμές άμεσης διάτμησης). Επιλέγεται  $\phi'_{des}$  που εξαρτάται από το πόσο πιθανό είναι να εμφανιστούν άλλες δυνάμεις κατά τη διάρκεια ζωής του πρανούς. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν επιφάνειες διάτμησης, ή είναι πιθανό να αναπτυχθούν μετατοπίσεις (ή έχουν ήδη αναπτυχθεί) και μπορούν να προκαλέσουν μείωση της διατμητικής αντοχής (ή έχουν ήδη προκαλέσει μείωση διατμητικής αντοχής) τότε οι τιμές σχεδιασμού είναι:

$$\tan \varphi'_{des} = \tan \varphi'_r$$

$$c'_{des} = 0$$

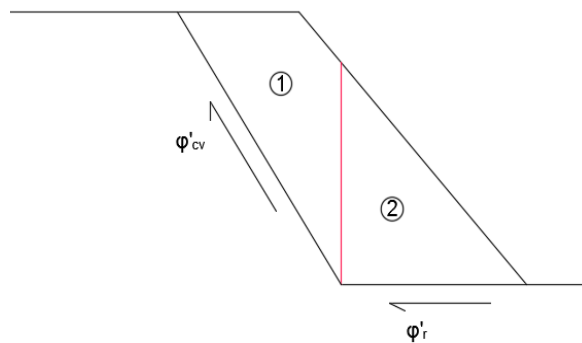
Το ενδεχόμενο πιθανής αστοχίας εξετάζεται προσεκτικά.

Όταν οι μετατόψεις είναι μικρές και δεν έχουν ανιχνευθεί προϋπάρχουσες επιφάνειες διάτμησης, τότε οι τιμές  $\varphi'_{des}$ ,  $c'_{des}$  ως εξής:

$$\tan \varphi'_{des} = \tan \varphi'_{cv}$$

$$c'_{des} = c'_{cv} \quad (\text{συνήθως ισούται με } 0)$$

Σε περιπτώσεις όπως, σε μια μετατόπιση λόγω φορτίου, ο συντελεστής  $\varphi'_{pk}$  μπορεί να αντικαταστήσει το  $\varphi'_{cv}$ . Είναι δυνατό να χρησιμοποιείται διαφορετικό  $\varphi'_{des}$  σε κάθε σφήνα όπως στο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16: Διαφορετική κατανομή γωνίας  $\varphi'$  στα όρια σφηνών (άργιοι υψηλής πλαστικότητας) (πηγή: HA 68/94)

Οι παράμετροι τριβής της διεπιφάνειας  $\varphi'_{int}$ ,  $c'_{int}$  λαμβάνονται είτε από τις συστάσεις του κατασκευαστή, όπως προκύπτει από το πιστοποιητικό BBA, είτε από μια δοκιμή άμεσης διάτμησης για περιπτώσεις διάτμησης εδάφους πάνω από ένα στρώμα οπλισμού που θα προκαλέσει διάτμηση στην επιφάνεια του οπλισμού. Τα μέρη διάτμησης γεμίζονται με χώμα. Ορίζεται ο συντελεστής ολίσθησης στη διεπιφάνεια,  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\sigma'_v \tan \varphi'_{int} + c'_{int}}{\sigma'_v \tan \varphi'_{des} + c'_{des}}$$

όπου:  $\sigma'_v$  = κατακόρυφη ενεργός τάση

Κατά τη διάρκεια ζωής του επιχώματος, οι πιέσεις πόρων ενδέχεται να αλλάζουν. Επομένως, πρέπει να επιλέγονται συντηρητικές τιμές πίεσης νερού πόρων. Οι πιέσεις πόρων  $U_1$ ,  $U_2$  στον Πίνακα 2.1 έχουν υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο πίεσης νερού πόρων,  $r_u$  (Bishop and Morgenstern, 1960):

$$r_u = \frac{u}{\gamma \times h}$$

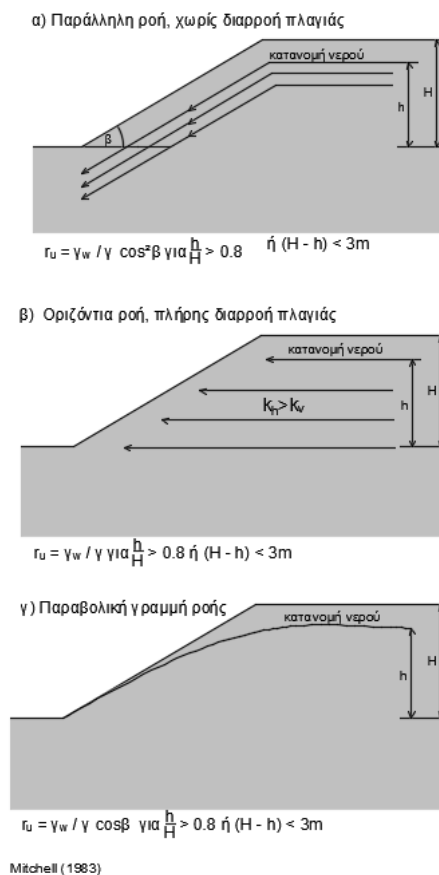
όπου:  $u$  = πίεση πόρων ( $\text{kN/m}^2$ )

$\gamma$  = ειδικό βάρος του εδάφους ( $\text{kN/m}^3$ )

$h$  = βάθος υπερπίεσης ακριβώς πάνω από το εν λόγω σημείο (m)

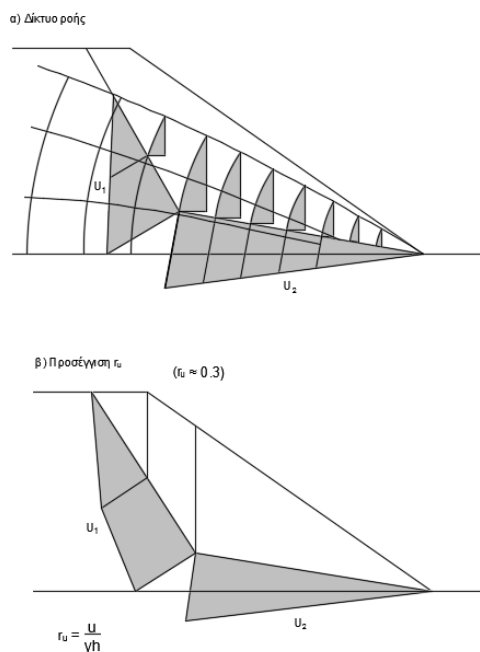
Στο Σχήμα 2.17 απεικονίζονται ορισμένες συνθήκες ροής με τις αντίστοιχες εκφράσεις  $r_u$ .

Επίσης, εκφράσεις για  $U_1$  και  $U_2$  μπορούν να ληφθούν όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18 με τη βοήθεια ενός δίχτυ ροής όπου αθροίζονται όλες οι πιέσεις νερού για κάθε σφήνα.



Σχήμα 2.17: Τιμές για  $r_u$  για τοπικές συνθήκες ροής (πηγή: HA 68/94)





Σχήμα 2.18: Σύγκριση μεταξύ τυπικού δικτύου ροής και προσέγγισης  $r_u$  (πηγή: HA 68/94)

Η τιμή σχεδιασμού για τη δύναμη οπλισμού ανά μέτρο πλάτους  $P_{des}$ , πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες εγκατάστασης και τις αναμενόμενες συνθήκες εδάφους και υπόγειων υδάτων. Υπολογίζεται με τη βοήθεια της μακροχρόνιας χαρακτηριστικής αντοχής  $P_c$ , που λαμβάνεται από το εργοστάσιο και ορισμένους συντελεστές ως εξής:

$$P_{des} = \frac{P_c}{f_d \times f_e \times f_m}$$

όπου:  $P_c$  = χαρακτηριστική αντοχή (σε kN/m) που αντιστοιχεί στην απαιτούμενη διάρκεια ζωής και τη θερμοκρασία σχεδιασμού

$f_d$  = συντελεστής μηχανικής βλάβης πριν και κατά την εγκατάσταση

$f_e$  = συντελεστής περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού (χημική και βιολογική)

$f_m$  = συντελεστής κάλυψης μεταβλητών και αβεβαιοτήτων ως προς την αντοχή του υλικού (συμπεριλαμβανομένης της παρέκτασης δεδομένων)

Οι τιμές για  $P_c$ ,  $f_d$ ,  $f_e$ ,  $f_m$  μπορούν να ληφθούν από το πιστοποιητικό BBA ή τον κατασκευαστή. Περισσότερες οδηγίες υπάρχουν στο CIRIA RP396.

Τα πιστοποιητικά έγκρισης κατασκευαστικών προϊόντων BBA προέρχονται από τον ανεξάρτητο βρετανικό οργανισμό British Board of Agreement και παρέχουν μια σειρά από υπηρεσίες όπως πιστοποιητικά Agreement, αναφορές δοκιμών, εκθέσεις αξιολόγησης,

πιστοποίηση προϊόντων και συστημάτων διαχείρισης, σήμανση CE, έλεγχο παραγωγής κ.ά.

Για μεταλλικό οπλισμό, το  $P_c$  αντικαθίσταται από  $(\sigma_y, A)$  όπου  $\sigma_y$  είναι η αντοχή διαρροής ή σχεδιασμού του χάλυβα και το  $A$  είναι η εγκάρσια τομή του οπλισμού ανά μέτρο πλάτους κλίσης. Η τιμή του  $f_e$  πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη και τη διάβρωση.

Στις περιπτώσεις όπου ο οπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί είναι αγκύρια, η αντοχή σχεδιασμού ανά μέτρο πλάτους κλίσης,  $P_{des}$ , υπολογίζεται από την αντοχή διαρροής ή σχεδιασμού που λαμβάνεται από τον προμηθευτή και ορισμένους παράγοντες ως εξής:

$$P_{des} = \frac{\sigma_y \times A}{f_d \times f_e \times f_m \times S_h}$$

όπου:  $\sigma_y$  = αντοχή διαρροής

$A$  = εμβαδόν διατομής της ράβδου

$S_h$  = οριζόντια απόσταση αγκυρίων

Σε περιπτώσεις όπου τα αγκύρια δεν είναι κατασκευασμένα από χάλυβα (π.χ. ένα πολυμερές προϊόν) τότε ο όρος  $(\sigma_y, A)$  μπορεί να αντικατασταθεί από τη μακροχρόνια αντοχή του προϊόντος που αναφέρεται στο BBA πιστοποιητικό ή από τον κατασκευαστή.

Όταν μια πιθανή επιφάνεια αστοχίας τέμνει ένα στρώμα οπλισμού ή σειρά αγκυρίων, η δύναμη που κινητοποιείται θεωρείται ότι είναι η μικρότερη από την δύναμη σχεδιασμού που ορίζεται παραπάνω. Στην πιο γενική του μορφή, η δύναμη εξόλκευσης κάθε στρώματος οπλισμού δίνεται από:

$$P_{des} = \lambda_p \times L_e \times (\sigma'_n \tan \varphi'_{des} + c'_{des})$$

όπου:  $\lambda_p$  = ένας αδιάστατος παράγοντας έλξης

$L_e$  = το μήκος του τύπου ενίσχυσης που εκτείνεται πέρα από τον κρίσιμο μηχανισμό αστοχίας

$\sigma'_n$  = η ορθή ενεργός τάση που ενεργεί στην ενίσχυση πέρα από την επιφάνεια αστοχίας.

#### ➤ Γεωφάσματα

Οι τιμές του συντελεστή εξόλκευσης,  $\lambda_p$  και της ορθής ενεργού τάσης,  $\sigma'_n$ , για τα γεωφάσματα υπολογίζονται ως εξής:

$$\lambda_p = 2\alpha$$

$$\sigma'_n = \sigma_v'$$

όπου:  $\alpha$  = ο συντελεστής ολίσθησης της διεπιφάνειας και το  $\sigma_v'$  = η μέση κατακόρυφη ενεργός τάση που ενεργεί στο επίπεδο του οπλισμού (=  $\gamma z [1 - r_u]$ )

➤ Γεωπλέγματα

Για τα γεωπλέγματα, η εξόλκευση εξαρτάται από την πίεση που ασκείται στα εγκάρσια μέλη και όχι με την ολίσθηση της διεπιφάνειας:

$$\lambda_p = 2\alpha'$$

$$\sigma'_n = \sigma_v' \text{ (όπως για τα γεωυφάσματα)}$$

όπου:  $\alpha'$  = είναι ο "συντελεστής συμπεριφοράς"

Οι τιμές του  $\alpha'$  μπορούν είτε να ληφθούν από το πιστοποιητικό BBA, να μετρηθούν σε δοκιμές πεδίου είτε να υπολογιστούν με τη μέθοδο που δίδεται στο Jewell (1990).

➤ Λωρίδες

Οι τιμές του συντελεστή εξόλκευσης  $\lambda_p$  και της ορθής ενεργού τάσης,  $\sigma'_n$ , για λωρίδες υπολογίζονται ως:

$$\lambda_p = 2\alpha b$$

$$\sigma'_n = \sigma_v'$$

όπου:  $\alpha$  = ο συντελεστής ολίσθησης διεπιφάνειας

$b$  = το πλάτος ενίσχυσης ανά μονάδα πλάτους πρανούς

$\sigma_v'$  = η μέση κατακόρυφη ενεργός τάση στον οπλισμού (=  $\gamma z [1 - r_u]$ ).

➤ Αγκύρια

Οι τιμές του συντελεστή εξόλκευσης,  $\lambda_p$  και της ορθής ενεργού τάσης,  $\sigma'_n$ , για τα κεκλιμένα αγκύρια του εδάφους να λαμβάνονται ως:

$$\lambda_p = \pi \times d_{hole} \times \frac{a}{S_h}$$

$\sigma'_n$  = μέση ακτινική ενεργός τάση

όπου:  $d_{hole}$  = η διάμετρος της οπής ενέματος γύρω από το αγκύριο (=  $d_{bar}$  για αγκύρια χωρίς ενέματα)

$\alpha$  = ο συντελεστής ολίσθησης διεπιφάνειας

$S_h$  = η οριζόντια απόσταση των αγκυρίων

Προτείνεται οι δοκιμές εξόλκευσης να γίνονται επί τόπου με αργό ρυθμό ώστε να αποφεύγεται η επιρροή από την πίεση των πόρων και έχοντας κατανοήσει καλά τις οριακές συνθήκες, διότι υπάρχει περίπτωση να υποτιμηθεί η πραγματική αντοχή του κοκκώδους εδάφους και να υπερεκτιμηθεί του αργιλώδους εδάφους.

Όταν  $c'_{des} = 0$ , το  $\alpha$  ορίζεται ως:

$$\alpha = \tan\varphi'_{int} / \tan\varphi'_{des}$$

Εάν  $c'_{des} \neq 0$  (δηλαδή για συνεκτικά εδάφη με  $PI < 25\%$  χρησιμοποιώντας τη μέθοδο  $f_s$ , τότε ο συντελεστής  $\alpha$  υπολογίζεται ως:

$$\alpha = \frac{\sigma'_v \tan\varphi'_{int} + c'_{int}}{\sigma'_v \tan\varphi'_{des} + c'_{des}}$$

Για να είναι σταθερή η τιμή του  $\alpha$  για διαφορετικές τιμές  $\sigma'_v$ , κατασκευάζεται μια προσαρμοσμένη γραμμή που να διαπερνά όλα τα σημεία από τη δοκιμή διάτμησης διεπιφάνειας και για το σχετικό εύρος τάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.21:

$$\alpha = (\tan\varphi'_{int} / \tan\varphi'_{des}) = (c'_{int} / c'_{des})$$

Όταν το έδαφος είναι συνεκτικό με  $PI > 25\%$  τότε το  $c'_{int} = 0$ . Η τιμή του  $\varphi'_{int}$  εξαρτάται από μια απομένουσα γωνία τριβής διεπιφάνειας για αυτά τα εδάφη, εκτός εάν αποδεικνύεται πως οι σχετικές μετακινήσεις μεταξύ οπλισμού και εδάφους εργασίας δεν επαρκούν για να αναπτύξουν δυνάμεις. Λαμβάνεται υπόψη το εύρος του οπλισμού και μια πιθανή αστοχία.

Σε ειδικές περιπτώσεις όπου μία στρώση οπλισμού βρίσκεται στη διεπιφάνειας δύο τύπων εδάφους (π.χ. στη βάση της ζώνης ενίσχυσης) τότε χρησιμοποιούνται οι τιμές  $\varphi'_{int}$  και για τους δύο τύπους. Επίσης, εξετάζεται η περίπτωση τοποθέτησης ενός λεπτού στρώματος κοκκώδους υλικού (π.χ. άργιλος) κάτω και πάνω από κάθε στρώση οπλισμού, ή η χρήση διογκωτικού ενέματος στα αγκύρια.

Όταν οι οπλισμοί δεν "τυλίγονται" ή στερεώνονται στην μπροστινή όψη του πρανούς (Σχήμα 2.19α), τότε λαμβάνεται υπόψη η εξόλκευση. Ομοίως, για αγκύρια, εάν η μπροστινή όψη δεν στερεώνεται με σκυρόδεμα ή με άλλα μέσα (Σχήμα 2.19α), τότε ελέγχεται η επάρκεια της πλάκας επένδυσης μπροστινής όψης.

Σε περιπτώσεις όπου η βάση της κάτω σφήνας ολισθαίνει πάνω σε μια στρώση οπλισμού (π.χ.  $\theta_2=0$  για οριζόντια τοποθετημένη ενίσχυση ή  $\theta_2=-\delta$  για αγκύρια εδάφους), τότε ενσωματώνεται στους όρους  $R_2'$  και  $K_2$  ο συντελεστής ολίσθησης βάσης  $\lambda_s$ , (Σχήμα 2.3) και οι όροι γίνονται ως εξής:

$$R_2' = \lambda_s \times N_2' \times \tan \varphi'_{des}$$

$$K_2 = \lambda_s \times c'_{des} \times m$$

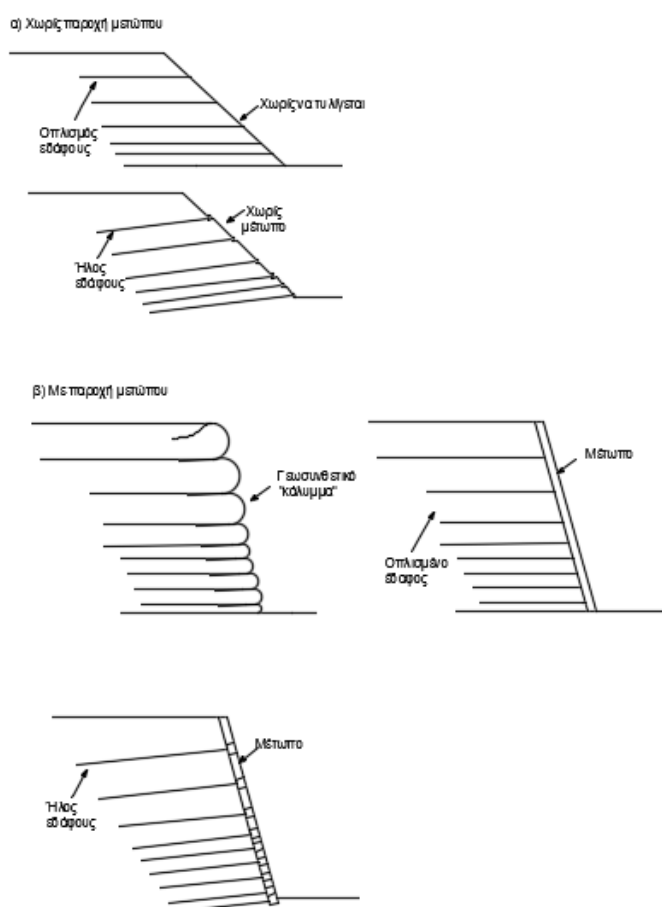
Οι κατάλληλες τιμές  $\lambda_s$  για κάθε τύπο ενίσχυσης είναι οι εξής:

Γεωφάσματα:  $\lambda_s = \alpha$

Γεωπλέγματα:  $\lambda_s = \alpha$

Ενίσχυση με λωρίδα:  $\lambda_s = \alpha b + (1-b)$

Αγκύρια:  $\lambda_s = (\alpha d_{hole} / S_h) + (1-d_{hole} / S_h)$



Σχήμα 2.19: Λεπτομέρειες μπροστινού μετώπου (πηγή: HA 68/94)

Όταν υπάρχει ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο στην κορυφή του πρανούς είτε θα υπολογιστούν οι όροι  $Q_1$  και  $Q_2$  (μόνο όταν το όριο μεταξύ σφηνών έχει κατακόρυφη διεύθυνση) όπως ορίζεται στο Σχήμα 2.14 και στον Πίνακα 2.1, είτε θα προστεθεί μια επιπλέον τιμή στο ύψος του πρανούς που το άθροισμά τους θα αντικαταστήσει το  $H$  στους υπολογισμούς. Δηλαδή:

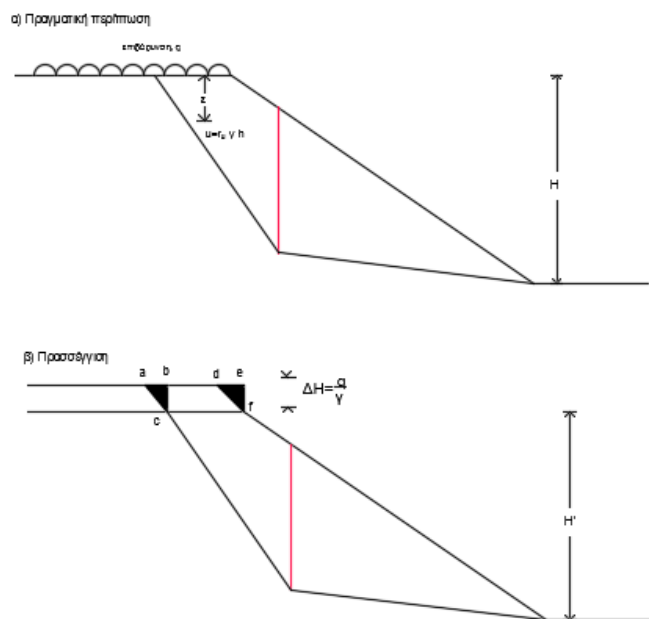
$$H' = H + (q/\gamma)$$

όπου:  $H$  = πραγματικό ύψος κλίσης (m)

$q$  = πρόσθετο φορτίο (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = ειδικό βάρος υλικού επίχωσης (kN/m<sup>3</sup>)

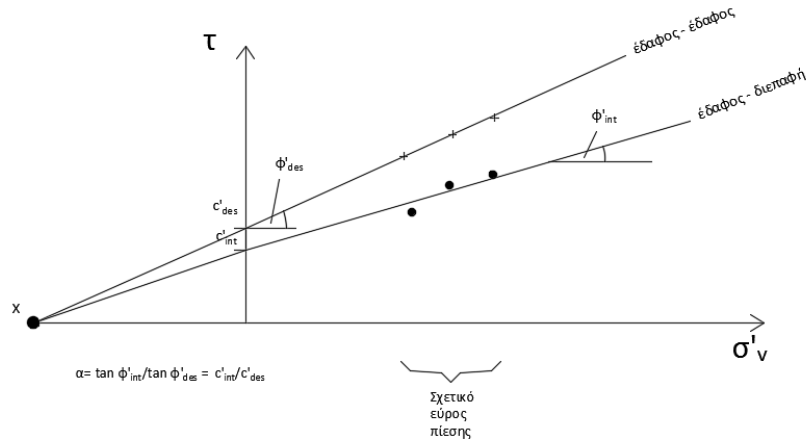
Η παραπάνω τιμή θα υπερεκτιμήσει συντηρητικά τις πιέσεις των πόρων, διότι  $u = \gamma \times z \times r_u$  και το  $z$  μετράται από το  $H'$  αντί του  $H$ , αλλά μπορεί να υπερεκτιμήσει συντηρητικά την επίδραση του  $c'$ , διότι προκύπτει πως η σφήνα 1 ολισθαίνει σε μεγαλύτερη επιφάνεια από ό,τι στην πραγματικότητα. Ένα μικρό σφάλμα εισάγεται επίσης στην έκφραση για το  $W_1$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20.



Σφάλματα:

1. Υπερεκτίμηση του  $K$ , κατά μήκος  $\overline{ac}$ . (μη συντηρητικό)
2. Υπερεκτίμηση του  $u$  από  $(r_u \gamma \Delta H)$ . (συντηρητικό)
3. Υποπίμηση του φορτίου επιβάρυνσης από  $(def - abc) \gamma$ . (μη συντηρητικό)

Σχήμα 2.20: Επιπρόσθετο φορτίο (πηγή: HA 68/94)



Σχήμα 2.21: Διάγραμμα εύρεσης του α σε περίπτωση μη μηδενικής συνοχής (πηγή: ΗΑ 68/94)

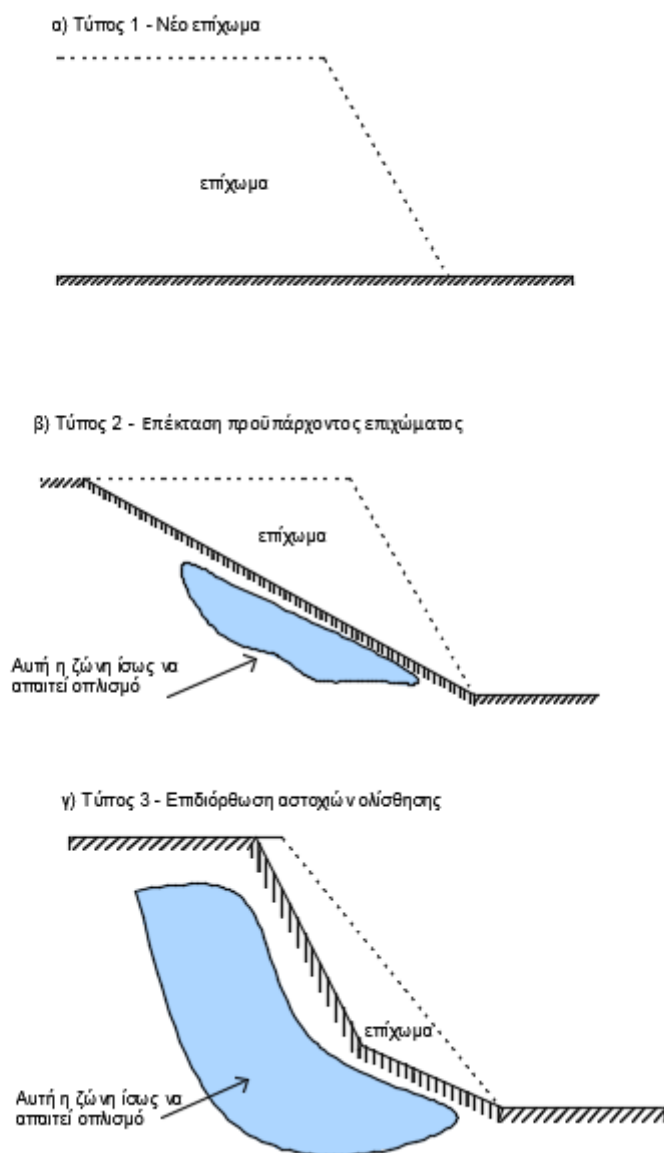
Πίνακας 2.1: Αλγεβρικές σχέσεις

	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3
W <sub>1</sub>	$\frac{1}{2} \times \gamma \times [(a+b)^2 \times \cot\theta_1 - a^2 \times \cot\beta + v \times k]$	$\frac{1}{2} \times \gamma \times (H-Y)^2 \times \cot\theta_1 + \frac{1}{2} \times \gamma \times (v \times k - t \times z)$	$\frac{1}{2} \times \gamma \times b \times u$
W <sub>2</sub>	$\frac{1}{2} \times \gamma \times b \times X$	$\frac{1}{2} \times \gamma \times [2 \times X \times H - X^2 \times \tan\theta_2 - H^2 \times \cot\beta + t \times z]$	$\frac{1}{2} \times \gamma \times b \times X$
U <sub>1</sub>	$\frac{1}{2} \times r_u \times \gamma \times [d \times (e+w) + (d+b) \times f]$	$\frac{1}{2} \times r_u \times \gamma \times (g+w) \times (H-Y+z)$	$\frac{1}{2} \times r_u \times \gamma \times b \times u \times \sec\theta_1$
U <sub>2</sub>	$\frac{1}{2} \times r_u \times \gamma \times b \times m$	$\frac{1}{2} \times r_u \times \gamma \times [(H-Y) \times (X+t) \times \sec\theta_2 + j \times m + z \times t \times \sec\theta_2]$	$\frac{1}{2} \times r_u \times b \times m$
K <sub>1</sub>	$c'_1 \times (e + f + w) = c'_1 \times (g+w)$	$c'_1 \times (g + w)$	$c'_1 \times [u \times \sec\theta_1]$
K <sub>2</sub>	$c'_2 \times m$	$c'_2 \times m$	$c'_2 \times m$
Q <sub>1</sub>	$q \times (k + w \times \cos\theta_1)$	$q \times (s + w \times \cos\theta_1)$	-
Q <sub>2</sub>	-	$q \times t$	-

<b>a</b>	$(H - X \times \tan\beta)$	<b>m</b>	$\sqrt{(X^2+Y^2)}$
<b>b</b>	$(H - Y - a) = X \times \tan\beta - Y$	<b>s</b>	$(a + b) \times \cot\theta_1$
<b>d</b>	$k \times \tan\theta_1$	<b>t</b>	$(k - s)$
<b>e</b>	$k \times \sec\theta_1$	<b>u</b>	$b/(\tan\theta_1 - \tan\beta)$
<b>f</b>	$[(a + b)/\sin\theta_1] - e = (g - e)$	<b>v</b>	$k/(\cot i - \cot\theta_1)$ [if $i = 0$ , then $v = 0$ ]
<b>g</b>	$s \times \sec\theta_1 = (a + b)/\sin\theta_1$	<b>w</b>	$v/\sin\theta_1$
<b>j</b>	$t \times \tan\theta_2$	<b>z</b>	$t \times \tan i$
<b>k</b>	$[(a+b) \times \cot\theta_1] - [a \times \cot\beta] = (s + t)$		

Διακρίνονται τρεις τύποι επιχώματος (σχήματα 2.22 α, β και γ, αντίστοιχα):

- Τύπος 1: επιχώματα εδρασμένα σε οριζόντιο έδαφος
- Τύπος 2: επιχώματα ενσωματωμένα σε υπάρχουσες ήπιες πλαγιές επιχώματος
- Τύπος 3: επιδιόρθωση αστοχιών ολίσθησης



Σχήμα 2.22: Τύποι επιχωμάτων (πηγή: HA 68/94)

Για τον υπολογισμό της συνολικής δύναμης οπλισμού (αριθμός των στρώσεων οπλισμού  $\times$  αντοχή ανά στρώση) και των διαστάσεων των οπλισμών  $L_T$  και  $L_B$ , (Σχήμα 2.23 α) εξετάζονται διαφορετικοί παράγοντες και λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες τρεις γενικές έννοιες:

- Ο μηχανισμός  $T_{max}$

Με χρήση υπολογιστή ή άλλων μέσων εντοπίζεται ο κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας,



δηλαδή εκείνος που απαιτεί τη μεγαλύτερη δύναμη οπλισμού (δηλ.  $T_{tot} = T_{max}$ ). Αυτός ο κρίσιμος μηχανισμός είναι μοναδικός και βάσει αυτού θα υπολογιστεί η αναγκαία ποσότητα οπλισμού. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται "μηχανισμός  $T_{max}$ ". Ο ελάχιστος αριθμός στρώσεων οπλισμού,  $N$  που απαιτείται δίνεται από τη σχέση  $T_{max}/P_{des}$ , στρογγυλοποιημένος στον επόμενο ακέραιο. Με τη βοήθεια αυτού του μηχανισμού καθορίζεται το μήκος της ζώνης ενίσχυσης στην κορυφή του πρανούς,  $L_T$ . (Σχήμα 2.23 β). Το μήκος  $L_T$  επιλέγεται έτσι ώστε η ανώτατη στρώση οπλισμού του μηχανισμού  $T_{max}$  να έχει μόλις το επαρκές μήκος,  $L_{e1}$  για να κινητοποιήσει την πλήρη δύναμη εξόλκευσης.

Υπολογίζεται η παράμετρος  $K$  ως εξής:

$$K = \frac{T_{max}}{0.5 \times \gamma \times H^2}$$

Σημείωση: η τιμή του  $K$  δεν είναι ισοδύναμη με τον ενεργό συντελεστή Rankine,  $K_a$

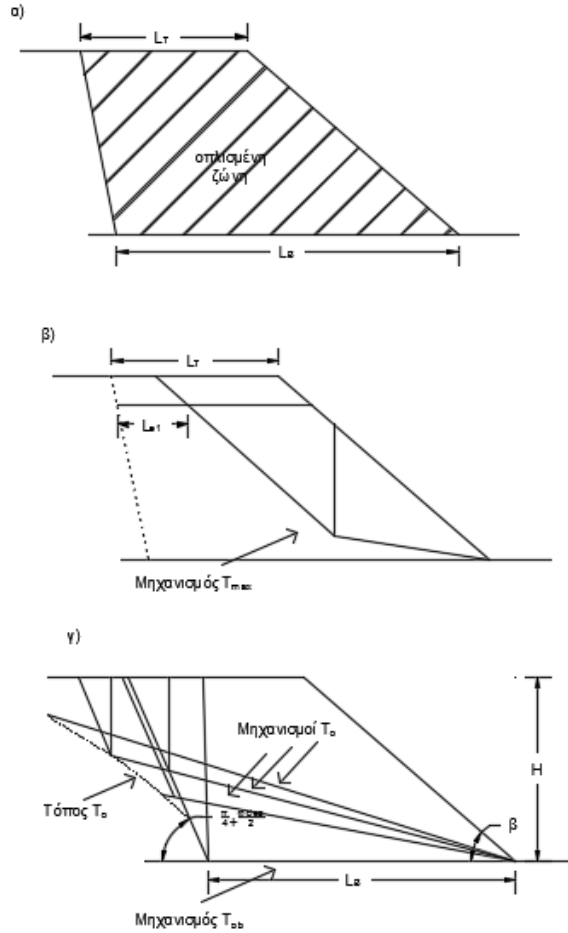
Στην περίπτωση που  $\theta_2=0$  όπου η ολίσθηση της κάτω σφήνας γίνεται πάνω από ένα οριζόντιο στρώμα οπλισμού, τότε οι τιμές των  $R_2'$  και  $K_2$  (Σχήμα 2.14) πρέπει να μειωθούν από το συντελεστή ολίσθησης βάσης,  $\lambda_s=0,8$ . Σημειώνεται ότι για  $\theta_2 \neq 0$ , τότε το  $\lambda_s = 1$ .

#### ➤ Ο μηχανισμός $T_{ob}$

Με τη βοήθεια του μηχανισμού  $T_{ob}$  καθορίζεται το μήκος  $L_B$  που απαιτείται για τη ζώνη οπλισμού στη βάση. Δεδομένου ότι υπάρχει ένα ικανό υλικό στήριξης κάτω από την οπλισμένη ζώνη, ο βασικός μηχανισμός ολισθαίνει προς τα εμπρός στο βασικό στρώμα του οπλισμού και ονομάζεται μηχανισμός  $T_{ob}$ .

Γενικότερα, το μήκος της ζώνης οπλισμού πρέπει να είναι τέτοιο ώστε κανένας μηχανισμός δύο σφηνών, που να απαιτεί οπλισμό, να μην μπορεί να περάσει εντελώς έξω από αυτό. Ένας μηχανισμός δύο σφηνών που δεν απαιτεί καθόλου οπλισμό ονομάζεται «μηχανισμός  $T_o$ ». Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23 γ, υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί  $T_o$ . Αυτά οριοθετούνται από έναν "τόπο  $T_o$ " (ο τόπος που αντιστοιχεί στη θέση του κόμβου  $X, Y$  των μηχανισμών  $T_o$ ) πέρα από τον οποίο δεν υπάρχουν περαιτέρω μηχανισμοί  $T_o$ . Είναι βολικό να εξεταστεί ο μηχανισμός  $T_o$  στο σημείο όπου ο τόπος  $T_o$  τέμνει τη βάση. Αυτός ο μηχανισμός  $T_o$ , ο οποίος ενσωματώνει οριζόντια ολίσθηση στη βάση, ονομάζεται "μηχανισμός  $T_{ob}$ ". Ο μηχανισμός  $T_{ob}$  είναι απλός να προσδιοριστεί εύκολα με χρήση υπολογιστή ή με άλλα μέσα. Η κρίσιμη τιμή του  $\phi_1$ , για τον μηχανισμό  $T_{ob}$  λαμβάνεται ως  $\Pi/4 + \phi'_{des}/2$ , εκτός εάν  $i > 0$  ή  $X < H/\tan\beta$  όπου πρέπει να γίνει ειδική αναζήτηση για το  $\phi_1$ ,

το μήκος  $L_B$  θεωρείται ίσο με το πλάτος βάσης του μηχανισμού  $T_{ob}$  (Σχήμα 2.23 γ). Δεδομένου ότι  $\theta_2 = 0$  για τον μηχανισμό  $T_{ob}$  (εξ ορισμού), η τιμή του  $l_s$  θα πρέπει να χρησιμοποιείται στη γενική εξίσωση.



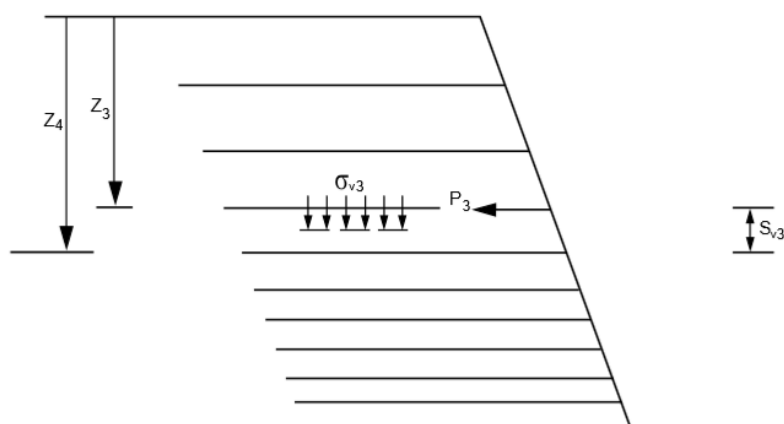
Σχήμα 2.23: Γενικές έννοιες της μεθόδου οριζόντιου σχεδιασμού (πηγή: HA 68/94)

➤ Βέλτιστη κάθετη απόσταση

Για αποφυγή αστοχίας, η οριακή ισορροπία πρέπει να ικανοποιείται για εξωτερική ισορροπία αλλά και για εσωτερική ισορροπία. Προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική πίεση σε ένα μόνο στρώμα σπλισμού (Σχήμα 2.24) και πιθανή αστοχία, αποδεικνύεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη απόσταση,  $S_v$ , στρώσεων ίσης αντοχής του σπλισμού πρέπει να περιορίζεται σε:

$$S_v = \frac{P_{des}}{K \times \gamma \times z}$$

όπου:  $z$ = το βάθος έως το μεσαίο σημείο μεταξύ των στρωμάτων (Σχήμα 2.24).



$$P_3 = \frac{1}{2} \gamma K (z_i^2 - z_{i-1}^2) \\ = \sigma_{v3} K S_{v3}$$

Σχήμα 2.24: Εσωτερική ισορροπία (πηγή: HA 68/94)

Προκειμένου να διατηρηθεί γεωμετρική ομοιότητα σε ολόκληρο το πρηνές, για να ικανοποιηθούν οι μηχανισμοί  $T_{max}$ , χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση για βέλτιστα διαστήματα στρώσης (υποθέτοντας ότι όλα τα στρώματα οπλισμού έχουν την ίδια δύναμη,  $T_{max} / N$ ):

$$z_i = H \times \sqrt{\frac{i-1}{N}}$$

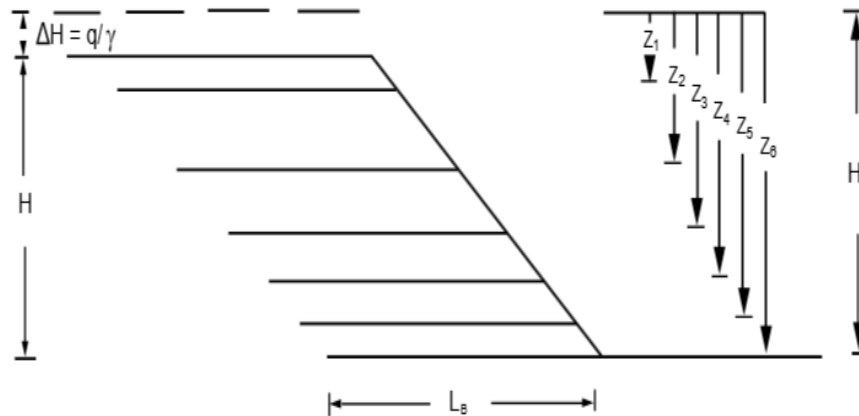
όπου:  $z_i$  = βάθος κάτω από το επίπεδο κορυφής στο επίπεδο  $i^{th}$

$H$  = ύψος επιχώματος

$N$  = συνολικός αριθμός στρωμάτων οπλισμού

Εξάιρεση στον παραπάνω κανόνα αποτελεί η ανώτερη στρώση οπλισμού. Θεωρητικά, το ανώτερο στρώμα οπλισμού πρέπει να εισαχθεί σε μηδενικό βάθος, αλλά για πρηνή με οριζόντια άνω επιφάνεια (δηλ.  $i=0$ ) αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα μηδενική δύναμη εξόλκευσης. Συνεπώς, προτείνεται η εισαγωγή της πρώτης στρώσης οπλισμού να είναι σε βάθος,  $z_1 = 0,5 z_2$  σε τέτοιες περιπτώσεις. Για την περίπτωση επικλινών επιχωμάτων (δηλ.  $i > 0$ ) το πρώτο στρώμα μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε μεταξύ 0 και  $0,5 z_2$ . Δεδομένου ότι η  $(N + 1)^{th}$  στρώση οπλισμού εισάγεται σε βάθος  $H$ , στην πραγματικότητα θα υπάρχουν πάντα  $(N + 1)$  στρώσεις οπλισμού, αντί για  $N$ . Αυτή η επιπλέον στρώση οπλισμού, ωστόσο, δεν θεωρείται υπερβολικός σχεδιασμός.

Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει επιπρόσθετο φορτίο, η τιμή του  $H'$  ( $= H + q/\gamma$ ) χρησιμοποιείται στην εξίσωση αντί για  $H$  και οι τιμές του  $z_i$  μετρώνται από το  $H'$  και όχι από την πραγματική κορυφή του (Σχήμα 2.25). Το επιπλέον φορτίο πρέπει να περιορίζεται σε  $\Delta H = z_1$ .



Σχήμα 2.25: Κάθετες αποστάσεις με επιφόρτιση (πηγή: HA 68/94)

➤ Πρακτική κάθετη απόσταση

Οι αποστάσεις μεταξύ των στρώσεων που προκύπτουν δεν είναι σταθερές με το βάθος. Υπάρχει η δυνατότητα να εξορθολογιστούν σε πολλαπλάσια κάποιου πάχους στρώσης, όμως, αυτό θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη ποσότητα οπλισμού. Επιλέγεται οποιαδήποτε από τις δύο μεθόδους αρκεί να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- το βάθος έως το στρώμα οπλισμού  $i^{\text{th}}$  οπουδήποτε στην κλίση δεν υπερβαίνει την τιμή  $z_i$  που υπολογίζεται
- η απόσταση μεταξύ των στρωμάτων σε οποιοδήποτε βάθος δεν πρέπει να υπερβαίνει το  $P_{\text{des}}/(K\gamma z)$ , όπου το  $z$  είναι το βάθος στο μέσο της απόστασης.

Σχεδιασμός επιχωμάτων χτισμένων σε οριζόντιο έδαφος (Επίχωμα Τύπου I)

Τα βήματα της βασικής διαδικασίας σχεδιασμού είναι τα εξής:

1. Με τη βοήθεια υπολογιστή εκτελούνται αναζητήσεις για τους μηχανισμούς  $T_{\text{max}}$  και  $T_{\text{ob}}$ , χρησιμοποιώντας την κατάλληλη τιμή  $\lambda_s$ .
2. Επιλέγεται  $P_{\text{des}}$  και υπολογίζεται το  $N$ , στρογγυλοποιημένο στον επόμενο ακέραιο (όπου  $N$

=  $T_{\max}/P_{\text{des}}$ ). Υπολογίζεται το βάθος,  $z_1$  στο πρώτο στρώμα οπλισμού. Υπολογίζεται το μήκος εξόλκευσης,  $L_{e1}$ , στην πρώτη στρώση οπλισμού

3. Σχεδιάζονται οι μηχανισμοί  $T_{\max}$  και  $T_{ob}$  στο πρανές. Με τον σχεδιασμό του  $L_{e1}$  και διαβάζονται τα  $L_T$  και  $L_B$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23. (Εάν το  $L_T$  είναι μικρότερο από  $[L_B - X_c]$ , όπου  $X_c = H/\tan\beta$ , τότε το  $L_T$  είναι ίσο με το  $[L_B - X_c]$ , έτσι ώστε να προκύψει κατακόρυφο το πίσω όριο της ζώνης οπλισμού.) Σχεδιάζονται εξίσου όλοι οι άλλοι οπλισμοί

### Ελεγχοι

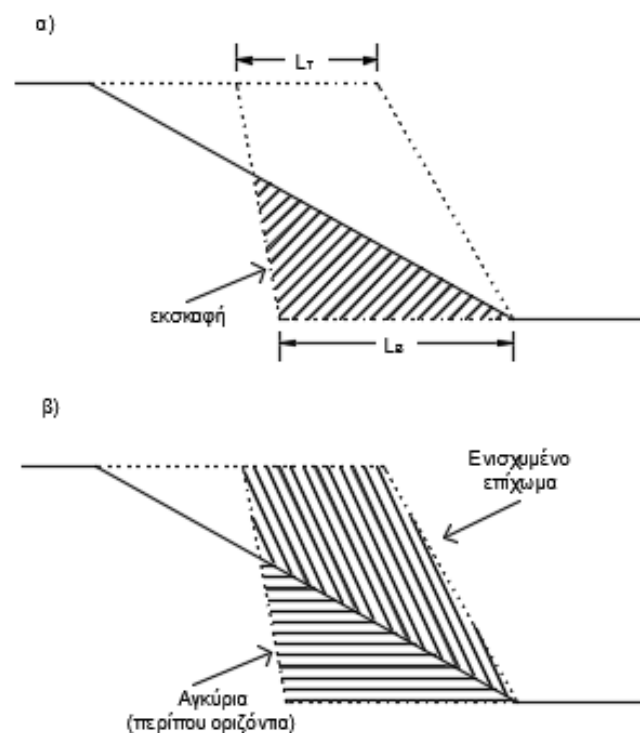
Οι έλεγχοι που πρέπει να γίνονται είναι οι εξής:

- i. Στις περιπτώσεις όπου τα μήκη  $L_T$  και  $L_B$  καθώς και οι αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών έχουν υπολογιστεί όπως περιγράφεται παραπάνω, ικανοποιούνται επαρκώς και οι ενδιάμεσοι μηχανισμοί. Ωστόσο, ενδέχεται να χρειαστεί έλεγχος ενδιάμεσων μηχανισμών σε ορισμένες περιπτώσεις.
- ii. Όταν ο οπλισμός δεν "τυλίγεται" στην μπροστινή όψη (όπως μπορεί να ισχύει για πρανή με πιο ήπια κλίση και  $c'_{\text{des}} > 0$ ), πρέπει να ελέγχεται η υποχώρηση της μπροστινής όψης. Είναι επίσης πιθανό να απαιτείται αυξημένη τιμή  $L_T$  σε αυτήν την περίπτωση.
- iii. Ελέγχεται το  $L_B$  ώστε να διαθέτει επαρκές μήκος εξόλκευσης στο κάτω μέρος του οπλισμού από τον μηχανισμό  $T_{\max}$  και, εάν όχι, επεκτείνεται το  $L_B$  ανάλογα. (Αυτό είναι πιθανό να είναι κρίσιμο μόνο για οπλισμό που απαιτεί μεγάλα μήκη εξόλκευσης, π.χ. ενίσχυση ταινίας με χαμηλή τιμή  $b$ ).
- iv. Εξετάζεται το υλικό κάτω από το πρανές και εάν είναι απαραίτητο ελέγχονται οι μηχανισμοί ολίσθησης στο σημείο αυτό.
- v. Ελέγχονται οι μετατοπίσεις και η συμβατότητα μεταξύ της ακαμψίας του οπλισμού και του εδάφους. Εξετάζονται, ακόμα, οι πιθανές επιπτώσεις της μετατόπισης του εδάφους λόγω διαστολής ή πάγου.
- vi. Ελέγχονται τα μέτρα αποστράγγισης ώστε να επαρκούν για τις αναμενόμενες πιέσεις πόρων και οι επιπτώσεις από τον κορεσμό ενδεχόμενων ρωγμών πίσω από την οπλισμένη περιοχή.
- vii. Προβλέπεται η προστασία από υπερϊώδη ακτινοβολία, πυρκαγιά, βανδαλισμό και δημιουργία βλάβστησης.

Επιχώματα Χτισμένα πάνω σε υπάρχουσες ήπιες πλαγιές επιχώματος (Επίχωμα τύπου 2)

Η επόμενη περίπτωση επιχωμάτων συναντάται συχνά σε σχέδια διεύρυνσης αυτοκινητοδρόμων και κατασκευάζονται σε υπάρχοντα πρανή με ήπια κλίση (Σχήμα 2.22 β). Το μήκος του οριζόντιου οπλισμού περιορίζεται στο δάκτυλο του. Εάν δεν είναι δυνατή η κατάληψη γης πέρα από το δάκτυλο του υφιστάμενου επιχώματος, τότε απαιτείται μια εκσκαφή στο υπάρχον επίχωμα (Σχήμα 2.26 α), ή θα πρέπει να τοποθετηθεί εναλλακτικό μέσο σταθεροποίησης του υπάρχοντος επιχώματος, όπως μια υβριδική κατασκευή που περιλαμβάνει τόσο οπλισμό εδάφους όσο και αγκύρια (Σχήμα 2.26 β).

Εφόσον υπάρχουν οι βασικοί μηχανισμοί στο πρανές, δεν τοποθετούνται πολλοί οπλισμοί στη νέα περιοχή πλήρωσης, διότι δεν αποτελεί μια οικονομική και βιώσιμη λύση καθώς θα προκύψουν περισσότεροι οπλισμοί από το  $T_{max}$ . Στην περίπτωση υβριδικής κατασκευής με οπλισμένο έδαφος και ζώνες με αγκύρια (Σχήμα 2.26 β), οι στρώσεις ή οι λωρίδες οπλισμού στο νέο υλικό πλήρωσης μπορούν να στερεωθούν μηχανικά ή επικαλύπτονται με αγκύρια εγκατεστημένα στο υπάρχον επίχωμα. Για αυτή την κατασκευή απαιτούνται να ληφθούν ειδικά μέτρα.

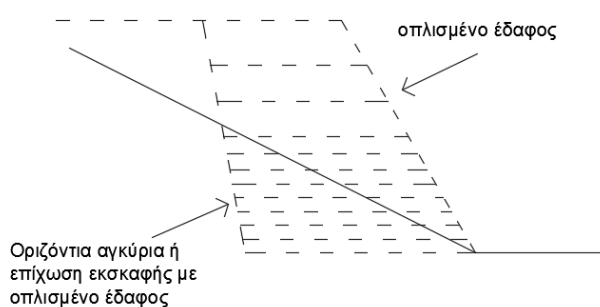


Σχήμα 2.26: Λεπτομέρειες του τύπου επιχώματος 2 με την υβριδική κατασκευή (πηγή: HA 68/94)

*Ειδικά μέτρα*

Τα ειδικά μέτρα για την υβριδική κατασκευή είναι τα εξής:

- i. Για τον μηχανισμό  $T_{max}$  χρησιμοποιούνται οι πιο κρίσιμες από τις παραμέτρους εδάφους
- ii. Προς διευκόλυνση της κατασκευής και του σχηματισμού αρμών, η κατακόρυφη απόσταση των αγκυρίων πρέπει να ταιριάζει με εκείνη των οριζόντιων στρώσεων ενίσχυσης του εδάφους. Η τιμή  $P_{des}$  των αγκυρίων πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση προσαρμόζοντας το  $d_{hole}$  και το  $S_h$  των αγκυρίων. Εάν η εξόλκευση ανά μέτρο του αγκυρίου ( $P_{des}/L_e$ ) είναι επίσης περίπου ίση με τον οριζόντιο οπλισμό του εδάφους και τα αγκύρια είναι περίπου οριζόντια, τότε τα όρια που ορίζονται από τα  $L_T$  και  $L_B$  για την οριζόντια ενίσχυση του εδάφους θα εφαρμοζόταν επίσης στα αγκύρια (Σχήμα 2.27).
- iii. Οι αντίστοιχες τιμές των  $\lambda_s$ ,  $\lambda_p$  θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στα αγκύρια και στις οπλισμένες εδαφικές ζώνες. Γενικά τα αγκύρια θα ελέγχουν το  $L_B$  και το οπλισμένο έδαφος θα ελέγχει το  $L_T$ . Στη συνέχεια, πρέπει να ελεγχθεί η βραχυπρόθεσμη σταθερότητα της υβριδικής κατασκευής. Αυτό μπορεί να είναι πιο κρίσιμο από τη μακροπρόθεσμη κατάσταση, για παράδειγμα στην περίπτωση ενός υφιστάμενου επιχώματος αργίλου όπου η μη στραγγιζόμενη αντοχή διάτμησης κοντά στην επιφάνεια επιχώματος μπορεί να είναι σχετικά μικρή. Συνιστάται η αντοχή των αγκυρίων που υπολογίζεται για βραχυπρόθεσμη σταθερότητας να βασίζεται σε προσεκτικά διεξαγόμενες βραχυπρόθεσμες δοκιμές εξόλκευσης που γίνονται επί τόπου.



Σχήμα 2.27: Υβριδική κατασκευή (πηγή: HA 68/94)

Επισκευή αστοχιών ολίσθησης (Επίχωμα τύπου 3)

Η επιδιόρθωση ενός αποτυχημένου πρανούς (Σχήμα 2.22 γ) που χρησιμοποιεί οπλισμό εδάφους μπορεί να πραγματοποιηθεί εφαρμόζοντας τη βασική διαδικασία και ελέγχους που

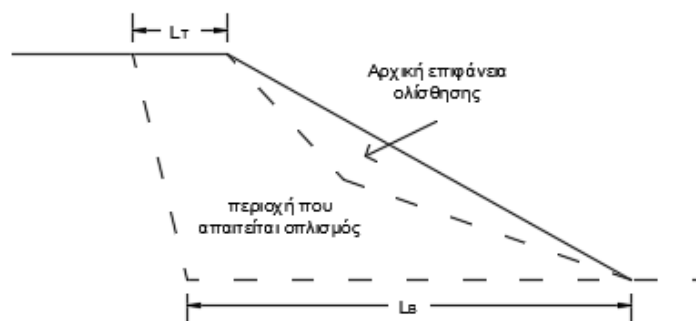
αναφέρονται στον τύπο επιχώματος 1 και τα ειδικά μέτρα στον τύπο επιχώματος 2 με το επιπρόσθετο βήμα της αναδρομικής ανάλυσης.

#### *Ανάλυση της αστοχίας ολίσθησης πίσω μέρος*

Επεξεργάζονται οι παράμετροι αντοχής του εδάφους μαζί με την πιθανή τιμή  $r_u$  για τη στιγμή της αστοχίας. Ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την αυτή ανάλυση πρέπει να βασίζεται στον μηχανισμό δύο σφηνών που ορίστηκε παραπάνω προκειμένου να ληφθούν συμβατές παράμετροι εδάφους. Ο συντελεστής ασφάλειας λαμβάνεται ίσος με 1. Εφόσον οι περισσότεροι αυτοκινητόδρομοι υπέστησαν ολίσθηση σε επιχώματα κατασκευασμένα σε άκαμπτους αργίλους υψηλής πλαστιμότητας, είναι αναγκαίο να ελεγχθεί και να αξιολογηθεί η ανάπτυξη προϋπαρχόντων διατμητικών επιπέδων.

#### *Επανόρθωση*

Ο επανασχεδιασμός βασίζεται στη βασική διαδικασία και στους ελέγχους που δίνονται στον τύπο επιχώματος 1 με μικρή τιμή συντελεστή (π.χ.  $f_s = 1.1$ ), για την κάλυψη πιθανών αβεβαιοτήτων κατά την ανάλυση. Ο οπλισμός που απαιτείται για την ανακατασκευή του πρανούς, είναι πιθανό να εκτείνεται σημαντικά πέρα από την αρχική επιφάνεια ολίσθησης (Σχήμα 2.28). Αυτό θα αποτρέψει τη μελλοντική αστοχία σε πιο βαθιές επιφάνειες ολίσθησης, εφόσον η αρχική ολίσθηση πιθανότατα είχε συμβεί σε επιφανειακές στρώσεις ή όπου οι πιέσεων νερού πόρων είχαν φτάσει. Απαιτείται μια υβριδική κατασκευή με αγκύρια και οπλισμό, όπως περιγράφεται παραπάνω, επειδή απαιτείται σημαντική επιπλέον εκσκαφή για την παροχή των απαραίτητων μηκών οπλισμού του εδάφους. Μια εναλλακτική λύση είναι να προστεθεί στον πόδα του πρανούς ένα επιπλέον βάρος, το οποίο να προστεθεί και στις εξισώσεις του Πίνακα 2.1, που θα χρησιμοποιηθεί και στο σχεδιασμό των μηχανισμών  $T_{max}$  και  $T_{ob}$

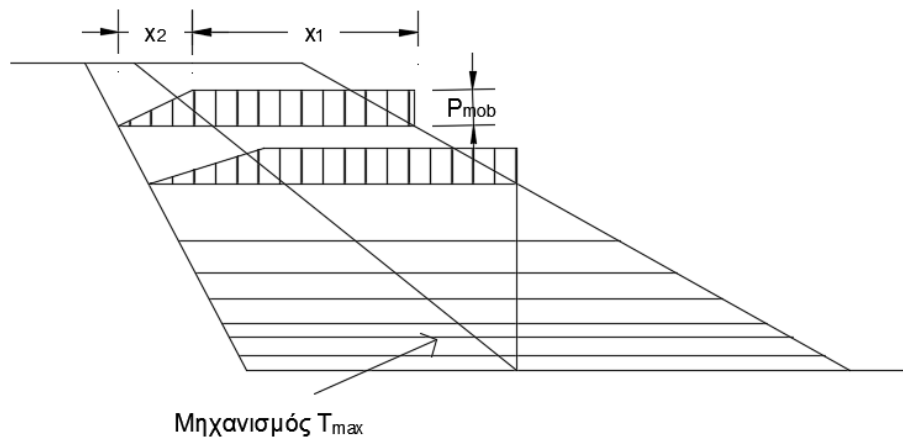


Σχήμα 2.28: Επιδιόρθωση αστοχίας ολίσθησης (πηγή: HA 68/94)



*Μετατοπίσεις μπροστινού μετώπου*

Υποθέτοντας το προφίλ της τάσης σε κάθε στρώμα οπλισμού (Σχήμα 2.29), εκτιμάται η μετατόπιση της μπροστινής όψης λόγω επιμήκυνσης του οπλισμού. Μια ομοιόμορφη τάση  $P_{mob}$  πρέπει να θεωρείται ότι υπάρχει κατά μήκος του οπλισμού που βρίσκεται εντός του μηχανισμού  $T_{max}$ , ο οποίος στη συνέχεια μειώνεται γραμμικά στο μηδέν από το πίσω όριο της οπλισμένης εδαφικής ζώνης. Η τιμή του  $P_{mob}$  θα είναι μικρότερη από  $P_{des}$  λόγω του ότι το έδαφος έχει μεγαλύτερη γωνία τριβής από το  $\phi'_{cv}$ . Μια σχετικά συντηρητική εκτίμηση μετατοπίσεων μπορεί να ληφθεί υποθέτοντας ότι  $P_{mob} = P_{des}$ . Άλλες αιτίες μετατόπισης είναι η παραμόρφωση που προκαλείται από το μη οπλισμένο έδαφος πίσω από την οπλισμένη ζώνη και η φαινομενική παραμόρφωση που προκαλείται από σταδιακή κατασκευή. Αυτά μπορεί να θεωρηθούν ότι είναι σχετικά μικρά εάν χρησιμοποιείται επεκτάσιμος οπλισμός και η μπροστινή όψη κάθε στρώσης επιχώματος συγκρατείται καλά κατά τη διάρκεια της κατασκευής.



Σχήμα 2.29: Προφίλ δύναμης κατά μήκος οπλισμένου εδάφους (πηγή: HA 68/94)

➤ Υλικά ελεύθερης αποστράγγισης

Για υλικά ελεύθερης αποστράγγισης, η οριζόντια επιμήκυνση,  $\delta_{ho}$  ενός στρώματος οπλισμού στο τέλος της κατασκευής δίνεται από:

$$\delta_{ho} = P_{mob} \times \frac{x_1 + 0,5 \times x_2}{J_o}$$

όπου:  $J_o$  = ακαμψία οπλισμού στο τέλος της κατασκευής (kN/m)

$x_1, x_2$  = μήκη που ορίζονται στο Σχήμα 3.10

Η ακαμψία του οπλισμού είναι πιθανό να μειωθεί με την πάροδο του χρόνου μετά την κατασκευή για ελαστικό πολυμερή οπλισμό. Η επιπλέον οριζόντια μετατόπιση της μπροστινής όψης της πλαγιάς μετά την κατασκευή,  $\Delta\delta_{ho}$  στη συνέχεια δίνεται από:

$$\Delta\delta_{ho} = \delta_{ho} \times \left( \frac{J_o}{J_\infty} - 1 \right)$$

όπου:  $J_\infty$  = ακαμψία οπλισμού στο τέλος της διάρκειας ζωής του σχεδιασμού (kN/m)

➤ Υλικά μη ελεύθερης αποστράγγισης

Όταν το υλικό πλήρωσης δεν αποστραγγίζεται ελεύθερα και έχει σημαντική συνοχή βραχυπρόθεσμα, το μέγεθος της μετατόπισης στο τέλος της κατασκευής  $\delta_{ho}$ , και η επιπλέον μετατόπιση μακροπρόθεσμα  $\Delta\delta_{ho}$ , δεν εξαρτάται μόνο από την αλλαγή της τιμής  $J$ , αλλά και τη μεταβαλλόμενη τιμή του  $P_{mob}$  στον παραπάνω τύπο. Η βραχυπρόθεσμη τιμή  $P_{mob}$  υπολογίζεται με βάση παραμέτρους αντοχής στο έδαφος (ή εναλλακτικά χρησιμοποιώντας αποτελεσματικές παραμέτρους με αρνητική τιμή  $r_u$ ). Η μακροπρόθεσμη τιμή του  $P_{mob}$  υπολογίζεται με την προϋπόθεση ότι είναι μακροπρόθεσμες οι τιμές των  $\phi'$ ,  $c'$  και  $r_u$ .

## 2.3 Ευρωκώδικας

Ο Ευρωκώδικας 7, ο οποίος αναφέρεται στο γεωτεχνικό σχεδιασμό, δεν καλύπτει τον σχεδιασμό οπλισμένων επιχωμάτων. Στην Ελλάδα, για μη οπλισμένα πρανή, επιλέγεται ο τρόπος ανάλυσης 3 (DA-3) του ευρωκώδικα με επιβολή συντελεστών στις δράσεις και ιδιότητες του εδάφους ( $c'$ ,  $\phi'$ ) για τον έλεγχο ολικής ευστάθειας. Οι συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση ευστάθειας και η διαδικασία ανάλυσης είναι:

- αρχικά, υπολογίζονται οι ιδιότητες του εδάφους (συνοχή  $c'$  και γωνία τριβής  $\phi'$ ) με τους παρακάτω τύπους:

$$c'_d = \frac{c'_k}{\gamma_M}$$

$$\phi'_d = \arctan \frac{\tan \phi'_k}{\gamma_M}$$

όπου:  $\gamma_M = 1,25$  ή  $1,40$

- υπολογίζονται τα δυσμενή φορτία χρησιμοποιώντας ξανά συντελεστή:

$$E = \gamma_F \times F_d$$

όπου:  $\gamma_F = 1,35$  ή  $1,50$

- έπειτα, υπολογίζονται οι ευνοϊκές δράσεις με επιβολή ενός μοναδιαίου συνήθως συντελεστή, :

$$R = \gamma_F \times F_k$$

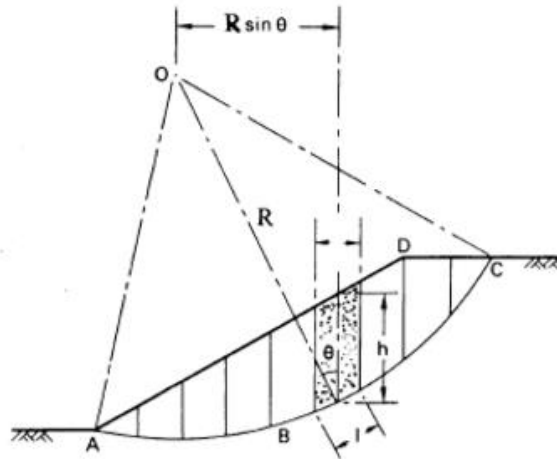
όπου:  $\gamma_F = 1,00$  ή  $1,30$

- τέλος, γίνεται η ανάλυση του πρανούς και προκύπτει ο συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος πρέπει να είναι μεγαλύτερος της μονάδας προκειμένου να είναι αποδεκτός ( $FS=R/E \geq 1.00$ ).

## 2.4 Συμβατικές μέθοδοι ευστάθειας πρανών

Μια ακόμη μέθοδος ευστάθειας πρανών, η οποία είναι αρκετά συνηθισμένη είναι η μέθοδος των λωρίδων. Σε αυτή τη μέθοδο, η εδαφική μάζα διαιρείται σε κατακόρυφες λωρίδες όπως φαίνεται στο σχήμα 2.30. Οι δυνάμεις που δρουν σε κάθε λωρίδα είναι οι εξής:

- Το βάρος  $W_i$ , της λωρίδας και η εξωτερική επιφόρτιση, δηλαδή η κατακόρυφη συνιστώσα  $P_i$  και οριζόντια συνιστώσα  $H_i$ .
- Οι ορθές πλευρικές δυνάμεις  $E_i$  και  $E_{i+1}$ , και οι αντίστοιχες διατμητικές  $X_i$  και  $X_{i+1}$  που δρουν στις διεπιφάνειες μεταξύ της λωρίδας  $i$  και των γειτονικών της.
- Η ορθή ενεργός δύναμη  $N'_i$ , η δύναμη  $U_i (= u_i \times \Delta l_i)$  που προκαλείται από την πίεση πόρων  $u_i$  και η διατμητική δύναμη  $T_i$  στη βάση της λωρίδας.



Σχήμα 2.30: Διαίρεση του πρανούς σε λωρίδες (πηγή: Κουρμπέτης Δ.)

Επειδή, θεωρητικά, ο συντελεστής ασφαλείας σε όλες τις λωρίδες είναι ίδιος, η διατμητική τάση στη βάση κάποιας λωρίδας  $i$  υπολογίζεται με τη σχέση:

$$\tau_i = \frac{1}{F} \times (c_i + \sigma'_i \times \tan \varphi_i)$$

όπου:  $F$ = συντελεστής ασφαλείας

$c_i$ = συνοχή της λωρίδας

$\varphi_i$ = γωνία τριβής της λωρίδας

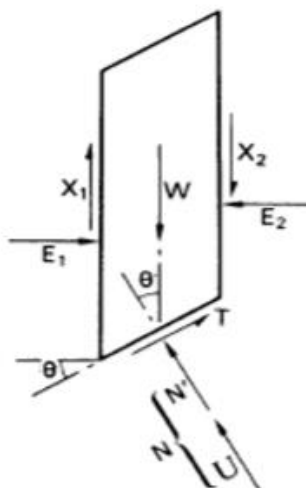
$\sigma'_i$ = ορθή ενεργός τάση στη βάση της λωρίδας.

Με ανάλυση της παραπάνω σχέσης προκύπτει ο παρακάτω τύπος:

$$T_i = \frac{1}{F} \times (c_i \times \Delta l_i + N'_i \times \tan \varphi_i)$$

Στη μέθοδο των λωρίδων, τα άγνωστα μεγέθη του προβλήματος για έναν  $n$  αριθμών λωρίδων είναι (σχήμα 2.31):

1. Οι ορθές δυνάμεις  $N'_i$  στις βάσεις των λωρίδων. ( $n$  πλήθος)
2. Οι ορθές πλευρικές δυνάμεις  $E_i$ , στις διεπιφάνειες μεταξύ των λωρίδων. ( $n-1$  πλήθος)
3. Οι γωνίες  $\alpha_i$ , που επιτρέπουν τον υπολογισμό των διατμητικών πλευρικών δυνάμεων  $X_i$ . ( $n-1$  πλήθος)
4. Ο συντελεστής ασφαλείας  $F$ , βάσει του οποίου υπολογίζονται οι διατμητικές δυνάμεις  $T_i$ , με τη βοήθεια της παραπάνω εξίσωσης.



Σχήμα 2.31: Δυνάμεις που ασκούνται σε μια λωρίδα (πηγή: Κουρμπέτης Δ.)

Ενώ, οι εξισώσεις που ισορροπίας είναι:

1. Οι εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και στους δύο άξονες. (2n πλήθους)
2. Η εξίσωση ισορροπίας ροπών της ολισθαίνουσας μάζας ως προς το κέντρο (O) του κύκλου ολίσθησης με ακτίνα R, η οποία εξισώνει την ανθιστάμενη στην ολίσθηση ροπή των διατμητικών δυνάμεων  $T_i$ , με τις ροπές των δυνάμεων που προκαλούν την ολίσθηση, δηλαδή του βάρους των λωρίδων  $W_i$ , και των εξωτερικών επιφορτίσεων  $P_i$  και  $H_i$

$$R \times \sum_i T_i = R \times \sum_i (W_i + P_i) \times \sin\theta_i + \sum_i H_i \times y_i$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω τελευταίες εξισώσεις προκύπτει η παρακάτω σχέση για τον συντελεστή ασφαλείας:

$$FS = \frac{\sum_i (c_i \times \Delta l_i + N'_i \times \tan\phi_i)}{\sum_i (W_i + P_i) \times \sin\theta_i + \frac{1}{R} \times \sum_i H_i \times y_i}$$

Στην παραπάνω σχέση το άγνωστο μέγεθος είναι οι δυνάμεις  $N'_i$ , που υπολογίζονται από τις υπόλοιπες εξισώσεις του προβλήματος και τις πρόσθετες παραδοχές.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι οι εξισώσεις ισορροπίας είναι λιγότερες από τους αγνώστους. Για το λόγο αυτό θα προστεθούν ορισμένες εξισώσεις με τη μορφή των παραδοχών. Υπάρχουν διάφορες ομάδες παραδοχών για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Η πιο συνηθισμένη είναι η απλοποιημένη μέθοδος Bishop.

Σε αυτή τη μέθοδο θεωρείται ότι  $\alpha_i=0$  μεταξύ των λωρίδων, όμως, δεν μπορούν να ικανοποιηθούν όλες οι εξισώσεις ισορροπίας και η λύση που προκύπτει δεν είναι ακριβής. Προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$N'_i = \frac{(W_i + P_i) - u_i \times \Delta x_i - \frac{1}{F} \times c_i \times \Delta x_i \times \tan\theta_i}{\cos\theta_i \times (1 + \frac{1}{FS} \times \tan\theta_i \times \tan\phi_i)}$$

Επειδή και οι δύο τελευταίες σχέσεις περιλαμβάνουν τους δύο άγνωστους όρους  $N'_i$  και FS, θα πραγματοποιηθούν δοκιμές για την επίλυση των δύο εξισώσεων και την εύρεση των δύο όρων. Η μέθοδος του Bishop (1960) δίνει ένα μικρό σφάλμα στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με άλλες μεθόδους (π.χ. Fellenius) και, μάλιστα, προς την ασφάλεια. Όταν η φόρτιση γίνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες (π.χ. σε περιπτώσεις ταχείας κατασκευής πρανούς από αργιλικό έδαφος), τότε η ανάλυση μπορεί να γίνει με τις ολικές τάσεις και όχι με τις ενεργές. Για αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας θα πάρει τη μορφή:

$$FS = \frac{\sum_i c_{ui} \times \Delta l}{\sum_i (W_i + P_i) \times \sin\theta_i + \frac{1}{r} \times \sum_i H_i \times y_i}$$

όπου:  $c_{ui}$ = αστράγγιστη διατμητική αντοχή στη βάση της λωρίδας  $i$ .

Σε περίπτωση που θεωρηθεί μία λωρίδα, τότε υπολογίζουμε έναν κατά προσέγγιση συντελεστή ασφαλείας με τον παρακάτω τρόπο:

$$F(\theta) = \frac{c_u \times (A\Gamma)}{W \times \sin\theta} = \frac{2 \times c_u}{\gamma \times H \times \cos\theta}$$

Με ελάχιστη τιμή:

$$F = \frac{2 \times c_u}{\gamma \times H}$$

Όπου, από την τελευταία σχέση υπολογίζεται το κρίσιμο μήκος του πρανούς στην αστοχία. Δηλαδή:

$$H_{cr} = \frac{2 \times c_u}{\gamma} \quad \text{για } F = 1 \text{ στην αστοχία}$$

Σημείωση: ο συντελεστής  $F=1$  στην αστοχία ισχύει μόνο για επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης. Όταν η επιφάνεια ολίσθησης είναι, για παράδειγμα κυκλική, τότε πρέπει να γίνουν δοκιμές με χρήση υπολογιστή ώστε να εντοπιστεί ο κρίσιμος κύκλος ολίσθησης. Αυτό επιτυγχάνεται με

δοκιμές πάνω στην ακτίνα του κύκλου και στο κέντρο του μέχρι να εντοπιστεί ο μηχανισμός αστοχίας.

## 2.5 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) είναι η δυνατότητα διαχωρισμού του πρσανούς σε μικρότερα τμήματα, των οποίων τα σχήματα είναι απλούστερα και γνωστά. Με αυτό τον τρόπο, όλα τα στοιχεία, όπως και οι μηχανικές ιδιότητες τους, είναι διακριτά μέσα από τους κόμβους. Με τη χρήση μαθηματικών προσομοιωμάτων επιτυγχάνεται η ισορροπία σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά, εξασφαλίζοντας την ισορροπία σε ολόκληρο το πρανές.

Αρχικά, ο χώρος που πρόκειται να αναλυθεί χωρίζεται με τη βοήθεια καννάβου σε μικρότερες επιφάνειες. Οι επιφάνειες αυτές συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους που συνήθως βρίσκονται εξωτερικά των πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα αυτά στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τρίγωνα. Κάθε κόμβος, ανάλογα με το είδος του έχει ορισμένους βαθμούς ελευθερίας, επιτρέπει δηλαδή να συμβούν κάποιες μετατοπίσεις. Εάν το όλο σύστημα είναι δισδιάστατο τότε οι βαθμοί ελευθερίας θα είναι 2, αν είναι τρισδιάστατο 3 κλπ. Υπολογίζοντας τις μετατοπίσεις των κόμβων, υπολογίζονται και οι μετατοπίσεις των στοιχείων και, συνεπώς, όλου του συστήματος. Τελικά, γνωρίζοντας όλες τις μετατοπίσεις είναι εύκολο να υπολογιστούν οι παραμορφώσεις και οι τάσεις.

### Στατική επίλυση

Οι γενικές παραδοχές για την επίλυση του στατικού μοντέλου είναι:

- I. ορίζονται οι μετατοπίσεις των στοιχείων έτσι ώστε, να υπάρχει συνέχεια μετατοπίσεων μεταξύ τους. Ειδικά σε περιπτώσεις καμπτόμενων κατασκευών οι γωνίες των στοιχείων πριν την παραμόρφωση πρέπει να είναι ίσες με τις γωνίες μετά την παραμόρφωση.
- II. ορίζονται ως συνεχείς συναρτήσεις οι μετατοπίσεις κάθε στοιχείου ώστε να δίνουν συνεχείς παραμορφώσεις.
- III. το πεδίο των μετατοπίσεων κάθε στοιχείου καθορίζεται ώστε να είναι δυνατή η περιγραφή της μετακίνησης του σώματος και η σταθερή παραμόρφωση του συστήματος.

Για δισδιάστατο σύστημα οι τροπές δίνονται από τη σχέση:  $\varepsilon = X \times q$  (όπου X είναι το μητρώο τελεστής)

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} du/dx \\ dv/dy \\ du/dx + dv/dy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d/dx & 0 \\ 0 & d/dy \\ d/dy & d/dx \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} du/dx \\ dv/dy \\ du/dx + dv/dy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d/dx & 0 \\ 0 & d/dy \\ d/dy & d/dx \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίζονται οι τροπές σε τρισδιάστατο ή μονοδιάστατο μοντέλο.

Οι τάσεις υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\sigma = D \times \varepsilon$$

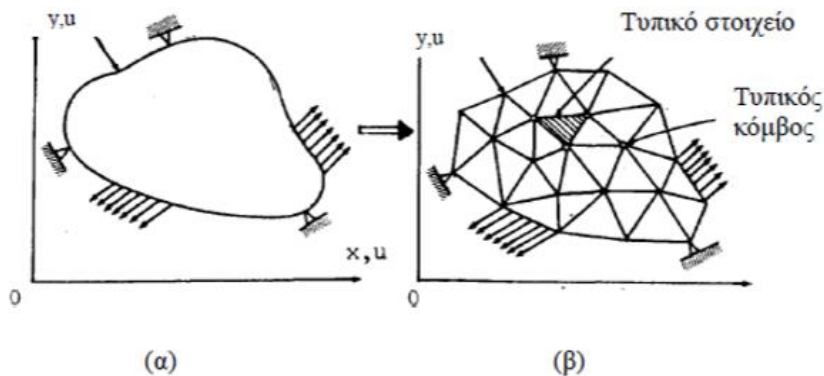
όπου: D= μητρώο που έχει μέτρο ελαστικότητας προς όλες τις κατευθύνσεις.

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\sigma = D \times B \times q^e$$

επειδή:  $\varepsilon = X \times N \times q = B \times q^e$

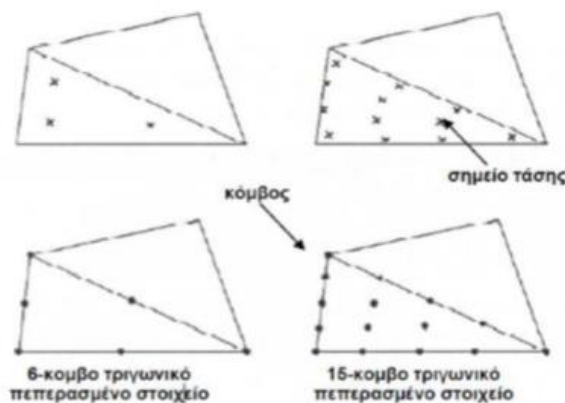
Για την προσομοίωση πραγματικών προβλημάτων στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και επίλυση αυτών, τα προβλήματα μορφώνονται είτε σε δισδιάστατα αξονοσυμμετρικά προσομοιώματα (που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις κυκλικών διατομών με ομοιόμορφη ακτίνα και φόρτιση με τις τάσεις και τις παραμορφώσεις να θεωρούνται ταυτόσημες προς κάθε κατεύθυνση) είτε σε δισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων με επίπεδη παραμόρφωση (που χρησιμοποιούνται σε διατομές περισσότερο ή λιγότερο ομοιόμορφες με αντίστοιχες τάσεις και φορτίσεις κάθετα σε ένα επίπεδο, στο οποίο οι παραμορφώσεις και οι μετακινήσεις είναι μηδέν και οι ορθές τάσεις να λαμβάνονται υπόψη). (Σχήμα 2.32).



Σχήμα 2.32: Διαμερισμός σώματος. (α) Αρχικό σώμα. (β) Διαμερισμός σε πεπερασμένα στοιχεία (πηγή: Πανταζής Ε.)



Η διακριτοποίηση του χώρου επιτυγχάνεται με χρήση δεκαπεντάκομβων ή εξάκομβων τριγωνικών σχημάτων (Σχήμα 2.33), με τα δεκαπεντάκομβα σχήματα να δίνουν μεγαλύτερη ακρίβεια για την εντατική κατάσταση προσομοιωμάτων με ιδιαίτερες δυσκολίες.



Σχήμα 2.33: Θέση κόμβων και σημείων υπολογισμού τάσεων σε πεπερασμένα στοιχεία (πηγή: Πανταζής Ε.)

Πέρα από το έδαφος, είναι απαραίτητη και η προσομοίωση των γεωπλεγμάτων. Τα γεωπλέγματα αποτελούνται από γραμμικά στοιχεία με δύο βαθμούς ελευθερίας κατά  $x$  ( $u_x$ ) και κατά  $y$  ( $u_y$ ) σε κάθε κόμβο. Για χρήση δεκαπεντάκομβων στοιχείων εδάφους, το κάθε στοιχείο γεωπλέγματος ορίζεται από 5 κόμβους ενώ, για εξάκομβα στοιχεία εδάφους το κάθε στοιχείο γεωπλέγματος ορίζεται από 3 κόμβους, όπως φαίνεται στην (Σχήμα 2.43).



Σχήμα 2.34: Θέση κόμβων και σημείων υπολογισμού των τάσεων σε 3-κομβα και 5-κομβα στοιχεία γεωπλεγμάτων (πηγή: Πανταζής Ε.)

Στη συνέχεια, προσοικιώνονται ορισμένα στοιχεία της διεπιφάνειας μεταξύ του εδάφους και του οπλισμού με σκοπό να πάρουμε πληροφορίες για τη συμπεριφορά της. Η αντοχή του εδάφους (γωνία τριβής και συνοχή) συσχετίζεται με την αντοχή της διεπιφάνειας (γωνία τριβής διεπιφάνειας και συνάφεια) με έναν συντελεστή μείωσης αντοχής  $R_{inter}$ . Έτσι, κάθε διεπιφάνεια αποτελείται από πεπερασμένα στοιχεία που συνδέονται με τα πεπερασμένα στοιχεία του εδάφους. Αν και τα πεπερασμένα στοιχεία της διεπιφάνειας εμφανίζονται να έχουν κάποιο πάχος, στο προσομοίωμα αυτό θα είναι μηδέν καθώς, οι συντεταγμένες του κάθε ζεύγους κόμβων ταυτίζονται. Προκειμένου να περιγραφεί η συμπεριφορά της διεπιφάνειας χρησιμοποιείται το κριτήριο Mohr – Coulomb για τη διάκριση της ελαστικής συμπεριφοράς

και τις μετατοπίσεις μέσα στη διεπιφάνεια, και τη διάκριση της πλαστικής συμπεριφοράς για μόνιμες μετακινήσεις.

Για ελαστική συμπεριφορά, η τάση δίνεται από τον τύπο:

$$|\tau| < \sigma_n \times \tan\varphi_i + c_i$$

Ενώ, για την πλαστική συμπεριφορά, η τάση δίνεται από τον τύπο:

$$|\tau| = \sigma_n \times \tan\varphi_i + c_i$$

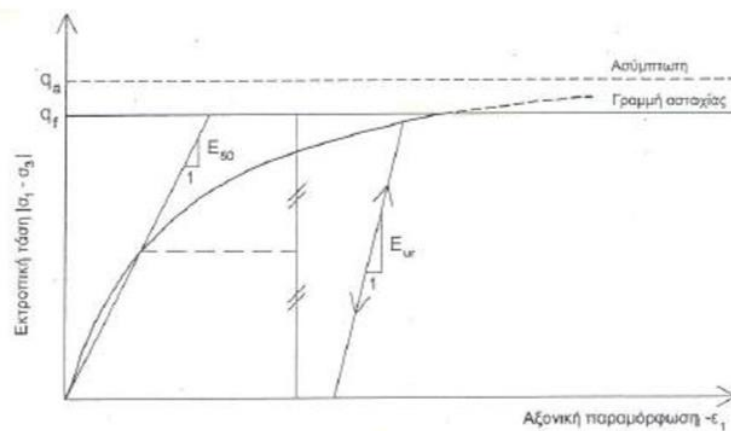
όπου:  $\varphi_i$  = γωνία τριβής διεπιφάνειας

$c_i$  = συνοχή διεπιφάνειας

Ο συντελεστής μείωσης αντοχής  $R_{inter}$ , συνδέεται με τη συνοχή και τη γωνία τριβής με τους παρακάτω τύπους:

$$c_i = R_{inter} \times c_{soil}$$

$$\tan\varphi_i = R_{inter} \times \tan\varphi_{soil} \leq \tan\varphi_{soil}$$



Σχήμα 2.35: Υπερβολή μοντέλου κρατυνόμενης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς (πηγή: Πανταζής Ε.)

Με ανάλυση του νόμου Mohr – Coulomb, χρησιμοποιείται ως βασικός δείκτης δυσκαμψίας του εδαφικού υλικού το μέτρο ελαστικότητας, E. Επειδή τα περισσότερα εδαφικά υλικά εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά από την αρχή της φόρτισης, η τιμή E που επιλέγεται πρέπει να έχει ελεγχθεί. Για εδάφη με μεγάλες τιμές στην ελαστική περιοχή χρησιμοποιείται το  $E_0$  (αρχικό μέτρο ελαστικότητας), αντί για E και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις λαμβάνεται υπόψη το  $E_{50}$  (μέτρο ελαστικότητας για το 50% της αντοχής του εδάφους). Μέσα από το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb εφαρμόζεται ο νόμος τριβής

Coulomb σε κάθε στοιχείο του υλικού, εκφράζεται συναρτήσει των κύριων τάσεων και εξαρτάται από τη συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής. Η γωνία  $\psi$  εκφράζει την τάση του εδάφους για διόγκωση και για συνεκτικά εδάφη θεωρείται  $\psi=0$ . Για τα υπερστερεοποιημένα αργιλικά εδάφη που δεν έχουν αμελητέο βαθμό διόγκωσης το  $\psi$  δεν μπορεί να θεωρηθεί μηδέν και σε αμμώδη μη συνεκτικά υλικά, η γωνία  $\psi$  εξαρτάται από τη γωνία τριβής και την πυκνότητα του εδάφους.

Ακολουθεί η διαδικασία  $K_o$ , κατά την οποία υπολογίζονται οι αρχικές τάσεις που αντιπροσωπεύουν την κατάσταση ισορροπίας του εδάφους. Σε κάποιο σημείο, οι τάσεις υπολογίζονται ως εξής:

Κατακόρυφη ενεργός τάση:

$$\sigma'_{v,o} = \sum M_{weight} \times \left( \sum_i \gamma_i \times h_i - p_w \right)$$

Οριζόντια ενεργός τάση:

$$\sigma'_{h,o} = K_o \times \sigma'_{v,o}$$

όπου:

$$K_o = \frac{\sigma'_{xx}}{\sigma'_{yy}}$$

ή

$$K_o = 1 - \sin\varphi$$

Για υλικά με πολύ μικρή ή μηδενική συνοχή, οι τιμές του  $K_o$  κυμαίνονται μεταξύ:

$$\frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} < K_o < \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

Τέλος, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας με συνεχή μείωση της γωνίας τριβής και της συνοχής έως ότου να προκύψει αστοχία. Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίζεται η αντοχή του οπλισμού, μειώνοντας την αντοχή της διεπιφάνειας. Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sum M_{sf} = \frac{\tan\varphi_{input}}{\tan\varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}}$$

$$SF = \frac{\text{διαθέσιμη αντοχή}}{\text{αντοχή στην αστοχία}} = \text{τιμή του } \sum M_{sf} \text{ στην αστοχία}$$

όπου: input= οι τιμές που εισάγονται για το εδαφικό υλικό  
reduced= οι τιμές που μειώνονται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΥΟ ΣΦΗΝΩΝ

#### 3.1 Ανάπτυξη υπολογιστικού φύλλου (Excel) για την εφαρμογή της μεθόδου δύο σφηνών

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη, με τη βοήθεια του προγράμματος Excel, υπολογιστικού φύλλου για την εφαρμογή της μεθόδου δύο σφηνών όπως ορίζεται από τον βρετανικό κανονισμό (ενότητα 2.2). Πιο συγκεκριμένα, γίνεται εισαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός πρανούς και με βάση τις συνθήκες που επικρατούν (π.χ. επιφόρτιση, πίεση πόρων) υπολογίζεται η απαιτούμενη δύναμη οπλισμού μέσα από ένα πλήθος αλγεβρικών σχέσεων που δίνονται στον πίνακα 2.1. Στη συνέχεια, εισάγεται η αντοχή του οπλισμού που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί και με βάση ορισμένους συντελεστές, οι οποίοι λαμβάνονται είτε από την εταιρεία κατασκευής είτε από τα πιστοποιητικά BBA, υπολογίζονται ο απαιτούμενος αριθμός στρώσεων οπλισμού για το συγκεκριμένο πρανές. Η διαδικασία που ακολουθείται φαίνεται παρακάτω μέσα από ένα παράδειγμα και είναι η εξής:

1. Εισαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πρανούς:

Γεωμετρία πρανούς:	
Υψος πρανούς, H:	10,000 m
Συντεταγμένη x κόμβου δυο σφηνών, X:	2,90 m
Συντεταγμένη y κόμβου δυο σφηνών, Y:	0,00 m
Γωνία κλίσης πρανούς, β:	60 °
Ειδικό βάρος υλικού, γ:	20,00 kN/m <sup>3</sup>
Ενεργός γωνία τριβής, φ':	30,0 °
Συνοχή, c':	0,00 kPa
Πρόσθετο φορτίο, q:	0,00 kN/m <sup>2</sup>
Συντελεστής ολίσθησης βάσης, λs:	0,8
Γωνία άνω κλίσης, i:	0 °
Πίεση πόρων, u:	0,000 kN/m <sup>2</sup>
Ελάχιστος σημείου πίεσης, h:	2,000 m
Παράμετρος πίεσης πόρων, ru:	0,000
<b>Έλεγχος Κατάστασης:</b>	<b>Περίπτωση 1</b>

Εικόνα 3.1: Γεωμετρία πρανούς και έλεγχος κατάστασης

Με την εισαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (ύψος H, γωνία κλίσης β, συντεταγμένες X, Y, γωνία άνω κλίσης i), των ιδιοτήτων του εδάφους (ειδικό βάρος γ, γωνία τριβής φ') και των συνθηκών που επικρατούν (επιφόρτιση q, πίεση πόρων  $u$ ) πραγματοποιείται έλεγχος προκειμένου να διαπιστωθεί σε ποια από τις τρεις κατηγορίες ανήκει το πρανές, όπως αυτές ορίστηκαν στην ενότητα 2.2. Ο έλεγχος που πραγματοποιείται είναι:

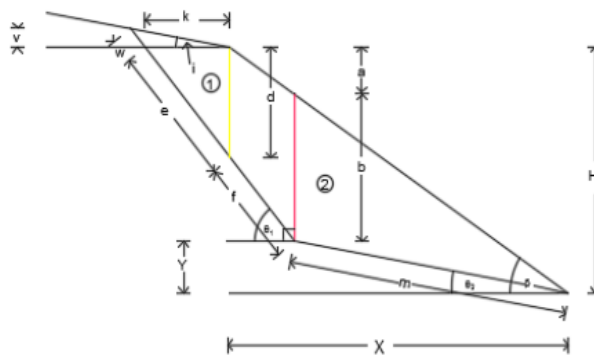
- Αν  $\frac{H}{\tan\beta} > X$  και  $k > 0$  τότε το πρανές είναι κατηγορίας 1
- Αν  $\frac{H}{\tan\beta} < X$  τότε το πρανές είναι κατηγορίας
- Αν  $\frac{H}{\tan\beta} > X$  και  $u > 0$  τότε το πρανές είναι κατηγορίας 3

Όπου οι αποστάσεις  $k, u$  προκύπτουν από τη γεωμετρία του πρανούς και υπολογίζονται με τη βοήθεια του πίνακα 2.1 , όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.2:

Άλλες αποστάσεις:	
a=	4,977 m
b=	5,023 m
d=	6,045 m
e=	7,472 m
f=	4,889 m
g=	12,361 m
j=	0,000 m
k=	4,392 m
m=	2,900 m
s=	7,265 m
t=	0,000 m
u=	0,000 m
v=	0,000 m
w=	0,000 m
z=	0,000 m

Εικόνα 3.2: Υπόλοιπες αποστάσεις όπως φαίνονται στον πίνακα 2.1

**Περίπτωση 1**

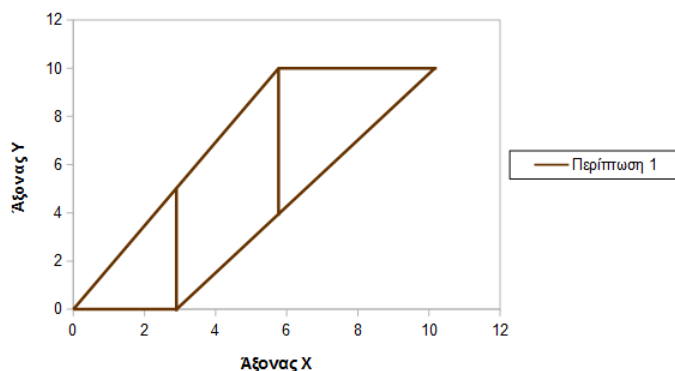


Σχήμα 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αποστάσεις περίπτωσης 1

2. Πραγματική γεωμετρία πρανούς:

Με την ολοκλήρωση των υπολογισμών του βήματος 1, προκύπτει μέσα από διάγραμμα η πραγματική γεωμετρία του πρανούς (Διάγραμμα 3.1)

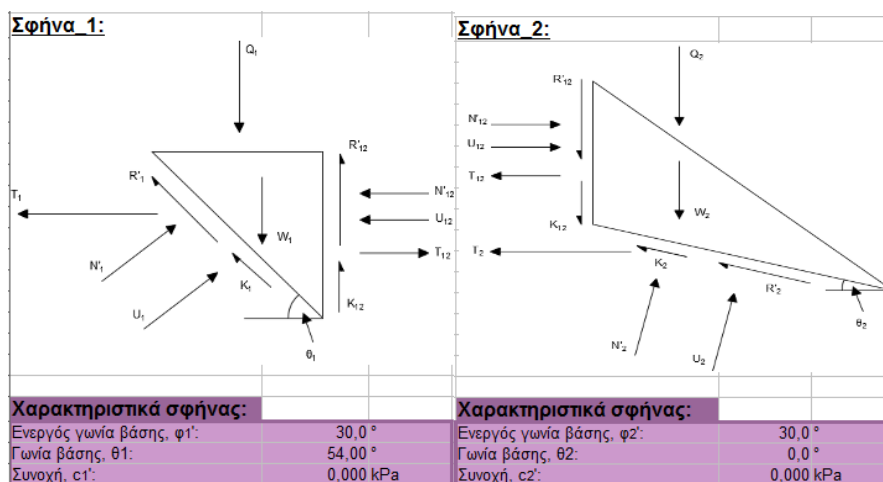
## Πραγματική Γεωμετρία Πρανούς



Διάγραμμα 3.1: Απεικόνιση της πραγματικής γεωμετρίας μέσα από διάγραμμα

## 3. Εισαγωγή χαρακτηριστικών κάθε σφήνας:

Στο τρίτο βήμα εισάγονται τα χαρακτηριστικά της κάθε σφήνας που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των αλγεβρικών σχέσεων του πίνακα 2.1.



Εικόνα 3.3: Χαρακτηριστικά δύο σφηνών

Η γωνία βάσης της σφήνας 1,  $\theta_1$ , εκτιμάται δοκιμαστικά ώστε να προκύψει η γωνία για την οποία απαιτείται η μεγαλύτερη δύναμη οπλισμού συναρτήσει της απόστασης X. Η γωνία  $\theta_2$  είναι συνήθως ίση με το μηδέν. Η συνοχή και η γωνία τριβής των δύο σφηνών θα είναι ίσες με τις αντίστοιχες του πρανούς, εφόσον πρόκειται για το ίδιο υλικό.

4. Υπολογισμός συνολικής απαιτούμενης δύναμης ενίσχυσης των δύο σφηνών:

Βάσει των παραπάνω βημάτων, υπολογίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στις δύο σφήνες, ο απαραίτητος οπλισμός κάθε μίας καθώς, και η απαιτούμενη δύναμη οπλισμού που είναι απαραίτητη για την ευστάθεια του πρανούς. Τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται με τη βοήθεια του πίνακα 2.1 για την περίπτωση 1, όπως προέκυψε στο πρώτο βήμα και τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

<b>Φορτία στη σφήνα_1:</b>		
Ίδιο βάρος, $W1=$		583,527 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U1=$		0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K1=$		0,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q1=$		0,000 kN/m
<b>Οπλισμός:</b>		
Δύναμη οπλισμού, $T1=$		259,803 kN/m
<b>Φορτία στη σφήνα_2:</b>		
Ίδιο βάρος, $W2=$		145,665 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U2=$		0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K2=$		0,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q2=$		Δεν εφαρμόζεται
<b>Οπλισμός:</b>		
Δύναμη οπλισμού, $T2=$		-67,280 kN/m
<b>Συνολική Δύναμη Οπλισμού:</b>		
$T_{tot}=$		192,523 kN/m

Εικόνα 3.4: Φορτία, οπλισμός κάθε σφήνας και απαραίτητος συνολικός οπλισμός

5. Διάταξη οπλισμού:

Ακολουθεί η επιλογή του είδους του οπλισμού και της αντοχής του. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέχθηκαν γεωπλέγματα με χαρακτηριστική αντοχή  $P=200$  kN/m. Η αντοχή σχεδιασμού προκύπτει με διαίρεση της χαρακτηριστικής αντοχής με ορισμένους συντελεστές που αφορούν τυχόν φθορές κατά την εγκατάσταση, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την αβεβαιότητα του υλικού. Οι απαραίτητες στρώσεις οπλισμού υπολογίζονται διαιρώντας τη συνολική δύναμη οπλισμού με την αντοχή σχεδιασμού των γεωπλεγμάτων.



Συντελεστής K=	0,193
<b>Γεπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	200 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, d50:	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, Rchar:	200,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, RFcr:	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, fd:	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, fe:	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, fd:	1,02
αs:	0,35
tanδ/tanφ':	0,60
σ'β/σ'η	2,87
αβ*B/25	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, α':	0,20
Συντ. εξόλκευσης, λρ:	0,40
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
Pdes=	110,72 kN/m
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
N=	2

Εικόνα 3.5: Διάταξη οπλισμού

Αφού εκτιμώνται οι στρώσεις ενίσχυσης που είναι απαραίτητες για την ευστάθεια του πρανούς, υπολογίζεται το βάθος κάθε μιας, οι μεταξύ τους αποστάσεις και η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση στρώσεων (Εικόνα 3.6) από τις σχέσεις:

$$\text{Βάθος στρώσης: } z_{i+1} = \frac{H}{N} + z_i$$

$$\text{Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων: } s_{i+1} = z_{i+1} - z_i$$

$$\text{Μέγιστη απόσταση μεταξύ στρώσεων: } S_v = \frac{P_{des}}{K \times \gamma \times z}$$

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	5,00	5,00	5,75
2	10,00	5,00	2,88

Εικόνα 3.6: Βάθος στρώσεων και μεταξύ τους αποστάσεις

Η δεύτερη στρώση παρουσιάζει πρόβλημα καθώς, ενώ η απόσταση με την αμέσως προηγούμενη στρώση είναι 5m, η μέγιστη επιτρεπόμενη είναι 2.88m. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος προτείνεται η προσθήκη επιπλέον στρώσεως οπλισμού στο μισό βάθος από το αρχικό των 5m, δηλαδή 2.5m κάτω από την πρώτη στρώση που είναι στο βάθος των 5m. (Εικόνα 3.7).

ΔΙΟΡΘΩΣΗ			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	5,00	5,00	5,75
2	7,50	2,50	3,83
3	10,00	2,50	2,88

Εικόνα 3.7: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις κάθε στρώσης, όπου οι κατακόρυφες ενεργές τάσεις είναι ίσες με τις ορθές ενεργές τάσεις (Εικόνα 3.8):

$$\sigma'_{v+1} = \sigma'_{n+1} = \gamma \times \left( \frac{Z_{i+1}}{2} + z_i \right)$$

Κατακόρυφη ενεργός τάση, $\sigma'_v$ (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, $\sigma'_n$ (kPa)
50,00	50,00
175,00	175,00
250,00	250,00

Εικόνα 3.8: Τάσεις εντός των στρώσεων

Τέλος, με τη βοήθεια του συντελεστή εξόλκευσης, ο οποίος προκύπτει από ένα σύνολο συντελεστών που λαμβάνονται από τα πιστοποιητικά BBA βάσει του είδους του γεωπλέγματος, εκτιμάται το μήκος εξόλκευσης (Εικόνα 3.9), όπως αυτό ορίζεται στο σχήμα 2.23, από τη σχέση:

$$L_e = \frac{P_{des}}{\lambda_p \times (\sigma'_n \times \tan \varphi_{des} + c'_{des})}$$

Le (m)
9,54
2,73
1,91

Εικόνα 3.9: Μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

### 3.2 Παραμετρικές αναλύσεις τυπικών εφαρμογών

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του υπολογιστικού φύλλου excel που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.1, πραγματοποιούνται αναλύσεις σε πρανή με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (όπου η γωνία βάσης στη σφήνα 2 είναι  $\theta_2=0$ , άρα και  $Y=0$ , και η γωνία κλίσης πρανούς  $\beta=60^\circ$  για όλα τα πρανή) και παραμέτρους διατμητικής αντοχής (συνοχή  $c'$ , γωνία τριβής  $\varphi'$ ) προκειμένου να υπολογιστούν, για διαφορετικής αντοχής γεωπλέγματα, οι απαιτούμενες στρώσεις ενίσχυσης, ώστε να εξασφαλιστεί η ευστάθεια κάθε ενός από αυτά.

### 3.2.1 Χονδρόκοκκο υλικό

Αρχικά, επιλέγεται χονδρόκοκκο υλικό με συνοχή  $c'=0$ , γωνία τριβής  $\phi'=35^\circ$  και ειδικό βάρος  $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ . Με συγκεκριμένο υλικό γίνονται αναλύσεις για 3 διαφορετικά πρανή ύψους  $H=10\text{m}$ ,  $15\text{m}$  και  $20\text{m}$  και χρησιμοποιούνται γεωπλέγματα χαρακτηριστικής αντοχής  $P_{\text{char}}=80\text{kN/m}$  και  $P_{\text{char}}=110\text{kN/m}$  για ενίσχυση των πρανών, ενώ οι στρώσεις ενίσχυσης που απαιτούνται για κάθε ένα αυτά προκύπτουν από τις αναλύσεις στο excel.

Η εκτίμηση της κρίσιμης γωνίας βάσης στη σφήνα 1,  $\theta_1$  και ο υπολογισμός της συντεταγμένης  $X$  γίνονται με τη βοήθεια του πίνακα 3.1 που δίνεται στον βρετανικό κανονισμό. Ο πίνακας 3.1 δίνει μια λίστα από μηχανισμούς δύο σφηνών για οριζόντιο σπλισμό, όπου όλοι οι μηχανισμοί πληρούν τις εξής προϋποθέσεις:  $r_u = 0$ ,  $\lambda_s = 0.8$ ,  $\theta_2 \geq 0$ ,  $c'=0$ ,  $i=0$ .

Πίνακας 3.1: Παραδείγματα μηχανισμών δύο σφηνών

$\beta$	$\phi'$	$K$	$X/H$	$Y/H$	$\theta_1$	$L_p/H$
20	15	0.152	1.87	0.00	39	2.75
25	15	0.243	1.53	0.00	43	2.45
	20	0.087	1.17	0.00	39	1.85
30	15	0.307	1.27	0.00	46	2.24
	20	0.156	1.04	0.00	44	1.71
35	15	0.355	1.06	0.00	47	2.09
	20	0.211	0.90	0.00	46	1.56
	25	0.101	0.70	0.00	45	1.22
40	15	0.393	0.90	0.00	48	1.97
	20	0.255	0.77	0.00	48	1.44
	25	0.146	0.63	0.00	47	1.14
	30	0.066	0.46	0.00	46	0.86
45	15	0.424	0.76	0.00	49	1.87
	20	0.291	0.66	0.00	49	1.34
	25	0.184	0.55	0.00	49	1.04
	30	0.102	0.43	0.00	49	0.83
50	15	0.450	0.64	0.00	50	1.79
	20	0.322	0.56	0.00	50	1.26
	25	0.217	0.48	0.00	51	0.96
	30	0.135	0.38	0.00	51	0.78
	35	0.073	0.29	0.00	51	0.60
55	15	0.473	0.54	0.00	50	1.72
	20	0.349	0.47	0.00	51	1.19
	25	0.247	0.41	0.00	52	0.89
	30	0.165	0.35	0.00	53	0.71
	35	0.101	0.26	0.00	54	0.57
	40	0.054	0.19	0.00	54	0.42
60	15	0.493	0.44	0.00	51	1.66
	20	0.373	0.39	0.00	52	1.13
	25	0.274	0.34	0.00	53	0.83
	30	0.193	0.29	0.00	54	0.65
	35	0.127	0.23	0.00	55	0.53
	40	0.077	0.17	0.00	56	0.41
65	15	0.511	0.36	0.00	51	1.61
	20	0.396	0.32	0.00	53	1.08
	25	0.299	0.28	0.00	54	0.78
	30	0.218	0.24	0.00	56	0.59
	35	0.153	0.20	0.00	57	0.48
	40	0.101	0.15	0.00	58	0.38
70	15	0.528	0.28	0.00	51	1.56
	20	0.416	0.25	0.00	53	1.02
	25	0.322	0.22	0.00	55	0.73
	30	0.243	0.19	0.00	57	0.54
	35	0.177	0.16	0.00	58	0.42
	40	0.124	0.13	0.00	60	0.34

1. Πρανές ύψους 10m

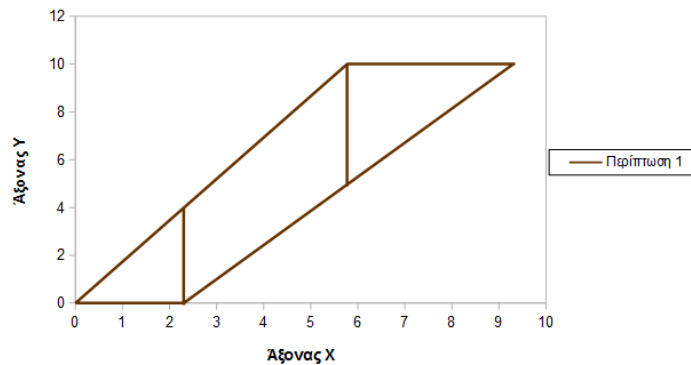
Γεωμετρία πρανούς:		Άλλες αποστάσεις:	
Υψος πρανούς, H:	10,000 m	a=	6,016 m
Συντεταγμένη χ κόμβου δυο σφηνών, X:	2,300 m	b=	3,984 m
Συντεταγμένη γ κόμβου δυο σφηνών, Y:	0,000 m	d=	5,039 m
Γωνία κλίσης πρανούς, β:	60 °	e=	6,152 m
Ειδικό βάρος υλικού, γ:	20,0 kN/m³	f=	6,056 m
Ενεργός γωνία τριβής, φ':	35,0 °	g=	12,208 m
Συνοχή, c':	0,000 kPa	j=	0,000 m
Πρόσθετο φορτίο, q:	0,000 kN/m²	k=	3,529 m
Συντελεστής ολίσθησης βάσης, λs:	0,8	m=	2,300 m
Γωνία άνω κλίσης, i:	0 °	s=	7,002 m
Πίεση πόρων, u:	0,000 kN/m²	t=	0,000 m
Βάθος σημείου πίεσης, h:	2,000 m	u=	0,000 m
Παράμετρος πίεσης πόρων, γu:	0,000	v=	0,000 m
		w=	0,000 m
		z=	0,000 m
<b>Έλεγχος Κατάστασης:</b>	<b>Περίπτωση 1</b>		

Εικόνα 3.10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αποστάσεις πρανούς

Σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται η συντεταγμένη X με τη βοήθεια του πίνακα 3.1 βάσει της γεωμετρίας του πρανούς ως εξής:

$$\frac{X}{H} = 0,23 \Rightarrow X = 0,23 \times H = 0,23 \times 10m \Rightarrow X = 2,3m$$

Έτσι, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα 3.2 που απεικονίζει τη μορφή του πρανούς.



Διάγραμμα 3.2: Πραγματική γεωμετρία πρανούς

Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής των δύο σφηνών λαμβάνονται από τη γεωμετρία του πρανούς εφόσον οι δύο σφήνες αποτελούν το πρανές, ενώ η γωνία βάσης για τη σφήνα 1 λαμβάνεται από τον πίνακα 3.1 ίση με 55° με τη γωνία βάσης στη σφήνα 2 να ισούται με μηδέν.

Χαρακτηριστικά σφήνας:		Χαρακτηριστικά σφήνας:	
Ενεργός γωνία τριβής, φ1':	35,0 °	Ενεργός γωνία τριβής, φ2':	35,0 °
Γωνία βάσης, θ1:	55,00 °	Γωνία βάσης, θ2:	0,0 °
Συνοχή, c1':	0,000 kPa	Συνοχή, c2':	0,000 kPa

Εικόνα 3.11: Χαρακτηριστικά δύο σφηνών

Η συνολική δύναμη οπλισμού είναι το άθροισμα των δυνάμεων οπλισμού των δύο σφηνών, οι οποίες προκύπτουν από τα φορτία (ενότητα 2.2), όπως αυτά δίνονται στις εξισώσεις του πίνακα 2.1.

<b>Φορτία στη σφήνα_1:</b>	
Ίδιο βάρος, $W_1=$	491,232 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U_1=$	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_1=$	0,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_1=$	0,000 kN/m
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_1=$	178,794 kN/m
<b>Φορτία στη σφήνα_2:</b>	
Ίδιο βάρος, $W_2=$	91,625 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U_2=$	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_2=$	0,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_2=$	Δεν εφαρμόζεται
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_2=$	-51,325 kN/m
<b>Συνολική Δύναμη Οπλισμού:</b>	
<b><math>T_{tot}=</math></b>	<b>127,468 kN/m</b>

Εικόνα 3.12: Υπολογισμός απαιτούμενης δύναμης οπλισμού

#### 1. Γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m

Συντελεστής $K=$	0,127
<b>Γεπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	80 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, $d_{50}$ :	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, $R_{char}$ :	80,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, $RF_{cr}$ :	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, $fd$ :	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, $fe$ :	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, $fd$ :	1,02
$\alpha_s$ :	0,35
$\tan\delta/\tan\phi'$ :	0,60
$\sigma'_b/\sigma'_h$	8,85
$\alpha_b \cdot B/25$	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, $\alpha'$ :	0,46
Συντ. εξόλκευσης, $\lambda_r$ :	0,93
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
<b><math>P_{des}=</math></b>	<b>44,29 kN/m</b>
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
<b><math>N=</math></b>	<b>3</b>

Εικόνα 3.13: Διάταξη οπλισμού

Για γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m, η ανάλυση δίνει ως αποτέλεσμα 3 στρώσεις οπλισμού ώστε να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του πρανούς. Όμως, επειδή οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις μεταξύ των στρώσεων για τη δεύτερη και τρίτη στρώση (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.14) είναι μικρότερες από τις αποστάσεις που υπολογίζονται με βάση τα βάθη των στρώσεων, τοποθετούνται επιπλέον 2 στρώσεις ενίσχυσης ενδιάμεσα των αρχικών στρώσεων (μπλε χρώμα, εικόνα 3.14), οπότε συνολικά

απαιτούνται πλέον 5 στρώσεις ενίσχυσης.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	3,33	3,33	5,21
2	6,67	3,33	2,61
3	10,00	3,33	1,74
<b>ΔΙΟΡΘΩΣΗ</b>			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	3,33	3,33	5,21
2	5,00	1,67	3,47
3	6,67	1,67	2,61
4	8,33	1,67	2,08
5	10,00	1,67	1,74

Εικόνα 3.14: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Τέλος, υπολογίζονται οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις κάθε στρώσης, καθώς και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση, $\sigma'_v$ (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, $\sigma'_n$ (kPa)	$L_e$ (m)
33,33	33,33	2,05
116,67	116,67	0,59
166,67	166,67	0,41
216,67	216,67	0,32
266,67	266,67	0,26

Εικόνα 3.15: Τάσεις εντός του πρανούς και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

## II. Γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m

<b>Γεπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	110 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, d50:	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, Rchar:	110,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, R <sub>Fcr</sub> :	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, f <sub>d</sub> :	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, f <sub>e</sub> :	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, f <sub>d</sub> :	1,02
αs:	0,35
tanδ/tanφ':	0,60
σ'β/σ'n	8,85
αb*B/25	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, α':	0,46
Συντ. εξόλκευσης, λp:	0,93
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
<b>Pdes=</b>	<b>60,89 kN/m</b>
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
<b>N=</b>	<b>3</b>

Εικόνα 3.16: Διάταξη οπλισμού

Για γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m, η ανάλυση δίνει ως αποτέλεσμα ξανά 3 στρώσεις οπλισμού για το ίδιο πρανές. Όμως, επειδή η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των στρώσεων για την τρίτη στρώση (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.17) είναι μικρότερη από την απόσταση που υπολογίζεται με βάση τα βάθη των στρώσεων, τοποθετείται 1

επιπλέον στρώση ενίσχυσης ενδιάμεσα των δύο τελευταίων στρώσεων στη μισή απόσταση από την αρχική (μπλε χρώμα, εικόνα 3.17). Έτσι, συνολικά απαιτούνται πλέον 4 στρώσεις ενίσχυσης.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	3,33	3,33	7,17
2	6,67	3,33	3,58
3	10,00	3,33	2,39
<b>ΔΙΟΡΘΩΣΗ</b>			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	3,33	3,33	7,17
2	6,67	3,33	3,58
3	8,33	1,67	2,87
4	10,00	1,67	2,39

Εικόνα 3.17: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Όπως και στην περίπτωση των 80kN/m, υπολογίζονται οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις κάθε στρώσης, καθώς και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση, $\sigma'_v$ (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, $\sigma'_n$ (kPa)	$L_e$ (m)
33,33	33,33	2,82
133,33	133,33	0,70
216,67	216,67	0,43
266,67	266,67	0,35

Εικόνα 3.18: Τάσεις εντός του πρανούς και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

## 2. Πρανές ύψους 15m

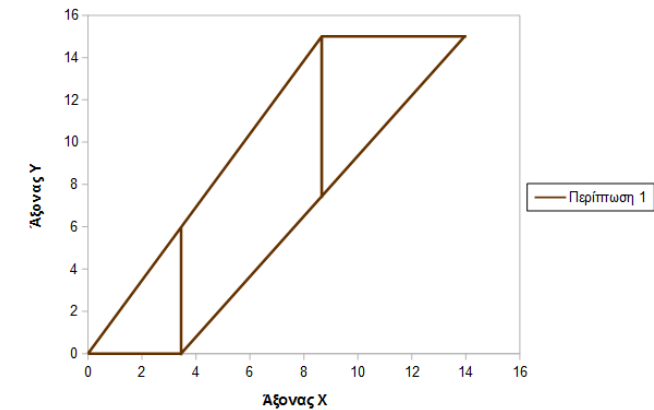
Γεωμετρία πρανούς:		Άλλες αποστάσεις:	
Ύψος πρανούς, H:	15,000 m	a=	9,024 m
Συντεταγμένη x κόμβου δυο σφηνών, X:	3,450 m	b=	5,976 m
Συντεταγμένη y κόμβου δυο σφηνών, Y:	0,000 m	d=	7,559 m
Γωνία κλίσης πρανούς, $\beta$ :	60°	e=	9,228 m
Ειδικό βάρος υλικού, $\gamma$ :	20,000 kN/m <sup>3</sup>	f=	9,084 m
Ενεργός γωνία τριβής, $\phi'$ :	35,0°	g=	18,312 m
Συνοχή, c':	0,000 kPa	j=	0,000 m
Πρόσθετο φορτίο, q:	0,000 kN/m <sup>2</sup>	k=	5,293 m
Συντελεστής ολίσθησης βάσης, $\lambda_s$ :	0,8	m=	3,450 m
Γωνία άνω κλίσης, i:	0°	s=	10,503 m
Πίεση πόρων, u:	0,000 kN/m <sup>2</sup>	t=	0,000 m
Βάθος σημείου πίεσης, h:	2,000 m	u=	0,000 m
Παράμετρος πίεσης πόρων, $u_0$ :	0,000	v=	0,000 m
		w=	0,000 m
		z=	0,000 m
<b>Έλεγχος Κατάστασης:</b>	<b>Περίπτωση 1</b>		

Εικόνα 3.19: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αποστάσεις πρανούς

Ομοίως, η συντεταγμένη X υπολογίζονται με τη βοήθεια του πίνακα 3.1 βάσει της γεωμετρίας του πρανούς ως εξής:

$$\frac{X}{H} = 0,23 \Rightarrow X = 0,23 \times H = 0,23 \times 15m \Rightarrow X = 3,45m$$

Έτσι, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα 3.3 που απεικονίζει τη μορφή του πρανούς.



Διάγραμμα 3.3: Πραγματική γεωμετρία πρανούς

Όπως στην περίπτωση του πρανούς με ύψος 10m, οι παράμετροι διατμητικής αντοχής των δύο σφηνών λαμβάνονται από τη γεωμετρία του πρανούς, ενώ η γωνία βάσης για τη σφήνα 1 λαμβάνεται από τον πίνακα 3.1 με τη γωνία βάσης στη σφήνα 2 να ισούται με μηδέν.

Χαρακτηριστικά σφήνας:		Χαρακτηριστικά σφήνας:	
Ενεργός γωνία τριβής, $\phi_1'$ :	35,0 °	Ενεργός γωνία τριβής, $\phi_2'$ :	35,0 °
Γωνία βάσης, $\theta_1$ :	55,00 °	Γωνία βάσης, $\theta_2$ :	0,0 °
Συνοχή, $c_1'$ :	0,000 kPa	Συνοχή, $c_2'$ :	0,000 kPa

Εικόνα 3.20: Χαρακτηριστικά δύο σφηνών

Η συνολική δύναμη οπλισμού είναι το άθροισμα των δυνάμεων οπλισμού των δύο σφηνών, οι οποίες προκύπτουν από τα φορτία (ενότητα 2.2), όπως αυτά δίνονται στις εξισώσεις του πίνακα 2.1.

<b>Φορτία στη σφήνα_1:</b>	
Ίδιο βάρος, $W_1$ =	1105,272 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U_1$ =	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_1$ =	0,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_1$ =	0,000 kN/m
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_1$ =	402,286 kN/m
<b>Φορτία στη σφήνα_2:</b>	
Ίδιο βάρος, $W_2$ =	206,157 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U_2$ =	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_2$ =	0,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_2$ =	Δεν εφαρμόζεται
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_2$ =	-115,482 kN/m
<b>Συνολική Δύναμη Οπλισμού:</b>	
$T_{tot}$ =	286,804 kN/m

Εικόνα 3.21: Υπολογισμός απαιτούμενης δύναμης οπλισμού



1. Γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m

Συντελεστής K=	0,127
<b>Γεπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	80 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, d50:	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, Rchar:	80,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, RFcr:	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, fd:	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, fe:	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, fd:	1,02
αs:	0,35
tanδ/tanφ':	0,60
σ'β/σ'η	8,85
αb*B/25	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, α':	0,46
Συντ. εξόλκευσης, λρ:	0,93
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
Pdes=	44,29 kN/m
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
N=	7

Εικόνα 3.22: Διάταξη οπλισμού

Για γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m, προκύπτουν από την ανάλυση 7 στρώσεις οπλισμού. Όμως, επειδή οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις μεταξύ των στρώσεων για τις 4 τελευταίες στρώσεις (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.23) είναι μικρότερες από τις αποστάσεις που υπολογίζονται με βάση τα βάθη των στρώσεων, τοποθετούνται επιπλέον 4 στρώσεις ενίσχυσης ενδιάμεσα των αρχικών στρώσεων (μπλε χρώμα, εικόνα 3.23). Συνεπώς, συνολικά απαιτούνται πλέον 11 στρώσεις ενίσχυσης.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	2,14	2,14	8,11
2	4,29	2,14	4,05
3	6,43	2,14	2,70
4	8,57	2,14	2,03
5	10,71	2,14	1,62
6	12,86	2,14	1,35
7	15,00	2,14	1,16
<b>ΔΙΟΡΘΩΣΗ</b>			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	2,14	2,14	8,11
2	4,29	2,14	4,05
3	6,43	2,14	2,70
4	7,50	1,07	2,32
5	8,57	1,07	2,03
6	9,64	1,07	1,80
7	10,71	1,07	1,62
8	11,79	1,07	1,47
9	12,86	1,07	1,35
10	13,93	1,07	1,25
11	15,00	1,07	1,16

Εικόνα 3.23: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις κάθε στρώσης, καθώς και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης υπολογίζονται ξανά όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση, $\sigma'_v$ (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, $\sigma'_n$ (kPa)	Le (m)
21,43	21,43	3,19
85,71	85,71	0,80
150,00	150,00	0,46
203,57	203,57	0,34
235,71	235,71	0,29
267,86	267,86	0,26
300,00	300,00	0,23
332,14	332,14	0,21
364,29	364,29	0,19
396,43	396,43	0,17
428,57	428,57	0,16

Εικόνα 3.24: Τάσεις εντός του πρανού και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

## II. Γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m

Γεπλέγματα:	
Κατηγορία:	110 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, $d_{50}$ :	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, $R_{char}$ :	110,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, $RF_{CR}$ :	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, $f_d$ :	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, $f_e$ :	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, $f_t$ :	1,02
$\alpha_s$ :	0,35
$\tan\delta/\tan\phi'$ :	0,60
$\sigma'_b/\sigma'_n$ :	8,85
$\alpha b^*B/25$ :	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, $\alpha'$ :	0,46
Συντ. εξόλκευσης, $\lambda_r$ :	0,93
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
<b><math>P_{des}</math>=</b>	<b>60,89 kN/m</b>
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
<b><math>N</math>=</b>	<b>5</b>

Εικόνα 3.25: Διάταξη οπλισμού

Από την ανάλυση των γεωπλεγμάτων αντοχής 110kN/m υπολογίζονται 5 στρώσεις οπλισμού για πρανές ύψους 15m. Αλλά, επειδή η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των στρώσεων στις 3 τελευταίες στρώσεις (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.26) είναι μικρότερες από τις αποστάσεις που προκύπτουν με βάση τα βάθη των στρώσεων, τοποθετούνται επιπλέον 3 στρώσεις ενίσχυσης ενδιάμεσα των στρώσεων που παρουσιάζουν πρόβλημα (μπλε χρώμα, εικόνα 3.26), με αποτέλεσμα να τοποθετούνται συνολικά 8 στρώσεις ενίσχυσης.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	3,00	3,00	7,96
2	6,00	3,00	3,98
3	9,00	3,00	2,65
4	12,00	3,00	1,99
5	15,00	3,00	1,59
<b>ΔΙΟΡΘΩΣΗ</b>			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	3,00	3,00	7,96
2	6,00	3,00	3,98
3	7,50	1,50	3,18
4	9,00	1,50	2,65
5	10,50	1,50	2,27
6	12,00	1,50	1,99
7	13,50	1,50	1,77
8	15,00	1,50	1,59

Εικόνα 3.26: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις κάθε στρώσης, καθώς και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης υπολογίζονται ξανά όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση, $\sigma'_v$ (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, $\sigma'_n$ (kPa)	$L_e$ (m)
30,00	30,00	3,13
120,00	120,00	0,78
195,00	195,00	0,48
240,00	240,00	0,39
285,00	285,00	0,33
330,00	330,00	0,28
375,00	375,00	0,25
420,00	420,00	0,22

Εικόνα 3.27: Τάσεις εντός του πρανούς και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

### 3. Πρανές ύψους 20m

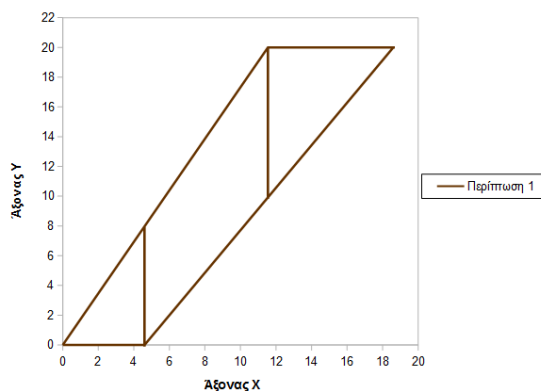
Γεωμετρία πρανούς:		Άλλες αποστάσεις:	
Υψος πρανούς, H:	20,000 m	a=	12,033 m
Συντεταγμένη χ κόμβου δυο σφηνών, X:	4,600 m	b=	7,967 m
Συντεταγμένη γ κόμβου δυο σφηνών, Y:	0,000 m	d=	10,079 m
Γωνία κλίσης πρανούς, β:	60 °	e=	12,304 m
Ειδικό βάρος υλικού, γ:	20,000 kN/m <sup>3</sup>	f=	12,112 m
Ενεργός γωνία τριβής, φ':	35,0 °	g=	24,415 m
Συνοχή, c':	0,000 kPa	j=	0,000 m
Πρόσθετο φορτίο, q:	0,000 kN/m <sup>2</sup>	k=	7,057 m
Συντελεστής ολίσθησης βάσης, λs:	0,8	m=	4,600 m
Γωνία άνω κλίσης, i:	0 °	s=	14,004 m
Πίεση πόρων, u:	0,000 kN/m <sup>2</sup>	t=	0,000 m
Βάθος σημείου πίεσης, h:	2,000 m	u=	0,000 m
Παράμετρος πίεσης πόρων, ru:	0,000	v=	0,000 m
		w=	0,000 m
		z=	0,000 m
<b>Έλεγχος Κατάστασης:</b>	<b>Περίπτωση 1</b>		

Εικόνα 3.28: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αποστάσεις πρανούς

Με τον ίδιο τρόπο, χρησιμοποιώντας τον πίνακα 3.1, η συντεταγμένη X υπολογίζεται βάσει της γεωμετρίας του πρανούς ως εξής:

$$\frac{X}{H} = 0,23 \Rightarrow X = 0,23 \times H = 0,23 \times 20m \Rightarrow X = 4,6m$$

Βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πρανούς προκύπτει το διάγραμμα 3.4.



Διάγραμμα 3.4: Πραγματική γεωμετρία πρανούς

Η γωνία τριβής και η συνοχή κάθε σφήνας είναι ίσες με τις αντίστοιχες του πρανούς, ενώ η γωνία βάσης για τη σφήνα 1 λαμβάνεται από τον πίνακα 3.1 με τη γωνία βάσης στη σφήνα 2 να ισούται με μηδέν.

Χαρακτηριστικά σφήνας:		Χαρακτηριστικά σφήνας:	
Ενεργός γωνία τριβής, $\varphi_1$ :	35,0 °	Ενεργός γωνία τριβής, $\varphi_2$ :	35,0 °
Γωνία βάσης, $\theta_1$ :	55,00 °	Γωνία βάσης, $\theta_2$ :	0,0 °
Συνοχή, $c_1$ :	0,000 kPa	Συνοχή, $c_2$ :	0,000 kPa

Εικόνα 3.29: Χαρακτηριστικά δύο σφηνών

Η συνολική δύναμη οπλισμού που είναι το άθροισμα των δυνάμεων οπλισμού των δύο σφηνών, προκύπτει από τα φορτία (ενότητα 2.2), όπως αυτά δίνονται στις εξισώσεις του πίνακα 2.1.

<b>Φορτία στη σφήνα_1:</b>	
Ίδιο βάρος, $W_1$ =	1964,927 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U_1$ =	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_1$ =	0,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_1$ =	0,000 kN/m
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_1$ =	715,175 kN/m
<b>Φορτία στη σφήνα_2:</b>	
Ίδιο βάρος, $W_2$ =	366,502 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U_2$ =	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_2$ =	0,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_2$ =	Δεν εφαρμόζεται
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_2$ =	-205,302 kN/m
<b>Συνολική Δύναμη Οπλισμού:</b>	
<b><math>T_{tot}</math>=</b>	<b>509,873 kN/m</b>

Εικόνα 3.30: Υπολογισμός απαιτούμενης δύναμης οπλισμού

### 1. Γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m

Συντελεστής $K$ =	0,127
<b>Γεωπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	80 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, $d_{50}$ :	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, $R_{char}$ :	80,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, $R_{FCR}$ :	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, $f_d$ :	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, $f_e$ :	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, $f_d$ :	1,02
$\alpha_s$ :	0,35
$\tan\delta/\tan\varphi$ :	0,60
$\sigma'_b/\sigma'_h$ :	8,85
$\alpha_b \cdot B/25$ :	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, $\alpha'$ :	0,46
Συντ. εξόλκευσης, $\lambda_p$ :	0,93
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
<b><math>P_{des}</math>=</b>	<b>44,29 kN/m</b>
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
<b><math>N</math>=</b>	<b>12</b>

Εικόνα 3.31: Διάταξη οπλισμού

Για γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m, προκύπτουν από την ανάλυση 12 στρώσεις οπλισμού. Όμως, επειδή οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις μεταξύ των στρώσεων για τις 6 τελευταίες στρώσεις (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.32) είναι μικρότερες από τις αποστάσεις που υπολογίζονται με βάση τα βάθη των στρώσεων, τοποθετούνται ξανά επιπλέον 6 στρώσεις ενίσχυσης ενδιάμεσα των αρχικών στρώσεων (μπλε χρώμα, εικόνα 3.32). Συνεπώς, συνολικά απαιτούνται πλέον 18 στρώσεις ενίσχυσης.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	1,67	1,67	10,42
2	3,33	1,67	5,21
3	5,00	1,67	3,47
4	6,67	1,67	2,61
5	8,33	1,67	2,08
6	10,00	1,67	1,74
7	11,67	1,67	1,49
8	13,33	1,67	1,30
9	15,00	1,67	1,16
10	16,67	1,67	1,04
11	18,33	1,67	0,95
12	20,00	1,67	0,87

**ΔΙΟΡΘΩΣΗ**

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	1,67	1,67	10,42
2	3,33	1,67	5,21
3	5,00	1,67	3,47
4	6,67	1,67	2,61
5	8,33	1,67	2,08
6	10,00	1,67	1,74
7	10,83	0,83	1,60
8	11,67	0,83	1,49
9	12,50	0,83	1,39
10	13,33	0,83	1,30
11	14,17	0,83	1,23
12	15,00	0,83	1,16
13	15,83	0,83	1,10
14	16,67	0,83	1,04
15	17,50	0,83	0,99
16	18,33	0,83	0,95
17	19,17	0,83	0,91
18	20,00	0,83	0,87

Εικόνα 3.32: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις, καθώς και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης για τις 18 στρώσεις υπολογίζονται ξανά όπως στην ενότητα 3.1.

Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)	Κατακόρυφη ενεργός τάση, $\sigma'_v$ (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, $\sigma'_h$ (kPa)	$L_e$ (m)
10,42	16,67	16,67	4,10
5,21	66,67	66,67	1,03
3,47	116,67	116,67	0,59
2,61	166,67	166,67	0,41
2,08	216,67	216,67	0,32
1,74	266,67	266,67	0,26
1,60	308,33	308,33	0,22
1,49	333,33	333,33	0,21
1,39	358,33	358,33	0,19
1,30	383,33	383,33	0,18
1,23	408,33	408,33	0,17
1,16	433,33	433,33	0,16
1,10	458,33	458,33	0,15
1,04	483,33	483,33	0,14
0,99	508,33	508,33	0,13
0,95	533,33	533,33	0,13
0,91	558,33	558,33	0,12
0,87	583,33	583,33	0,12

Εικόνα 3.33: Τάσεις εντός του πρανούς και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

## II. Γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m

<b>Γεπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	110 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, d50:	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, Rchar:	110,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, RFcr:	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, fd:	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, fe:	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, fd:	1,02
as:	0,35
tanδ/ταφ':	0,60
σ'β/σ'n	8,85
ab*B/25	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, α':	0,46
Συντ. εξόλκευσης, λρ:	0,93
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
Pdes=	60,89 kN/m
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
N=	9

Εικόνα 3.34: Διάταξη οπλισμού

Από την ανάλυση των γεωπλεγμάτων αντοχής 110kN/m υπολογίζονται 9 στρώσεις οπλισμού για πρανές ύψους 20m. Επειδή η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των στρώσεων στις 5 τελευταίες στρώσεις (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.35) είναι μικρότερες από τις αποστάσεις που υπολογίζονται βάσει των βαθών των στρώσεων, τοποθετούνται επιπλέον 5 στρώσεις ενίσχυσης στο μισό βάθος από το αρχικό για τις στρώσεις που παρουσιάζουν πρόβλημα (μπλε χρώμα, εικόνα 3.35), με αποτέλεσμα να είναι συνολικά 14 οι στρώσεις ενίσχυσης για την ευστάθεια του πρανούς.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	2,22	2,22	10,75
2	4,44	2,22	5,37
3	6,67	2,22	3,58
4	8,89	2,22	2,69
5	11,11	2,22	2,15
6	13,33	2,22	1,79
7	15,56	2,22	1,54
8	17,78	2,22	1,34
9	20,00	2,22	1,19
<b>ΔΙΟΡΘΩΣΗ</b>			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	2,22	2,22	10,75
2	4,44	2,22	5,37
3	6,67	2,22	3,58
4	8,89	2,22	2,69
5	10,00	1,11	2,39
6	11,11	1,11	2,15
7	12,22	1,11	1,95
8	13,33	1,11	1,79
9	14,44	1,11	1,65
10	15,56	1,11	1,54
11	16,67	1,11	1,43
12	17,78	1,11	1,34
13	18,89	1,11	1,26
14	20,00	1,11	1,19

Εικόνα 3.35: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις, όπως και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης για τις 14 στρώσεις υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο της ενότητας 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση, $\sigma'_v$ (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, $\sigma'_n$ (kPa)	$L_e$ (m)
22,22	22,22	4,23
88,89	88,89	1,06
155,56	155,56	0,60
222,22	222,22	0,42
277,78	277,78	0,34
311,11	311,11	0,30
344,44	344,44	0,27
377,78	377,78	0,25
411,11	411,11	0,23
444,44	444,44	0,21
477,78	477,78	0,20
511,11	511,11	0,18
544,44	544,44	0,17
577,78	577,78	0,16

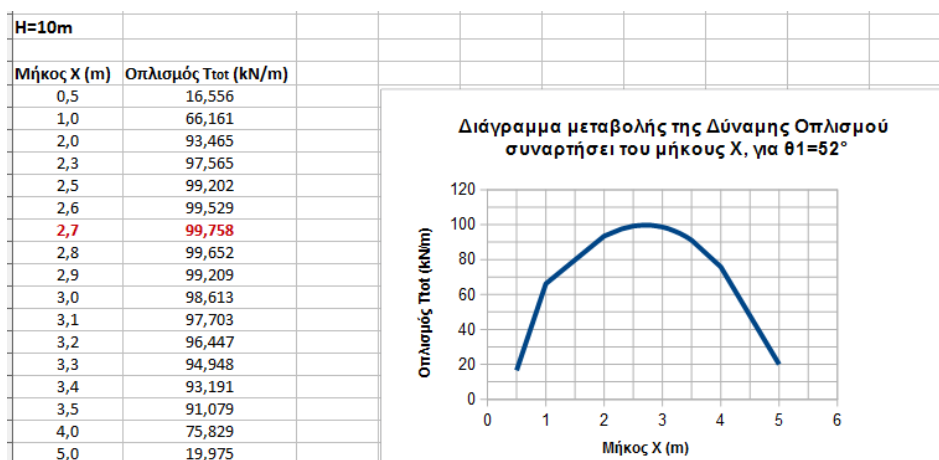
Εικόνα 3.36: Τάσεις εντός του πρανούς και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

### 3.2.2 Λεπτόκοκκο υλικό

Ακόμη, επιλέγεται λεπτόκοκκο υλικό με συνοχή  $c'=10\text{kPa}$ , γωνία τριβής  $\phi'=25^\circ$  και ειδικό βάρος  $\gamma=20\text{ kN/m}^3$ . Όπως και στην περίπτωση του χονδρόκοκκου υλικού, γίνονται αναλύσεις για 3 διαφορετικά πρανή ύψους  $H=10\text{m}$ ,  $15\text{m}$  και  $20\text{m}$  με γεωπλέγματα χαρακτηριστικής αντοχής  $P_{\text{char}}=80\text{kN/m}$  και  $P_{\text{char}}=110\text{kN/m}$  για ενίσχυση και οι στρώσεις ενίσχυσης που απαιτούνται για κάθε ένα πρανές προκύπτουν από τις αναλύσεις στο excel.

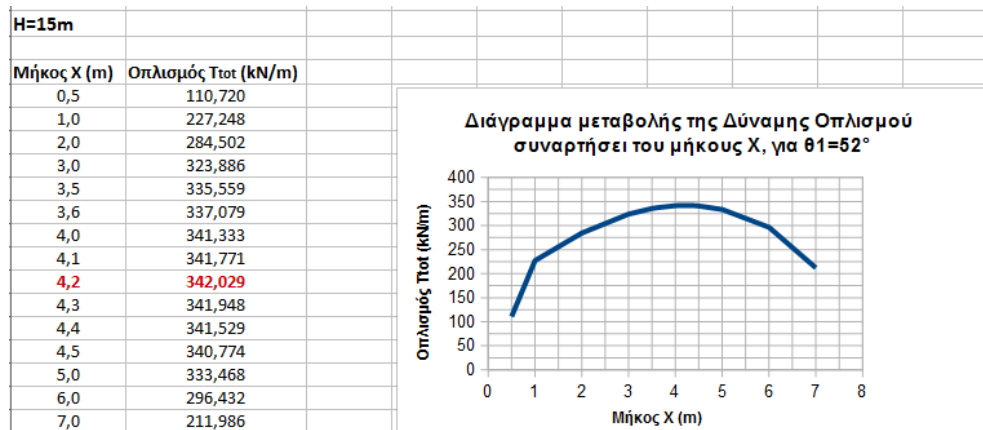
Προκειμένου να εντοπιστεί η δυσμενέστερη γωνία βάσης στη σφήνα 1,  $\theta_1$ , γίνονται δοκιμές σε συνδυασμό με την απόσταση  $X$  για κάθε πρανές και διαπιστώνεται πως η γωνία  $\theta_1$ , δηλαδή η γωνία για την οποία απαιτείται η μεγαλύτερη δύναμη οπλισμού είναι:

- Για  $H=10\text{m}$ :  $X=2,7\text{m}$  και  $\theta_1=52^\circ$



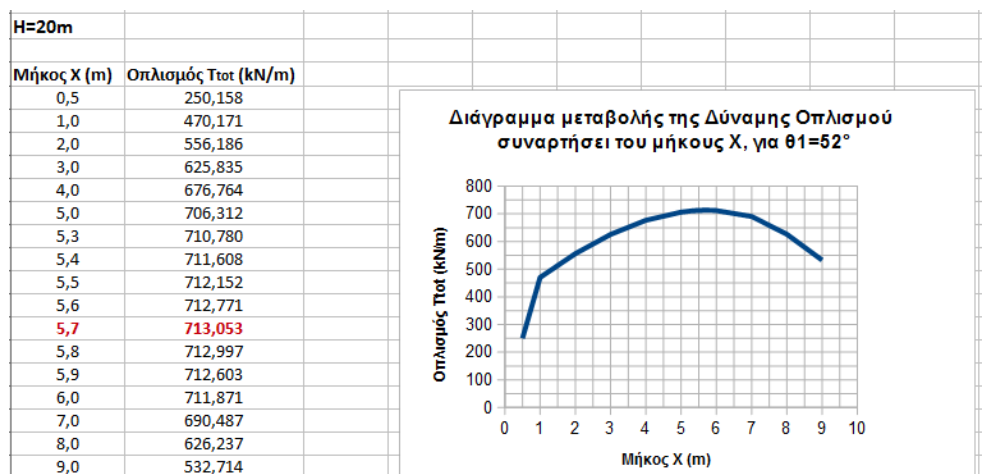
Διάγραμμα 3.5: Δοκιμές γωνίας  $\theta_1$  για ύψος επιχώματος 10m

- Για  $H=15m$ :  $X=4,2m$  και  $\theta_1=52^\circ$



Διάγραμμα 3.6: Δοκμές γωνίας  $\theta_1$  για ύψος επιχώματος 15m

- Για  $H=20m$ :  $X=5,7m$  και  $\theta_1=52^\circ$



Διάγραμμα 3.7: Δοκμές γωνίας  $\theta_1$  για ύψος επιχώματος 20m

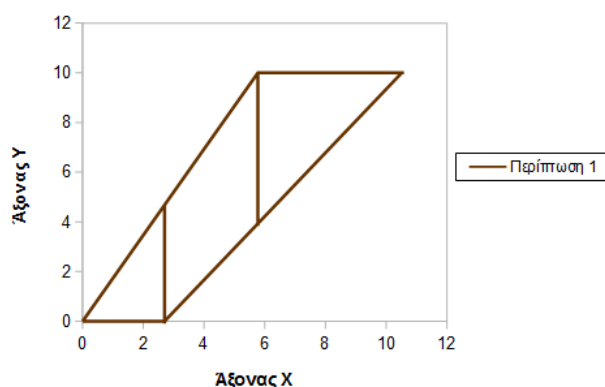
### 1. Πρανές ύψους 10m

Γεωμετρία πρανούς:		Άλλες αποστάσεις:	
Υψος πρανούς, H:	10,000 m	a=	5,323 m
Συντεταγμένη χ κόμβου δυο σφηνών, X:	2,700 m	b=	4,677 m
Συντεταγμένη γ κόμβου δυο σφηνών, Y:	0,000 m	d=	6,066 m
Γωνία κλίσης πρανούς, $\beta$ :	60 °	e=	7,698 m
Ειδικό βάρος υλικού, $\gamma$ :	20,000 kN/m <sup>3</sup>	f=	4,992 m
Ενεργός γωνία τριβής, $\varphi$ :	25,0 °	g=	12,690 m
Συνοχή, c':	10,000 kPa	j=	0,000 m
Πρόσθετο φορτίο, q:	0,000 kN/m <sup>2</sup>	k=	4,739 m
Συντελεστής ολίσθησης βάσης, $\lambda_s$ :	1	m=	2,700 m
Γωνία άνω κλίσης, i:	0 °	s=	7,813 m
Πίεση πόρων, u:	0,000 kN/m <sup>2</sup>	t=	0,000 m
Βάθος σημείου πίεσης, h:	2,000 m	u=	0,000 m
Παράμετρος πίεσης πόρων, $u_v$ :	0,000	v=	0,000 m
		w=	0,000 m
		z=	0,000 m
<b>Έλεγχος Κατάστασης:</b>	<b>Περίπτωση 1</b>		

Εικόνα 3.37: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αποστάσεις πρανούς



Η συντεταγμένη X υπολογίζεται με δοκιμές όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.5 και το διάγραμμα 3.8 προκύπτει βάσει της γεωμετρίας του πρανούς.



Διάγραμμα 3.8: Πραγματική γεωμετρία πρανούς

Και στην περίπτωση του λεπτόκοκκου υλικού, η γωνία τριβής και η συνοχή των δύο σφηνών λαμβάνονται από τη γεωμετρία του πρανούς, ενώ η γωνία βάσης για τη σφήνα 1 εκτιμάται ίση με  $52^\circ$  ύστερα από δοκιμές (διάγραμμα 3.5) με τη γωνία βάσης στη σφήνα 2 να ισούται με μηδέν.

Χαρακτηριστικά σφήνας:		Χαρακτηριστικά σφήνας:	
Ενεργός γωνία τριβής, $\varphi_1'$ :	25,0 °	Ενεργός γωνία τριβής, $\varphi_2'$ :	25,0 °
Γωνία βάσης, $\theta_1$ :	52,00 °	Γωνία βάσης, $\theta_2$ :	0,0 °
Συνοχή, $c_1'$ :	10,000 kPa	Συνοχή, $c_2'$ :	10,000 kPa

Εικόνα 3.38: Χαρακτηριστικά δύο σφηνών

Η συνολική δύναμη οπλισμού, δηλαδή το άθροισμα των δυνάμεων οπλισμού των δύο σφηνών, προκύπτει από τα φορτία (ενότητα 2.2), όπως αυτά δίνονται στις εξισώσεις του πίνακα 2.1.

<b>Φορτία στη σφήνα_1:</b>	
Ιδίο βάρος, $W_1$ =	617,669 kN/m
Πίεση πρόρων βάσης, $U_1$ =	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_1$ =	126,902 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_1$ =	0,000 kN/m
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_1$ =	185,637 kN/m
<b>Φορτία στη σφήνα_2:</b>	
Ιδίο βάρος, $W_2$ =	126,267 kN/m
Πίεση πρόρων βάσης, $U_2$ =	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_2$ =	27,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_2$ =	Δεν εφαρμόζεται
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_2$ =	-85,879 kN/m
<b>Συνολική Δύναμη Οπλισμού:</b>	
$T_{tot}$ =	99,758 kN/m

Εικόνα 3.39: Υπολογισμός απαιτούμενης δύναμης οπλισμού

1. Γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m

Συντελεστής K=	0,100
<b>Γεπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	80 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, d <sub>50</sub> :	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, R <sub>char</sub> :	80,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, R <sub>Fcr</sub> :	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, f <sub>d</sub> :	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, f <sub>e</sub> :	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, f <sub>d</sub> :	1,02
α <sub>s</sub> :	0,35
tanδ'/tanφ':	0,60
σ' <sub>b</sub> /σ' <sub>n</sub>	4,00
α <sub>b</sub> *B/25	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, α':	0,38
Συντ. εξόλκευσης, λ <sub>p</sub> :	0,76
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
P <sub>des</sub> =	44,29 kN/m
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
N=	3

Εικόνα 3.40: Διάταξη οπλισμού

Για γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m, η ανάλυση έχει ως αποτέλεσμα 3 στρώσεις οπλισμού για πρανές ύψους 10m. Επειδή οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις μεταξύ των στρώσεων στη δεύτερη και τρίτη στρώση (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.41) είναι μικρότερες από τις αποστάσεις που υπολογίζονται βάσει των βαθών των στρώσεων, τοποθετούνται επιπλέον 2 στρώσεις ενίσχυσης στο μισό βάθος από το αρχικό για τις στρώσεις που παρουσιάζουν πρόβλημα (μπλε χρώμα, εικόνα 3.41), με αποτέλεσμα να είναι 5 στρώσεις ενίσχυσης για την ευστάθεια του πρανού.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, S <sub>v</sub> (m)
1	3,33	3,33	6,66
2	6,67	3,33	3,33
3	10,00	3,33	2,22
<b>ΔΙΟΡΘΩΣΗ</b>			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, S <sub>v</sub> (m)
1	3,3	3,33	6,66
2	5,0	1,67	4,44
3	6,7	1,67	3,33
4	8,3	1,67	2,66
5	10,0	1,67	2,22

Εικόνα 3.41: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Όπως και στα πρανή με χονδρόκοκο υλικό, οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης για τις 5 στρώσεις υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο της ενότητας 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση, σ' <sub>v</sub> (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, σ' <sub>n</sub> (kPa)	L <sub>e</sub> (m)
33,33	33,33	2,27
116,67	116,67	0,90
166,67	166,67	0,66
216,67	216,67	0,52
266,67	266,67	0,43

Εικόνα 3.42: Τάσεις εντός του πρανού και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

II. Γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m

<b>Γεπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	110 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, d <sub>50</sub> :	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, R <sub>char</sub> :	110,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, R <sub>FSR</sub> :	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, f <sub>d</sub> :	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, f <sub>e</sub> :	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, f <sub>d</sub> :	1,02
α <sub>s</sub> :	0,35
tanδ/tanφ':	0,60
σ'β/σ'η	4,00
αβ*B/25	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, α':	0,38
Συντ. εξόλκευσης, λρ:	0,76
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
<b>P<sub>des</sub>=</b>	<b>60,89 kN/m</b>
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
<b>N=</b>	<b>2</b>

Εικόνα 3.43: Διάταξη οπλισμού

Για γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m, η ανάλυση έχει ως αποτέλεσμα 2 στρώσεις οπλισμού για πρανές ύψους 10m. Όμως, λόγω του ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση στη δεύτερη στρώση (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.44) είναι μικρότερη από την απόσταση που υπολογίζεται από τα βάθη των δύο στρώσεων, τοποθετείται επιπλέον 1 στρώση ενίσχυσης ενδιάμεσα των δύο αρχικών στρώσεων (μπλε χρώμα, εικόνα 3.44), ώστε συνολικά να είναι 3 στρώσεις στο πρανές.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, S <sub>v</sub> (m)
1	5,00	5,00	6,10
2	10,00	5,00	3,05
<b>ΔΙΟΡΘΩΣΗ</b>			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, S <sub>v</sub> (m)
1	5,0	5,00	6,10
2	7,5	2,50	4,07
3	10,0	2,50	3,05

Εικόνα 3.44: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις, όπως και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης για τις 3 στρώσεις υπολογίζονται όπως στο παράδειγμα της ενότητας 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση, σ' <sub>v</sub> (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, σ' <sub>n</sub> (kPa)	L <sub>e</sub> (m)
50,00	50,00	2,40
175,00	175,00	0,87
250,00	250,00	0,63

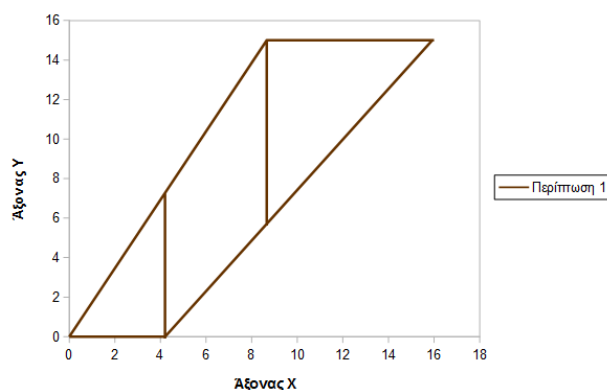
Εικόνα 3.45: Τάσεις εντός του πρανούς και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

## 2. Πρανές ύψους 15m

Γεωμετρία πρανούς:		Άλλες αποστάσεις:	
Υψος πρανούς, H:	15,000 m	a=	7,725 m
Συντεταγμένη χ κόμβου δυο σφηνών, X:	4,200 m	b=	7,275 m
Συντεταγμένη y κόμβου δυο σφηνών, Y:	0,000 m	d=	9,291 m
Γωνία κλίσης πρανούς, β:	60 °	e=	11,791 m
Ειδικό βάρος υλικού, γ:	20,000 kN/m <sup>3</sup>	f=	7,245 m
Ενεργός γωνία τριβής, φ':	25,0 °	g=	19,035 m
Συνοχή, c':	10,000 kPa	j=	0,000 m
Πρόσθετο φορτίο, q:	0,000 kN/m <sup>2</sup>	k=	7,259 m
Συντελεστής ολίσθησης βάσης, λs:	1	m=	4,200 m
Γωνία άνω κλίσης, i:	0 °	s=	11,719 m
Πίεση πόρων, u:	0,000 kN/m <sup>2</sup>	t=	0,000 m
Βάθος σημείου πίεσης, h:	2,000 m	u=	0,000 m
Παράμετρος πίεσης πόρων, ru:	0,000	v=	0,000 m
		w=	0,000 m
		z=	0,000 m
<b>Έλεγχος Κατάστασης:</b>	<b>Περίπτωση 1</b>		

Εικόνα 3.46: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αποστάσεις πρανούς

Η συντεταγμένη X υπολογίζεται με δοκιμές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 3.6, ενώ στο διάγραμμα 3.9 απεικονίζεται η γεωμετρία του πρανούς.



Διάγραμμα 3.9: Πραγματική γεωμετρία πρανούς

Και σε αυτή την περίπτωση, τα χαρακτηριστικά των δύο σφηνών λαμβάνονται από τη γεωμετρία του πρανούς, ενώ η γωνία βάσης για τη σφήνα 1 εκτιμάται ίση με 52° ύστερα από δοκιμές (διάγραμμα 3.6) με τη γωνία βάσης στη σφήνα 2 να ισούται με μηδέν.

Χαρακτηριστικά σφήνας:		Χαρακτηριστικά σφήνας:	
Ενεργός γωνία τριβής, φ1':	25,0 °	Ενεργός γωνία τριβής, φ2':	25,0 °
Γωνία βάσης, θ1:	52,00 °	Γωνία βάσης, θ2:	0,0 °
Συνοχή, c1':	10,000 kPa	Συνοχή, c2':	10,000 kPa

Εικόνα 3.47: Χαρακτηριστικά δύο σφηνών

Όπως και στις παραπάνω περιπτώσεις, η συνολική δύναμη οπλισμού, προκύπτει από τα φορτία (ενότητα 2.2), όπως αυτά δίνονται στις εξισώσεις του πίνακα 2.1.

<b>Φορτία στη σφήνα_1:</b>	
Ιδίο βάρος, $W_1=$	1413,321 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U_1=$	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_1=$	190,353 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_1=$	0,000 kN/m
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_1=$	526,501 kN/m
<b>Φορτία στη σφήνα_2:</b>	
Ιδίο βάρος, $W_2=$	305,534 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U_2=$	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_2=$	42,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_2=$	Δεν εφαρμόζεται
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_2=$	-184,473 kN/m
<b>Συνολική Δύναμη Οπλισμού:</b>	
<b><math>T_{tot}=</math></b>	<b>342,029 kN/m</b>

Εικόνα 3.48: Υπολογισμός απαιτούμενης δύναμης οπλισμού

1. Γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m

Συντελεστής $K=$	0,152
<b>Γεπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	80 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, $d_{50}$ :	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, $R_{char}$ :	80,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, $RF_{CR}$ :	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, $f_d$ :	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, $f_e$ :	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, $f_d$ :	1,02
$\alpha_s$ :	0,35
$\tan\delta/\tan\phi'$ :	0,60
$\sigma'_b/\sigma'_h$	4,00
$\alpha_b \cdot B/25$	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, $\alpha'$ :	0,38
Συντ. εξόλκευσης, $\lambda_p$ :	0,76
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
<b><math>P_{des}=</math></b>	<b>44,29 kN/m</b>
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
<b><math>N=</math></b>	<b>8</b>

Εικόνα 3.49: Διάταξη οπλισμού

Για γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m, η ανάλυση έχει ως αποτέλεσμα 8 στρώσεις οπλισμού για πρανές ύψους 15m. Όμως, επειδή στις 4 τελευταίες στρώσεις οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.50) είναι μικρότερες από τις αποστάσεις που υπολογίζονται από τα βάθη των στρώσεων, τοποθετούνται επιπλέον 4 στρώσεις ενίσχυσης ενδιάμεσα των αρχικών στρώσεων που είχαν πρόβλημα (μπλε χρώμα, εικόνα 3.50). Έτσι, συνολικά, οι αναγκαίες στρώσεις είναι 12.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	1,88	1,88	7,77
2	3,75	1,88	3,88
3	5,63	1,88	2,59
4	7,50	1,88	1,94
5	9,38	1,88	1,55
6	11,25	1,88	1,29
7	13,13	1,88	1,11
8	15,00	1,88	0,97
<b>ΔΙΟΡΘΩΣΗ</b>			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	1,88	1,88	7,77
2	3,75	1,88	3,88
3	5,63	1,88	2,59
4	7,50	1,88	1,94
5	8,44	0,94	1,73
6	9,38	0,94	1,55
7	10,31	0,94	1,41
8	11,25	0,94	1,29
9	12,19	0,94	1,20
10	13,13	0,94	1,11
11	14,06	0,94	1,04
12	15,00	0,94	0,97

Εικόνα 3.50: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις, όπως και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης για τις 12 στρώσεις υπολογίζονται όπως στο παράδειγμα της ενότητας 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση, $\sigma'_v$ (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, $\sigma'_n$ (kPa)	$L_e$ (m)
18,75	18,75	3,10
75,00	75,00	1,29
131,25	131,25	0,82
187,50	187,50	0,60
234,38	234,38	0,49
262,50	262,50	0,44
290,63	290,63	0,40
318,75	318,75	0,37
346,88	346,88	0,34
375,00	375,00	0,31
403,13	403,13	0,29
431,25	431,25	0,27

Εικόνα 3.51: Τάσεις εντός του πρανούς και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

## II. Γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m

<b>Γεωπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	110 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, d50:	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, Rchar:	110,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, R <sub>FCR</sub> :	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, fd:	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, fe:	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, fd:	1,02
as:	0,35
tanδ/tanφ':	0,60
σ'b/σ'n	4,00
αb*B/25	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, α':	0,38
Συντ. εξόλκευσης, λρ:	0,76
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
<b>Pdes=</b>	<b>60,89 kN/m</b>
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
<b>N=</b>	<b>6</b>

Εικόνα 3.52: Διάταξη οπλισμού

Από την ανάλυση πρανούς ύψους 15m για γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m, υπολογίζονται 6 στρώσεις οπλισμού. Όμως, επειδή στις 3 τελευταίες στρώσεις οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.53) είναι μικρότερες από τις αποστάσεις που υπολογίζονται από τα βάθη των στρώσεων, τοποθετούνται επιπλέον 3 στρώσεις ενίσχυσης ενδιάμεσα των αρχικών στρώσεων που είχαν πρόβλημα (μπλε χρώμα, εικόνα 3.53). Έτσι, συνολικά, οι αναγκαίες στρώσεις είναι 9.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	2,50	2,50	8,01
2	5,00	2,50	4,01
3	7,50	2,50	2,67
4	10,00	2,50	2,00
5	12,50	2,50	1,60
6	15,00	2,50	1,34
<b>ΔΙΟΡΘΩΣΗ</b>			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	2,50	2,50	8,01
2	5,00	2,50	4,01
3	7,50	2,50	2,67
4	8,75	1,25	2,29
5	10,00	1,25	2,00
6	11,25	1,25	1,78
7	12,50	1,25	1,60
8	13,75	1,25	1,46
9	15,00	1,25	1,34

Εικόνα 3.53: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις, όπως και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης για τις 9 στρώσεις υπολογίζονται ξανά όπως στο παράδειγμα της ενότητας 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση, $\sigma'_v$ (kPa)	Ορθή ενεργός τάση, $\sigma'_n$ (kPa)	Le (m)
25,00	25,00	3,68
100,00	100,00	1,41
175,00	175,00	0,87
237,50	237,50	0,66
275,00	275,00	0,58
312,50	312,50	0,51
350,00	350,00	0,46
387,50	387,50	0,42
425,00	425,00	0,38

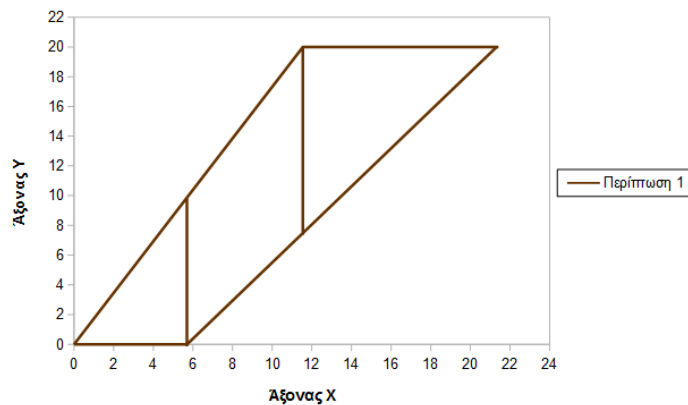
Εικόνα 3.54: Τάσεις εντός του πρανούς και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

### 3. Πρανές ύψους 20m

Γεωμετρία πρανούς:		Άλλες αποστάσεις:	
Υψος πρανούς, H:	20,000 m	a=	10,127 m
Συντεταγμένη χ κόμβου δυο σφηνών, X:	5,700 m	b=	9,873 m
Συντεταγμένη γ κόμβου δυο σφηνών, Y:	0,000 m	d=	12,516 m
Γωνία κλίσης πρανούς, β:	60 °	e=	15,883 m
Ειδικό βάρος υλικού, γ:	20,000 kN/m <sup>3</sup>	f=	9,497 m
Ενεργός γωνία τριβής, φ':	25,0 °	g=	25,380 m
Συνοχή, c':	10,000 kPa	j=	0,000 m
Πρόσθετο φορτίο, q:	0,000 kN/m <sup>2</sup>	k=	9,779 m
Συντελεστής ολίσθησης βάσης, λs:	1	m=	5,700 m
Γωνία άνω κλίσης, i:	0 °	s=	15,626 m
Πίεση πόρων, u:	0,000 kN/m <sup>2</sup>	t=	0,000 m
Βάθος σημείου πίεσης, h:	2,000 m	u=	0,000 m
Παράμετρος πίεσης πόρων, ru:	0,000	v=	0,000 m
		w=	0,000 m
<b>Έλεγχος Κατάστασης:</b>	<b>Περίπτωση 1</b>	z=	0,000 m

Εικόνα 3.55: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αποστάσεις πρανούς

Η συντεταγμένη X υπολογίζεται με δοκιμές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 3.7, ενώ στο διάγραμμα 3.10 απεικονίζεται η γεωμετρία του πρανούς.



Διάγραμμα 3.10: Πραγματική γεωμετρία πρανούς

Η γωνία τριβής και η συνοχή κάθε σφήνας είναι ίσες με τις αντίστοιχες του πρανούς, ενώ η γωνία βάσης για τη σφήνα 1 εκτιμάται ίση με  $52^\circ$  ύστερα από δοκιμές (διάγραμμα 3.7) με τη γωνία βάσης στη σφήνα 2 να ισούται με μηδέν.

Χαρακτηριστικά σφήνας:		Χαρακτηριστικά σφήνας:	
Ενεργός γωνία τριβής, $\varphi_1'$ :	$25,0^\circ$	Ενεργός γωνία τριβής, $\varphi_2'$ :	$25,0^\circ$
Γωνία βάσης, $\theta_1$ :	$52,00^\circ$	Γωνία βάσης, $\theta_2$ :	$0,0^\circ$
Συνοχή, $c_1'$ :	10,000 kPa	Συνοχή, $c_2'$ :	10,000 kPa

Εικόνα 3.56: Χαρακτηριστικά δύο σφηνών

Η συνολική δύναμη οπλισμού που είναι το άθροισμα των δυνάμεων οπλισμού των δύο σφηνών, προκύπτει από τα φορτία (ενότητα 2.2), όπως αυτά δίνονται στις εξισώσεις του πίνακα 2.1.

<b>Φορτία στη σφήνα_1:</b>	
Ιδίο βάρος, $W_1$ =	2532,998 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U_1$ =	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_1$ =	253,804 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_1$ =	0,000 kN/m
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_1$ =	1032,465 kN/m
<b>Φορτία στη σφήνα_2:</b>	
Ιδίο βάρος, $W_2$ =	562,743 kN/m
Πίεση πόρων βάσης, $U_2$ =	0,000 kN/m
Δύναμη συνοχής, $K_2$ =	57,000 kN/m
Δύναμη πρόσθετου φορτίου, $Q_2$ =	Δεν εφαρμόζεται
<b>Οπλισμός:</b>	
Δύναμη οπλισμού, $T_2$ =	-319,412 kN/m
<b>Συνολική Δύναμη Οπλισμού:</b>	
<b><math>T_{tot}</math>=</b>	<b>713,053 kN/m</b>

Εικόνα 3.57: Υπολογισμός απαιτούμενης δύναμης οπλισμού



1. Γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m

<b>Γεπλέγματα:</b>		
Κατηγορία:		80 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, d <sub>50</sub> :		30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:		60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, R <sub>char</sub> :		80,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, R <sub>Fcr</sub> :		1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, f <sub>d</sub> :		1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, f <sub>e</sub> :		1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, f <sub>d</sub> :		1,02
α <sub>s</sub> :		0,35
tanδ/tanφ':		0,60
σ'β/σ'η		4,00
α <sub>b</sub> *B/25		0,02
Συντ. συμπεριφοράς, α':		0,38
Συντ. εξόλκευσης, λ <sub>p</sub> :		0,76
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>		
<b>P<sub>des</sub>=</b>		<b>44,29 kN/m</b>
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>		
<b>N=</b>		<b>17</b>

Εικόνα 3.58: Διάταξη οπλισμού

Από την ανάλυση πρανούς ύψους 20m για γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m, υπολογίζονται 17 στρώσεις οπλισμού. Όμως, οι 9 τελευταίες στρώσεις φαίνεται να έχουν πρόβλημα καθώς οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.59) είναι μικρότερες από τις αποστάσεις που υπολογίζονται από τα βάθη των στρώσεων, τοποθετούνται επιπλέον 9 στρώσεις ενίσχυσης ενδιάμεσα των αρχικών στρώσεων που είχαν πρόβλημα (μπλε χρώμα, εικόνα 3.59). Έτσι, το σύνολο των στρώσεων που τοποθετούνται είναι 26.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	1,18	1,18	10,56
2	2,35	1,18	5,28
3	3,53	1,18	3,52
4	4,71	1,18	2,64
5	5,88	1,18	2,11
6	7,06	1,18	1,76
7	8,24	1,18	1,51
8	9,41	1,18	1,32
9	10,59	1,18	1,17
10	11,76	1,18	1,06
11	12,94	1,18	0,96
12	14,12	1,18	0,88
13	15,29	1,18	0,81
14	16,47	1,18	0,75
15	17,65	1,18	0,70
16	18,82	1,18	0,66
17	20,00	1,18	0,62

**ΔΙΟΡΘΩΣΗ**

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	1,18	1,18	10,56
2	2,35	1,18	5,28
3	3,53	1,18	3,52
4	4,71	1,18	2,64
5	5,88	1,18	2,11
6	7,06	1,18	1,76
7	8,24	1,18	1,51
8	9,41	1,18	1,32
9	10,00	0,59	1,24
10	10,59	0,59	1,17
11	11,18	0,59	1,11
12	11,76	0,59	1,06
13	12,35	0,59	1,01
14	12,94	0,59	0,96
15	13,53	0,59	0,92
16	14,12	0,59	0,88
17	14,71	0,59	0,84
18	15,29	0,59	0,81
19	15,88	0,59	0,78
20	16,47	0,59	0,75
21	17,06	0,59	0,73
22	17,65	0,59	0,70
23	18,24	0,59	0,68
24	18,82	0,59	0,66
25	19,41	0,59	0,64
26	20,00	0,59	0,62

Εικόνα 3.59: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης για τις 26 στρώσεις υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο της ενότητας 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση,σ'ν (kPa)	Ορθή ενεργός τάση,σ'n (kPa)	Le (m)
11,76	11,76	3,75
47,06	47,06	1,82
82,35	82,35	1,20
117,65	117,65	0,89
152,94	152,94	0,71
188,24	188,24	0,59
223,53	223,53	0,51
258,82	258,82	0,44
288,24	288,24	0,40
305,88	305,88	0,38
323,53	323,53	0,36
341,18	341,18	0,34
358,82	358,82	0,33
376,47	376,47	0,31
394,12	394,12	0,30
411,76	411,76	0,29
429,41	429,41	0,28
447,06	447,06	0,27
464,71	464,71	0,26
482,35	482,35	0,25
500,00	500,00	0,24
517,65	517,65	0,23
535,29	535,29	0,22
552,94	552,94	0,22
570,59	570,59	0,21
588,24	588,24	0,20

Εικόνα 3.60: Τάσεις εντός του πραινός και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

II. Γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m

Συντελεστής K=	0,178
<b>Γεπλέγματα:</b>	
Κατηγορία:	110 /20
Διάμετρος διερχόμενων κόκκων, d50:	30 mm
Διάρκεια ζωής έργου:	60 έτη
Χαρακτηριστική αντοχή, Rchar:	110,00 kN/m
Συντελεστής μείωσης οπλισμού, RF <sub>CR</sub> :	1,40
Συντ. μείωσης ζημιάς εγκατάστασης, fd:	1,15
Συντ. μείωσης περιβ. επιπτώσεων, fe:	1,10
Συντ. μείωσης αβεβαιοτήτων υλικού, fd:	1,02
as:	0,35
tanδ/tanφ':	0,60
σ'b/σ'n	4,00
αb*B/25	0,02
Συντ. συμπεριφοράς, α':	0,38
Συντ. εξόλκευσης, λρ:	0,76
<b>Αντοχή σχεδιασμού:</b>	
Pdes=	60,89 kN/m
<b>Αριθμός στρώσεων οπλισμού:</b>	
N=	12

Εικόνα 3.61: Διάταξη οπλισμού

Από την ανάλυση πρανούς ύψους 20m για γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m, υπολογίζονται 12 στρώσεις οπλισμού. Όμως, επειδή στις 6 τελευταίες στρώσεις οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις (κόκκινο χρώμα, εικόνα 3.62) είναι μικρότερες από τις αποστάσεις που υπολογίζονται από τα βάθη των στρώσεων, τοποθετούνται επιπλέον 6 στρώσεις ενίσχυσης ενδιάμεσα των αρχικών στρώσεων που είχαν πρόβλημα (μπλε χρώμα, εικόνα 3.62). Έτσι, συνολικά, οι αναγκαίες στρώσεις είναι 18.

Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	1,67	1,67	10,25
2	3,33	1,67	5,12
3	5,00	1,67	3,42
4	6,67	1,67	2,56
5	8,33	1,67	2,05
6	10,00	1,67	1,71
7	11,67	1,67	1,46
8	13,33	1,67	1,28
9	15,00	1,67	1,14
10	16,67	1,67	1,02
11	18,33	1,67	0,93
12	20,00	1,67	0,85
<b>ΔΙΟΡΘΩΣΗ</b>			
Στρώση	Βάθος στρώσης, z (m)	Αποστάσεις μεταξύ στρώσεων (m)	Μέγιστη απόσταση στρώσεων, Sv(m)
1	1,67	1,67	10,25
2	3,33	1,67	5,12
3	5,00	1,67	3,42
4	6,67	1,67	2,56
5	8,33	1,67	2,05
6	10,00	1,67	1,71
7	10,83	0,83	1,58
8	11,67	0,83	1,46
9	12,50	0,83	1,37
10	13,33	0,83	1,28
11	14,17	0,83	1,21
12	15,00	0,83	1,14
13	15,83	0,83	1,08
14	16,67	0,83	1,02
15	17,50	0,83	0,98
16	18,33	0,83	0,93
17	19,17	0,83	0,89
18	20,00	0,83	0,85

Εικόνα 3.62: Διόρθωση στρώσεων οπλισμού

Τέλος, και σε αυτό το πρηνές οι κατακόρυφες και ορθές τάσεις και το απαιτούμενο μήκος εξόλκευσης για τις 18 στρώσεις υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο της ενότητας 3.1.

Κατακόρυφη ενεργός τάση,σ'ν (kPa)	Ορθή ενεργός τάση,σ'n (kPa)	L <sub>e</sub> (m)
16,67	16,67	4,49
66,67	66,67	1,94
116,67	116,67	1,24
166,67	166,67	0,91
216,67	216,67	0,72
266,67	266,67	0,59
308,33	308,33	0,52
333,33	333,33	0,48
358,33	358,33	0,45
383,33	383,33	0,42
408,33	408,33	0,40
433,33	433,33	0,38
458,33	458,33	0,36
483,33	483,33	0,34
508,33	508,33	0,32
533,33	533,33	0,31
558,33	558,33	0,30
583,33	583,33	0,28

Εικόνα 3.63: Τάσεις εντός του πρηνούς και μήκος εξόλκευσης κάθε στρώσης

### 3.3 Σύγκριση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων της ενότητας 3.2 βγαίνει το συμπέρασμα πως όσο το ύψος του επιχώματος αυξάνεται, η ανάγκη για ενίσχυση γίνεται μεγαλύτερη, συνεπώς αυξάνονται και οι στρώσεις ενίσχυσης. Αυτό το συμπέρασμα είναι λογικό, αφού όσο πιο ψηλό είναι το επίχωμα τόσο πιο μεγάλο είναι το φορτίο που δέχεται λόγω του βάρους του και εφόσον το ίδιο βάρος του επιχώματος συμβάλλει στην ολίσθησή του, έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση για αύξηση της δύναμης οπλισμού.

Τέλος, όσο αυξάνεται η χαρακτηριστική αντοχή των γεωπλεγμάτων μειώνονται οι αναγκαίες στρώσεις ενίσχυσης σε κάθε επίχωμα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός των στρώσεων για ένα επίχωμα υπολογίζεται διαιρώντας την δύναμη οπλισμού με την αντοχή των γεωπλεγμάτων που επιλέγονται. Έτσι, οι αναλύσεις των επιχωμάτων της παραπάνω ενότητας με αντοχή 80kN/m εκτιμά περισσότερες στρώσεις οπλισμού σε σχέση με τις αντίστοιχες αναλύσεις για αντοχή 110kN/m.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

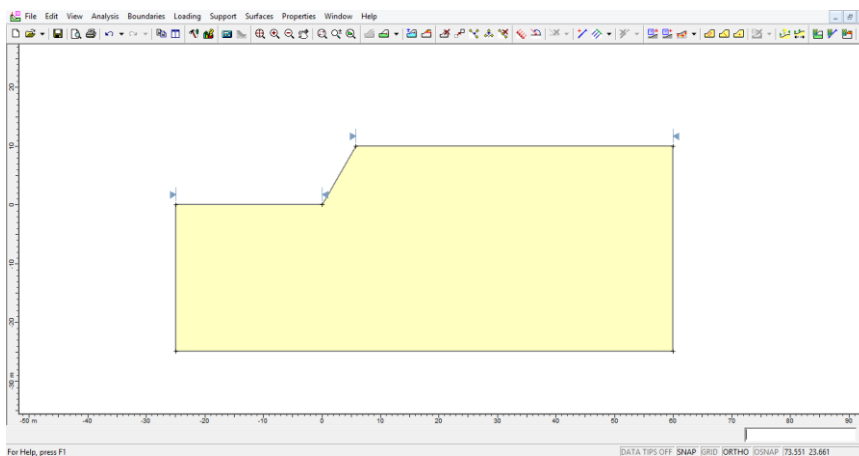
### ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

#### 4.1 Υπολογιστικό προσομοίωμα ευστάθειας πρανών slide

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται αναλύσεις σε πρανή προκειμένου να διερευνηθεί η ευστάθειά τους για κυκλική και τεθλασμένη επιφάνεια ολίσθησης. Οι αναλύσεις γίνονται μέσω του προγράμματος slide και βασίζονται στην απαιτούμενη δύναμη και στρώσεις οπλισμού, όπως αυτά προκύπτουν από τη μέθοδο των δύο σφηνών και το υπολογιστικό φύλλο excel (ενότητα 3.1), με τον υπολογισμό των φορτίων που ασκούνται στο πρανές. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα της ανάλυσης του πρανού, του οποίου η δύναμη οπλισμού και οι στρώσεις φαίνονται στην παράγραφο 3.1.

1. Εισαγωγή συντεταγμένων για καθορισμό του επιχώματος:

Με την εισαγωγή των συντεταγμένων στο πρόγραμμα, το πρανές παίρνει την μορφή της Εικόνας 4.1.



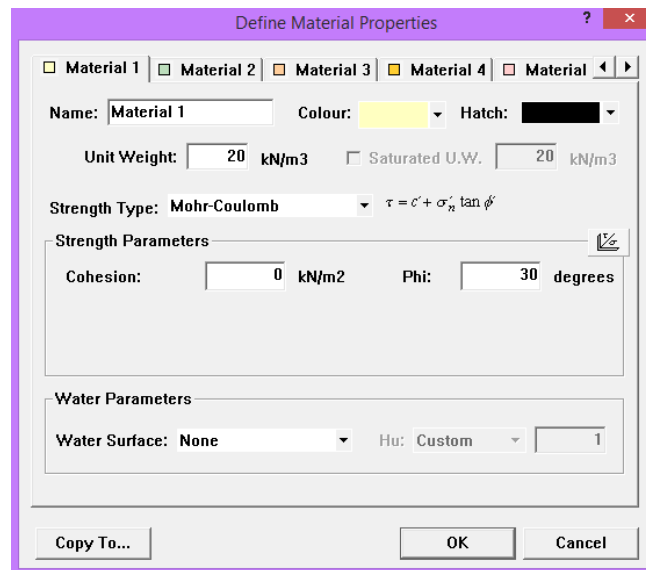
Εικόνα 4.1: Καθορισμός πρανού

2. Προσδιορισμός των ιδιοτήτων του εδάφους:

Εισάγονται τα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού, δηλαδή:

- ειδικό βάρος,  $\gamma=20\text{kN/m}^3$
- συνοχή,  $c=0$
- γωνία τριβής,  $\varphi'=30^\circ$
- υγρασία,  $w=0$

και επιλέγεται το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb για ανάλυση του επιχώματος.

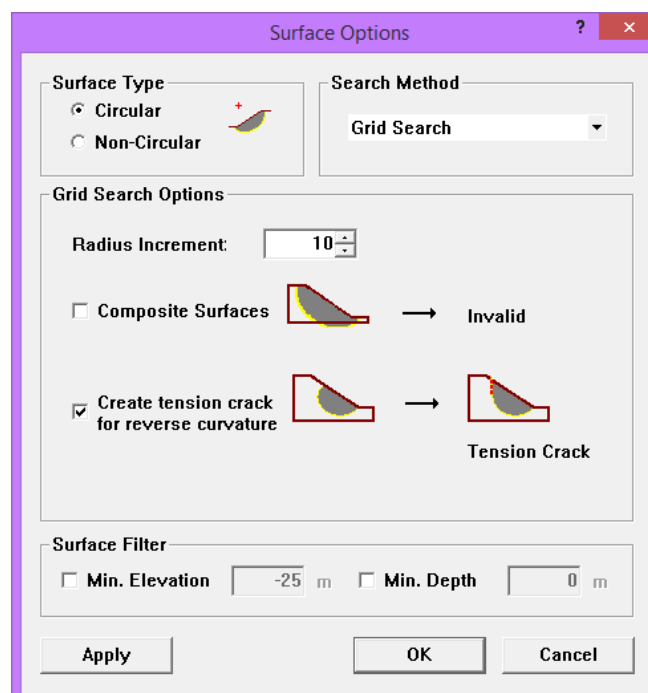


Εικόνα 4.2: Ιδιότητες του εδαφικού υλικού

### 3. Κυκλική επιφάνεια ολίσθησης:

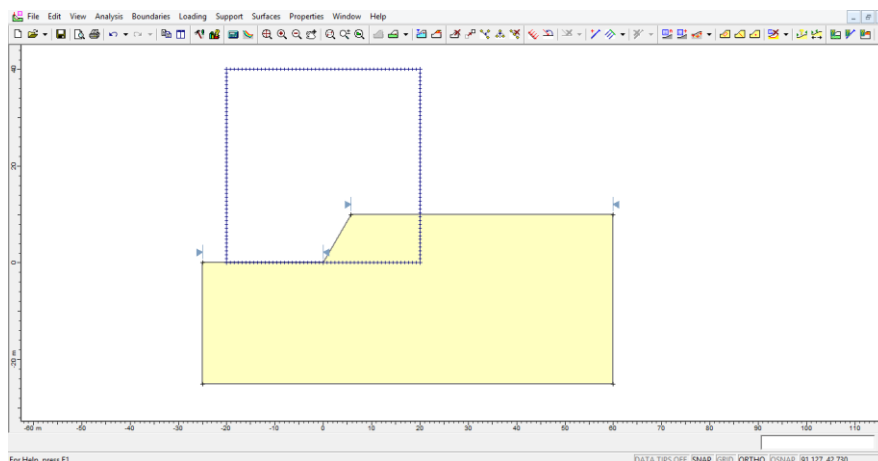
#### α. Ορισμός κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης

Επιλέγεται η κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και η μέθοδος του πλέγματος (grid) για την αναζήτηση των δυσμενέστερων επιφανειών ολίσθησης.



Εικόνα 4.3: Ορισμός κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης

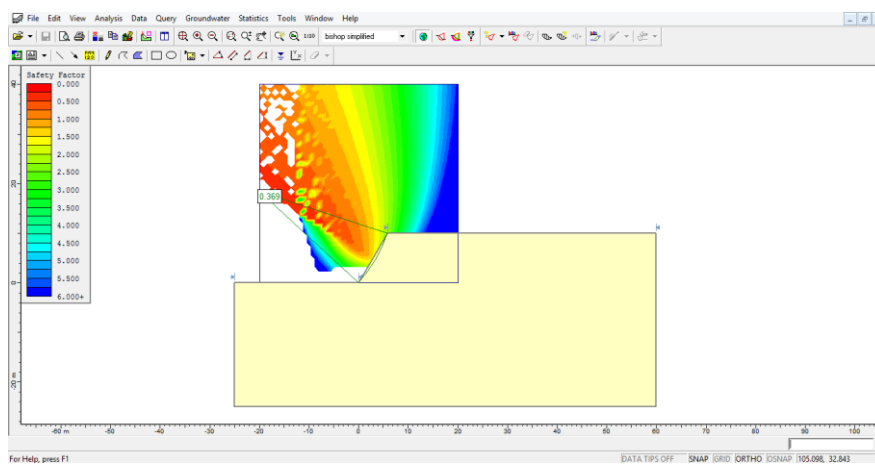
## β. Εισαγωγή πλέγματος για ανάλυση κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης



Εικόνα 4.4: Εισαγωγή search grid

## γ. Υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας για κυκλική επιφάνεια χωρίς οπλισμό

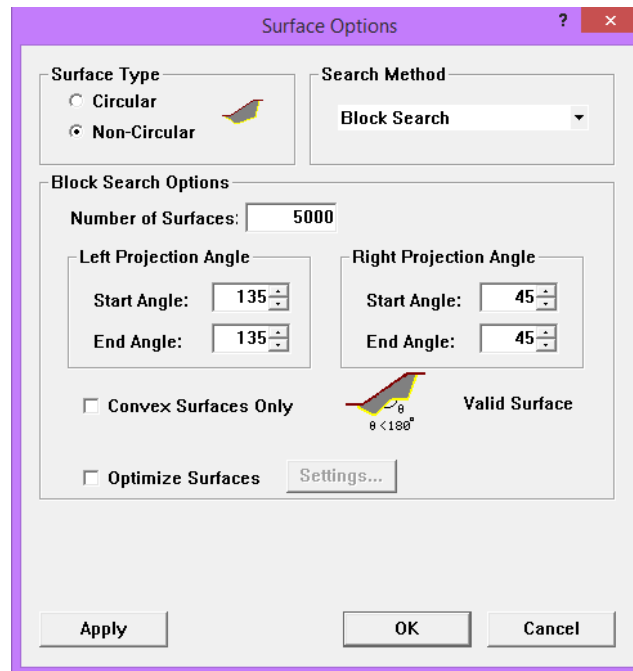
Μετά την εισαγωγή του πλέγματος, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας ίσος με 0.369. Αυτό σημαίνει πως το πρανές θα αστοχήσει. Προκειμένου να αποφευχθεί η αστοχία, δηλαδή ο συντελεστής ασφαλείας να είναι μεγαλύτερος της μονάδας, τοποθετείται οπλισμός. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μελετώνται γεωπλέγματα χαρακτηριστικής αντοχής 200kN/m και υπολογίζονται 3 στρώσεις οπλισμού σε βάθος 5m, 7.50m και 10m (ενότητα 3.1).



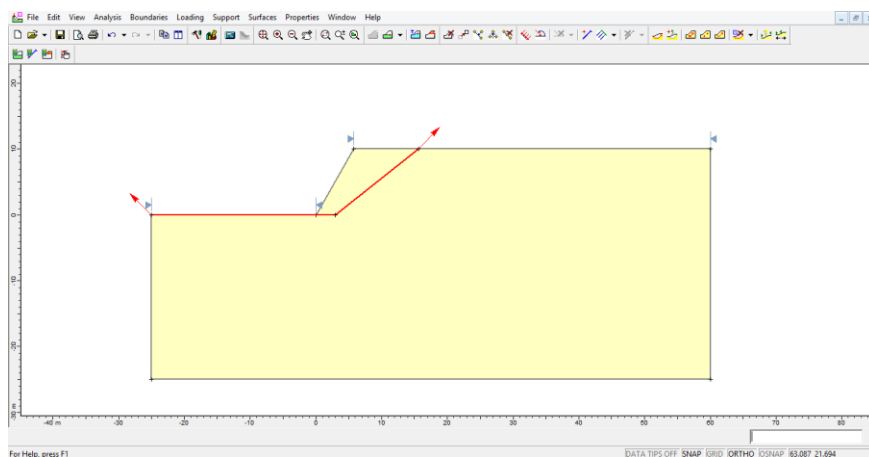
Εικόνα 4.5: Ανάλυση πρανούς για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης χωρίς ενίσχυση

4. Τεθλασμένη επιφάνειας ολίσθησης:α. *Ορισμός τεθλασμένης επιφάνειας ολίσθησης*

Επιλέγεται η τεθλασμένη επιφάνεια ολίσθησης και η μέθοδος της πολυγωνικής γραμμής (polyline) για την αναζήτηση των δυσμενέστερων επιφανειών ολίσθησης.



Εικόνα 4.6: Ορισμός τεθλασμένης επιφάνειας ολίσθησης

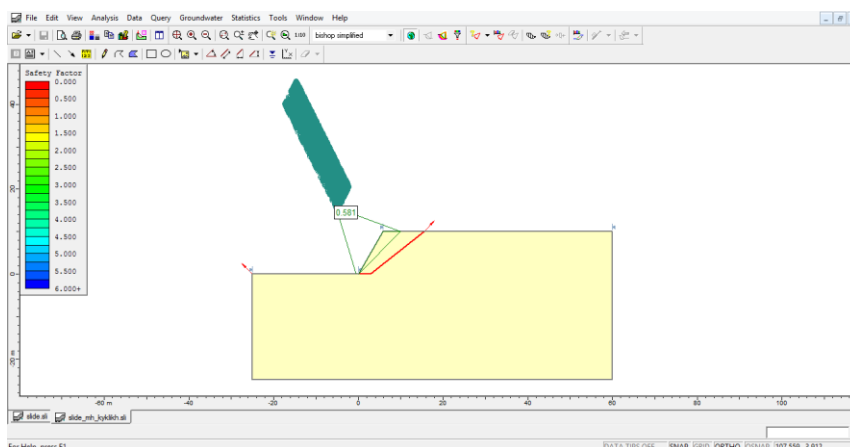
β. *Εισαγωγή πολυγωνικής γραμμής για ανάλυση τεθλασμένης επιφάνειας ολίσθησης*

Εικόνα 4.7: Εισαγωγή polyline



- γ. Υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας για τεθλασμένη επιφάνεια χωρίς οπλισμό

Μετά την εισαγωγή της πολυγωνικής γραμμής, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας ίσος με 0.581. Και σε αυτή την περίπτωση το πρηνές θα αστοχήσει επειδή ο συντελεστής είναι μικρότερος της μονάδας. Εφαρμόζονται τα ίδια γεωπλέγματα χαρακτηριστικής αντοχής 200kN/m για 3 στρώσεις οπλισμού σε βάθος 5m, 7.50m και 10m όπως και στην κυκλική επιφάνεια ολίσθησης.



Εικόνα 4.8: Ανάλυση πρηνούς για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης χωρίς ενίσχυση

##### 5. Ορισμός ιδιοτήτων οπλισμού:

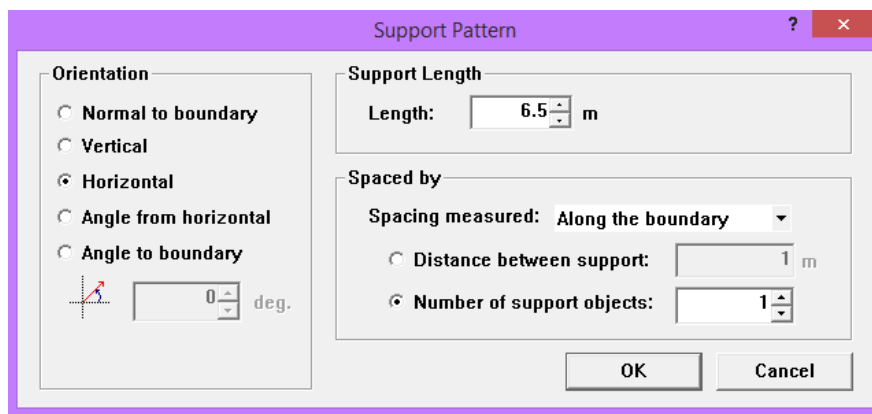
Εικόνα 4.9: Ιδιότητες οπλισμού

Δίνονται στο πρόγραμμα τα χαρακτηριστικά των γεωπλεγμάτων:

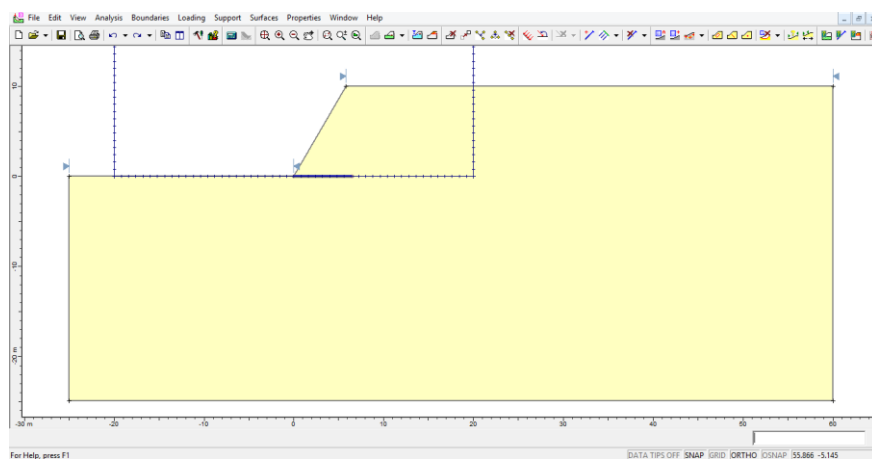
- αντοχή σχεδιασμού,  $P_{des}=110.72\text{kN/m}$ , η οποία υπολογίζεται διαιρώντας τη χαρακτηριστική αντοχή με ένα σύνολο συντελεστών (εικόνα 3.5)
- γωνία τριβής,  $\varphi'=30^\circ$
- πρόσφυση  $=0.8\text{kN/m}^2$

6. Εισαγωγή οριζώντιου οπλισμού για τις δύο επιφάνειες ολίσθησης:

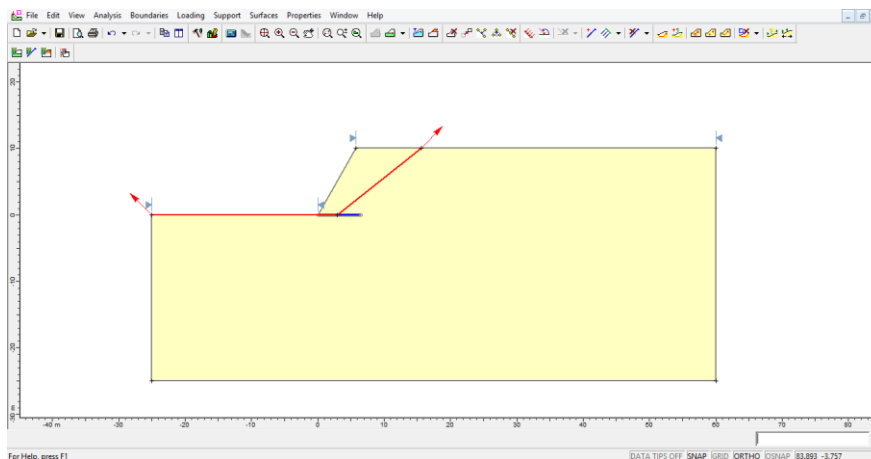
Στη συνέχεια, εισάγονται τα 3 γεωπλέγματα στο πρηνές σε οριζόντια διεύθυνση με τη σειρά ξεκινώντας από τα 10m βάθος. Το πρώτο γεώπλεγμα (στα 10m) έχει μήκος 6.5m, το δεύτερο (σε βάθος 7.50m) έχει μήκος 9.75m και το τρίτο (σε βάθος 5m) έχει μήκος 13.19m).



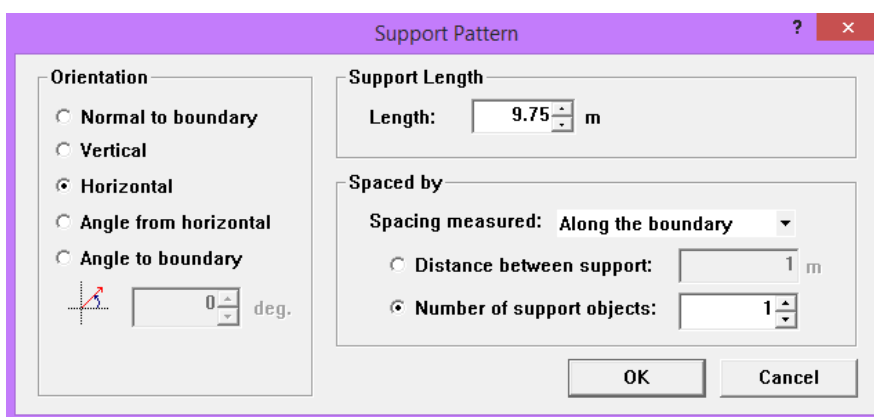
Εικόνα 4.10: Μήκος 1ης στρώσης οπλισμού



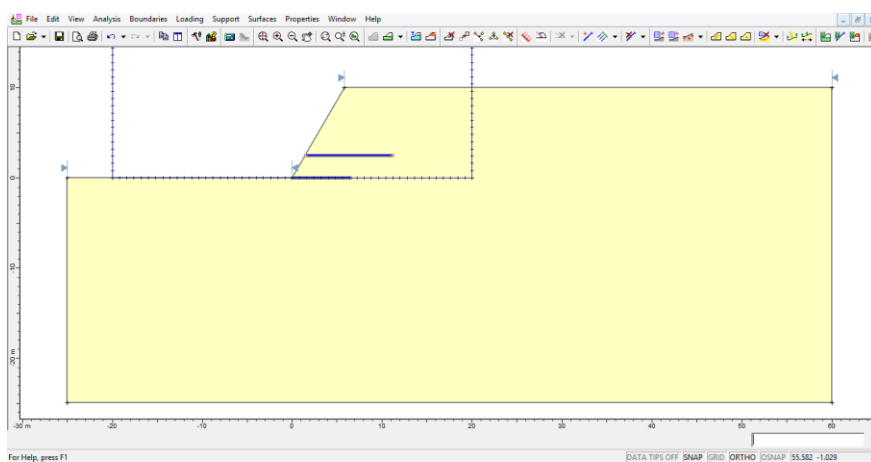
Εικόνα 4.11: Εισαγωγή 1ης στρώσης οπλισμού για κυκλική επιφάνεια



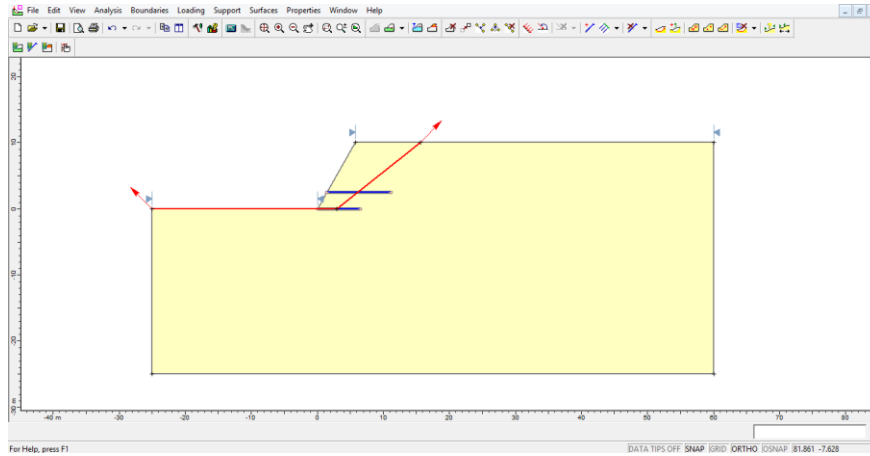
Εικόνα 4.12: Εισαγωγή 1ης στρώσης οπλισμού για τεθλασμένη επιφάνεια



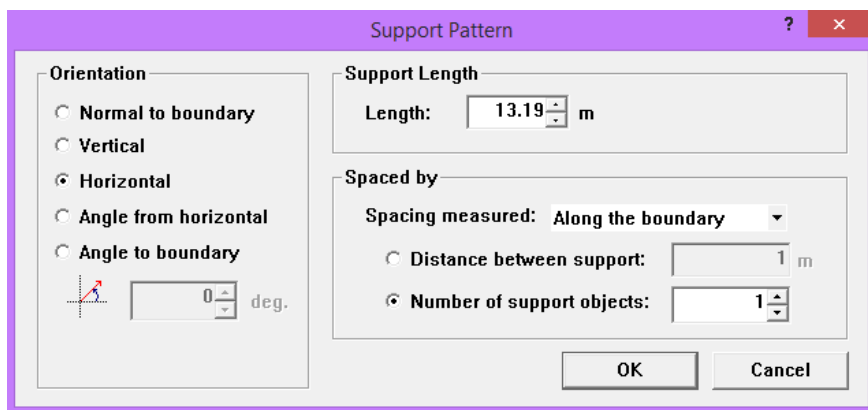
Εικόνα 4.13: Μήκος 2ης στρώσης οπλισμού



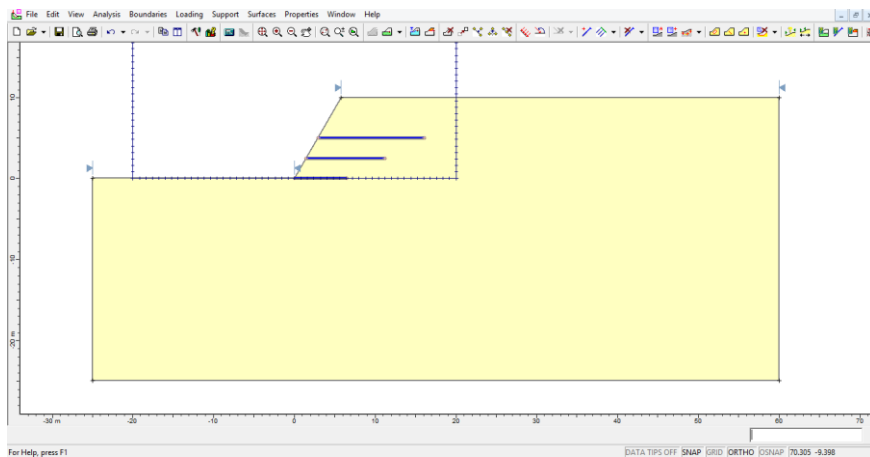
Εικόνα 4.14: Εισαγωγή 2ης στρώσης οπλισμού για κυκλική επιφάνεια



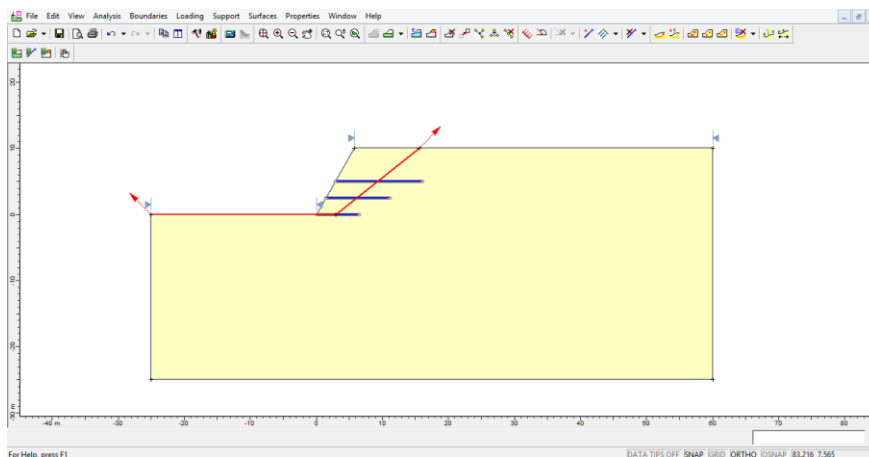
Εικόνα 4.15: Εισαγωγή 2ης στρώσης σπλισμού για τεθλασμένη επιφάνεια



Εικόνα 4.16: Μήκος 3ης στρώσης σπλισμού



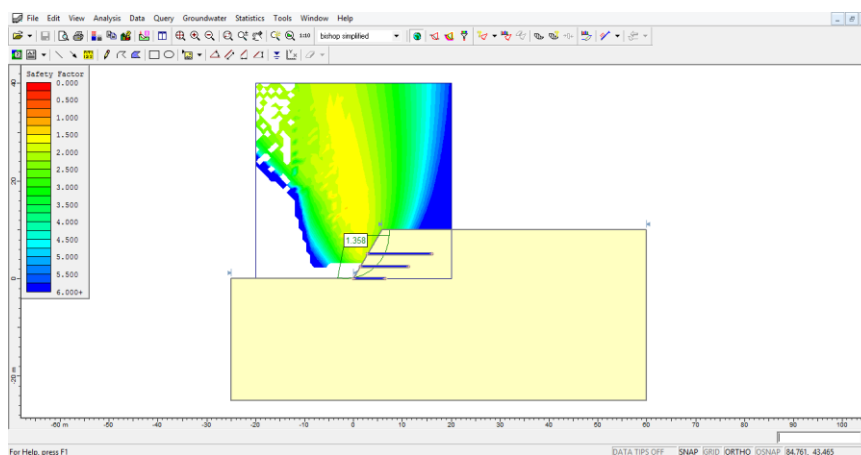
Εικόνα 4.17: Εισαγωγή 3ης στρώσης σπλισμού για κυκλική επιφάνεια



Εικόνα 4.18: Εισαγωγή 3ης στρώσης οπλισμού για τεθλασμένη επιφάνεια

7. Ανάλυση ευστάθειας για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης με οπλισμό:

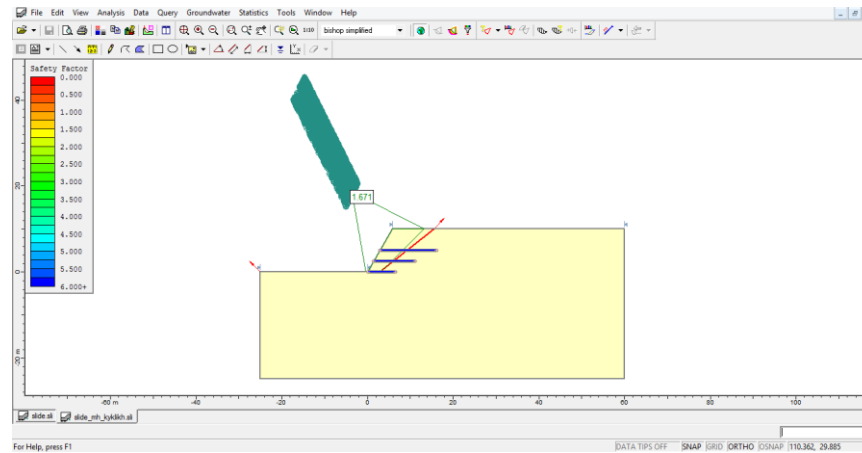
Ύστερα από την εισαγωγή του οπλισμού, πραγματοποιείται ξανά έλεγχος ευστάθειας και ο συντελεστής ασφαλείας, για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης, υπολογίζεται ίσος με 1.358. Αυτό σημαίνει ότι το πρανές πλέον δεν κινδυνεύει από ολίσθηση.



Εικόνα 4.19: Ανάλυση ευστάθειας με οπλισμό

8. Ανάλυση ευστάθειας για τεθλασμένη επιφάνεια ολίσθησης με οπλισμό:

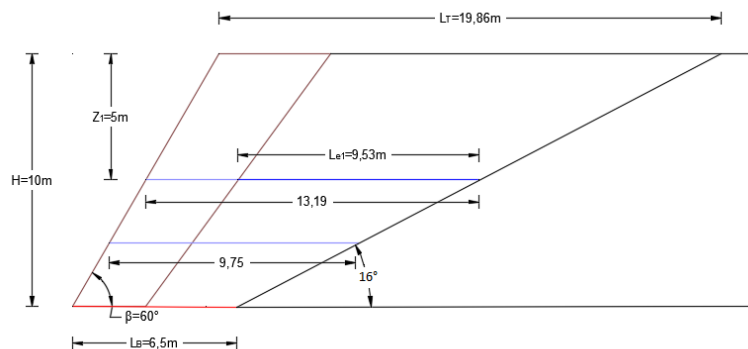
Όπως και για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης, γίνεται ξανά έλεγχος ευστάθειας και ο συντελεστής ασφαλείας, για τεθλασμένη επιφάνεια ολίσθησης, υπολογίζεται ίσος με 1.671. Δηλαδή, το πρανές δεν κινδυνεύει να αστοχήσει.



Εικόνα 4.20: Ανάλυση ευστάθειας με οπλισμό

9. Τελική μορφή του επιχώματος μετά την εισαγωγή του οπλισμού:

Η τελική μορφή του πρανούς μετά την προσθήκη των γεωπλεγμάτων φαίνεται στην εικόνα 4.21.



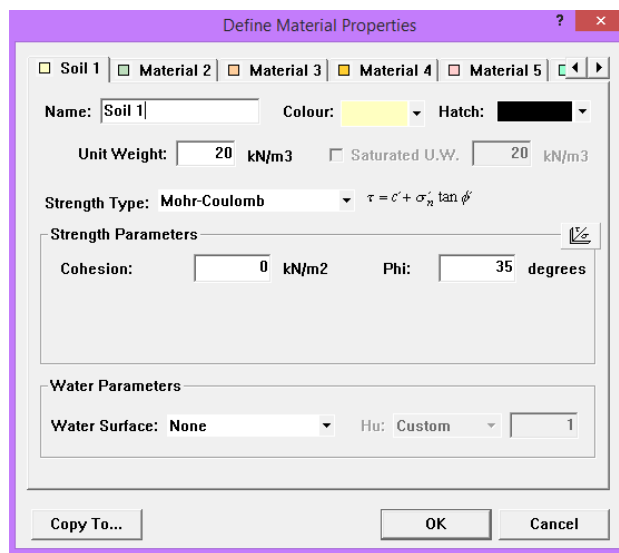
Εικόνα 4.21: Τελική μορφή του επιχώματος

## 4.2 Παραμετρικές αναλύσεις τυπικών εφαρμογών με θεώρηση κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης

Στη συνέχεια, βάσει των αποτελεσμάτων της ενότητας 3.2 από το υπολογιστικό φύλλο excel, για πρανή 10m, 15m, 20m για χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο υλικό και γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m και 110kN/m, πραγματοποιούνται αναλύσεις για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης προκειμένου να διαπιστωθεί η ευστάθεια των πρανών πριν και μετά την εισαγωγή των γεωπλεγμάτων. Για όλες τις περιπτώσεις, το μήκος κάθε γεωπλέγματος προκύπτει κατά το σχεδιασμό του αντίστοιχου επιχώματος.

### 4.2.1 Χονδρόκοκκο Υλικό

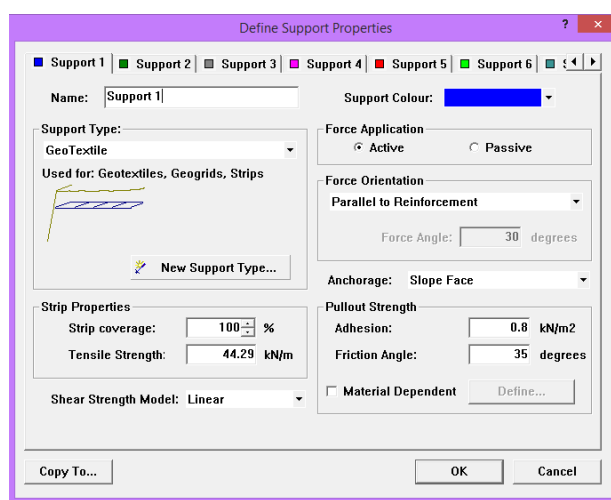
Αρχικά, γίνονται οι αναλύσεις του χονδρόκοκκου υλικού με συνοχή  $c'=0$ , γωνία τριβής  $\phi'=35^\circ$  και ειδικό βάρος  $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ .



Εικόνα 4.22: Ιδιότητες χονδρόκοκκου υλικού

#### 1. Γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m

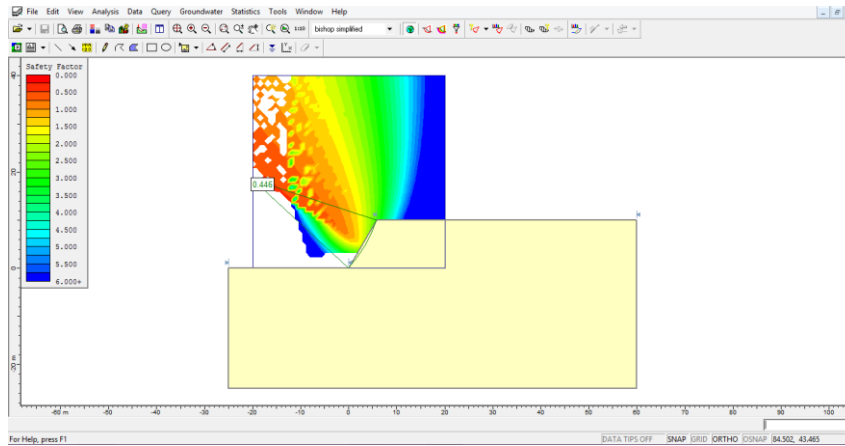
Τα γεωπλέγματα με χαρακτηριστική αντοχή 80kN/m έχουν εφελκυστική αντοχή 44.29kN/m, όπως υπολογίζεται από το excel (ενότητα 3.2), πρόσφυση ίση με 0.8kN/m<sup>2</sup> και γωνία τριβής ίση 35°.



Εικόνα 4.23: Ιδιότητες γεωπλεγμάτων αντοχής 80kN/m

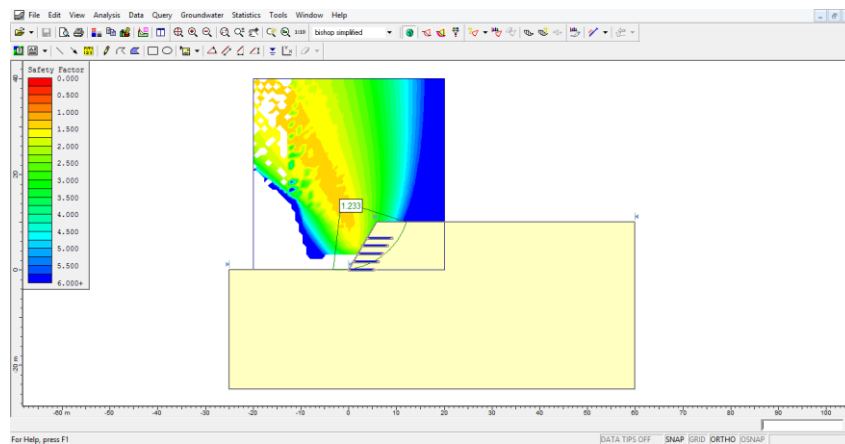
I. Πρανές ύψους 10m

Το πρανές με ύψος 10m έχει συντελεστή ασφαλείας 0.446 πριν την τοποθέτηση οπλισμού που σημαίνει ότι είναι απαραίτητος ο οπλισμός για την ευστάθειά του.



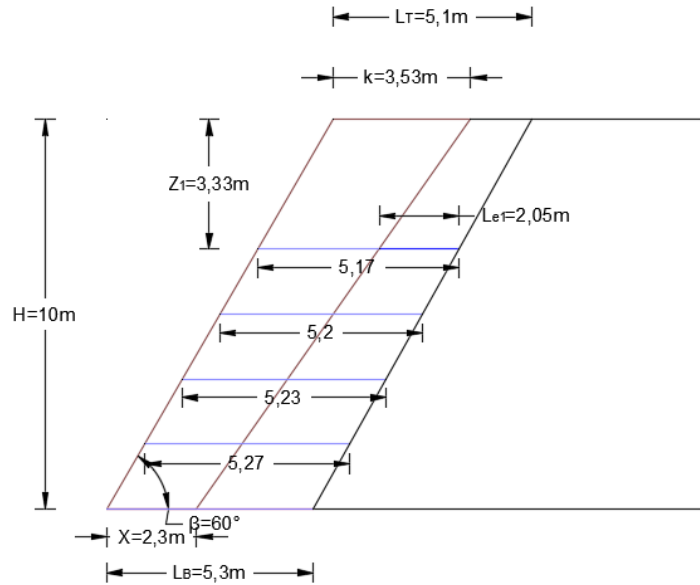
Εικόνα 4.24: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m χωρίς οπλισμό

Μετά την τοποθέτηση των 5 γεωπλεγμάτων, η ανάλυση δίνει συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1.233. Άρα, το πρανές δεν κινδυνεύει από αστοχία.



Εικόνα 4.25: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m με οπλισμό

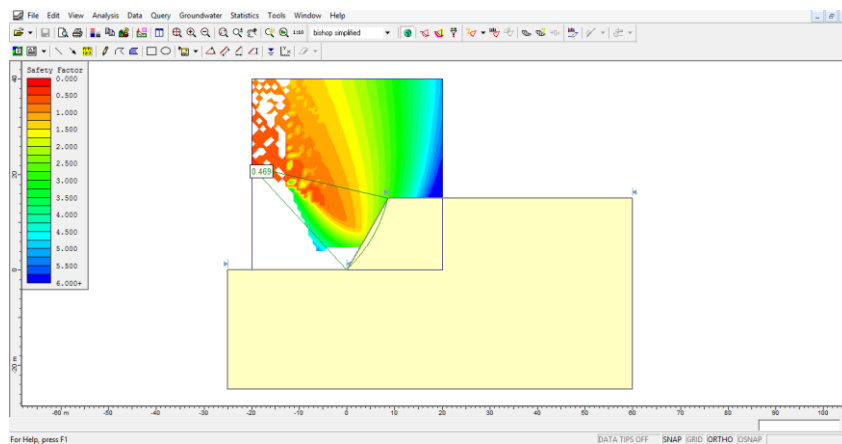




Εικόνα 4.26: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 10m

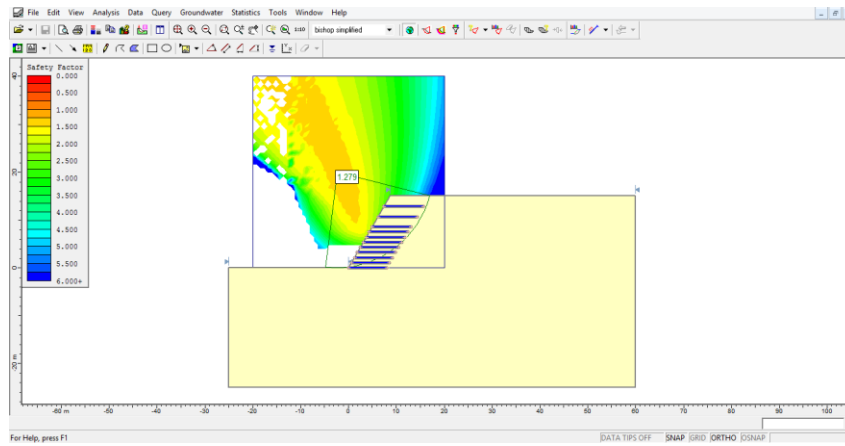
## II. Πρανές ύψους 15m

Η ανάλυση για το επίχωμα ύψους 15m, δίνει συντελεστή ασφαλείας 0.469 πριν την τοποθέτηση των γεωπλεγμάτων.

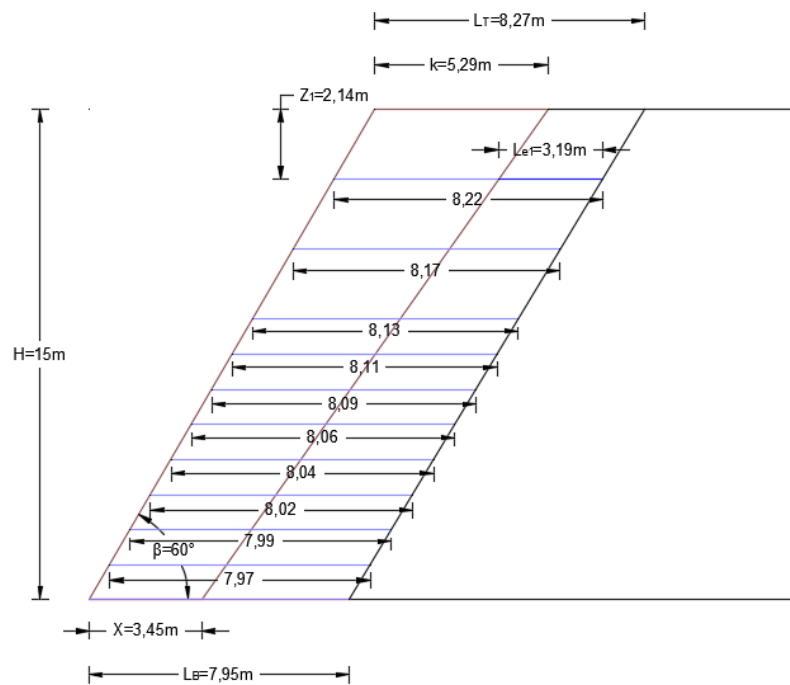


Εικόνα 4.27: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m χωρίς οπλισμό

Αφού τοποθετούνται τα 11 γεωπλέγματα, ο συντελεστής ασφαλείας είναι 1.279. Άρα, το πρανές δεν κινδυνεύει από αστοχία.



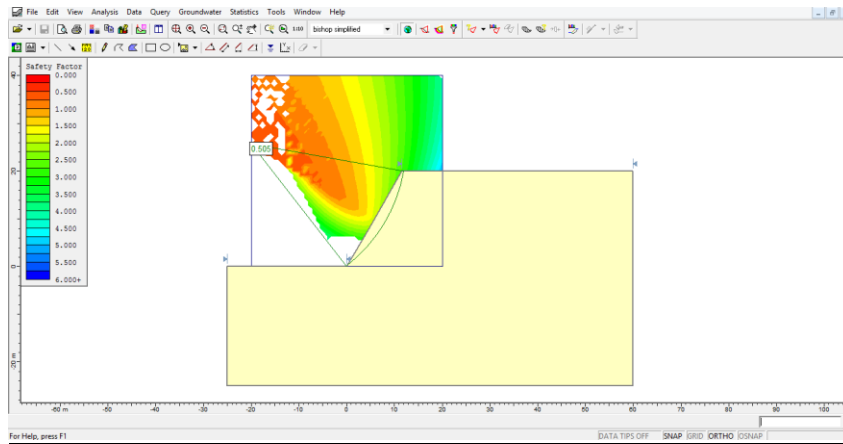
Εικόνα 4.28: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m με οπλισμό



Εικόνα 4.29: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 15m

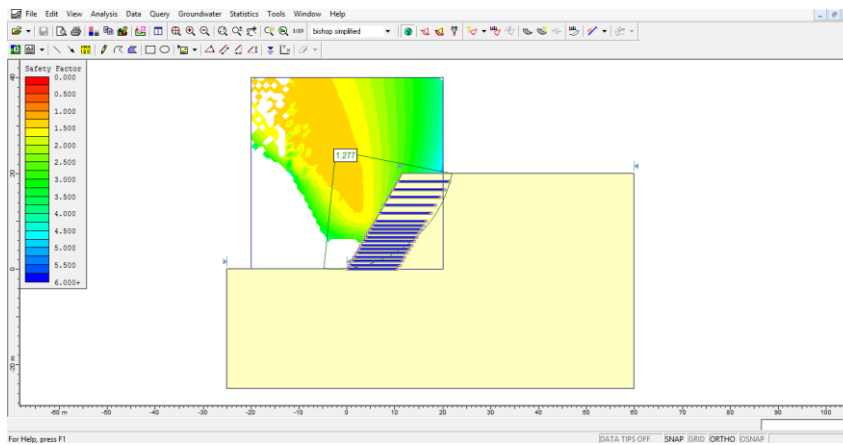
### III. Πρανές ύψους 20m

Η ανάλυση για το επίχωμα ύψους 20m χωρίς οπλισμό, δίνει συντελεστή ασφαλείας 0.505.

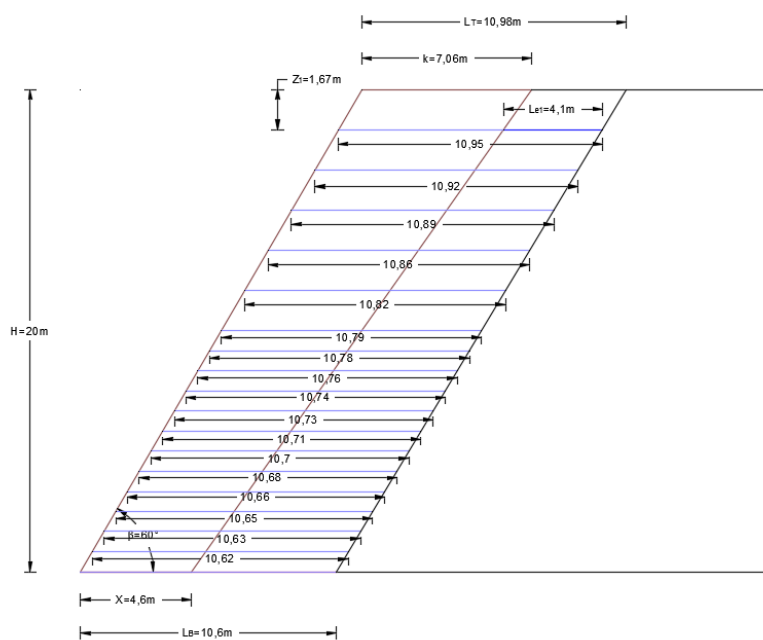


Εικόνα 4.30: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m χωρίς οπλισμό

Μετά την υποστήριξη του επιχώματος με 18 γεωπλέγματα, η ανάλυση δίνει συντελεστή ίσο με 1.277.



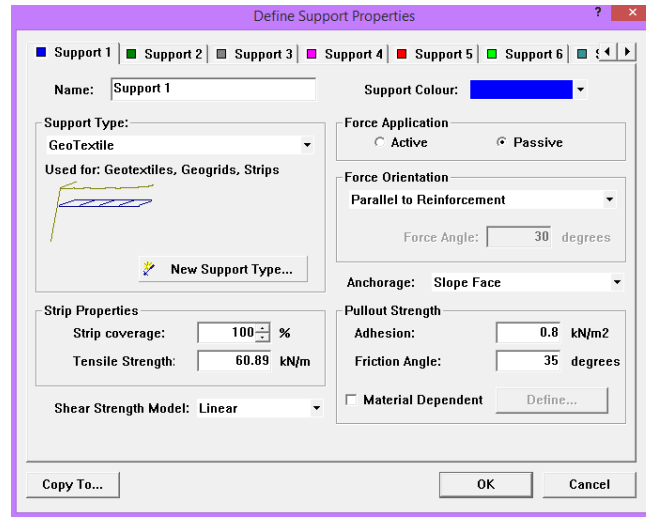
Εικόνα 4.31: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m με οπλισμό



Εικόνα 4.32: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 20m

## 2. Γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m

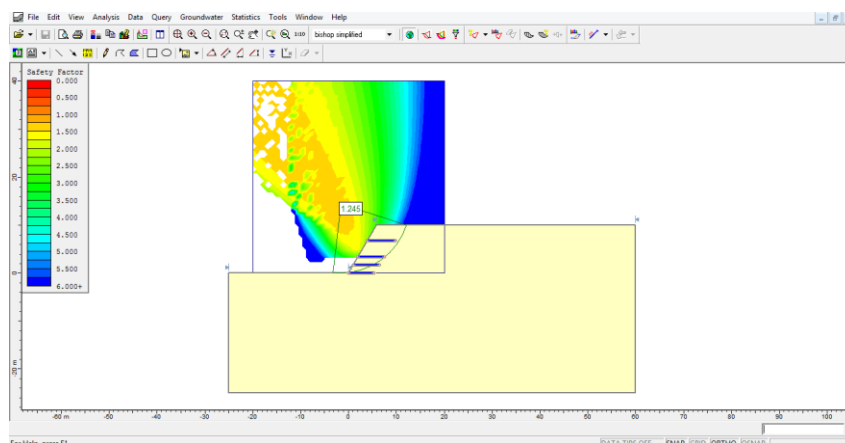
Τα γεωπλέγματα με χαρακτηριστική αντοχή 110kN/m έχουν εφελκυστική αντοχή 60.89kN/m, όπως υπολογίζεται από το excel (ενότητα 3.2), πρόσφυση ίση με 0.8kN/m<sup>2</sup> και γωνία τριβής ίση με 35°.



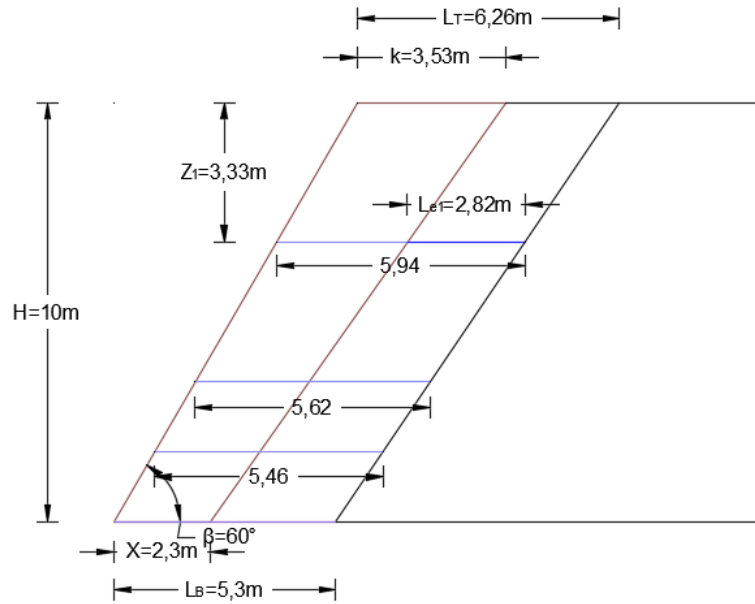
Εικόνα 4.33: Ιδιότητες γεωπλεγμάτων αντοχής 110kN/m

### I. Πρανές ύψους 10m

Αφού τοποθετούνται 4 γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m στο επίχωμα με ύψος 10m, η ανάλυση δίνει συντελεστή ασφαλείας 1.245, σε αντίθεση με την ανάλυση χωρίς οπλισμό που δίνει συντελεστή ίσο με 0.446.



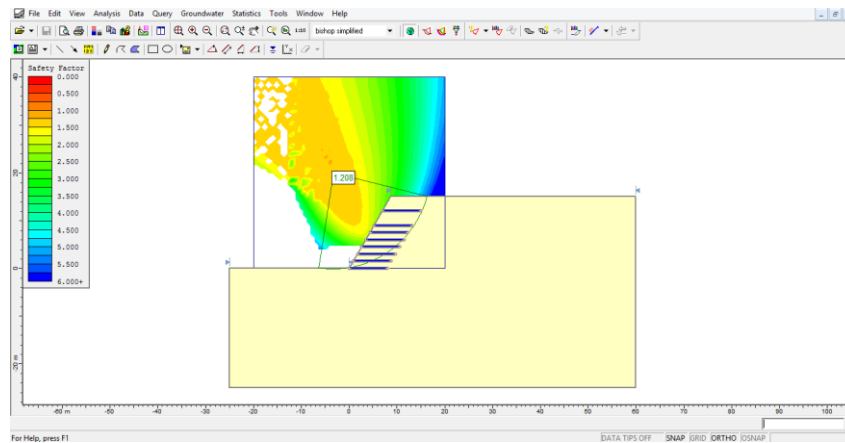
Εικόνα 4.34: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m με οπλισμό



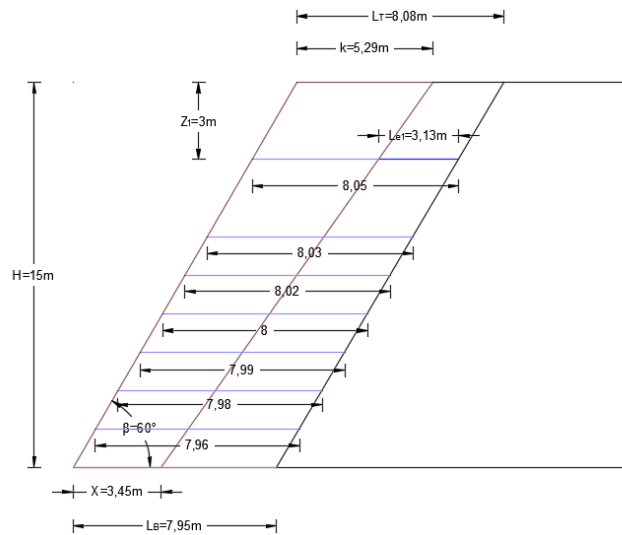
Εικόνα 4.35: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 10m

## II. Πρανές ύψους 15m

Τα 8 γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m που τοποθετούνται στο πρανές ύψους 15m, δίνουν συντελεστή ασφαλείας 1.208, ενώ χωρίς τον οπλισμό ο συντελεστής είναι ίσος με 0.469.



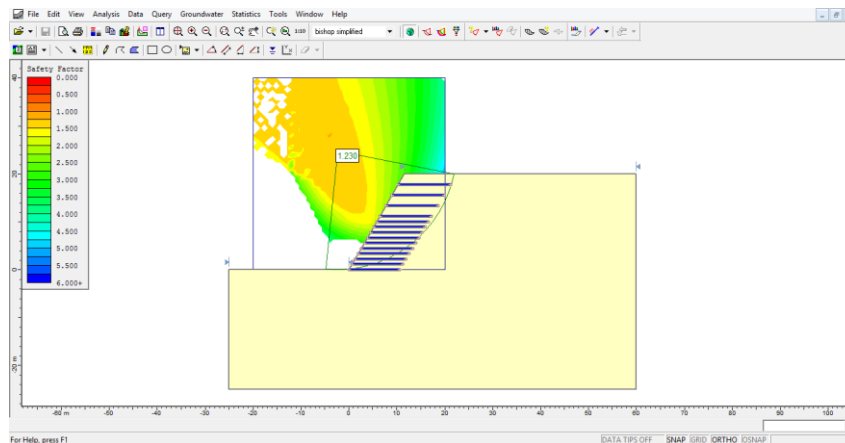
Εικόνα 4.36: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m με οπλισμό



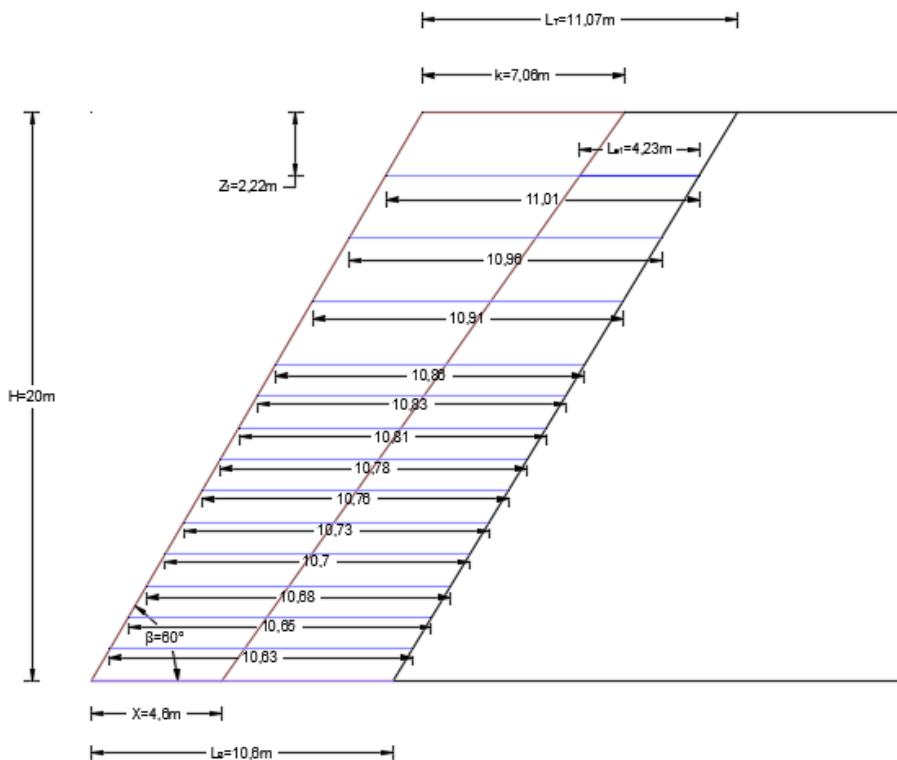
Εικόνα 4.37: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 15m

### III. Πρανές ύψους 20m

Αφού τοποθετούνται τα 14 γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m στο πρανές ύψους 20m, υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 1.230, ενώ χωρίς τον οπλισμό ο συντελεστής είναι ίσος με 0.505.



Εικόνα 4.38: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m με οπλισμό



Εικόνα 4.39: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 20m

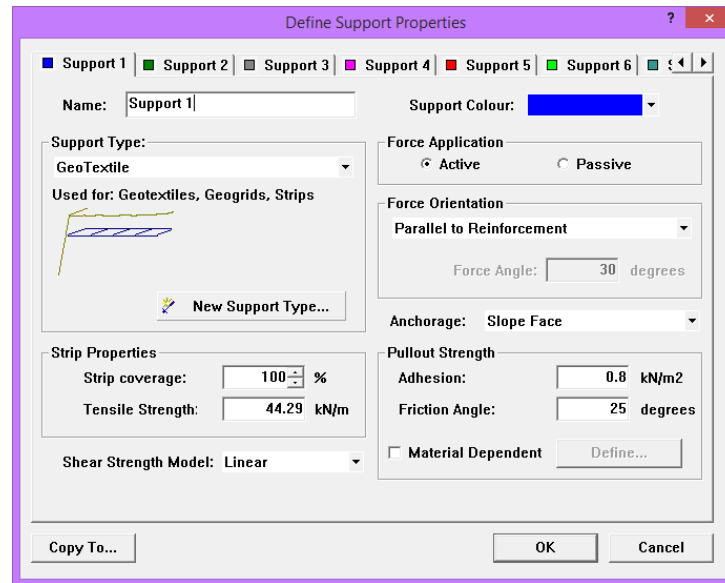
#### 4.2.2 Λεπτόκοκκο Υλικό

Έπειτα, πραγματοποιούνται οι αναλύσεις για το λεπτόκοκκο υλικό με συνοχή  $c' = 10 \text{ kPa}$ , γωνία τριβής  $\phi' = 25^\circ$  και ειδικό βάρος  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ .

Εικόνα 4.40: Ιδιότητες λεπτόκοκκου υλικού

## 1. Γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m

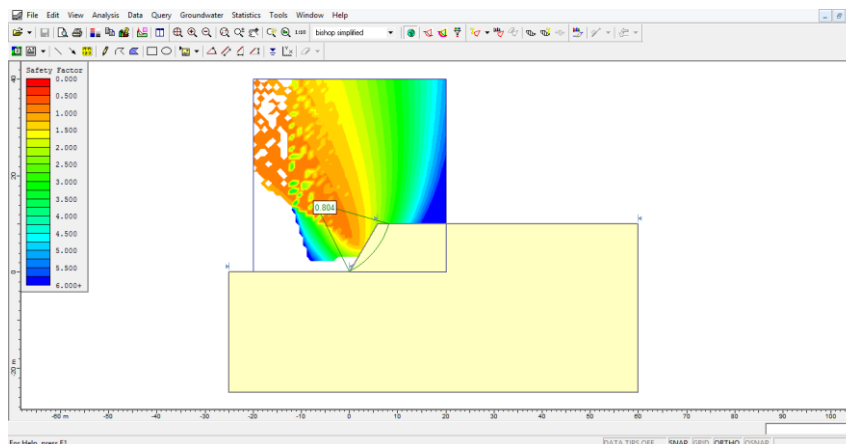
Τα γεωπλέγματα με χαρακτηριστική αντοχή 80kN/m έχουν εφελκυστική αντοχή 44.29kN/m, όπως υπολογίζεται από το excel (ενότητα 3.2), πρόσφυση ίση με 0.8kN/m<sup>2</sup> και γωνία τριβής 25°.



Εικόνα 4.41: Ιδιότητες γεωπλεγμάτων αντοχής 80kN/m

### 1. Πρανές ύψους 10m

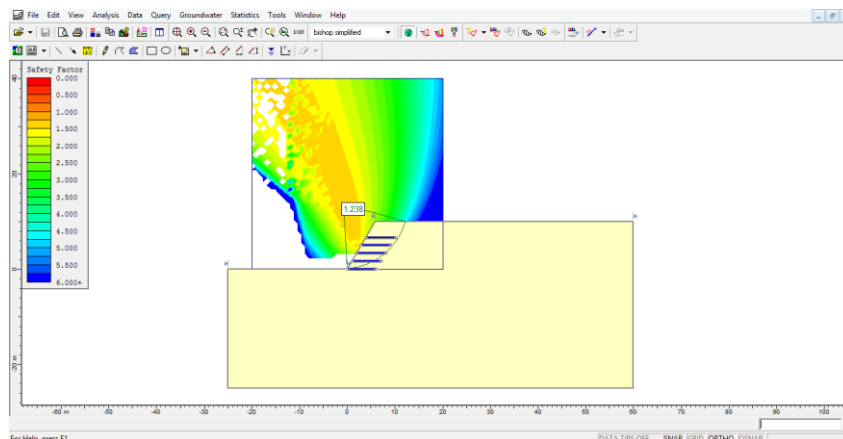
Το πρανές με ύψος 10m έχει συντελεστή ασφαλείας 0.804 πριν την τοποθέτηση οπλισμού. Αυτό σημαίνει ότι είναι απαραίτητος ο οπλισμός για την ευστάθειά του.



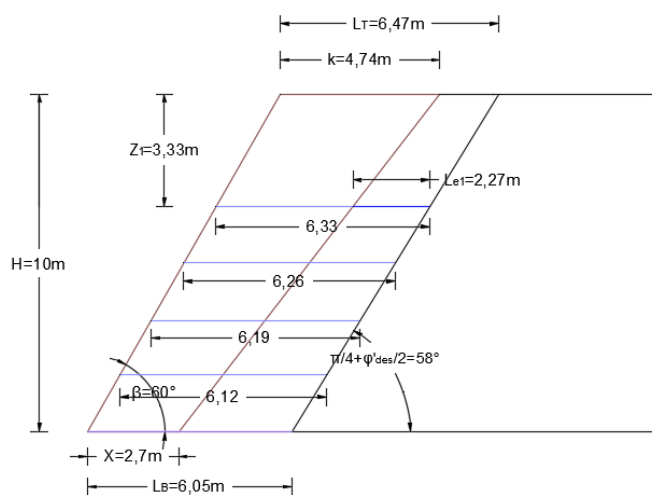
Εικόνα 4.42: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m χωρίς οπλισμό

Αφού τοποθετούνται τα 5 γεωπλέγματα, γίνεται ξανά η ανάλυση και προκύπτει συντελεστής ασφαλείας 1.238.





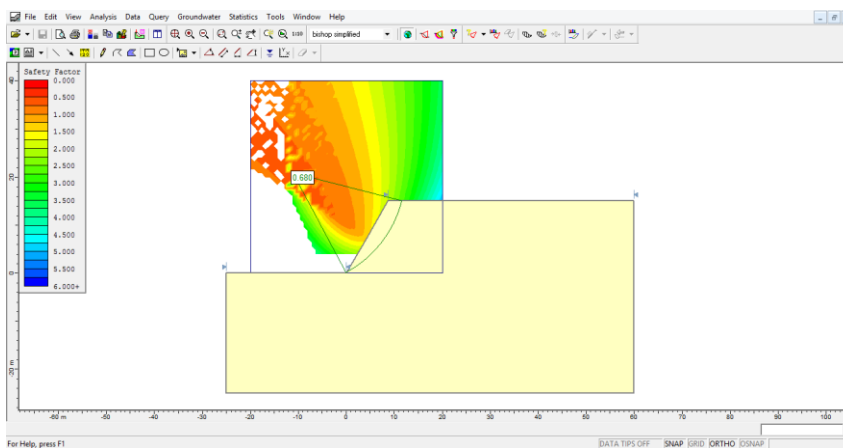
Εικόνα 4.43: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m με οπλισμό



Εικόνα 4.44: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 10m

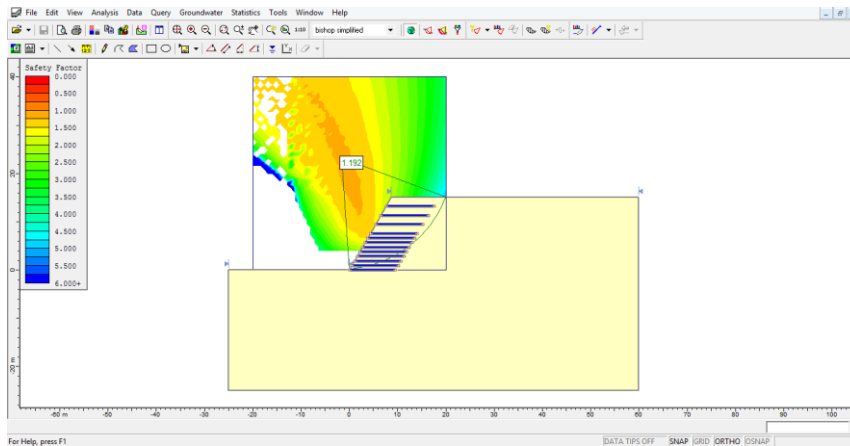
## II. Πρανές ύψους 15m

Για το πρανές ύψους 15m χωρίς οπλισμό, ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0.680.

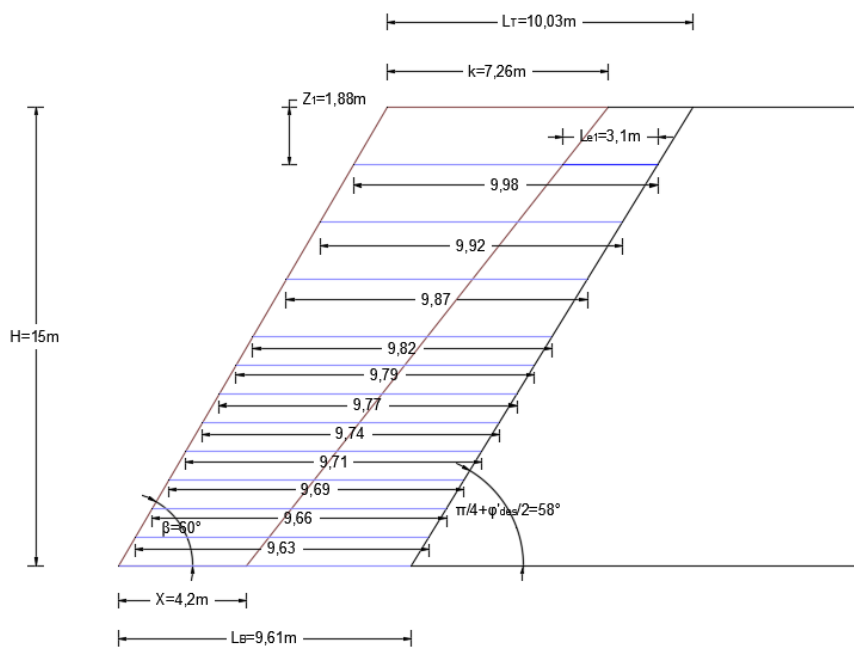


Εικόνα 4.45: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m χωρίς οπλισμό

Μετά την τοποθέτηση 12 γεωπλεγμάτων, το πρανές έχει συντελεστή ασφαλείας 1.192.



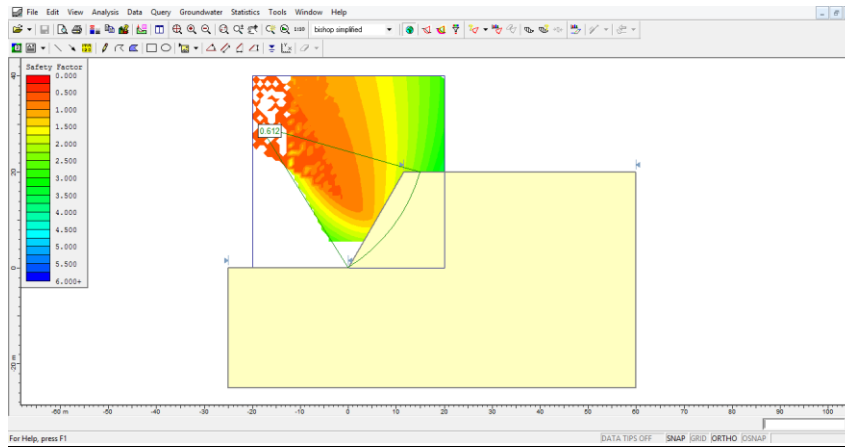
Εικόνα 4.46: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m με οπλισμό



Εικόνα 4.47: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 15m

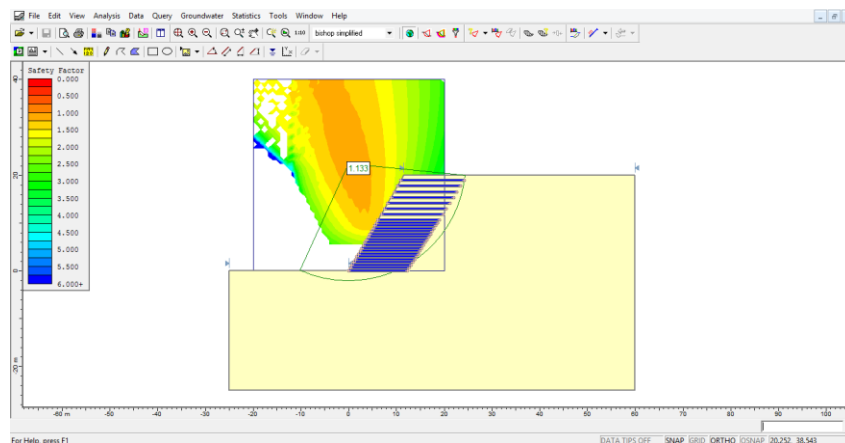
### III. Πιανές ύψους 20m

Για το επιχώμα ύψους 20m, ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0.612.

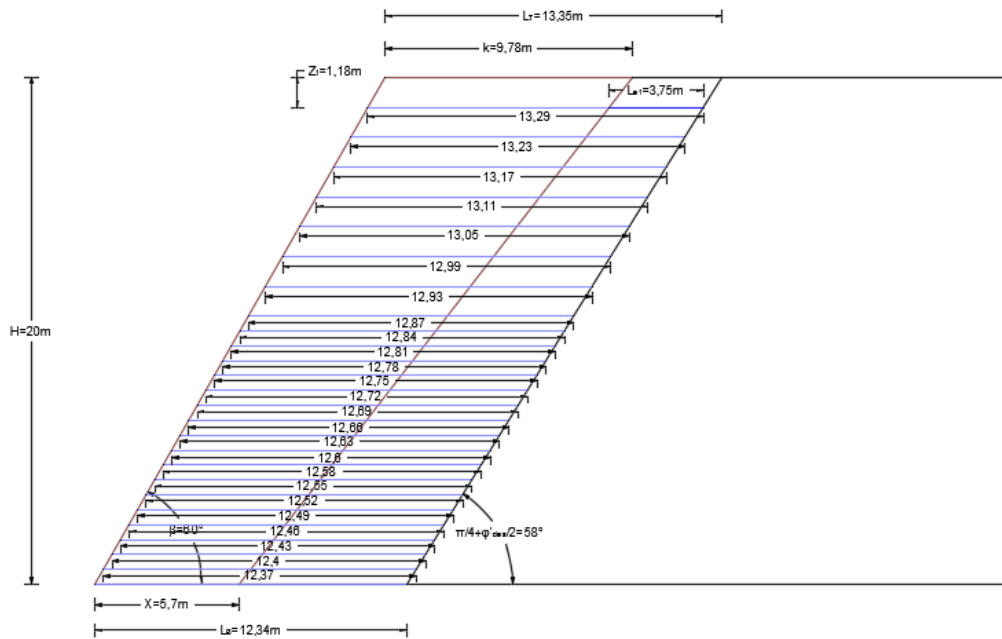


Εικόνα 4.48: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m χωρίς οπλισμό

Αφού τοποθετούνται τα 26 γεωπλέγματα που υπολογίζονται στην ανάλυση του excel, ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει ίσος με 1.133.



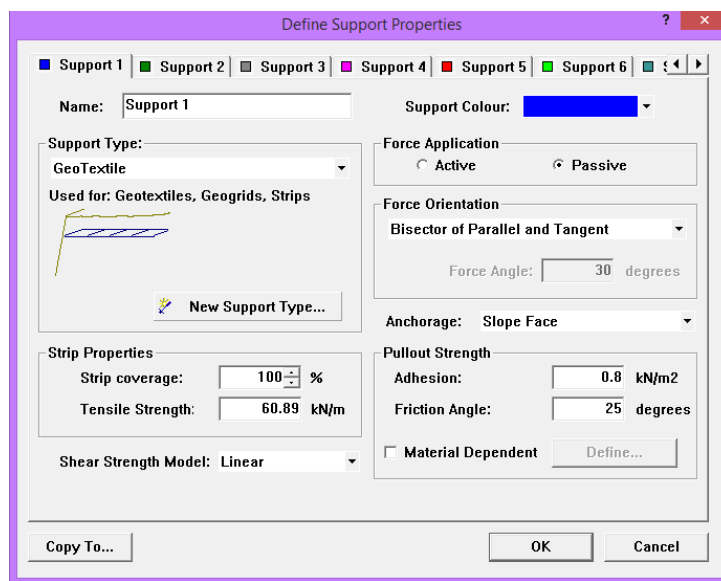
Εικόνα 4.49: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m με οπλισμό



Εικόνα 4.50: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 20m

## 2. Γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m

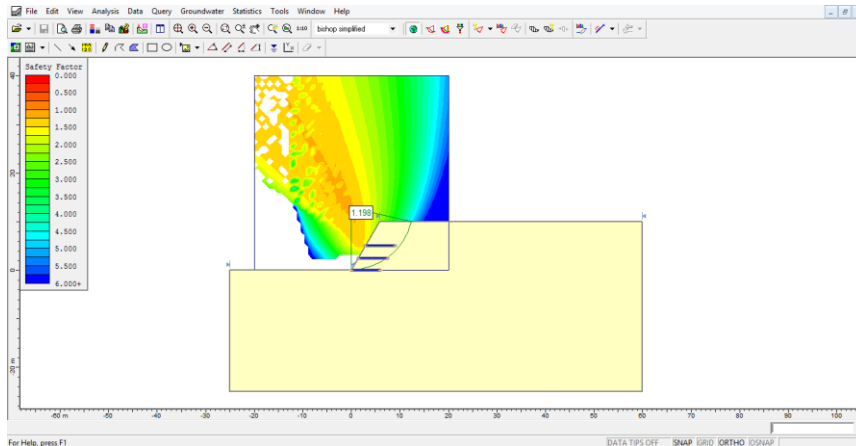
Τα γεωπλέγματα με χαρακτηριστική αντοχή 110kN/m έχουν εφελκυστική αντοχή 60.89kN/m, όπως υπολογίζεται από το excel (ενότητα 3.2), πρόσφυση ίση με 0.8kN/m<sup>2</sup> και γωνία τριβής 25°.



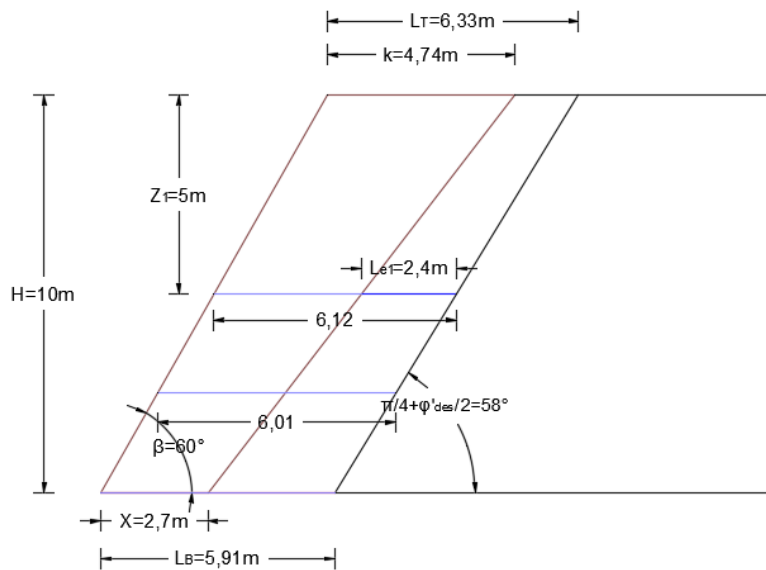
Εικόνα 4.51: Ιδιότητες γεωπλεγμάτων αντοχής 110kN/m

### I. Πρανές ύψους 10m

Αφού τοποθετούνται οι 3 οπλισμοί αντοχής 110kN/m στο πρανές ύψους 10m, υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 1.198, ενώ χωρίς τον οπλισμό ο συντελεστής είναι ίσος με 0.804.



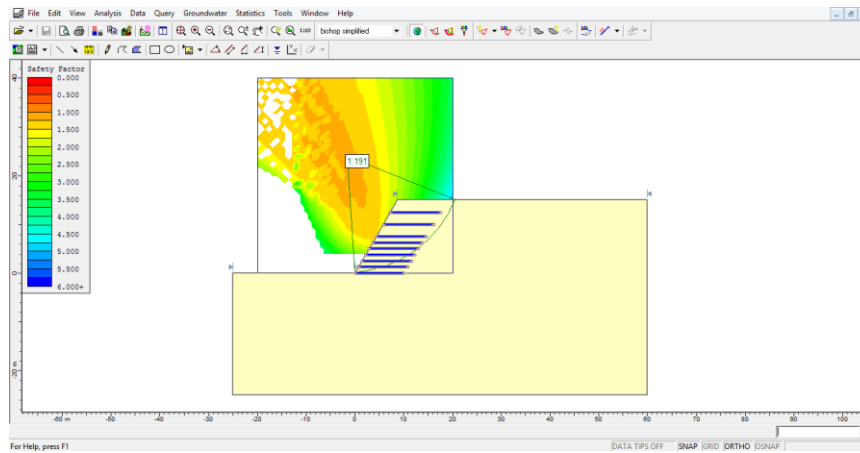
Εικόνα 4.52: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m με οπλισμό



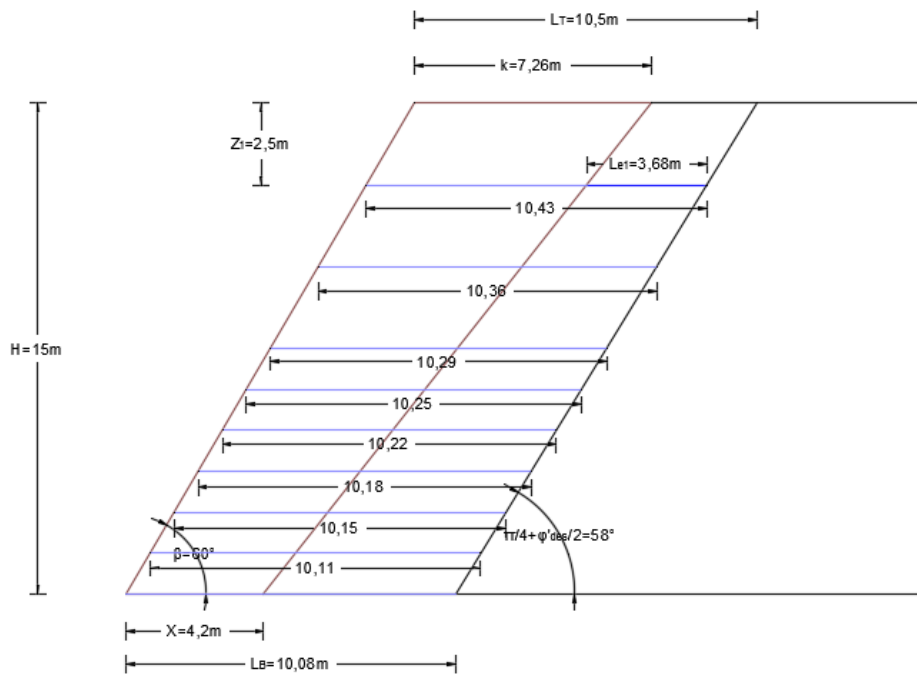
Εικόνα 4.53: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 10m

### II. Πρανές ύψους 15m

Μετά την τοποθέτηση των 9 γεωπλεγμάτων αντοχής 110kN/m στο επίχωμα ύψους 15m, υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 1.191, ενώ χωρίς τον οπλισμό ο συντελεστής είναι 0.680.



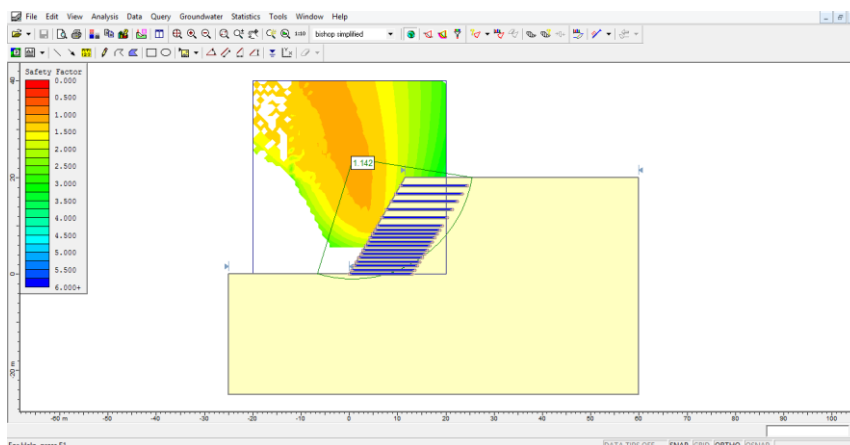
Εικόνα 4.54: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m με οπλισμό



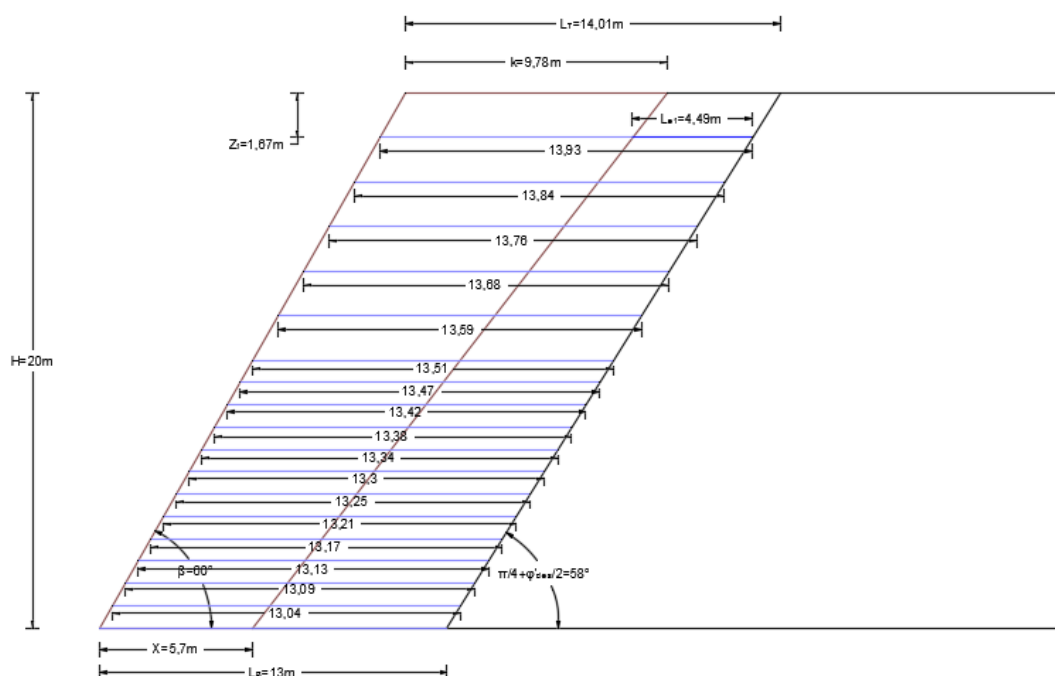
Εικόνα 4.55: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 15m

### III. Πρανές ύψους 20m

Αφού τοποθετούνται οι 18 οπλισμοί αντοχής 110kN/m στο πρανές ύψους 20m, υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 1.142, ενώ χωρίς τον οπλισμό ο συντελεστής είναι 0.612.



Εικόνα 4.56: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m με οπλισμό



Εικόνα 4.57: Μήκη γεωπλεγμάτων για πρανές ύψους 20m

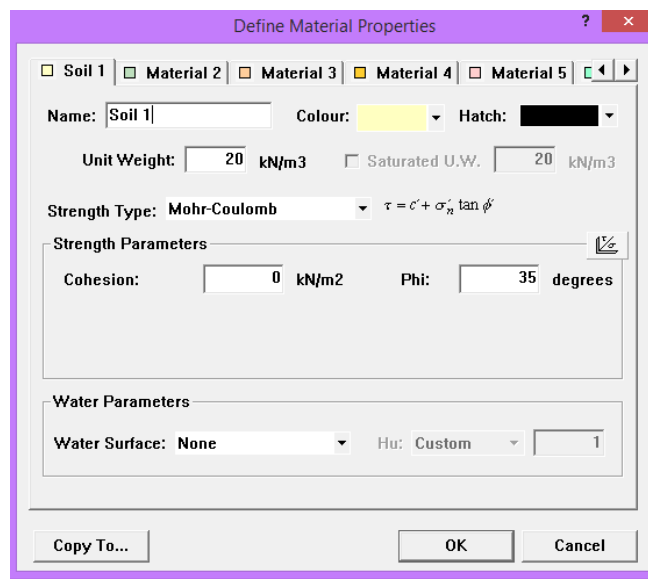
### 4.3 Παραμετρικές αναλύσεις τυπικών εφαρμογών με θεώρηση τεθλασμένης επιφάνειας ολίσθησης

Ομοίως, και σε αυτή την ενότητα, πραγματοποιούνται αναλύσεις για τεθλασμένη επιφάνεια ολίσθησης προκειμένου να διαπιστωθεί η ευστάθεια των πρανών πριν και μετά την εισαγωγή των γεωπλεγμάτων. Οι αναλύσεις βασίζονται στα αποτελέσματα που προκύπτουν στην ενότητα 3.2 από το υπολογιστικό φύλλο excel, για πρανή 10m, 15m, 20m για χονδρόκοκκο και

λεπτόκοκκο υλικό και γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m και 110kN/m, Για όλες τις περιπτώσεις, το μήκος κάθε γεωπλέγματος προκύπτει κατά το σχεδιασμό του αντίστοιχου επιχώματος, όπως παρουσιάζονται στην ενότητα 4.2.

### 4.3.1 Χονδρόκοκκο Υλικό

Αρχικά, γίνονται οι αναλύσεις του χονδρόκοκκου υλικού με συνοχή  $c'=0$ , γωνία τριβής  $\phi'=35^\circ$  και ειδικό βάρος  $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ .

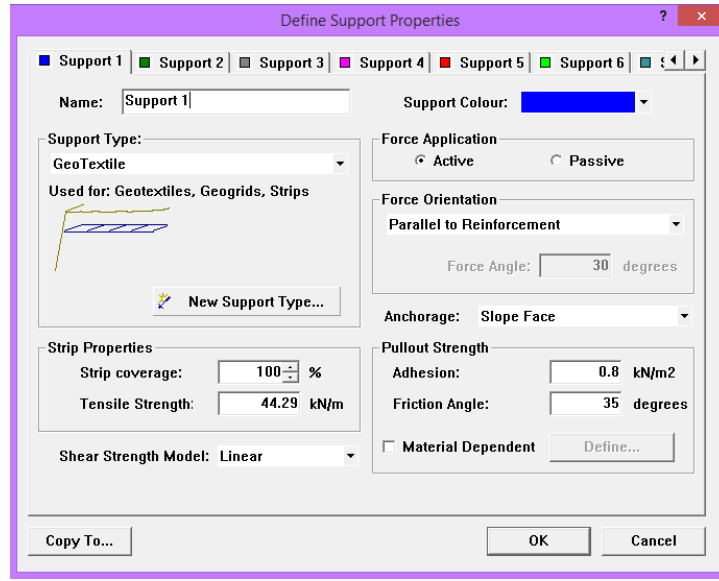


Εικόνα 4.58: Ιδιότητες χονδρόκοκκου υλικού

#### 1. Γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m

Τα γεωπλέγματα με χαρακτηριστική αντοχή 80kN/m έχουν εφελκυστική αντοχή 44.29kN/m, όπως υπολογίζεται από το excel (ενότητα 3.2), πρόσφυση ίση με  $0.8 \text{ kN/m}^2$  και γωνία τριβής ίση  $35^\circ$ .

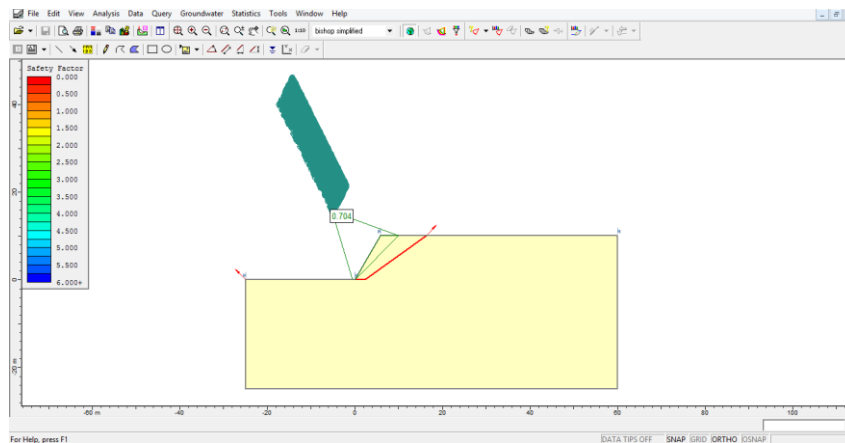




Εικόνα 4.59: Ιδιότητες γεωπλεγμάτων αντοχής 80kN/m

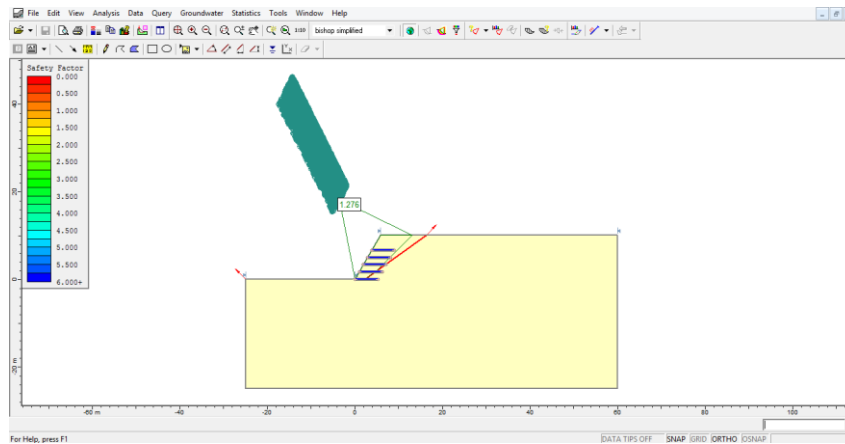
### I. Πρανές ύψους 10m

Για τεθλασμένη επιφάνεια και ύψος επιχώματος 10m, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται ίσος με 0.704 χωρίς ενίσχυση.



Εικόνα 4.60: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m χωρίς οπλισμό

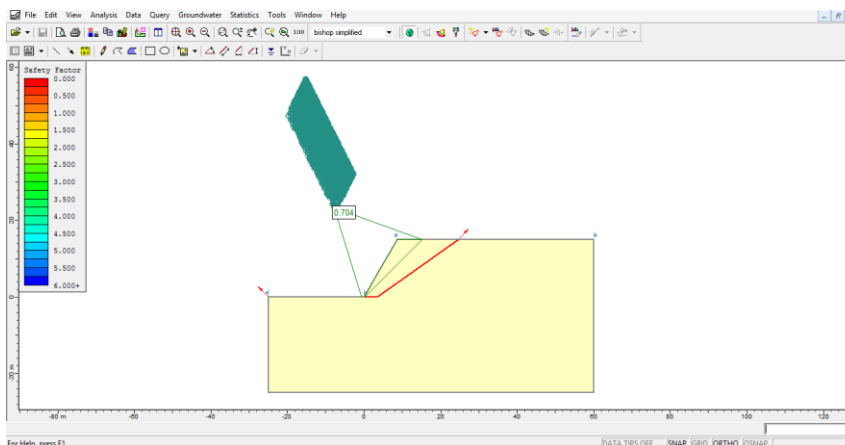
Μετά την ενίσχυση του με 5 γεωπλέγματα, ο συντελεστής είναι ίσος με 1.276.



Εικόνα 4.61: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m με σπλισμό

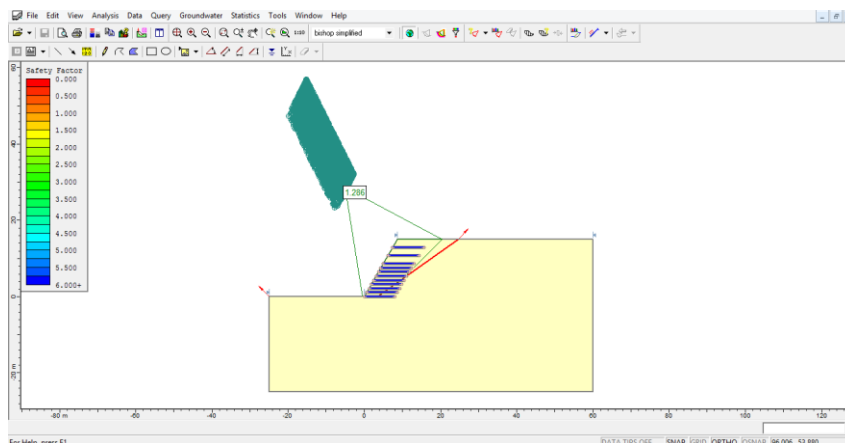
II. Πρανές ύψους 15m

Και σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας χωρίς ενίσχυση είναι 0.704.



Εικόνα 4.62: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m χωρίς σπλισμό

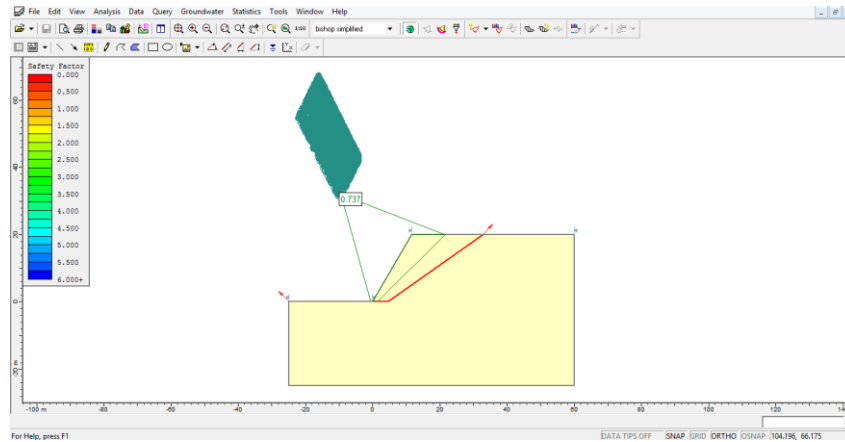
Αφού τοποθετούνται 11 γεωπλέγματα, η ανάλυση δίνει συντελεστή 1.286.



Εικόνα 4.63: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m με σπλισμό

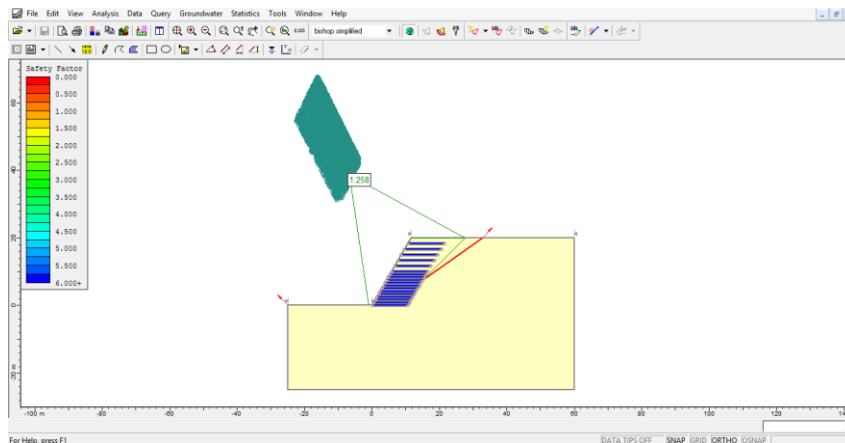
### III. Πιανές ύψους 20m

Για το επίχωμα με ύψος 20m, η ανάλυση χωρίς οπλισμό δίνει συντελεστή 0.737.



Εικόνα 4.64: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m χωρίς οπλισμό

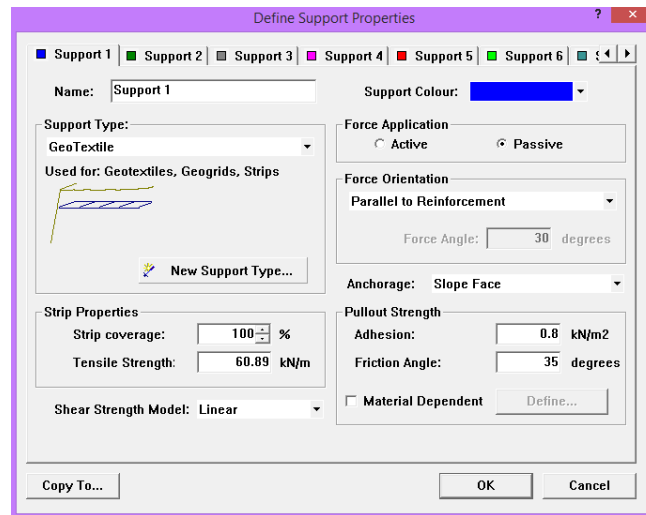
Ενώ, για ανάλυση με 18 γεωπλέγματα, ο συντελεστής προκύπτει 1.258.



Εικόνα 4.65: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m με οπλισμό

## 2. Γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m

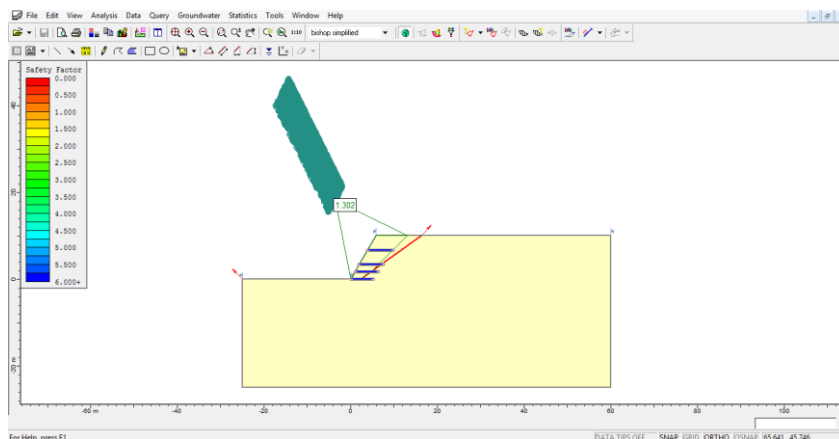
Τα γεωπλέγματα με χαρακτηριστική αντοχή 110kN/m έχουν εφελκυστική αντοχή 60.89kN/m, όπως υπολογίζεται από το excel (ενότητα 3.2), πρόσφυση ίση με 0.8kN/m<sup>2</sup> και γωνία τριβής ίση 35°.



Εικόνα 4.66: Ιδιότητες γεωπλεγμάτων αντοχής 110kN/m

### I. Πρανές ύψους 10m

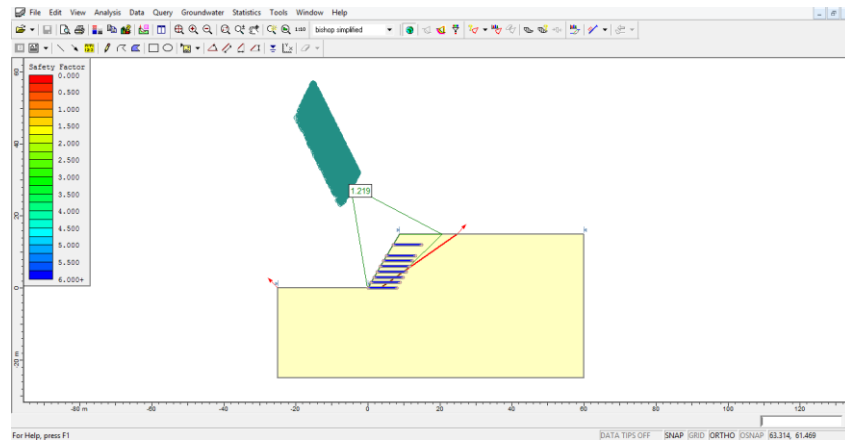
Αφού τοποθετούνται οι 4 οπλισμοί αντοχής 110kN/m στο πρανές ύψους 10m, υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 1.302, ενώ χωρίς τον οπλισμό ο συντελεστής είναι 0.704.



Εικόνα 4.67: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m με οπλισμό

### II. Πρανές ύψους 15m

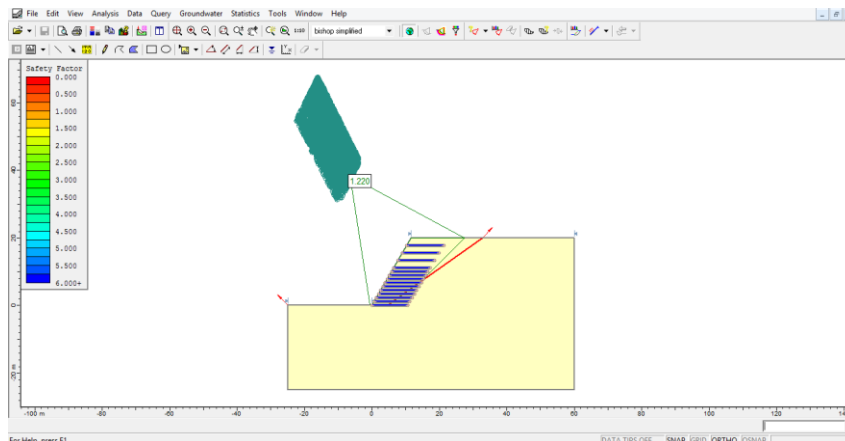
Μετά την τοποθέτηση των 8 γεωπλεγμάτων αντοχής 110kN/m στο επίχωμα ύψους 15m, υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 1.219, ενώ χωρίς τον οπλισμό ο συντελεστής είναι 0.704.



Εικόνα 4.68: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m με οπλισμό

### III. Πρανές ύψους 20m

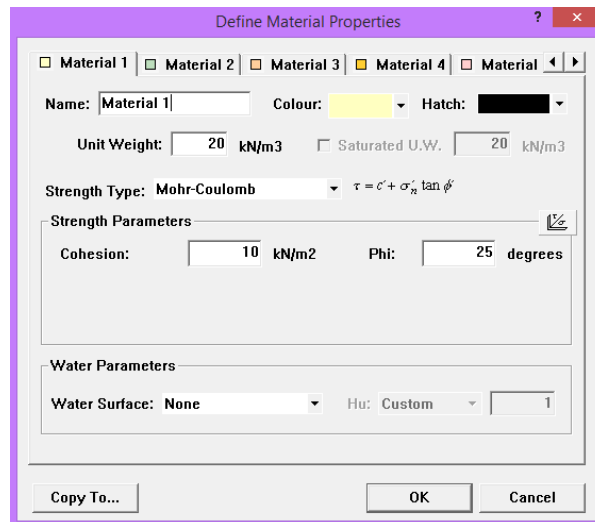
Ενώ πριν το επίχωμα έχει συντελεστή ασφαλείας 0.737, μετά την ενίσχυση με 14 γεωπλέγματα η ανάλυση δίνει συντελεστή 1.220.



Εικόνα 4.69: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m με οπλισμό

#### 4.3.2 Λεπτόκοκκο Υλικό

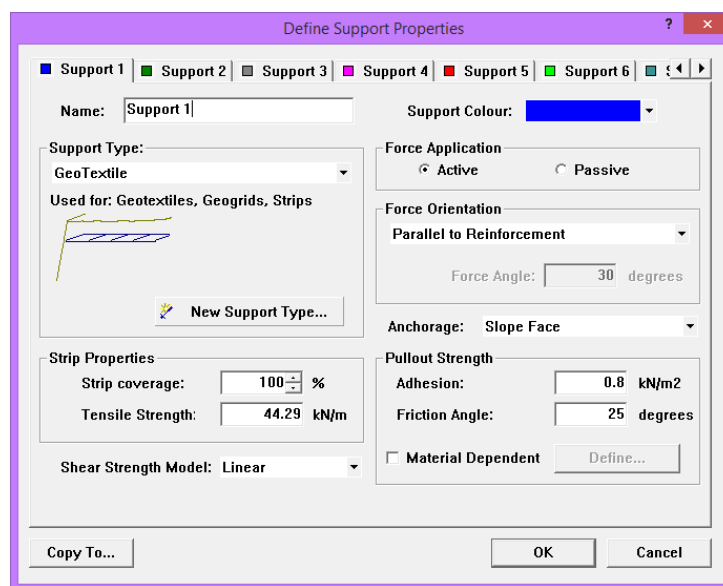
Έπειτα, πραγματοποιούνται οι αναλύσεις για το λεπτόκοκκο υλικό με συνοχή  $c'=10\text{kPa}$ , γωνία τριβής  $\varphi'=25^\circ$  και ειδικό βάρος  $\gamma=20\text{ kN/m}^3$ .



Εικόνα 4.70: Ιδιότητες λεπτόκοκκου υλικό

### 1. Γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m

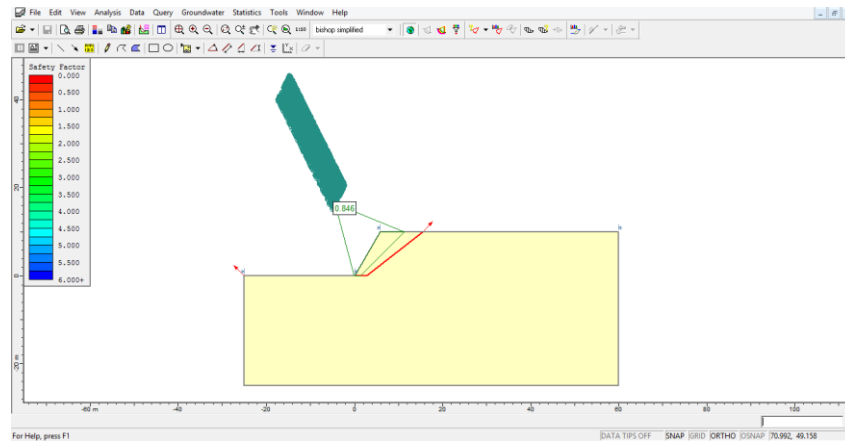
Τα γεωπλέγματα με χαρακτηριστική αντοχή 80kN/m έχουν εφελκυστική αντοχή 44.29kN/m, όπως υπολογίζεται από το excel (ενότητα 3.2), πρόσφυση ίση με 0.8kN/m<sup>2</sup> και γωνία τριβής 25°.



Εικόνα 4.71: Ιδιότητες γεωπλεγμάτων αντοχής 80kN/m

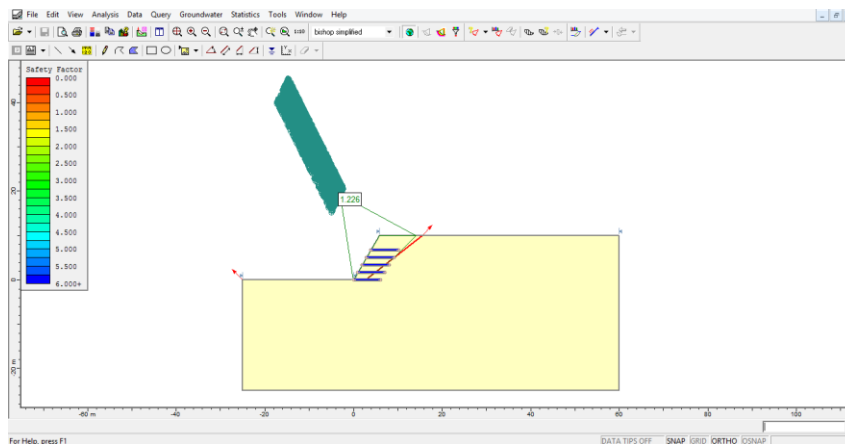
#### 1. Πρανές ύψους 10m

Για επίχωμα ύψους 10m χωρίς ενίσχυση, ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0.846.



Εικόνα 4.72: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m χωρίς οπλισμό

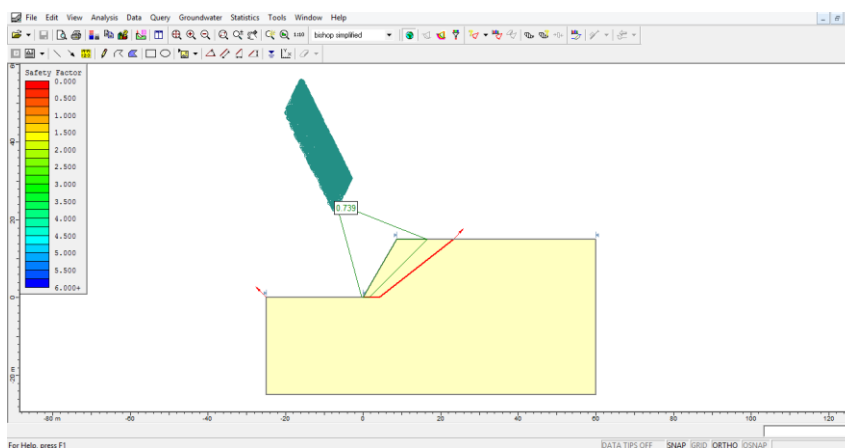
Αφού τοποθετούνται 5 γεωπλέγματα, ο συντελεστής υπολογίζεται ίσος με 1.226.



Εικόνα 4.73: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m με οπλισμό

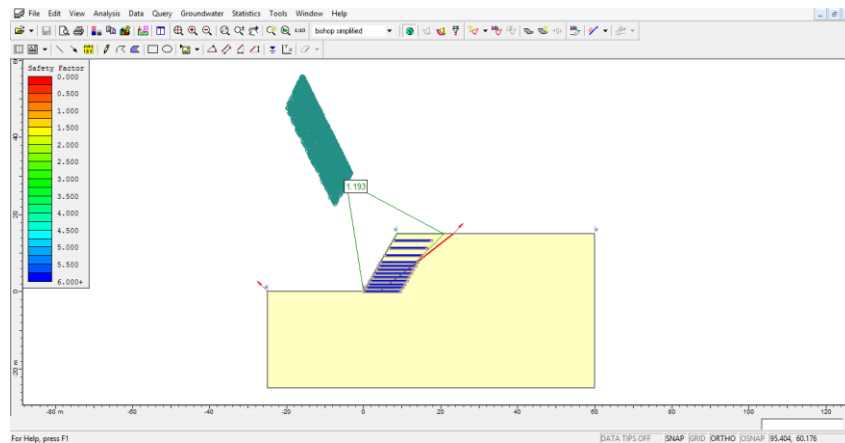
## II. Πιρανές ύψους 15m

Η ανάλυση του επιχώματος ύψους 15m χωρίς ενίσχυση δίνει συντελεστή ασφαλείας 0.739.



Εικόνα 4.74: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m χωρίς οπλισμό

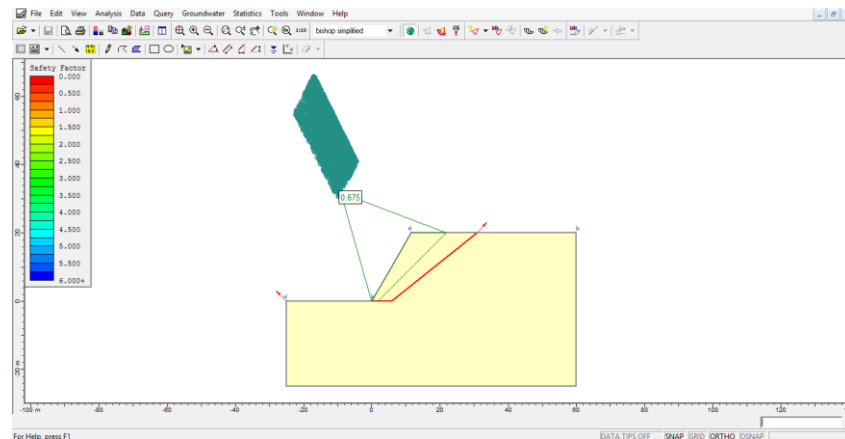
Μετά την ενίσχυσή του με 12 γεωπλέγματα, ο συντελεστής προκύπτει ίσος με 1.193.



Εικόνα 4.75: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m με οπλισμό

### III. Πρανές ύψους 20m

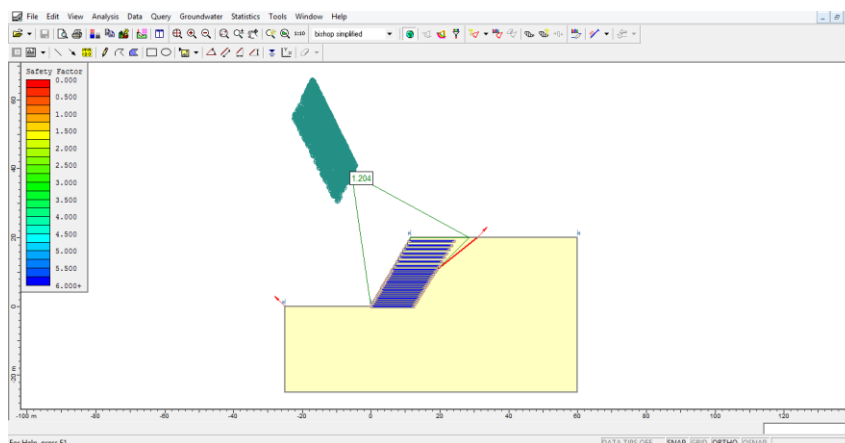
Ο συντελεστής ασφαλείας για επίχωμα ύψους 20m χωρίς οπλισμό είναι 0.675.



Εικόνα 4.76: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m χωρίς οπλισμό

Μετά από την ενίσχυσή του με 26 γεωπλέγματα, ο συντελεστής που υπολογίζεται, είναι 1.204.





Εικόνα 4.77: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m με οπλισμό

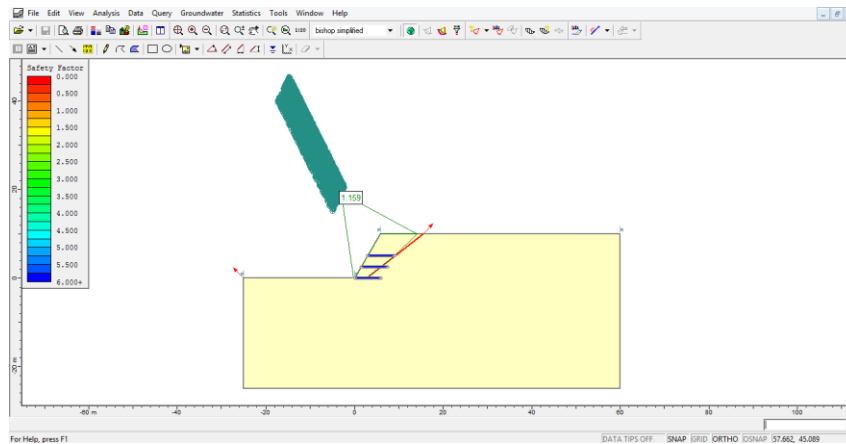
## 2. Γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m

Τα γεωπλέγματα με χαρακτηριστική αντοχή 110kN/m έχουν εφελκυστική αντοχή 60.89kN/m, όπως υπολογίζεται από το excel (ενότητα 3.2), πρόσφυση ίση με 0.8kN/m<sup>2</sup> και γωνία τριβής 25°.

Εικόνα 4.78: Ιδιότητες γεωπλεγμάτων αντοχής 110kN/m

### 1. Πρανές ύψους 10m

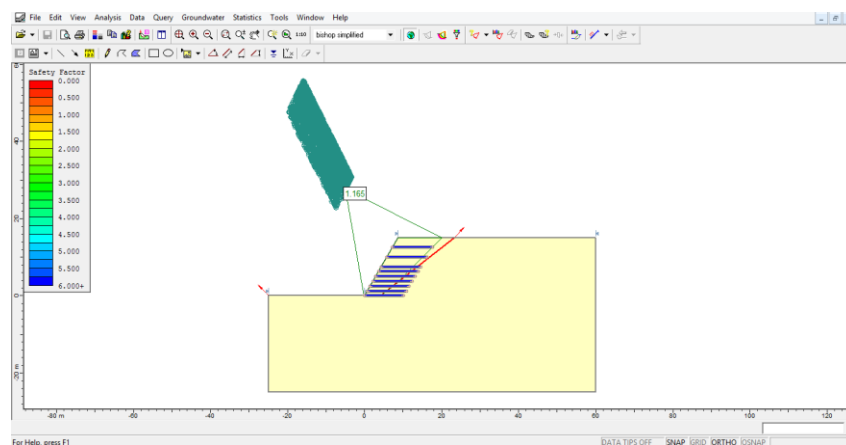
Αφού τοποθετούνται οι 3 οπλισμοί αντοχής 110kN/m στο πρανές ύψους 10m, υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 1.159, ενώ χωρίς τον οπλισμό ο συντελεστής είναι 0.846.



Εικόνα 4.79: Ανάλυση επιχώματος ύψους 10m με οπλισμό

## II. Πρανές ύψους 15m

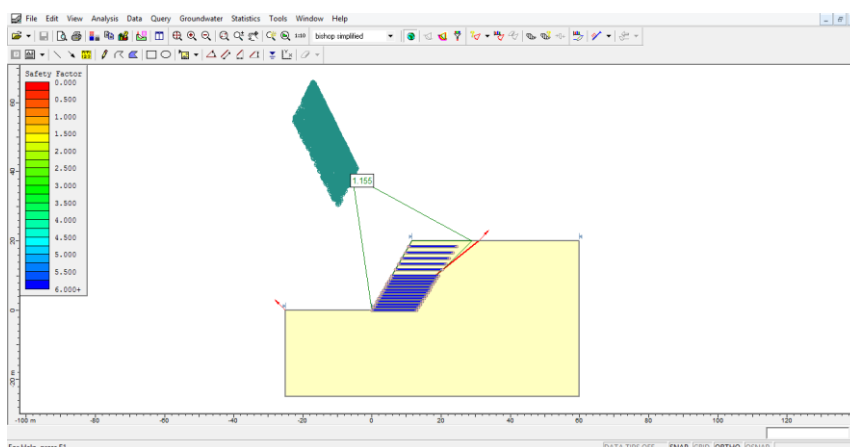
Μετά την τοποθέτηση 9 γεωπλεγμάτων στο επίχωμα ύψους 15m, υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 1.165, ενώ χωρίς τον οπλισμό ο συντελεστής είναι 0.739.



Εικόνα 4.80: Ανάλυση επιχώματος ύψους 15m με οπλισμό

## III. Πρανές ύψους 20m

Αφού τοποθετούνται τα 18 γεωπλέγματα στο επίχωμα ύψους 20m, υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 1.155, ενώ πριν ο συντελεστής είναι 0.675.



Εικόνα 4.81: Ανάλυση επιχώματος ύψους 20m με οπλισμό

#### 4.4 Σύγκριση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Τόσο για την κυκλική επιφάνεια ολίσθησης, όσο και την τεθλασμένη, όταν αυξάνεται η χαρακτηριστική δύναμη των γεωπλεγμάτων, μειώνονται οι απαιτούμενες στρώσεις ενίσχυσης. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός των στρώσεων για ένα επίχωμα υπολογίζεται διαιρώντας την δύναμη οπλισμού με την αντοχή των γεωπλεγμάτων που επιλέγονται (ενότητα 3.2). Ο αριθμός των ενισχυτικών στρώσεων δεν εξαρτάται άμεσα από τη σύσταση του εδάφους (χονδρόκοκκο ή λεπτόκοκκο) αλλά, από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε επιχώματος.

Αν και ο συντελεστής ασφαλείας θεωρείται απόλυτα αποδεκτός όταν είναι μεγαλύτερος από 1.3 ( $FS \geq 1.3$ ), σε καμία από τις περιπτώσεις αυτού του κεφαλαίου δεν προέκυψε ο συντελεστής μεγαλύτερος ή ίσος με 1.3. Αυτό συμβαίνει διότι, η μέθοδος δύο σφηνών του βρετανικού κανονισμού, βάσει της οποίας γίνονται οι αναλύσεις, είναι μια μέθοδος οριακής ισορροπίας που σημαίνει ότι υπολογίζει συνολική δύναμη οπλισμού ώστε να ισορροπούν οριακά οι δυνάμεις που ασκούνται στις δύο σφήνες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

#### 5.1 Συγκριτική αξιολόγηση

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια συγκριτική αξιολόγηση σχετικά με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου δύο σφηνών και τις αναλύσεις ευστάθειας του προγράμματος slide.

Αρχικά, για τη μέθοδο των δύο σφηνών και τα επιχώματα με χονδρόκοκκο υλικό, όσο το ύψος του επιχώματος αυξάνεται αυξάνονται και οι αναγκαίες ενισχυτικές στρώσεις. Δηλαδή, για επίχωμα ύψους 10m απαιτούνται 5 γεωπλέγματα χαρακτηριστικής αντοχής 80kN/m και 4 γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m. Για επίχωμα ύψους 15m οι απαραίτητες στρώσεις οπλισμού είναι 11 για αντοχή 80kN/m και 8 για χαρακτηριστική αντοχή 110kN/m. Τέλος, το επίχωμα με ύψος 20m χρειάζεται 18 γεωπλέγματα χαρακτηριστικής αντοχής 80kN/m και 14 γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευστάθειά του.

Ομοίως, για τα επιχώματα με λεπτόκοκκο υλικό, ο αριθμός των ενισχυτικών στρώσεων μεγαλώνει όσο το ύψος του επιχώματος αυξάνεται. Έτσι, για το επίχωμα ύψους 10m υπολογίζονται 5 ενισχυτικές στρώσεις χαρακτηριστικής αντοχής 80kN/m και 3 στρώσεις για αντοχή 110kN/m. Όταν το ύψος γίνει 15m είναι αναγκαίες 12 στρώσεις γεωπλεγμάτων χαρακτηριστικής αντοχής 80kN/m και 9 στρώσεις αντοχής 110kN/m. Τέλος, στα 20m μελετώνται 26 γεωπλέγματα χαρακτηριστικής αντοχής 80kN/m και 18 αντοχής 110kN/m.

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως δεν υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ των στρώσεων οπλισμού για επιχώματα χονδρόκοκκης και λεπτόκοκκης σύστασης εδάφους και οι ενισχυτικές στρώσεις που υπολογίζονται από τη μέθοδο των δύο σφηνών εξαρτώνται κυρίως από την γεωμετρία του πρανούς.

Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται αναλύσεις ευστάθειας στα επιχώματα χονδρόκοκκου υλικού με τη βοήθεια του προγράμματος slide για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης με εισαγωγή των γεωπλεγμάτων που υπολογίζονται από τη μέθοδο των δύο σφηνών. Πριν την εισαγωγή των γεωπλεγμάτων, οι συντελεστές ασφαλείας ήταν 0.446 για επίχωμα ύψους 10m, 0.469 για επίχωμα ύψους 15m και 0.505 για επίχωμα ύψους 20m. Αυτό σημαίνει ότι και στις τρεις περιπτώσεις θα υπάρξει αστοχία του πρανούς. Με τοποθέτηση γεωπλεγμάτων αντοχής 80kN/m οι συντελεστές ασφαλείας είναι 1.233, 1.279 και 1.277 και με γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m οι συντελεστές είναι 1.245, 1.208, 1.230 για τα πρανή 10m, 15m, 20m αντίστοιχα. Δηλαδή, και τα δύο διαφορετικής αντοχής γεωπλέγματα μπορούν να εξασφαλίσουν την ευστάθεια των

επιχώματων αφού δίνουν συντελεστές μεγαλύτερους της μονάδας και χωρίς μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών για κάθε επίχωμα. Αυτό είναι λογικό αφού τοποθετείται οπλισμός με βάση τη μέθοδο των δύο σφηνών που σημαίνει ότι η μέθοδος καταλήγει σε έναν συντελεστή ασφαλείας της τάξεως του 1.2 έως 1.3

Οι αναλύσεις ευστάθειας κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης στο πρόγραμμα slide για λεπτόκοκκο υλικό αρχικά δίνουν συντελεστές 0.804, 0.680, 0.612 για πρανή με ύψος 10m, 15m, 20m με αποτέλεσμα να είναι βέβαιο πως και τα τρία επιχώματα θα ολισθήσουν. Αφού τοποθετούνται τα γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m, οι συντελεστές υπολογίζονται εκ νέου και προκύπτουν 1.238, 1.192, 1.133, ενώ, για γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m είναι 1.198, 1.191, 1.142 για επιχώματα ύψους 10m, 15m, και 20m. Και σε αυτή την περίπτωση εξασφαλίζεται η ευστάθεια με χρήση οποιουδήποτε από τα δύο γεωπλέγματα χωρίς να παρατηρείται σημαντική διαφορά ανάμεσα στις τιμές των συντελεστών για κάθε πρανή. Ωστόσο, έχοντας τοποθετήσει σχεδόν ίδιο οπλισμό σε σχέση με το χονδρόκοκκο υλικό, φαίνεται πως η απόδοση του οπλισμού είναι μικρότερη καθώς η ποσοστιαία αύξηση του συντελεστή ασφαλείας είναι σημαντικά μικρότερη.

Ακόμη, πραγματοποιούνται αναλύσεις ευστάθειας στα επιχώματα χονδρόκοκκου υλικού με τη βοήθεια του προγράμματος slide για τεθλασμένη επιφάνεια ολίσθησης με εισαγωγή των γεωπλεγμάτων που υπολογίζονται από τη μέθοδο των δύο σφηνών. Πριν την εισαγωγή των γεωπλεγμάτων, οι συντελεστές ασφαλείας ήταν 0.704 για επίχωμα ύψους 10m, 0.704 για επίχωμα ύψους 15m και 0.737 για επίχωμα ύψους 20m. Αυτό σημαίνει ότι η αστοχία είναι βέβαιη και για τις τρεις περιπτώσεις. Με τοποθέτηση γεωπλεγμάτων αντοχής 80kN/m οι συντελεστές ασφαλείας είναι 1.276, 1.286 και 1.258 και με γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m οι συντελεστές είναι 1.302, 1.219, 1.220 για τα πρανή 10m, 15m, 20m αντίστοιχα. Δηλαδή, και τα δύο διαφορετικής αντοχής γεωπλέγματα μπορούν να εξασφαλίσουν την ευστάθεια των επιχώματων αφού δίνουν συντελεστές μεγαλύτερους της μονάδας και χωρίς μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών για κάθε επίχωμα.

Οι αναλύσεις ευστάθειας τεθλασμένης επιφάνειας ολίσθησης στο πρόγραμμα slide για λεπτόκοκκο υλικό αρχικά δίνουν συντελεστές 0.846, 0.739, 0.675 για πρανή με ύψος 10m, 15m, 20m με αποτέλεσμα να είναι βέβαιο πως και τα τρία επιχώματα θα ολισθήσουν. Αφού τοποθετούνται τα γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m, οι συντελεστές υπολογίζονται εκ νέου και προκύπτουν 1.226, 1.193, 1.204, ενώ, για γεωπλέγματα αντοχής 110kN/m είναι 1.159, 1.165, 1.155 για επιχώματα ύψους 10m, 15m, και 20m. Και σε αυτή την περίπτωση εξασφαλίζεται η ευστάθεια με χρήση οποιουδήποτε από τα δύο γεωπλέγματα χωρίς να παρατηρείται σημαντική διαφορά ανάμεσα στις τιμές των συντελεστών για κάθε πρανή.

Τέλος, οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας για τις δύο επιφάνειες αστοχίας, κυκλική και τεθλασμένη, δεν έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους για κάθε ύψος επιχώματος και κάθε υλικό.

Στους πίνακες 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας πριν και μετά την τοποθέτηση των οπλισμών για κάθε επίχωμα και για κάθε επιφάνεια αστοχίας, όπως προκύπτουν από τις αναλύσεις στο πρόγραμμα slide.

Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα αναλύσεων για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης

ΚΥΚΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ						
	Ύψος επιχώματος	Σ.Α. χωρίς γεωπλέγματα	Σ.Α. με γεωπλέγματα αντοχής P=80kN/m	Σ.Α. με γεωπλέγματα αντοχής P=110kN/m	Αριθμός γεωπλεγμάτων	
					P=80kN/m	P=110kN/m
Χονδρόκοκκο υλικό	10m	0.446	1.233	1.245	5	4
	15m	0.469	1.279	1.208	11	8
	20m	0.505	1.277	1.230	18	14
Λεπτόκοκκο υλικό	10m	0.804	1.238	1.198	5	3
	15m	0.680	1.192	1.191	12	9
	20m	0.612	1.133	1.142	26	18

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα αναλύσεων για τεθλασμένη επιφάνεια ολίσθησης

ΤΕΘΛΑΣΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ						
	Ύψος επιχώματος	Σ.Α. χωρίς γεωπλέγματα	Σ.Α. με γεωπλέγματα αντοχής P=80kN/m	Σ.Α. με γεωπλέγματα αντοχής P=110kN/m	Αριθμός γεωπλεγμάτων	
					P=80kN/m	P=110kN/m
Χονδρόκοκκο υλικό	10m	0.704	1.276	1.302	5	4
	15m	0.704	1.286	1.219	11	8
	20m	0.737	1.258	1.220	18	14
Λεπτόκοκκο υλικό	10m	0.846	1.226	1.159	5	3
	15m	0.739	1.193	1.165	12	9
	20m	0.675	1.204	1.155	26	18

## 5.2 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, βάσει των αναλύσεων που παρουσιάζονται στα κεφάλαια 3 και 4, οι οποίες πραγματοποιούνται με τη μέθοδο δύο σφηνών του βρετανικού κανονισμού, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως ανεξάρτητα από τη σύσταση του εδάφους, όσο πιο μεγάλο είναι το ύψος ενός επιχώματος αυξάνεται και η ανάγκη του για ενίσχυση. Συνεπώς, στα επιχώματα με ύψος 20m τοποθετούνται περισσότερες στρώσεις γεωπλεγμάτων σε σχέση με τα επιχώματα των 15m και ακόμα λιγότερα γεωπλέγματα στα επιχώματα ύψους 10m. Επιπλέον, οι αναλύσεις με

χαρακτηριστική αντοχή οπλισμού 110kN/m έχουν ως αποτέλεσμα να ενισχύονται τα επιχώματα με μικρότερο αριθμό γεωπλεγμάτων σε σχέση με τα αντίστοιχα επιχώματα που αναλύονται με οπλισμό χαρακτηριστικής αντοχής 80kN/m. Αυτό είναι απόρροια του τρόπου υπολογισμού των αναγκαίων ενισχυτικών στρώσεων, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της διαίρεσης της απαιτούμενης δύναμης ενίσχυσης (που υπολογίζεται από τη μέθοδο δύο σφηνών) προς τη χαρακτηριστική αντοχή του οπλισμού που επιλέγεται. Έτσι, αφού αυξάνεται η χαρακτηριστική αντοχή του οπλισμού μειώνονται ο αριθμός των αναγκαίων στρώσεων. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως ο αριθμός των ενισχυτικών στρώσεων δεν εξαρτάται άμεσα από τη σύσταση του εδάφους (χονδρόκοκκο ή λεπτόκοκκο) αλλά, από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε επιχώματος. Τέλος, αν και ο κανονισμός συστήνει συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο από 1.3 ( $F.S. \geq 1.3$ ), οι παραπάνω αναλύσεις γίνονται αποδεκτές και τα γεωπλέγματα θεωρούνται επαρκή και για τις δύο τιμές χαρακτηριστικής αντοχής, μολονότι καμία από αυτές δεν δίνει συντελεστή μεγαλύτερο από 1.3, διότι η μέθοδος δύο σφηνών είναι μέθοδος οριακής ισορροπίας. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τέτοια ώστε τα πρανά να ισορροπούν οριακά μετά την τοποθέτηση των γεωπλεγμάτων

### 5.3 Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία επιλέγονται και μελετώνται γεωπλέγματα αντοχής 80kN/m και 110kN/m ως μέτρο προστασίας των επιχωμάτων, προκειμένου αυτά να μην αστοχήσουν. Ο οπλισμός με γεωπλέγματα προσφέρει στο επίχωμα αντοχή απέναντι σε μεγαλύτερα φορτία ή σε πιο απότομες γωνίες που δεν είχε στην αρχική του κατάσταση. Όμως, εκτός από τα γεωπλέγματα υπάρχουν κι άλλοι τρόποι ώστε να αποφευχθεί ενδεχόμενη ολίσθηση ενός πρανούς. Μια αρκετά συνηθισμένη λύση είναι η τοποθέτηση μεταλλικών αγκυριών σε όλη την επιφάνεια του πρανούς. Τα αγκύρια αποτρέπουν την αστοχία του πρανούς ασκώντας θλιπτική δύναμη σε αυτό και συγκρατώντας το στη θέση του. Επιπλέον, τα συρματοκιβώτια στην πρόσοψη του επιχώματος μπορούν να είναι αποτελεσματικά εφόσον συνδυαστούν με γεωπλέγματα ή άλλα συστήματα όπλισης εδάφους. Τα συρματοκιβώτια είναι ένα αρθρωτό σύστημα που αποτελείται από μονάδες χαλύβδινου πλέγματος χωρισμένο σε ορθογώνια κελιά μέσα στα οποία τοποθετείται η κατάλληλη πέτρα που συγκρατεί το έδαφος. Οποιαδήποτε από τις παραπάνω λύσεις όπλισης επιχώματος μπορεί να είναι αποδεκτή αρκεί να έχουν κατανοηθεί και μελετηθεί σωστά όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν το επίχωμα ως προς την ευστάθειά του και να συμβαδίζει με τις εκάστοτε οικονομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Πέρα από τη μέθοδο των δύο σφηνών που εξετάζεται σε αυτή την εργασία, υπάρχουν επιπλέον μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση πρανών. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι ένας τρόπος διερεύνησης της συμπεριφοράς επιχωμάτων και επιλογής

οποιοδήποτε οπλισμού, ο οποίος θα εξασφαλίζει την ευστάθειά τους. Ακόμη, προτείνεται η μελέτη επιχωμάτων λαμβάνοντας υπόψη μετρήσεις και αποτελέσματα πραγματικών έργων που έχουν προηγηθεί προκειμένου να συγκριθούν και να επιλεγεί ο τρόπος ενίσχυσής τους, εφόσον θεωρηθεί απαραίτητο. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης τρισδιάστατων προσομοιωμάτων με τη βοήθεια λογισμικού για την ενίσχυση επιχωμάτων.



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- *Πίνακας 1.8:* Κατηγοριοποίηση σε σχέση με την διάρκεια ωφέλιμης χρήσης και την σπουδαιότητα
- *Πίνακας 1.9:* Κριτήρια αποδοχής εδαφικών υλικών επίχωσης βάσει των Ελβετικών κανονισμών SN 670 010
- *Πίνακας 1.10:* Ηλεκτροχημικές ιδιότητες γεωϋλικών επίχωσης (περίπτωση χαλύβδινων οπλισμών κατά EN14475-2006)
- *Πίνακας 1.11:* Ηλεκτροχημικές ιδιότητες των υλικών επίχωσης σε συνδυασμό με τους διάφορους τύπους μεταλλικού οπλισμού σύμφωνα με το Βρετανικό πρότυπο BS 8006:1995
- *Πίνακας 1.12:* Παραδείγματα τύπων χάλυβα μεταλλικών στοιχείων σύμφωνα με το βρετανικό πρότυπο BS 8006:1995
- *Πίνακας 1.13:* Απαιτήσεις των συστημάτων επένδυσης (κατά EN 14475-2006)
- *Πίνακας 1.14:* Είδος και αντίστοιχη μέθοδος εκτέλεσης δοκιμών ποιοτικού ελέγχου
- *Πίνακας 2.1:* Αλγεβρικές σχέσεις
- *Πίνακας 3.1:* Παραδείγματα μηχανισμών δύο σφηνών
- *Πίνακας 7.1:* Αποτελέσματα αναλύσεων για κυκλική επιφάνεια ολίσθησης
- *Πίνακας 7.2:* Αποτελέσματα αναλύσεων για τεθλασμένη επιφάνεια ολίσθησης

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Εφραιμίδης, Χ.Φ., (2007) “Υψηλά οπλισμένα επιχώματα: Βασικές Αρχές Ανάλυσης - Μεθοδολογική Προσέγγιση Σχεδιασμού και Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες”, *Γεωτεχνικές Εφαρμογές Γεωσυνθετικών Υλικών*, Ημερίδα ΤΕΕ, 11 Ιανουαρίου, Αθήνα
- Καββαδάς Μ., (2008) “Εφαρμογές του Ευρωκώδικα 7 (EN 1997-1) σε θέματα σχεδιασμού Γεωτεχνικών Έργων”, *Eurocode 7 (EN 1997-1): Geotechnical Design – Part 1 : General Rules*, Ημερίδα ΣΠΜΕ, 14 Δεκεμβρίου, Ηράκλειο
- Νάσκος, Α.Ν., (2007) “Οπλισμένα επιχώματα - Στοιχεία σχεδιασμού, κατασκευής και ελέγχων ευστάθειας”, *Γεωτεχνικές Εφαρμογές Γεωσυνθετικών Υλικών*, Ημερίδα ΤΕΕ, 11 Ιανουαρίου, Αθήνα
- EN 1997-1 (2004) *Eurocode 7 Geotechnical design - Part 1: General Rules*, Technical Comitee CEN/TC 250
- FHWA-NHI-00-043 (2001) *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines*, Η.Π.Α
- HA 68/94 (1994) *Design Methods for the Reinforcement of Highway Slopes by Reinforced Soil and Soil Nailing Techniques*, Scotland
- ΕΛΟΤ EN 14475 (2006) *Execution of special geotechnical works - Reinforced fill*, Ελλάδα
- ΠΙΕΤΕΠ 11-02-05-00 (2006) *Έργα Αντιστηρίξεως από Οπλισμένη Γη*, Ελλάδα
- Κουρμπέτης Δ. (2010) *Σχεδιασμός Γεωσυνθετικά οπλισμένων πρανών*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Πανταζής Ε. (2011) *Στατική και δυναμική επίλυση πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- Schmidt F. Cr., (2016) “Guideline on Using Geosynthetics in Slide”, *RocNews Fall*
- Maccaferri (2016) “Κατασκευή οπλισμένου επιχώματος για την υποστήριξη του νέου αυτοκινητοδρόμου Α2, Εγνατία Οδός, Αιθιοπία, Ελλάδα”, *Officine Maccaferri S.p.A. Global Headquarters*, 16 Δεκεμβρίου, Ιταλία
- HAPAS Certificate 16/H253 (2020) *XGrid PET-PVC-0 geogrids*, Geogrids for reinforced soil embankments, BBA, 27 Φεβρουαρίου, Turkey