



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

## «Βελτίωση ευστάθειας πρανών σε αποθέσεις εξορυκτικών αποβλήτων με χρήση γεωσυνθετικών»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Άννα-Μαρία Ν. Κολυδά

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

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**«Βελτίωση ευστάθειας πρανών σε αποθέσεις εξορυκτικών  
αποβλήτων με χρήση γεωσυνθετικών»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άννα-Μαρία Ν. Κολυδά

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 21/07/2021

Ζευγώλης Ιωάννης	Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
Νομικός Παύλος	Καθηγητής ΕΜΠ
Λουπασάκης Κωνσταντίνος	Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εργασία ασχολείται με ένα ζήτημα που απασχολεί ευρέως τη σύγχρονη μεταλλευτική βιομηχανία, αλλά και την κοινωνία ευρύτερα, και το οποίο αφορά στην προστασία και βέλτιστη διαχείριση του περιβάλλοντος με ταυτόχρονη προώθηση της αειφόρου ανάπτυξης. Συγκεκριμένα, αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η μελέτη της βελτιστοποίησης της κλίσης σωρών απόθεσης εξορυκτικών στείρων με τη χρήση γεωσυνθετικών υλικών και συγκεκριμένα γεωπλεγμάτων. Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις με τη χρήση του προγράμματος Slide2 της εταιρίας Rocscience, για διαφορετικά ύψη σωρών απόθεσης, κλίσεις πρανών, μηχανικά χαρακτηριστικά εδαφών και εφελκυστική αντοχή γεωπλεγμάτων. Σκοπός της διπλωματικής είναι η διερεύνηση της δυνατότητας επίτευξης πιο απότομης κλίσης σε σωρούς απόθεσης με τη χρήση γεωπλεγμάτων, έναντι «άοπλων» σωρών, αλλά και η διερεύνηση οικονομοτεχνικών ζητημάτων που σχετίζονται με το κόστος των γεωπλεγμάτων έναντι του οφέλους που προκύπτει σε όγκο ή επιφάνεια σωρών απόθεσης.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ζευγώλη Ιωάννη για την απaráμιλλη βοήθεια του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας, καθώς και για το ενδιαφέρον που μου δημιούργησε, μέσα από την αγάπη και την αφοσίωσή του, για το αντικείμενο της γεωτεχνικής μηχανικής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου όλα μου τα αγαπημένα πρόσωπα, οικογένεια και φίλους για τη συνεχή στήριξη τους αυτά τα πέντε χρόνια.



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται το πρόβλημα της ευστάθειας σωρών απόθεσης εξορυκτικών αποβλήτων και συγκεκριμένα διερευνάται η δυνατότητα αύξησης της κλίσης των πρανών με τη χρήση γεωπλεγμάτων. Στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση στην ευστάθεια των ακόλουθων παραμέτρων: ύψος και κλίση πρανού σωρού απόθεσης, διατμητική αντοχή των γεωυλικών και εφελκυστική αντοχή των γεωπλεγμάτων. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος Slide2 της Rocscience, το οποίο επιλύει προβλήματα ευστάθειας πρανών σε δύο διαστάσεις (2D) με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας. Σκοπός της διπλωματικής είναι: (α) η διερεύνηση της δυνατότητας επίτευξης πιο απότομης κλίσης σε σωρούς απόθεσης με τη χρήση γεωπλεγμάτων, έναντι «άοπλων» σωρών, και (β) η διερεύνηση οικονομοτεχνικών ζητημάτων που σχετίζονται με το κόστος των γεωπλεγμάτων έναντι του οφέλους που προκύπτει σε όγκο ή επιφάνεια σωρών απόθεσης λόγω της πιο απότομης επιτευχθείσας κλίσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων, οι κρίσιμες περιοχές του πρανού στις οποίες απαιτείται η χρήση γεωπλεγμάτων είναι κοντά στον πόδα και στη στέψη του πρανού. Αντίθετα, παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη γεωπλεγμάτων στις ενδιάμεσες περιοχές δεν συνεισφέρει στην επίτευξη μεγαλύτερου συντελεστή ασφαλείας. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του ύψους και της κλίσης του πρανού προϋποθέτει μεγαλύτερης συνολικά εφελκυστικής δύναμης για τη διατήρηση της ασφάλειας, γεγονός που αυξάνει μεν το κόστος των γεωπλεγμάτων, αλλά ταυτόχρονα έχει σημαντικό όφελος με όρους έκτασης που καταλαμβάνουν οι χώροι απόθεσης.

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

## **Abstract**

### **Slope stability improvement of mining rock waste dumps using geosynthetics**

by *Anna-Maria N. Kolyda*

Thesis Submitted for the Degree

*Diploma (MEng) in Mining and Metallurgical Engineering*

School of Mining and Metallurgical Engineering

National Technical University of Athens

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

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

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



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1	Αντικείμενο εργασίας .....	1
1.2	Στόχος εργασίας.....	3
1.3	Δομή εργασίας.....	3
<b>2</b>	<b>ΣΩΡΟΙ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΕΙΡΩΝ</b> .....	<b>5</b>
2.1	Τα εξορυκτικά απόβλητα.....	5
2.2	Τύποι σωρών απόθεσης .....	6
2.3	Σχεδιασμός χώρων απόθεσης .....	8
2.3.1	Ευστάθεια σωρών απόθεσης .....	8
2.3.2	Καθιζήσεις .....	21
2.3.3	Ροή νερού και στράγγιση σωρών αποβλήτων .....	22
2.3.4	Διάβρωση .....	24
2.4	Σημασία και ρόλος κλίσης σωρών απόθεσης .....	25
2.5	Εξορυκτικά απόβλητα και προβληματισμοί.....	25
<b>3</b>	<b>ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΟΠΛΙΣΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>27</b>
3.1	Γεωσυνθετικά υλικά .....	27
3.1.1	Γεωπλέγματα .....	28
3.2	Χρήσεις γεωπλεγμάτων στην γεωτεχνική μηχανική .....	31
3.2.1	Κατασκευές με γεωπλέγματα ως ενισχυτικό μέσο.....	31
3.3	Χαρακτηριστικά γεωπλεγμάτων.....	33
3.3.1	Φυσικές ιδιότητες .....	33
3.3.2	Μηχανικές ιδιότητες .....	34
3.3.3	Ιδιότητες αντοχής (Endurance Properties).....	36
3.3.4	Ζητήματα Υποβιβασμού (Degradation issues).....	39
3.3.5	Αντοχή γεωπλεγμάτων .....	41
3.4	Αρχές σχεδιασμού οπλισμένων επιχωμάτων.....	43
3.4.1	Γενικά στοιχεία .....	43
3.4.2	Υπολογιστικοί έλεγχοι ευστάθειας πρανών.....	46
3.4.3	Σχεδιασμός και Κανονισμοί.....	50

3.5	Γεωτεχνικό πρόγραμμα Slide2 της Rocscience.....	55
3.5.1	Χρήση γεωπλεγμάτων στο γεωτεχνικό πρόγραμμα Slide2 .....	55
3.5.2	Σχόλια – Συμπεράσματα.....	61
<b>4</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΟΠΛΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>62</b>
4.1	Εισαγωγή.....	62
4.2	Τα άοπλα πρανή .....	62
4.2.1	Πρανές ύψους 10m .....	63
4.2.2	Πρανές ύψους 50m .....	66
4.2.3	Πρανές ύψους 150m .....	69
4.2.4	Συγκεντρωτικά διαγράμματα $F_s$ - $\phi$ και πίνακες για C1 και C2 .....	72
<b>5</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΡΑΝΩΝ.....</b>	<b>75</b>
5.1	Τα οπλισμένα πρανή.....	75
5.1.1	Οπλισμός-Γεωπλέγματα.....	75
5.1.2	Πρανές μικρού ύψους $H_1=10m$ .....	77
5.1.3	Πρανές μεσαίου ύψους $H_2=50m$ .....	81
	Πρανές μεγάλου ύψους $H_3=150m$ .....	85
5.1.4	Σύνοψη των παραπάνω αποτελεσμάτων .....	86
5.1.5	Μια επιπλέον πρόταση .....	87
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>90</b>
6.1	Συμπεράσματα.....	90
6.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	91
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>93</b>

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 Διάφορες μορφές κατασκευής σωρών απόθεσης εξορυκτικών αποβλήτων (Blight 2010) .....	7
Εικόνα 2.2 Τυπικές μέθοδοι κατασκευής αποβλήτων ορυχείων: α. από πάνω προς τα κάτω σε κεκλιμένη τοπογραφία, β. από πάνω προς τα κάτω σε οριζόντια τοπογραφία, γ. από κάτω προς τα πάνω σε κεκλιμένη τοπογραφία, δ. από κάτω προς τα πάνω σε οριζόντια τοπογραφία (Blight 2010, Zevgolis 2018) .....	11
Εικόνα 2.3 Φρεατική επιφάνεια (abaqus-docs.mit.edu 2017) .....	13
Εικόνα 2.4 Καθίζηση επιφάνειας ή άκρων (Orman et al. 2011) .....	15
Εικόνα 2.5 Αβαθής ρέουσα ολίσθηση (Orman et al. 2011) .....	15
Εικόνα 2.6 Περιτροφική Κυκλική αστοχία (Orman et al. 2011) .....	16
Εικόνα 2.7 Αστοχία της βάσης (Orman et al. 2011) .....	16
Εικόνα 2.8 Μετατόπιση άκαμπτου σώματος (Orman et al. 2011) .....	17
Εικόνα 2.9 Ρευστοποίηση (Orman et al. 2011) .....	17
Εικόνα 3.1 Μονοαξονικά (αριστερά) και διαξονικά (δεξιά) γεωπλέγματα (διαδίκτυο) ....	29
Εικόνα 3.2 Ενοποιημένη πολυολεφίνη (Koerner 2012) .....	30
Εικόνα 3.3 Επικαλυμένα νήματα (Koerner 2012) .....	30
Εικόνα 3.4 Ράβδοι (ή λωρίδες) πολυεστέρα (Koerner 2012) .....	30
Εικόνα 3.5 Μηχανισμοί αντοχής αγκύρωσης γεωπλέγματος (Koerner 2012) .....	36
Εικόνα 3.6 Αποτελέσματα συνεχούς τάσης παραμόρφωσης (ερπυσμός) σε ένα γεώπλεγμα HDPE τελικής αντοχής 72 kN /m (Koerner 2012). .....	38
Εικόνα 3.7 Οπλισμένα επιχώματα αντιστήριξης - απότομη κλίση παρειάς (Νάσκος 2007) .....	44
Εικόνα 3.8 Όπλιση βάσης ή στέψης επιχώματος (Νάσκος 2007) .....	44
Εικόνα 3.9 Πρανές στο Slide2 .....	56
Εικόνα 3.10 Επιλογή τύπου επιφάνειας ολίσθησης .....	56
Εικόνα 3.11 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού του πρανούς .....	57
Εικόνα 3.12 Ορισμός διαστάσεων οπλισμού .....	57
Εικόνα 3.13 Τοποθέτηση του συστήματος οπλισμού .....	58
Εικόνα 3.14 Επιλογή είδους οπλισμού .....	59
Εικόνα 3.15 Κατασκευαστές γεωσυνθετικών υλικών .....	59
Εικόνα 3.16 Προϊόντα και χαρακτηριστικά συγκεκριμένου κατασκευαστή .....	60
Εικόνα 3.17 Όλες οι πιθανές επιφάνειες ολίσθησης .....	61
Εικόνα 3.18 Η κρισιμότερη επιφάνεια ολίσθησης .....	61
Εικόνα 5.1 Συντελεστές απομείωσης αντοχής γεωπλέγματος .....	76

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Συνιστώμενες τιμές συντελεστή απομείωσης της επιτρεπόμενης αντοχής εφέλκυσμού γεωπλεγμάτων (Koerner 2012).....	42
Πίνακας 4-1 Πληροφορίες για τη γεωμετρία και το υλικό των πρανών .....	62
Πίνακας 4-2 Γωνίες τριβής $\phi'$ ( $^{\circ}$ ) για τις οποίες $FS = 1.4$ (θεώρηση $c1' = 0.5$ kPa).....	73
Πίνακας 4-3 Γωνίες τριβής $\phi'$ ( $^{\circ}$ ) για τις οποίες $FS = 1.4$ (θεώρηση $c2' = 10$ kPa).....	73
Πίνακας 5-1 Ενδεικτικό κόστος οπλισμού .....	76
Πίνακας 5-2 Χαρακτηριστικά πρανούς ύψους $H1=10m$ .....	77
Πίνακας 5-3 Χαρακτηριστικά οπλισμού για $\beta'=30^{\circ}$ .....	78
Πίνακας 5-4 Ποσότητα και χαρακτηριστικά οπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για $\beta'=30^{\circ}$	79
Πίνακας 5-5 Χαρακτηριστικά οπλισμού για $\beta'=35^{\circ}$ .....	79
Πίνακας 5-6 Ποσότητα και χαρακτηριστικά οπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για $\beta'=35^{\circ}$	79
Πίνακας 5-7 Χαρακτηριστικά οπλισμού για $\beta'=40^{\circ}$ .....	80
Πίνακας 5-8 Ποσότητα και χαρακτηριστικά οπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για $\beta'=40^{\circ}$	80
Πίνακας 5-9 Εμβαδομέτρηση στο ύψος $H1=10m$ .....	81
Πίνακας 5-10 Όφελος σε εμβαδό και όγκο στο ύψος $H1=10m$ .....	81
Πίνακας 5-11 Κόστος οπλισμού στο ύψος $H1=10m$ .....	81
Πίνακας 5-12 Χαρακτηριστικά πρανούς ύψους $H2=50m$ .....	82
Πίνακας 5-13 Χαρακτηριστικά οπλισμού για $\beta'=28.5^{\circ}$ .....	82
Πίνακας 5-14 Ποσότητα και χαρακτηριστικά οπλισμού για $\beta'=28.5^{\circ}$ .....	82
Πίνακας 5-15 Χαρακτηριστικά οπλισμού για $\beta'=30^{\circ}$ .....	83
Πίνακας 5-16 Ποσότητα και χαρακτηριστικά οπλισμού για $\beta'=30^{\circ}$ .....	83
Πίνακας 5-17 Εμβαδομέτρηση στο ύψος $H2=50m$ .....	84
Πίνακας 5-18 Όφελος σε εμβαδό και όγκο στο $H2=50m$ .....	84
Πίνακας 5-19 Κόστος οπλισμού στο ύψος $H2=50m$ .....	84
Πίνακας 5-20 Χαρακτηριστικά πρανούς ύψους $H3=150m$ .....	85
Πίνακας 5-21 Χαρακτηριστικά οπλισμού για $\beta'=26.7^{\circ}$ .....	85
Πίνακας 5-22 Ποσότητα και χαρακτηριστικά οπλισμού για $\beta'=26.7^{\circ}$ .....	86
Πίνακας 5-23 Εμβαδομέτρηση στο ύψος $H3=150m$ .....	86
Πίνακας 5-24 Όφελος σε εμβαδό και όγκο για το ύψος $H3=150m$ .....	86
Πίνακας 5-25 Κόστος οπλισμού στο ύψος $H3=150m$ .....	86
Πίνακας 5-26 Όφελος σε έκταση .....	88

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3-1(β) Ενδεικτικοί μηχανισμοί και καταστάσεις δυνητικής αστοχίας για ελέγχους οπλισμένων επιχώματων (Elias et al. 2001).....	49
Σχήμα 3-2 Οπλισμένο επίχωμα ήπιας σχετικά κλίσης και με γεωπλέγματα μικρού μήκους (Κωμοδρόμος 2019) .....	52
Σχήμα 3-3 Οπλισμένο επίχωμα απότομης κλίσης και με γεωπλέγματα δύο τύπων (Κωμοδρόμος 2019) .....	52
Σχήμα 3-4 Αποστάσεις έναντι αντοχής ενίσχυσης (Elias et al. 2001) .....	53
Σχήμα 3-5 Τοποθέτηση κύριας και δευτερεύουσας ενίσχυση (Elias et al. 2001) .....	54
Σχήμα 3-6 Πρανές και κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας.....	55
Σχήμα 4-1 Άοπλο πρανές ύψους 10m και κλίσης 20°.....	63
Σχήμα 4-2 Άοπλο πρανές ύψους 10m και κλίσης 30°.....	64
Σχήμα 4-3 Άοπλο πρανές ύψους 10m και κλίσης 40°.....	65
Σχήμα 4-4 Άοπλο πρανές ύψους 50m και κλίσης 20°.....	66
Σχήμα 4-5 Άοπλο πρανές ύψους 50m και κλίσης 30°.....	67
Σχήμα 4-6 Άοπλο πρανές ύψους 50m και κλίσης 40°.....	68
Σχήμα 4-7 Άοπλο πρανές ύψους 150m και κλίσης 20°.....	69
Σχήμα 4-8 Άοπλο πρανές ύψους 150m και κλίσης 30°.....	70
Σχήμα 4-9 Άοπλο πρανές ύψους 150m και κλίσης 40°.....	71
Σχήμα 5-1 Άοπλο πρανές H1=10m, FS=1.4, $\beta=24.1^\circ$ .....	78
Σχήμα 5-2 Οπλισμένο πρανές H1=10m, FS=1.4, $\beta'=30^\circ$ .....	79
Σχήμα 5-3 Οπλισμένο πρανές H1=10m, FS=1.4, $\beta'=35^\circ$ .....	80
Σχήμα 5-4 Οπλισμένο πρανές H1=10m, FS=1.4, $\beta'=40^\circ$ .....	81
Σχήμα 5-5 Άοπλο πρανές H2= 50m με FS=1.4.....	82
Σχήμα 5-6 Οπλισμένο πρανές H2=50m, FS=1.4, $\beta'=28.5^\circ$ .....	83
Σχήμα 5-7 Οπλισμένο πρανές H2=50m, FS=1.4, $\beta'=30^\circ$ .....	84
Σχήμα 5-8 Οπλισμένο πρανές H3=150m, FS=1.4, $\beta'=26.7^\circ$ .....	86
Σχήμα 5-9 Όφελος σε έκταση (m) .....	87



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία συντάχθηκε με αφορμή τη δημοσίευση των Rai et al. στην οποία όπου μελετάται η σχεδίαση και ενίσχυση χωμάτινων πρανών με στόχο την αύξηση της γωνίας τους κάνοντας χρήση γεωπλεγμάτων, που ανήκουν σε μια ευρύτερη κατηγορία μέσων βελτιστοποίησης εδαφών, τα γεωσυνθετικά υλικά (Rai et al. 2012).

Ειδικότερα, με τον όρο γεωσυνθετικά υλικά, αναφερόμαστε σε επίπεδα πολυμερή υλικά που σε συνεργασία με τα εδάφη, τα πετρώματα και άλλα γεωτεχνικά υλικά, λειτουργούν ως σταθεροποιητές και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι ενός κατασκευαστικού έργου. Τα πολυμερή αυτά έχουν μεγάλη αντοχή σε χημική και βιολογική διάβρωση. Επίσης, λόγω της σταθερότητας που προσδίδουν, ακόμα και χαμηλής αντοχής εδάφη, μπορούν να δεχτούν ρηχά θεμέλια.

Η πρώτη κατηγορία, τα γεωυφάσματα, είναι διαπερατά υλικά που λειτουργούν ως φίλτρα, στραγγιστήρια και ενισχυτικά μέσα όταν έρχονται σε επαφή με το έδαφος. Πολλές φορές όταν απαιτείται προσωρινή εφαρμογή τους, χρησιμοποιείται μια διαφορετική σύνθεση, η οποία αποτελείται από φυσικές ίνες όπως βαμβάκι και μπαμπού. Επίσης υπάρχουν και οι γεωμεμβράνες, που είναι χαμηλής διαπερατότητας υλικά και χρησιμοποιούνται ως «φράγματα» υγρών.

Τέλος, τα γεωπλέγματα, που θα μας απασχολήσουν, κατασκευάζονται από ένα απλό δίκτυο εφελκόμενων στοιχείων με ανοίγματα τέτοιου μεγέθους ώστε να περιπλέκονται με το υλικό. Είναι ακριβά υλικά, τα οποία μπορούν λόγω της υψηλής εφελκυστικής τους αντοχής να ενισχύσουν και να βελτιώσουν την διατμητική αντοχή ενός πρανούς, περιορίζοντας ταυτόχρονα και τις μετακινήσεις του εδάφους. Η εφελκυστική τάση τους και τα μεγάλα ανοίγματα που διαθέτουν επιτρέπουν μεγάλη τριβή μεταξύ της επιφάνειας τους και του εδάφους και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση του πρανούς, ενώ επίσης βοηθούν στην κατακόρυφη αποστράγγιση ενισχυμένου, μη αποστραγγισμένου εδάφους. Η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους ανοιγμάτων ενός γεωπλέγματος, βασίζεται κυρίως στην κατανομή των σωματιδίων του υλικού. Επιπλέον έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν τάση στο έδαφος μέσω της παθητικής αντίστασης τους στα εγκάρσια τμήματα του πλέγματος. Η τοποθέτηση των γεωπλεγμάτων γίνεται με συγκεκριμένο τρόπο. Αυτά τοποθετούνται σε οριζόντιες λωρίδες μέσα στα χωμάτινα πρανή προκειμένου να αντιστέκονται στην εξωτερική κίνηση της ενισχυμένης εδαφικής

μάζας. Έτσι, αλληλοεπιδρούν με το έδαφος μέσω μηχανισμών που αναπτύσσονται εξαιτίας των εφελκυστικών δυνάμεων. Η αλληλεπίδραση αυτή εξαρτάται από το μέγεθος των ανοιγμάτων και της κατανομής των σωματιδίων της απόθεσης. Τα σωματίδια παγιδεύονται στα ανοίγματα του πλέγματος και όταν ένα πρηνές τείνει να αστοχήσει, τα πλέγματα τανύονται και αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις τριβής οι οποίες και αποτρέπουν την πτώση του. Τα παραπάνω μπορούν να προσομοιωθούν και αριθμητικά, υποθέτοντας ένα λεπτό στρώμα στοιχείων διεπιφάνειας να έχει πολύ μεγάλη εφελκυστική δύναμη και γωνία τριβής. Εάν τα προαναφερθέντα υλικά συνδυαστούν μεταξύ τους, αυξάνουν την αποδοτικότητα τους και συχνά είναι πολυμερείς πυρήνες και πολυμερείς τρισδιάστατες κελυφώδεις κατασκευές. Η σύνθεση τους ποικίλλει και μας δίνει τα λεγόμενα γεωσύνθετα.

Συγκρίνοντας τα γεωσύνθετα με τα χαλύβδινα ενισχυτικά μέσα, καταλαβαίνουμε πως είναι πιο αποτελεσματικά αφού δημιουργείται ισχυρότερος δεσμός μεταξύ αυτών και του εδάφους. Μάλιστα μετά από μελέτη, φάνηκε πως στα πρώτα η ολίσθηση λαμβάνει χώρα στην διεπιφάνεια μεταξύ του εδάφους και της χαλύβδινης ενίσχυσης, ενώ στα δεύτερα, στην εδαφική μάζα δίπλα από την ενίσχυση.

Το 2005 οι Jones και Cooper, προσομοιώνουν τον οπλισμό που περιλαμβάνει στρώματα εφελκυστικής μεμβράνης και τον εφαρμόζουν όπου υπήρχαν χαλαρωμένοι σχηματισμοί που αν κατέρρεαν θα επέφεραν μεγάλες καταστροφές. Το 2007 οι Lupo και Morrison, μελετούν τα γεωσυνθετικά υλικά στον σχεδιασμό και την ενίσχυση των εξορυκτικών εγκαταστάσεων, τα οποία και χρησιμοποιούνται ευρέως σε περιβαλλοντικά και γεωτεχνικά έργα. Το 2008 ο Fowmes, κατασκευάζει μια αριθμητικά μοντελοποιημένη τεχνική για πολυεπίπεδα συστήματα υγειονομικής ταφής. Την ίδια χρονιά ο Park, σχεδιάζει μια κομβικής σημασίας μέθοδο για τον υπολογισμό της ταχύτητας του υπόγειου νερού. Το 2011 ο Chen, χρησιμοποιεί τα γεωσυνθετικά για να κάνει ελεγχόμενη την διάβρωση σε χωμάτινα πρηνή κατά την πτώση ισχυρής βροχής. Τέλος το 2011 οι Rajesh και Viswanadham, ελέγχουν την υδρομηχανική συμπεριφορά των φραγμάτων του εδάφους με και χωρίς την ενίσχυση από γεωπλέγματα.

Η σταθερότητα ενός όγκου απορριμμάτων είναι πολύ σημαντική σε μεγάλες μεταλλευτικές επιφάνειες. Η υπερφόρτωση των σωρών πρέπει να αφαιρείται και να απορρίπτεται, καθώς σε περίπτωση αστοχίας, μπορούν να δημιουργηθούν ποικίλα προβλήματα και ατυχήματα. Στην πραγματικότητα, η απόθεση θα ήταν κατάλληλο να γίνεται σε οριζόντια στρώματα κάτι που έχει μεγάλο κόστος και προϋποθέτει την ύπαρξη τεράστιων εκτάσεων. Για αυτό, κρίνεται άμεσης ανάγκης ο υπολογισμός του κατάλληλου ύψους και κλίσης των παραφορτωμένων αυτών χωμάτινων πρηνών. Η προσομοίωση τους με γεωπλέγματα γίνεται με την χρήση του λογισμικού Slide2, που χρησιμοποιεί την μέθοδο της οριακή ισορροπίας. Τα γεωπλέγματα μπορούν να υποστούν φόρτιση και συμπίεση αλλά όχι κάμψη. Ο συντελεστής ασφαλείας κυρίως βασίζεται στις παραμέτρους δύναμης Mohr-Coulomb. Η διατμητική αντοχή και ο



συντελεστής ασφαλείας υπολογίζονται ώστε να δείξουν την επίδραση των πλεγμάτων στην σταθερότητά του πρανούς.

Μέσα από δοκιμές αποδεικνύεται ότι ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται όσο το νούμερο των γεωπλεγμάτων αυξάνεται. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν γεωπλέγματα ο κύκλος ολίσθησης φτάνει στον πόδα του πρανούς ενώ όσο περισσότερα τοποθετούνται εκεί, απομακρύνεται και γίνεται στενότερος. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη εφελκυστική αντοχή που τα πλέγματα διαθέτουν και δεν επιτρέπουν την διέλευση του κύκλου αστοχίας από εκεί. Όταν ο κύκλος ολίσθησης γεννάται στην στέψη και φτάνει στον πόδα σημαίνει ότι δεν χρησιμοποιούνται γεωπλέγματα. Οι μεταλλευτικοί σωροί χρειάζονται μεσαία έως υψηλή ευστάθεια με ελάχιστη τιμή  $FS=1.4$ , που είναι και ο σκοπός των αναλύσεων που εκπονήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

## 1.2 Στόχος εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της κλίσης των σωρών εξορυκτικών αποβλήτων με την χρήση γεωπλεγμάτων. Αρχικά μελετάται η ευστάθεια των άοπλων εδαφικών πρανών τα οποία καταλαμβάνουν μεγάλο κομμάτι των εκτάσεων απόθεσής τους. Όπως είναι αναμενόμενο τα πρανή αυτά εμφανίζουν μικρούς συντελεστές ασφαλείας, δηλαδή  $FS < 1.4$ . Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα δύο παραπάνω προβλήματα, χωρητικότητα και ευστάθεια, προχωράμε στον οπλισμό αυτών των σωρών με ταυτόχρονη αύξηση της κλίσης τους. Έτσι επιτυγχάνεται η ασφάλεια και η εξασφάλιση εκτάσεων για την αποθήκευση περισσότερων τόνων αποβλήτων. Η όπλιση γίνεται με την χρήση γεωπλεγμάτων, συγκεκριμένης γεωμετρίας τα οποία τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδίδουν την βέλτιστη και οικονομικότερη λύση. Συνοψίζοντας, καταλαβαίνουμε πως ο σωστός χειρισμός αυτών των σωρών από τον μηχανικό είναι εξέχουσας σημασίας για την μεταλλευτική εταιρία εκμετάλλευσης.

## 1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής 5 κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Στο κεφάλαιο παρουσιάζονται το αντικείμενο και ο σκοπός της εργασίας καθώς και η δομή της.

Κεφάλαιο 2: Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο αποκλειστικά στις σωρούς απόθεσης εξορυκτικών στείρων. Αρχικά ορίζονται τα εξορυκτικά απόβλητα και παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τύποι των σωρών απόθεσης. Στην συνέχεια παρατίθενται κάποια στοιχεία σχετικά με τον σχεδιασμό αυτών των χώρων και ύστερα μελετάται η ευστάθεια τους. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται οι παράγοντες

που μπορούν να επιδράσουν στην ευστάθεια, οι μηχανισμοί αστοχίας, η διατμητική αντοχή και τέλος κάποια σχεδιαστικά ζητήματα. Επιπλέον, σχολιάζονται οι καθιζήσεις και η διάβρωση που μπορούν να εμφανιστούν καθώς και η ροή του νερού μέσα από τις σωρούς αυτές. Κλείνοντας γίνεται αναφορά στην σημασία και τον ρόλο που διαδραματίζει η κλίση των αποθέσεων καθώς και τυχόν προβληματισμοί που μπορούν να τεθούν σε γεωτεχνικό κοινωνικό και περιβαλλοντικό επίπεδο σχετικά με τις αποθέσεις αυτές.

Κεφάλαιο 3: Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η χρήση των γεωπλεγμάτων στην όπλιση των επιχωμάτων. Ορίζονται τα γεωσυνθετικά υλικά και εν συνεχεία παρουσιάζονται τα γεωπλέγματα οι χρήσεις τους σε τεχνικές κατασκευές. Εν συνεχεία αναλύονται οι φυσικές, μηχανικές και οι ιδιότητες αντοχής τους, καθώς και ζητήματα υποβιβασμού τους που μπορεί να δημιουργηθούν. Προχωρώντας, κύριας σημασίας είναι η μελέτη των αρχών και κανονισμών σχεδιασμού των οπλισμένων επιχωμάτων. Τέλος γίνεται μια σύντομη παρουσίαση του τρόπου τοποθέτησης των γεωπλεγμάτων χρησιμοποιώντας το γεωτεχνικό πρόγραμμα Slide2 της Rocscience.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται επιχώματα εξορυκτικών αποβλήτων, τα οποία εμφανίζουν τόσο συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όσο και ιδιότητες εδάφους. Μελετάται η ολική σταθερότητα αυτών των πρανών, γνωστή και ως "Global Stability", δηλαδή τίθενται τα όρια μέσα στα οποία θα γίνεται η ανάλυση, με τέτοιον τρόπο ώστε να μην λαμβάνονται υπόψιν κάποιες ρηχές επιφάνειες αστοχίας του πρανούς που εμφανίζουν πολύ μικρούς συντελεστές ασφαλείας και επηρεάζουν αρκετά το τελικό αποτέλεσμα.

Κεφάλαιο 5: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η όπλιση των πρανών αυτών με γεωπλέγματα, με στόχο της αύξηση της κλίσης τους και συνεπώς της χωρητικότητας τους και αυτό λόγω της έλλειψης εκτάσεων για την αποθήκευση τους και του μεγάλου κόστους αγοράς περισσότερων. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποδεικνύεται πολυέξοδη σε κάποιες περιπτώσεις για την επιχείρηση αλλά σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί με σύνεση, το όφελος μπορεί να είναι μεγαλύτερο.

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται κάποιες από τις βέλτιστες λύσεις που βρέθηκαν μετά από πολλές δοκιμές και αναλύσεις, για το πρανές  $H_1=10m$  με μια κλίμακα  $0,25\beta \leq \Delta\beta \leq 0,6\beta$ , για το πρανές  $H_2=50m$ ,  $0,17\beta \leq \Delta\beta \leq 0,285\beta\%$  και για το πρανές  $H_3=150m$   $\Delta\beta=0,09\beta$ .

## 2 ΣΩΡΟΙ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΕΙΡΩΝ

### 2.1 Τα εξορυκτικά απόβλητα

Τα εξορυκτικά απόβλητα και οι μεταλλευτικοί σωροί αναφέρονται σε απόβλητα από πετρώματα, εκπλυμένο μέταλλευμα και άλλα υλικά τα οποία κατά τη χρονική περίοδο εξόρυξης δεν έχουν οικονομική αξία. Οι σωροί αυτών των υλικών μπορούν όμως δυνητικά να αποκτήσουν αξία στο μέλλον (Orman et al. 2011).

Από παλιά οι άνθρωποι εξήγαγαν υλικά αξίας από πετρώματα ή και από άλλα μικρότερης αξίας υλικά τα οποία είχαν απομείνει μετά τις εργασίες εξαγωγής του χρήσιμου υλικού. Στα νεότερα χρόνια, η συσσώρευση των αποβλήτων αυτών σε σωρούς ή η απόθεσή τους σε ελεύθερες περιοχές - πλαγιές, ήταν κάποιες από τις λύσεις ώστε αυτά τα υλικά να μη καταλαμβάνουν χώρο και να εμποδίζουν. Συχνά μάλιστα κατέληγαν σε λεκάνες αποστράγγισης, ποταμούς και λίμνες, όπου και προκαλούσαν περιβαλλοντικά προβλήματα (Orman et al. 2011). Με το πέρασμα του χρόνου, νέες νομοθεσίες και κανόνες θεσμοθετήθηκαν σηματοδοτώντας την εφαρμογή καινούργιων πρακτικών με στόχο τη μείωση των φαινομένων περιβαλλοντικής καταστροφής ή την εξάλειψη των πιθανών κινδύνων, που σχετίζονται με τα εξορυκτικά απόβλητα. Στα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα λόγω των πολλών αστοχιών που έλαβαν χώρα σε μεταλλευτικούς σωρούς αποβλήτων, ξεκίνησε η διαφορετική διαχείριση τους από τις μεταλλευτικές επιχειρήσεις. Οι αστοχίες αυτές είχαν ως αποτέλεσμα, τόσο απώλειες ανθρώπινων ζώων όσο και περιβαλλοντικές καταστροφές. Το θέμα έλαβε μεγάλες διαστάσεις και έτσι άρχισε η υπονόμηση της αξιοπιστίας των βιομηχανιών εξόρυξης και διαχείρισης αποβλήτων. Όλη αυτή η κατάσταση έθεσε ως στόχο τη βελτίωση της ποιότητας της διαχείρισης των εξορυκτικών αποβλήτων σε πολλές εταιρείες και χώρες, χωρίς αυτό να εξαλείφει τελείως την εκδήλωση τέτοιων φαινομένων (Blight 2010). Αυτό γίνεται εμφανές καθώς οι κίνδυνοι που σχετίζονται με αποθέσεις εξορυκτικών αποβλήτων έχουν μειωθεί στις ανεπτυγμένες χώρες, αλλά συνεχίζουν να υπάρχουν σε χώρες όπου οι περιβαλλοντικοί νόμοι δεν εφαρμόζονται με αυστηρότητα (Orman et al. 2011). Προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι κίνδυνοι στους οποίους μια εταιρεία εκτίθεται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης ενός χώρου αποθήκευσης αποβλήτων, είναι απαραίτητος ο κατάλληλος λειτουργικός έλεγχος. Η αναγνώριση αυτής της ανάγκης οδήγησε στην παροχή ενός υποχρεωτικού εγχειριδίου λειτουργίας σε πολλά ορυχεία καθώς και σε αυξημένη προσοχή στην εκπαίδευση και επίβλεψη του προσωπικού. Ένας μηχανικός που ασχολείται με την αποθήκευση εξορυκτικών αποβλήτων απαιτείται να συνεργαστεί με άτομα από πολλούς διαφορετικούς κλάδους, όπως

βοτανική, οικολογία, οικονομία, κηπουρική, κοινωνιολογία και ακόμη και τοπική πολιτική για την επίτευξη και την εφαρμογή σχεδίων κατασκευής, λειτουργίας και ολοκλήρωσης του έργου, που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις μηδενικής βλάβης. Η παροχή ικανοποιητικών λύσεων σε τέτοια αδιέξοδα προβλήματα κατά τις επόμενες δεκαετίες είναι αυτή που θα προσφέρει μερικές από τις πιο ικανοποιητικές και προσοδοφόρες δραστηριότητες στις οποίες θα μπορούσαν να εργαστούν μηχανικοί (Blight 2010).

## **2.2 Τύποι σωρών απόθεσης**

Οι δύο βασικοί τύποι σωρών απόθεσης εξορυκτικών αποβλήτων είναι οι σωροί ξηρών μεταλλευτικών αποβλήτων (mine waste dumps) και τα μεταλλευτικά τέλματα. Πιο αναλυτικά (Blight 2010):

### **A. Σωροί ξηρών εξορυκτικών αποβλήτων**

Στους σωρούς αποτίθεται άγονο υπερκείμενο υλικό, άγονα πετρώματα, ανόργανο υλικό το οποίο δεν προσφέρεται για περαιτέρω άμεση επεξεργασία ή αφυδατωμένα απορρίμματα από μια διαδικασία εξόρυξης μεταλλευμάτων. Αυτός ο τύπος αποθήκευσης χαρακτηρίζεται από τη μέθοδο εναπόθεσης που μπορεί να είναι μέσω μεταφοράς με ελαστικοφόρους φορτωτές ή ταινιοδρόμους, μηχανήματα στοίβαξης, απόθεσης ή άλλα μηχανήματα. Το καθοριστικό κριτήριο αυτής της μεθόδου εναπόθεσης, είναι ότι το υλικό τοποθετείται μηχανικά σε υγρή ή ημίξηρη κατάσταση. Μπορεί να τοποθετηθεί είτε με είτε χωρίς κάποια μορφή συμπίεσης. Στην περίπτωση εργασιών στοίβαξης ή απόθεσης, τα απόβλητα εναποτίθενται χωρίς καμία μορφή συμπίεσης και έτσι ένα εξαιρετικά μεγάλο ύψος υλικού μπορεί να εναποτεθεί σε μια περιοχή σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Προφανώς, από επιχειρησιακή άποψη, η μέθοδος έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, για αυτό αυτός ο τύπος απορρίψεων χρησιμοποιείται ευρέως.

Ωστόσο, υπάρχουν μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Από την άποψη της ευστάθειας, αυτή η μέθοδος απόθεσης ενδέχεται να μην είναι ικανοποιητική για τους ακόλουθους λόγους:

A) Το υλικό εναποτίθεται σε πολύ χαλαρή κατάσταση. Μπορεί επομένως να είναι σχετικά διαπερατό και μπορεί να συσσωρεύσει υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία ως αποτέλεσμα της βροχής που διεισδύει στην επιφάνεια του σωρού.

B) Η επιβολή μεγάλου ύψους υλικού στα στρώματα θεμελίωσης του σωρού σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα μπορεί να προκαλέσει υψηλές διατμητικές τάσεις και μπορεί να οδηγήσει σε συνθήκες που ευνοούν την αστοχία της θεμελίωσης. Η ταχεία αύξηση του ύψους μπορεί επίσης να προκαλέσει κάποιες πιέσεις στους πόρους του υλικού, ως αποτέλεσμα της μη επιμελημένης φόρτωσης των αποβλήτων.

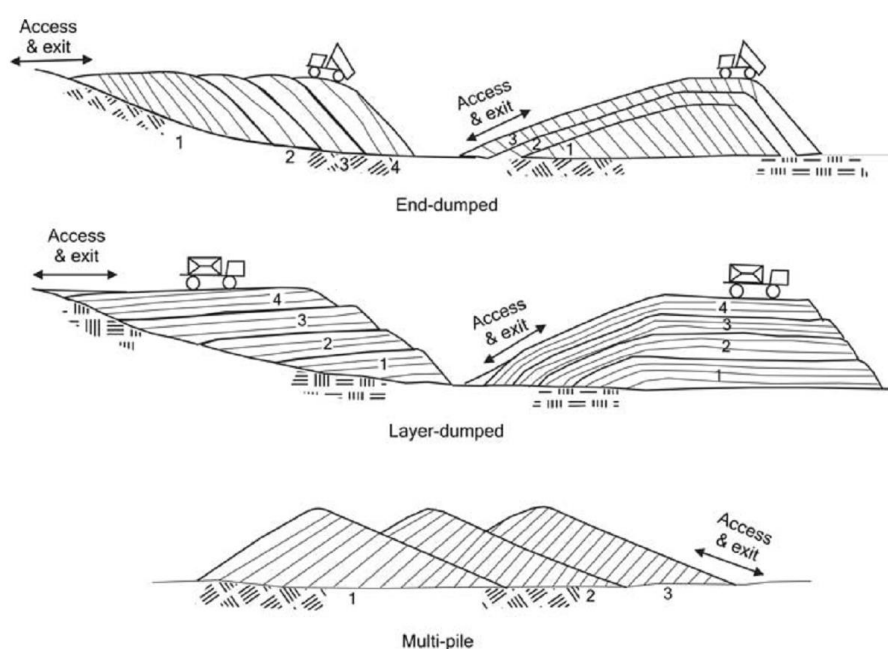
Γ) Αν η επιφάνεια του σωρού είναι διαπερατή, ένα σημαντικό ποσοστό της ετήσιας βροχόπτωσης μπορεί να διεισδύσει σε αυτήν. Εάν η διαρροή περιέχει άλατα ή οξέα

διαλυμένα από τα απόβλητα, μπορεί να αποτελεί σημαντική πηγή ρύπανσης των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων. Ωστόσο, η διάχυση μπορεί να μειωθεί σημαντικά εάν η επιφάνεια του σωρού έχει συμπυκνωθεί κατάλληλα ώστε να καθίσταται λιγότερο διαπερατή (Blight 2010).

Όπου το υλικό εναποτίθεται από ελαστικοφόρα οχήματα, ο σωρός μπορεί να κατασκευαστεί με στρώσεις, καθεμία από τις οποίες δέχεται κάποια συμπύκνωση από τα οχήματα που απορρίπτουν το υλικό. Αυτό σημαίνει ότι :

- Η επιφάνεια ενός τέτοιου σωρού είναι γενικά αρκετά καλά σφραγισμένη έναντι της εισόδου υγρασίας.
- Αποφεύγεται μεγάλο μέρος καθίζησης επειδή το υλικό συμπιέζεται σε στρώματα καθώς εναποτίθεται.
- Καθώς το υλικό είναι τοποθετημένο σε αρκετά λεπτά στρώματα σε μια μεγάλη περιοχή, τα στρώματα θεμελίωσης καθώς και τα απόβλητα έχουν την ευκαιρία να ενοποιηθούν και να αποκτήσουν αντοχή κάτω από το υπερτιθέμενο φορτίο.

Στην περίπτωση καύσιμου υλικού, π.χ. απόβλητα από την εξόρυξη άνθρακα, η συμπύκνωση της επιφάνειας μειώνει την είσοδο οξυγόνου και συνεπώς την πιθανότητα αυθόρμητης καύσης των αποβλήτων (Blight 2010).



Εικόνα 2.1 Διάφορες μορφές κατασκευής σωρών απόθεσης εξορυκτικών αποβλήτων (Blight 2010)

## **B. Μεταλλευτικά τέλματα**

Αυτού του είδους οι αποθηκευτικοί χώροι μπορούν να έχουν ποικίλες μορφές, αλλά ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι συγκρατούν ή εμποδίζουν το λεπτόκοκκο υλικό το οποίο συνήθως εναποτίθεται υδραυλικά, είτε ως πολτός χαμηλού ιξώδους, είτε ως παχύρρευστο υλικό. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα απορρίμματα είναι αρκετά ιξώδη ώστε να μπορούν να εναποτίθενται με μεταφορική ταινία.

- «Διασταυρώσεις κοιλάδων»: Ένα ανάχωμα ή ένα φράγμα είναι χτισμένο σε μια κοιλάδα και τα απόβλητα που κατακρημνίζονται χρησιμοποιούνται για να γεμίσουν τον όγκο πίσω από το ανάχωμα.
- «Κατακρημνίσεις δακτυλίων»: Ένα ανάχωμα κατασκευάζεται για να περικλείει ένα χώρο που στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να περιέχει τα απόβλητα. Οι δακτύλιοι είναι συνήθως κατασκευασμένοι σε αρκετά επίπεδο έδαφος, αλλά ένας πλευρικός δακτύλιος λόφου μπορεί να κατασκευαστεί σε επικλινές έδαφος, οπότε η κλειστή πλευρά της κατακρήμνισης, σχηματίζεται από την κλίση του φυσικού εδάφους.
- «Κατακρημνίσεις εντός του λάκκου»: Εμφανίζονται όταν χρησιμοποιούνται απόβλητα για την πλήρωση ενός υπάρχοντος ανοιχτού λάκκου. Μικρές ποσότητες ιδιαίτερα επιβλαβών αποβλήτων απορρίπτονται μερικές φορές σε αδιαπέραστες επενδύσεις σε λάκκους, οι οποίες μπορεί να ανασκαφούν ειδικά για το σκοπό αυτό (Blight 2010).

## **2.3 Σχεδιασμός χώρων απόθεσης**

### **2.3.1 Ευστάθεια σωρών απόθεσης**

Η ελλειπής ευστάθεια και η τελική αστοχία πρανών, είναι πολύ σοβαρά ζητήματα για όλους τους τύπους σωρών εξορυκτικών αποβλήτων και λειτουργιών έκπλυσης σωρών. Οι κίνδυνοι και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός ασταθούς σωρού είναι κάτι που απασχολεί πολύ τόσο τους χειριστές όσο και τις ρυθμιστικές αρχές των εξορυκτικών αυτών διεργασιών. Η αστοχία ενός πρανού σε μια δομή αποβλήτων, μπορεί να προκαλέσει τόσο τραυματισμούς όσο και υλικές ζημιές. Επίσης η αστοχία ενός πρανού απόπλυσης, μπορεί να προκαλέσει ρήξη της επένδυσης, πιθανή απελευθέρωση ολόκληρου του διαλύματος κάτι που δύνανται να οδηγήσει στην ρύπανση των υπόγειων υδάτων, καθώς και σε απώλεια εσόδων. Για αυτό είναι απαραίτητος ο προσχεδιασμός ώστε να αποφεύγονται τέτοιες δαπάνες.

Για να επιτευχθεί η ευστάθεια των σωρών απόθεσης πρέπει να πραγματοποιούνται ο κατάλληλος προγραμματισμός και σχεδιασμός. Αυτές οι διαδικασίες προκειμένου να εκτελεστούν σωστά, απαιτούν μια πλήρη εικόνα των ιδιοτήτων του αποβλήτου πετρώματος ή μεταλλεύματος. Στην περίπτωση έκπλυσης απορριμμάτων ή σωρού, οι ιδιότητες υπόγειων υδάτων και διαρροής του μεταλλεύματος πρέπει επίσης να γίνουν κατανοητές για τον σωστό σχεδιασμό αυτών των τύπων εγκαταστάσεων. Οι

μελέτες πρέπει να περιλαμβάνουν έρευνα πεδίου που αποτελείται από χαρτογράφηση εδαφών και πετρωμάτων, δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, καλή παρακολούθηση της εγκατάστασης, ανασκαφή λάκκου δοκιμής, δειγματοληψία αποβλήτων βράχου μεταλλεύματος και υλικών θεμελίωσης καθώς και εργαστηριακές δοκιμές και αναλύσεις (Orman et al. 2011).

### **Παράγοντες επίδρασης στην ευστάθεια των σωρών**

Πολλοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόθεση απορριμμάτων και τη σταθερότητα των σωρών, όπως η τοπογραφία της τοποθεσίας, η γεωμετρία των απορρίψεων, ο ρυθμός στοίβαξης, το πάχος ανύψωσης, οι γεωτεχνικές ιδιότητες, η μέθοδος κατασκευής, το φορτίο του εξοπλισμού, η φρεατική επιφάνεια και οι σεισμικές δυνάμεις. Όλα αυτά πρέπει να ληφθούν υπόψη στην αξιολόγηση της σταθερότητας της δομής αποβλήτων κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού της. Γενικά, η ανάλυση οριακής ισορροπίας χρησιμοποιώντας μία από τις πολλές επικρατούσες προσεγγίσεις θεωρείται επαρκής για την αξιολόγηση της σταθερότητας της κλίσης των απορρίψεων αποβλήτων (Orman et al. 2011).

#### **1. Η τοπογραφία και η θέση της περιοχής**

Οικονομικοί είναι οι κύριοι λόγοι που οδηγούν στην επιλογή τοποθεσιών, με πιο συμφέρουσες αυτές που βρίσκονται μεταξύ της πηγής αποβλήτων και της περιοχής απόθεσης. Τα απόβλητα μπορούν να απορριφθούν σε μια περιοχή εντελώς έξω από το ορυχείο, ή μπορεί να προτιμηθεί η απόρριψη σε αυτό. Κατά τη διάρκεια του σταδίου έρευνας του σχεδιασμού, οι τοπογραφικές πληροφορίες που συγκεντρώνονται πρέπει να περιλαμβάνουν ολόκληρη την περιοχή αποχέτευσης που μπορεί να επηρεάσει την απόρριψη, καθώς απαραίτητος είναι και ο εντοπισμός των περιοχών που θα επηρεαστούν σε περίπτωση πραγματικής αποτυχίας της απόρριψης (Orman et al. 2011).

#### **2. Η γεωμετρία του σωρού και οι μέθοδοι στοίβαξης**

Η βέλτιστη προσέγγιση για την κατασκευή του σωρού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως τη μέθοδο απόρριψης και από την τοπογραφία του χώρου. Πιο αναλυτικά, εξαρτάται από το σχήμα του χώρου, την εγγύτητά του και τη σχετική ανύψωσή του σε σχέση με το ορυχείο, τη φύση του απόβλητου βράχου και τη θεμελίωση (Hustrulid et al. 2001, Orman et al. 2011).

Οι μέθοδοι απόρριψης εξορυκτικών αποβλήτων ταξινομούνται γενικά σύμφωνα με δύο κριτήρια: τη μέθοδο διάθεσης, η οποία μπορεί να κατασκευαστεί ως μια φθίνουσα κατασκευή, όπου το ανάχωμα κατασκευάζεται από πάνω προς τα κάτω (end dumping) και ως μια ανερχόμενη κατασκευή, όπου το ανάχωμα κατασκευάζεται από κάτω προς τα πάνω σε σειρά υψωμάτων (stacking in lifts or layers) καθώς και από την τοπογραφία των εδαφών διάθεσης, τα οποία μπορεί να είναι είτε επίπεδα είτε κεκλιμένα.

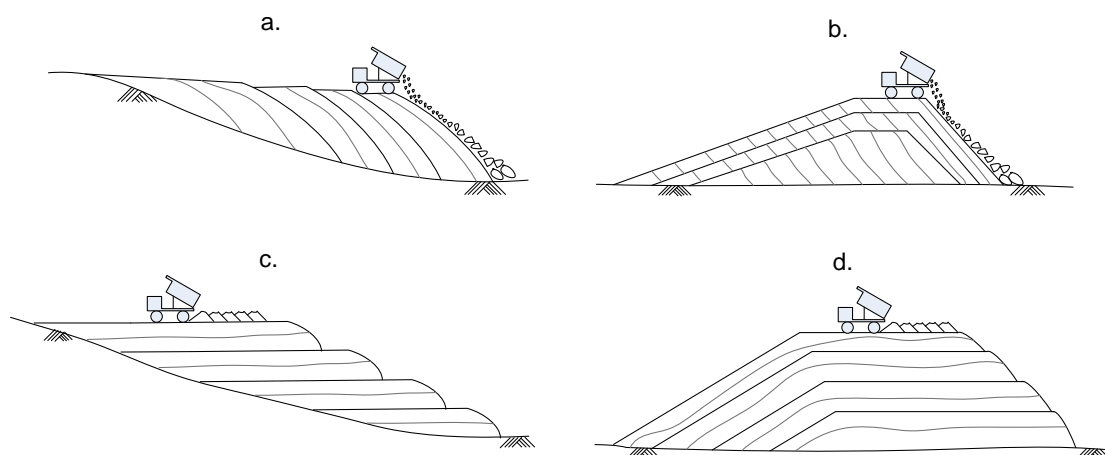
Σε ορεινό έδαφος, όπου ο χώρος διάθεσης βρίσκεται σε χαμηλότερο υψόμετρο από τον λάκκο, η κατηφορική κατασκευή είναι συνήθως η πιο οικονομική προσέγγιση. Ωστόσο, η ποιότητα των αποβλήτων και τα χαρακτηριστικά θεμελίωσης ενδέχεται να αποκλείουν ή να περιορίζουν αυτόν τον τύπο κατασκευής. Σε ήρεμο έδαφος ή όπου τα απόβλητα πετρώματα ή τα θεμέλια είναι φτωχά, η ανερχόμενη κατασκευή μπορεί να είναι η μόνη επιλογή. Η ανερχόμενη κατασκευή γενικά επιτρέπει περισσότερο έλεγχο επί της τοποθέτησης του υλικού και, ως εκ τούτου, είναι συνήθως καλύτερη από την κατηφορική κατασκευή όσον αφορά τη σταθερότητα. Η κατηφορική απόθεση, επίσης γνωστή και ως τελική απόθεση, συνεπάγεται την απόρριψη του υλικού σε ένα προελαύνον μέτωπο. Από την άλλη, στην ανηφορική απόθεση, που μερικές φορές αναφέρεται ως απόρριψη περίφραξης, τα απόβλητα απορρίπτονται σε μια σειρά κωνικών πασσάλων και στη συνέχεια εξαπλώνονται από μπουλντόζες ώστε να σχηματιστούν σχετικά οριζόντια στρώματα. Η διαδικασία και στις δύο προσεγγίσεις επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί η τελική διαμόρφωση. Έχει τεκμηριωθεί στην βιβλιογραφία ότι υπάρχουν πολλές διαφορές μεταξύ των δύο τύπων κατασκευών.

Γενικά, οι διεργασίες από κάτω προς τα πάνω επιτυγχάνουν υψηλότερη πυκνότητα σε σύγκριση με αυτές από πάνω προς τα κάτω, επειδή κάθε στρώμα συμπιέζεται κάτω από το φορτίο των στρώσεων υπερφόρτωσης καθώς απλώνονται πάνω από τα προηγούμενα. Ανεξάρτητα από τον τύπο του σωρού, πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω του παροδικού φορτίου των φορτηγών ανάσυρσης που κινούνται στην επιφάνεια του αναχώματος (70 t καθαρό βάρος, 166 t μικτό βάρος), πιθανώς επιτυγχάνεται κάποιος βαθμός συμπίκνωσης στην επιφάνεια. Ωστόσο, πρόκειται για μια μικρή συνεισφορά και αφορά αποκλειστικά τη ρηχή συμπίκνωση κατά μήκος των διαδρομών στις οποίες κινούνται τα φορτηγά. Από την άλλη, οι διεργασίες από πάνω προς τα κάτω έχουν χαμηλή πυκνότητα και συνήθως οδηγούν σε λιγότερο ομοιογενείς σωρούς. Αυτό συμβαίνει επειδή καθώς απορρίπτονται τα απόβλητα, πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των σωματιδίων καθώς μεγαλύτερα σωματίδια, όπως ογκόλιθοι, κυλούν στους πρόποδες του σωρού, ενώ τα λεπτά παραμένουν κοντά στην κορυφή. Αυτό δεν συμβαίνει στις διαδικασίες από κάτω προς τα πάνω, όπου η στοίβαξη και η επακόλουθη εξάπλωση πραγματοποιούνται σε στρώσεις. Μια άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων είναι ότι στην κατασκευή από πάνω προς τα κάτω, η κλίση των πρανών συμπίπτει αρκετά με τη γωνία ανάπαυσης του απορριφθέντος υλικού. Αυτή η γωνία αναφέρεται σε μια πολύ χαλαρή διάταξη των σωματιδίων του εδάφους. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι τέτοια αναχώματα είναι οριακά σταθερά ή "μετα-σταθερά" (δηλαδή η αστοχία λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με τη διάθεση) και ο συντελεστής ασφαλείας τους είναι ίσος ή πολύ κοντά στη μονάδα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τέτοια αναχώματα είναι πιο επιρρεπή σε κατολισθήσεις. Επιπλέον, λόγω της χαμηλής αρχικής τους πυκνότητας και της θραύσης και αναπροσαρμογής των σωματιδίων που λαμβάνει χώρα με την πάροδο του χρόνου, τα κατασκευασμένα ανάχωμα από πάνω προς τα κάτω είναι επιρρεπή



σε σημαντικές καθιζήσεις, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Ιδιαίτερα, οι διαφορικές καθιζήσεις μπορεί να προκαλέσουν ρωγμές στην επιφάνεια που τελικά θα μπορούσαν να δημιουργήσουν διαδρομές διήθησης των νερών της βροχόπτωσης. Ένα τέτοιο γεγονός θα μπορούσε να οδηγήσει σε εσωτερική διάβρωση, περαιτέρω διαχωρισμούς και τελικά σε ζητήματα σταθερότητας. Αντιθέτως, τα αναχώματα από κάτω προς τα πάνω λόγω της υψηλότερης πυκνότητάς τους είναι λιγότερο ευάλωτα σε καθιζήσεις, ρωγμές στην επιφάνεια και προβλήματα εσωτερικής διάβρωσης.

Τέλος, όσον αφορά τη διαπερατότητα, λόγω του διαχωρισμού σωματιδίων που εξηγήθηκε παραπάνω, οι σωροί από πάνω προς τα κάτω αναμένεται να έχουν μια πολύ διαπερατή ζώνη στη βάση και κοντά στον πόδα (όπου έχουν κυλήσει τα μεγαλύτερα σωματίδια) και μια χαμηλότερη ζώνη διαπερατότητας στη στέψη (όπου μένουν τα λεπτά). Από την άλλη πλευρά, οι διεργασίες από κάτω προς τα πάνω έχουν ως αποτέλεσμα μια συνολικά πιο σταθερή διαπερατότητα σε όλο το σώμα των απορρίψεων (Hustrulid et al. 2001, Zevgolis 2018).



Εικόνα 2.2 Τυπικές μέθοδοι κατασκευής αποβλήτων ορυχείων: a. από πάνω προς τα κάτω σε κεκλιμένη τοπογραφία, b. από πάνω προς τα κάτω σε οριζόντια τοπογραφία, c. από κάτω προς τα πάνω σε κεκλιμένη τοπογραφία, d. από κάτω προς τα πάνω σε οριζόντια τοπογραφία (Blight 2010, Zevgolis 2018)

### 3. Οι γεωτεχνικές ιδιότητες των εξορυκτικών αποβλήτων

Οι γεωτεχνικές ιδιότητες των εξορυκτικών αποβλήτων ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ έργων, ακόμη και μεταξύ διαφορετικών φάσεων του ίδιου έργου. Οι παράμετροι πυκνότητας, κορεσμού και διατμητικής αντοχής των υλικών που σχηματίζουν το πρανές απόρριψης επηρεάζουν τόσο τον τρόπο αστοχίας όσο και τον υπολογισμένο συντελεστή ασφάλειας (FS) κατά της ολίσθησης. Άλλες χρήσιμες πληροφορίες για το σχεδιασμό περιλαμβάνουν την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, το ειδικό

βάρος, τη διαπερατότητα, τον δείκτη σύνθεσης, την ταξινόμηση εδάφους και τη συμπεριφορά αποδόμησης των αποβλήτων. Αυτές οι παράμετροι βασίζονται γενικά σε εργαστηριακές δοκιμές. Συχνά όμως απαιτείται έλεγχος επαλήθευσης κατά την κατασκευή για να διασφαλιστεί ότι οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ήταν λογικές, ακριβείς και κατάλληλες. Πιο συγκεκριμένα, τα βραχώδη απόβλητα που είναι χονδροειδή υλικά συνήθως ταξινομούνται ως χαλίκια ή πέτρες με κάποια συγκεκριμένη κοκκομετρία. Επιπλέον, η γωνία ανάπαυσης για τα βραχώδη εξορυκτικά απόβλητα κυμαίνεται συνήθως από 35 ° έως 40 ° και βασίζεται σε παράγοντες όπως το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων, το ύψος πτώσης, το ειδικό βάρος και την ποσότητα του νερού. Η πυκνότητα των απορριμμάτων πετρωμάτων συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 1,6 και 2,2 t / m<sup>3</sup>, ανάλογα με το εάν το υλικό είναι χαλαρό ή συμπιεσμένο (Williams 2000). Για παράδειγμα, στους σωρούς έκπλυσης, το μέταλλευμα στοιβάζεται σκόπιμα σε χαλαρή κατάσταση για να διατηρήσει υψηλή διαπερατότητα, όπως απαιτείται κατά την διαδικασία έκπλυσης (Orman et al. 2011).

#### **4. Οι γεωτεχνικές ιδιότητες του αποβλήτου και η θεμελίωση**

Η θεμελίωση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στη συνολική σταθερότητα της απόρριψης αποβλήτων. Η έρευνα του χώρου απόρριψης πρέπει να προσδιορίζει τη γενική γεωλογία του τόπου και τυχόν δυσμενείς γεωλογικές και εδαφικές συνθήκες. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην παρουσία ρηχών υπόγειων υδάτων, περιοχών απόρριψης, κατολισθήσεων, οργανικών εδαφών, αργίλων και βυθισμένων πλακών (Vandre 1980). Οι μελέτες κάτω από την επιφάνεια μπορεί να περιλαμβάνουν δειγματοληψία, επιτόπιες δοκιμές και γεωτρήσεις και θα πρέπει να εξυπηρετούν τη λήψη των κρίσιμων παραμέτρων για τον σχεδιασμό. Αφού ληφθούν δείγματα εδάφους και πετρώματος, κατά τη διάρκεια της έρευνας θα πρέπει να διεξαχθούν εργαστηριακές δοκιμές για τον εντοπισμό των σχετικών γεωτεχνικών ιδιοτήτων των υλικών. Επιπλέον, πρέπει να προσδιοριστεί η ιδιότητα ταξινόμησης, αντοχής, διαπερατότητας και σταθεροποίησης των υλικών θεμελίωσης και πώς αυτές οι ιδιότητες επηρεάζονται από το χρόνο ή τον κορεσμό των εδαφών (Orman et al. 2011).

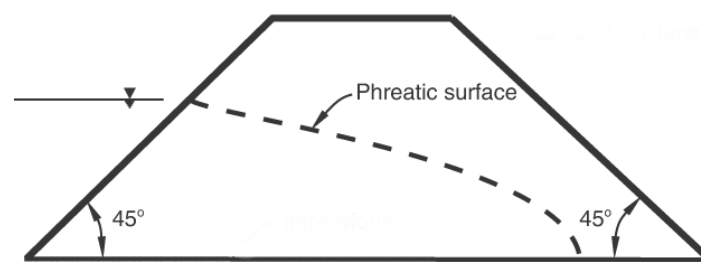
#### **5. Γεωτεχνικές ιδιότητες σωρών και γεωσυνθετικά**

Τα τελευταία 20 χρόνια, σωροί έκπλυσης χρυσού, ασημιού και πιο πρόσφατα χαλκού, έχουν κατασκευαστεί με στρώσεις γεωμεμβράνης στα θεμέλια. Συνήθως, το LLDPE (Linear low-density polyethylene) ή το HDPE (High-density polyethylene) χρησιμοποιείται ως βασική επένδυση. Η απόφαση βασίζεται στην επιμήκυνση, τη δύναμη και άλλες απαιτήσεις της εγκατάστασης. Οι επενδύσεις από PVC (PolyVinyl Chloride), έχουν χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, κυρίως για οικονομικούς λόγους. Το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του έργου, καθώς και οι συνέπειες της αποτυχίας απόρριψης, είναι αυτά που συνήθως καθορίζουν την έκταση της έρευνας που πραγματοποιείται για τη λήψη αυτών των πληροφοριών. Η

έρευνα πρέπει να είναι αρκετά διεξοδική ώστε να εντοπίζει όλες τις δυσμενείς συνθήκες και να παρέχει με βεβαιότητα ότι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό είναι κατάλληλες (Orman et al. 2011).

### 6. Υπόγεια ύδατα και φρεατική επιφάνεια

Οι επιπτώσεις του νερού στη σταθερότητα των απορρίψεων εξορυκτικών αποβλήτων μπορεί να είναι δύσκολο να εκτιμηθούν και πρέπει να ληφθούν μέτρα για να αποφευχθεί η είσοδος περίσσειας νερού στην απόρριψη. Προκειμένου να εκτιμηθεί με ακρίβεια η σταθερότητα της απόρριψης αποβλήτων, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ανάλυση διαρροής για τον προσδιορισμό των ροών μέσω του σωρού και του ύψους της φρεατικής επιφάνειας. Η συσσώρευση πίεσης νερού εντός του σωρού θα μειώσει τον συντελεστή ασφαλείας FS για τη σταθερότητα του πρανούς και θα πρέπει να εξεταστεί η πιθανότητα αύξησης της φρεατικής επιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα, στην διαδικασία έκπλυσης, τα επιθέματα έκπλυσης παρουσιάζουν συνδυασμό ακραίων πιέσεων βάσης και υψηλών συνθηκών υγρασίας που δεν υπάρχουν σε άλλες επενδυμένες εγκαταστάσεις, όπως χώροι υγειονομικής ταφής. Επιπλέον, οι σωροί απόπλυσης βρίσκονται μερικές φορές σε ιδιαίτερα σεισμικές περιοχές, προκαλώντας ανησυχίες για υγροποίηση λόγω ξαφνικής συσσώρευσης πίεσης πόρων. Μια αύξηση στον υδροφόρο ορίζοντα μπορεί να μειώσει σημαντικά τον FS για μια βαθιά αστοχία μέσω του υλικού θεμελίωσης, ενώ η υψηλή στάθμη νερού μέσα στην απόρριψη μπορεί να οδηγήσει σε επιφανειακές αστοχίες. Η παράλληλη ροή στην επιφάνεια της κλίσης μπορεί επίσης να μειώσει σημαντικά τον FS (Orman et al. 2011).



Εικόνα 2.3 Φρεατική επιφάνεια (abaqus-docs.mit.edu 2017)

### 7. Σεισμικές Δυνάμεις

Σε σεισμικά ενεργές περιοχές, η σταθερότητα του πρανούς της δομής αποβλήτων αξιολογείται επίσης για σεισμικές συνθήκες φόρτισης. Η σεισμική φόρτιση, αν και δυναμική και κυκλική στη φύση, αντιμετωπίζεται γενικά ως υπέρθετο ισοδύναμο σύνολο στατικών φορτίων και η ανάλυση σταθερότητας για αυτήν την περίπτωση αναφέρεται ως ψευδοστατική ανάλυση. Ο συντελεστής σεισμού, ή ο ψευδοστατικός συντελεστής, επιλέγεται βάσει ενός καθορισμένου σεισμικού σχεδιασμού. Συχνά,

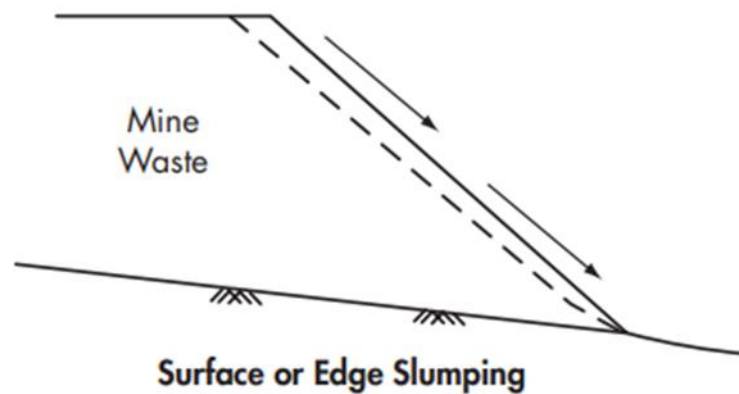
μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ποσοστό της μέγιστης επιτάχυνσης σχεδιασμού στην βάση για την ψευδοστατική ανάλυση. Ωστόσο, η επιλογή ενός κατάλληλου ψευδοστατικού συντελεστή μπορεί να βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην τεχνική κρίση και είναι συχνά συζητήσιμη. Επίσης, τα υλικά μέσα στην απόρριψη αποβλήτων ενδέχεται να υποστούν σημαντική απώλεια αντοχής κατά τη διάρκεια της σεισμικής ανατάραξης, η οποία μπορεί να μην είναι πλήρως κατανοητή ή καθορισμένη από τις εργαστηριακές δοκιμές. Επομένως, ενώ οι ψευδοστατικές αναλύσεις είναι ένα απλό και βολικό εργαλείο, πρέπει να χρησιμεύουν κυρίως ως μέθοδος διερεύνησης ως προς το εάν μπορεί να συμβεί σημαντική μετατόπιση κατά τη διάρκεια του σεισμού. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος σταθερότητας που προκαλείται από τους σεισμούς είναι συνήθως η ρευστοποίηση των υλικών θεμελίωσης, αν και η ρευστοποίηση μπορεί να συμβεί και σε ευαίσθητα υλικά αποβλήτων. Η ρευστοποίηση λόγω σεισμικών συμβάντων περιορίζεται συνήθως σε βάθος 20 m, λόγω των ευεργετικών επιδράσεων της περιορισμένης πίεσης κατά της ευαισθησίας ρευστοποίησης (Thiel and Smith 2004) (Orman et al. 2011).

### **2.3.1.1 Μηχανισμοί αστοχίας**

Είναι πολύ βασικό κατά την αξιολόγηση της σταθερότητας και τον σχεδιασμό των πρανών να λαμβάνονται υπόψη οι βασικοί τρόποι αστοχίας των απορρίψεων των αποβλήτων που μπορούν να εκδηλωθούν (Orman et al. 2011)

#### **A. Καθίζηση επιφάνειας ή άκρων (Surface or edge slumping)**

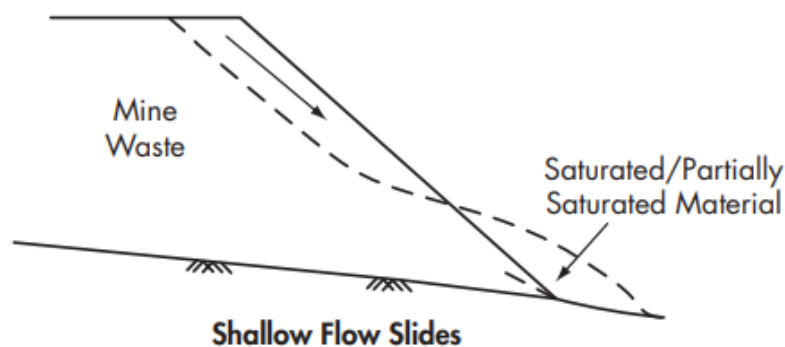
Ο πιο συνηθισμένος τρόπος αστοχίας είναι η καθίζηση των άκρων (καθίζηση στέψης), όπου μια λεπτή σφήνα υλικού μετατοπίζεται προς τα κάτω παράλληλα με την επιφάνεια των απορρίψεων. Αυτή η ρηχή αστοχία συνήθως δημιουργείται κοντά στην κορυφή του επιχώματος λόγω της απότομης κλίσης. Οι παραπάνω αστοχίες, εμφανίζονται συχνά μετά από έντονη βροχόπτωση, η οποία οδηγεί σε αυξημένες πιέσεις πόρων στα απορρίμματα χαμηλής διαπερατότητας. Τα συνεκτικά ή χαμηλής διαπερατότητας απόβλητα επιτρέπουν την ανάπτυξη πολύ απότομων πρανών. Σε σωρούς που έχουν χονδρόκοκκα υλικά, μπορεί να αναπτυχθεί καθίζηση των άκρων λόγω της αρχικής σύμπλεξης των μπλοκ. Η επίπεδη αστοχία είναι παρόμοια με την πτώση των άκρων και μπορεί να συμβεί βαθύτερα στα υλικά σωρών αποβλήτων. Σε αυτήν την περίπτωση, η ολίσθηση συμβαίνει κατά μήκος ενός επιπέδου αδυναμίας εντός του πρανούς, το οποίο μπορεί να έχει δημιουργηθεί λόγω μιας ζώνης αποβλήτων κακής ποιότητας ή από την απόρριψη αποβλήτων πάνω από χιόνι ή πάγο (Orman et al. 2011).



Εικόνα 2.4 Καθίζηση επιφάνειας ή άκρων (Orman et al. 2011)

### Β. Αβαθείς ρέουσες ολισθήσεις (Shallow flow slides)

Οι αβαθείς ρέουσες ολισθήσεις είναι ρηχές αποτυχίες κορεσμένων ή μερικώς κορεσμένων αποβλήτων. Συνήθως προκαλούνται από βροχή ή χιονοστιβάδα και έχουν ως αποτέλεσμα το υλικό να κυλάει κάτω από τα πρηνή λόγω διατμητικής αποτυχίας ή κατάρρευσης της δομής του εδάφους (Orman et al. 2011).

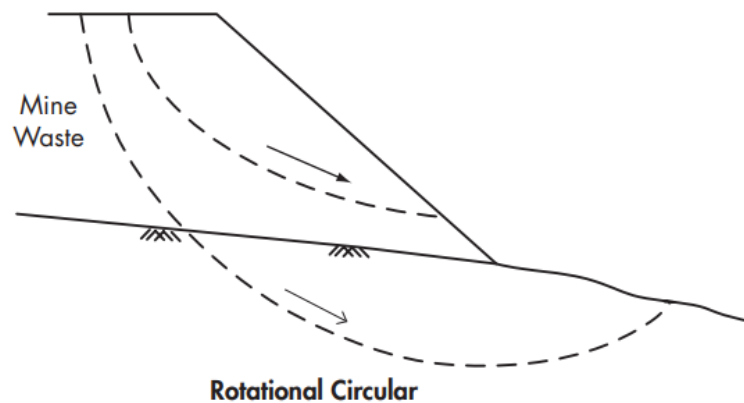


Εικόνα 2.5 Αβαθής ρέουσα ολίσθηση (Orman et al. 2011)

### Γ. Περιστροφικές Κυκλικές αστοχίες (Rotational circular failures)

Περιστροφική κυκλική αστοχία (αστοχία μάζας κατά μήκος καμπύλης επιφάνειας αστοχίας) μπορεί να προκύψει εντός των αποβλήτων ως αποτέλεσμα υπερβολικού ύψους απορρίψεων, πρόσθετης φόρτωσης που προκαλείται κατά τη διάρκεια σεισμού, ασθενών ή λεπτόκοκκων απορριμμάτων, μείωσης στηρίγματος δακτύλου και / ή υψηλών πιέσεων στους πόρους του νερού. Οι επιφάνειες περιστροφικής αστοχίας μπορεί επίσης να εκτείνονται έως και την θεμελίωση εάν το έδαφος είναι αδύναμο ή αναπτύσσονται υψηλές πιέσεις πόρων, όπως σε βαθιά απόθεση λεπτόκοκκου εδάφους. Η αστοχία ερπυσμού είναι επίσης ένας τύπος περιστροφικής

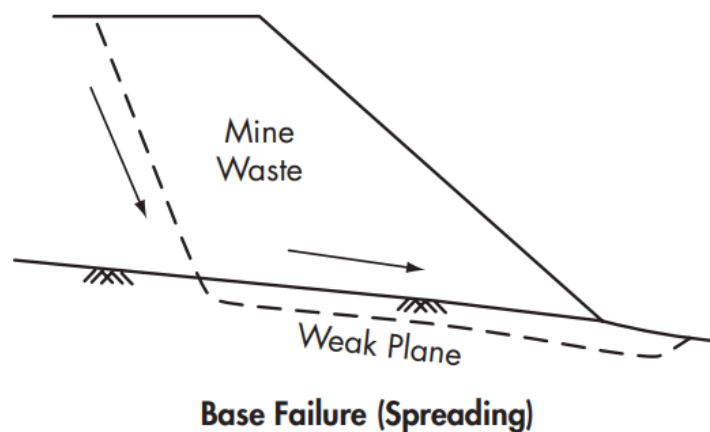
αστοχίας, με ευρεία περιστροφική διάτμηση που χαρακτηρίζεται από διόγκωση στον πόδα του πρανούς (Orman et al. 2011)



Εικόνα 2.6 Περιστροφική Κυκλική αστοχία (Orman et al. 2011)

#### Δ. Αστοχία της βάσης (Base failure)

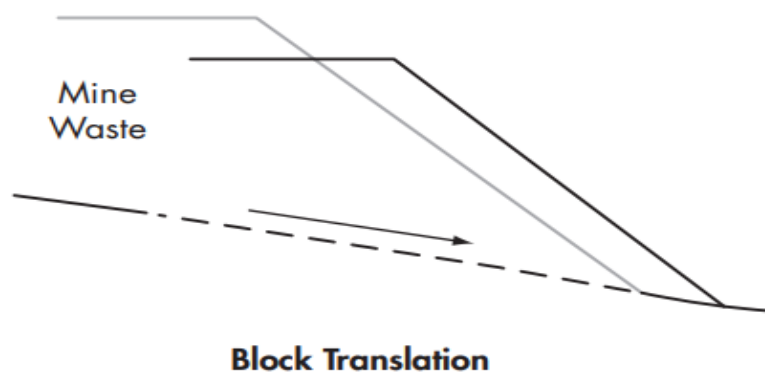
Η αστοχία της βάσης μπορεί να συμβεί εάν ένα λεπτό, αδύναμο στρώμα τοποθετηθεί πάνω από τη θεμελίωση, ειδικά εάν η θεμελίωση είναι κεκλιμένη. Εάν μια σφήνα του πρανούς των αποβλήτων μετατοπίζεται πλευρικά κατά μήκος μιας διατμητικής επιφάνειας, τα εδάφη θεμελίωσης μπορεί να εξαπλωθούν και να συμπιεστούν μπροστά από τον πόδα του πρανούς. Αυτό το φαινόμενο, γνωστό και ως εξάπλωση θεμελίων, μπορεί να οδηγήσει σε προοδευτική αποτυχία της συνολικής απόρριψης (Orman et al. 2011).



Εικόνα 2.7 Αστοχία της βάσης (Orman et al. 2011)

### Ε. Μετατόπιση άκαμπτου σώματος (Block translation)

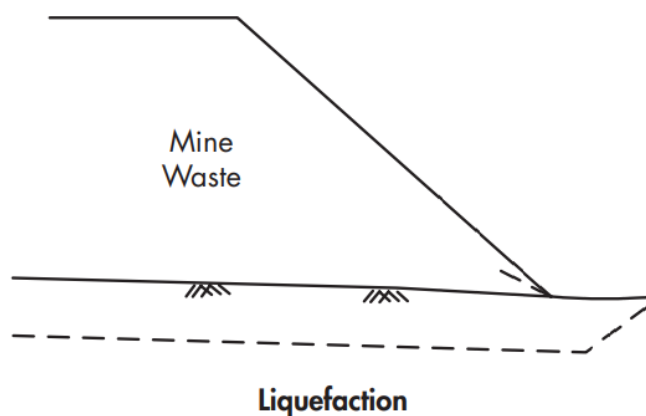
Η μετατόπιση κατά μπλοκ (επίπεδη ολίσθηση) μπορεί να προκύψει από οποιονδήποτε από τους παράγοντες που αναφέρονται στην περιστροφική αστοχία και εμφανίζεται κυρίως σε απότομες πλαγιές θεμελίωσης και σε επιφάνειες επενδυμένες με ένα λεπτό, αδύναμο κάλυμμα εδάφους. Το μεγαλύτερο μέρος του σωρού ολισθαίνει ως ένα άκαμπτο σώμα κατά μήκος ενός επιπέδου αδυναμίας. Αυτό το αδύναμο επίπεδο μπορεί να βρίσκεται εντός του εδάφους θεμελίωσης, κατά μήκος της διεπαφής μεταξύ του σωρού και του θεμελίου, ή κατά μήκος μιας επένδυσης (Orman et al. 2011).



Εικόνα 2.8 Μετατόπιση άκαμπτου σώματος (Orman et al. 2011)

### ΣΤ. Ρευστοποίηση (Liquefaction)

Εάν το θεμέλιο του εδάφους ή ο ίδιος ο σωρός αποβλήτων αποτελείται από υγροποιήσιμα υλικά και εξέρχονται υψηλές πιέσεις νερού-πόρων, τότε η ρευστοποίηση μπορεί να αποτελέσει σημαντική απειλή της ευστάθειας ενός πρανού. Σε περίπτωση που εμφανιστεί ρευστοποίηση στο θεμέλιο, ολόκληρος ο σωρός μπορεί να μετατοπιστεί ή μπορεί να υπάρξει προοδευτική αστοχία (Orman et al. 2011).



Εικόνα 2.9 Ρευστοποίηση (Orman et al. 2011)

### 2.3.1.2 Διατμητική αντοχή

#### A) Διατμητική αντοχή εξορυκτικών αποβλήτων

Η αντοχή σε διάτμηση είναι μια σημαντική ιδιότητα του εδάφους. Στα πρηνή των σωρών απόθεσης, η διατμητική αντοχή μπορεί να μειωθεί σημαντικά ως αποτέλεσμα της υγρασίας. Επιπλέον, τα απόβλητα υλικά των πετρωμάτων παρουσιάζουν χαρακτηριστική ευθραυστότητα που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της διατμητικής αντοχής των σωρών. Ειδικές γεωτεχνικές δοκιμές μπορούν να εφαρμοστούν για την αξιολόγηση της αντοχής των πετρωμάτων καθώς και της αντοχής σε διάτμηση για πιο λεπτομερείς μελέτες σχεδιασμού (Hustrulid et al. 2001).

Η κατανόηση της διατμητικής συμπεριφοράς των αποβλήτων είναι σημαντική για την αξιολόγηση της σταθερότητας του πρηνούς απόρριψης αποβλήτων. Πυκνότητα απορριμμάτων και μεταβλητότητα διαβάθμισης, μαζί με διαφορές στις φυσιολογικές και περιοριστικές τάσεις (π.χ. στο εσωτερικό του σωρού έναντι του πόδα ή στην επιφάνεια της πλαγιάς), έχουν ως αποτέλεσμα ετερογενή διατμητική αντοχή του σωρού. Τα ύψη απόρριψης που επιτυγχάνονται σήμερα έχουν ως αποτέλεσμα ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος φυσιολογικών τάσεων στον σωρό, στο οποίο το περίβλημα αντοχής δεν παραμένει απαραίτητα γραμμικό και αυτή η μη γραμμικότητα του πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση σταθερότητας. Η κυριαρχία των θραυσμάτων με μέγεθος λίθου σε τυπικά απόβλητα πετρωμάτων, προσδίδει μια διασταλτική συμπεριφορά υπό χαμηλές κανονικές καταπονήσεις και σημαντική συντριβή σημείων επαφής σε υψηλές τάσεις, όπως φαίνεται στην περίπτωση του γεμίσματος πετρωμάτων. Η γωνία τριβής του γεμίσματος εξαρτάται έντονα από την τάση και είναι σημαντικά χαμηλότερη για το υλικό στη βάση του σωρού (λόγω υψηλότερων κανονικών φορτίων) από ό, τι για το υλικό κοντά στον πόδα του σωρού (κάτω από χαμηλά φορτία). Οι Barton και Kjaernsli υπολόγισαν ότι η αποτελεσματική γωνία τριβής του γεμίσματος αυξάνεται μεταξύ 4° και 8° για κάθε δεκαπλάσια μείωση στην αποτελεσματική κανονική καταπόνηση (Barton and Kjaernsli 1981). Η διατμητική αντοχή του γεμίσματος επηρεάζεται επίσης από την ξηρή πυκνότητα του γεμίσματος, την αναλογία κενού, την δύναμη συμπίεσης, τον συντελεστή ενιαίας μορφής, το μέγιστο μέγεθος των κόκκων, την περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα και το σχήμα σωματιδίων. Οι εργαστηριακοί έλεγχοι των εξορυκτικών αποβλήτων συχνά περιορίζονται για να αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια την πιθανή υλική μεταβλητότητα μεγάλου όγκου αποβλήτων υπό διάφορες συνθήκες φόρτωσης. Επομένως, η διατμητική αντοχή των αποβλήτων αυτών, για σκοπούς σχεδιασμού και ανάλυσης, πρέπει συχνά να εκτιμάται με βάση ποικίλες τιμές που εισάγονται, συμπεριλαμβανομένων των τρεχόντων εργαστηριακών αποτελεσμάτων, της προηγούμενης εμπειρίας, της συμπεριφοράς παρόμοιων υλικών και της δημοσιευμένης βιβλιογραφίας (Orman et al. 2011).



## **B) Διατμητική αντοχή και θεμελίωση**

Επιπλέον, η διατμητική αντοχή και το πάχος του εδάφους θεμελίωσης είναι σημαντικές παράμετροι για τη σταθερότητα του πρανούς. Η διαπερατότητα του υλικού θεμελίωσης επηρεάζει τη δημιουργία πιέσεων των πόρων στο θεμέλιο, λόγω ύπαρξης νερού, επηρεάζοντας έτσι τη σταθερότητα της απόρριψης και περιορίζοντας τον επιτρεπόμενο ρυθμό απόρριψης. Τα θεμέλια που αποτελούνται από χαμηλής πλαστικότητας και αργιλικά εδάφη είναι αυτά που εμφανίζουν κατά κύριο λόγο επιφάνειες διατμητικής αστοχίας. Η υπερβολική αλλοίωση θα μπορούσε να έχει σοβαρές επιπτώσεις όσον αφορά το σύστημα επένδυσης και συλλογής σε περίπτωση πασσάλων απόπλυσης σωρού και γενικά αστοχίας σωρών (Orman et al. 2011).

### **2.3.1.3 Σχεδιαστικά ζητήματα**

Όλες οι απορρίψεις αποβλήτων ενέχουν κάποιο κίνδυνο αστάθειας, είτε λόγω του ανεπαρκούς σχεδιασμού είτε λόγω της απρόβλεπτης μεταβλητότητας των υποτιθέμενων παραμέτρων. Το ζήτημα της αντιμετώπισης της αβεβαιότητας στο γεωτεχνικό σχεδιασμό έχει συζητηθεί σε βάθος. Για τις τοποθεσίες ορυχείων, πραγματοποιούνται συνήθως σημαντικές επενδύσεις στην εξερεύνηση και την εκτίμηση των ορυκτών πόρων. Ωστόσο, στις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους και των πετρωμάτων που σχετίζονται με τη σταθερότητα των πρανών δίνεται λιγότερη έμφαση. Οι Baecher και Christian παρατήρησαν ότι οι τομείς της γεωτεχνικής μέριμνας, όπως τα πρανή και οι εγκαταστάσεις διάθεσης αποβλήτων, συνήθως συνδέονται με το κόστος των ορυκτών, και παρά τα έσοδα τους, αφιερώνονται σημαντικά λιγότερα χρήματα για τον χαρακτηρισμό της τοποθεσίας τους και τις εργαστηριακές δοκιμές (Baecher and Christian 2003). Επίσης κατά τον σχεδιασμό, μπορούν να αγνοηθούν οι αβεβαιότητες που εμπλέκονται σε ένα σχέδιο, να ακολουθηθεί μια συντηρητική προσέγγιση ή ακόμα ο σχεδιασμός να βασιστεί σε μεθόδους παρατήρησης ή στην ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας. Γενικά, τα γεωτεχνικά σχέδια μπορεί να περιλαμβάνουν συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων (Orman et al. 2011).

## **A) Συντελεστής Ασφαλείας**

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος που ακολουθείται για τη συντηρητική προσέγγιση σχεδιασμού είναι η απαίτηση για ένα ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας (FS) για την αστοχία του πρανούς. Ο ελάχιστος FS που έχει επιλεγεί για σχεδιασμό επιτρέπει κάποιο περιθώριο σφάλματος μεταξύ των υποτιθέμενων συνθηκών και εκείνων που υπάρχουν πραγματικά στο πεδίο, και θα πρέπει να λάβει υπόψη τα ακόλουθα, όπως σκιαγραφείται από τον Vandre 1980):

- Τις συνέπειες της αστάθειας
- Τη λεπτομέρεια της γεωτεχνικής έρευνας
- Την αξιοπιστία των υποθέσεων σχεδιασμού
- Την ικανότητα πρόβλεψης δυσμενών συνθηκών

- Τις πιθανές κατασκευαστικές αποκλίσεις από τον σχεδιασμό
- Την τεχνική κρίση με βάση τη προηγούμενη εμπειρία

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται τόσο για κανονικές συνθήκες φόρτωσης όσο και για σεισμική φόρτωση όταν το έργο βρίσκεται σε μια σεισμικά ενεργή περιοχή. Γενικά, ένας ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας (FS) από 1,3 (για ρηχές αστοχίες) έως 1,5 (για πιο σημαντικές αστοχίες) θεωρείται αποδεκτός για μακροπρόθεσμες (στατικές) συνθήκες. Ο συντελεστής ασφαλείας που απαιτείται για ακραίες αντίξοες συνθήκες, όπως ο σχεδιασμός σεισμικής εκδήλωσης ή προσωρινά πρηνή, είναι συνήθως χαμηλότερος από αυτόν που απαιτείται για τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα των τελικών πρηνών αποβλήτων και ένα εύρος τιμών από 1,1 έως 1,3 είναι γενικά αποδεκτό (Orman et al. 2011).

Ο κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας ή η πιθανότητα αστοχίας ενός αναχώματος αποβλήτων πετρωμάτων εξαρτάται από τους συντελεστές διακύμανσης των παραμέτρων αντοχής (η συνοχή δείχνει σημαντικά μεγαλύτερη διακύμανση από τη γωνία εσωτερικής τριβής), την πυκνότητα των εξορυκτικών απορριμμάτων (που δείχνει σχετικά μικρή διακύμανση) και το αποδεκτό ποσοστό αποτυχίας. Ένα τέτοιο ποσοστό αστοχίας μπορεί να είναι το 1 / 10.000 του εμβαδού των πρηνών αποβλήτων πετρωμάτων. Ωστόσο, το αποδεκτό ποσοστό αστοχίας και ο κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας εξαρτώνται επίσης από τις συνέπειες της αποτυχίας, συμπεριλαμβανομένης της πιθανής απώλειας ζωής, της ζημιάς στην υποδομή και της απώλειας λειτουργίας, τόσο εντός όσο και εκτός της μίσθωσης. Γενικά, τα πρηνή αποβλήτων που έχουν σχεδιαστεί με συντελεστή ασφαλείας από 1,10 έως 1,15 έχουν μικρό κίνδυνο αστοχίας (Khandelwal and Mozumdar 1992; Miller et al. 1979). Τα πρηνή αποβλήτων που έχουν σχεδιαστεί για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 1,10 υπόκεινται σε μεγαλύτερο κίνδυνο, ακόμη και αν τα δεδομένα που εισάγονται είναι ακριβή, λόγω της μεταβλητότητας στο ύψος του πρηνούς ή της αντοχής του υλικού των αποβλήτων ή της θεμελίωσης. Αυτές οι συνθήκες μπορεί να οδηγήσουν σε τοπικές διακυμάνσεις περίπου 10% στον συντελεστή ασφαλείας, αφήνοντας μικρό περιθώριο ασφαλείας. Πιο συγκεκριμένα, η αρχική αστοχία μιας πλαγιάς που αποτελείται από χαλαρά πετρώματα διέπεται από την κανονικά στερεοποιημένη γωνία τριβής του υλικού. Ωστόσο, τα στρώματα των αποβλήτων που εκτίθενται λόγω αστοχίας είναι υπερβολικά στερεοποιημένα. Κατά συνέπεια, μετά την αρχική αστοχία, η γωνία διαστολής του υλικού καθίσταται σημαντική επιρροή στον παράγοντα ασφαλείας της εκτεθειμένης αστοχίας. Η σταθερότητα ενισχύεται μετά την εκάστοτε αστοχία (Hustrulid et al. 2001).

## **B. Αξιοπιστία**

Για σημαντικές κατασκευές, όπως οι σωροί εξορυκτικών απορριμμάτων και απόπλυσης σωρού, είναι ζωτικής σημασίας, τα στοιχεία αβεβαιότητας, στην ανάλυση της σταθερότητας να αναγνωρίζονται νωρίς και να λαμβάνονται υπόψη στη συνολική προσέγγιση του σχεδιασμού. Όπως με οποιοδήποτε έργο, τα οικονομικά και άλλοι

φυσικοί περιορισμοί όπως ο περιορισμός χώρου δεν επιτρέπουν πάντα έναν υπερβολικά στιβαρό σχεδιασμό. Σε μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας και της παροχής ενός βαθμού εμπιστοσύνης στην ασφάλεια και την αξιοπιστία ενός σχεδιασμού, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί οι πιθανοτικές μέθοδοι που συναντώνται σε πολλά πακέτα λογισμικών που έχουν σχέση με ευστάθεια πρηνών. Οι μέθοδοι αξιοπιστίας χρησιμοποιούνται συχνά στο σχεδιασμό των πλαγιών ανοικτών ορυχείων, αλλά όχι τόσο συχνά στον σχεδιασμό των επιφανειών απόπλυσης σωρών και των εξορυκτικών αποβλήτων. Όπως γίνεται αντιληπτό, είναι απαραίτητο κατά την επιλογή των κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους εισαγωγής της ανάλυσης σταθερότητας, το επίπεδο αβεβαιότητας στα δεδομένα και οι παραδοχές που γίνονται, να προσδιορίζονται και να λαμβάνονται υπόψη με σαφήνεια στον σχεδιασμό (Orman et al. 2011).

### **Γ. Απλοποιημένες αναλύσεις παραμόρφωσης**

Για την αξιολόγηση των σεισμικά προκληθέντων παραμορφώσεων, μπορούν να πραγματοποιηθούν αναλύσεις. Η μέθοδος ψευδοστατικής ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης απόδοσης της ολισθαίνουσας μάζας. Αυτή η επιτάχυνση της απόδοσης μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί σε απλουστευμένες διαδικασίες για την εκτίμηση παραμορφώσεων που προκαλούνται από σειμούς.

Ο προσδιορισμός των αποδεκτών ορίων παραμόρφωσης μπορεί να εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως κανονισμούς, τεχνική κρίση, προηγούμενη εμπειρία και αποδεκτό κίνδυνο. Συνοπτικά, η αστοχία της κλίσης μπορεί να συμβεί σε απορρίψεις αποβλήτων με μια ποικιλία τρόπων αστοχίας, που περιλαμβάνουν καθίζηση της επιφάνειας ή των άκρων, αβαθείς ρέουσες ολισθήσεις, περιστροφικές κυκλικές αστοχίες, αστοχία της βάσης, μετατόπιση άκαμπτου σώματος και ρευστοποίηση. Στους σωρούς με επένδυση από γεωμεμβράνη, οι ολισθήσεις συμβαίνουν συνήθως με αστοχία σφήνας κατά μήκος της κρίσιμης διεπαφής του συστήματος επένδυσης. Κατά την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανάλυσης για αυτούς τους πιθανούς τρόπους αστοχίας, καθώς και κατά την επιλογή παραμέτρων εισαγωγής για τα υλικά απορρίψεων και την θεμελίωση, πρέπει να χρησιμοποιείται η τεχνική κρίση και η εμπειρία των μηχανικών. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης της σταθερότητας εξαρτάται από το εάν οι παραδοχές σχεδιασμού είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών συνθηκών απόρριψης αποβλήτων (Orman et al. 2011).

### **2.3.2 Καθιζήσεις**

Οι καθιζήσεις που λαμβάνουν χώρα σε σωρούς αποβλήτων οφείλονται στον επαναπροσανατολισμό των σωματιδίων, στη διάβρωση των υλικών με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο, στην εξασθένιση της συγκόλλησης μεταξύ σωματιδίων λόγω του νερού και της μεταφοράς λεπτών σωματιδίων μέσω του σωρού (Williams

2000). Ο ρυθμός καθίζησης επηρεάζεται από το ύψος απορρίψεων, το ρυθμό φόρτωσης, τη θέση εντός του σωρού και τον τύπο του υλικού (Zavodni et al. 1981). Οι καθιζήσεις είναι πιο προβλέψιμες και συνήθως μικρότερες σε στρώματα απόρριψης από ό,τι σε επιχωματώσεις. Κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης των αποβλήτων, μπορεί να συμβεί αρχικά αυτοκαύση ή μπορεί να συμβεί καθίζηση κορυφών λόγω συμπίεσης ή επιφανειακής απόρριψης λόγω υπερβολικής κλίσης. Μετά την τοποθέτηση των απορριμμάτων, η πρωτογενής καθίζηση και η καθίζηση ερπυσμού εμφανίζονται με μειωμένο ρυθμό με την πάροδο του χρόνου και έχει αποδειχθεί ότι συνεχίζουν για περισσότερα από 10 χρόνια μετά την κατασκευή των σωρών απορριμμάτων (Williams 2000). Η πλειονότητα των καθιζήσεων, ωστόσο, συμβαίνει μέσα στους πρώτους μήνες μετά την κατασκευή (Zavodni et al. 1981). Καθώς τα υλικά απόρριψης γίνονται κορεσμένα, υπάρχει μια μείωση της αντοχής και μπορεί να συμβεί καθίζηση κατάρρευσης (Williams 2000), ειδικά σε χαλαρούς σωρούς απορριμμάτων. Η πιθανότητα κατάρρευσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με επαρκή συμπίκνωση (Vandre 1980). Σε ξηρές συνθήκες, συνήθως έχουν αναφερθεί καθιζήσεις από 0,3% έως 7% του ύψους των σωρών απορριμμάτων (Naderian and Williams 1996). Ωστόσο, έχουν τεκμηριωθεί και καθιζήσεις άνω του 20% του συνολικού ύψους απορρίψεων (Zavodni et al. 1981). Οι τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων των σωρών αυτών με τον χρόνο ποικίλουν. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν επιτόπιες επιθεωρήσεις, έρευνα, φωτογραμμετρία, κελιά καθίζησης, και λέιζερ (McCarter 1985b). Οι κατάλληλες μέθοδοι παρακολούθησης επιλέγονται με βάση το ύψος, το υλικό και τη μέθοδο κατασκευής αποβλήτων (Orman et al. 2011).

### **2.3.3 Ροή νερού και στράγγιση σωρών αποβλήτων**

Οι εγκαταστάσεις διάθεσης αποβλήτων πρέπει να είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να είναι καλά στραγγιζόμενες. Οι ίδιες θεμελιώδεις αρχές διήθησης που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό των φραγμάτων γης και των αναχωμάτων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και στον σχεδιασμό των σωρών αποβλήτων και των εγκαταστάσεων αποθήκευσης απορριμμάτων. Η κατανόηση της ροής υγρών μέσω απορρίψεων αποβλήτων είναι σημαντική για την αξιολόγηση τόσο της σταθερότητας όσο και των περιβαλλοντικών κινδύνων.

#### **Διήθηση και Αποστράγγιση**

Τα περισσότερα εξορυκτικά απόβλητα και οι σωροί απόπλυσης είναι συνήθως ακόρεστα και η ακριβής προβολή της διήθησης και μεταφοράς ρύπων απαιτεί τον προσδιορισμό των ακόρεστων ιδιοτήτων του εδάφους. Ωστόσο, η συμπεριφορά του ακόρεστου εδάφους είναι λιγότερο υποβαθμισμένη από την κορεσμένη συμπεριφορά και οι ακόρεστες ιδιότητες και η απεικόνιση της ροής δεν περιλαμβάνονται πάντα ως μέρος του σχεδιασμού απορρίψεων αποβλήτων και απόπλυσης σωρών. Στην πραγματικότητα, οι περισσότεροι υπολογισμοί γεωτεχνικής

ηλικίας διήθησης βασίζονται σε κορεσμένα εδάφη. Οι παράμετροι του εδάφους που χρησιμοποιούνται για την προβολή της ακόρεστης ροής προέρχονται από μη γραμμικές εξισώσεις χρησιμοποιώντας δεδομένα εργαστηριακών δοκιμών και αναφέρονται γενικά ως λειτουργία υδραυλικής αγωγιμότητας και λειτουργία αποθήκευσης νερού. Η λειτουργία υδραυλικής αγωγιμότητας (HCF) αντιπροσωπεύει την αγωγιμότητα του ακόρεστου υλικού σε διάφορες περιεκτικότητες νερού. Το HCF μπορεί να μετρηθεί στο εργαστήριο ή να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τις μεθόδους των Brooks και Corey (1964), van Genuchten (1980), Campbell (1973), και Fredlund και Xing (1994). Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα αντιπροσωπεύει την οριακή κατάσταση για ακόρεστη ροή και γενικά μετράται ως έχει στο εργαστήριο. Ωστόσο, εάν τα εργαστηριακά δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα, υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την εκτίμηση της ονομαστικής υδραυλικής αγωγιμότητας ενός υλικού έμμεσα. Οι φόρμουλες συνήθως συνδέουν την υδραυλική αγωγιμότητα με την κατανομή μεγέθους κόκκων του υλικού. Τα στοιχεία σχεδιασμού και κατασκευής μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη διήθηση και την αποστράγγιση μέσω των απορρίψεων αποβλήτων. Η άνω επιφάνεια της απόρριψης αποβλήτων πρέπει να διαβαθμίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτρέπεται η ροή των επιφανειακών υδάτων στις πλαγιές. Όταν απορρίπτεται απόβλητο πέτρωμα, τα χονδροειδή σωματίδια που εναποτίθενται στον πυθμένα της απορρίψεως ως αποτέλεσμα του φυσικού διαχωρισμού μπορούν να σχηματίσουν επαρκή αποστράγγιση σε πολλές περιπτώσεις. Ανάλογα με τις τοπογραφικές λεπτομέρειες, τέτοια τμήματα αποστράγγισης σωρού μπορεί να είναι σημαντικά μεγάλα και ένα χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της ροής, ειδικά σε μέρη όπως στο βαθύτερο σημείο των κοιλάδων όπου ήδη διέρχεται μια κοίτη. Ωστόσο, εάν υπάρχουν πηγές στην τοποθεσία, τότε πρέπει να εγκατασταθούν συγκεκριμένα υποβρύχια στραγγιστήρια ώστε να στραγγίζονται οι πηγές αυτές υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Εάν ξεπεραστεί η ικανότητα ροής της αποχέτευσης, η φρεατική επιφάνεια μπορεί να αυξηθεί, μειώνοντας τη σταθερότητα της απόρριψης αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, η θέση της φρεατικής επιφάνειας σε ένα ανάχωμα πετρωμάτων εξαρτάται από τη χρήση στην οποία τοποθετείται το ανάχωμα και από κάθε ζώνη των δομικών υλικών. Όταν η στάθμη του νερού στην ανάντη όψη του αναχώματος είναι χαμηλή ή διατηρείται σε χαμηλό επίπεδο με τη συμπερίληψη αποχέτευσης εντός του αναχώματος, η φρεατική επιφάνεια θα είναι χαμηλή και θα έχει μικρή επίδραση στη σταθερότητα του αναχώματος. Από την άλλη πλευρά, όπου η στάθμη του νερού έναντι της ανάντη όψης του αναχώματος είναι υψηλή, η φρεατική επιφάνεια θα είναι υψηλή και θα έχει ουσιαστική επίδραση στη σταθερότητα του αναχώματος. Ως εκ τούτου, η κατανόηση της υδραυλικής συμπεριφοράς των αποχετεύσεων πετρωμάτων είναι σημαντική για τον σχεδιασμό απορρίψεων αποβλήτων. Στους σωρούς απόπλυσης, ένα σωστά σχεδιασμένο και λειτουργικό σύστημα συλλογής και επένδυσης είναι κρίσιμο για την ανάκτηση του διαλύματος έκπλυσης, καθώς και για τον έλεγχο των επιπέδων φρεατικής επιφάνειας μέσα στο σωρό. Τέλος, σημαντικό είναι η θεμελίωση

του αναχώματος να επιλέγεται ώστε να παρέχει επαρκή αντοχή και χαμηλή διαπερατότητα. Η σωστή επιλογή θα πρέπει να εξαλείψει την αποτυχία θεμελίωσης και την εκτέλεση μεγάλης διαρροής θεμελίων (Daniel 1993, Hustrulid et al. 2001, Orman et al. 2011).

### **2.3.4 Διάβρωση**

Η διάβρωση είναι μια φυσική διαδικασία που δεν μπορεί να σταματήσει αλλά μπορεί να ελεγχθεί. Η πιθανότητα διάβρωσης του εδάφους εξαρτάται από τις ιδιότητες του, τη γωνία και το μήκος της κλίσης, μεταξύ άλλων παραγόντων. Η γωνία του πρανού και το μήκος του καθορίζονται στον σχεδιασμό της συνολικής μορφής της γης. Η διάβρωση υλικού που στοιβάζεται υπό γωνία μπορεί να είναι επικίνδυνη, λόγω της αστοχίας του, της καταστροφικής καθοδικής κίνησης, της καθίζησης και της ρύπανσης των κατάντη υδάτων, των ρεμάτων και των ποταμών, καταστρέφοντας έτσι τους βιότοπους υδρόβιων οργανισμών και ενδεχομένως επηρεάζοντας τη χρήση νερού για οικιακούς σκοπούς και άρδευση. Η ανάκτηση και το κλείσιμο σωρών συνήθως απαιτεί την μείωση της κλίσης και την ανάπτυξη της βλάστησης. Και οι δύο αυτές μέθοδοι μειώνουν σημαντικά τη διάβρωση. Ωστόσο, περαιτέρω προστασία από τη διάβρωση μπορεί να παρέχεται από διάφορα μέτρα που έχουν σχεδιαστεί για την προστασία από την πρόσκρουση της βροχής ή για τη διακοπή της επιφανειακής ροής. Προστασία από την πρόσκρουση της βροχής μπορεί να παρέχεται χρησιμοποιώντας χαλίκι ή φυτικό κάλυμμα, ή με την τοποθέτηση ενός αποικοδομήσιμου υφάσματος όπως το δίχτυ από γιούτα. Γενικώς κάποια από τα μέτρα αυτά, παρέχουν μόνο προσωρινή προστασία από τη διάβρωση. Η επιλογή θα εξαρτηθεί από την τοπική διαθεσιμότητα κατάλληλων υλικών, το κόστος εργασίας και τον απαιτούμενο χρόνο για τη δημιουργία κάλυψης επαρκούς βλάστησης για τον μακροπρόθεσμο έλεγχο της διάβρωσης. Η απόσταση μεταξύ των εργασιών για τη διακοπή της επιφανειακής ροής εξαρτάται κυρίως από τη γωνία κλίσης. Η απόσταση μπορεί να αυξηθεί εάν το επιφανειακό έδαφος είναι πολύ χαλικώδες ή πετρώδες. Μεγάλες χωματερές, αναχώματα ή σωροί έχουν σχεδιαστεί για να ελέγχουν και να συλλέγουν την απορροή και να αποτρέπουν την αστοχία του υλικού. Η τελική αποκατεστημένη μορφή είναι επίσης σημαντικό στοιχείο για τον μακροπρόθεσμο έλεγχο της διάβρωσης. Είναι πολύ πιο εύκολο και λιγότερο δαπανηρό να αποφεύγεται η ρύπανση πριν εμφανιστεί από το να καθαριστεί αργότερα. Εξαιτίας αυτού, οι ρυθμιστικές αρχές και η βιομηχανία σχεδιάζουν εγκαταστάσεις που να μειώνουν τις πιθανότητες επιβλαβών επιπτώσεων στο περιβάλλον εξαρχής. Το δυναμικό διάβρωσης των αποβλήτων πρέπει να χαρακτηρίζεται και όπου είναι δυνατόν, το υλικό με υψηλότερο δυναμικό διάβρωσης πρέπει να καλύπτεται με υλικό που έχει χαμηλότερο δυναμικό διάβρωσης (Spitz and Trudinger 2008, Orman et al. 2011).

## 2.4 Σημασία και ρόλος κλίσης σωρών απόθεσης

Η κλίση των σωρών απόθεσης εξορυκτικών αποβλήτων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την ευστάθεια του σωρού. Πιο συγκεκριμένα, η εμπειρία δείχνει ότι κλίσεις θεμελίωσης πιο απότομες από 25° συνήθως οδηγούν σε χαμηλότερους παράγοντες ασφάλειας για την ευστάθεια του πρανούς. Από την άλλη, τοπογραφικά χαρακτηριστικά που παρέχουν πλευρική στήριξη ή στήριξη του πόδα βελτιώνουν τη σταθερότητα του σωρού αποβλήτων. Επιπλέον, όταν η γωνία ανάπαυσης του υλικού για τα εξορυκτικά απόβλητα κυμαίνεται μεταξύ των 35 ° με 40 °, δηλαδή σχηματίζουν απότομες πλαγιές, τότε ο παράγοντας ασφάλειας για την κλίση ενός σωρού αποβλήτων με τελική απόρριψη είναι κοντά στο 1,0. Στην περίπτωση κατασκευής σωρών αποβλήτων με στρώσεις υπάρχει η δυνατότητα διατήρησης ενός υψηλότερου συντελεστή ασφάλειας, επειδή κατασκευάζονται με πιο ελεγχόμενο τρόπο από κάτω προς τα πάνω. Οι αναλύσεις σταθερότητας πρανών χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης συνολικής γωνίας κλίσης, συμπεριλαμβανομένων των στρώσεων, για τη διατήρηση σταθερών συνθηκών κλίσης στο προγραμματισμένο απόλυτο ύψος απορρίψεων (Breitenbach 2004). Μάλιστα οι Smith και Giroud (2000) εξέτασαν την επίδραση της κατεύθυνσης τοποθέτησης μεταλλεύματος στη σταθερότητα ενός στρώματος απόπλυσης σωρού με επένδυση από γεωμεμβράνη και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η συσσώρευση μεταλλεύματος στην κατεύθυνση προς τα κάτω κλίσης έχει ως αποτέλεσμα μια λιγότερο σταθερή δομή από ότι η στοίβαξη στην κατεύθυνση προς τα πάνω (Orman et al. 2011).

## 2.5 Εξορυκτικά απόβλητα και προβληματισμοί

Οι ανησυχίες για την αποθήκευση των εξορυκτικών αποβλήτων μπορούν να διαχωριστούν στις 3 κάτωθι κατηγορίες:

A) Γεωτεχνικές ανησυχίες : Μπορούν να δημιουργηθούν συμβατικές γεωτεχνικές ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια και τη διατηρητική σταθερότητα των πρανών καθώς και την εγκατάσταση αποθηκών αποβλήτων ή κατακρημνίσεων.

B) Περιβαλλοντικές ανησυχίες: Μπορούν να δημιουργηθούν ανησυχίες σχετικές με τη διάβρωση της επιφάνειας και τη μεταφορά ρύπανσης, τόσο ατμοσφαιρικής, όσο, της ρύπανσης μέσω επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από αποχετεύσεις ορυχείων οξέος και ή από σωρούς έκπλυσης μεταλλεύματος.

Γ) Ανησυχίες των τοπικών κοινοτήτων: Οι τοπικές κοινωνίες κυριεύονται από τον φόβο για δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, στην ποιότητα ζωής, στις καλλιέργειες και στην αξία της επένδυσής τους σε ακίνητα και γη, που προκύπτουν από την εγγύτητα μιας εγκατάστασης αποθήκευσης εξορυκτικών απορριμμάτων .

Η σχετική σημασία και η σοβαρότητα των διαφόρων γεωτεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών προβλημάτων ποικίλλει ανάμεσα σε περιοχές με πλεόνασμα σε νερό

ή με έλλειψη νερού και σε ανεπτυγμένες ή αναπτυσσόμενες κοινωνίες. Συνοπτικά, μπορεί να αναφερθεί ότι οι γεωτεχνικές ανησυχίες των εγκαταστάσεων διάθεσης εξορυκτικών αποβλήτων, σχετίζονται με το χαρακτηρισμό των υλικών ως προς την διατμητική τους αντοχή και την κατασκευή αυτών των εγκαταστάσεων για μέγιστη οικονομία και αξιόπιστη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη σταθερότητα. Η πείρα διαδραματίζει μεγάλο ρόλο στον σχεδιασμό εγκαταστάσεων διάθεσης αποβλήτων (Daniel 1993, Blight 2010).



### 3 ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΟΠΛΙΣΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ

#### 3.1 Γεωσυνθετικά υλικά

Τα γεωπλέγματα ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των γεωσυνθετικών υλικών. Ως γεωσυνθετικά υλικά ορίζονται τα επίπεδα προϊόντα που κατασκευάζονται από πολυμερή υλικά και χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το έδαφος, βράχους ή άλλα υλικά που σχετίζονται με την γεωτεχνική μηχανική σαν αναπόσπαστο κομμάτι ενός έργου. Έτσι γεννήθηκε ο όρος γεωσυνθετικά υλικά. Γεω- αναφέρεται στο έδαφος και Συνθετικά – στον τρόπο παραγωγής των συγκεκριμένων υλικών στα εργοστάσια (Koerner 2012).

Οι προσπάθειες για την ενίσχυση των εδαφών χρονολογούνται από τον 20<sup>ο</sup> αιώνα. Η προσθήκη υλικών με στόχο την ενίσχυση του εδάφους και την αλλαγή της συμπεριφοράς του είχε γίνει αναμφίβολα πριν από τις πρώτες καταγραφές που υπάρχουν. Οι πρώτες επιχειρήσεις σταθεροποίησης έγιναν σε βάλτους με κορμούς δέντρων, θάμνους και άλλα παρεμφερή φυτά. Αυτά τα εδάφη δέχονταν τα ινώδη υλικά έως ότου η μάζα τους αποκτήσει ικανοποιητικές ιδιότητες μέχρι το επιθυμητό αποτέλεσμα. Παρόμοιες προσπάθειες σταθεροποίησης συνεχίστηκαν πιο συστηματικά, καθώς κορμοί παρομοίου μεταξύ τους μεγέθους περιδέονταν ώστε να δημιουργήσουν μια στρωματοειδή επιφάνεια. Παρόλα αυτά η αλλοίωση των ξύλων και του δεσίματος τους ήταν αναπόφευκτη με αποτέλεσμα το πρόβλημα να παραμένει άλυτο. Όλα άρχισαν να αλλάζουν όταν για την κατασκευή ενός αυτοκινητόδρομου χρησιμοποιήθηκε ύφασμα πάνω στο οποίο τοποθετήθηκε καυτή άσφαλτος και στην συνέχεια μια λεπτή στρώση άμμου. Όσο το ύφασμα ήταν σε καλή κατάσταση, τυχόν αστοχίες, ήταν μειωμένες. Αυτή η μελέτη μάλιστα αποτέλεσε την πρωτοπόρο των μεθόδων διαχωρισμού και ενίσχυσης με την χρήση γεωσυνθετικών υλικών, όπως τα ξέρουμε εμείς σήμερα. Οι επαγγελματικοί τομείς που επηρεάστηκαν κυρίως ήταν οι γεωτεχνικές, οι περιβαλλοντικές και οι υδραυλικές αναπτυσσόμενες κοινότητες μηχανικών. Συνεπώς, από όλα τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι τα γεωσυνθετικά είναι τα μηχανικά υλικά που μπορούν να εφαρμόζονται με ποικίλους τρόπους σε πολλών ειδών έργα (Koerner 2012).

Οι λόγοι της τόσο γρήγορης «ανάπτυξης» των γεωσυνθετικών υλικών παρατίθενται παρακάτω:

1. Μπορούν να αντικαταστήσουν παραδοσιακά υλικά, όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα, καθιστώντας ευκολότερη την κατασκευή έργων.
2. Κατασκευάζονται σε εργοστάσια, όπου και ελέγχεται η ποιότητα τους.

3. Μεταφέρονται και εγκαθίστανται εύκολα.
4. Η χρήση τους είναι απαραίτητη σύμφωνα με τους κανονισμούς σε κάποιες περιπτώσεις.
5. Το κόστος τους είναι χαμηλό.
6. Πολύ δύσκολοι σχεδιασμοί έχουν γίνει πραγματοποιήσιμοι.
7. Παράγονται συνεχώς και είναι ευρέως διαθέσιμα.
8. Η απόδοση τους και οι ιδιότητες τους είναι δοκιμασμένες και συνιστώνται ανεπιφύλακτα.

Τέλος τα γεωσυνθετικά υλικά εκτελούν 5 μεγάλες λειτουργίες : α) διαχωρισμό, β) ενίσχυση, γ) φιλτράρισμα, δ) αποστράγγιση και ε)περιορισμό(υγρού/αέριου) (Koerner 2012).

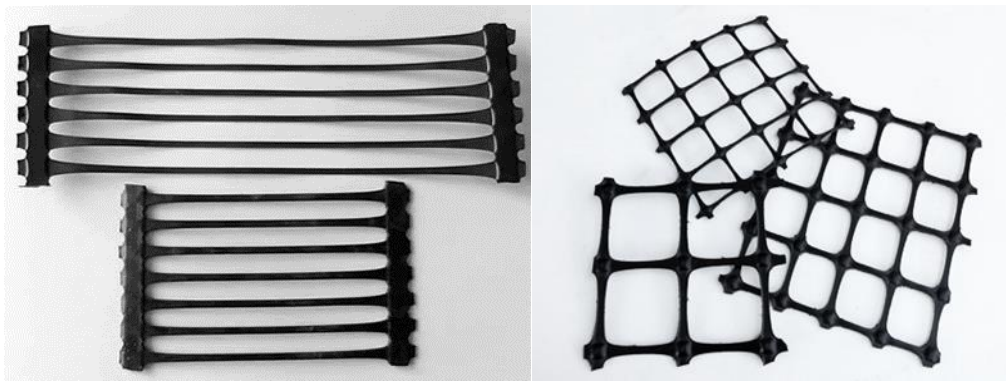
### **3.1.1 Γεωπλέγματα**

#### **Ορισμός και Είδη Γεωπλεγμάτων**

Τα γεωπλέγματα ορίζονται ως τα γεωσυνθετικά υλικά που αποτελούνται από συνδεδεμένα παράλληλα ζεύγη συνδεδεμένων στελεχών, με ανοίγματα ικανού μεγέθους, ώστε να παγιδεύουν το έδαφος, τα χαλίκια ή άλλα γεωυλικά.

Τα γεωπλέγματα χωρίζονται σε μονοαξονικά και διαξονικά. Σε εφαρμογές όπως, τοίχους και πρανή, όπου η διεύθυνση της μέγιστης τάσης είναι γνωστή, χρησιμοποιούνται μονοαξονικά ή μονοδιάστατα πλέγματα. Σε άλλες εφαρμογές όπου οι εφαρμοζόμενες τάσεις έρχονται από τυχαίες διευθύνσεις όπως σε θεμέλια και δρόμους, χρησιμοποιούνται διαξονικά πλέγματα.

Για την κατασκευή μονοαξονικών γεωπλεγμάτων χρησιμοποιείται υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE) και για την κατασκευή διαξονικών πολυπροπυλένιο (PP). Αυτό σημαίνει πως προβάλλουν αντίσταση στην προσβολή από οξέα, άλατα και αλκάλια που ενδεχομένως να περιέχονται στο έδαφος. Ίνες πολυεστέρα (PET) και σπανιότερα ίνες γυαλιού και νάιλον χρησιμοποιούνται για την παρασκευή κάποιου τύπου γεωπλέγματος, πιο όλκιμου σε σχέση με τα παραπάνω. Όλα τα γεωπλέγματα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής όταν βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, και διατηρούν τις μηχανικές ιδιότητές τους για δεκαετίες, ακόμα και όταν είναι εκτεθειμένα στο φως του ήλιου. Επιπλέον η μοριακή σύσταση του πολυμερούς, προσδίδει υψηλή αντοχή σε συγκεκριμένες διευθύνσεις φόρτισης και μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, κάτι που εξασφαλίζει υψηλή εφελκυστική αντοχή με μικρές παραμορφώσεις και με ταυτόχρονη μικρή τάση για ερπυσμό. Στις εικόνες που ακολουθούν δίνεται μία άποψη μονοαξονικών και διαξονικών γεωπλεγμάτων, ανάλογα με τη μορφή του κανάβου που σχηματίζουν τα διαμήκη με τα εγκάρσια μέλη των γεωπλεγμάτων. Οι πωλήσεις ανά τον κόσμο ανέρχονται σε 100.000.000 m<sup>2</sup> και είναι διαρκώς αυξανόμενες. Παραδείγματος χάριν, το 90% των τοίχων αντιστήριξης που κατασκευάστηκαν στην Βόρεια Αμερική το 1998 ενισχύθηκαν με γεωπλέγματα (Koerner 2012).



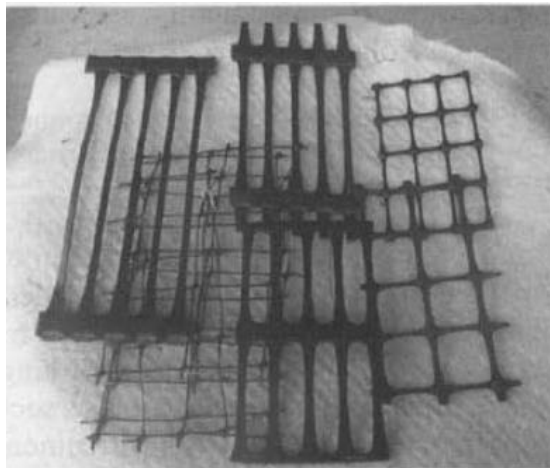
Εικόνα 3.1 Μονοαξονικά (αριστερά) και διαξονικά (δεξιά) γεωπλέγματα (διαδίκτυο)

### Γενικά στοιχεία

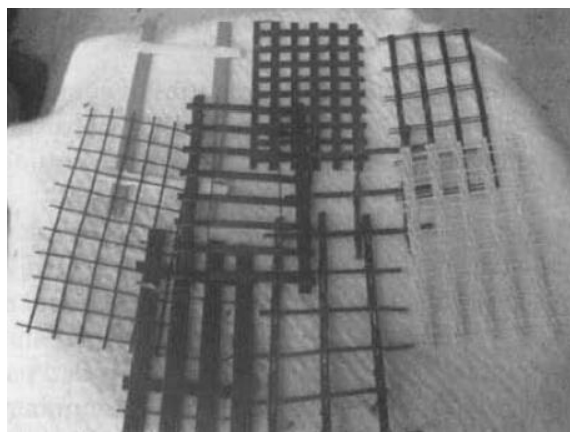
Η ανάπτυξη των μεθόδων κατασκευής, υψηλού συντελεστή πολυμερών υλικών, ενίσχυσε την πιθανότητα χρήσης τους ως ενισχυτικά μέσα εδαφών, σε τοίχους, απότομες πλαγιές και ως βάση σε οδικά δίκτυα. Το βασικό χαρακτηριστικό που πρέπει να διαθέτουν τα γεωπλέγματα είναι τα κενά μεταξύ των γειτονικών διαμήκων και εγκάρσιων στελεχών τους, ώστε να τους δίνεται η δυνατότητα αλληλεπίδρασης τους με το έδαφος. Τα στελέχη των γεωπλεγμάτων είναι πιο δύσκαμπτα σε σχέση με τις ίνες των γεωφασμάτων, για αυτό πρέπει, τόσο η αντοχή αυτών όσο και των ενώσεων τους να είναι μεγάλη, καθώς όταν το έδαφος παγιδεύεται στα μεγάλα κενά, το φορτίο όλο μεταφέρεται στους κόμβους.

Μετά από χρόνια διαφόρων πειραματισμών και εφαρμογών, η βιομηχανία οδηγήθηκε στην κατασκευή πολυεστερικών νηματοειδών γεωπλεγμάτων, με μηχανές πλέξης. Σε αυτή την διαδικασία χιλιάδες ίνες πλέκονταν μαζί ώστε να δημιουργήσουν πλέγματα τα οποία συνιστώνταν με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται τα κενά που αναφέραμε παραπάνω. Πολλές βιομηχανίες κατασκεύαζαν τέτοιου είδους γεωπλέγματα, ενώ αργότερα άρχισαν να κατασκευάζονται γεωπλέγματα με λέιζερ και να ενώνονται υπερηχητικά οι πολυεστερικές ράβδοι ή οι λωρίδες δημιουργώντας έτσι ένα πλέγμα (Koerner 2012).

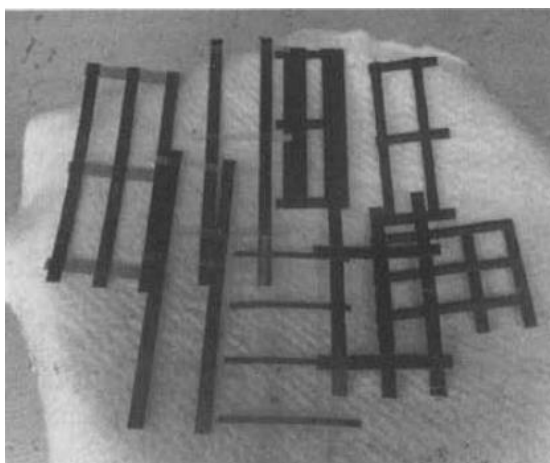
Στις κάτωθι εικόνες παρουσιάζονται τα 3 είδη γεωπλεγμάτων που υπάρχουν σήμερα διαθέσιμα στην αγορά:



Εικόνα 3.2 Ενοποιημένη πολυολεφίνη (Koerner 2012)



Εικόνα 3.3 Επικαλυμένα νήματα (Koerner 2012)



Εικόνα 3.4 Ράβδοι (ή λωρίδες) πολυεστέρα (Koerner 2012)

## 3.2 Χρήσεις γεωπλεγμάτων στην γεωτεχνική μηχανική

Το έδαφος όταν συνεργάζεται με τα γεωπλέγματα, αποκτά πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά αντοχής.

Τα γεωπλέγματα που κατασκευάζονται σήμερα, μπορούν να περιγραφούν ως υψηλής αντοχής και υψηλού συντελεστή με χαμηλή ευαισθησία σε ερπυσμό πολυμερή, των οποίων τα ανοίγματα λαμβάνουν τιμές από 10 έως 100 mm. Επίσης κάτω από συγκεκριμένες καταστάσεις, τα γεωπλέγματα μπορούν να λειτουργήσουν ως μέθοδος διαχωρισμού αλλά αυτό μόνο εάν έχουμε χονδρόκοκκα υλικά. Κατά κανόνα ισχύει πως τα γεωπλέγματα συμπεριλαμβάνονται ως κύρια λειτουργικά μέσα στην ενίσχυση και η χρήση τους έχει οδηγήσει στην βελτίωση της λειτουργίας πολλών κατασκευών αλλά και στην κατασκευή νέων. Η οπλισμένη με γεωπλέγματα γη είναι μια γρήγορη και ταυτόχρονα οικονομική μέθοδος κατασκευής επιχωμάτων, τοίχων αντιστήριξης, έργων οδοποιίας με ή χωρίς οδόστρωμα και θεμελιώσεων.

Παρακάτω παρατίθενται κάποιες από τις λειτουργίες τους (Koerner 2012):

- Ενισχυτικό μέσο σε λιθόστρωτους δρόμους
- Ενισχυτικό μέσο σε σιδηροδρόμους
- Ενισχυτικό μέσο σε υπερφορτωμένους σωρούς
- Ως μηχανικά σταθεροποιητικά γης για διάφορες κατασκευές τοίχων
- Ως περιμετρικοί τοίχοι που παρέχουν ενίσχυση
- Ως ενισχυτικό μέσο επιχωμάτων
- Ως ενισχυτικό μέσο για την ανακατασκευή πρανών και ολισθήσεων γης
- Ως συρματοκιβώτια για υποστήριξη στην κατασκευή τοίχων και γεφυρών
- Ως βασική ενίσχυση σε μαλακά εδάφη
- Ως βασική ενίσχυση σε ασβεστολιθικές περιοχές, κ.α.

### 3.2.1 Κατασκευές με γεωπλέγματα ως ενισχυτικό μέσο

#### Επιχώματα

Τα επιχώματα χαρακτηρίζονται από κλίση πρανούς μικρότερη από 70°. Τα γεωπλέγματα τοποθετούνται σε οριζόντιες στρώσεις μέσα στο εδαφικό υλικό και σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους. Έτσι η μεθοδολογία σχεδιασμού βασίζεται, όχι στην θεωρία των πλευρικών ωθήσεων του εδάφους, αλλά στην ανάλυση ευστάθειας του οπλισμένου πρανούς. Εάν το γεωσυνθετικό είναι επαρκώς πλατύ, μπορεί να τοποθετηθεί παράλληλα στην όψη του πρανούς και η κάθετη προς την ύφανση διεύθυνση θα πρέπει να αναλάβει την μέγιστη κύρια τάση. Εάν όμως το πλάτος του δεν είναι επαρκές, και παρ'όλα αυτά θα πρέπει να τοποθετηθεί παράλληλα στην πρόσοψη του επιχώματος τότε απαιτούνται ειδικές ραφές με την ταυτόχρονη εισαγωγή μειωτικού συντελεστή στην εκτίμηση της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής,  $T_{allow}$ . Στην περίπτωση που το γεωσυνθετικό θα τοποθετηθεί

κάθετα στην πρόσοψη του πρανούς, τότε η διεύθυνση ύφανσης αναλαμβάνει την κύρια τάση (Koerner 2012).

### **Τοίχοι αντιστήριξης**

Οι συμβατικοί τοίχοι βαρύτητας, αποτελούμενοι από σκυρόδεμα, χρησιμοποιούνται με επιτυχία εδώ και πολλούς αιώνες και έχουν την ιδιότητα να αντιστέκονται στις πλευρικές ωθήσεις του εδάφους με την βοήθεια της μεγάλης μάζας τους. Ήδη από την δεκαετία του 1960 εφαρμόζεται μία νέα μέθοδος κατασκευής τοίχων αντιστήριξης με χρήση γεωσυνθετικών υλικών, μεταλλικών λωρίδων και άλλων υλικών ενίσχυσης, τα οποία τοποθετούνται σε οριζόντιες στρώσεις μέσα στο έδαφος και οι άκρες τους αναδιπλώνονται με στόχο την διαμόρφωση της όψης τους και την αγκύρωση αυτής (ειδικώς τα γεωυφάσματα). Το περιβάλλον έδαφος δημιουργεί πλευρικές ωθήσεις ενώ ταυτόχρονα αλληλεπιδρά με τα υλικά όπλισης και αντιστέκεται σε αυτές. Με άλλα λόγια, η ενίσχυση λειτουργεί ως ένας εσωτερικός πλευρικός περιορισμός οποίος επιτρέπει στο έδαφος την κινητοποίηση διατμητικής αντίστασης. Η ενίσχυση δηλαδή περιορίζει τις παραμορφώσεις λόγω της τριβής που αναπτύσσεται εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με το έδαφος. Βέβαια οι πλευρικές τάσεις μεγαλύτερες της εφελκυστικής αντοχής των γεωπλεγμάτων, που εν προκειμένω μας ενδιαφέρουν, οδηγούν σε αστοχία της ίδιας της ενίσχυσης. Είναι φανερό ότι οι οπλισμένοι τοίχοι που προκύπτουν είναι πιο παραμορφώσιμοι συγκρινόμενοι με τους τοίχους βαρύτητας και έχουν πολλά πλεονεκτήματα συμπεριλαμβανομένου και του χαμηλότερου κόστους κατασκευής (Koerner 2012).

### **Οδοποιία χωρίς οδόστρωμα**

Με τον όρο "οδοποιία χωρίς οδόστρωμα" εννοείται τοποθέτηση ποσότητας γεωυλικών (άμμου ή χαλίκων) απευθείας επάνω σε ασθενή υπόβαση. Καμία μόνιμη προστατευτική επένδυση, όπως σκυρόδεμα ασφάλτου, δεν διαστρώνεται στην επιφάνεια των γεωυλικών. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 έγινε αποδεκτή η χρήση γεωπλεγμάτων σε έργα οδοποιίας αυτού του τύπου. Κατά το σχεδιασμό, πρωταρχική σημασία θα πρέπει να δίνεται στην πυκνότητα του συνόλου των διαστρωθέντων γεωυλικών που απαιτείται, όταν δεν γίνεται χρήση γεωσυνθετικών αλλά και όταν γίνεται. Κατ'αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η πυκνότητα και κατά συνέπεια το κόστος των γεωυλικών που εξοικονομούνται και συγκρίνεται με το κόστος του προς χρήση γεωσυνθετικού. Η ευεργετική επίδραση τους έγκειται στην ικανότητα παραμόρφωσής τους και κινητοποίησης των εφελκυστικών τους ιδιοτήτων, φαινόμενα που προκαλούνται εξαιτίας της καθίζησης του εδάφους λόγω των επιβαλλόμενων κυκλοφοριακών φορτίων. Στο εμπόριο διατίθενται πολλά είδη γεωυφασμάτων και γεωπλεγμάτων ικανά να χρησιμοποιηθούν σε έργα οδοποιίας. Μελέτες διαφόρων κατασκευαστών έχουν δείξει πως τα πιο βαριά και άκαμπτα είναι αυτά που οδηγούν σε μεγαλύτερες ποσότητες αποταμιευμένων γεωυλικών (Koerner 2012).

### Οδοποιία με οδόστρωμα

Στην περίπτωση έργων οδοποιίας στα οποία αναμένεται τελική διάστρωση με σκυρόδεμα ασφάλτου, τοποθέτηση γεωφασμάτων δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί σε εξαιρετικά παραμορφώσιμη υπόβαση, καθώς μία τέτοια ενέργεια θα έχει ως αποτέλεσμα την κατάρρευση του τμήματος του δρόμου ύστερα από την εφαρμογή μικρής επαναληψιμότητας κυκλοφορικών φορτίων. Ωστόσο, ένα γεωύφασμα πρέπει να παρουσιάσει σχετική παραμόρφωση ώστε να προσφέρει σε αντοχή, καθώς διαφορετικά παραμένει ανενεργό. Όσον αφορά στην χρήση γεωπλεγμάτων αντί για γεωυφάσματα, θα πρέπει να επισημανθεί ότι το μέγεθος του ανοίγματος μεταξύ των εγκαρσίων και διαμήκων μελών τους παρέχει ένα εξαιρετικό πλεονέκτημα. Στην προκειμένη περίπτωση το πλέγμα τοποθετείται μέσα στην μάζα του κοκκώδους υλικού βάσης (συνήθως θραυστού λατομείου) με στόχο την εισαγωγή ενός πλευρικού περιορισμού ο οποίος θα αντιστέκεται στην τάση των γεωυλικών να παραμορφωθούν οριζόντια υπό την επιρροή επαναλαμβανόμενων κατακόρυφων φορτίων (Koerner 2012).

### Θεμελιώσεις

Οι περιοχές κοντά σε ακτές ποταμών και θαλασσών αποτελούνται κυρίως από μαλακά χαλαρά εδάφη και δυστυχώς, είναι συνήθως στις περιοχές αυτές που χρησιμοποιούνται συχνότατα για την κατασκευή έργων Πολιτικού Μηχανικού. Η θεμελίωση τέτοιων έργων δεν μπορεί να είναι πάντα εφικτή σε μαλακά χαλαρά εδάφη όπως τα προαναφερθέντα. Μία μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι τοποθέτηση γεωφασμάτων ή γεωπλεγμάτων προς ενίσχυση του ασθενούς εδάφους του οποίου μάλιστα η διατμητική αντοχή πολλές φορές δεν υπερβαίνει τα 10KPa. Τα υφαντά γεωυφάσματα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, διακρίνονται από υψηλή διατμητική αντοχή, με τις τιμές αυτής να κυμαίνονται από 80 έως 700 KN/m. Αντίστοιχη ενίσχυση μπορεί να επιτευχθεί και με γεωπλέγματα (Koerner 2012).

## **3.3 Χαρακτηριστικά γεωπλεγμάτων**

### **3.3.1 Φυσικές ιδιότητες**

Κάποιες από τις φυσικές ιδιότητες των γεωπλεγμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των διαστάσεων των μελών, του τύπου της ένωσης τους, του μεγέθους των ανοιγμάτων και του πάχους τους μετρώνται απευθείας και με ακρίβεια. Άλλες ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες ιδιότητες είναι η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας που κυμαίνεται από 200 έως 1000 g/m<sup>2</sup>, και η ποσοστιαία ακάλυπτη περιοχή που κυμαίνεται από 40% έως 95% (Koerner 2012).

Άλλες σημαντικές ιδιότητές τους παρατίθενται παρακάτω :

**Πυκνότητα (Density)** : Εξαρτάται από το πολυμερές από το οποίο έχει κατασκευαστεί το πλέγμα. Τα ομογενή γεωπλέγματα είναι φτιαγμένα από HDPE (υψηλής πυκνότητας

πολυαιθυλένιο) ή PP (πολυπροπυλένιο) και η πυκνότητα μικρότερη την μονάδας. Γεωπλέγματα από PET(πολυεστέρας) έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη της μονάδας. (Koerner 2012).

**Ακαμψία Εκτός Επιπέδου (out-of-plane bending stiffness):** Προσδιορίζεται ποσοτικά μέσω της, πειραματικής διαδικασίας ASTM O1388. Η τιμή της ακαμψίας που προκύπτει, σχετίζεται με το βάρος του πλέγματος ή διαφορετικά με την μάζα ανά μονάδα επιφάνειας. Κάποιοι τύποι γεπλεγμάτων είναι αρκετά άκαμπτοι με τιμές που ξεπερνούν τα 1000 g-cm. Όταν η τιμή της ακαμψίας λυγισμού είναι κάτω των 1000 g-cm τότε το γεώπλεγμα χαρακτηρίζεται σχετικά ευλύγιστο-εύκαμπτο. Τα ενοποιημένα και δεμένα γεωπλέγματα είναι πιο δύσκαμπτα σε σχέση με τα εύκαμπτα υφαντά και πλεκτά νηματοειδή γεωπλέγματα (Koerner 2012).

**Δυστρεψία Εντός Επιπέδου (in-plane Torsional Stiffness):** Σταθερή ροπή εφαρμόζεται στο τετραγωνικό δείγμα διαξονικού πλέγματος και η γωνιακή περιστροφή που εφαρμόζεται ενάντια της αντίστασης του γεωπλέγματος μετράται. Το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται τα αποτελέσματα της αντίδρασης, για τα μεν δύσκαμπτα γεωπλέγματα είναι γραμμικό, ενώ για τα δε εύκαμπτα είναι ενώ η αντίσταση είναι αρχικά χαμηλή, μετά από 5° με 10° περιστροφή, η δύναμη αντίστασης αυξάνεται σημαντικά. Η δοκιμή αυτή κυρίως εφαρμόζεται σε διαξονικά πλέγματα σε μαλακό έδαφος θεμελίωσης (Koerner 2012).

### 3.3.2 Μηχανικές ιδιότητες

Στην παράγραφο αυτή, θα αναλυθούν οι μηχανικές ιδιότητες που σχετίζονται απευθείας με την λειτουργία που κυρίως καλούνται τα γεωπλέγματα να επιτελέσουν στη λειτουργία της ενίσχυσης.

#### Αντοχή Μεμονωμένου Στελέχους και Κόμβου (Single Rib and Junction Strength)

Για την αξιολόγηση της εφελκυστικής αντοχής ενός γεωπλέγματος, αρχικά εφαρμόζεται μια εφελκυστική δύναμη σε ένα μεμονωμένο στέλεχος, τέτοια που να το οδηγήσει τελικά σε αστοχία, ώστε να σημειωθεί η συμπεριφορά του. Στην συνέχεια εκτιμάται η αντοχή μεμονωμένου κόμβου μέσω της απομάκρυνσης ενός διαμήκους στελέχους μακριά από τον κόμβο. Αυτός, είναι πολύ σημαντικό να βρίσκεται σε απομόνωση καθώς έτσι δεν του ασκούνται ορθές τάσεις κατά την διάρκεια του πειράματος, κάθετα στην διεύθυνση του διαμήκους στελέχους (Koerner 2012).

#### Εφελκυστική αντοχή (Wide-Width Tensile Strength)

Η εφελκυστική αντοχή των γεωπλεγμάτων, είναι υψίστης σημασίας για τη χρήση τους ως μέσα όπλισης. Ορίζεται ως η μέγιστη εφελκυστική τάση την οποία μπορεί να αντέξει ένα δείγμα γεωπλέγματος μέχρι τη στιγμή της αστοχίας. Μέσω πειραματικής διαδικασίας, προκύπτει μέγιστη εφελκυστική τάση και μέγιστη παραμόρφωση. Είναι



σημαντικό να αναφερθούμε πως τα πειράματα διεξάγονται απουσίας εδαφικού υλικού (Koerner 2012).

### Διατμητική Αντοχή (Shear Strength)

Εφαρμόζεται συχνά ως έλεγχος σε γεωπλέγματα. Σε κάθε δοκιμή το πλέγμα είναι σταθεροποιημένο, ασκούνται ορθές τάσεις στην επιφάνειά του και του δίνεται ώθηση να ολισθήσει πάνω σε ακίνητο έδαφος. Με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυνάμεων τριβής στην διεπιφάνεια μεταξύ εδάφους και πλέγματος. Τελικά προκύπτει ένα γράφημα γνωστό και ως αστοχία της περιβάλλουσας Mohr-Coulomb. Από αυτή την γραφική παράσταση λαμβάνονται οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του γεωπλέγματος για συγκεκριμένο έδαφος. Αυτές είναι η συνοχή και η γωνία τριβής. Η έρευνα του Sarsby μελετά την επίδραση του ανοίγματος των γεωπλεγμάτων σε σχέση με το μέγεθος των εδαφικών σωματιδίων στον συντελεστή τριβής και η βέλτιστη μεταφορά διατμητικής τάσης-που αντιστοιχεί και στον μέγιστο συντελεστή τριβής-λαμβάνει χώρα όταν (Koerner 2012):

$$B_{GG} > 3.5d_{50} \quad (3.1)$$

(η σχέση αυτή παρουσιάζει μεγάλη χρησιμότητα για την επιλογή του εδαφικού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ως περιβάλλον έδαφος σε κάποιο γεώπλεγμα)

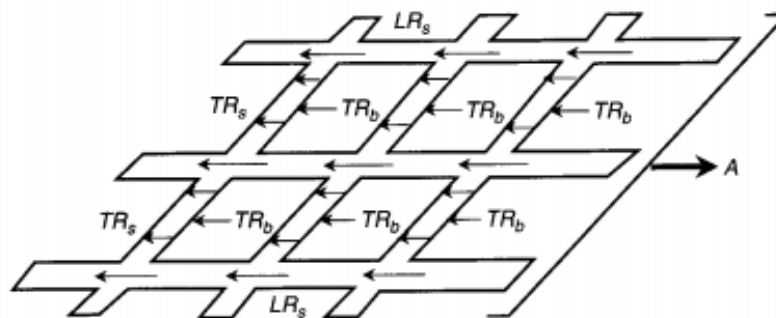
όπου:

$B_{GG}$  = το ελάχιστο πλάτος ανοίγματος ενός γεωπλέγματος

$d_{50}$  = το κατά μέσον όρο μέγεθος κόκκων εδάφους

### Αντοχή Αγκύρωσης (Anchorage Strength from Soil Pullout)

Η εγγενής αξία των γεωπλεγμάτων οφείλεται στη αντοχή αγκύρωσης ή στην αντίσταση εξόλκευσης που μπορεί να ξεπεράσει κατά πολύ την διατμητική αντοχή. Η δύναμη αγκύρωσης ή η αντίσταση σε εξόλκευση είναι αποτέλεσμα τριών διαφορετικών μηχανισμών. Ο πρώτος είναι η διατμητική δύναμη κατά μήκος του επάνω και κάτω μέρους των διαμήκων μελών του γεωπλέγματος (LRs). Ο δεύτερος είναι η συμβολή της διατμητικής δύναμης κατά μήκος του επάνω και κάτω μέρους των εγκάρσιων μελών του πλέγματος (TRs). Ο τρίτος είναι η παθητική αντίσταση στο μπροστινό τμήμα επίσης των εγκαρσίων μελών (TRb). Σε αυτόν τον μηχανισμό, το έδαφος υποβάλλεται σε μια παθητική κατάσταση αστοχίας και αντιστέκεται στην εξόλκευση, μέσω της φέρουσας ικανότητας του, που διαδραματίζει εξέχοντα ρόλο στην συνολική αντοχή αγκύρωσης ενός γεωπλέγματος (Koerner 2012).



A : Συνολική αντοχή αγκύρωσης/εξόλκευσης

LR<sub>s</sub> : Διατμητική αντοχή διαμήκους στελέχους

TR<sub>s</sub> : Διατμητική αντοχή εγκάρσιου στελέχους

TR<sub>b</sub> : Φέρουσα ικανότητα εγκάρσιου στελέχους

Εικόνα 3.5 Μηχανισμοί αντοχής αγκύρωσης γεωπλέγματος (Koerner 2012)

### Αγκύρωση λόγω Σύνδεσης με Φέρουσα Πανέλα (Anchorage Strength from Wall Connection)

Στην κατασκευή τοίχων αντιστήριξης με γεωπλέγματα, μπροστινή πλευρά των τοίχων ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση πανέλων, μηχανική ένωση αλλά και φέρουσα ικανότητα, σύνδεσης ενός γεωπλέγματος με την οποιαδήποτε προστατευτική επένδυση τοίχων πρέπει γενικώς να εκτιμάται (Koerner 2012).

#### **3.3.3 Ιδιότητες αντοχής (Endurance Properties)**

Αφού τα γεωσυνθετικά χρησιμοποιούνται, σε περιπτώσεις κρίσιμες, ως ενίσχυση, είναι σκόπιμο να γνωρίζουμε τις ιδιότητες της αντοχής τους και μέσα στον χρόνο.

#### **Πρόκληση βλάβης κατά τη τοποθέτηση**

Όπως με όλα τα συνθετικά, η τοποθέτηση γεωπλεγμάτων στο πεδίο απαιτεί σημαντικό βαθμό σχεδιασμού και φροντίδας. Πολύ συχνά μπορεί να δημιουργηθεί ζημιά στα γεωπλέγματα κατά την τοποθέτησή τους, εξαιτίας της απροσεξίας των υπευθύνων τοποθέτησης ή εξαιτίας της χρήσης βαριών μηχανημάτων. Άλλες αβεβαιότητες που μπορούν να εμφανιστούν είναι κάποιοι χονδροειδείς εδαφικοί σχηματισμοί που προσκρούοντας στο έδαφος μπορούν να βλάψουν τα πλέγματα καθώς και άλλου είδους ατυχήματα που μπορεί να προκύψουν πριν αυτά καλυφθούν. Προκειμένου να υπολογιστεί τι ποσοστό βλάβης προκαλείται κατά την λανθασμένη τοποθέτηση των γεωπλεγμάτων, έχουν διεξαχθεί μελέτες κατά τις οποίες γίνεται η εκταφή των γεωπλεγμάτων μετά την εγκατάστασή τους και η σύγκρισή τους με το αρχικό υλικό. Η βασικότερη διαπίστωση είναι ότι κατά την διαδικασία αυτή έχει χαθεί ένα ποσοστό της αντοχής τους. Πιο συγκεκριμένα, έρευνες έδειξαν ότι είναι δυνατή η μείωση της αντοχής τους από 0 έως 30%. Γενικά,

οι υψηλότερες τιμές απώλειας αντοχής προκύπτουν όταν χρησιμοποιούνται μεγάλα κακώς διαβαθμισμένα λατομικά αδρανή και βαρύς κατασκευαστικός εξοπλισμός που εκτελεί τη τοποθέτηση και τη συμπύκνωση. Εάν είναι αναπόφευκτο να χρησιμοποιηθούν τέτοια υλικά και μέθοδοι, είναι συνετό να τοποθετηθεί πρώτα μια απορροφητική στρώση άμμου πάνω και μερικές φορές κάτω από το γεωπλέγμα. Τέλος σημαντική είναι η αναφορά στην τυποποιημένη διαδικασία που είναι διαθέσιμη προκειμένου να μειωθούν οι ζημιές εγκατάστασης, το ISO 10722 (Koerner 2012).

### **Συμπεριφορά έντασης ερπυσμού**

Μια σημαντική ιδιότητα αντοχής που περιλαμβάνει γεωπλέγματα είναι η παραμόρφωση υφιστάμενου φορτίου ή η ένταση ερπυσμού. Με δεδομένο ότι όλα τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή γεωπλεγμάτων αποτελούνται από μόρια μακράς αλυσίδας διατεταγμένα σε κρυσταλλικές περιοχές με ενδιάμεσες άμορφες περιοχές, η ένταση ερπυσμού αντανάκλα την εκατοστιαία κρυσταλλικότητα και τη θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού ( $T_g$ ). Γενικά, αυτή η δομή αντικατοπτρίζεται με τον ακόλουθο τρόπο.

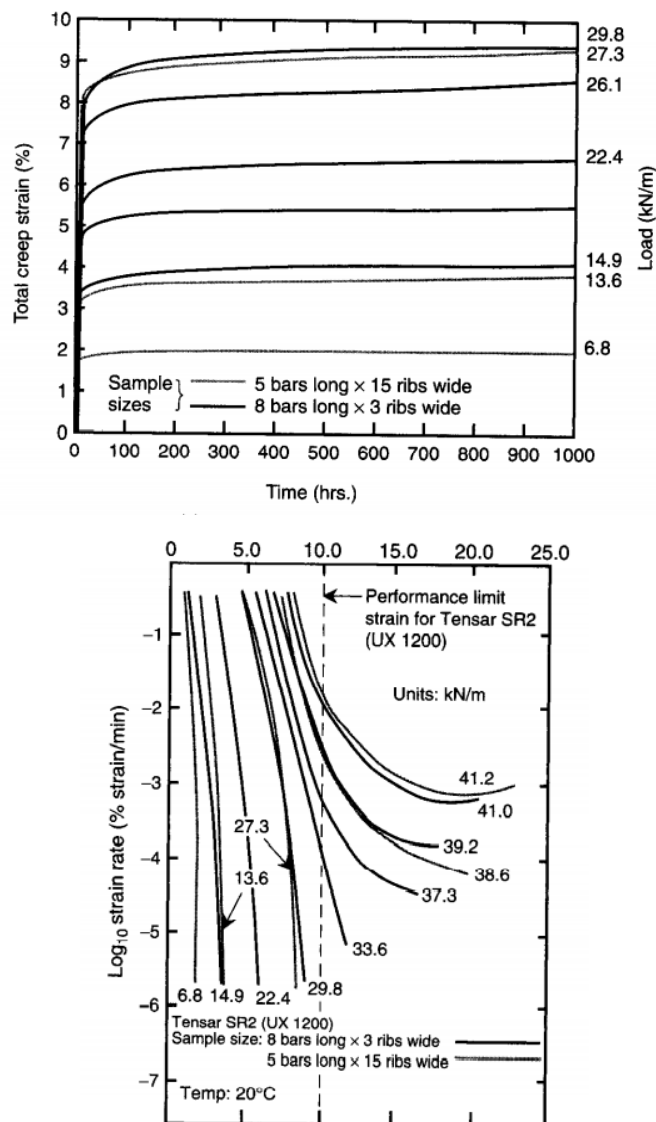
Για μη προσανατολισμένες πολυολεφίνες (πολυπροπυλένιο και πολυαιθυλένιο) που λειτουργούν κάτω από την  $T_g$  οι μοριακές αλυσίδες γλιστρούν μεταξύ τους εντός των κρυσταλλικών περιοχών. Οι πολυολεφίνες είναι, γενικά, πολύ κρυσταλλικές.

Για προσανατολισμένες πολυολεφίνες (επίσης κάτω από  $T_g$ ) ο προσανατολισμός δημιουργεί μια μοριακά ινώδη δομή και όταν λαμβάνει χώρα ο ερπυσμός το κάνει μεταξύ των ινών τόσο προς την προσανατολισμένη κατεύθυνση, όσο και προς την κατεύθυνση της τάσης.

Για πολυμερή όπως πολυεστέρας, πολυαμίδιο και πολυβινυλική αλκοόλη, τα οποία λειτουργούν πάνω από την  $T_g$ , η ολίσθηση ερπυσμού δεν εμφανίζεται σχεδόν καθόλου στην κρυσταλλική περιοχή. Σε αυτή την περίπτωση οι αλυσίδες σπάζουν στη διεπαφή των κρυσταλλικών και άμορφων περιοχών. Από αυτήν την άποψη, η ρήξη ερπυσμού είναι πιο πιθανό να συμβεί πριν επιτευχθεί οριακή παραμόρφωση.

Εκτός από τη μοριακή δομή και τις τιμές της  $T_g$ , ο ερπυσμός είναι κυρίως συνάρτηση του επιπέδου της τάσης, του χρόνου, της θερμοκρασίας και ορισμένων περιβαλλοντικών παραγόντων. Ο ερπυσμός έχει αξιολογηθεί εκτενώς σε πολλά γεωπλέγματα, με αποτελέσματα για ένα συγκεκριμένο προϊόν HDPE, όπως φαίνεται στην εικόνα **3-7α**. Επιπλέον έως περίπου 29,8 kN/m, τα οποία είναι το 41% του φορτίου θραύσης αυτού του συγκεκριμένου γεωπλέγματος, η παραμόρφωση ερπυσμού είναι εντός μιας περιορισμένης τιμής τάσης 10%, η οποία είναι ισοδύναμη των 120 χρόνων ζωής σχεδιασμού. Η επιτρεπόμενη ή λειτουργική τάση αντικατοπτρίζει αυτόν τον τύπο διαμόρφωσης κατά το ότι ο συντελεστής μείωσης έναντι του ερπυσμού θα είναι το αντίστροφο του 41%, καθώς τα νήματα των γεωυφασμάτων PE και PP απαιτούν παράγοντες μείωσης ερπυσμού που είναι γενικά

υψηλότεροι, λόγω της έλλειψης προσανατολισμού, όπως συμβαίνει και στην κατασκευή ομοιογενών υλικών PE και PP γεωπλεγμάτων. Το τεστ έντασης ερπυσμού έχει υιοθετηθεί ως ASTM D5262 ή ISO 13431. Τα δεδομένα δοκιμής ερπυσμού σε γεωπλέγματα πολυολεφίνης μπορούν να απεικονιστούν ως δεδομένα ισοχρονικού ερπυσμού, όπως φαίνεται στην **εικόνα 3-7β**. Η συμπεριφορά ερπυσμού παρατηρείται εύκολα σε ένα τέτοιο γράφημα (Koerner 2012).



Εικόνα 3.6 Αποτελέσματα συνεχούς τάσης παραμόρφωσης (ερπυσμός) σε ένα γεώπλεγμα HDPE τελικής αντοχής 72 kN /m (Koerner 2012).

### Συμπεριφορά θραύσης ερπυσμού

Μια παραλλαγή της δοκιμής έντασης ερπυσμού που μόλις περιγράφηκε στη διαδικασία θραύσης ερπυσμού, που παρουσιάστηκε από τους Ingold et al. Σε αυτή τη

διαδικασία επιβάλλονται υψηλότερες τάσεις στα δοκίμια που προκαλούν αστοχία σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Κατά την εκτέλεση πολλών τέτοιων δοκιμών, μπορεί να δημιουργηθεί ένα γράφημα του φορτίου συναρτήσει του χρόνου καταγραφής. Όταν γίνει κανονικοποίηση στην επιθυμητή διάρκεια ζωής, μπορεί να ληφθεί το αποδεκτό φορτίο. Όταν κανονικοποιείται στη βραχυπρόθεσμη τιμή, το αντίστροφο αυτού του λόγου γίνεται ο συντελεστής μείωσης που εφαρμόζεται στην απόλυτη αντοχή (Koerner 2012).

### **Επιταχυνόμενες μέθοδοι δοκιμών**

Τόσο η τάση ερπυσμού, όσο και η θραύση ερπυσμού μπορούν να αξιολογηθούν ταχύτερα από ό, τι συμβατικά, αναγνωρίζοντας ότι η αυξημένη θερμοκρασία δοκιμής επιταχύνει τους σχετικούς μηχανισμούς.

Η ιδέα χρησιμοποιεί υπέρθεση χρόνου-θερμοκρασίας (TTS) για την παραγωγή μιας σειράς καμπυλών σε διάφορα στάδια αυξημένης θερμοκρασίας. Οι προκύπτουσες καμπύλες στη συνέχεια μετατοπίζονται κατά μήκος του οριζόντιου άξονα (άξονας μεγάλης διάρκειας) για να αντιπροσωπεύουν τη διάρκεια ζωής στη συγκεκριμένη τοποθεσία. Με βάση τις μετρήσεις πεδίου, αυτό μπορεί να ληφθεί ως 10°C. Χρησιμοποιώντας το TTS, ο χρόνος δοκιμής μειώνεται δραστικά και μπορούν να ληφθούν προβλέψεις για το μακρινό μέλλον. Υπάρχουν δύο παραλλαγές των δοκιμών TTS.

Η πρώτη, (ονομάζεται πρότυπο TTS ανά Παράρτημα ASTM D5292) και χρησιμοποιεί μεμονωμένα δείγματα δοκιμής για κάθε βήμα θερμοκρασίας και αύξησης φορτίου. Η δεύτερη (που ονομάζεται σταδιακή ισοθερμική μέθοδος ή SIM, ανά ASTM D6992) χρησιμοποιεί και τοποθετεί μετρήσεις καταπόνησης σε κάθε αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα του περιορισμού της παραλλαγής δείγματος σε αυτές τις αρκετά ευαίσθητες δοκιμές. Για διαφορετικές αυξήσεις φορτίου, ωστόσο απαιτούνται μεμονωμένα δείγματα δοκιμής. Και οι δύο αυτές επιταχυνόμενες μέθοδοι είναι γόνιμοι τομείς έρευνας, με τους σχεδιαστές να λαμβάνουν παράγοντες μείωσης εγκαίρως και τους κατασκευαστές να διερευνούν τη συμπεριφορά των τροποποιημένων ή / και νέων προϊόντων (Koerner 2012).

### **3.3.4 Ζητήματα Υποβιβασμού (Degradation issues)**

Για όλα τα είδη γεωπλεγμάτων που χρησιμοποιούνται σε μόνιμες εγκαταστάσεις ενίσχυσης, είναι απαραίτητη η αξιολόγηση κάποιων επιλεγμένων υποθέσεων υποβιβασμού.

### **Επιπτώσεις Θερμοκρασίας**

Δεδομένου του εύρους θερμοκρασίας των τυπικών περιβάλλοντων, οι ακραίες θερμοκρασίες (ζεστές ή κρύες) δεν πρέπει να έχουν σοβαρές δυσμενείς επιπτώσεις στα γεωπλέγματα. Το μόνο που χρειάζεται προσοχή, είναι ότι η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να επιδεινώσει τις καταπονήσεις που προκαλούνται από τον ερπυσμό, την

θραύση ερπυσμού και / ή τη χαλάρωση της τάσης. Αυτό απαιτεί πραγματικές δοκιμές στις αναμενόμενες θερμοκρασίες πεδίου ή τη χρήση των τεχνικών, όπως αυτή της TTS που περιγράφηκαν προηγουμένως (Koerner 2012).

### **Επιπτώσεις Οξειδωσης**

Αυτός ο μακροχρόνιος μηχανισμός, που εφαρμόζεται στον υποβιβασμό της πολυολεφίνης ( HDPE και PP) (Koerner 2012).

### **Χημικές Επιπτώσεις**

Οι πολυολεφίνες και οι πολυεστέρες έχουν δείξει εξαιρετική αντοχή σε ένα ευρύ φάσμα χημικών. Εάν υπάρχουν ασυνήθιστες συνθήκες, η κατάσταση μπορεί να υπαγορεύει συγκεκριμένες δοκιμές στο πραγματικό χημικό περιβάλλον αντίδρασης – όπως για παράδειγμα, τα εκπλύματα χωματερών. Η διαδικασία εργαστηριακής επώασης μπορεί να χρησιμοποιήσει το ASTM D5322 ακολουθούμενο από το ASTM D6213 για τις πραγματικές δοκιμές γεωπλέγματος που πρέπει να εκτελεστούν. Ωστόσο, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δοκιμών αφήνεται στον σχεδιαστή (Koerner 2012).

### **Επιπτώσεις Ραδιενέργειας**

Τα χαμηλού επιπέδου και τα μικτά ραδιενεργά υλικά δεν πρέπει να δημιουργούν προβλήματα στα γεωπλέγματα, εκτός και αν τα ραδιενεργά υλικά υψηλού επιπέδου βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση (Koerner 2012).

### **Βιολογικές Επιπτώσεις**

Η συζήτηση για τη γενική έλλειψη βιολογικής αποδόμησης των γεωφασμάτων εφαρμόζεται για τα γεωπλέγματα, με την πιθανή εξαίρεση της επικάλυψης σε εύκαμπτα γεωπλέγματα. Το λατέξ, η άσφαλτος ή οι πλαστικοποιητές σε PVC μπορεί να είναι ευαίσθητοι σε μικροοργανισμούς, αλλά δεν υπάρχουν διαθέσιμες μελέτες σχετικά με αυτό. Ακόμα κι αν ήταν δυνατή μια τέτοια προσβολή των επικαλύψεων, οι ίνες πολυεστέρα υψηλής κρυσταλλικότητας (στις οποίες οφείλουν τα γεωπλέγματα την αντοχή τους) θα παραμείνουν πιθανώς ανεπηρέαστες (Koerner 2012).

### **Επιπτώσεις Ηλιακής Ακτινοβολίας (UV)**

Όπως με όλα τα πολυμερή υλικά μπορεί να συμβεί υπεριώδης αποικοδόμηση με την πάροδο του χρόνου και θα ακολουθήσει αποικοδόμηση του πολυμερούς. Όσον αφορά το ζήτημα της έγκαιρης κάλυψης, ο χρόνος έκθεσης των γεωπλεγμάτων μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερος από των γεωφασμάτων. Αυτό οφείλεται στο πάχος των νευρώσεων των γεωπλεγμάτων πολυολεφίνης και στην καλή αντοχή των γεωπλεγμάτων PET στην υπεριώδη ακτινοβολία. Ωστόσο συνιστάται μια μέγιστη έκθεση 30 ημερών στην ηλιακή ακτινοβολία πριν από την κάλυψη (Koerner 2012).

### **Αντίσταση στην πίεση ρωγμάτωσης**

Πολύκρυσταλλικά πολυμερή μερικές φορές είναι ευαίσθητα σε ρωγμάτωση ενώ βρίσκονται υπό πίεση. Το τεστ που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση αυτής της τάσης είναι το ASTM D5397, το οποίο περιγράφει τη δοκιμή εγκοπής σταθερού εφελκυσμού (NCTL) και την εκδοχή ενός σημείου (SP-NCTL) του προσαρτήματος στο D5379. Μόνο εξαιρετικά κρυσταλλικά πολυαιθυλενικά γεωπλέγματα προκαλούν ανησυχία και μια αξιολόγηση σχετικά με αυτά δίνεται από τον Wrigley. Αυτό δεν φαίνεται να αποτελεί πρόβλημα, όσον αφορά τις αστοχίες πεδίου (Koerner 2012).

### 3.3.5 Αντοχή γεωπλεγμάτων

#### Αντοχή σε εφελκυσμό και εξόλκευση

Στα συνθετικά γεωπλέγματα, οι τιμές των παραμέτρων εφελκυστικής αντοχής και αντοχής σε εξόλκευση προκύπτουν βάσει των εξής χαρακτηριστικών τιμών που πρέπει να παρέχονται από τον κατασκευαστή τους :

**Εφελκυστική αντοχή:** Λόγω της βισκώδους συμπεριφοράς των γεωσυνθετικών υλικών, η εφελκυστική αντοχή δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την χρονική διάρκεια παραμονής της φόρτισης. Για ταχείες παροδικές φορτίσεις (όπως ο σεισμός) λαμβάνεται αντίστοιχη τιμή αντοχής σε ταχεία φόρτιση, η οποία απομειώνεται με τους μερικούς συντελεστές ασφαλείας λόγω φθοράς κατά την εγκατάσταση και λόγω οξύτητας - αλκαλικότητας του περιβάλλοντος. Οι συντελεστές αυτοί λαμβάνουν τιμές αναλόγως του τύπου του γεωπλέγματος, της κοκκομετρίας και του pH του υλικού επίχωσης. Για μακροχρόνια φόρτιση, λαμβάνεται η αντίστοιχη εφελκυστική αντοχή του γεωπλέγματος σε θερμοκρασιακές συνθήκες που γενικώς ισχύουν στο έργο, η οποία και απομειώνεται κατ' αρχάς με τους μερικούς συντελεστές λόγω αποκλίσεων της παραγωγής και χρονικής επέκτασης δεδομένων, και εν συνεχεία με τους μερικούς συντελεστές λόγω φθοράς κατά την εγκατάσταση και συνθηκών pH του υλικού επίχωσης (Νάσκος 2007).

**Αντοχή σε εξόλκευση:** Δίνεται η τιμή του συντελεστή τριβής μεταξύ του γεωπλέγματος και του εδαφικού υλικού επίχωσης, που συνήθως υπολογίζεται βάσει της τιμής του λόγου τριβής του συγκεκριμένου τύπου γεωπλέγματος (για διάφορης σύστασης υλικό επίχωσης) και της θεωρούμενης εσωτερικής γωνίας τριβής του υλικού επίχωσης που θα χρησιμοποιηθεί. Οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχής και εξόλκευσης που προκύπτουν με τον παραπάνω τρόπο, προκειμένου να μετατραπούν σε τιμές σχεδιασμού, υπόκεινται σε μειώσεις με χρήση των κατά περίπτωση αντίστοιχων μερικών συντελεστών ασφαλείας (Νάσκος 2007).

#### Επιτρεπόμενες εκτιμήσεις αντοχής

Η βάση της έννοιας σχεδίασης κατά λειτουργία είναι ο καθορισμός ενός συντελεστή ασφάλειας. Για γεωπλέγματα, όπου η ενίσχυση είναι η κύρια λειτουργία τους, αυτός ο συντελεστής ασφάλειας έχει την ακόλουθη μορφή:

$$FS = \frac{T_{allow}}{T_{reqd}} \quad (3.2)$$

**όπου :**

**FS :** συντελεστής ασφαλείας (για την κάλυψη απρόβλεπτων συνθηκών φόρτισης και αβεβαιότητας στο σχεδιασμό ή τη δοκιμή).

**Tallow :** επιτρεπόμενη εφελκυστική αντοχή από εργαστηριακές δοκιμές.

**Treqd :** επιθυμητή εφελκυστική αντοχή από τον σχεδιασμό συγκεκριμένης κατάστασης πεδίου.

Η επιτρεπόμενη τιμή προέρχεται από δοκιμή εφελκυσμού του τύπου που περιγράφεται στις μηχανικές ιδιότητες των γεωπλεγμάτων, που αναλύσαμε παραπάνω, όπου πρέπει να συγκριθεί η ο δοκιμαστικός εξοπλισμός με την προβλεπόμενη κατάσταση του πεδίου. Εάν η μέθοδος δοκιμής δεν είναι πλήρως προσομοιωμένη στο πεδίο, η εργαστηριακή τιμή πρέπει να προσαρμοστεί κατάλληλα. Αυτό συμβαίνει γενικά. Έτσι, η αντοχή εφελκυσμού που δημιουργείται από το εργαστήριο είναι συνήθως μια τελική τιμή, η οποία πρέπει να μειωθεί πριν χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό (Koerner 2012).

### **Tallow < Tult (3.3)**

Πίνακας 3-1 Συνιστώμενες τιμές συντελεστή απομείωσης της επιτρεπόμενης αντοχής εφελκυσμού γεωπλεγμάτων (Koerner 2012)

Application Area	Reduction Factor Values		
	RF <sub>ID</sub>	RF <sub>CR</sub>	RF <sub>CBD</sub>
Unpaved roads	1.1–1.6	1.5–2.5	1.0–1.6
Paved roads	1.2–1.5	1.5–2.5	1.1–1.7
Embankments	1.1–1.4	2.0–3.0	1.1–1.5
Slopes	1.1–1.4	2.0–3.0	1.1–1.5
Walls	1.1–1.4	2.0–3.0	1.1–1.5
Foundations	1.2–1.5	2.0–3.0	1.1–1.6

Σημειώνεται ότι δίνονται τα εύρη και όχι συγκεκριμένες τιμές. Είναι απαραίτητο να μελετάται κάθε στοιχείο ξεχωριστά και να λαμβάνεται μια συνετή απόφαση ως προς το πόσο σημαντικό είναι για την κατάσταση της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Για παράδειγμα, ο μεγαλύτερος είναι ο παράγοντας μείωσης ερπυσμού – για αυτό έχει μεγάλη σημασία η σωστή αξιολόγηση του.



Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι τοποθέτηση ενός συντελεστή μείωσης σε κάθε ένα από τα τμήματα που δεν είναι μοντελοποιημένα στη εργαστηριακή δοκιμή. Για παράδειγμα, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ακόλουθη εξίσωση:

$$T_{\text{allow}} = T_{\text{ult}} \left( \frac{1}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_{CBD}} \right) \quad (3.4)$$

όπου:

$T_{\text{ult}}$  : απόλυτη αντοχή εφελκυσμού από τυποποιημένη δοκιμή εφελκυσμού, υπό καθεστώς απομόνωσης

$T_{\text{allow}}$  : επιτρεπόμενη εφελκυστική αντοχή για τελικές καταστάσεις σχεδιασμού

$RF_{ID}$  : συντελεστής απομείωσης για καταστροφή κατά την τοποθέτηση

$RF_{CR}$  : συντελεστής απομείωσης για αποφυγή ερπυσμού κατά την διάρκεια ζωής της κατασκευής

$RF_{CBD}$  : συντελεστής απομείωσης κατά της χημικής και βιολογικής διάβρωσης (Koerner 2012).

### 3.4 Αρχές σχεδιασμού οπλισμένων επιχωμάτων

#### 3.4.1 Γενικά στοιχεία

Υπό τον όρο οπλισμένα επιχώματα, καλούνται όλα τα επιχώματα πολιτικού μηχανικού (engineering fills), τα οποία περιλαμβάνουν οποιονδήποτε αποδεκτού τύπου οπλισμό, είτε στο σύνολο του ύψους αυτών, είτε τοπικά στην βάση ή την στέψη (Νάσκος 2007).

Οι δύο γενικές κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα επιχώματα είναι :

**A) Οπλισμένα επιχώματα με απότομες έως και κατακόρυφες κλίσεις πρανών**, η ευστάθεια των οποίων δεν θα μπορούσε να εξασφαλισθεί χωρίς όπλιση. Ως εκ τούτου, πρόκειται για οπλισμένα επιχώματα αντιστήριξης (retaining structures).

**B) Επιχώματα ήπιας κλίσης πρανών** που περιλαμβάνουν όπλιση είτε στην θεμελίωση αυτών, είτε στην στέψη, για λόγους, όπως η ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους ή και η αντιμετώπιση διαφορικών καθιζήσεων σε ειδικές περιπτώσεις (Νάσκος 2007).

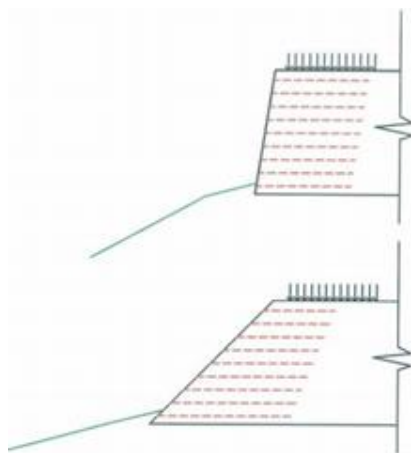
Ειδικότερα, οι γεωτεχνικές κατηγορίες, στις οποίες διαχωρίζονται τα επιχώματα είναι οι εξής τρείς :

**Κατηγορία 1:** Συνήθη απλά επιχώματα – ελάχιστος κίνδυνος – μικρές συνέπειες αν αστοχήσει

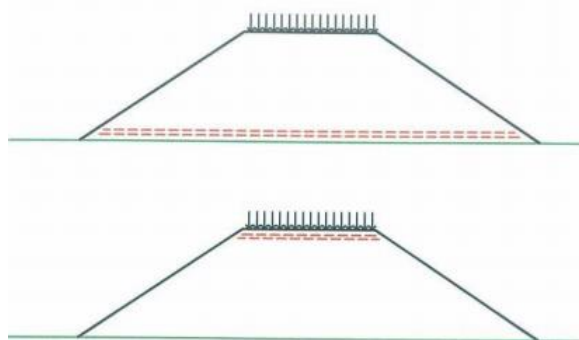
**Κατηγορία 2:** Συνήθη οπλισμένα επιχώματα – Συνήθεις κίνδυνοι και δυσμενείς συνθήκες – Ομαλές γεωτεχνικές συνθήκες θεμελίωσης

**Κατηγορία 3:** Υψηλοί κίνδυνοι και συνέπειες σε περίπτωση αστοχίας – Ιδιαίτερα επιχώματα – Δύσκολες εδαφικές συνθήκες θεμελίωσης και φορτίσεις -Σεισμός κρίσιμη παράμετρος

Οι κατηγορίες αυτές στην απρόσκοπτη λειτουργία του συνολικού έργου και χαρακτηρίζουν την κρισιμότητα της διατήρησης αυτού σε συνθήκες πλήρους λειτουργίας. Διαμορφώνουν την πορεία των γεωτεχνικών ερευνών και το επίπεδο οργάνωσης και συντήρησης κατά την λειτουργία του έργου.



Εικόνα 3.7 Οπλισμένα επιχώματα αντιστήριξης - απότομη κλίση παρειάς (Νάσκος 2007)



Εικόνα 3.8 Όπλιση βάσης ή στέψης επιχώματος (Νάσκος 2007)

Για την κατάταξη ενός επιχώματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι αντοχής, το είδος και η ποιότητα του γεωυλικού επίχωσης σύμφωνα με τις επιτόπου συνθήκες του έργου. Επίσης πρέπει να καθορίζεται εξαρχής το είδος των στοιχείων

όπλισης, ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης και την διάρκεια ωφέλιμης χρήσης (Ένωση Επιστημόνων της Εγνατία Οδός ΑΕ 2007).

### **Γεωϋλικά κατασκευής οπλισμένων επιχωμάτων**

Α) Για την κατασκευή οπλισμένων επιχωμάτων, είναι γενικώς κατάλληλα όλα τα γεωϋλικά αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται οργανικά, διογκούμενα ή υδατοδιαλυτά γεωϋλικά.

Β) Αναλόγως των απαιτήσεων σχεδιασμού και χρήσης των οπλισμένων επιχωμάτων, συνιστώνται κυρίως κοκκώδη ή μικτής κοκκομετρικής διαβάθμισης γεωϋλικά. Η μέγιστη διάσταση και η μορφή των κόκκων του υλικού, σε σχέση με την ορυκτολογική σύσταση και την προέλευσή του, εξαρτάται από το είδος των οπλισμών (ώστε να μην καταστρέφονται κατά την τοποθέτησή τους) καθώς και από το καθοριζόμενο μέγιστο πάχος στρώσης του υλικού προς συμπύκνωση.

Γ) Τα ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά των γεωϋλικών (pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα, χλωροϊόντα και θειϊκά) πρέπει να βρίσκονται εντός ανεκτών ορίων εφόσον οι οπλισμοί είναι χαλύβδινοι. Για πολυμερικής σύστασης οπλισμούς, αρκεί ο βαθμός οξύτητας pH να μη λαμβάνει ιδιαίτερα ακραίες τιμές (εξαρτώνται από τις προδιαγραφές του υλικού του οπλισμού).

Δ) Επίσης καθορίζονται και ελέγχονται κατά την κατασκευή:

- Το φαινόμενο βάρος του υλικού  $\gamma_k$ .
- Τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής  $\phi'_k$ .
- Οι παράμετροι διάστρωσης - συμπύκνωσης (πάχος στρώσης, βέλτιστη υγρασία και πυκνότητα συμπύκνωσης) (Νάσκος 2007).

### **Οπλισμός**

Οι οπλισμοί που μπορούν να τοποθετηθούν στα επιχώματα είναι είτε χαλύβδινοι, είτε από πολυμερικά υλικά. Η τοποθέτησή τους γίνεται συνηθέστατα σε διαδοχικά οριζόντια επίπεδα κατά την ανέγερση του επιχώματος και συνδέονται με το σύστημα επένδυσης της παρειάς. Σε περίπτωση χρήσης πολυμερικού τύπου οπλισμών, ακολουθεί ελαφρά τάνυση και προσωρινή στερέωση του πίσω άκρου τους επί της εκάστοτε συμπυκνωμένης επιφάνειας επίχωσης, πριν την τοποθέτηση και την διάστρωση της επόμενης στρώσης υλικού επιχώματος.

**Οι χαλύβδινοι οπλισμοί** (χαλύβδινες λωρίδες, ράβδοι, χαλύβδινα πλέγματα) σε μόνιμες κατασκευές είναι γαλβανισμένοι, αναλόγως του τύπου τους και των απαιτήσεων διάρκειας χρήσης. Ειδικά, σε περίπτωση χρήσης συρματοπλεγμάτων όπλισης, θα πρέπει να είναι γαλβανισμένα με κράμα Zn95Al5 και συνιστώμενη προστασία με επικάλυψη PVC. Ανοξειδωτοι χάλυβες και κράματα αλουμινίου δεν συνιστώνται γενικώς για μόνιμες κατασκευές, επιτρέπονται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις και κατόπιν ειδικής μελέτης. Τα χαρακτηριστικά μηχανικής αντοχής που πρέπει να δίνονται για τους χαλύβδινους οπλισμούς συνίστανται στην αντοχή σε

εφελκυσμό έναντι θραύσης του χάλυβα, καθώς και σε επιμέρους παραμέτρους που να επιτρέπουν τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής του οπλισμού σε εξόλκευση, εφόσον είναι γνωστή η γωνία τριβής του υλικού επίχωσης. Σχετικές 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.

**Οι πολυμερικοί οπλισμοί** (πολυμερικές λωρίδες, πολυμερικά γεωπλέγματα ή φύλλα) συνήθως είναι πολυεστερικής ή πολυαιθυλενικής σύστασης, χωρίς να αποκλείονται άλλοι τύποι. Οπλισμοί από ίνες (fiber, carbon) έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ερευνητικά σε προσωρινές κατασκευές. Τα χαρακτηριστικά μηχανικής αντοχής που πρέπει να δίνονται για τους πολυμερικούς οπλισμούς συνίστανται στις τιμές αντοχής σε εφελκυσμό για τις δεδομένες συνθήκες τοποθέτησης, περιβάλλοντος και θερμοκρασίας, αντίστοιχα σε ταχείες φορτίσεις καθώς και σε αργές φορτίσεις που ισοδυναμούν με την ωφέλιμη διάρκεια χρήσης του οπλισμένου επιχώματος (όριο αντοχής σε ερπυσμό). Επίσης θα πρέπει να δίνονται οι τιμές των παραμορφώσεων σε διάφορες τιμές εφελκυστικού φορτίου, συναρτήσει της διάρκειας φόρτισης (ισόχρονες καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης). Τέλος, δίνονται και οι τιμές των επιμέρους παραμέτρων που επιτρέπουν τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής σε εξόλκευση, εφόσον είναι γνωστή η γωνία τριβής του υλικού επίχωσης. Σχετικές 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 (Νάσκος 2007).

### **3.4.2 Υπολογιστικοί έλεγχοι ευστάθειας πρανών**

Από την εμφάνιση της οπλισμένης γης μέχρι και σήμερα, οι κύριες αρχές σχεδιασμού και ελέγχου βασίζονται στην μέθοδο οριακής ισορροπίας. Σε ειδικές μόνο περιπτώσεις, όπου το κινηματικό πεδίο εσωτερικά της οπλισμένης γης διαφοροποιείται έντονα και η σύζευξη κινηματικών και στατικών μεγεθών είναι απαραίτητη, η χρήση αριθμητικών μεθόδων (μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών) μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερη αποτίμηση, έλεγχο και σχεδιασμό.

Βασικός άξονας των κανονιστικών πλαισίων που διέπουν τον σχεδιασμό των οπλισμένων επιχωμάτων είναι σε διεθνές επίπεδο η θεωρία της οριακής ισορροπίας. Κατά την προσέγγιση αυτή εξετάζεται η ισορροπία δυνάμεων ή/και ροπών παρά δε τα σχετικά μειονεκτήματα που παρουσιάζει εξακολουθεί να είναι ιδιαίτερα δημοφιλής μεταξύ των γεωτεχνικών μελετών, καθότι αποτυπώνει την επάρκεια και την ασφάλεια ενός έργου με την τιμή ενός γενικευμένου συντελεστή ασφαλείας. Επιπρόσθετα, η χρήση μερικών συντελεστών ασφαλείας με εύρος τιμών μπορεί να προσδιορίσει άνω και κάτω όριο ασφαλείας και σχεδιασμού ενός έργου οπλισμένου

επιχώματος. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η προσμέτρηση των επιπτώσεων διαφόρων παραγόντων που δεν μπορούν να εισαχθούν στην ανάλυση.

Ανεξαρτήτως της επιμέρους μεθόδου που χρησιμοποιείται στην ανάλυση (π.χ. κατά Bishop, κ.λπ.), διερευνώνται και προσδιορίζονται οι κρισιμότερες πιθανές επιφάνειες δυνητικής θραύσης, κυκλικού ή πολυγωνικού σχήματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως για απότομες κλίσεις παρειάς και σε εδάφη θεμελίωσης με χαμηλή σχετικώς φέρουσα ικανότητα (π.χ. χαλαρά εδάφη θεμελίωσης ή και με ισχυρή φυσική κλίση), πρέπει επιπροσθέτως να διεξάγεται και ξεχωριστός έλεγχος φέρουσας ικανότητας, θεωρουμένων των κατακόρυφων, των οριζοντίων φορτίων καθώς και της εκκεντρότητας αυτών στη βάση του απότομου οπλισμένου επιχώματος. Στους ως άνω υπολογισμούς, τα γεωπλέγματα συνεισφέρουν στην ευστάθεια, των εκάστοτε υπολογιζόμενων πρισμάτων με την αύξηση των ανθιστεκόμενων δυνάμεων που υπολογίζεται ως η ελάχιστη εκ της εφελκυστικής αντοχής σχεδιασμού και της αντοχής σε εξόλκευση για κάθε γεώπλεγμα το οποίο τέμνει την θεωρούμενη επιφάνεια δυνητικής ολίσθησης.

Η αντοχή αυτή των γεωπλεγμάτων επιπροστίθεται στην διατμητική αντίσταση του εδάφους κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, η οποία και θεωρείται ότι μπορεί κατά προτεραιότητα να αναπτυχθεί, δοθέντος ότι η μετακίνηση που απαιτείται προς τούτο είναι μικρή και δεν επηρεάζει αρνητικά την ικανότητα του εύκαμπτου γεωσυνθετικού πλέγματος για να παραλάβει εφελκυσμό. Η εφελκυστική αντοχή του γεωπλέγματος, είναι ανεξάρτητη του βάθους τοποθέτησης του, εξαρτάται όμως από την χρονική διάρκεια παραμονής της αναπτυσσόμενης εφελκυστικής δύναμης, δοθέντος ότι τα γεωπλέγματα κατασκευάζονται από πολυμερικά συνθετικά υλικά, τα οποία διαθέτουν βισκώδη συμπεριφορά με έντονα φαινόμενα ερπυσμού και χαλάρωσης υπό σταθερή τάση (ή σταθερή παραμόρφωση αντιστοίχως). Αντιθέτως, η αντοχή σε εξόλκευση είναι συνάρτηση του βάθους τοποθέτησης του γεωπλέγματος καθώς και του συντελεστή τριβής μεταξύ του γεωπλέγματος και του εδάφους επίχωσης. Εξαρτάται επίσης από τα μήκη των τμημάτων του γεωπλέγματος πίσω και εντός του πρίσματος δυνητικής ολίσθησης, με την σημείωση ότι αν το σύστημα επένδυσης της παρειάς του πρανούς διαθέτει επαρκή φέρουσα ικανότητα και είναι σταθερά συνδεδεμένο με τα γεωπλέγματα, τότε το μήκος εξόλκευσης είναι αποκλειστικά το μήκος πίσω από την επιφάνεια δυνητικής ολίσθησης (Ένωση Επιστημόνων της Εγνατία Οδός ΑΕ 2007, Κωμοδρόμος 2019).

Κατά το σχεδιασμό των οπλισμένων επιχωμάτων στο πλαίσιο θεώρησης οριακής ισορροπίας πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι έλεγχοι :

#### **Έλεγχος εξωτερικής ευστάθειας (External Stability / ES)**

Κατά τον έλεγχο αυτό, το σώμα του οπλισμένου επιχώματος θεωρείται απαραμόρφωτο σώμα, η δε αναμενόμενη αστοχία εκδηλώνεται πέρα από αυτό. Ως απαραμόρφωτο σώμα παραλαμβάνει τις ωθήσεις που αναπτύσσονται πίσω από

αυτό και τις μεταβιβάζει στην βάση της έδρασής του. Ο έλεγχος περιλαμβάνει εξέταση αστοχίας βαθιάς ολίσθησης, σε κυκλικές ή πολυγωνικές επιφάνειες, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση των μεθόδων οριακής ισορροπίας Bishop, Janbu, Spencer ή άλλες. Στην κατάσταση αυτή δεν παίζουν άμεσα ρόλο τα στοιχεία όπλισης ( παρά μόνο στον γεωμετρικό καθορισμό του οπλισμένου τμήματος του επιχώματος). Περιλαμβάνονται οι εξής επιμέρους μηχανισμοί δυνητικής αστοχίας :

(ES.1) Αστοχία βαθιάς ολίσθησης: Διευρευνάται με περιστροφικές ή πολυγωνικές επιφάνειες δυνητικής ολίσθησης οι οποίες δεν τέμνουν τα στοιχεία οπλισμού.

(ES.2) Ολίσθηση του στερεού ( οπλισμένου σώματος) στη βάση : Διευρευνάται με πολυγωνικές επιφάνειες δυνητικής ολίσθησης στην βάση έδρασης του επιχώματος.

(ES.3) Θραύση του υπεδάφους θεμελίωσης : Διευρευνάται είτε με περιστροφικές επιφάνειες δυνητικής ολίσθησης είτε με κλασσικές μεθόδους φέρουσας ικανότητας (Ένωση Επιστημόνων της Εγνατία Οδός ΑΕ 2007, Κωμοδρόμος 2019).

### **Έλεγχος εσωτερικής ευστάθειας (Internal Stability / IS)**

Κατά τον έλεγχο αυτό, εξετάζονται οι μηχανισμοί δυνητικής αστοχίας, πολυγωνικές και περιστροφικές επιφάνειες που αναπτύσσονται εντός του οπλισμένου σώματος του επιχώματος, συνυπολογίζοντας και τη συνεισφορά των οπλισμών. Επίσης είναι πιθανό τα γεωσυνθετικά υλικά να έχουν την απαραίτητη αντοχή και είναι σε θέση να αποτρέψουν εκδήλωση αστοχίας αυτής της μορφής. Η αστοχία αυτού τύπου προκαλείται όταν η διατμητική αντίσταση κατά μήκος της διεπιφάνειας δεν είναι σε θέση να μεταφέρει τη δύναμη αντοχής της όπλισης (ολίσθηση κατά μήκος της διεπιφάνειας). Περιλαμβάνονται οι εξής επιμέρους μηχανισμοί δυνητικής αστοχίας :

(IS.1) Περιστροφικός ή Πολυγωνικός μηχανισμός αστοχίας : Διευρευνάται με περιστροφικές ή πολυγωνικές επιφάνειες δυνητικής ολίσθησης, οι οποίες διέρχονται αποκλειστικά εντός του οπλισμένου σώματος.

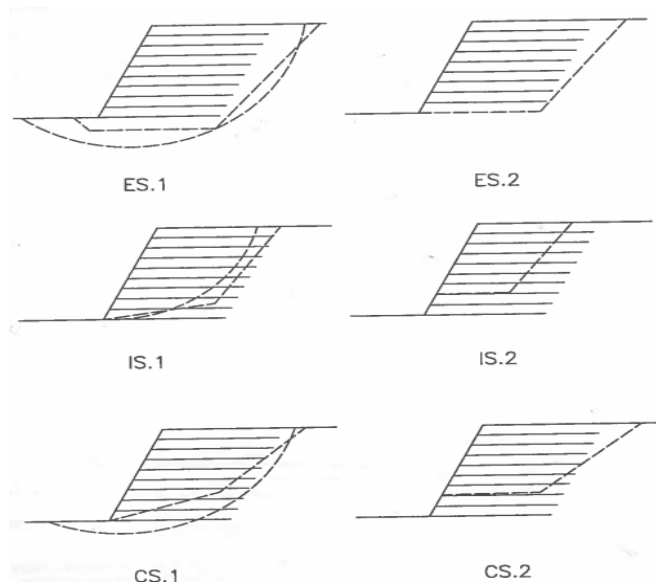
(IS.2) Ολίσθηση κατά μήκος διεπιφανειών μειωμένης αντοχής εντός του οπλισμένου σώματος: Διευρευνάται με πολυγωνικές επιφάνειες, που περιλαμβάνουν τμήμα διεπιφάνειας μειωμένης αντοχής (μεταξύ εδάφους-στοιχείου όπλισης), διερχόμενες αποκλειστικά εντός του οπλισμένου σώματος (Ένωση Επιστημόνων της Εγνατία Οδός ΑΕ 2007, Κωμοδρόμος 2019).

### **Έλεγχος σύμμεκτης ευστάθειας (Compound Stability/CS)**

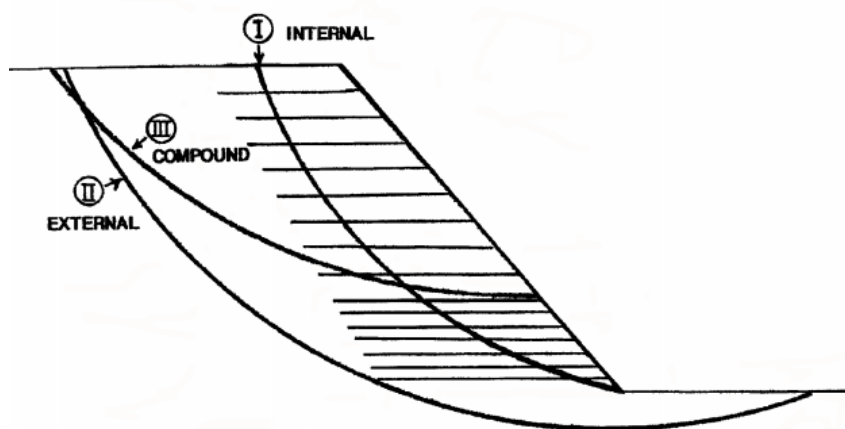
Κατά τον έλεγχο αυτό, εξετάζονται επιφάνειες αστοχίας οι οποίες διέρχονται από το σώμα του οπλισμένου επιχώματος, εκτείνονται όμως και πέρα από αυτό. Οι έλεγχοι εσωτερικής και σύμμεκτης ευστάθειας οδηγούν πρακτικά σε έλεγχο επάρκειας των γεωπλεγμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κανόνα στα οπλισμένα επιχώματα, σε εφελκυστική αντοχή και σε έλεγχο έναντι εξόλκευσης.

(CS.1) Περιστροφικός ή πολυφωνικός μηχανισμός αστοχίας: Διερευνάται με περιστροφικές ή πολυγωνικές επιφάνειες δυνητικής ολίσθησης που αναπτύσσονται ταυτόχρονα εντός και εκτός του σπλισμένου σώματος.

(CS.2) Ολίσθηση κατά μήκος διεπιφανειών μειωμένης αντοχής εντός του σπλισμένου σώματος : Διερευνάται με πολυγωνικές επιφάνειες που περιλαμβάνουν τμήμα διεπιφάνειας μειωμένης αντοχής (μεταξύ εδάφους -στοιχείου όπλισης), διερχόμενης ταυτόχρονα εντός και εκτός του σπλισμένου σώματος (Ένωση Επιστημόνων της Εγνατία Οδός ΑΕ 2007, Κωμοδρόμος 2019).



Σχήμα 3-1(α) Μηχανισμοί και καταστάσεις δυνητικής αστοχίας (Ένωση Επιστημόνων της Εγνατία Οδός ΑΕ 2007).



Σχήμα 3-1(β) Ενδεικτικοί μηχανισμοί και καταστάσεις δυνητικής αστοχίας για ελέγχους σπλισμένων επιχωμάτων (Elias et al. 2001).

### 3.4.3 Σχεδιασμός και Κανονισμοί

#### Γενικά

Ο υπολογισμός της ευστάθειας των οπλισμένων επιχωμάτων προς το παρόν βασίζεται κατά κύριο λόγο στην μέθοδο οριακής ισορροπίας (Ultimate Limite State) καθόσον οι αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία παρουσιάζουν την πρόσθετη δυσκολία χρήσης κατάλληλων καταστατικών νόμων που να περιγράφουν με την δέουσα ακρίβεια την βισκώδη (χρονικά εξαρτώμενη) συμπεριφορά των γεωσυνθετικών πλεγμάτων όπλισης. Χρησιμοποιούνται έτσι οι διάφορες κλασικές μέθοδοι οριακών ελέγχων ευστάθειας (Bishop, Fellenius, Janbu, Spencer κ.λπ.) με εισαγωγή των αντοχών των πλεγμάτων (δηλαδή της εφελκυστικής αντοχής τους καθώς και της αντοχής έναντι εξόλκευσης) στις βασικές εξισώσεις ισορροπίας των μεθόδων αυτών. Εξετάζονται κατά τα λοιπά διάφορες μορφές πιθανής δυνητικής αστοχίας και προσδιορίζονται οι κρισιμότερες, με τους ελάχιστους συντελεστές ασφαλείας που συγκρίνονται με τις ελάχιστες κατά περίπτωση θεωρούμενες ανεκτές τιμές, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ικανοποιητική εδαφoστατική επάρκεια της κατασκευής.

Στα ίδια γενικά πλαίσια κινείται διεθνώς το σύνολο των υφιστάμενων οδηγιών και κανονισμών που χρησιμοποιούνται σε διάφορες χώρες (όπως το BS 8006, η NF P94-220, η NF G3064 κ.λπ.), με πολλά κοινά σημεία αλλά και επιμέρους όμως διαφοροποιήσεις σε ότι αφορά τους συντελεστές ασφαλείας και τις εξεταζόμενες καταστάσεις ελέγχου, δεδομένου μάλιστα ότι το θέμα των οπλισμένων επιχωμάτων δεν καλύπτεται από τον Ευρωκώδικα 7, το δε ισχύον πρότυπο EN 14475 καλύπτει προς το παρόν μόνο τα θέματα κατασκευής και προδιαγραφών υλικών. Στον Ελληνικό χώρο, πέραν του Ευροκώδικα 7 και του ΕΑΚ, υφίστανται επίσης οι πρόσφατες οδηγίες μελετών οδικών έργων ΟΜΟΕ, οι οποίες περιλαμβάνουν απλή αναφορά στα οπλισμένα επιχώματα και στις σχετικές Βρετανικές οδηγίες καθώς και εκτενέστερη αναφορά - θέσπιση του Γαλλικού κανονισμού της οπλισμένης γης NF P94-220 με στοιχεία κατακόρυφης παρειάς και χρήση χαλύβδινων ράβδων ή χαλύβδινων πλεγμάτων οπλισμού. Ο κανονισμός αυτός περιλαμβάνει πλήρη μεθοδολογία υπολογισμού της ευστάθειας της οπλισμένης γης με ορισμό των συνδυασμών φόρτισης, των καταστάσεων ελέγχου και των τιμών των επιμέρους συντελεστών ασφαλείας (Νάσκος 2007).

#### Βήματα σχεδιασμού

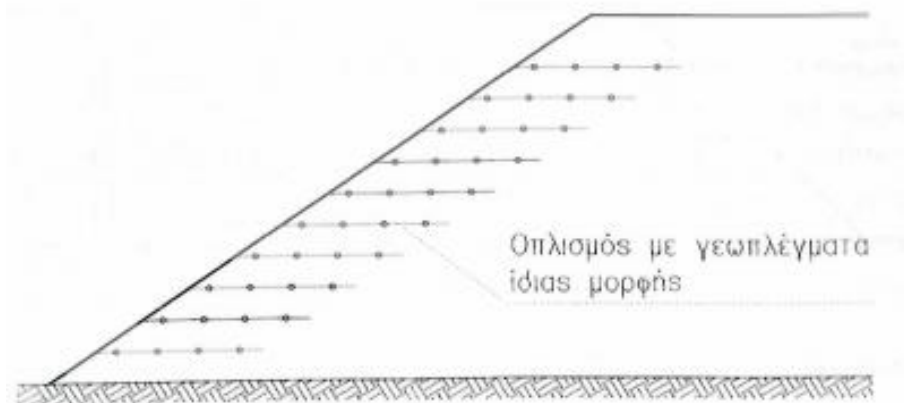
1. Υπολογισμός της επιτρεπόμενης δύναμης ( $T_{allow}$ ) με βάση τους δοθείσαντες μειωτικούς συντελεστές και τότε να υπολογιστεί και η απαιτούμενη δύναμη ( $T_{reqd}$ ) που εμπεριέχει τον συντελεστή ασφαλείας (βλ. Σχ.3.2).
2. Προσδιορισμός των διάφορων σχεδιαστικών και εδαφικών παραμέτρων.



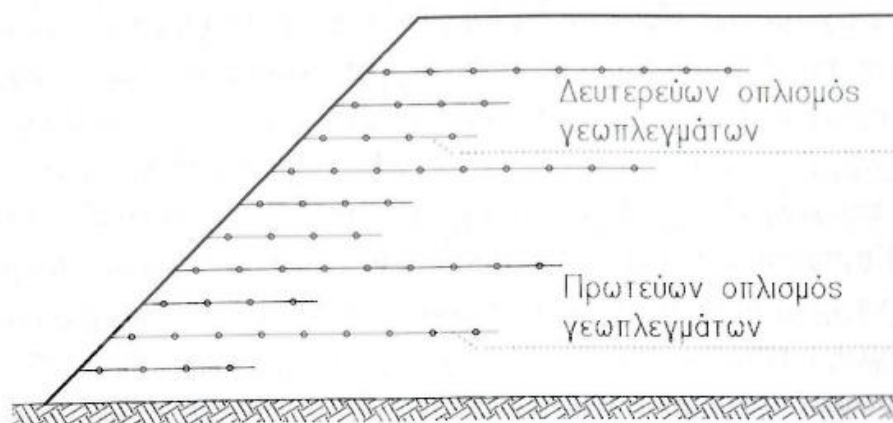
3. Υπολογισμός των κενών στην βάση του πρανούς και τελικός υπολογισμός του αριθμού των λωρίδων γεωπλεγμάτων, όπου και οι τάσεις είναι οι μέγιστες.
4. Επιλογή του βέλτιστου μήκους ενίσχυσης.
5. Έλεγχος μήκους στη βάση μέσω συμβατικών μεθόδων χρησιμοποιώντας ολόκληρη τη μηχανικά σταθεροποιημένη μάζα εδάφους .
6. Έλεγχος μεταξύ των διαφορετικών συμπεριφορών των γεωπλεγμάτων στο σημείο αγκύρωσης, πίσω από το υποθετικό επίπεδο διάτμησης. Όταν υπάρχει δίλημμα για το τι μήκος γεωπλέγματος πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο σχεδιαστής συνήθως επιλέγει αυτό με μήκος μεγαλύτερο του απαιτούμενου.
7. Τέλος, σχεδιασμός του τελικού ενισχυμένου πρανούς και παροχή συγκεκριμένων χρήσιμων πληροφοριών, όπως η απόσταση μεταξύ των πλεγμάτων, το ύψος του πρανούς, κα (Koerner 2012).

### **Οδηγίες τοποθέτησης οπλισμού**

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η κατασκευή επιχωμάτων σε περιοχές με περιορισμένες εκτάσεις .Θα γίνει προσπάθεια αύξησης της κλίσης τους μέσω της χρήσης πολυμερικού οπλισμού και πιο συγκεκριμένα γεωπλεγμάτων. Αναλυτικότερα, σε ήπιες κλίσεις επιχωμάτων οι απαιτήσεις όπλισης είναι περιορισμένες και ικανοποιούνται από γεωσυνθετικά υλικά χαμηλής αντοχής και μικρού μήκους,βλ. Σχήμα 3-2. Από την άλλη, η αύξηση της κλίσης, οδηγεί σε αύξηση των απαιτήσεων τόσο στην αντοχή όσο και στο μήκος των στοιχείων όπλισης βλ. Σχήμα 3-3. Στο Σχήμα 3-3 παρατηρούνται δύο τύποι οπλισμών κάτι που γίνεται για λόγους οικονομίας. Πιο συγκεκριμένα ο κύριος οπλισμός έχει μεγαλύτερη αντοχή και μήκος και τοποθετείται για την εξασφάλιση του πρανούς έναντι βαθιάς επιφάνειας ολίσθησης ενώ ο δευτερεύων οπλισμός έχει μικρότερο μήκος και αντοχή συνήθως και τοποθετείται για να ενισχύσει την αντίσταση σε επιφάνειες που διέρχονται σε μικρό βάθος από την εξωτερική επιφάνεια του πρανούς. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως και στις δύο περιπτώσεις είναι ευεργετική και ιδιαίτερης σημασίας, η δυνατότητα ανάληψης των εφελκυστικών δυνάμεων από τα στοιχεία ενίσχυσης σε μικρές παραμορφώσεις, συμβατές με την παραμόρφωση εκδήλωσης της μέγιστης διατμητικής αντίστασης του εδάφους (Κωμοδρόμος 2019).



Σχήμα 3-2 Οπλισμένο επίχωμα ήπιας σχετικά κλίσης και με γεωπλέγματα μικρού μήκους (Κωμοδρόμος 2019)



Σχήμα 3-3 Οπλισμένο επίχωμα απότομης κλίσης και με γεωπλέγματα δύο τύπων (Κωμοδρόμος 2019)

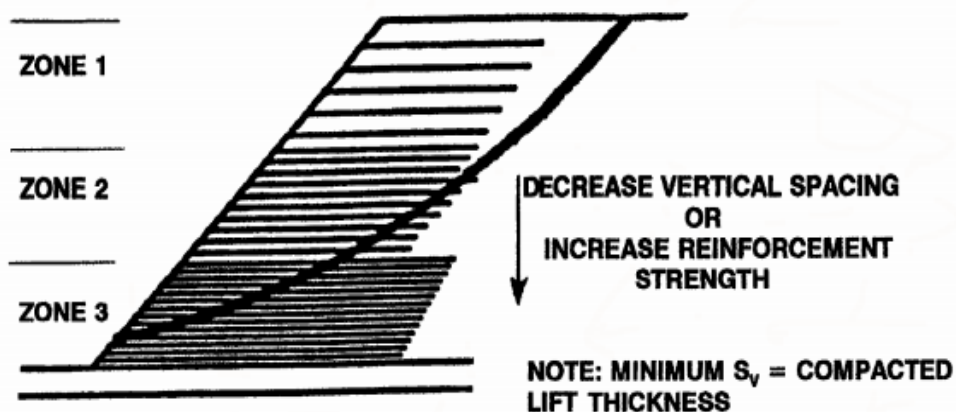
### **Μήκη και αποστάσεις οπλισμών**

Το μήκος των οπλισμών προκύπτει κατόπιν των ελέγχων ευστάθειας. Σύμφωνα με τις γαλλικές οδηγίες, το ελάχιστο μήκος είναι  $L \geq 0,4H_m$  στον πόδα, ( $H_m$ =το στατικό ύψος του οπλισμένου επιχώματος). Ο σχεδιασμός ως προς το μήκος των οπλισμών καθ' ύψος θα πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε να σχηματίζεται κατά το δυνατόν ένα γεωμετρικώς κανονικό οπλισμένο πρίσμα. Οι αλλαγές μήκους μεταξύ των δύο γειτονικών οπλισμών δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν το  $\Delta L = 0,15H_m$ .

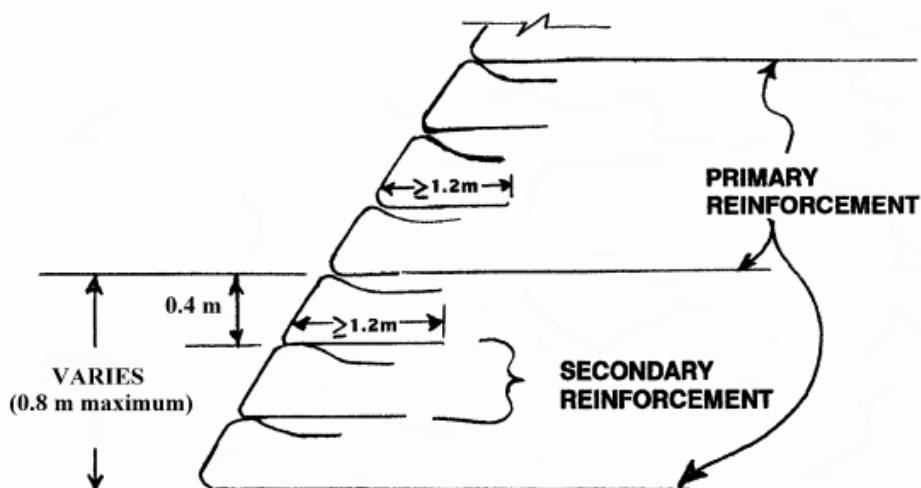
Μικρά μήκη οπλισμού μπορούν να χρησιμοποιούνται με ιδιαίτερη προσοχή εφόσον το επιτρέπει το έδαφος θεμελίωσης και το οπίσθιο άοπλο τμήμα (π.χ. να διατίθεται υψηλή φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης, το άοπλο τμήμα να είναι με καλά συμπυκνωμένο υλικό επιχώματος ή αποτελούμενο από φυσικό υλικό πρανούς που δεν μεταβιβάζει οριζόντια ώθηση). Τέλος, σύμφωνα με τις γαλλικές οδηγίες, οι αποστάσεις καθ' ύψος των οπλισμών  $S_v$  πρέπει να είναι ακέραια πολλαπλάσια του

καθοριζόμενου συμπυκνωμένου πάχους των επιμέρους στρώσεων του γεωυλικού κατασκευής του επιχώματος, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική συμπύκνωση. Συνίσταται αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών από 0.2m έως 0.8m και όχι να υπερβαίνουν το 1m, ώστε το οπλισμένο σώμα του επιχώματος να διατηρεί ομογενή συμπεριφορά.

Σε περίπτωση που το υλικό που χρήζει υποστήριξης, είναι μεταλλευτικές αποθέσεις, μπορούν να ληφθούν και μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών, εντούτοις, αυτός ο σχεδιασμός χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση ώστε να εφαρμοστεί σωστά. Τέλος, ο σωστός σχεδιασμός είναι το σημαντικότερο κομμάτι του έργου, καθώς είναι αυτός που θα καθορίσει εμμέσως και το κόστος όλης της κατασκευής. Στο Σχήμα 3-4 που ακολουθεί παρατηρείται πως στην βάση του συγκεκριμένου πρανού έχει τοποθετηθεί πυκνότερα ο οπλισμός, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της αντοχής της ενίσχυσης. Αυτός είναι και ένας γενικός κανόνας, δηλαδή ότι στην βάση των πρανών τοποθετείται πυκνότερα ο οπλισμός από ότι στην στέψη τους. Τέλος στο Σχήμα 3-5 που ακολουθεί, παρατηρείται η τοποθέτηση δύο ειδών οπλισμού, όπως και στο άνωθι Σχήμα 3-2, με την διαφορά ότι τώρα φαίνονται κάποια συνιστώμενα μήκη και αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών (Ένωση Επιστημόνων της Εγνατία Οδός ΑΕ 2007, Νάσκος 2007).



Σχήμα 3-4 Αποστάσεις έναντι αντοχής ενίσχυσης (Elias et al. 2001)



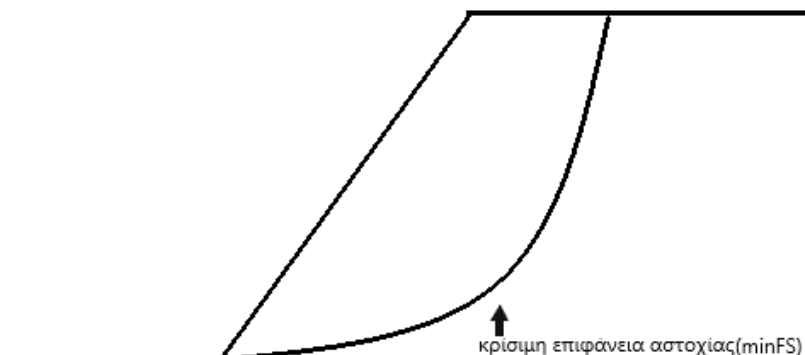
Σχήμα 3-5 Τοποθέτηση κύριας και δευτερεύουσας ενίσχυση (Elias et al. 2001)

### Συντελεστής Ασφαλείας

Για την διεξαγωγή των ελέγχων, παρουσιάζονται στη συνέχεια δύο δυνατότητες:

**α.** Γενικευμένη εφαρμογή μερικών συντελεστών επί των φορτίσεων και των παραμέτρων αντοχής των γεωϋλικών και των γεωπλεγμάτων καθώς και επί της μεθοδολογίας. Στην περίπτωση αυτή, οι επιλύσεις θα πρέπει να καταλήγουν σε γενικό συντελεστή ασφαλείας (συντελεστή υπερδιαστασιολόγησης)  $\Gamma_{tot} \geq 1,0$  κατά τα καθοριζόμενα στον Ευροκώδικα 7, την NF P94-220 και τον ΕΑΚ.

**β.** Εναλλακτική δυνατότητα επιλύσεων κατ' αντιστοιχία των ΟΜΟΕ. Στην περίπτωση αυτή προτείνεται η εφαρμογή μερικών συντελεστών ασφαλείας σε ότι αφορά την εφελκυστική αντοχή και την αντοχή σε εξόλκευση των γεωπλεγμάτων καθώς και επί της φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελίωσης και επί της μεθοδολογίας. Οι λοιποί μερικοί συντελεστές τίθενται ίσοι προς την μονάδα. Οι επιλύσεις αυτές θα πρέπει να καταλήγουν σε ολικό συντελεστή ασφαλείας με προτεινόμενη τιμή  $FS \geq 1.4$ . Πιο συγκεκριμένα, οι μεταλλευτικοί σωροί χρειάζονται μεσαία ως υψηλή ευστάθεια με  $\min FS = 1.4$ . Γενικώς επιδιώκεται πάντα συντελεστής ασφαλείας:  $\min FS >$  απαιτούμενου  $FS$ . Επιπλέον, πρέπει να αναφερθεί πως η τοποθέτηση γεωπλεγμάτων στα πρανή έχει μεγάλη επίδραση στον συντελεστή ασφαλείας ο οποίος αυξάνεται σημαντικά. Τέλος σε περίπτωση που ο κρίσιμος μηχανισμός αποτυχίας τέμνει την ενίσχυση ο συντελεστής ασφαλείας 1.4 δεν επαρκεί.



Σχήμα 3-6 Πρανές και κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας

### 3.5 Γεωτεχνικό πρόγραμμα Slide2 της Rocscience

Το πρόγραμμα Slide2 της εταιρείας Rocscience είναι ένα λογισμικό γεωτεχνικής μηχανικής που χρησιμοποιεί τη μέθοδο οριακής ισορροπίας (limit equilibrium method) σε δύο διαστάσεις (2D), για την ανάλυση ευστάθειας εδαφικών ή βραχωδών πρανών. Το πρόγραμμα υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας (safety factor - FS), αλλά και την πιθανότητα αστοχίας (probability of failure - PF), σε κυκλικές και σύνθετες επιφάνειες αστοχίας ενός πρανούς.

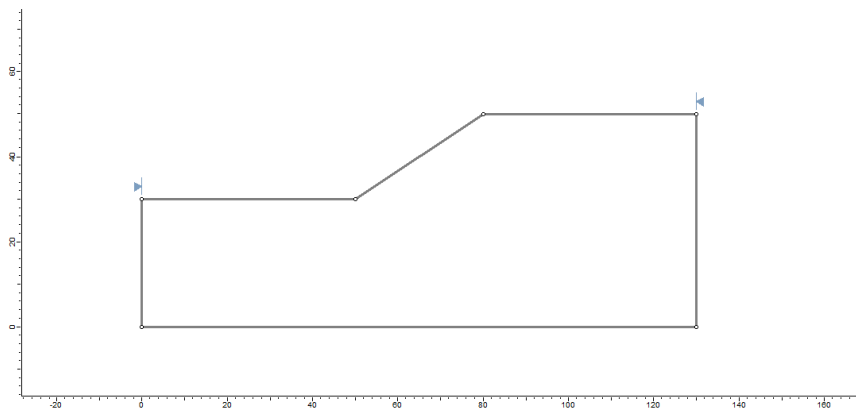
#### 3.5.1 Χρήση γεωπλεγμάτων στο γεωτεχνικό πρόγραμμα Slide2

Η διαδικασία της τοποθέτησης στοιχείων οπλισμού σε ένα πρανές που μελετάται στο πρόγραμμα είναι μια εύκολη διαδικασία που απαιτεί όμως την απαραίτητη προεργασία, δηλαδή σωστή μελέτη και κατάλληλο σχεδιασμό από τον επιβλέποντα μηχανικό. Οι αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας θα μας δίνουν συντελεστές ασφαλείας σύμφωνα με τις μεθόδους οριακών ελέγχων ευστάθειας Bishop, Fellenius Janbu, Spencer (όπου ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας είναι  $FS=1.4$ ) καθώς και μέσω της ανάλυσης με Ευρωκώδικα 7 (όπου ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας είναι  $FS=1$ , λόγω κάποιων μερικών συντελεστών με τους οποίους πολλαπλασιάζονται οι διαιρούνται οι γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού).

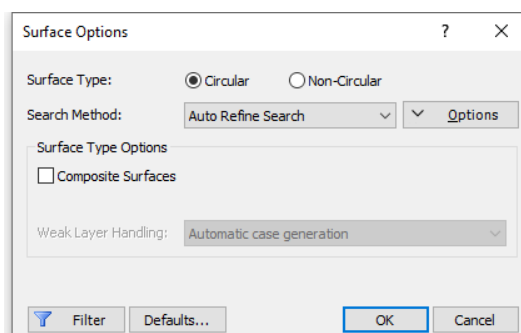
Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα πιο σημαντικά από τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν ώστε να επιτευχθεί τελικά η σωστή όπλιση του πρανούς :

#### **Βήμα 1<sup>ο</sup>**

Το πρώτο βήμα και το σημαντικότερο είναι η σωστή εισαγωγή των διαστάσεων του έργου στο πρόγραμμα καθώς και η επιλογή του είδους της επιφάνειας ολίσθησης (κυκλική ή μη), όπου επιλέγουμε τις κυκλικές επιφάνειες για την εύρεση του κρισιμότερου μηχανισμού αστοχίας .



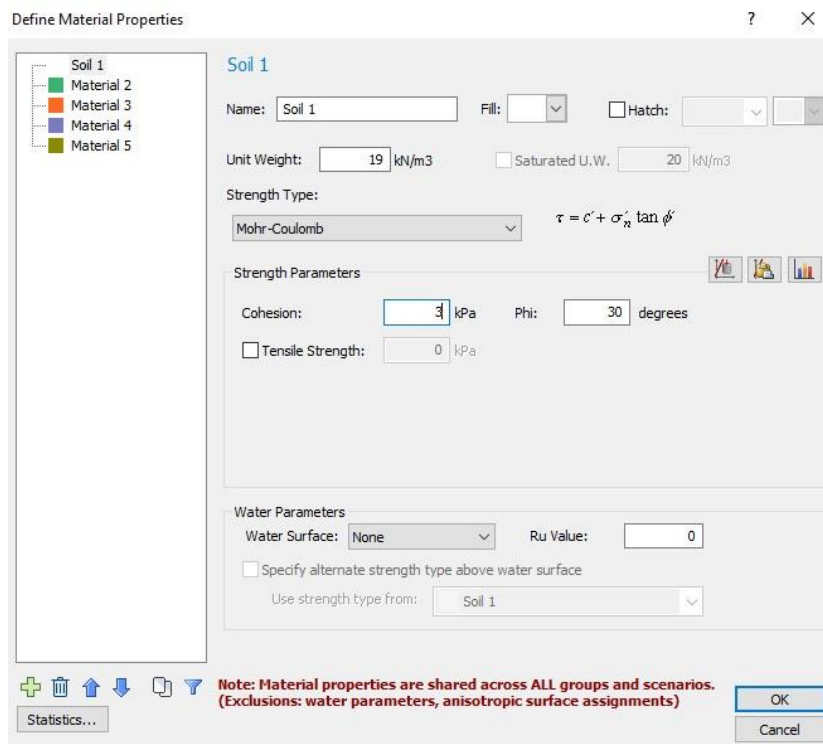
Εικόνα 3.9 Πρανές στο Slide2



Εικόνα 3.10 Επιλογή τύπου επιφάνειας ολίσθησης

### **Βήμα 2<sup>ο</sup>**

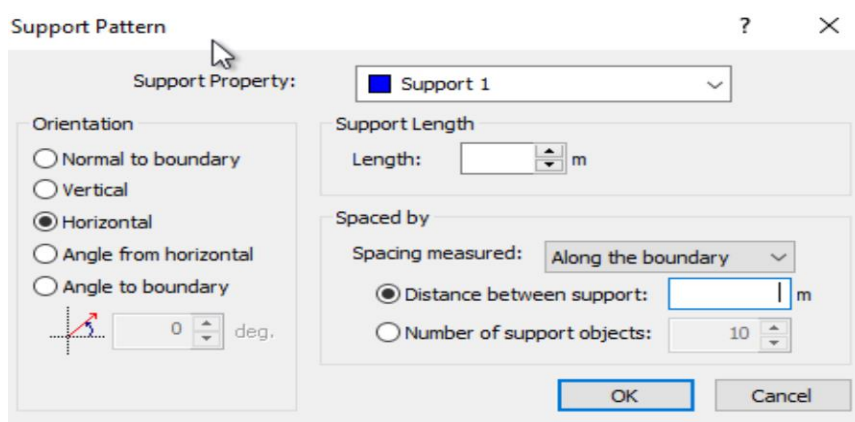
Στο βήμα αυτό ορίζονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά (ειδικό βάρος, συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής), του/των υλικού/ων από τα οποία αποτελείται το πρανές που μελετάται.



Εικόνα 3.11 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού του πρανούς

### **Βήμα 3<sup>ο</sup>**

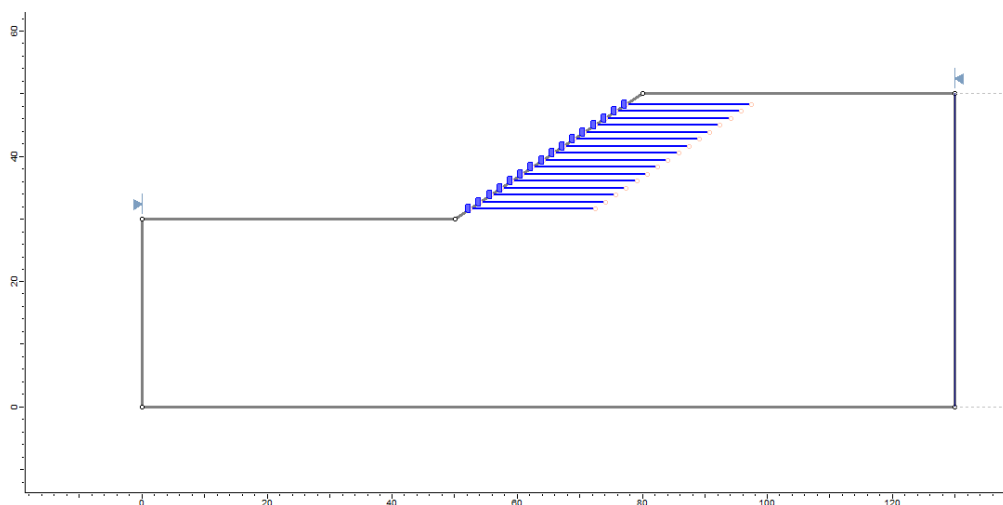
Στο βήμα αυτό μέσω της εντολής “Support” του προγράμματος, επιλέγουμε “Add Support Pattern” και αφού εμφανιστεί το κάτωθι παράθυρο επιλέγουμε με βάση τους κανόνες διαστασιολόγησης που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο “Support Length” και “Distance between support” καθώς και “Orientation”, που στην δική μας περίπτωση, ο σπλισμός επειδή είναι γεωπλέγματα, θα τοποθετηθεί οριζόντια.



Εικόνα 3.12 Ορισμός διαστάσεων σπλισμού

### **Βήμα 4°**

Τοποθέτηση του συστήματος οπλισμού, πριν ορίσω τι γεωσυνθετικό υλικό είναι.

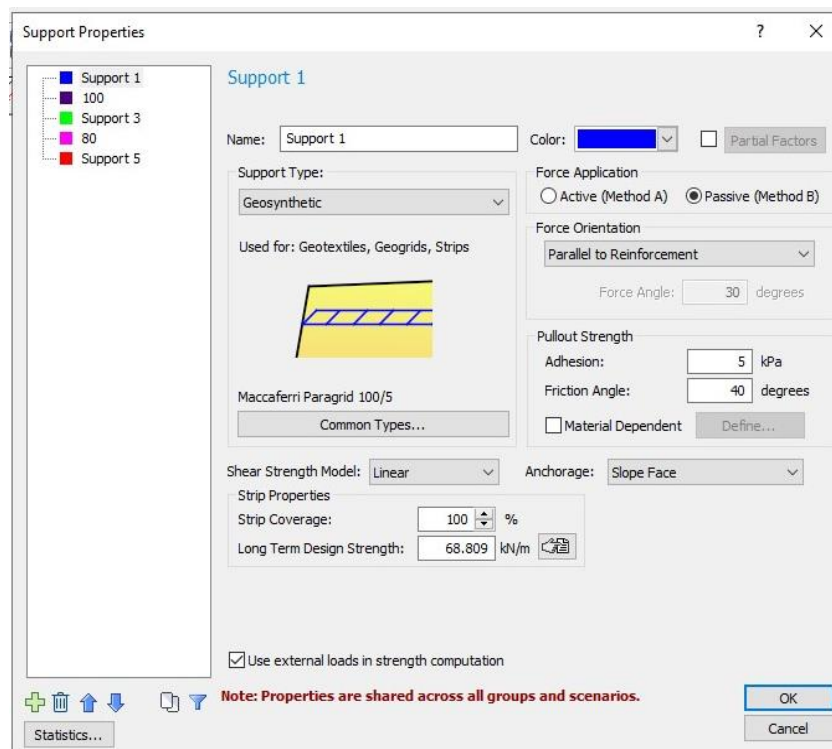


Εικόνα 3.13 Τοποθέτηση του συστήματος οπλισμού

### **Βήμα 5°**

Σε αυτό το βήμα μέσω των εντολών “Properties” και στην συνέχεια “Support Properties” επιλέγεται το είδος του οπλισμού και εμμέσως η εφελκυστική του αντοχή καθώς, η εφαρμογή της δύναμης ( Active ή Passive) καθώς και η καλυπτικότητα που θέλουμε να έχει το γεωσυνθετικό υλικό. Εμείς επιλέγουμε γεωσυνθετικά και μέσω της εντολής “Common Types” επιλέγουμε μάρκα γεωπλεγμάτων και επιθυμητή εφελκυστική αντοχή, παθητική εφαρμογή δύναμης και 100% καλυπτικότητα μεταξύ των λωρίδων που οπλισμού. Τα κελιά Adhesion & Friction Angle τα αφήνουμε ως έχουν.

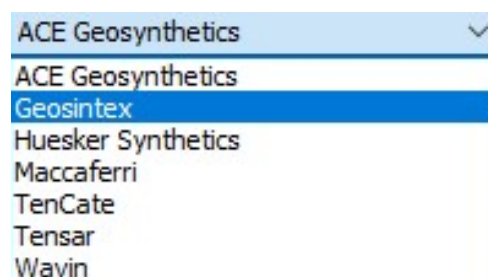




Εικόνα 3.14 Επιλογή είδους σπλισμού

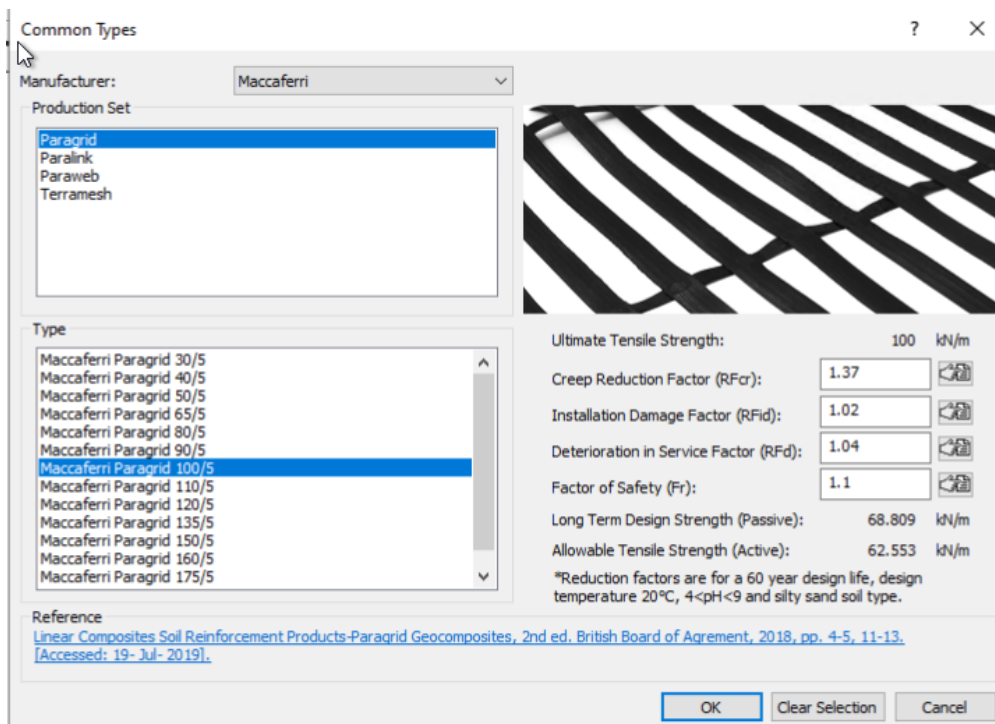
### **Βήμα 6<sup>ο</sup>**

Σε συνέχεια του προηγούμενου βήματος και πιο συγκεκριμένα της εντολής “Common Types”, εμφανίζονται οι παρακάτω κατασκευαστές γεωσυνθετικών υλικών:



Εικόνα 3.15 Κατασκευαστές γεωσυνθετικών υλικών

Επιλέγοντας έναν κατασκευαστή λαμβάνουμε την παρακάτω εικόνα:

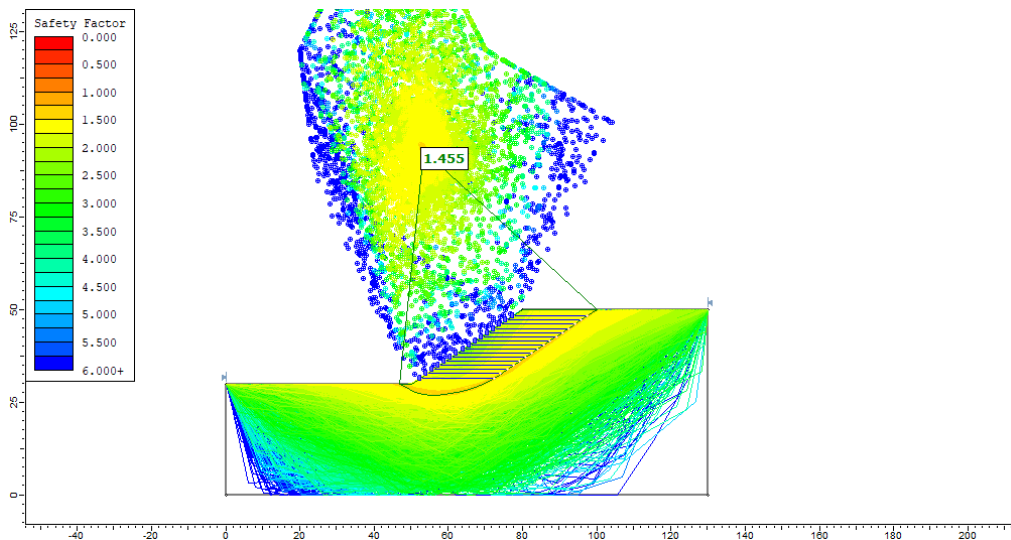


Εικόνα 3.16 Προϊόντα και χαρακτηριστικά συγκεκριμένου κατασκευαστή

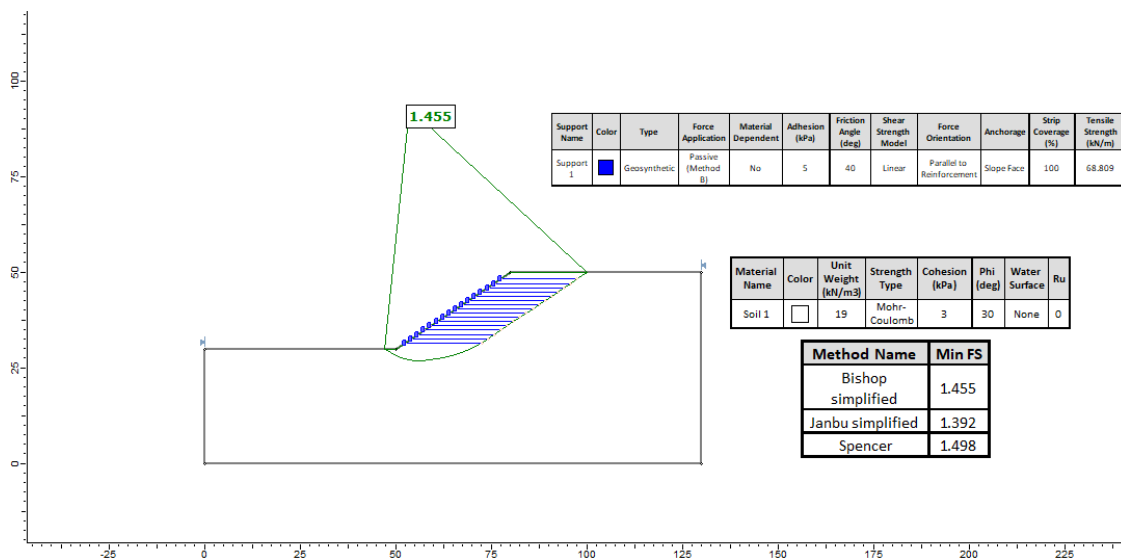
Σε αυτή την περίπτωση έχουμε επιλέξει τον κατασκευαστή Maccaferri και μπορούμε να παρατηρήσουμε τα προϊόντα που διαθέτει (πάνω αριστερά) καθώς και τις εφελκυστικές αντοχές που αυτά διαθέτουν οι οποίες περιγράφονται από το πρώτο σετ αριθμών του τύπου πχ. 30/5. Εμείς επιλέγουμε Paragrid (αφού θα τοποθετήσουμε γεωπλέγματα) και μια εφελκυστική αντοχή 100kN/m. Κάτω από την ενδεικτική φωτογραφία του γεωπλέγματος υπάρχουν κάποιοι μειωτικοί συντελεστές (ερπυσμού, τοποθέτησης, αλλοίωσης), του υλικού που αναφέρονται σε συγκεκριμένη χρονική διάρκεια, συγκεκριμένο pH και θερμοκρασία καθώς και σε συγκεκριμένους τύπους εδαφών. Τέλος, δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές μακροχρόνιας αντοχής σχεδιασμού και επιτρεπόμενης εφελκυστικής αντοχής.

### **Βήμα 7<sup>ο</sup>**

Όταν έχουμε φτάσει στο βήμα αυτό, είμαστε πλέον έτοιμοι να πραγματοποιήσουμε την ανάλυση μας μέσω διαδοχικών κλικ στις εντολές "Compute" και "Interpret" ώστε το πρόγραμμα να μας δώσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης μας. Στην **Εικόνα 3-19**, βλέπουμε όλους του κύκλους που βρήκε το πρόγραμμα καθώς επίσης είναι χρωματισμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνεται αντιληπτό σε ποια περιοχή του συντελεστή ασφαλείας ανήκουν. Επίσης βλέπουμε στην **Εικόνα 3-20** πως ο κρισιμότερος κύκλος που εντόπισε χαρακτηρίζεται από επαρκή συντελεστή ασφαλείας (όχι υπερβολικά μεγαλύτερο του επιθυμητού), συνεπώς ο σχεδιασμός μας ήταν σωστός και δεν υπήρξε υπερδιαστασιολόγηση.



Εικόνα 3.17 Όλες οι πιθανές επιφάνειες ολίσθησης



Εικόνα 3.18 Η κρισιμότερη επιφάνεια ολίσθησης

### 3.5.2 Σχόλια – Συμπεράσματα

Τα παραπάνω βήματα αποτελούν την βασική διαδικασία που απαιτείται να ακολουθηθεί από τον μηχανικό προκειμένου να επιτύχει την σωστή όπλιση του πρανούς που τον απασχολεί. Το πρόγραμμα Slide 2 δίνει την ευκαιρία στον μηχανικό να αναπαραστήσει και να μελετήσει με μεγάλη ακρίβεια το εκάστοτε πρανές. Η ποικιλία των τύπων οπλισμού, των μηκών, των αποστάσεων και των εφελκυστικών τους αντοχών δίνει την δυνατότητα πειραματισμού και εύρεσης της βέλτιστης λύσης, αποφεύγοντας έτσι την υπερδιαστασιολογηση και την αύξηση του κόστους του έργου.

## 4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΟΠΛΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο μελετώνται επιχώματα εξορυκτικών αποβλήτων, τα οποία εμφανίζουν συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες εδάφους. Οι αναλύσεις ευστάθειας θα πραγματοποιηθούν με τη χρήση του γεωτεχνικού προγράμματος Slide2 της εταιρίας Rocscience. Οι μέθοδοι ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθούν ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας (FS) είναι η απλοποιημένη μέθοδος Bishop (Bishop simplified), η απλοποιημένη μέθοδος Janbu (Janbu simplified), η μέθοδος Spencer και η μέθοδος GLE/Morgernstern-Price. Στο πλαίσιο της εργασίας θα μελετηθεί η ολική ευστάθεια των πρανών (“Global Stability”), δηλαδή θα τεθούν τα όρια μέσα στα οποία θα γίνεται η ανάλυση, με τρόπο ώστε να μην λαμβάνονται υπόψιν αβαθείς (επιφανειακές) επιφάνειες αστοχίας του πρανού που εμφανίζουν πολύ μικρούς συντελεστές ασφαλείας. Στην επόμενη ενότητα ακολουθούν οι προσομοιώσεις και οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν.

### 4.2 Τα άοπλα πρανή

Με τον όρο «άοπλα» επιχώματα αναφερόμαστε σε σωρούς υλικών που δεν έχουν δεχτεί κανενός είδους ενίσχυση. Η ευστάθεια των εν λόγω επιχωμάτων οφείλεται αποκλειστικά στη διατμητική αντοχή των γεωυλικών (συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής). Παρακάτω παρατίθενται ο συγκεντρωτικός πίνακας με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του εδάφους τους.

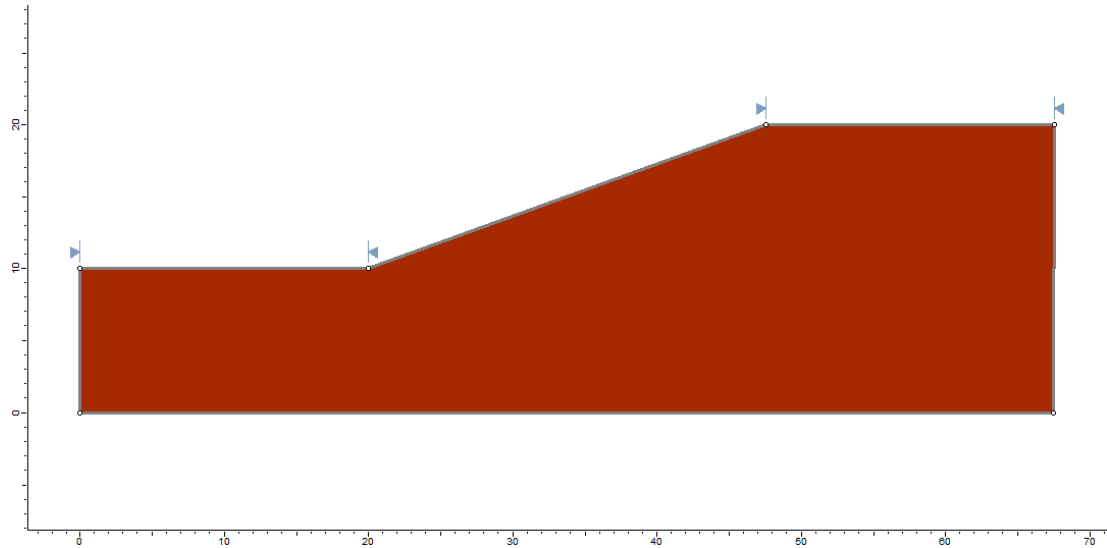
Πίνακας 4-1 Πληροφορίες για τη γεωμετρία και το υλικό των πρανών

Ύψος	Κλίση	Συνοχή	Ειδικό βάρος	Γωνία εσωτ. τριβής
H1 = 10m	$\beta_1 = 20^\circ$	$c_1' = 0,5 \text{Kpa}$	$\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$	$\phi' = 15^\circ - 45^\circ$
H2 = 50m	$\beta_2 = 30^\circ$	$c_2' = 10 \text{Kpa}$		
H3 = 150m	$\beta_3 = 40^\circ$			

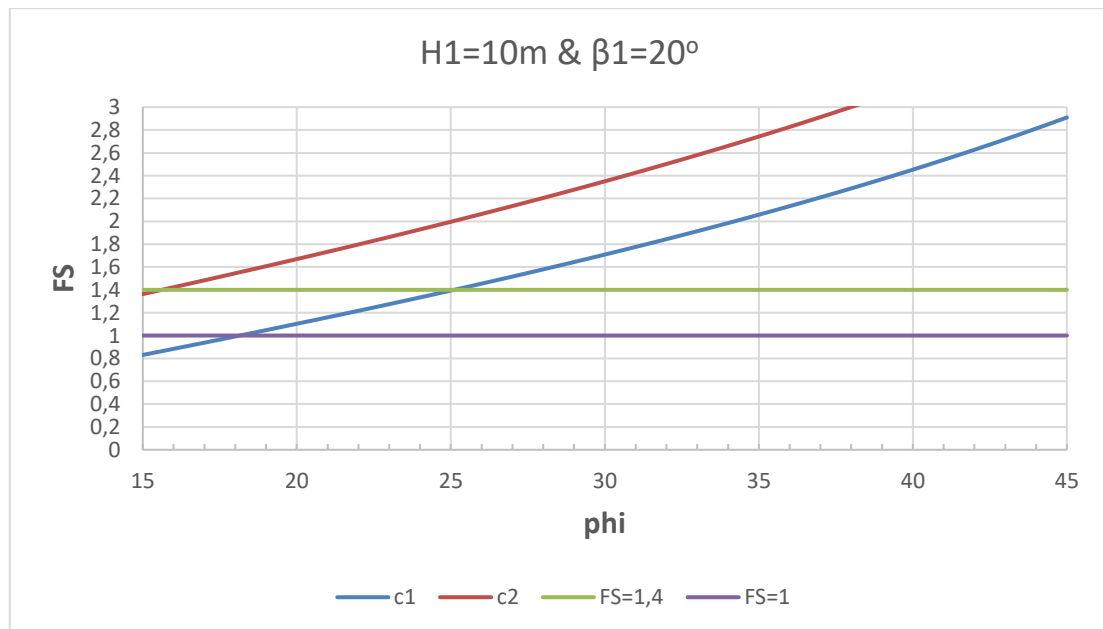
Για τα κάτωθι επιχώματα έγιναν οι καμπύλες των 2 διαφορετικών συνοχών σε διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας (FS) συναρτήσεως της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού ( $\phi$ ). Τα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω:

#### 4.2.1 Πρανές ύψους 10m

##### A) Κλίση 20°

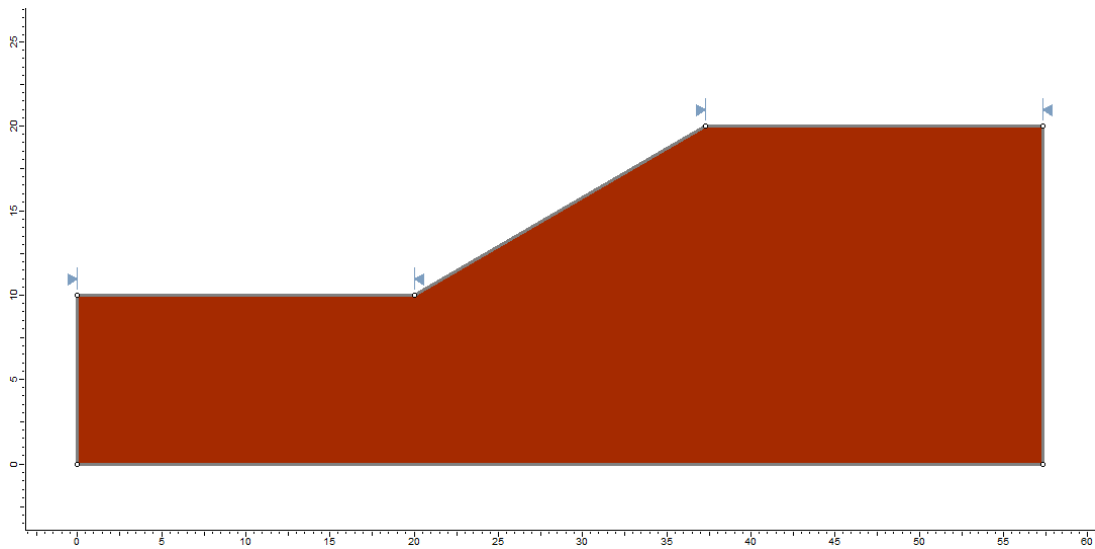


Σχήμα 4-1 Άσπλο πρανές ύψους 10m και κλίσης 20°

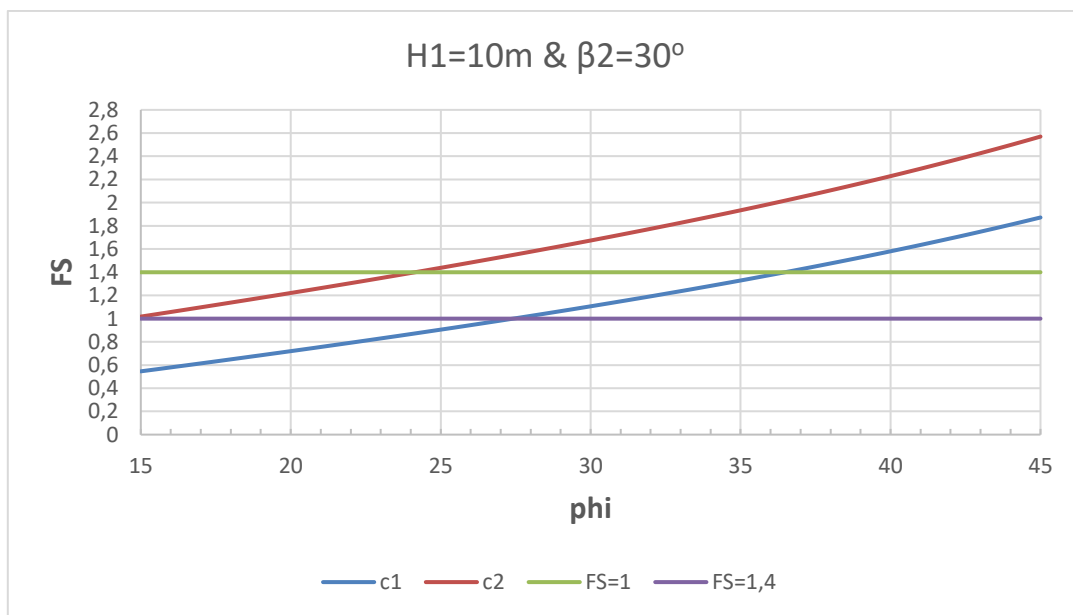


Διάγραμμα 4-1 (FS-phi) για πρανές με H=10m και β=20°

## Β) Κλίση 30°

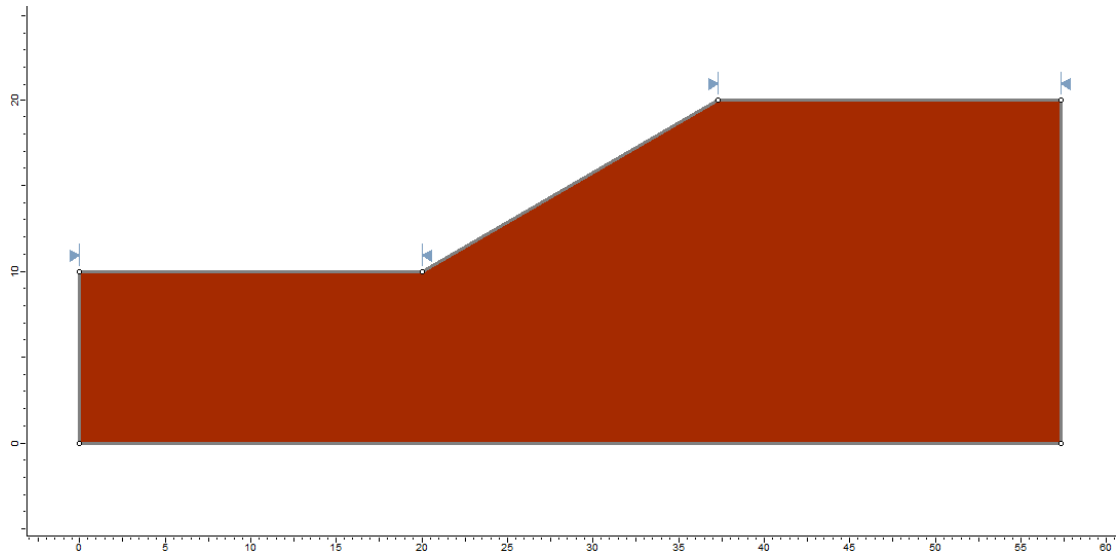


Σχήμα 4-2 Άοπλο πρανές ύψους 10m και κλίσης 30°

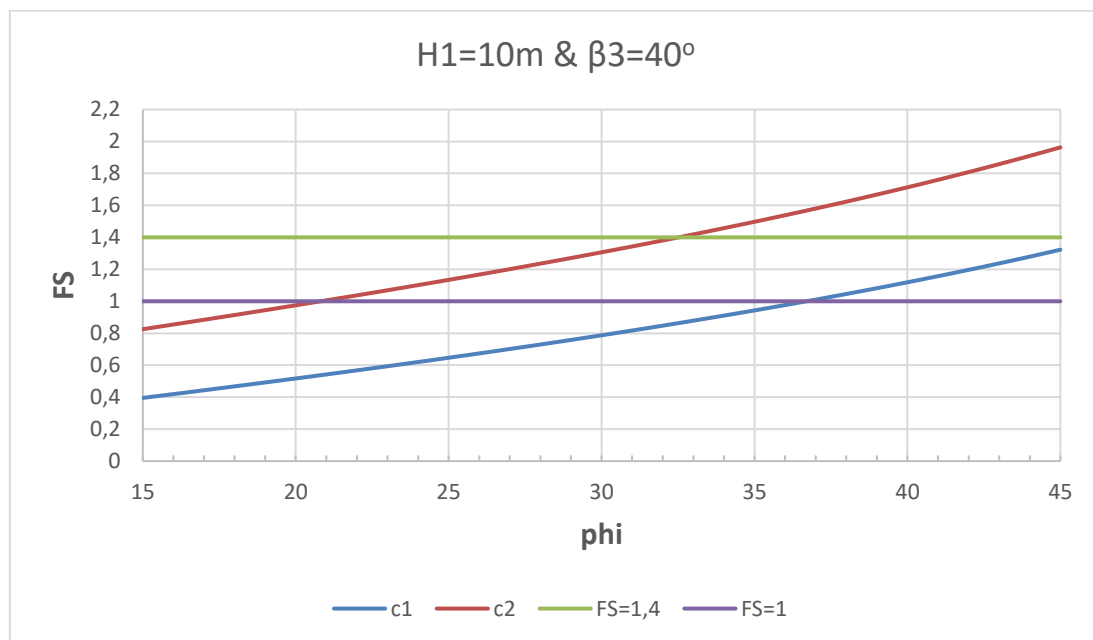


Διάγραμμα 4-2 (FS-phi) για πρανές με H=10m και  $\beta=30^\circ$

### Γ) Κλίση 40°



Σχήμα 4-3 Άοπλο πρανές ύψους 10m και κλίσης 40°



Διάγραμμα 4-3 (FS-phi) για πρανές με H=10m και  $\beta=40^\circ$

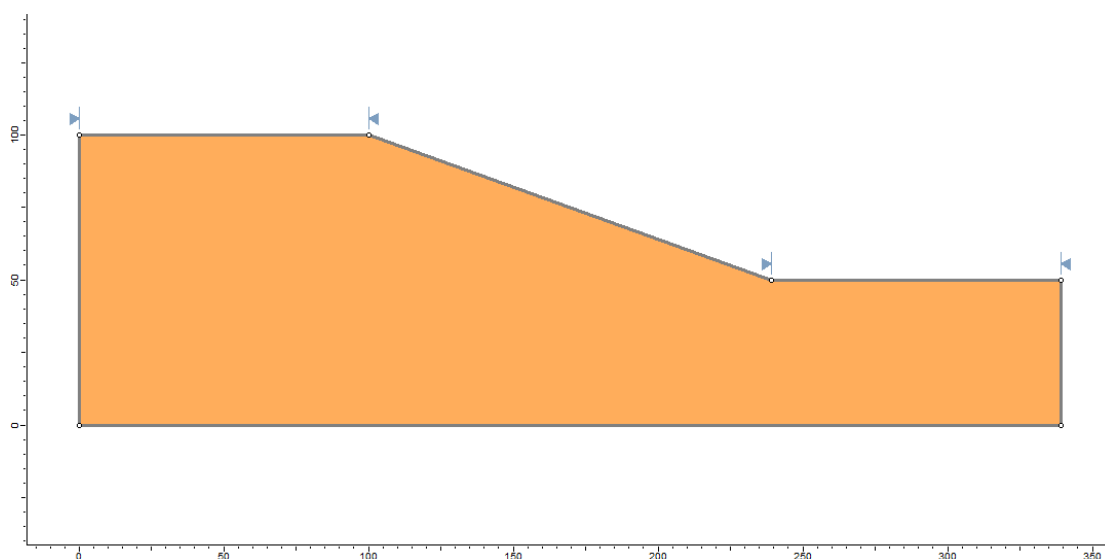
Το παραπάνω επίχωμα ύψους H=10m, είναι ένα σχετικά χαμηλό επίχωμα το οποίο παρουσιάζει διαφορετικές απαιτήσεις στις τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής,

ανάλογα με την συνοχή και την κλίση του επιχώματος και δεν θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στην συνέχεια.

#### 4.2.2 Πρανές ύψους 50m

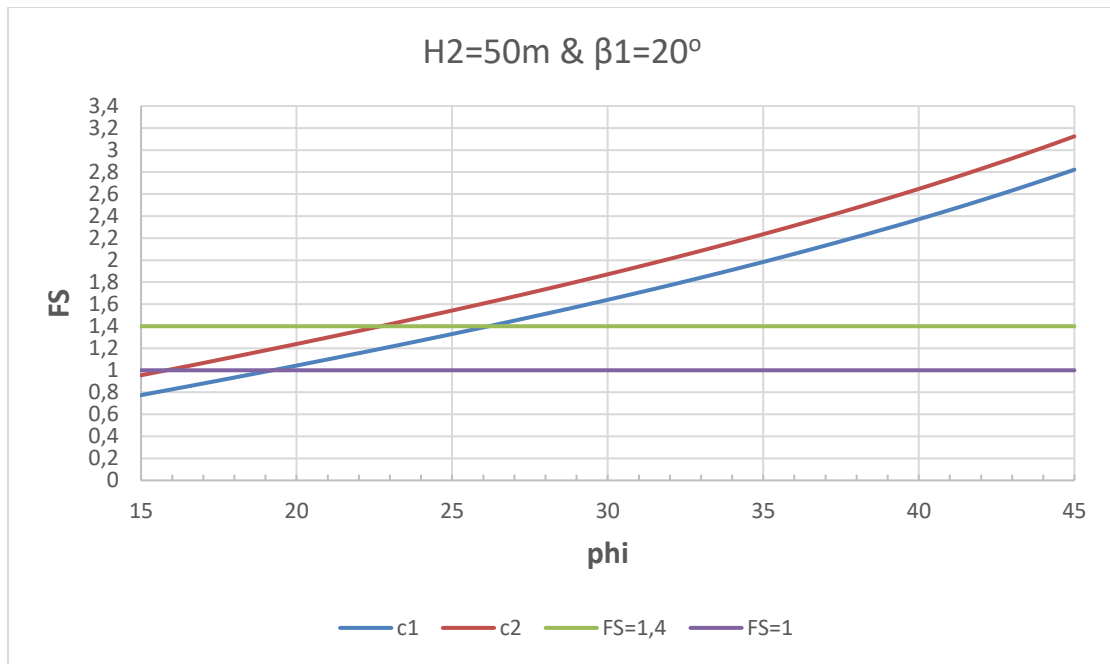
Το παρακάτω επίχωμα ύψους  $H=50\text{m}$ , είναι ένα μεσαίου ύψους επίχωμα το οποίο παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον και θα μας απασχολήσει στην συνέχεια για το πώς μπορεί να οπλιστεί κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί αύξηση της κλίσης του.

##### A) Κλίση $20^\circ$



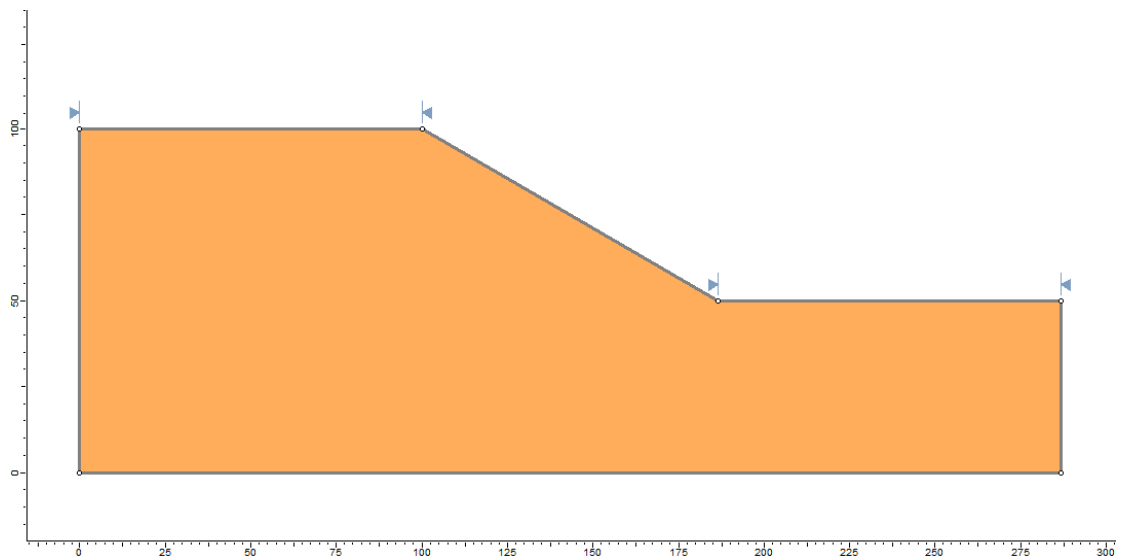
Σχήμα 4-4 Άοπλο πρανές ύψους 50m και κλίσης  $20^\circ$



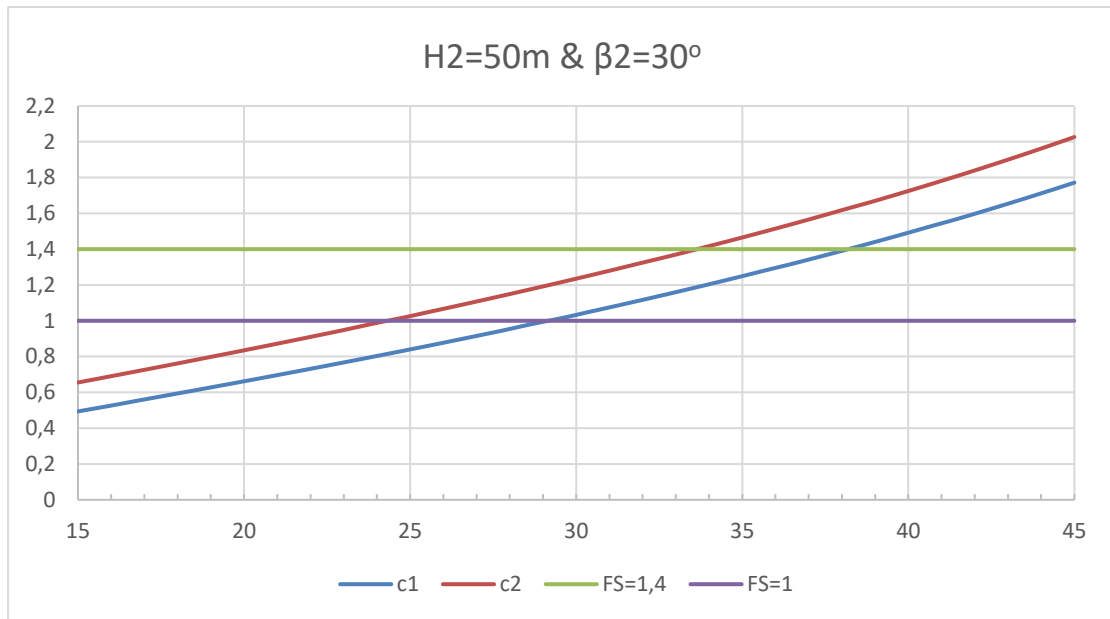


Διάγραμμα 4-4 (FS- $\phi$ ) για πρανές με  $H=50\text{m}$  και  $\beta=20^\circ$

### Β) Κλίση $30^\circ$

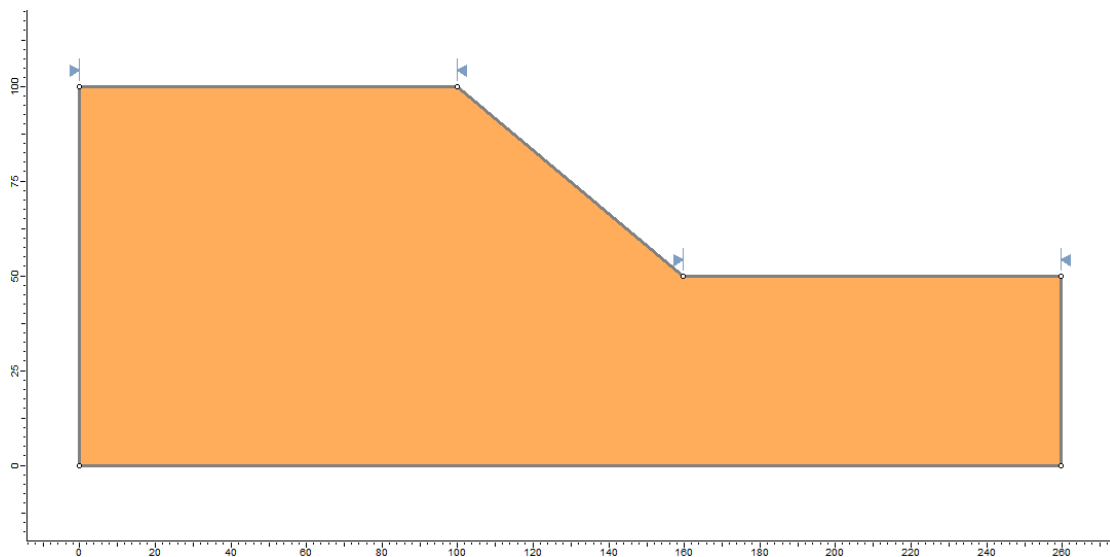


Σχήμα 4-5 Άοπλο πρανές ύψους 50m και κλίσης  $30^\circ$

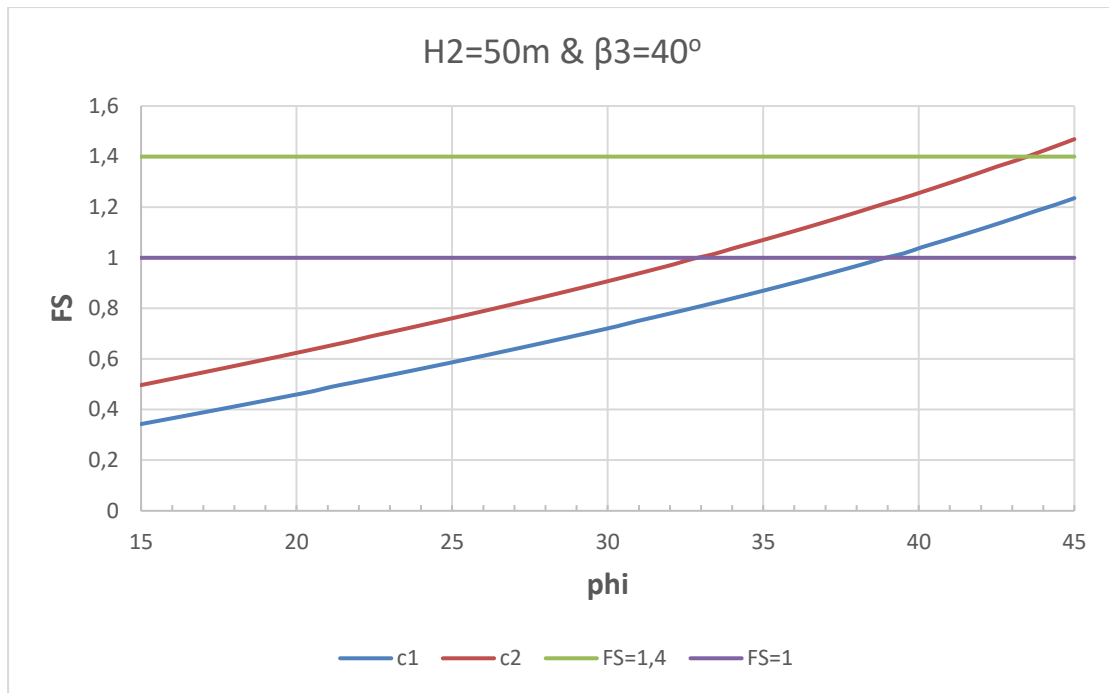


Διάγραμμα 4-5 (FS-phi) για πρανές με  $H=50m$  και  $\beta=30^\circ$

### Γ) Κλίση $30^\circ$



Σχήμα 4-6 Άοπλο πρανές ύψους 50m και κλίσης  $40^\circ$

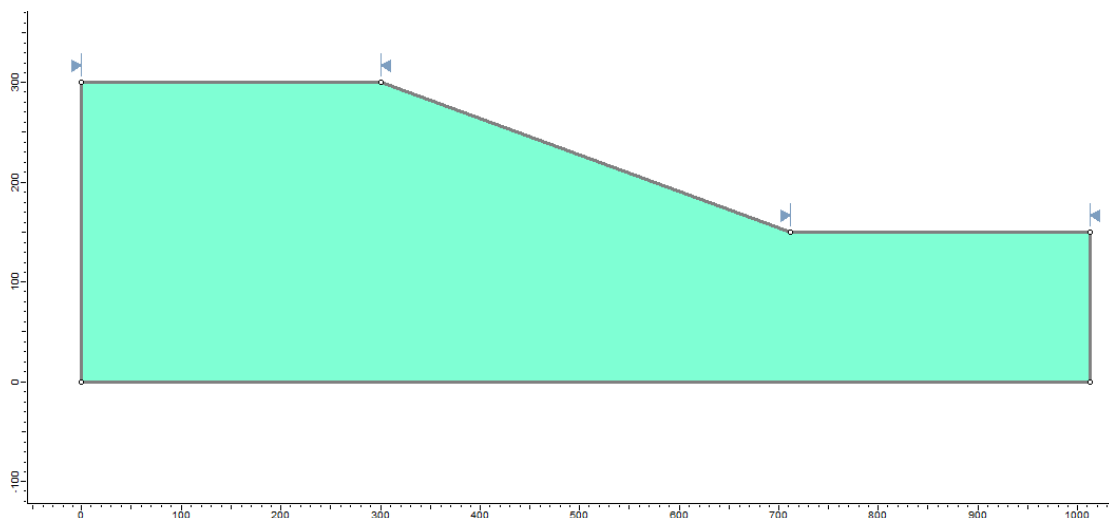


Διάγραμμα 4-6 (FS- $\phi$ ) για πρανές με  $H=50m$  και  $\beta=40^\circ$

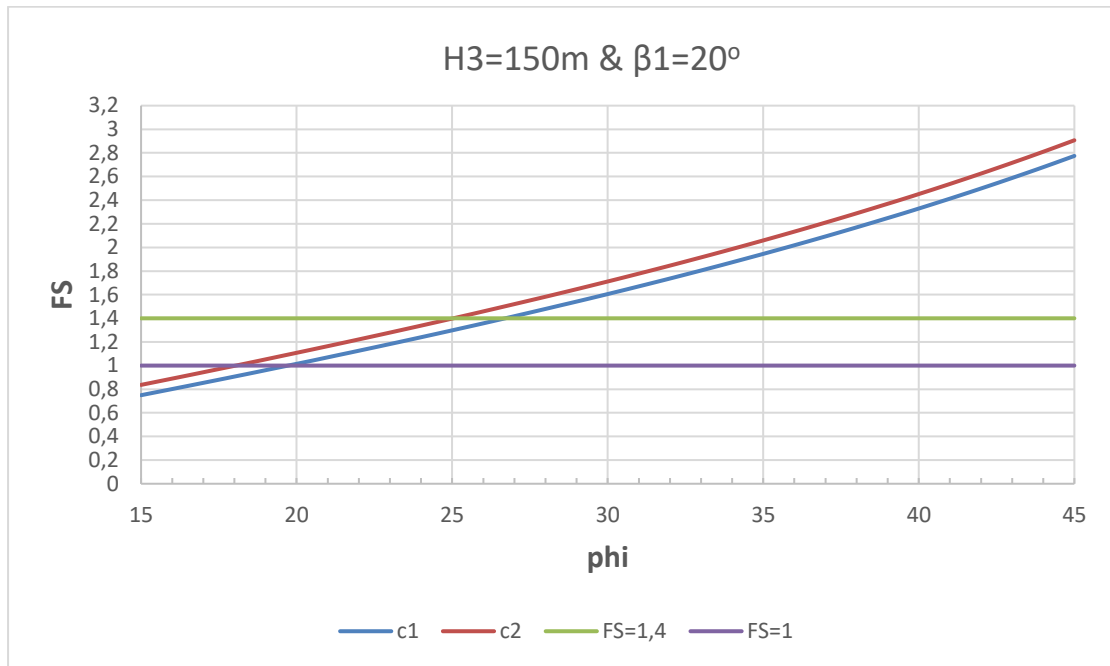
#### 4.2.3 Πρανές ύψους 150m

Το πρανές ύψους 150m που παρατίθενται παρακάτω είναι μεγάλου ύψους και είναι αρκετά δύσκολη και με πολλά έξοδα η διαδικασία οπλισμού του.

##### A) Κλίση $20^\circ$

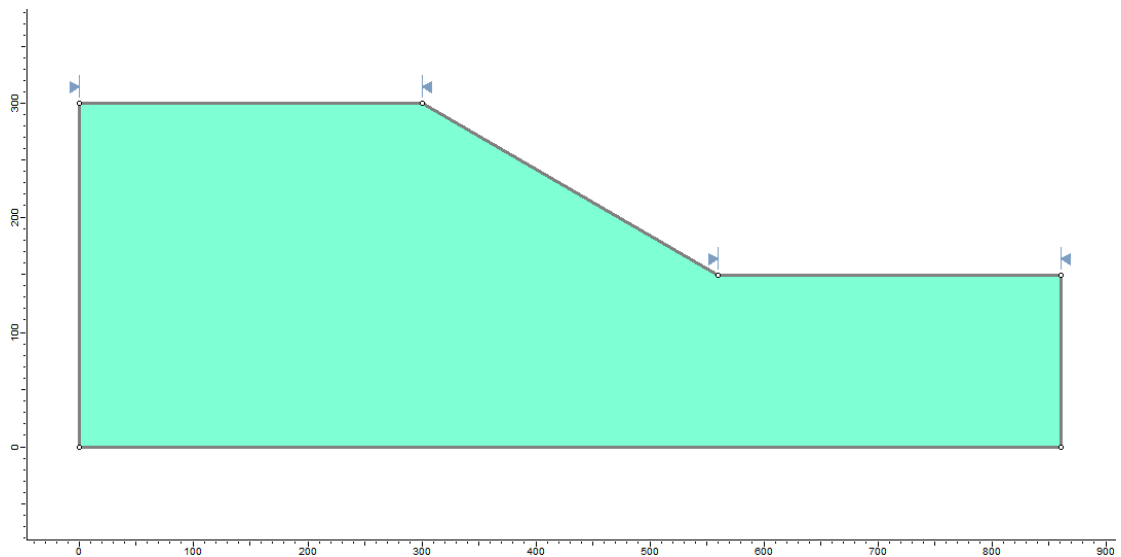


Σχήμα 4-7 Άοπλο πρανές ύψους 150m και κλίσης  $20^\circ$

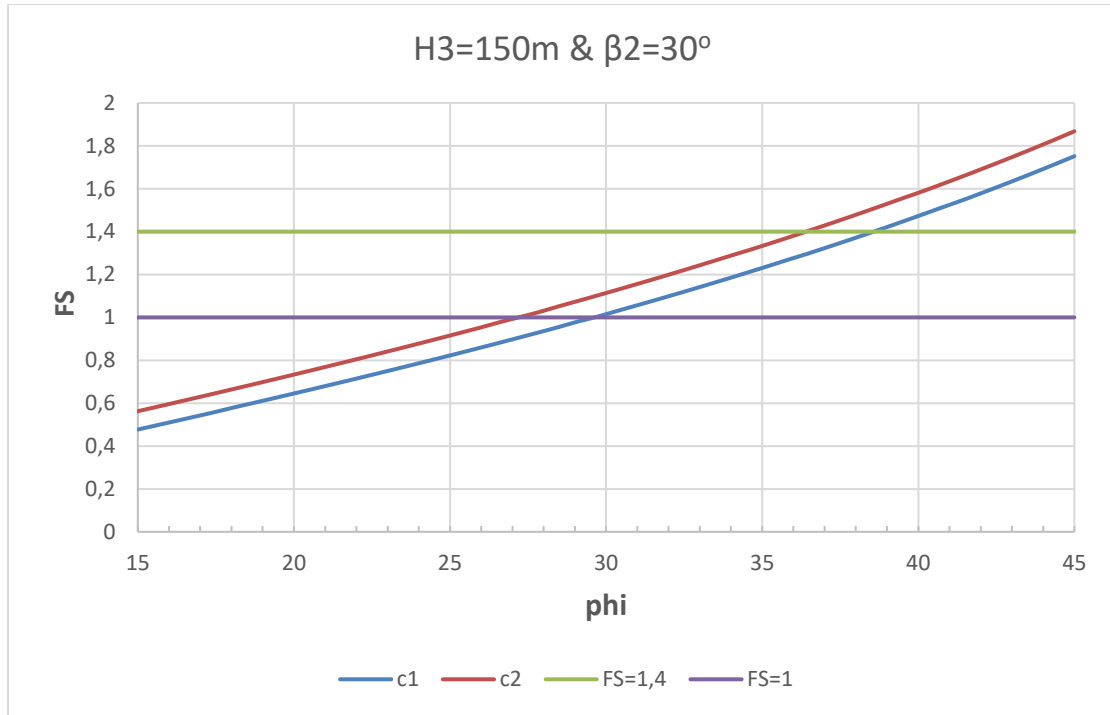


Διάγραμμα 4-7 (FS- $\phi$ ) για πρανές με  $H=150\text{m}$  και  $\beta=20^\circ$

### Β) Κλίση $30^\circ$

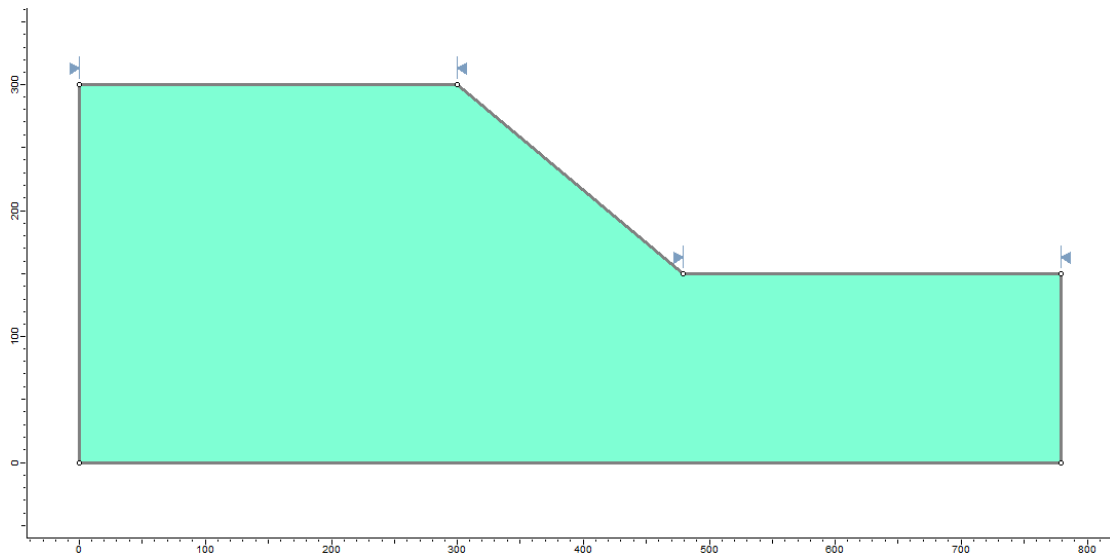


Σχήμα 4-8 Άοπλο πρανές ύψους 150m και κλίσης  $30^\circ$

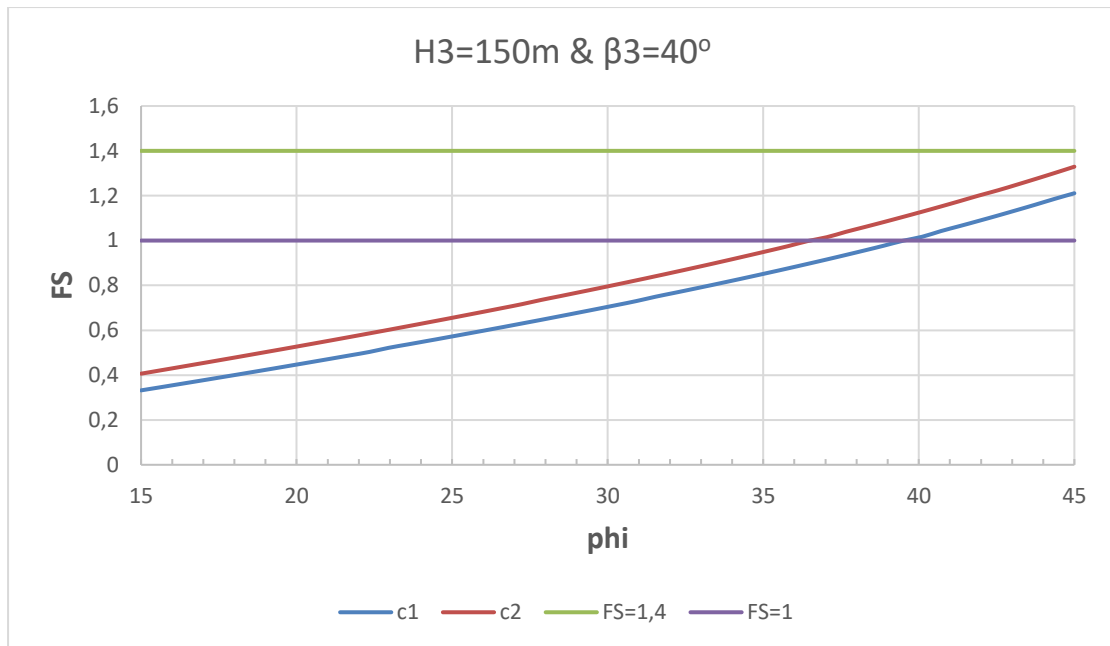


Διάγραμμα 4-8 (FS-phi) για πρανές με  $H=150\text{m}$  και  $\beta=30^\circ$

### Γ) Κλίση $40^\circ$



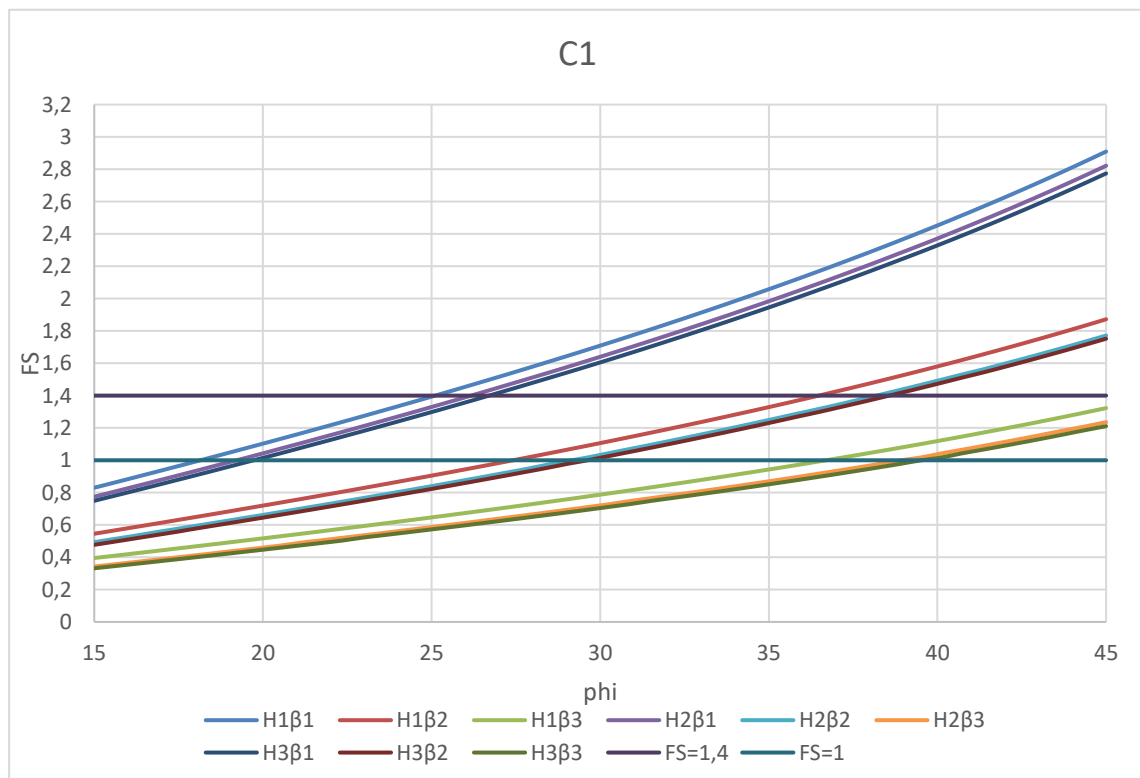
Σχήμα 4-9 Άοπλο πρανές ύψους  $150\text{m}$  και κλίσης  $40^\circ$



Διάγραμμα 4-9 (FS-phi) για πρανές με  $H=150\text{m}$  και  $\beta=40^\circ$

#### 4.2.4 Συγκεντρωτικά διαγράμματα FS-phi και πίνακες για C1 και C2

##### A) Συνοχή $C_1=0.5\text{Kpa}$

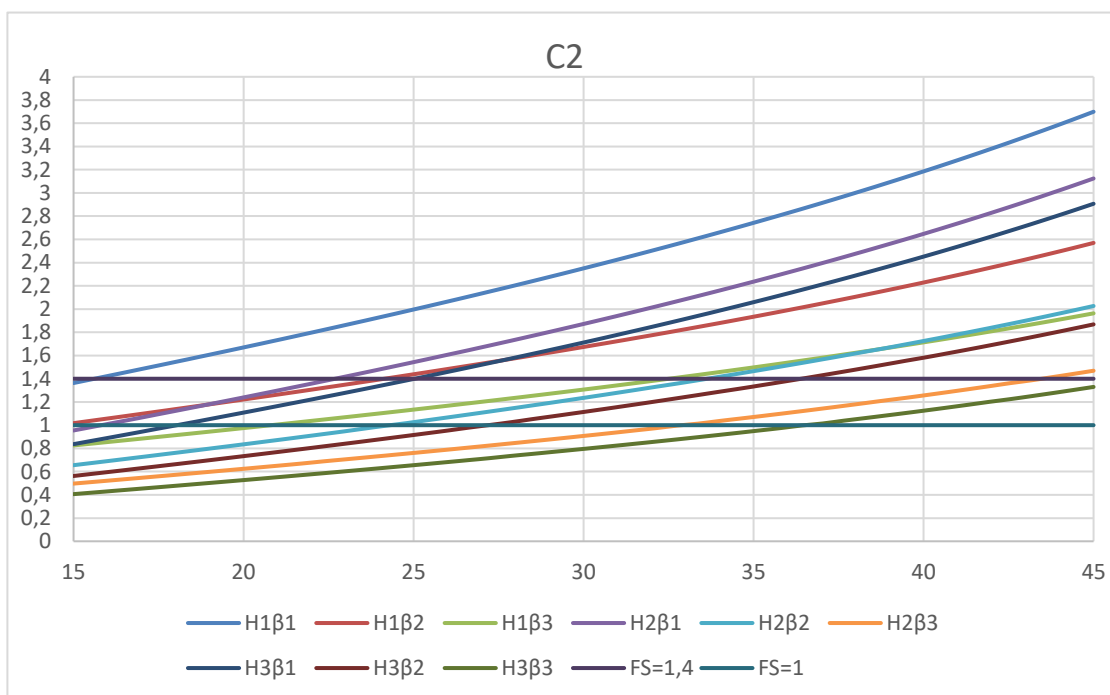


Διάγραμμα 4-10 (FS-phi) για συνοχή  $C_1 = 0.5 \text{ kPa}$

Πίνακας 4-2 Γωνίες τριβής  $\phi'$  (°) για τις οποίες  $FS = 1.4$  (θεώρηση  $c_1' = 0.5$  kPa)

	$\beta$ (°)		
H (m)	20	30	40
<b>10</b>	25°	36,5°	>45°
<b>50</b>	26°	38°	>45°
<b>150</b>	26,5°	38,5°	>45°

### B) Συνοχή $C_2=10$ Κρα



Διάγραμμα 4-11 (FS- $\phi$ ) για συνοχή C2

Πίνακας 4-3 Γωνίες τριβής  $\phi'$  (°) για τις οποίες  $FS = 1.4$  (θεώρηση  $c_2' = 10$  kPa)

	$\beta$ (°)		
H (m)	20	30	40
<b>10</b>	15,8°	23,5°	32,5°
<b>50</b>	22,5°	33,5°	43,5°
<b>150</b>	25°	36,5°	>45°

Από τα παραπάνω διαγράμματα και τους συγκεντρωτικούς πίνακες διαπιστώνουμε ότι :

A) Για όλα τα ύψη και κλίσεις όταν έχουμε συνοχή  $c1'=0.5\text{kra}$ , απαιτούνται μεγαλύτερες γωνίες εσωτερικής τριβής, από όταν έχουμε συνοχή  $c2'=10\text{kra}$ , ώστε να επιτευχθεί ένας συντελεστής ασφαλείας  $FS=1.4$ .

B) Στο χαμηλό πρανές με ύψος  $H1=10\text{m}$ , για κλίση  $\beta=20^\circ$ , παρατηρείται πως απαιτείται μικρή γωνία εσωτερικής τριβής ( $\phi'=25^\circ$ ).

Γ) Αντιθέτως όταν η κλίση  $\beta$  λαμβάνει τιμές  $30^\circ$  και  $40^\circ$  αντίστοιχα, οι απαιτήσεις για γωνία εσωτερικής τριβής αυξάνονται σημαντικά, κάτι που όταν έχουμε εξορυκτικά απόβλητα δεν μπορεί να ισχύσει. Αντίστοιχα συμβαίνει και για τα μεγαλύτερα ύψη, όπου και τα πράγματα γίνονται ακόμα πιο δύσκολα στις μεγάλες κλίσεις πρανών.

Οι συνθήκες που επικρατούν στις προσομοιώσεις είναι στραγγισμένες και εφαρμόζονται οι παρακάτω τύποι:

**Για μη συνεκτικό έδαφος ( $c1'=0.5\text{kra}$ )**

$$FS = \frac{\tan\phi'}{\tan\beta}$$

**Για συνεκτικό έδαφος ( $c2'=10\text{kra}$ )**

$$FS = \frac{2c'}{\gamma H \sin(2\beta)} + \frac{\tan\phi'}{\tan\beta}$$

Από τους τύπους αυτούς παρατηρούμε πως για  $c'=0\text{kra}$ , ο συντελεστής ασφαλείας εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το ημίγειο της εφαπτομένης της γωνίας εσωτερικής τριβής ( $\phi'$  ή  $\phi$ ), και την εφαπτομένη της κλίσης του πρανού. Από την άλλη για  $c'=10\text{kra}$ , παρατηρούμε πως ο συντελεστής ασφαλείας εξαρτάται από κάποιες επιπλέον παραμέτρους που είναι η συνοχή, το ύψος του πρανού και το ειδικό βάρος του υλικού.

Στην δική μας περίπτωση αναλύσεων χρησιμοποιούμε μια τιμή συνοχής ( $c'=0.5\text{kra}$ ), ώστε να εξασφαλίζεται το γεγονός ότι τα αποτελέσματα που θα λάβουμε θα είναι πιο ακριβή.

Τέλος στο Κεφάλαιο 5 που ακολουθεί θα δούμε τα παραπάνω επιχώματα σε ποια κλίση μπορούν να είναι ασφαλή χωρίς οπλισμό και πως αυτή μπορεί να επηρεαστεί με την χρήση κατάλληλου οπλισμού, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη σχέση μεταξύ κέρδους και δαπανών.



## 5 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

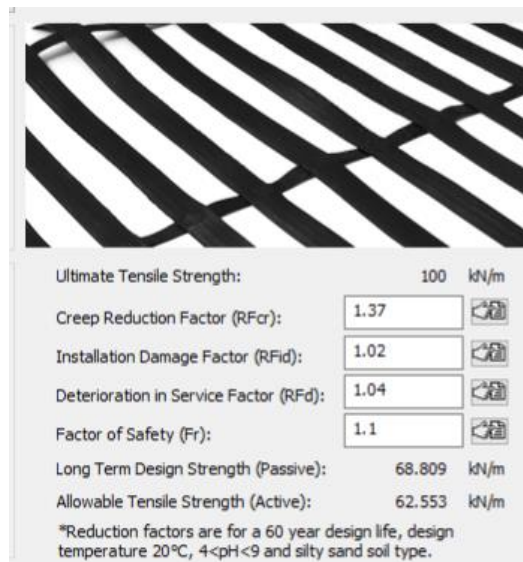
### 5.1 Τα οπλισμένα πρανή

Με τον όρο «οπλισμένα» πρανή, αναφερόμαστε σε σωρούς υλικών οι οποίες έχουν δεχτεί την απαραίτητη υποστήριξη ώστε να επιτευχθεί η σταθερότητά τους σε ένα συγκεκριμένο ύψος και κλίση. Η όπλιση τους γίνεται με γεωπλέγματα, με στόχο της αύξηση της κλίσης τους και συνεπώς της χωρητικότητας τους και αυτό λόγω της έλλειψης εκτάσεων για την αποθήκευση τους και του μεγάλου κόστους αγοράς περισσότερων. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να έχει έξοδα για την επιχείρηση αλλά σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί με σύνεση, το όφελος μπορεί να είναι μεγαλύτερο.

Στην παρούσα μελέτη θα παρουσιαστούν κάποιες από τις βέλτιστες λύσεις που βρέθηκαν μετά από πολλές δοκιμές και αναλύσεις, για το πρανές H1=10m με μια κλίμακα  $0,25\beta \leq \Delta\beta \leq 0,6\beta$ , για το πρανές H2=50m,  $0,17\beta \leq \Delta\beta \leq 0,285\beta\%$  και για το πρανές H3=150m  $\Delta\beta=0,09\beta$ .

#### 5.1.1 Οπλισμός-Γεωπλέγματα

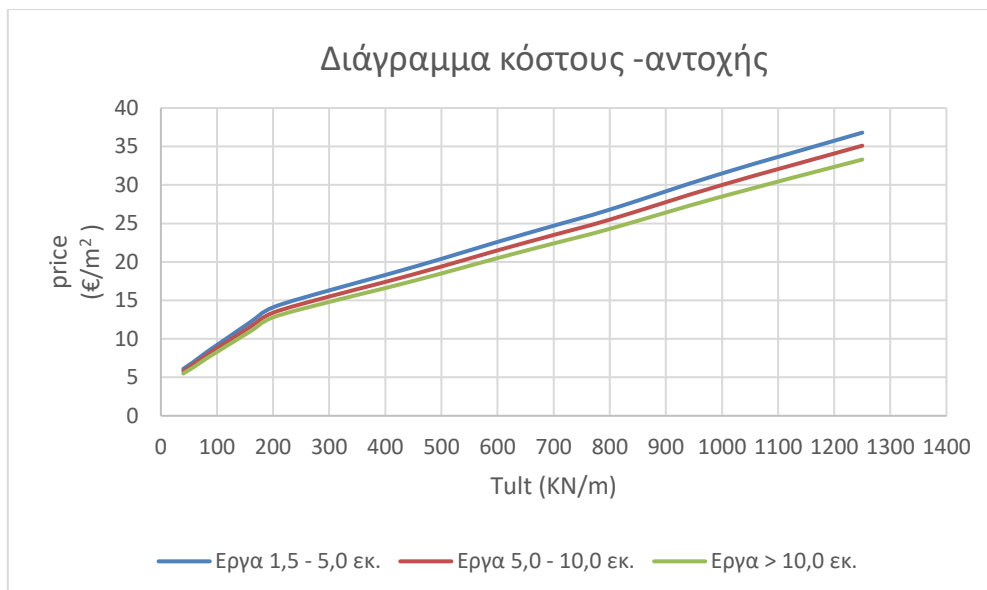
Για την ενίσχυση των πρανών επιλέγουμε γεωπλέγματα που ανήκουν στην κατηγορία Paragrids της εταιρίας Maccafferrri. Στην παρακάτω εικόνα ενδεικτικά φαίνονται συντελεστές απομείωσης της εφελκυστικής αντοχής του γεωπλέγματος, η μακροπρόθεσμη αντοχή σχεδιασμού και η επιτρεπόμενη αντοχή σε εφελκυσμό. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζονται με σειρά οι συντελεστές, μείωσης ερπυσμού, ζημιάς εγκατάστασης και μείωσης λειτουργικότητας. Οι συντελεστές αυτοί διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο και είναι απαραίτητο να λαμβάνονται για λόγους μεγαλύτερης ακρίβειας και ασφάλειας.



Εικόνα 5.1 Συντελεστές απομείωσης αντοχής γεωπλέγματος

Πίνακας 5-1 Ενδεικτικό κόστος οπλισμού

Οπλισμός	Εργα 1,5 - 5,0 εκ.	Εργα 5,0 - 10,0 εκ.	Εργα > 10,0εκ.
40	6,10	5,80	5,50
50	6,60	6,30	5,95
60	7,10	6,80	6,40
80	8,20	7,80	7,40
100	9,20	8,80	8,30
120	10,20	9,70	9,20
160	12,20	11,60	11,00
200	14,10	13,40	12,80
300	16,30	15,50	14,80
400	18,30	17,40	16,60
500	20,40	19,40	18,50
600	22,60	21,50	20,50
700	24,70	23,50	22,40
800	26,80	25,50	24,30
1000	31,50	30,00	28,50
1250	36,80	35,10	33,30



Διάγραμμα 5-1 Κόστος – Αντοχή πλέγματος

Μελετώντας το παραπάνω διάγραμμα, κάποιος καταλήγει στα εξής συμπεράσματα:

- i) Όσο μεγαλύτερη είναι η εφελκυστική αντοχή (Tult), τόσο μεγαλύτερη και η τιμή του πλέγματος.
- ii) Η τιμές των πλεγμάτων προσαρμόζονται ανάλογα με το κόστος ολόκληρου του έργου.
- iii) Για μικρής αντοχής πλέγματα έως και  $Tult = 180\text{KN/m}$ , οι τιμές των πλεγμάτων είναι σχεδόν ανεξάρτητες της τιμής του έργου. Το αντίθετο συμβαίνει για αντοχές από  $900\text{KN/m}$ - $1250\text{KN/m}$ , όπου η διαφορά στην τιμή γίνεται εμφανής.

Τέλος σημαντικό είναι να αναφέρουμε πως στις αρχικές τιμές αυτές γίνονται εκπτώσεις, οπότε το τελικό κόστος του εκάστοτε συστήματος όπλισης μπορεί να διαφέρει από το αρχικά υπολογισμένο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αναλύσεις των οπλισμένων πρανών, τα οποία οπλίστηκαν με τέτοιον τρόπο ώστε να πλησιάζουμε πολύ κοντά στην βέλτιστη λύση.

## 5.1.2 Πρανές μικρού ύψους $H1=10\text{m}$

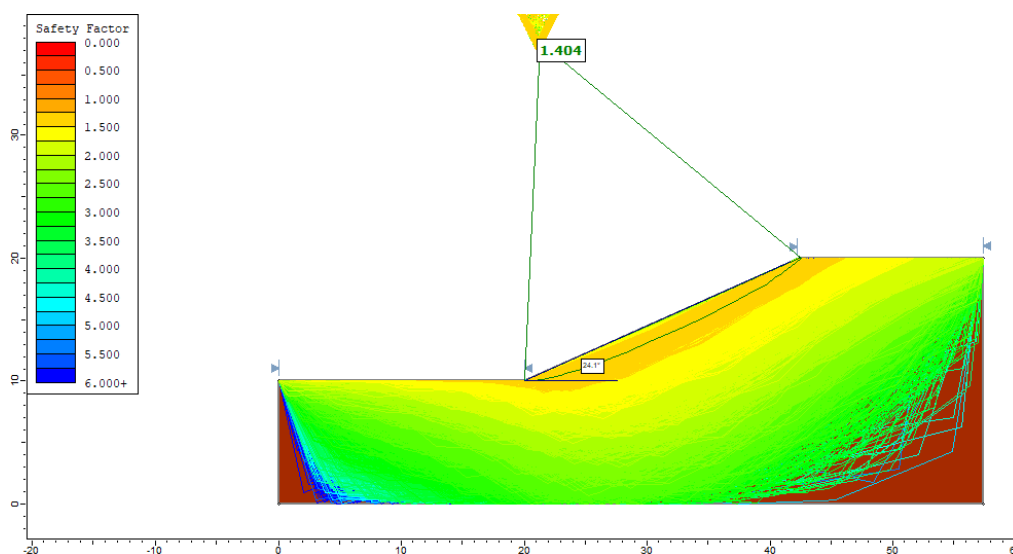
### 5.1.2.1 Πριν την ενίσχυση

Πίνακας 5-2 Χαρακτηριστικά πρανούς ύψους  $H1=10\text{m}$

Ύψος	Κλίση	Συνοχή	Ειδικό βάρος	Γωνία εσωτ. τριβής
$H1 = 10\text{m}$	$\beta = ;$	$c_1' = 0,5\text{Kpa}$	$\gamma = 20\text{ KN/m}^3$	$\phi' = 30^\circ$

Το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει για αυτό το πρανές είναι η εύρεση της κλίσης στην οποία είναι ασφαλές ( $FS=1.4$ ), χωρίς την χρήση οπλισμού. Μετά από δοκιμές καταλήγουμε στη κλίση  $\beta=24.1^\circ$ , όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

Πραγματοποιούμε εμβαδομέτρηση του πρανούς και υποθέτουμε πως έχει μήκος  $L=100m$ . Έτσι βρίσκουμε :  $E_{(24.1^\circ)} = 8204,1 m^2$




Σχήμα 5-1 Άοπλο πρανές  $H1=10m$ ,  $FS=1.4$ ,  $\beta=24.1^\circ$

### 5.1.2.2 Μετά την ενίσχυση

Το συγκεκριμένο πρανές ύψους 10m, δεν χρειάζεται μεγάλη ποσότητα, ούτε πολύ υψηλής εφελκυστικής αντοχής πλέγματα. Παρακάτω έχει γίνει προσπάθεια αύξησης της κλίσης από  $\beta=24.1^\circ$  σε  $\beta=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ . Για τα πρανή αυτά θα γίνει εμβαδομέτρηση και ογκομέτρηση και στην συνέχεια θα συγκριθούν οι τιμές αυτές με τις τιμές του άοπλου πρανούς.

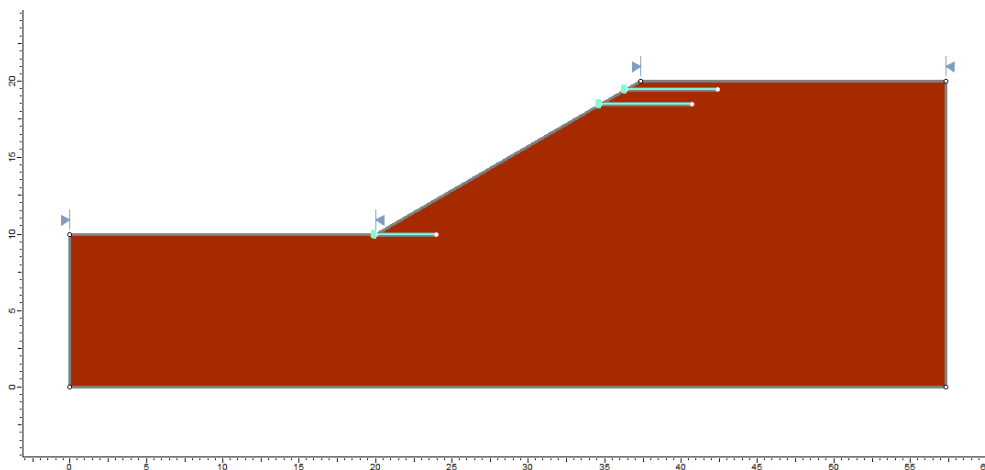
#### i. $\Delta\beta=25\%\beta$ και $\beta'=30^\circ$

Πίνακας 5-3 Χαρακτηριστικά οπλισμού για  $\beta'=30^\circ$

Support Name	Color	Type	Force Application	Material Dependent	Adhesion (kPa)	Friction Angle (deg)	Shear Strength Model	Force Orientation	Anchorage	Strip Coverage (%)	Long Term Design Strength (kN/m)	Connection Strength Input	Connection Strength (kN/m)
80		Geosynthetic	Passive (Method B)	No	5	40	Linear	Parallel to Reinforcement	Slope Face	100	54.512	Constant	40

Πίνακας 5-4 Ποσότητα και χαρακτηριστικά οπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για  $\beta'=30^\circ$ 

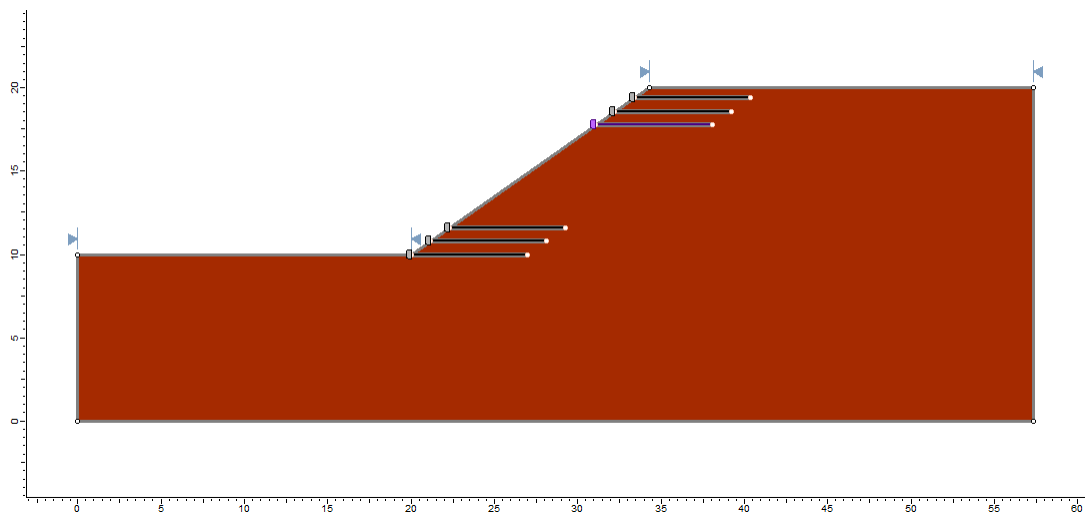
Tult(kN/m)	Ποσότητα	Μήκος(m)	Μήκος ολικό (m)
80	1	4	4
80	2	6	12
			16

Σχήμα 5-2 Οπλισμένο πρανές H1=10m, FS=1.4,  $\beta'=30^\circ$ ii.  $\Delta\beta = 46\% \beta$  και  $\beta'=35^\circ$ Πίνακας 5-5 Χαρακτηριστικά οπλισμού για  $\beta'=35^\circ$ 

Support Name	Color	Type	Force Application	Material Dependent	Adhesion (kPa)	Friction Angle (deg)	Shear Strength Model	Force Orientation	Anchorage	Strip Coverage (%)	Long Term Design Strength (kN/m)	Connection Strength Input	Connection Strength (kN/m)
120	■	Geosynthetic	Passive (Method B)	No	5	40	Linear	Parallel to Reinforcement	Slope Face	100	82.57	Constant	40
50	■	Geosynthetic	Passive (Method B)	No	5	40	Linear	Parallel to Reinforcement	Slope Face	100	44.291	Constant	40

Πίνακας 5-6 Ποσότητα και χαρακτηριστικά οπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για  $\beta'=35^\circ$ 

Tult(kN/m)	Ποσότητα	Μήκος (m)	Μήκος ολικό (m)
50	5	7	35
120	1	7	7
			42



Σχήμα 5-3 Οπλισμένο πρανές H1=10m, FS=1.4,  $\beta'=35^\circ$

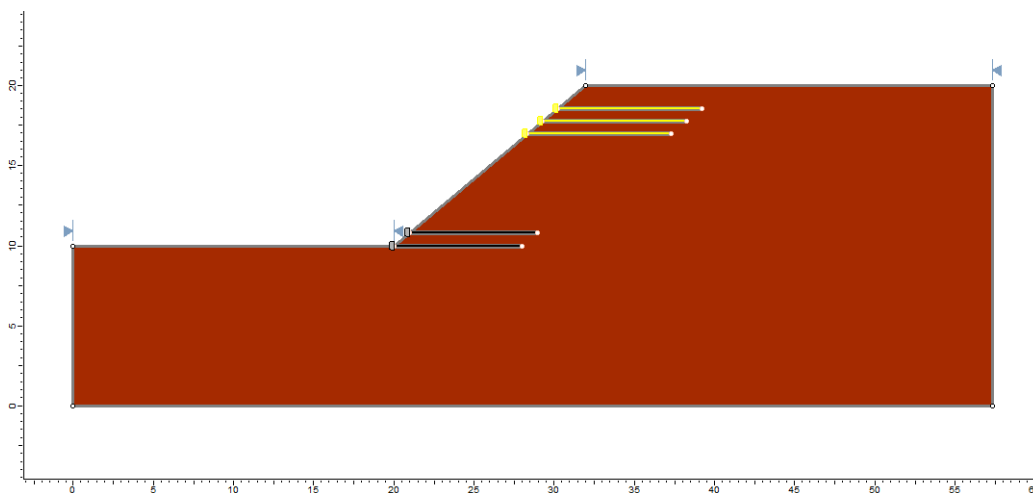
iii.  $\Delta\beta = 67\%\beta$  και  $\beta'=40^\circ$

Πίνακας 5-7 Χαρακτηριστικά οπλισμού για  $\beta'=40^\circ$

Support Name	Color	Type	Force Application	Material Dependent	Adhesion (kPa)	Friction Angle (deg)	Shear Strength Model	Force Orientation	Anchorage	Strip Coverage (%)	Long Term Design Strength (kN/m)	Connection Strength Input	Connection Strength (kN/m)
1003	Yellow	Geosynthetic	Passive (Method B)	No	5	40	Linear	Parallel to Reinforcement	Slope Face	100	68.809	Constant	40
50	Black	Geosynthetic	Passive (Method B)	No	5	40	Linear	Parallel to Reinforcement	Slope Face	100	44.291	Constant	40

Πίνακας 5-8 Ποσότητα και χαρακτηριστικά οπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για  $\beta'=40^\circ$

Tult(kN/m)	Ποσότητα	Μήκος(m)	Μήκος ολικό(m)
50	2	8	16
100	3	9	27
			43



Σχήμα 5-4 Οπλισμένο πρανές H1=10m, FS=1.4,  $\beta'=40^\circ$

Πίνακας 5-9 Εμβαδομέτρηση στο ύψος H1=10m

$\beta$ (°)	Εμβαδό m <sup>2</sup>
24.1	262,5
30	286,6
35	301,7
40	313,6

Πίνακας 5-10 Όφελος σε εμβαδό και όγκο στο ύψος H1=10m

$\beta'$ (°)	Όφελος (m <sup>2</sup> )	Όφελος (m <sup>3</sup> )
30	24,1	2413,5
35	39,3	3933,0
40	51,1	5115,0

Πίνακας 5-11 Κόστος οπλισμού στο ύψος H1=10m

$\beta'$ (°)	Έργα 1,5 - 5,0 εκ.	Έργα 5,0 - 10,0 εκ.	Έργα > 10,0 εκ.
30	13.120€	12.480€	11.840€
35	30.240€	28.840€	27.265€
40	35.400€	33.840€	31.930€

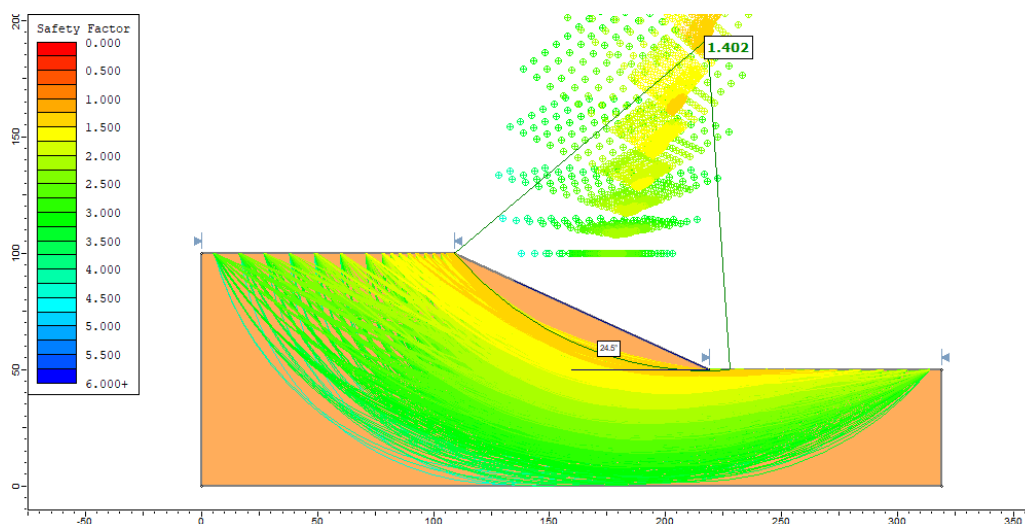
### 5.1.3 Πρανές μεσαίου ύψους H2=50m

#### 5.1.3.1 Πριν την ενίσχυση

Πίνακας 5-12 Χαρακτηριστικά πρανούς ύψους H2=50m

Ύψος	Κλίση	Συνοχή	Ειδικό βάρος	Γωνία εσωτ. τριβής
H2 = 50m	$\beta = ;$	$c_1' = 0,5 \text{Kpa}$	$\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$	$\phi' = 30^\circ$

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, βρίσκουμε την γωνία στην οποία το υλικό παρουσιάζει συντελεστή ασφαλείας (FS=1.4). Μετά από δοκιμές καταλήγουμε στη κλίση  $\beta = 24.5^\circ$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5-5 Άοπλο πρανές H2= 50m με FS=1.4

### 5.1.3.2 Μετά την ενίσχυση

Σε αυτή την περίπτωση του μεσαίου ύψους πρανούς οι περιπτώσεις αύξησης της κλίσης που μελετήθηκαν ήταν λιγότερες καθώς όσο μεγαλώνει το ύψος καθίσταται δυσκολότερη η αύξηση της κλίσης και απαιτεί ταυτόχρονα πολύ σπλισμό.

i)  $\Delta\beta = 17\% \beta$  και  $\beta' = 28,5^\circ$

Πίνακας 5-13 Χαρακτηριστικά σπλισμού για  $\beta' = 28.5^\circ$ 

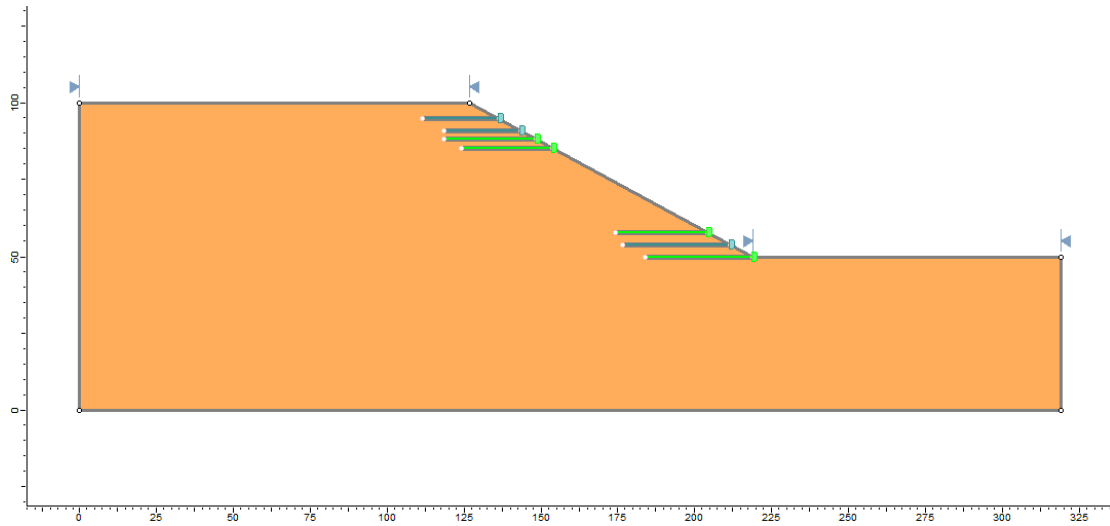
Support Name	Color	Type	Force Application	Material Dependent	Adhesion (kPa)	Friction Angle (deg)	Shear Strength Model	Force Orientation	Anchorage	Strip Coverage (%)	Long Term Design Strength (kN/m)	Connection Strength Input	Connection Strength (kN/m)
Support 300	Green	Geosynthetic	Passive (Method B)	No	5	40	Linear	Parallel to Reinforcement	Slope Face	100	206.42	Constant	206.42
600	Blue	Geosynthetic	Passive (Method B)	No	5	40	Linear	Parallel to Reinforcement	Slope Face	100	412.85	Constant	40

Πίνακας 5-14 Ποσότητα και χαρακτηριστικά σπλισμού για  $\beta' = 28.5^\circ$ 

Tult(kN/m)	Ποσότητα	Μήκος(m)	Μήκος ολικό (m)
300	3	30	90



300	1	35	35
600	2	25	50
600	1	35	35
			210



Σχήμα 5-6 Οπλισμένο πρανές H2=50m, FS=1.4,  $\beta'=28.5^\circ$

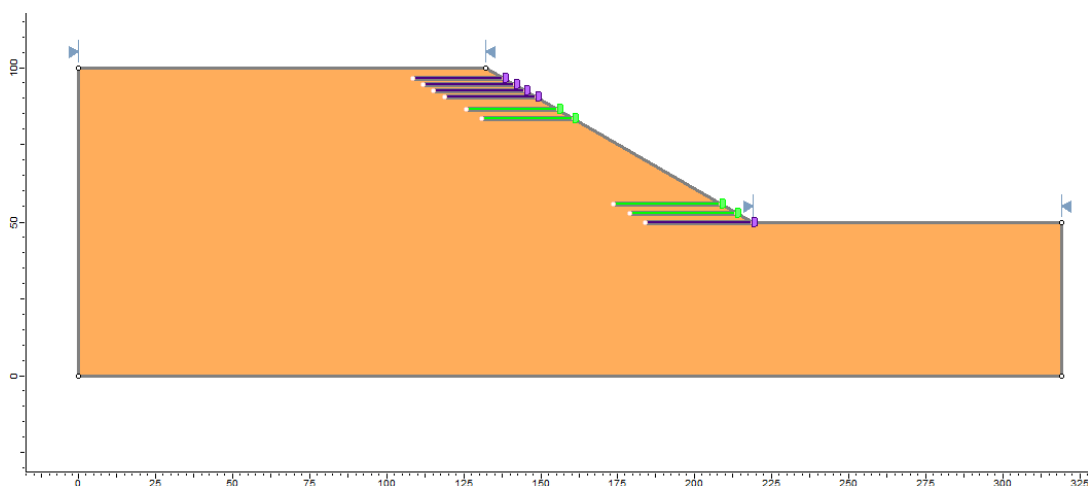
ii)  $\Delta\beta = 23\%\beta$  και  $\beta' = 30^\circ$

Πίνακας 5-15 Χαρακτηριστικά οπλισμού για  $\beta'=30^\circ$

Support Name	Color	Type	Force Application	Material Dependent	Adhesion (kPa)	Friction Angle (deg)	Shear Strength Model	Force Orientation	Anchorage	Strip Coverage (%)	Long Term Design Strength (kN/m)	Connection Strength Input	Connection Strength (kN/m)
Support 500	Blue	Geosynthetic	Passive (Method B)	No	5	40	Linear	Parallel to Reinforcement	Slope Face	100	344.04	Constant	312.76
Support 300	Red	Geosynthetic	Passive (Method B)	No	5	40	Linear	Parallel to Reinforcement	Slope Face	100	206.42	Constant	206.42

Πίνακας 5-16 Ποσότητα και χαρακτηριστικά οπλισμού για  $\beta'=30^\circ$

Tult(kN/m)	Ποσότητα	Μήκος(m)	Μήκος ολικό (m)
300	2	30	60
300	2	35	70
500	4	30	120
500	1	35	35
			285



Σχήμα 5-7 Οπλισμένο πρανάς  $H_2=50\text{m}$ ,  $FS=1.4$ ,  $\beta'=30^\circ$

Πίνακας 5-17 Εμβαδομέτρηση στο ύψος  $H_2=50\text{m}$

$\beta'(^{\circ})$	Εμβαδό $\text{m}^2$
24.5	8204,1
28.5	8644,8
30	8781,9

Πίνακας 5-18 Όφελος σε εμβαδό και όγκο στο  $H_2=50\text{m}$

$\beta'(^{\circ})$	Όφελος ( $\text{m}^2$ )	Όφελος ( $\text{m}^3$ )
28.5	440,6	44066,1
30	577,8	57781,1

Πίνακας 5-19 Κόστος οπλισμού στο ύψος  $H_2=50\text{m}$

$\beta'(^{\circ})$	Έργα 1,5 - 5,0 εκ.	Έργα 5,0 - 10,0 εκ.	Έργα > 10,0 εκ.
28.5	395.850 €	376.500 €	359.250 €
30	528.100 €	502.200 €	479.150 €

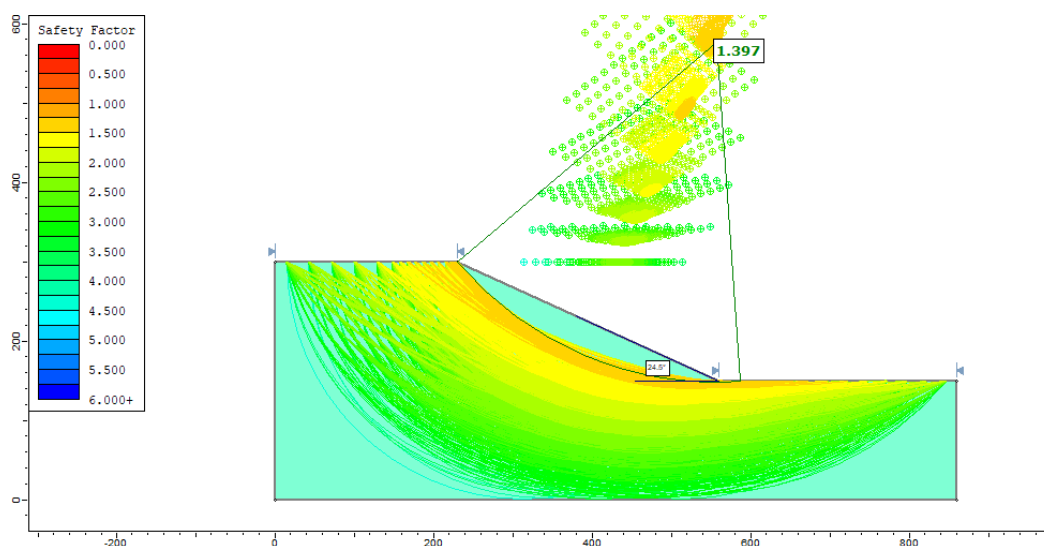
## Πρανές μεγάλου ύψους H3=150m

### 5.1.3.3 Πριν την ενίσχυση

Πίνακας 5-20 Χαρακτηριστικά πρανούς ύψους H3=150m

Ύψος	Κλίση	Συνοχή	Ειδικό βάρος	Γωνία εσωτ. τριβής
H3 = 150m	$\beta = ;$	$c_1'=0,5\text{Kpa}$	$\gamma=20 \text{ KN/m}^3$	$\phi'=30^\circ$

Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με πριν, βρίσκουμε την γωνία στην οποία το υλικό παρουσιάζει συντελεστή ασφαλείας (FS=1.4). Μετά από δοκιμές καταλήγουμε στη κλίση  $\beta=24.5^\circ$ , όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.12 Άοπλο πρανές H3= 150m, FS=1.4,  $\beta=24.5^\circ$

### 5.1.3.4 Μετά την ενίσχυση

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι σε τόσο υψηλά πρανή μπορεί να απαιτείται τόσος πολύς οπλισμός που να μη συμφέρει την εταιρία. Παρακάτω παρατίθενται ένα μοτίβο οπλισμού το οποίο μας δίνει τον επιθυμητό συντελεστή ασφαλείας 1.4, αλλά το κόστος του είναι υπερβολικά υψηλό. Στο πρανές αυτό έχουμε  $\Delta\beta=0.09\beta$ .

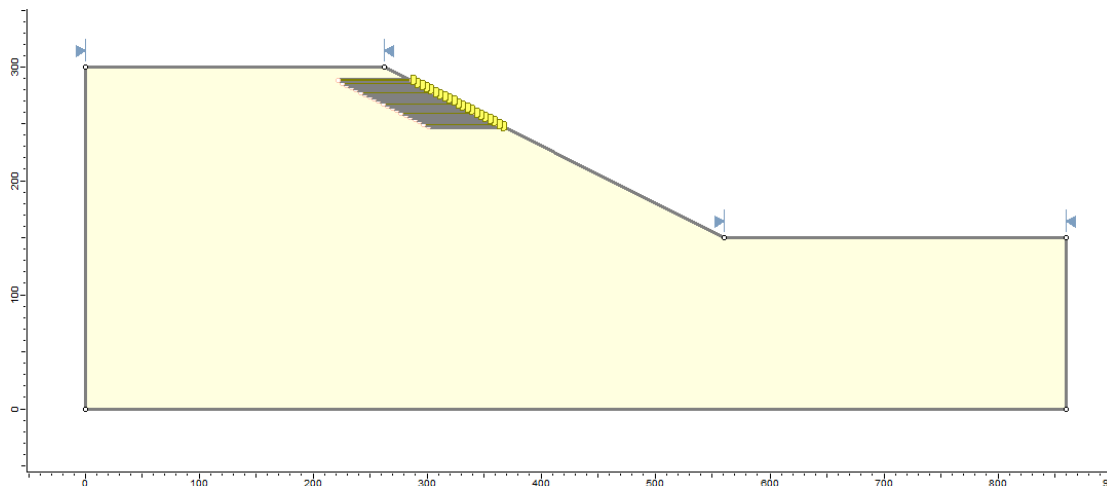
i)  $\Delta\beta=0.09\beta$  και  $\beta'=26.7^\circ$

Πίνακας 5-21 Χαρακτηριστικά οπλισμού για  $\beta'=26.7^\circ$

Support Name	Color	Type	Force Application	Material Dependent	Adhesion (kPa)	Friction Angle (deg)	Shear Strength Model	Force Orientation	Anchorage	Strip Coverage (%)	Long Term Design Strength (kN/m)	Connection Strength Input	Connection Strength (kN/m)
1200		Geosynthetic	Passive (Method B)	No	5	40	Linear	Parallel to Reinforcement	Slope Face	100	825.7	Constant	40

Πίνακας 5-22 Ποσότητα και χαρακτηριστικά σπλισμού για  $\beta'=26.7^\circ$ 

Tult(kN/m)	Ποσότητα	Μήκος (m)	Μήκος ολικό (m)
1200	21	65	1365

Σχήμα 5-8 Οπλισμένο πρανές  $H_3=150\text{m}$ ,  $FS=1.4$ ,  $\beta'=26.7^\circ$ Πίνακας 5-23 Εμβαδομέτρηση στο ύψος  $H_3=150\text{m}$ 

$\beta^\circ$	Εμβαδό $\text{m}^2$
24.5	59284,1
26.7	61601,9

Πίνακας 5-24 Όφελος σε εμβαδό και όγκο για το ύψος  $H_3=150\text{m}$ 

$\beta^\circ$	Όφελος ( $\text{m}^2$ )	Όφελος ( $\text{m}^3$ )
26.7	2317,7	231773,6

Πίνακας 5-25 Κόστος σπλισμού στο ύψος  $H_3=150\text{m}$ 

$\beta^\circ$	Έργα 1,5 - 5,0 εκ.	Έργα 5,0 - 10,0 εκ.	Έργα > 10,0 εκ.
26.7	5.023.200 €	4.791.150 €	4.545.450 €

#### 5.1.4 Σύνοψη των παραπάνω αποτελεσμάτων

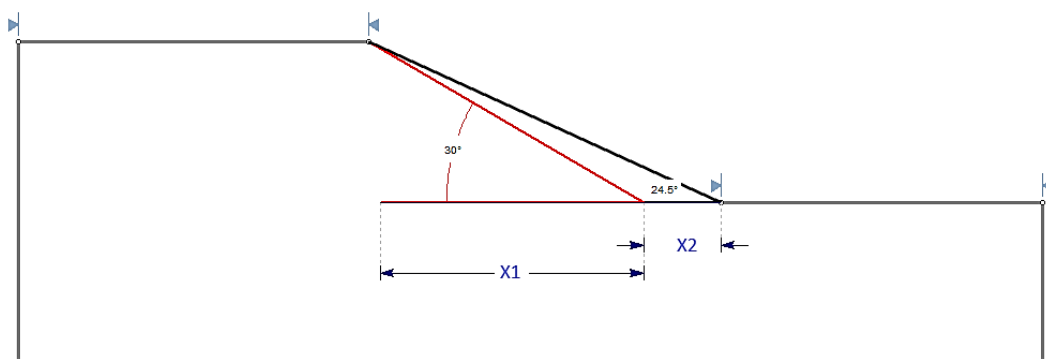
Όπως είδαμε και στις 3 περιπτώσεις, προκειμένου να έχουμε μια αύξηση της κλίσης του πρανούς είναι απαραίτητη η ενίσχυσή τους με γεωπλέγματα. Όπως είναι αναμενόμενο, σε μεγαλύτερου ύψους πρανή χρειάζονται περισσότερα μέτρα σπλισμού και ίσως με μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή.

Τα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν επιλέχθηκαν ως τα βέλτιστα μέσα από μια σειρά πολλών αναλύσεων και δοκιμών με διαφορετικά μήκη, αποστάσεις και αντοχές οπλισμού. Εμείς τοποθετώντας τα πλέγματα και γνωρίζοντας κάποιες ενδεικτικές τιμές τους, υποθέσαμε πως έχουμε ένα πρανές με μήκος 100m και ύστερα υπολογίσαμε τους όγκους που κερδίζουμε σε κάθε περίπτωση, καθώς και το συνολικό κόστος της ενίσχυσης. Στα 2 πρώτα ύψη πρανών υπάρχει μια σχετικά καλή σχέση κόστους οπλισμού και κέρδους σε όγκο. Στο τρίτο ύψος, το κόστος του οπλισμού είναι υπερβολικά υψηλό για την αύξηση της κλίσης κατά μόνο  $\Delta\beta = 2^\circ$  και δεν αξίζει η εταιρία να επενδύσει χρήματα.

Σε κάθε περίπτωση γίνεται εμφανές ότι το θέμα της αποθήκευσης των εξορυκτικών αποβλήτων αποτελεί ζωτικής σημασίας πρόβλημα για τον μεταλλευτικό κλάδο και η εκάστοτε εταιρία πρέπει πάντα να αποσκοπεί στη βέλτιστη διαχείριση των αποβλήτων της. Επειδή θέλαμε να εξαντλήσουμε όλες τις πιθανές περιπτώσεις κέρδους, δοκιμάσαμε με την αλλαγή της κλίσης σε κάθε περίπτωση, πόσα στρέμματα μπορεί να κερδίσει η εταιρία, ώστε να μην αναγκάζεται συνεχώς να αγοράζει νέες εκτάσεις, όλο και πιο μακριά από την εκσκαφή, για την αποθήκευση των αποβλήτων της, κάτι που ίσως της επιφέρει και μεγαλύτερα έξοδα καθώς τα φορτηγά θα χρειάζεται πιθανότατα να διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις, διαφορετικά εδάφη και κλίσεις.

### 5.1.5 Μια επιπλέον πρόταση

Μια επιπλέον πρόταση που γίνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι η μελέτη της έκτασης που μπορεί να εξασφαλιστεί από την εταιρία με την αλλαγή της κλίσης στα τρία διαφορετικά ύψη πρανών ( $H_1=10\text{m}$ ,  $H_2=50\text{m}$ ,  $H_3=150\text{m}$ ). Ενδεικτικά στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το σκεπτικό. Η διάσταση X2 μας δίνει τα κερδισμένα μέτρα, από μια αύξηση κλίσης πχ.  $24.5^\circ$  σε  $30^\circ$ .



Σχήμα 5-9 Όφελος σε έκταση (m)

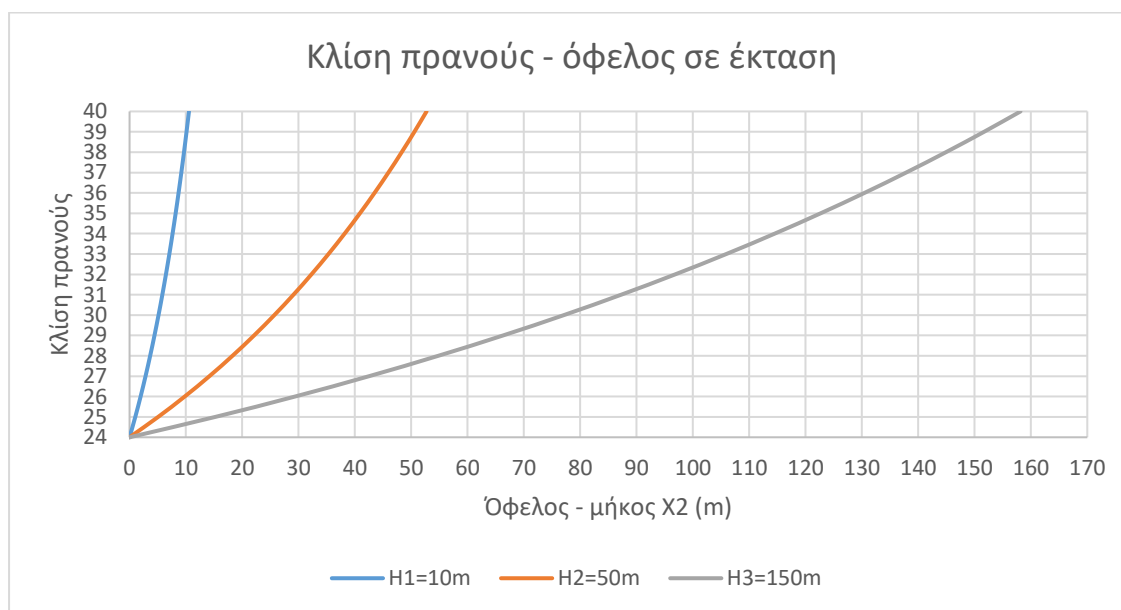
Πίνακας 5-26 Όφελος σε έκταση

<b>H1=10m - <math>\beta_{\text{αρχ}}=24^\circ</math></b>			
$\beta'$	X1(m)	X2(m)	m <sup>2</sup>
<b>30°</b>	17,3	<b>5,0</b>	500
<b>35°</b>	14,3	<b>8,1</b>	800
<b>40°</b>	11,9	<b>10,4</b>	1040

<b>H2=50m - <math>\beta_{\text{αρχ}}=24.5^\circ</math></b>			
$\beta'$	X1(m)	X2(m)	m <sup>2</sup>
<b>28.5°</b>	92,0	<b>17,6</b>	1763
<b>30°</b>	86,6	<b>23,1</b>	2311

<b>H3=150m - <math>\beta_{\text{αρχ}}=24.5^\circ</math></b>			
$\beta'$	X1(m)	X2(m)	m <sup>2</sup>
<b>26.7°</b>	298,2	<b>30,9</b>	3090

Ο παραπάνω πίνακας απεικονίζει το όφελος σε μέτρα που επιτυγχάνεται ανά τρέχον μετρό πρανούς. Συνεπώς, για το πρανές που μελετάμε με μήκος L=100m, έχουμε όφελος πολλών μέτρων. Παρακάτω παρουσιάζεται η γραφική παράσταση κλίσης πρανούς – οφέλους .



Διάγραμμα 5-2 Όφελος σε έκταση ανάλογα με την κλίση πρανούς

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- i) Για ύψος πρανούς H1 η αύξηση της κλίσης του δεν έχει μεγάλο όφελος σε έκταση .
- ii) Για ύψος πρανούς H2 παρατηρείται πολύ μεγαλύτερο όφελος συναρτήσει της αύξησης της γωνίας.

- iii) Για ύψος πρανούς H3 το όφελος πλέον είναι πολύ μεγάλο, αλλά δεν πρέπει να ξεχνάμε το υπέρογκο κόστος του σπλισμού που χρειάζεται.
- iv) Τέλος καταλήγουμε στο σημαντικό συμπέρασμα, ότι η κλίση διαδραματίζει όλο και πιο σημαντικό ρόλο όσο αυξάνεται το ύψος του πρανούς.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 Συμπεράσματα

Η μελέτη ευστάθειας πρηνών αποτελεί βασικό αντικείμενο ενασχόλησης των γεωτεχνικών μηχανικών. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν πρηνή σωρών απόθεσης εξορυκτικών αποβλήτων, με στόχο τη διερεύνηση της δυνατότητας αύξησης της κλίσης των πρηνών τους με τη χρήση γεωπλεγμάτων, πάντα με γνώμονα τόσο την ασφάλεια, όσο και την εξασφάλιση εκτάσεων για την αποθήκευση μεγαλύτερου όγκου αποβλήτων ή την εξοικονόμηση εκτάσεων γης.

Τα εξορυκτικά απόβλητα και οι μεταλλευτικοί σωροί αναφέρονται σε απόβλητα από πετρώματα, εκπλυμένο μέταλλευμα και άλλα υλικά τα οποία δεν έχουν καμία οικονομική αξία τη χρονική περίοδο της εξορύξεώς τους. Οι εν λόγω σωροί μπορεί δυνητικά να αποκτήσουν αξία. Η ευστάθεια των σωρών μπορεί να μεταβληθεί λόγω διαφόρων παραγόντων και να δημιουργηθούν τελικά μηχανισμοί αστοχίας. Επιπλέον, όλες οι απορρίψεις και αποθέσεις αποβλήτων ενέχουν κάποιο κίνδυνο αστάθειας, είτε λόγω του ανεπαρκούς σχεδιασμού είτε λόγω απρόβλεπτης μεταβλητότητας διαφόρων παραμέτρων. Τέλος, είναι αληθές το γεγονός ότι μπορούν να δημιουργηθούν για τις αποθέσεις αυτές, τόσο γεωτεχνικοί προβληματισμοί όσο κοινωνικοί και περιβαλλοντικοί οι οποίοι μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με κατάλληλη μελέτη και διαχείριση των σωρών από τους μηχανικούς.

Προκειμένου να υπάρξει η δυνατότητα αύξησης της κλίσης των παραπάνω ωρών χρησιμοποιούνται γεωπλέγματα, τα οποία είναι πολυμερή υλικά διαφόρων τύπων με προκαθορισμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως όπως κάθε άλλο είδος σπλισμού, έτσι και αυτό μπορεί να εμφανίσει ζητήματα αντοχής με το πέρασ του χρόνου. Η αντοχή τους μπορεί να ποικίλλει και ο κάθε κατασκευαστής δίνει τις δικές του πληροφορίες σχετικά με το υλικό. Η χρήση των γεωπλεγμάτων πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένους κανόνες και πρότυπα σχεδιασμού. Το γεωτεχνικό πρόγραμμα Slide2, που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη και όπλιση των πρηνών στην παρούσα διπλωματική, έχει την δυνατότητα να προσδιορίζει τον κρισιμότερο μηχανισμό αστοχίας. Επιπλέον δίνει τη δυνατότητα επιλογής σπλισμού και κατάλληλης διαστασιολόγησης του, ώστε να εξασφαλιστεί η ευστάθεια των πρηνών.

Στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τρία διαφορετικά ύψη πρηνών τα οποία αποτελούνται από συγκεκριμένο τύπο υλικού. Αρχικά η μελέτη πραγματοποιήθηκε για άοπλα πρηνή με κλίσεις  $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  και συνοχή  $c' = 0\text{Kra}$ ,  $10\text{Kra}$  το καθένα και αναζητήθηκε πόση πρέπει να είναι η γωνία εσωτερικής τριβής



του υλικού ( $\phi'$ ), ώστε να επιτυγχάνεται συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.4. Το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν πως όσο μικρότερη είναι η συνοχή και όσο μεγαλύτερο το ύψος και η κλίση, τόσο μεγαλύτερες γωνίες τριβής απαιτούνται.

Στη συνέχεια, προκειμένου να γίνει αύξηση της κλίσης αυτών των πρανών μελετήθηκε σε ποια κλίση μπορούν να είναι ασφαλή και ύστερα προστέθηκε οπλισμός ώστε να αυξηθεί η κλίση τους και συνεπώς η χωρητικότητά τους. Παρατηρήθηκε πως όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του πρανού τόσο μεγαλύτερο είναι και το όφελος σε όγκο με την αλλαγή της κλίσης. Μετά από πολλές αναλύσεις προσδιορίστηκε ένα συγκεκριμένο μοτίβο οπλισμού για το κάθε ύψος, καθώς και το κόστος το οποίο σε κάποιες περιπτώσεις είναι τόσο υψηλό που καθιστά τις διεργασίες αύξησης της κλίσης ιδιαίτερα ακριβές. Παρατηρείται πως όσο μεγαλύτερη είναι η εφελκυστική αντοχή ( $T_{ult}$ ), τόσο μεγαλύτερη και η τιμή του πλέγματος. Όσον αφορά τις τιμές των πλεγμάτων προσαρμόζονται ανάλογα με το κόστος ολόκληρου του έργου και για μικρής αντοχής πλέγματα έως και  $T_{ult} = 180\text{KN/m}$ , οι τιμές των πλεγμάτων είναι σχεδόν ανεξάρτητες της τιμής του έργου. Το αντίθετο συμβαίνει για αντοχές από  $900\text{KN/m}$ - $1250\text{KN/m}$ , όπου η διαφορά στην τιμή γίνεται εμφανής. Η όπλιση που παρουσιάζεται σε κάθε περίπτωση είναι η βέλτιστη που βρέθηκε μέσα από μια σειρά μεγάλου αριθμού αναλύσεων.

Τέλος, παρουσιάζεται μια ακόμη λύση για όφελος σε έκταση (εναλλακτικά της χωρητικότητας), η οποία φαίνεται να λειτουργεί εξαιρετικά σε πρανή μεσαίου έως μεγάλου ύψους. Πιο συγκεκριμένα, για ύψος πρανού  $H_1$  η αύξηση της κλίσης του δεν έχει μεγάλο όφελος σε έκταση, για ύψος πρανού  $H_2$  παρατηρείται πολύ μεγαλύτερο όφελος συναρτήσει της αύξησης της γωνίας και για ύψος πρανού  $H_3$  το όφελος πλέον είναι πολύ μεγάλο. Σε κάθε περίπτωση όμως, απαιτείται ένα υψηλό κόστος οπλισμού.

## 6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Θέματα που μπορούν να μελετηθούν εκτενέστερα σε μελλοντικές εργασίες είναι τα εξής:

- Προσδιορισμός κλίσης όπου επιτυγχάνεται η βέλτιστη σχέση όγκου – κόστους οπλισμού.
- Μελέτη διαφορετικών οπλισμών ως προς το μήκος, τις αποστάσεις και την αντοχή.
- Οικονομική έρευνα δαπανών για οπλισμό.
- Περεταίρω μελέτες όπου θα περιλαμβάνονται τα κόστη απαλλοτρίωσης γης.
- Ανάλυση κόστους μεταφοράς στείρων από τη θέση εξόρυξης ως και τη θέση απόθεσης.
- Διερεύνηση λειτουργίας των σωρών ως στρώσεις θεμέλια για την τοποθέτηση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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