

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



Μεταπτυχιακή διατριβή

ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ

ΕΥΜΟΡΦΙΑ ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΥ

Λεμεσός 2016

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ

της
Ευμορφίας Κανελλοπούλου

Λεμεσός 2016

ΕΝΤΥΠΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ

Μεταπτυχιακή διατριβή

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ**

Παρουσιάστηκε από

Ευμορφία Κανελλοπούλου

Επιβλέπων καθηγητής _____

[ιδιότητα και όνομα]

Μέλος επιτροπής _____

[ιδιότητα και όνομα]

Μέλος επιτροπής _____

[ιδιότητα και όνομα]

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

[Σεπτέμβριος, 2016]

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Ευμορφία Κανελλοπούλου, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της μεταπτυχιακής διατριβής από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον Επίκουρο Καθηγητή Λύσανδρο Β. Παντελίδη, ο οποίος ήταν υπεύθυνος για την επιτυχή διεκπεραίωση του συγγράμματος. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τη Φιλόλογο Σταματία Κανελλοπούλου, για τον έλεγχο του κειμένου ως προς το εκφραστικό υπόβαθρο και τη διδακτορική φοιτήτρια του τμήματος των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Μαρία Αργυρού, για τη βοήθεια στο λογισμικό Matlab.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη μελέτη της χρησιμότητας των μηχανικά σταθεροποιημένων τοίχων για την ενίσχυση εδαφικών μαζών και την ανάλυση της ευστάθειας του συστήματος μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος-έδαφος, με τη μέθοδο κλειστού τύπου. Αρχικά, γίνεται αναφορά στα έργα αντιστήριξης και παράλληλα, τονίζεται η καταλληλότητα της οπλισμένης γης έναντι των συμβατικών κατασκευών ενίσχυσης. Κατά την επεξήγηση της διαδικασίας κατασκευής των μηχανικά σταθεροποιημένων τοίχων, δίνονται πληροφορίες τόσο για τα εδαφικά υλικά της επίχωσης, όσο για τα γεωσυνθετικά υλικά και τα στοιχεία επιφανειακής επικάλυψης. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στις μεθόδους ανάλυσης της ευστάθειας των πρηνών και αναπτύσσεται η μέθοδος κλειστού τύπου των Pantelidis και Griffiths (2012). Παρουσιάζονται οι παραδοχές που λαμβάνονται υπόψιν για την υλοποίηση της μεθόδου, προσδιορίζονται όλες οι δυνάμεις που ασκούνται και αποδίδεται η εξίσωση που αντιπροσωπεύει τον συντελεστή ασφαλείας. Στο παρόν σύγγραμμα, το σύστημα μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος-έδαφος είναι ενισχυμένο με γεωπλέγματα, έχοντας ως αποτέλεσμα τη συμβολή της δύναμης του κάθε γεωπλέγματος στον ορισμό του συντελεστή ασφαλείας. Ο συντελεστής αυτός παρουσιάζεται με δύο διαφορετικές εξισώσεις, οι οποίες επρόκειτο να συγκριθούν. Με στόχο αυτή η σύγκριση, το σύστημα μοντελοποιείται στο λογισμικό Matlab και τα αποτελέσματα παρατίθενται σε πίνακα. Για τον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων, γίνεται μια επιπλέον μοντελοποίηση στο λογισμικό, η οποία αποδίδει γραφικά τον συντελεστή ασφαλείας.

Λέξεις κλειδιά: έργα αντιστήριξης, οπλισμένη γη, μηχανικά σταθεροποιημένοι τοίχοι, γεωσυνθετικά υλικά, μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας, μέθοδος κλειστού τύπου, συντελεστής ασφαλείας

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	xiv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	xix
1 Έργα Αντιστήριξης Εδαφών.....	1
1.1 Τοίχοι αντιστήριξης	2
1.1.1 Τοίχοι βαρύτητας.....	3
1.1.2 Τοίχοι σε μορφή προβόλου.....	4
1.1.3 Αγκυρωμένοι τοίχοι.....	6
1.2 Οπλισμένη γη με γεωσυνθετικά υλικά	7
1.2.1 Μηχανικά σταθεροποιημένοι τοίχοι.....	8
1.2.1.1 Εδαφικά υλικά επίχωσης.....	11
1.2.1.2 Γεωσυνθετικά υλικά	12
1.2.1.3 Στοιχεία επιφανειακής επικάλυψης.....	13
1.2.2 Κατασκευή μηχανικά σταθεροποιημένου τοίχου	14
2 Μέθοδοι Ανάλυσης Ευστάθειας Πρανών.....	20
2.1 Απλές υπολογιστικές μέθοδοι.....	20
2.1.1 Μέθοδος των λωρίδων.....	22
2.1.2 Μέθοδος κλειστού τύπου.....	23
2.1.2.1 Παραδοχές	23
2.1.2.2 Δυνάμεις που δρουν στην ολισθαίνουσα μάζα.....	24
2.1.2.2.1 Υπολογισμός βάρους	24
2.1.2.2.2 Δύναμη αντίστασης λόγω συνοχής.....	25

2.1.2.2.3	Πίεση του νερού των πόρων	27
2.1.2.3	Συντελεστής ασφαλείας.....	28
3	Προσαρμογή Της Μεθόδου Σε Μηχανικά Σταθεροποιημένο Τοίχο.....	29
3.1	Δύναμη γεωσυνθετικού υλικού	29
3.2	Αναπροσαρμοσμένος συντελεστής ασφαλείας.....	31
3.3	Δεδομένα του συστήματος έδαφος-ΜΣΤ	32
3.4	Επίλυση στο λογισμικό Matlab	35
3.4.1	Συνάρτηση δεδομένων.....	35
3.4.2	Κύρια συνάρτηση	36
3.4.3	Συνάρτηση γραφικής παράστασης	38
3.5	Παρατηρήσεις	40
	Σύγκριση αποτελεσμάτων κύριας και γραφικής συνάρτησης.....	40
	Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφορετικών εξισώσεων συντελεστή ασφαλείας.....	41
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	43
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	44
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	46
	Παράρτημα 1: Συνάρτηση Δεδομένων	47
	Παράρτημα 2: Κύρια Συνάρτηση Main_w1	48
	Παράρτημα 3: Συνάρτηση Γραφικής Παράστασης	50
	Παράρτημα 4: Κύρια Συνάρτηση Main_w2	51
	Παράρτημα 5: Εξισώσεις	53

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των τοίχων αντιστήριξης.....	10
Πίνακας 2: Επιπτώσεις, λόγω αστοχίας των μηχανικά σταθεροποιημένων τοίχων	11
Πίνακας 3: Μέθοδοι ανάλυσης της οριακής ισορροπίας.....	20
Πίνακας 4: Διαφορετικοί ορισμοί συντελεστή ασφαλείας	28
Πίνακας 5: Αποτελέσματα της κύριας συνάρτησης και της συνάρτησης της γραφικής παράστασης.....	41
Πίνακας 6: αποτελέσματα της κύριας συνάρτησης, με διαφορετική δήλωση του συντελεστή ασφαλείας.....	42

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος. Από την ιστοσελίδα: « http://suporteecontencao.pt »	xix
Εικόνα 2: Τοίχος αντιστήριξης. Από την ιστοσελίδα: « http://www.maccaferri.com ».....	2
Εικόνα 3: Οπλισμένη γη. Από την ιστοσελίδα: « http://www.odotechniki.com »	7
Εικόνα 4: Μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος. Από την ιστοσελίδα: « http://armos-prokat.gr »	9
Εικόνα 5: Γεωσυνθετικά υλικά οπλισμένης γης. Από την ιστοσελίδα: « http://www.maccaferri.com »	12
Εικόνα 6: Επιφανειακή επικάλυψη μηχανικά σταθεροποιημένου τοίχου. Από την ιστοσελίδα: « http://www.maccaferri.com »	13

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: α) Τοίχοι βαρύτητας, β) Τοίχοι μορφής προβόλου, γ) Αγκυρωμένοι τοίχοι, δ) Οπλισμένη γη, ε) Τοίχοι υπογείου, στ) Ακρόβαθρα γεφυρών, ζ) Αυτοσταθή πετάσματα, η) Αγκυρωμένοι πασσαλότοιχοι	2
Σχήμα 2: Τοίχοι Βαρύτητας.....	3
Σχήμα 3: α) Ολίσθηση τοίχου βαρύτητας, β) Ανατροπή, γ) Ολική ολίσθηση	4
Σχήμα 4: Τοίχοι μορφής προβόλου	5
Σχήμα 5: α) Ολίσθηση τοίχου μορφής προβόλου, β) Ανατροπή, γ) Ολική αστάθεια, δ) Μηχανισμοί καμπτικής αστοχίας.....	5
Σχήμα 6: Αγκυρωμένος τοίχος	6
Σχήμα 7: α) Ανατροπή ακρόβαθρου γέφυρας γύρω από την κορυφή, β) Περιστροφή γύρω από τον πόδα, γ) Αστοχία αγκυρίου	7
Σχήμα 8: Περιπτώσεις μηχανικά σταθεροποιημένων τοίχων.....	9
Σχήμα 9: α) Πρόσοψη τοίχου αντιστήριξης από συνεχή ή διακριτά στοιχεία, β) Σχηματισμός πρόσοψης μετά από αναδίπλωση των γεωσυνθετικών υλικών	14
Σχήμα 10: Τυπικές μορφές ραφής των γεωσυνθετικών υλικών	16
Σχήμα 11: Συχνός τρόπος σύνδεσης δύο γεωϋφασμάτων, 1) μέρος γεωϋφάσματος, 2) παρεμβαλλόμενη ράβδος	16
Σχήμα 12: Εξωτερική στήριξη τοίχου. α) Χρήση σκαλωσιάς σε όλο το ύψος, β) Χρήση σκαλωσιάς ανά επίπεδο	17
Σχήμα 13: Τρόποι κατασκευής τάφρου στην άκρη του οδοστρώματος.....	18
Σχήμα 14: Διαχωριστική αποστραγγιστική στρώση.....	19
Σχήμα 15: Απεικόνιση δυνάμεων λωρίδας.....	22
Σχήμα 16: Πρανές διαχωρισμένο σε λωρίδες.....	23
Σχήμα 17: Απεικόνιση πρανούς.....	24
Σχήμα 18: Διαχωρισμός πρανούς σε τμήματα.....	25
Σχήμα 19: Απεικόνιση γωνιών εισόδου και εξόδου	26

Σχήμα 20: Στάθμη νερού και πίεση του νερού των πόρων	27
Σχήμα 21: Τοποθέτηση γεωπλεγμάτων ανά 80cm	30
Σχήμα 22: Απεικόνιση λωρίδας για την μέθοδο Bishop	31
Σχήμα 23: Απεικόνιση πρανούς εφαρμογής.....	33
Σχήμα 24: Σύνολο δυνάμεων που ασκούνται στο πρανές της παρούσας εφαρμογής	34

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Γραφική παράσταση στο λογισμικό Matlab. Απεικόνιση ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας.....	40
---	----

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

c:	Συνοχή του εδάφους, όσον αφορά την ενεργό τάση, σε kN/m^2
σ :	Τάση του εδάφους, σε kN/m^2
u:	Πίεση του νερού των πόρων, σε kN/m^2
r_u :	Λόγος πίεσης του νερού των πόρων
γ_s και γ_w :	Ειδικό βάρος του εδάφους και του νερού, σε kN / m^3
ϕ :	Γωνία τριβής του εδαφικού υλικού, σε μοίρες
$\tan \beta$:	Κλίση πρανούς
H:	Ύψος πρανούς, σε μέτρα
r:	Ακτίνα κύκλου ολίσθησης, σε μέτρα
O:	Κέντρο κύκλου ολίσθησης
x_o και y_o :	Οριζόντια και κατακόρυφη συντεταγμένη του κέντρου κύκλου ολίσθησης, σε μέτρα
L:	Μήκος τόξου επιφάνειας ολίσθησης, σε μέτρα
W:	Βάρος της ολισθαίνουσας μάζας, σε kN/m
C:	Κέντρο βάρους ολισθαίνουσας μάζας
x_c και y_c :	Οριζόντια και κατακόρυφη συντεταγμένη, από το κέντρο της ολισθαίνουσας μάζας, σε μέτρα
Γ :	Σημείο προβολής του βάρους πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης
y_Γ ή y_{cs} :	Κατακόρυφη συντεταγμένη σημείου Γ , σε μέτρα
δ :	Γωνία κλίσης της γραμμής, που διέρχεται από το κέντρο του κύκλου O και το σημείου Γ
A':	Ανώτερο σημείο επιφάνειας ολίσθησης
$x_{A'}$:	Οριζόντια συντεταγμένη του σημείου A', σε μέτρα

A:	Ανώτερο σημείο τοίχου αντιστήριξης
x_A :	Οριζόντια συντεταγμένη του σημείου A, σε μέτρα
$f_i(x)$:	Μαθηματική εξίσωση, αντιπροσωπευτική για τα γεωμετρικά στοιχεία του προβλήματος
$f_{circ}(x)$:	Εξίσωση της επιφάνειας του κρίσιμου κύκλου ολίσθησης
Fc:	Δύναμη λόγω συνοχής, σε kN/m
da:	Απειροελάχιστη γωνία, σε ακτίνια
ds:	Απειροελάχιστο μήκος, κατά μήκος του τόξου ολίσθησης, σε μέτρα
a_i και a_f :	Γωνιακή θέση του σημείου εισόδου και εξόδου του κύκλου ολίσθησης σε σχέση με το κέντρο περιστροφής O, σε ακτίνια
U:	Πίεση του νερού των πόρων, σε kN/m
SF _M :	Συντελεστής ασφαλείας, βάσει της ισορροπίας των ροπών, κατά τη μέθοδο κλειστού τύπου
SF:	Τροποποιημένος συντελεστής ασφαλείας, κατά τη μέθοδο κλειστού τύπου, για μηχανικά σταθεροποιημένο τοίχο
M _{RS} :	Ροπή επαναφοράς, που οφείλεται στη διατμητική δύναμη του εδάφους
M _{RR} :	Ροπή επαναφοράς, λόγω της παρουσίας του οπλισμού
M _D :	Ροπή που εντείνει την ολίσθηση
T _j :	Δύναμη Γεωσυνθετικού Υλικού, σε kN/m
T _{ult} :	Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή, σε kN/m
RF _{ID} :	Μειωτικός συντελεστής βλάβης, κατά την τοποθέτηση του υλικού
RF _{CR} :	Συντελεστής μείωσης, λόγω ερπυσμού
RF _D :	Μειωτικός συντελεστής ανθεκτικότητας
W _i :	το βάρος της λωρίδας, ανά μονάδα πλάτους

- N_i : η ορθή δύναμη επί της επιφάνειας ολίσθησης
- S_i : η διατμητική δύναμη στη βάση της λωρίδας
- E_i και T_i : οι ορθές και διατμητικές δυνάμεις, που δρουν μεταξύ των λωρίδων
- ΜΣΤ: Μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος

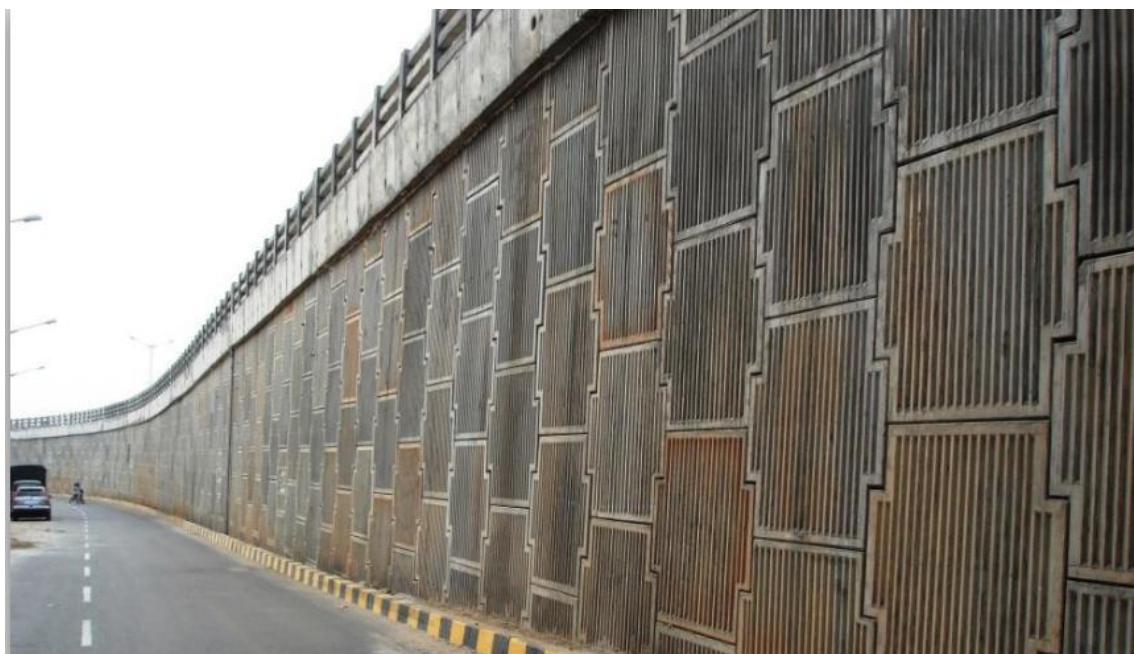
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

Retaining wall	Τοίχοι συγκράτησης
Access ramp	Ράμπα πρόσβασης
Waterfront structure	Κατασκευή προκυμαίας
Bridge abutment	Αντέρεισμα γέφυρας
Prayer seam	Απλή ραφή
Butterfly seam	Ραφή μορφής πεταλούδας
Z seam	Ραφή μορφής Z
J seam	Ραφή μορφής J
Interlocking seam	Εσωτερική ραφή

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα έργα αντιστήριξης, για την ενίσχυση των εδαφικών μαζών που χρήζουν συγκράτησης, λόγω της απότομης κλίσης τους, των δυσμενών συνθηκών του υπεδάφους και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων. Οι συμβατικές κατασκευές αντιστήριξης, παρουσιάζουν αστοχίες, οι οποίες επιφέρουν καταστροφικές συνέπειες στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, με παράλληλο κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο. Με σκοπό την μείωση των συνεπειών αυτών, γίνονται προσπάθειες πρόληψης και ελέγχου τέτοιων φαινομένων. Έναντι των κατασκευών αυτών, υπερισχύει η χρησιμότητα των μηχανικά σταθεροποιημένων τοίχων, χάρη στην αποτελεσματικότητα και την οικονομικότητά τους.

Εφόσον επιλεγεί η χρήση του μηχανικά σταθεροποιημένου τοίχου (Εικόνα 1), ως καταλληλότερη λύση, απαιτείται η ανάλυση της ευστάθειας του συστήματος έδαφος-ΜΣΤ, με σκοπό την αξιολόγηση των πιθανοτήτων αστοχίας. Στόχος είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας, ώστε να προβλεφθεί πότε αναμένεται αστοχία και να μελετηθούν πιθανές διορθωτικές επεμβάσεις. Εκτός των γνωστών απλών υπολογιστικών μεθόδων ανάλυσης της ευστάθειας, προτάθηκε μια νέα μέθοδος, γνωστή ως μέθοδος κλειστού τύπου, κατά την οποία η αστοχούσα μάζα δεν χωρίζεται σε λωρίδες, αλλά αντιμετωπίζεται ως συμπαγές σώμα.



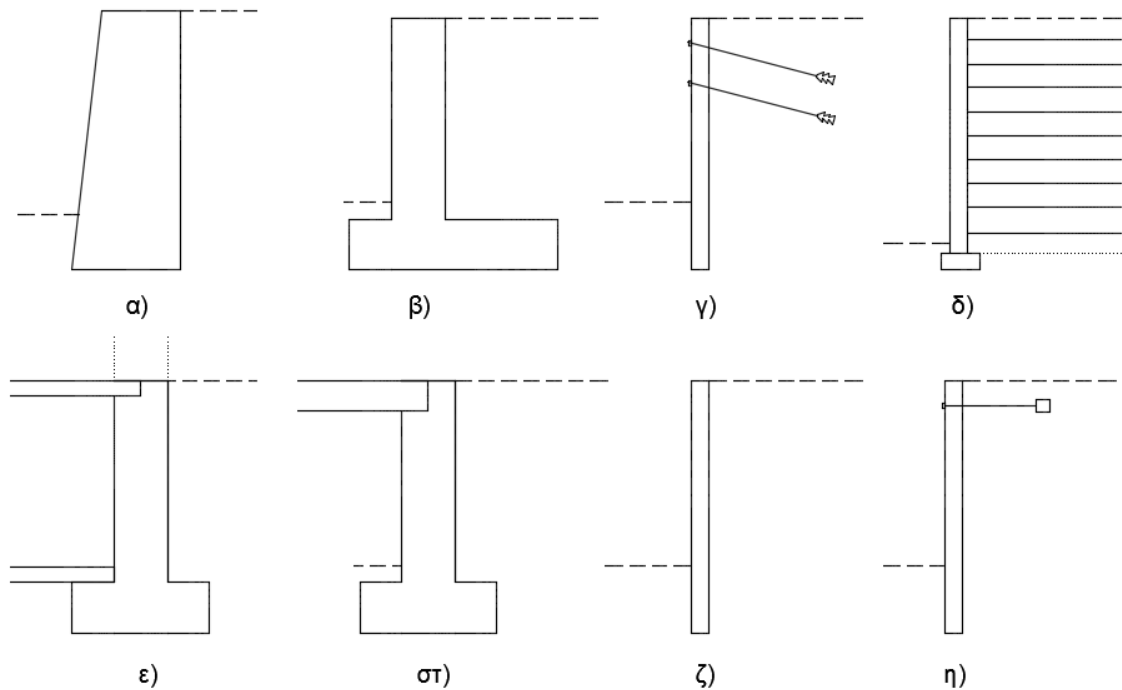
Εικόνα 1: Μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος. Από την ιστοσελίδα: «<http://suporteecontencao.pt>»

1 Έργα Αντιστήριξης Εδαφών

Ως έργα αντιστήριξης ορίζονται οι κατασκευές, που συγκρατούν την υπάρχουσα εδαφική μάζα. Επιτρέπουν την διαμόρφωση οποιασδήποτε απότομης αλλαγής στη στάθμη της γήινης επιφάνειας, με τέτοιο τρόπο ώστε το έδαφος μαζί με την κατασκευή να εμφανίζουν περιορισμένη μετακίνηση. Τέτοια έργα είναι οι τοίχοι βαρύτητας, οι τοίχοι μορφής προβόλου, οι αγκυρωμένοι τοίχοι και η οπλισμένη γη, όπως επίσης, οι τοίχοι υπογείου, τα ακρόβαθρα γεφυρών, τα αυτοσταθή πετάσματα και οι αγκυρωμένοι πασσαλότοιχοι (Σχήμα 1) (Κίρτας 2010).

Οι κατασκευές αυτές βρίσκουν μεγάλη χρησιμότητα σε έργα εκσκαφής κάτω από την επιφάνεια της γης, όπως συμβαίνει κατά την διάνοιξη σηράγγων, καθώς επίσης σε έργα επιχώσεων για την ανύψωση της στάθμης της εδαφικής επιφάνειας, όπως στην περίπτωση κατασκευής λιμενικών έργων. Επιπλέον, αποτελούν τρόπο αντιμετώπισης των κατολισθητικών φαινομένων, με απώτερο σκοπό την εξασφάλιση της μακροχρόνιας ευστάθειάς των πρανών. Πιο συγκεκριμένα, ως κατολίσθηση ορίζεται η μετακίνηση εδαφικών ή βραχωδών μαζών, υπό την δράση της βαρύτητας, τόσο σε φυσικά πρανή, όσο και σε πρανή ορυγμάτων. Η εμφάνιση αυτού του φαινομένου οφείλεται στην περιορισμένη ευστάθεια των πρανών έναντι στατικών και σεισμικών φορτίων. Τόσο γεωλογικοί, όσο φυσικοί και ανθρωπογενείς παράγοντες, είναι υπαίτιοι για την αστοχία των πρανών (Παντελίδης 2012).

Η κατασκευή των έργων αντιστήριξης απαιτεί τόσο την λεπτομερή μελέτη των δεδομένων του προβλήματος, όσο την επιλογή της πιο κατάλληλης λύσης. Τα κυριότερα κριτήρια επιλογής του τύπου αντιστήριξης είναι η φύση του εδάφους, η παρουσία υπόγειου υδροφορέα, οι περιβαλλοντικές επιδράσεις, το κόστος κατασκευής, η μακροπρόθεσμη αντοχή και η αισθητική.



Σχήμα 1: α) Τοίχοι βαρύτητας, β) Τοίχοι μορφής προβόλου, γ) Αγκυρωμένοι τοίχοι, δ) Οπλισμένη γη, ε) Τοίχοι υπογείου, στ) Ακρόβαθρα γεφυρών, ζ) Αυτοσταθή πετάσματα, η) Αγκυρωμένοι πασσαλότοιχοι

1.1 Τοίχοι αντιστήριξης

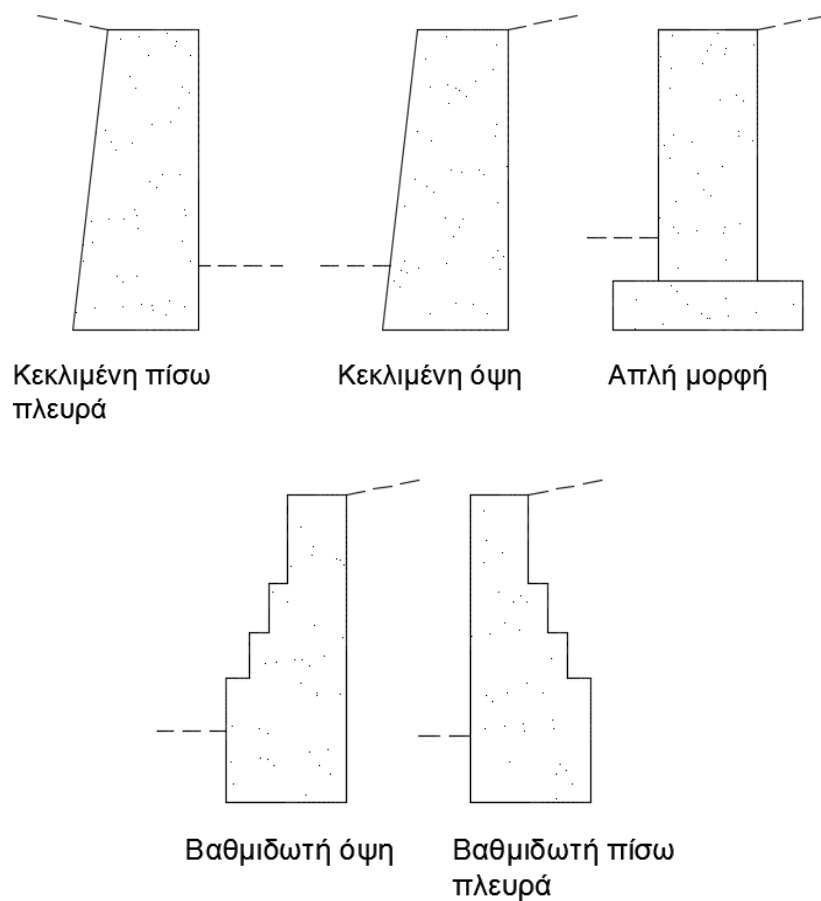
Οι τοίχοι αντιστήριξης (Εικόνα 2) αποτελούν κατηγορία των έργων αντιστήριξης εδαφών και χρησιμοποιούνται ευρέως για την συγκράτηση των εδαφικών μαζών. Η ταξινόμησή τους σε υποκατηγορίες γίνεται βάσει της μάζας τους, της ευκαμψίας τους και των συνθηκών αγκύρωσης. Οι κυριότεροι εξ' αυτών είναι οι τοίχοι βαρύτητας, οι τοίχοι μορφής προβόλου και οι αγκυρωμένοι τοίχοι (BS 8006 2010).



Εικόνα 2: Τοίχος αντιστήριξης. Από την ιστοσελίδα: <<http://www.maccaferri.com>>

1.1.1 Τοίχοι βαρύτητας

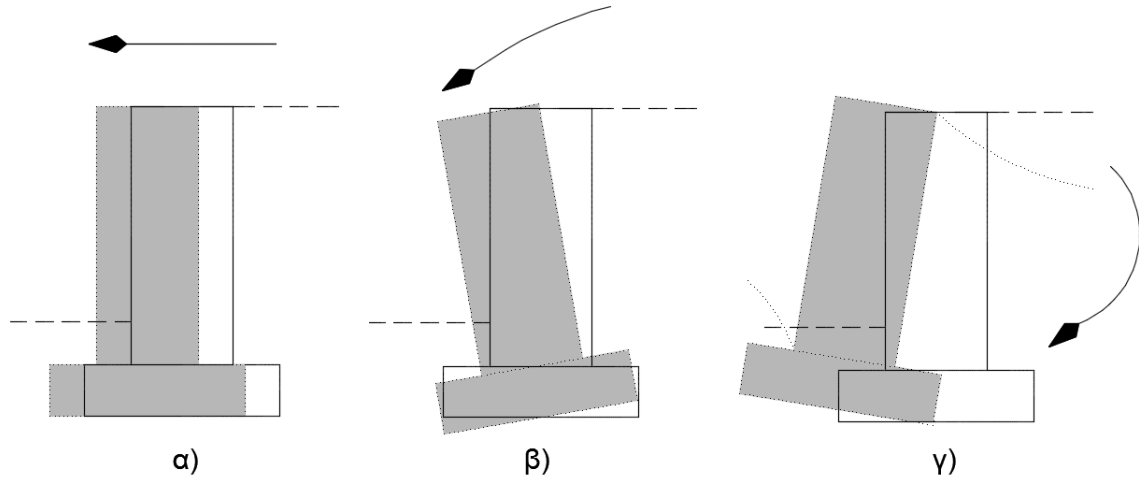
Οι τοίχοι βαρύτητας (Σχήμα 2) είναι ο πιο συνηθισμένος και ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος έργου αντιστήριξης (Κίρτας 2010). Οι δομές που σχηματίζονται είναι τραπεζοειδείς και συντίθενται από άοπλο σκυρόδεμα, τσιμεντόλιθους και σπάνια από φυσικούς λίθους. Σε αυτή τη κατηγορία εντάσσονται και οι τοίχοι από συρματοκιβώτια, τα οποία αποτελούνται από γαλβανισμένα πρισματικά συρμάτινα κουτιά πληρωμένα με πέτρες. Οι τοίχοι αντιστέκονται με το ίδιο τους το βάρος, καθώς είναι πολύ ογκώδεις και δύσκαμπτοι. Οι ιδιότητες αυτές τους καθιστούν μη παραμορφώσιμους, με αποτέλεσμα να χρήζουν ελέγχου μόνο έναντι ολίσθησης και ανατροπής (Μπελόκας n.d.).



Σχήμα 2: Τοίχοι Βαρύτητας

Η ευστάθεια του τοίχου βαρύτητας εξασφαλίζεται όταν δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας λόγω ολίσθησης (Σχήμα 3α) και ανατροπής της κατασκευής (Σχήμα 3β), όπως επίσης όταν αποφεύγεται η ολική ολίσθηση του αντιστηριζόμενου εδάφους και του εδάφους θεμελίωσης (Σχήμα 3γ). Πιο συγκεκριμένα, η ολίσθηση του τοίχου, πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, οφείλεται στην έλλειψη των συνθηκών ισορροπίας των οριζόντιων

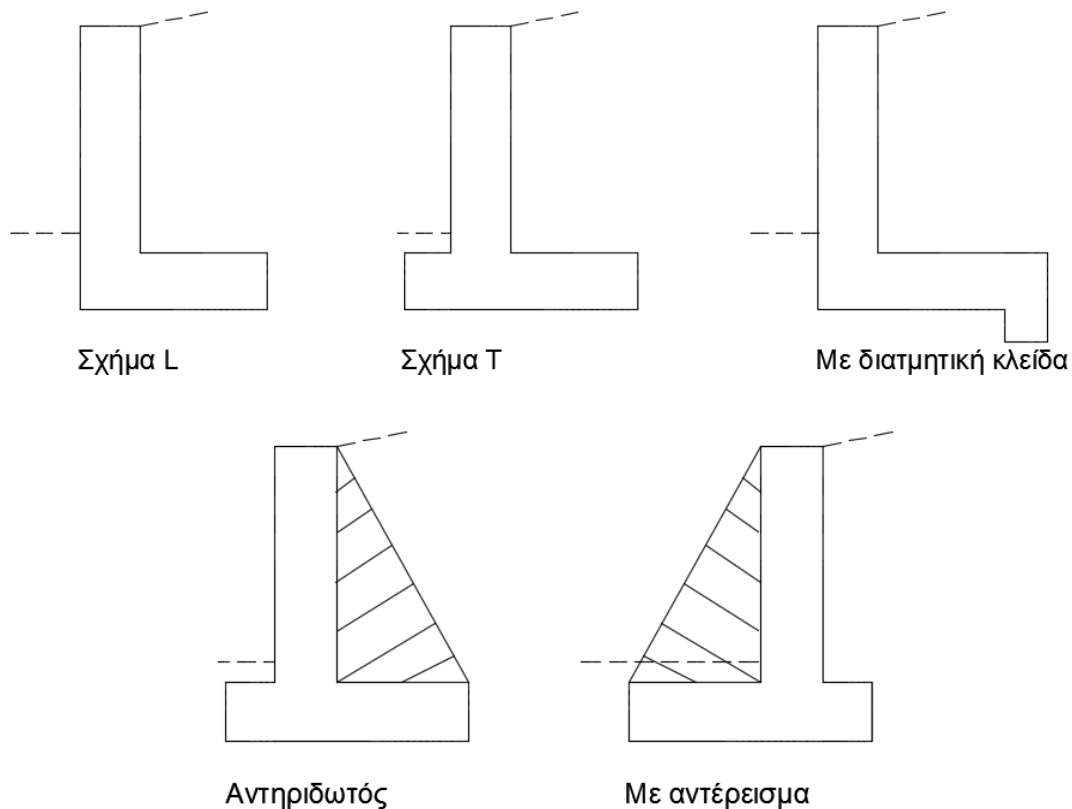
δυνάμεων. Επιπλέον, ο τοίχος μπορεί να ανατραπεί εξαιτίας της μη ισορροπίας των ροπών, κατά την περιστροφή του γύρω από άξονα κάθετο στην κατακόρυφη τομή του, σε συνδυασμό με την υπέρβαση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελίωσης (Kramer 1996).



Σχήμα 3: α) Ολίσθηση τοίχου βαρύτητας, β) Ανατροπή, γ) Ολική ολίσθηση

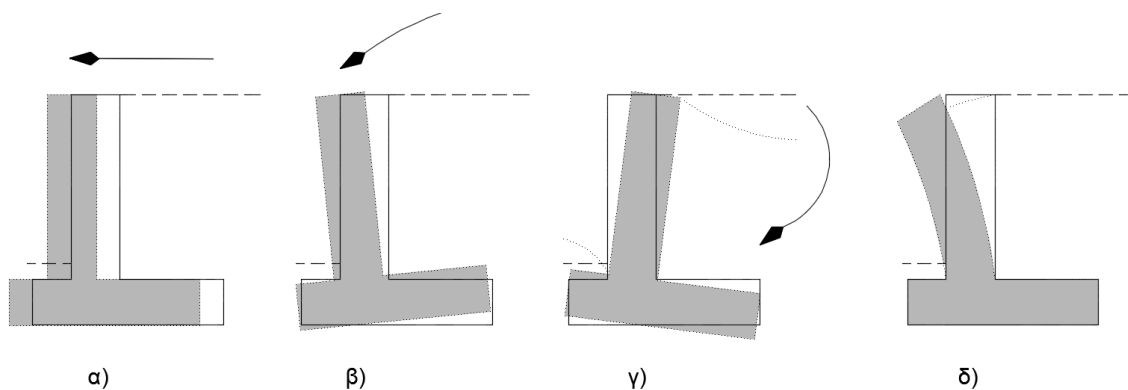
1.1.2 Τοίχοι σε μορφή προβόλου

Οι τοίχοι μορφής προβόλου (Σχήμα 4) κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα και οι διατομές τους είναι λεπτότερες των τοίχων βαρύτητας (Κίρτας 2010). Η λειτουργία τους βασίζεται στη δυσκαμψία τους, σε συνδυασμό με τη δράση του βάρους του εδάφους άνωθεν του πεδίου θεμελίωσης και την αντίσταση του εδάφους κατά μήκος της έμπηξης. Επιπλέον, η κατανομή των πλευρικών ωθήσεων καθ' ύψος του τοίχου εξαρτάται από την παραμορφωσιμότητα που δέχεται το σύστημα τοίχος-έδαφος. Η χρήση των τοίχων αυτών είναι περιορισμένη, εξαιτίας των μεγάλων πλευρικών ωθήσεων που επιτρέπουν να αναπτυχθούν. Η τοποθέτηση αγκυρίων και αντηρίδων αποτελούν λύση αυτού του περιορισμού.



Σχήμα 4: Τοίχοι μορφής προβόλου

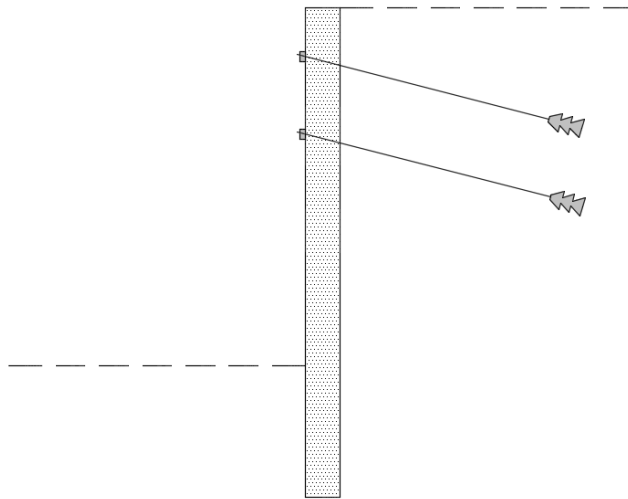
Η αστάθεια των τοίχων μορφής προβόλου οφείλεται στους κινδύνους αστοχίας λόγω ολίσθησης (Σχήμα 5α), ανατροπής (Σχήμα 5β) και ολικής αστάθειας (Σχήμα 5γ), όπως συμβαίνει με τους τοίχους βαρύτητας. Παρουσιάζουν όμως και μηχανισμούς καμπτικής αστοχίας (Σχήμα 5δ), κατά τους οποίους οι καμπτικές ροπές υπερβαίνουν την καμπτική αντοχή. Σε όλες τις περιπτώσεις αστοχίας που προαναφέρθηκαν, σημαντικό ρόλο παίζει η γεωμετρία, η δυσκαμψία και η αντοχή του συστήματος έδαφος-τοίχος (Kramer 1996).



Σχήμα 5: α) Ολίσθηση τοίχου μορφής προβόλου, β) Ανατροπή, γ) Ολική αστάθεια, δ) Μηχανισμοί καμπτικής αστοχίας

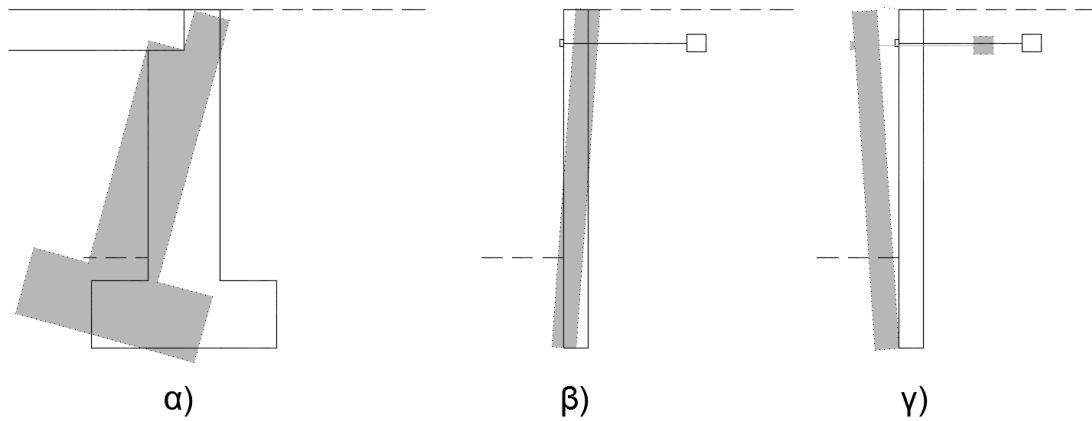
1.1.3 Αγκυρωμένοι τοίχοι

Οι αγκυρωμένοι τοίχοι (Σχήμα 6) κατασκευάζονται εξίσου από οπλισμένο σκυρόδεμα και οι διατομές τους είναι πιο λεπτές από τους τοίχους βαρύτητας (Κίρτας 2010). Η βασική διαφορά τους από τους τοίχους σε μορφή προβόλου είναι ότι περιορίζουν τα προβλήματα ανατροπής χάρη στην ανάπτυξη συστήματος προεντεταμένων και μη αγκυρίων. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν ως ελκυστήρες και αντιστέκονται στις ωθήσεις του εδάφους, αποτρέποντας τις μεγάλες μετακινήσεις των τοίχων αντιστήριξης.



Σχήμα 6: Αγκυρωμένος τοίχος

Η ευστάθειά τους καταρρίπτεται όταν υπάρχει κίνδυνος ανατροπής του τοίχου (Σχήμα 7α), ολικής αστάθειας και αστοχίας των αγκυρίων, καθώς και όταν υπάρχουν μηχανισμοί καμπτικής καταπόνησης (Kramer 1996). Πιο συγκεκριμένα, ανατροπή μπορεί να προκληθεί με περιστροφή του τοίχου γύρω από τον πόδα (Σχήμα 7β), λόγω έλλειψης παθητικής αντίστασης, καθώς το βάθος έμπηξης είναι ανεπαρκές. Παράλληλα, η καμπτική καταπόνηση συμβαίνει όπως και στους τοίχους μορφής προβόλου, με τη διαφορά ότι οι μέγιστες ροπές παρατηρούνται σε διαφορετικά σημεία. Εν κατακλείδι, κατά την αστοχία των αγκυρίων (Σχήμα 7γ), παρατηρείται είτε εξόλκευση του μέλους αγκύρωσης, είτε θραύση του (Παντελίδης 2013).



Σχήμα 7: α) Ανατροπή ακρόβαθρου γέφυρας γύρω από την κορυφή, β) Περιστροφή γύρω από τον πόδα, γ) Αστοχία αγκυρίου

1.2 Οπλισμένη γη με γεωσυνθετικά υλικά

Η οπλισμένη γη ορίζεται ως τρόπος ενίσχυσης των πρανών, αποτελούμενη από εδαφικά υλικά και μη γαιώδη υλικά μικρής διατομής, τα οποία συμβάλλουν στην εφελκυστική αντοχή, κυρίως κατά τη διεύθυνσή τους (Εικόνα 3). Τα έργα αντιστήριξης με οπλισμένη γη κατασκευάζονται με την χρήση γεωσυνθετικών υλικών ή μεταλλικών στοιχείων, τα οποία τοποθετούνται ενδιάμεσα των στρώσεων του εδαφικού υλικού, προσδίδοντας στο έργο την απαραίτητη αντοχή (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2006).



Εικόνα 3: Οπλισμένη γη. Από την ιστοσελίδα: «<http://www.odotechniki.com>»

Μελετώντας εκτενέστερα την χρήση γεωσυνθετικών υλικών, τα γεωφάσματα και τα γεωπλέγματα θεωρούνται ιδανικά για σκοπούς όπλισης, καθώς μέσω του μηχανισμού διάτμησης και αγκύρωσης, λειτουργούν ως οπλισμός. Ταυτοχρόνως, τα γεωφάσματα ενισχύουν την εφελκυστική αντοχή μέσω του μηχανισμού μεμβράνης και τα γεωπλέγματα μέσω της παθητικής αντίστασης του εδάφους.

Η ενίσχυση ενός πρανού με χρήση οπλισμένης γης, δίνει τη δυνατότητα κατασκευής ασφαλούς αλλά παράλληλα απότομης κλίσης, εν αντιθέσει με τον τρόπο διαμόρφωσης του πρανού με μια εκ των συμβατικών μεθόδων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την εξοικονόμηση υλικών κατασκευής, ενώ ταυτοχρόνως, τα υλικά αυτά μπορούν να είναι κατώτερης ποιότητας. Αυτό παρατηρείται στην επισκευή ενός κατολισθητικού φαινομένου, κατά το οποίο χρησιμοποιείται το υλικό που κατέπεσε, χωρίς να χρειάζεται υψηλότερης ποιότητας εδαφικό υλικό. Συγκρίνοντας ένα απότομο πρανές οπλισμένης γης, με ένα άοπλο πρανές μικρής κλίσης, σχεδιασμένα με τον ίδιο συντελεστή ασφαλείας, αποδεικνύεται ότι η πρώτη περίπτωση αποτελεί ασφαλέστερη λύση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, υπάρχει μικρότερος κίνδυνος μακροπρόθεσμων προβλημάτων ευστάθειας, λόγω της ενίσχυσης. Το οπλισμένο πρανές δέχεται περαιτέρω διατήρηση της αντοχής του στο χρόνο, με τη βελτίωση των έργων αποστράγγισης (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2006).

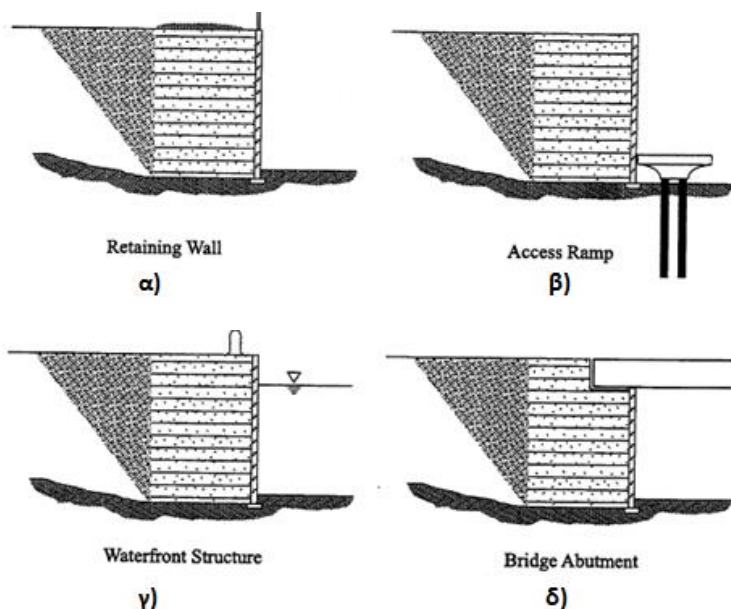
1.2.1 Μηχανικά σταθεροποιημένοι τοίχοι

Οι μηχανικά σταθεροποιημένοι τοίχοι (Εικόνα 4) αποτελούν εναλλακτική λύση στην σταθεροποίηση του εδάφους. Η κατασκευή τους ενδείκνυται για απότομες πλαγιές, ασταθή πρανή και περιοχές όπου το υπέδαφος παρουσιάζει δυσμενείς συνθήκες. Αποδεικνύεται ότι, είναι οικονομικά συμφέροντες σε σχέση με άλλες κατασκευές ενίσχυσης, όπως είναι οι τοίχοι από σκυρόδεμα ή οι τοίχοι βαρύτητας. Η χρησιμότητά τους τονίζεται από την ευελιξία και την ικανότητα τους να αντέχουν παραμορφώσεις, λόγω των κακών συνθηκών του υπεδάφους. Επίσης, με βάση τις παρατηρήσεις σε σεισμικά ενεργές ζώνες, οι δομές αυτές εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε σεισμικά φορτία, σε σχέση με τους τοίχους σκυροδέματος (BS 8006 2010).



Εικόνα 4: Μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος. Από την ιστοσελίδα: «<http://armos-prokat.gr>»

Παρουσιάζουν σημαντικά τεχνικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών κατασκευών, όπως είναι το γεγονός ότι χρειάζονται απλές και ταχείες διαδικασίες υλοποίησης, ενώ παράλληλα δε χρήζουν μεγάλου κατασκευαστικού εξοπλισμού. Επιπλέον, δεν απαιτούνται εξειδικευμένες δεξιότητες για την ανύψωση του τοίχου. Χρειάζεται μικρή προετοιμασία του χώρου του έργου και η έκταση εμπροσθεν του, για τις εργασίες κατασκευής, είναι μικρή. Σημειώνεται ότι, η διαμόρφωση άκαμπτου θεμελίου θεωρείται περιττή, εφόσον ο τοίχος είναι ανθεκτικός στις παραμορφώσεις. Σημειώνεται ότι, οι μηχανικά σταθεροποιημένοι τοίχοι (Σχήμα 8) αποτελούν τεχνικές εφικτές σε ύψος, που ξεπερνά τα τριάντα μέτρα.



Σχήμα 8: Περιπτώσεις μηχανικά σταθεροποιημένων τοίχων

Πηγή: BS 8006, 2010

Οι μηχανικά σταθεροποιημένοι τοίχοι μπορούν να διαμορφωθούν με κλίση που ξεπερνά την κλίση ευστάθειας του ελεύθερου πρανούς, δηλαδή με αρκετά απότομη κλίση, ακόμη και κατακόρυφη. Σημειώνεται ότι, στα πρανή που διαμορφώνονται σε επικλινή ή συμπιεστά εδάφη, οι ασκούμενες τάσεις στην θεμελίωση του επιχώματος είναι αυξημένες και συνεπώς οι έλεγχοι ευστάθειας και παραμορφώσεων του εδάφους θεμελίωσης είναι απαραίτητοι (BS 8006 2010).

Οι τοίχοι με οπλισμένη γη, επηρεάζονται από παράγοντες (Πίνακας 1), οι οποίοι σχετίζονται με την ακολουθούμενη κατασκευαστική μεθοδολογία, τα χαρακτηριστικά των υλικών επίχωσης και των υλικών ενίσχυσης. Επιπλέον, τα έργα αυτά επηρεάζονται από τη δράση εξωγενών παραγόντων, όπως είναι οι εξωτερικές φορτίσεις και η ανάπτυξη υδατικών πιέσεων στους πόρους των εδαφικών υλικών.

Πίνακας 1: Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των τοίχων αντιστήριξης

Κατασκευαστική Μεθοδολογία	Χαρακτηριστικά Εδαφικών Υλικών	Χαρακτηριστικά Υλικών Ενίσχυσης
Μέθοδος κατασκευής, Εργασίες συμπύκνωσης, Διαχείριση	Μέγεθος/Σχήμα κόκκων, Κοκκομετρική διαβάθμιση, Όρια συνεκτικότητας, Ορυκτολογία, Ανθεκτικότητα	Σύνθεση, Ανθεκτικότητα, Τύπος, Ιδιότητες επιφάνειας, Διαστάσεις, Αντοχή, Ακαμψία
Έργο αντιστήριξης με οπλισμένη γη	Κατάσταση εδαφικών υλικών	Διάταξη στοιχείων ενίσχυσης
Γεωμετρία, Θεμελίωση, Χρήση	Πυκνότητα, Εντατική κατάσταση, Βαθμός κορεσμού, Συνθήκες στράγγισης	Τοποθέτηση, Αποστάσεις, Προσανατολισμός

Πηγή: Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 2006

Επιπλέον, οι μηχανικά σταθεροποιημένοι τοίχοι υπόκεινται σε βλάβες, που επηρεάζουν την αποδοτικότητά τους ως έργα ενίσχυσης. Επομένως, είναι απαραίτητο να διαχωρίζονται σε επιπλέον κατηγορίες, αναλόγως των συνεπειών που επιφέρει η πιθανή αστοχία τους. Σύμφωνα με το Βρετανικό Πότυπο ‘Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills’ διαμορφώνεται ο Πίνακας 2 που ακολουθεί και περιλαμβάνει τις κατηγορίες με τον αντίστοιχο βαθμό βλάβης.

Πίνακας 2: Επιπτώσεις, λόγω αστοχίας των μηχανικά σταθεροποιημένων τοίχων

Βαθμός επιπτώσεων	Παράδειγμα Έργου
1. Χαμηλή	Τοίχος αντιστήριξης ($H < 1.5m$), όπου η αστοχία θα προκαλούσε περιορισμένες βλάβες
2. Μέση	Τοίχος αντιστήριξης επιχωμάτων, όπου η αστοχία θα προκαλούσε μέτριες βλάβες και περιορισμό χρήσης
3. Υψηλή	Τοίχος αντιστήριξης αυτοκινητοδρόμων, σιδηροδρομικών γραμμών, τοίχοι ανάληψης φορτίων ακροβάθρων γεφυρών

1.2.1.1 Εδαφικά υλικά επίχωσης

Τα έργα αντιστήριξης με οπλισμένη γη και συγκεκριμένα με χρήση γεωσυνθετικών υλικών περιλαμβάνουν τρεις βασικές κατηγορίες υλικών. Πρόκειται για τα εδαφικά υλικά επίχωσης, τα γεωσυνθετικά υλικά ενίσχυσης και τα στοιχεία επιφανειακής επικάλυψης.

Αρχικά, τα εδαφικά υλικά επίχωσης, κρίνεται απαραίτητο να περάσουν από ελέγχους, ως προς την καταλληλότητά τους. Οι δοκιμές που γίνονται σχετίζονται με την αντοχή, την κοκκομετρική διαβάθμιση, την προέλευση, τις χημικές και ηλεκτροχημικές ιδιότητες, την υγρασία και τον τρόπο συμπίκνωσης, καθώς επίσης την πλαστικότητα των υλικών. Σημειώνεται ότι, χρησιμοποιούνται κυρίως κοκκώδη υλικά, καλής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Σε τέτοιου είδους έργα, λαμβάνεται υπόψιν και η παρουσία νερού. Στην περίπτωση κυκλοφορίας υπόγειου νερού, θα πρέπει να γίνεται έλεγχος συμβατότητας μεταξύ του υλικού επίχωσης και του εδαφικού υλικού. Επιπλέον, όταν χρησιμοποιούνται άκαμπτα στοιχεία επιφανειακής επικάλυψης, θα πρέπει να ελέγχεται η συμπίκνωση των υλικών επίχωσης, καθώς υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης βλαβών από μελλοντικές καθιζήσεις ή παραμορφώσεις του επιχώματος (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2006).

1.2.1.2 Γεωσυνθετικά υλικά

Τα γεωσυνθετικά υλικά (Εικόνα 5) μπορεί να είναι γεωυφάσματα, γεωπλέγματα ή γεωδίκτυα. Θα πρέπει να πληρούν τις προδιαγραφές, όσον αφορά τη μακροχρόνια συμπεριφορά τους ως προς την εφελκυστική αντοχή, την διάτμηση, την κάμψη και την διάβρωση, καθώς επίσης την αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον εδαφικό υλικό.



Εικόνα 5: Γεωσυνθετικά υλικά οπλισμένης γης. Από την ιστοσελίδα: «<http://www.maccaferri.com>»

Προκειμένου να επιλεγεί το γεωσυνθετικό υλικό με την κατάλληλη εφελκυστική αντοχή, πραγματοποιείται ενδελεχής έλεγχος της απώλειας αντοχής, κατά τη διάρκεια της σχεδιαστικής ζωής. Οι εφελκυστικές ιδιότητες των υλικών επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι ο ερπυσμός, η γήρανση, η ζημία κατά την τοποθέτηση, οι θερμοκρασιακές μεταβολές και η περιορισμένη αντοχή. Σημειώνεται ότι, η εφελκυστική αντοχή των γεωσυνθετικών υλικών, που έχουν ως βάση το ίδιο πολυμερές, ποικίλει εξαιτίας όλων αυτών των προαναφερθέντων παραγόντων.

Παρατηρείται ότι, γεωσυνθετικά υλικά, που είναι ανθεκτικά στη διάβρωση, υποβαθμίζονται λόγω φυσικοχημικών δραστηριοτήτων, όπως είναι η υδρόλυση, η οξείδωση και η ρηγμάτωση από περιβαλλοντική καταπόνηση. Ταυτοχρόνως, κατά την δημιουργία των συνδέσεων και της πρόσοψης του τοίχου, παρουσιάζουν αδυναμία σε βλάβες, τόσο κατά την τοποθέτησή τους, όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω της αδυναμίας τους στις υψηλές θερμοκρασίες και την ηλιακή ακτινοβολία, αποθηκεύονται σε κλειστούς στεγασμένους χώρους, ώστε να προστατεύονται από αλλοιώσεις των ιδιοτήτων τους. Για τον ίδιο λόγο, η εγκατάστασή τους εντός του υλικού επιχώματος γίνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Με σκοπό να γίνει σωστή επιλογή των γεωσυνθετικών υλικών, μελετάται η ικανοποίηση των στοιχείων που ακολουθούν. Αρχικά, είναι απαραίτητη η λεπτομερής περιγραφή του υλικού κατασκευής ως προς τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές του. Παράλληλα,

χρειάζονται πληροφορίες για την συμπεριφορά του, μακροπρόθεσμα και βραχυπρόθεσμα ως προς την εφελκυστική αντοχή, τον ερπυσμό, την κόπωση, το μέτρο ελαστικότητας και τον συντελεστή τριβής. Σημειώνεται ότι, η μακροχρόνια ερπυστική συμπεριφορά δεν είναι πλήρως καθορισμένη, καθώς δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται υλικό συγκεκριμένων εταιρειών, θα συνοδεύεται από πιστοποιητικό ποιοτικού ελέγχου των κυριότερων ιδιοτήτων του. Επιπλέον, παρατηρείται η ανθεκτικότητα και η συμπεριφορά του κατά την τοποθέτηση, την αποθήκευση, τη μεταφορά, την πρόκληση βλαβών και τη σχετική επίδραση στα στοιχεία επιφανειακής επικάλυψης. Είναι αναγκαίο να τονιστεί ότι, θεωρούνται απαραίτητοι οι ποιοτικοί έλεγχοι κατά την παραγωγή των υλικών και η δοκιμή τους σε αντίξοες εξωγενείς περιβαλλοντικές συνθήκες πριν την τοποθέτησή τους (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2006).

1.2.1.3 Στοιχεία επιφανειακής επικάλυψης

Σε επιχώματα κλίσης άνω των 70 μοιρών, κρίνεται αναγκαία η κατασκευή στοιχείων επιφανειακής επικάλυψης (Εικόνα 6), τόσο για εξωτερική αγκύρωση και προστασία του οπλισμού, όσο για λειτουργικούς και αισθητικούς λόγους. Οι επικαλύψεις μπορεί να διαμορφώνονται από εύκαμπτα στοιχεία, αποτελούμενα από συρματοπλέγμα, συρματοκιβώτια ή συνθετικά υλικά. Επιπλέον, μπορεί να είναι άκαμπτα προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα, μεταλλικά στοιχεία, ξύλο, ακόμη και συνδυασμό των ανωτέρω ή άκαμπτα στοιχεία εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

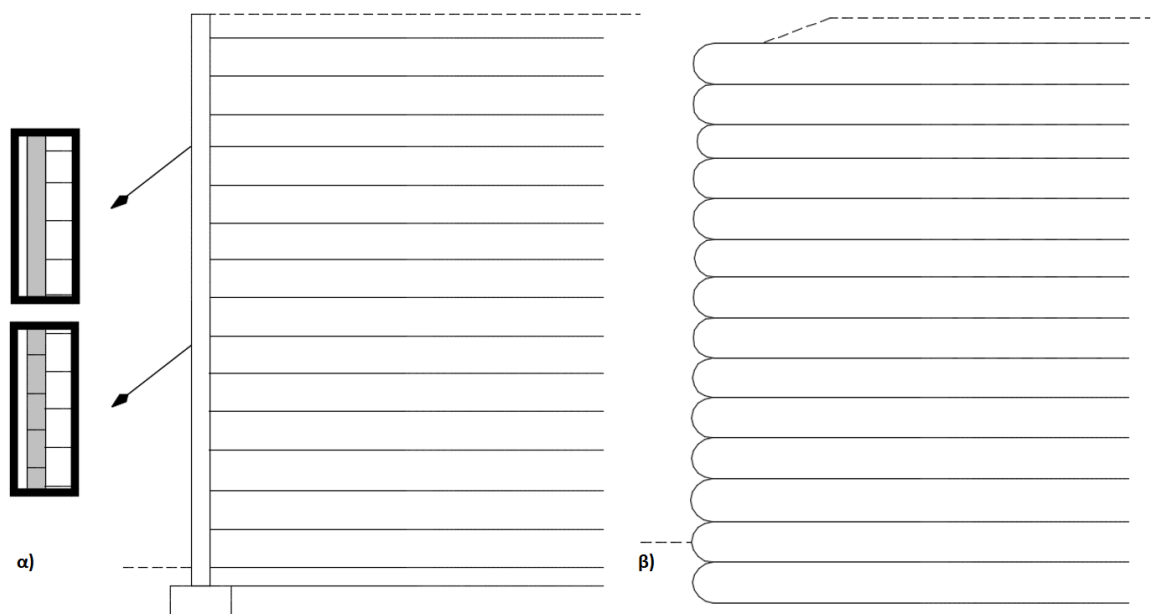


Εικόνα 6: Επιφανειακή επικάλυψη μηχανικά σταθεροποιημένου τοίχου. Από την ιστοσελίδα: «<http://www.maccaferri.com>»

Σκοπός των στοιχείων επιφανειακής επικάλυψης είναι η παραλαβή των διαφορικών μετακινήσεων του τοίχου, με παράλληλη προστασία αυτών και του οπλισμού, από πιθανές

βλάβες. Τα στοιχεία αυτά θα πρέπει να έχουν την δυνατότητα να λαμβάνουν φορτίο τουλάχιστον ίσο με τη φέρουσα ικανότητα του οπλισμού που χρησιμοποιείται.

Κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή επικάλυψης στην επιφάνεια του διαμορφωμένου πρανούς, τόσο για την εξωτερική αγκύρωση του οπλισμού, όσο και για αισθητικούς λόγους (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2006). Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο ειδών επιφανειακές προσόψεις, η άκαμπτη και η εύκαμπτη επικάλυψη. Στην πρώτη περίπτωση, η πρόσοψη αποτελείται από ένα συνεχές στοιχείο ή από διακριτά στοιχεία από σκυρόδεμα (Σχήμα 9α), εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταλλικά φύλλα, μεταλλικά πλέγματα, ξύλο ή ακόμη και συνδυασμό αυτών. Στη δεύτερη περίπτωση, η επικάλυψη σχηματίζεται από την επέκταση και προς τα μέσα αναδίπλωση των γεωσυνθετικών υλικών, με τέτοιο τρόπο, ώστε να περιβάλλουν εξωτερικά τα υλικά της επίχωσης (Σχήμα 9β).



Σχήμα 9: α) Πρόσοψη τοίχου αντιστήριξης από συνεχή ή διακριτά στοιχεία, β) Σχηματισμός πρόσοψης μετά από αναδίπλωση των γεωσυνθετικών υλικών

1.2.2 Κατασκευή μηχανικά σταθεροποιημένου τοίχου

Προκειμένου να κατασκευαστεί ένας μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος, είναι απαραίτητο να προηγηθούν κάποιες εργασίες. Αρχικά, διαμορφώνεται η επιφάνεια θεμελίωσης, η οποία θα πρέπει να έχει τις κατάλληλες διαστάσεις, ώστε να επιτρέπει την κατασκευή της βάσης της επίχωσης και την τοποθέτηση της πρώτης στρώσης των γεωσυνθετικών υλικών ενίσχυσης. Η εκσκαφή της θεμελίωσης γίνεται τμηματικά σε

ομαλές επιφάνειες υπό την επιθυμητή κλίση και στάθμη. Επιπλέον, διαμορφώνονται και οι απαιτούμενοι αναβαθμοί, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μελέτης. Σημειώνεται ότι, σε περίπτωση που το έδαφος περιέχει ακατάλληλα υλικά, θα πρέπει να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν με υλικό όμοιο της επίχωσης. Όταν ολοκληρωθεί η τελική στάθμη της θεμελίωσης, η επιφάνεια διαβρέχεται και συμπυκνώνεται (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2006).

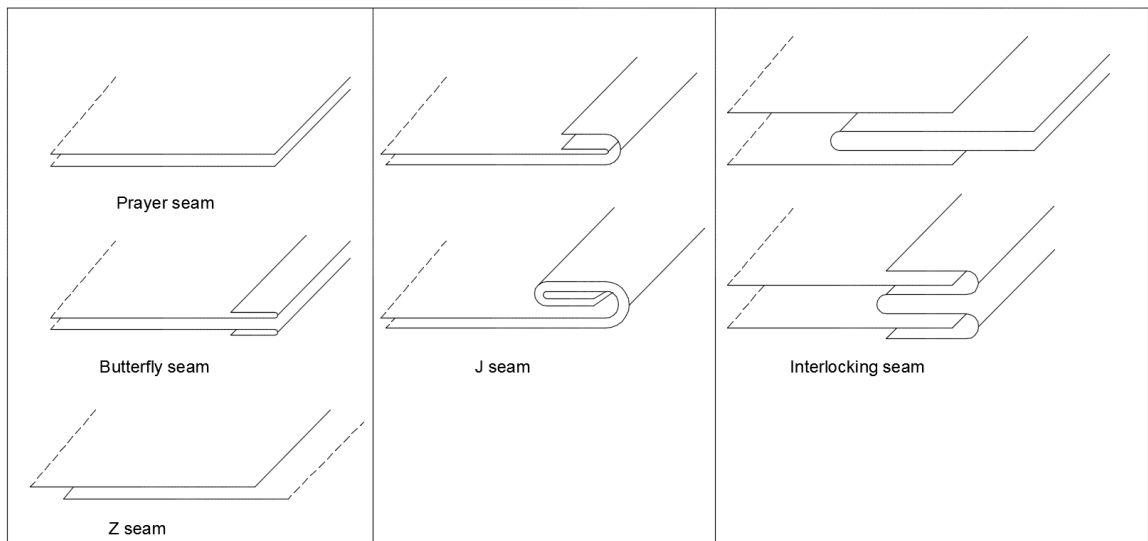
Είναι σύνηθες, να διαμορφώνεται ειδική τάφρος στο σημείο κατασκευής της επιφανειακής επικάλυψης. Στην τάφρο αυτή κατασκευάζεται θεμέλιο από σκυρόδεμα, κατάλληλο για να λαμβάνει τα πρόσθετα φορτία της πρόσωσης και να συμβάλλει στην μείωση των καθιζήσεων, ενώ παράλληλα, αποτελεί επίπεδη επιφάνεια, κατάλληλη για την διαμόρφωση της επικάλυψης.

Μελετώντας εκτενέστερα την κατασκευή και συμπύκνωση των στρώσεων της επίχωσης, παρατηρούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις, οι οποίες πρέπει να ικανοποιούνται. Αρχικά, τα υλικά της επίχωσης μπορούν να έχουν μέγιστη διάσταση κόκκου έως τα 2/3 του πάχους της συμπυκνωμένης στρώσης. Σε περίπτωση που εντοπιστούν λίθοι και χάλικες, που ξεπερνούν αυτό το όριο, αφαιρούνται, ώστε να μην προκαλέσουν βλάβες στα γεωσυνθετικά υλικά ενίσχυσης, που θα τοποθετηθεί μεταγενέστερα. Η διαμόρφωση και συμπύκνωση των υλικών της επίχωσης γίνεται παράλληλα στην διεύθυνση της επικάλυψης του τοίχου αντιστήριξης, υπο κλίση 2% έως 4%, ώστε να εναποτίθενται τα ύδατα των κατακρημνήσεων, προς κατάλληλα διαμορφωμένους αποδέκτες. Έπειτα, η μέγιστη καθ' ύψος απόσταση μεταξύ των στρώσεων των γεωσυνθετικών υλικών δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 80 εκατοστά. Επιπλέον, το πάχος των συμπυκνωμένων στρώσεων θα πρέπει να είναι ίσο ή υποπολλαπλάσιο της τιμής αυτής.

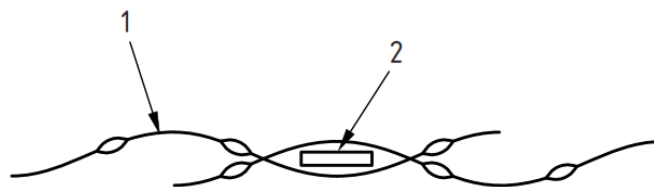
Εκτός των χονδρόκοκκων υλικών εντός του εδάφους επίχωσης, μπορεί να βρεθεί μεγάλη ποσότητα λεπτοκόκκου κλάσματος, η παρουσία του οποίου επιβάλλει την μελέτη των υπερπίεσεων των πόρων κατά τη συμπύκνωση. Σε περίπτωση που το ποσοστό υγρασίας είναι μεγάλο, είναι αναγκαίο να λαμβάνονται μέτρα προστασίας της επικάλυψης του τοίχου από παραμορφώσεις, λόγω της πλαστικής συμπεριφοράς των υλικών.

Εάν η θεμελίωση είναι αρκετά συμπίεστη, θα πρέπει να διαμορφωθεί κατάλληλη στρώση εξυγίανσης, ώστε να διευκολυνθεί η τοποθέτηση της πρώτης στρώσης των υλικών ενίσχυσης. Εφόσον εξασφαλιστούν τα άνωθεν, κάθε φορά που θα συμπυκνώνεται μια στρώση εδαφικού υλικού, θα ακολουθεί η τοποθέτηση στρώσης γεωσυνθετικών υλικών, τα οποία στη συνέχεια θα συνδέονται με τα στοιχεία της άκαμπτης επικάλυψης και θα τανύζονται, ώστε να διαστρωθεί ομαλά η επόμενη στρώση του υλικού επίχωσης.

Τα γεωσυνθετικά στοιχεία ενίσχυσης διαθέτουν κάποιες επιπλέον προδιαγραφές, που πρέπει να ικανοποιούνται. Αρχικά, ως ελάχιστη τιμή επικάλυψης ορίζονται τα 30 εκατοστά, ώστε να λαμβάνονται με ασφάλεια οι εφελκυστικές δυνάμεις. Επιπλέον, τα διαμήκη στοιχεία εμφανίζουν αρμούς ένωσης, εφόσον είναι αναπόφευκτη η ασυνέχεια του. Αντιθέτως, τα εγκάρσια δεν πρέπει να έχουν ματίσεις, αλλά να είναι συνεχή σε όλο το πλάτος. Στο Σχήμα 10 που ακολουθεί, παρουσιάζονται κάποιες από τις τυπικές μορφές αρμών σύνδεσης των γεωσυνθετικών υλικών, για την εξασφάλιση της μεγαλύτερης δυνατής αντοχής και ανθεκτικότητας. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τρόπος σύνδεσης δύο γεωϋφασμάτων, είναι με την παρεμβολή ράβδου μεταξύ των οπών (Σχήμα 11). Η ράβδος που χρησιμοποιείται πρέπει να ικανοποιεί τις προδιαγραφές αντοχής και διατομής, ώστε να μην εμφανίζονται μεγάλες παραμορφώσεις και οι διαστάσεις της να συνάδουν με εκείνες των οπών (BS 8006 2010).



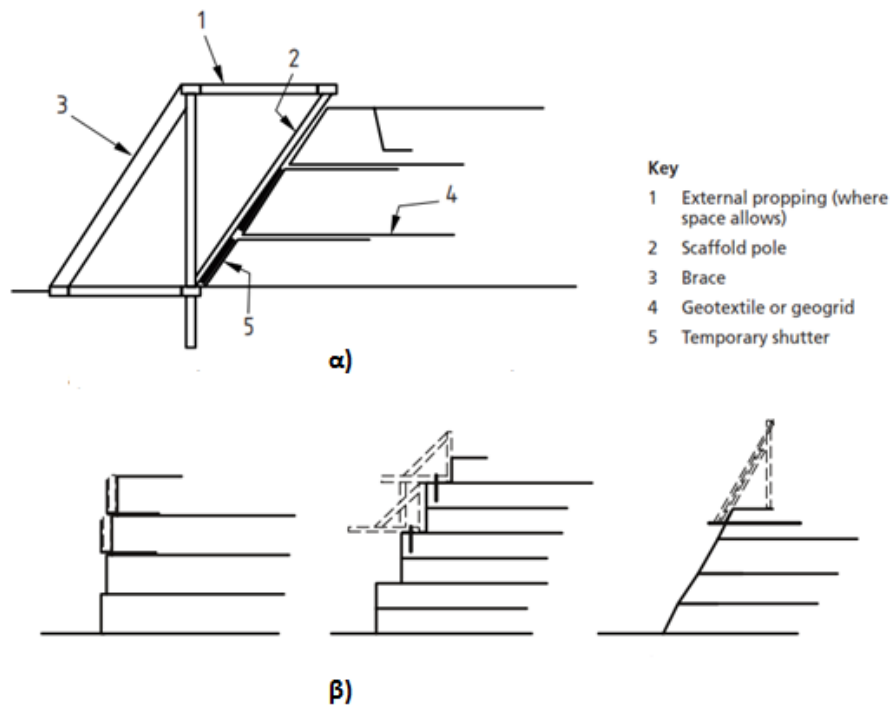
Σχήμα 10: Τυπικές μορφές ραφής των γεωσυνθετικών υλικών



Σχήμα 11: Συχνός τρόπος σύνδεσης δύο γεωϋφασμάτων, 1) μέρος γεωϋφάσματος, 2) παρεμβαλλόμενη ράβδος

Πηγή: BS 8006, 2010

Στην περίπτωση της εύκαμπτης επικάλυψης, κατά τη διάστρωση του γεωσυνθετικού υλικού, αφήνεται επαρκές τμήμα του, από την πλευρά της πρόσοψης, ώστε να μπορεί μετέπειτα να αναδιπλωθεί και να αγκυρωθεί. Προκειμένου να μην ρηγματωθεί το υλικό κατά την αναδίπλωση, η ακτίνα καμπυλότητας θα πρέπει να επιλεγεί βάσει των προδιαγραφών της μελέτης. Εν συνεχεία, κατά την τοποθέτηση των εδαφικών στρώσεων ασκούνται ωθήσεις στην επιφανειακή επικάλυψη, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η προσωρινή υποστήριξή της, ώστε να μην καταπέσει. Η στήριξη του τοίχου μπορεί να γίνει εξωτερικά με χρήση σκαλωσιάς (Σχήμα 12), ή εσωτερικά με σάκους γεμάτους από εδαφικό υλικό.



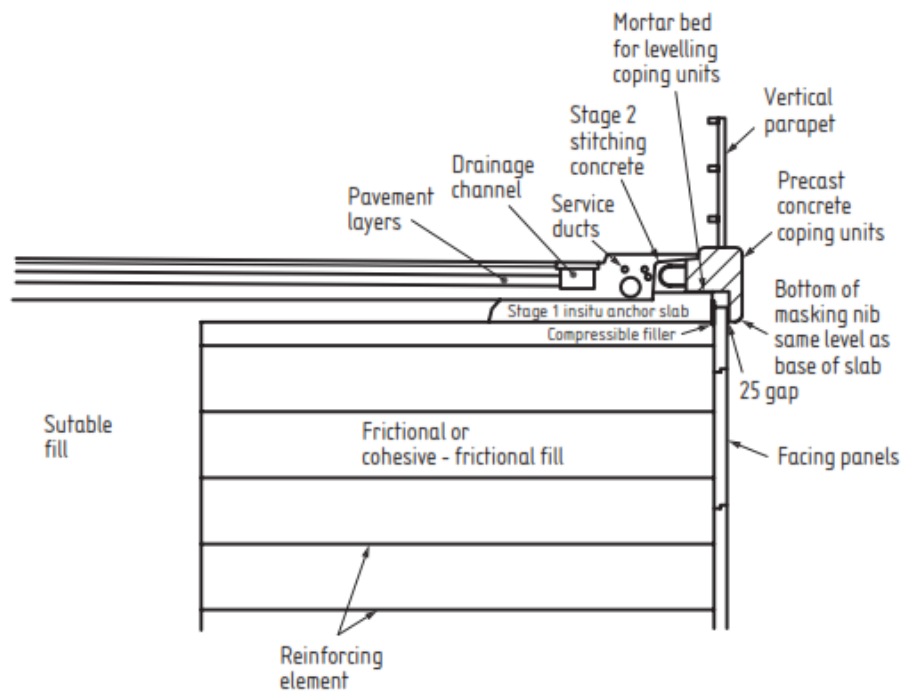
Σχήμα 12: Εξωτερική στήριξη τοίχου. **α)** Χρήση σκαλωσιάς σε όλο το ύψος, **β)** Χρήση σκαλωσιάς ανά επίπεδο

Πηγή: BS 8006, 2010

Τα γεωσυνθετικά υλικά παρουσιάζουν ευαισθησία σε φθορές, κατά την κίνηση των μηχανημάτων στην επιφάνεια διάστρωσης. Επομένως, η διαδικασία τοποθέτησής τους θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα οχήματα να μην κινούνται άνωθεν των τοποθετημένων στρώσεων υλικού ενίσχυσης και εδάφους αντίστοιχα. Ταυτοχρόνως, τα στοιχεία επιφανειακής επικάλυψης πρέπει να προστατεύονται από βλάβες κατά την κίνηση των βαρέων οχημάτων, όπως επίσης από φθορές κατά την τοποθέτηση των υλικών επίχωσης και των στρώσεων των γεωπλεγμάτων. Πιο συγκεκριμένα, οχήματα βάρους άνω

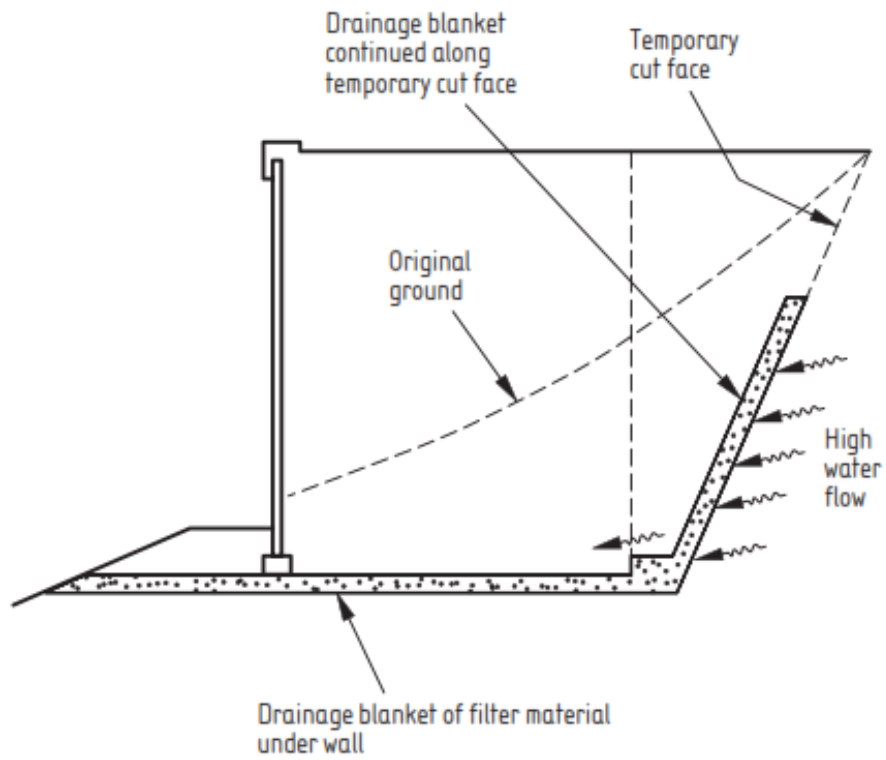
των 3,5 kN, δεν πρέπει να πλησιάζουν την πρόσοψη του τοίχου σε απόσταση μικρότερη του ενός μέτρου. Στο εύρος αυτό, η συμπύκνωση μπορεί να γίνει με χειροκίνητη πλάκα δόνησης.

Στα έργα μηχανικά σταθεροποιημένων τοίχων είναι αναγκαία η εξασφάλιση της αποστράγγισης του νερού, ώστε να αποφευχθούν οι υδατικές πιέσεις και η μείωση της αντοχής των γεωσυνθετικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση αυτοκινητοδρόμων διαμορφώνεται τάφρος στην άκρη του οδοστρώματος, ώστε να μην διεισδύει το νερό εντός του υλικού επίχωσης (Σχήμα 13). Εάν στο έργο παρατηρείται υπόγειος υδροφορέας, από τον οποίο αναμένεται διήθηση προς το διαμορφωμένο επίχωμα, τότε είναι αναγκαία η διαμόρφωση διαχωριστικής αποστραγγιστικής στρώσης (Σχήμα 14). Η στρώση αυτή κατασκευάζεται στην παρειά και στη βάση του επιχώματος, που εφάπτεται του φυσικού εδάφους, ώστε να απομακρύνονται τα ύδατα (BS 8006 2010).



Σχήμα 13: Τρόποι κατασκευής τάφρου στην άκρη του οδοστρώματος

Πηγή: BS 8006, 2010



Σχήμα 14: Διαχωριστική αποστραγγιστική στρώση

Πηγή: BS 8006, 2010

2 Μέθοδοι Ανάλυσης Ευστάθειας Πρανών

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάλυση της ευστάθειας των πρανών διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις απλές υπολογιστικές μεθόδους και τις αριθμητικές μεθόδους. Στην πρώτη περίπτωση, πραγματοποιείται ανάλυση της οριακής ισορροπίας των πρανών. Στην δεύτερη περίπτωση, οι μέθοδοι αποτελούν προσεγγιστικούς αλγόριθμους επίλυσης των εξισώσεων, που διέπουν τα προβλήματα της γεωτεχνικής μηχανικής, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, προτάθηκε η μέθοδος κλειστού τύπου, η οποία αποτελεί μέθοδο ανάλυσης της οριακής ισορροπίας. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα γίνει αναφορά στις απλές υπολογιστικές μεθόδους και θα αναπτυχθεί η μέθοδος κλειστού τύπου (Μπουκοβάλας 2006).

2.1 Απλές υπολογιστικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι ανάλυσης της οριακής ισορροπίας αποσκοπούν στην εύρεση της δυσμενέστερης επιφάνειας αστοχίας του πρανούς, συναρτήσει των ενεργών τάσεων που ασκούνται στην επιφάνεια αυτή. Βάσει της μεθόδου των λωρίδων, που προτάθηκε αρχικά από τον Petterson το 1916 και έπειτα από τον Fellenius, γίνεται υπολογισμός των ορθών και διατμητικών τάσεων της επιφάνειας αστοχίας, χρησιμοποιώντας για το σκοπό αυτό, το βάρος της ολισθαίνουσας εδαφικής μάζας. Έπειτα, προέκυψαν και άλλες απλές υπολογιστικές μέθοδοι, βασισμένες στην μέθοδο των λωρίδων (Πίνακας 3). Όπως προαναφέρθηκε, απλή υπολογιστική μέθοδο αποτελεί και η μέθοδος κλειστού τύπου των Pantelidis και Griffiths (2012), στην οποία η ολισθαίνουσα μάζα αντιμετωπίζεται ως συμπαγές σώμα και δεν διαχωρίζεται σε λωρίδες (Μπουκοβάλας 2006).

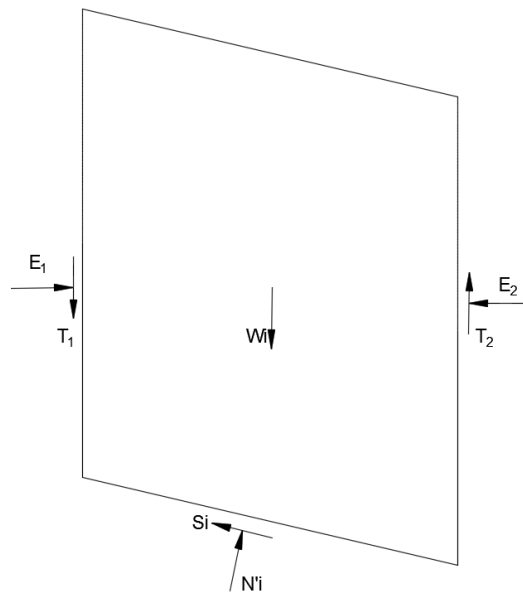
Πίνακας 3: Μέθοδοι ανάλυσης της οριακής ισορροπίας

Μέθοδος	Χρονολογία	Επιφάνεια ολίσθησης	
		Κυκλική	Μη κυκλική
Μέθοδοι των Λωρίδων			
<u>Fellenius</u> (Fellenius 1936)	1936	√	--

<u>Jambu</u> (απλουστευμένη) (Janbu 1954)	1954	√	√
<u>Bishop (ακριβής)</u> (Bishop 1955)	1955	√	√
<u>Bishop</u> (απλουστευμένη) (Bishop 1955)	1955	√	√
<u>Lowe-Karafiath</u> (Lowe et al. 1960)	1960	--	√
<u>Morgenstern-Price</u> (Morgenstern et al. 1965)	1965	√	√
<u>Spencer</u> (Spencer 1967)	1967	√	√
<u>Jambu (ακριβής)</u> (Janbu 1968)	1968	√	√
<u>Corps of Engineers</u> (Corps of Engineers 1970)	1970	--	√
<u>Sarma</u> (Sarma 1973)	1973	√	√
<u>Chen and Morgenstern</u> (Chen et al. 1983)	1983	√	√
Μέθοδος Κλειστού Τύπου			
<u>Pantelidis and Griffiths</u> (Pantelidis et al. 2012)	2012	√	√

2.1.1 Μέθοδος των λωρίδων

Σύμφωνα με τη μέθοδο των λωρίδων, η εδαφική μάζα που ολισθαίνει (Σχήμα 16), υποδιαιρείται σε πληθώρα κάθετων λωρίδων (Σχήμα 15), ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της τομής του εδάφους και την γεωμετρία του πρανούς (Παπαδόπουλος et al. n.d.). Ο διαχωρισμός σε λωρίδες μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιασδήποτε μορφής πρανή, ακόμη και κλιμακωτής ανάπτυξης, ενώ παράλληλα, η επιφάνεια αστοχίας δεν είναι απαραίτητως κυκλική (Hunt et al. 2003).



Σχήμα 15: Απεικόνιση δυνάμεων λωρίδας

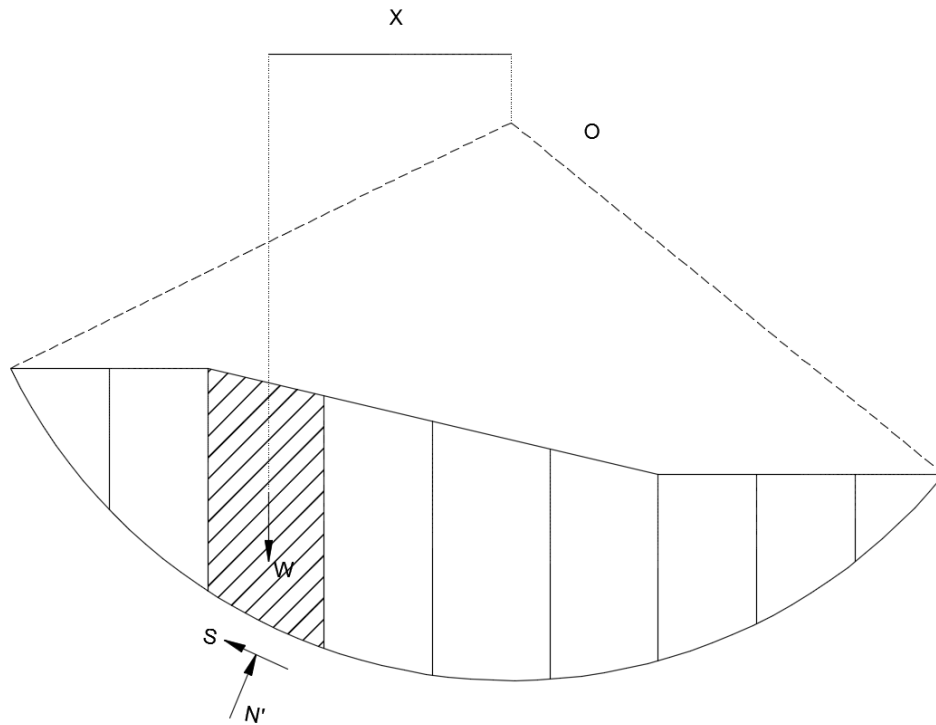
Όπου,

W_i το βάρος της λωρίδας, ανά μονάδα πλάτους

N_i' η ορθή δύναμη επί της επιφάνειας ολίσθησης

S_i η διατμητική δύναμη στη βάση της λωρίδας

E_i και T_i οι ορθές και διατμητικές δυνάμεις, που δρουν μεταξύ των λωρίδων



Σχήμα 16: Πρανές διαχωρισμένο σε λωρίδες

2.1.2 Μέθοδος κλειστού τύπου

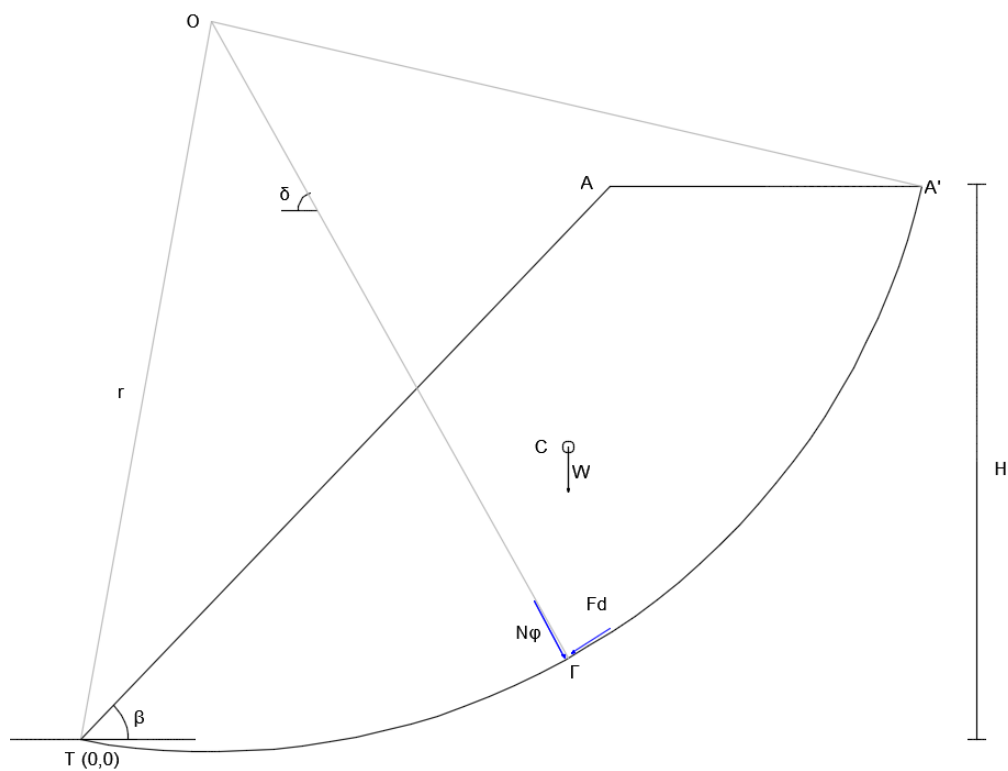
Η μέθοδος κλειστού τύπου των Pantelidis και Griffiths (2012), έχει ως αντικείμενο την ανάλυση της ευστάθειας εδαφικών πρανών έναντι κυκλικής ολίσθησης. Η μέθοδος ικανοποιεί τόσο την ισορροπία των ροπών όσο και των δυνάμεων. Θεωρείται ότι η επιφάνεια ολίσθησης, αντιμετωπίζεται ως συμπαγές σώμα, επιτρέποντας να αγνοηθεί η εσωτερική κατάσταση των τάσεων.

Η μέθοδος δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής σε ομοιογενές ή μη ομοιογενές πρανές, με απλή ή σύνθετη γεωμετρία και υπό την επήρεια οποιουδήποτε είδους πρόσθετης φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, όταν η επιφάνεια που αστοχεί είναι κυκλική και το έδαφος ομοιογενές, η μέθοδος αποτελεί ακριβή λύση. Όταν, η επιφάνεια ολίσθησης δεν είναι κυκλική και το έδαφος είναι στρωσιγενές, η άνωθεν παραδοχή παρουσιάζει αποκλίσεις, αναλόγως την περίπτωση που μελετάται.

2.1.2.1 Παραδοχές

Προκειμένου η μέθοδος κλειστού τύπου να γίνει εφαρμόσιμη, διαμορφώνεται μια σειρά παραδοχών. Για λόγους ευκολίας, το κέντρο του κύκλου O ταυτίζεται με το σημείο άσκησης

των ροπών της ολισθαίνουσας μάζας (Σχήμα 17), ενώ παράλληλα, ο συντελεστής ασφαλείας θεωρείται συμβατικά ίδιος σε όλα τα σημεία κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Εν συνεχεία, κατά την έναρξη της ολίσθησης γύρω από την κυκλική επιφάνεια, καμία διατμητική δύναμη δεν αναπτύσσεται εντός της αστοχούσας μάζας, έχοντας ως αποτέλεσμα, να αγνοούνται όλες οι εσωτερικές δυνάμεις και το συνολικό βάρος να εξιδανικεύεται ως σημειακό φορτίο στο κέντρο της συμπαγούς μάζας που αστοχεί. Έπειτα, η προβολή αυτού του φορτίου, τέμνει το ολισθέν τμήμα στο σημείο Γ. Τόσο οι ροπές του κέντρου περιστροφής, όσο και οι υπόλοιπες δυνάμεις, προβάλλονται πάνω στην επιφάνεια αστοχίας, ώστε να μπορούν να υπολογιστούν (Pantelidis et al. 2012).



Σχήμα 17: Απεικόνιση πρσανούς

2.1.2.2 Δυνάμεις που δρουν στην ολισθαίνουσα μάζα

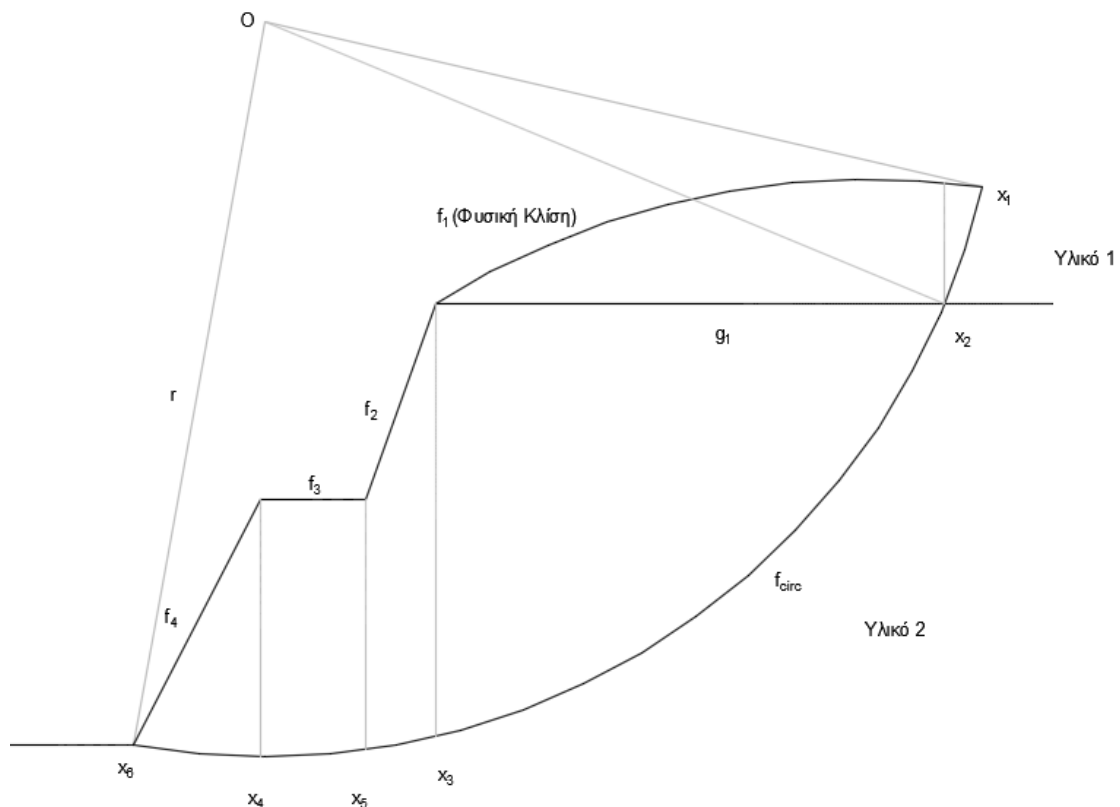
2.1.2.2.1 Υπολογισμός βάρους

Η μέθοδος αποτελείται από μια σειρά βημάτων, τα οποία διευκολύνουν τον προσδιορισμό της ολισθαίνουσας μάζας, καθώς το εμβαδόν της υποδιαιρείται νοητά σε τμήματα (Σχήμα 18). Πιο συγκεκριμένα, η ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους χωρίζεται σε ορισμένο αριθμό τμημάτων, το καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται βάσει μια εξίσωσης

$f_i(x)$. Έπειτα, σε περίπτωση που η περιοχή μελέτης αποτελείται από περισσότερα του ενός εδαφικά επίπεδα, η ενδιάμεση γραμμή επαφής των επιπέδων εκπροσωπείται από άλλη εξίσωση $g_i(x)$. Οι δύο αυτές εξισώσεις, σε συνδυασμό με άλλες δύο κάθετες εξισώσεις της μορφής x_i , διαμοιράζουν την μάζα σε ανεξάρτητες επιφάνειες, που προσδιορίζονται από την Εξίσωση 1, που ακολουθεί. Βάσει αυτής της εξίσωσης, προκύπτει και η οριζόντια συνιστώσα του βάρους της ολισθαίνουσας μάζας (Εξίσωση 2) (Pantelidis et al. 2012).

$$W = \int_{x_{A'}}^{x_A} \gamma_s [f_{A/A}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx + \int_{x_A}^{x_T} \gamma_s [f_{AT}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx \quad \text{Εξίσωση 1}$$

$$x_c = \frac{\int_{x_{A'}}^{x_A} \gamma_s x [f_{A/A}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx + \int_{x_A}^{x_T} \gamma_s x [f_{AT}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx}{W} \quad \text{Εξίσωση 2}$$



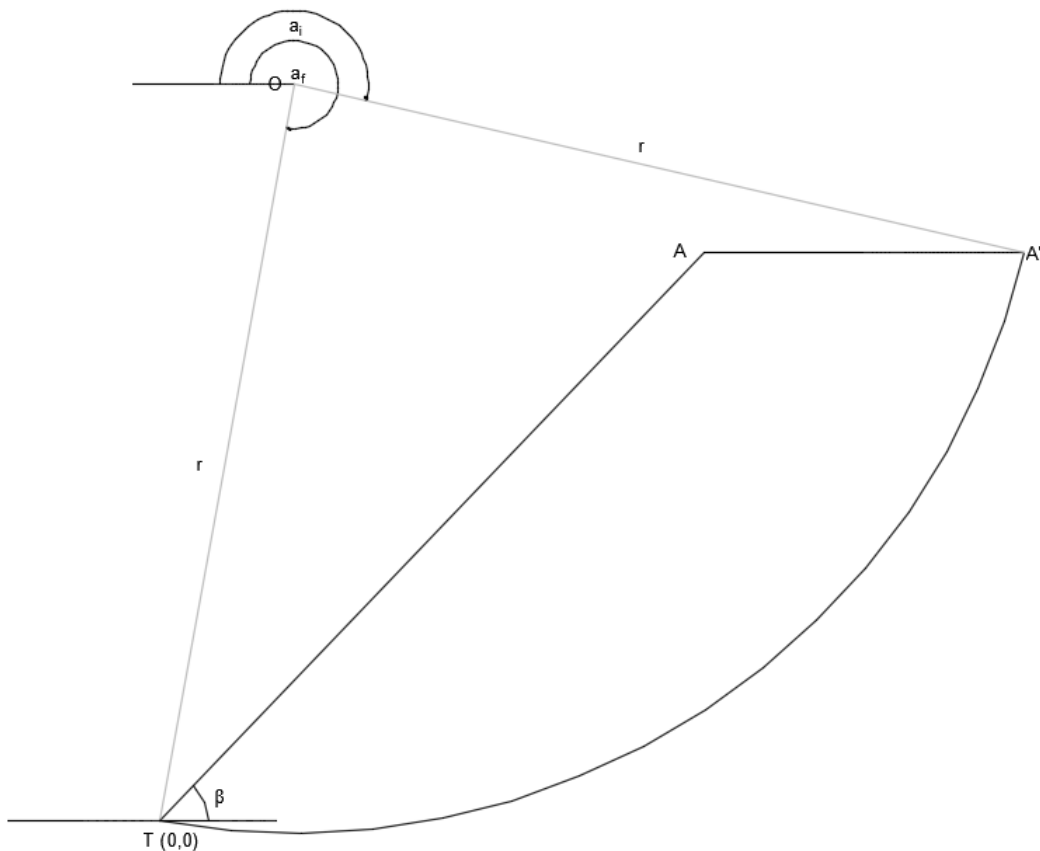
Σχήμα 18: Διαχωρισμός πρανούς σε τμήματα

2.1.2.2.2 Δύναμη αντίστασης λόγω συνοχής

Η δύναμη αντίστασης λόγω συνοχής F_c , προέρχεται από την ενσωμάτωση της συνοχής του εδάφους c , σε όλη την επιφάνεια αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα, τα συνεκτικά εδάφη

παρουσιάζουν μεγάλη συνοχή, η οποία συμβάλλει στον σχηματισμό ορισμένης κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η συνοχή είναι αρκετά μικρή, η ακτίνα τείνει στο άπειρο, με αποτέλεσμα η επιφάνεια ολίσθησης να γίνεται ευθεία. Η δύναμη αυτή αντιπροσωπεύεται από το ολοκλήρωμα της κυκλικής επιφάνειας, παρουσιάζοντας ως όρια τις γωνίες εισόδου και εξόδου της ολισθείσας μάζας a_i και a_f αντίστοιχα (Σχήμα 19), ως προς το κέντρο του κύκλου ολίσθησης (Εξίσωση 3). Σημειώνεται ότι, όσο η διανυσματική δύναμη συνοχής εφάπτεται σε κάθε σημείο της κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης, δεν κρίνεται αναγκαία η ανάλυσή της σε συνιστώσες (Pantelidis et al. 2012).

$$F_c = \int_{a_i}^{a_f} c \, ds = \int_{a_i}^{a_f} cr \, da = cr(a_f - a_i) \quad \text{Εξίσωση 3}$$

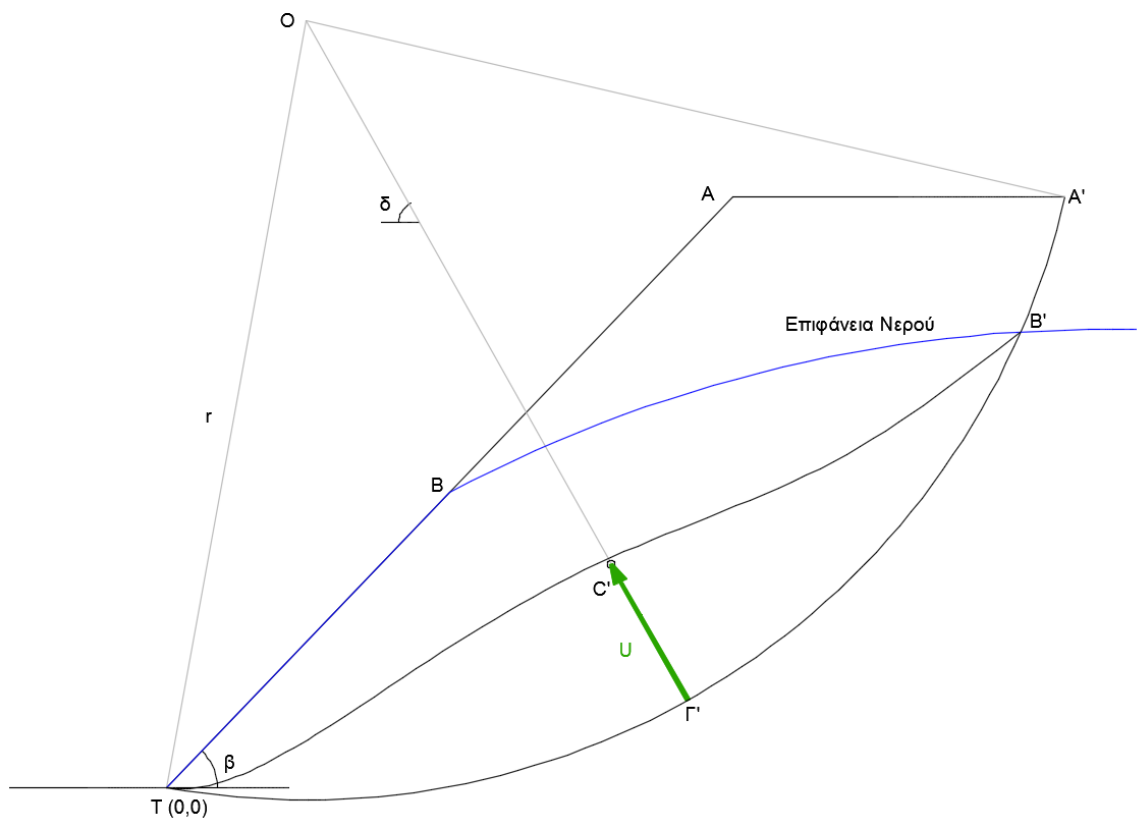


Σχήμα 19: Απεικόνιση γωνιών εισόδου και εξόδου

2.1.2.2.3 Πίεση του νερού των πόρων

Είναι σύνηθες, το έδαφος του πρανούς να περιλαμβάνει ποσότητα νερού, η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας. Η συνισταμένη της πίεσης του νερού των πόρων οριοθετείται μεταξύ της γραμμής ολίσθησης και της ανώτατης στάθμης του νερού, όπου και προσδιορίζεται το κέντρο C' της επιφάνειας αυτής (Σχήμα 20). Η πίεση του νερού των πόρων U , δρα κατά μήκος της ακτίνας που περνά από το κέντρο C' και το σημείο Γ' . Σημειώνεται ότι, το ειδικό βάρος γ_w είναι σταθερό, επομένως, η συνισταμένη υπολογίζεται άμεσα από το εμβαδό της επιφάνειας, που περικλείεται μεταξύ των προαναφερθέντων ορίων (Εξίσωση 4) (Pantelidis et al. 2012).

$$U = \gamma_w A_w = \gamma_w \left\{ \int_{x_{B'}}^{x_B} [f_{B'/B}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx + \int_{x_B}^{x_T} [f_{B\Gamma}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx \right\} \quad \text{Εξίσωση 4}$$



Σχήμα 20: Στάθμη νερού και πίεση του νερού των πόρων

2.1.2.3 Συντελεστής ασφαλείας

Ως συντελεστής ασφαλείας ορίζεται ο ποσοτικός δείκτης προσδιορισμού της ευστάθειας των γεωκατασκευών. Πιο συγκεκριμένα, αφορά το μέγεθος του κινδύνου αστοχίας της κατασκευής, κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, υπό την δράση των δυσμενέστερων συνθηκών. Μελετώντας την περίπτωση ευστάθειας των πρανών και συγκεκριμένα την ολίσθηση γαιών, ο συντελεστής ορίζεται σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb (Εξίσωση 5) (Γεωργιάδης et al. 2009).

$$\tau = c + (\sigma - u)\tan\varphi \quad \text{Εξίσωση 5}$$

Σύμφωνα με τον Fellenius, ο συντελεστής ασφαλείας αποτελεί το πηλίκο της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής προς την απαιτούμενη διατμητική αντοχή ή ακόμη τον λόγο του αρθροίσματος των ροπών αντίστασης, προς τις συνολικές ροπές που προκαλούν την αστοχία. Έπειτα, οι Rendulic και Jaky ορίζουν τον συντελεστή ως το λόγο της κρίσιμης συνοχής προς την πραγματική. Ακολούθως, με παρόμοιο τρόπο, ο Taylor τον εκφράζει ως προς το κρίσιμο ύψος του πρανού ή την γωνία τριβής (Πίνακας 4) (Παντελίδης 2012).

Πίνακας 4: Διαφορετικοί ορισμοί συντελεστή ασφαλείας

Fellenius	$FS_s = S/\tau$
	$FS_M = M_f/M_d$
Rendulic και Jaky	$FS_c = C_c/C$
Taylor	$FS_\varphi = \tan\varphi_c/\tan\varphi$
	$FS_\varphi = H_c/H$

Βάσει των άνωθεν, ο συντελεστής ασφαλείας (Εξίσωση 6) αποδίδεται ως ο λόγος των ροπών αντίστασης, προς το σύνολο των ροπών που προκαλούν την αστοχία. Ισχύει για ομοιογενές πρανές, όπου δρα η συνοχή του εδάφους, το βάρος W της ολισθαίνουσας μάζας και η πίεση του νερού των πόρων U (Pantelidis et al. 2012).

$$SF_M = \frac{cLr + W \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \tan(\varphi) r - U \tan(\varphi) r}{W \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) r} \geq 1 \quad \text{Εξίσωση 6}$$

3 Προσαρμογή Της Μεθόδου Σε Μηχανικά Σταθεροποιημένο Τοίχο

Με σκοπό τη βελτίωση ενός πρανούς με τον αποτελεσματικότερο και οικονομικότερο τρόπο, επιλέγεται ως λύση η ενίσχυσή του με μηχανικά σταθεροποιημένο τοίχο, σε συνδυασμό με τη χρήση γεωσυνθετικών υλικών. Παράλληλα, για τον έλεγχο της ευστάθειας της κατασκευής, χρησιμοποιείται η μέθοδος κλειστού τύπου με τις απαραίτητες προσαρμογές. Το μοντέλο του πρανούς επιλύεται με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab, για την εύρεση του ιδανικού κέντρου κύκλου ολίσθησης και τον προσδιορισμό του αντίστοιχου συντελεστή ασφαλείας. Για την μοντελοποίηση των άνωθεν, είναι απαραίτητη η χρήση των σχέσεων, που δίνονται στη συνέχεια.

3.1 Δύναμη γεωσυνθετικού υλικού

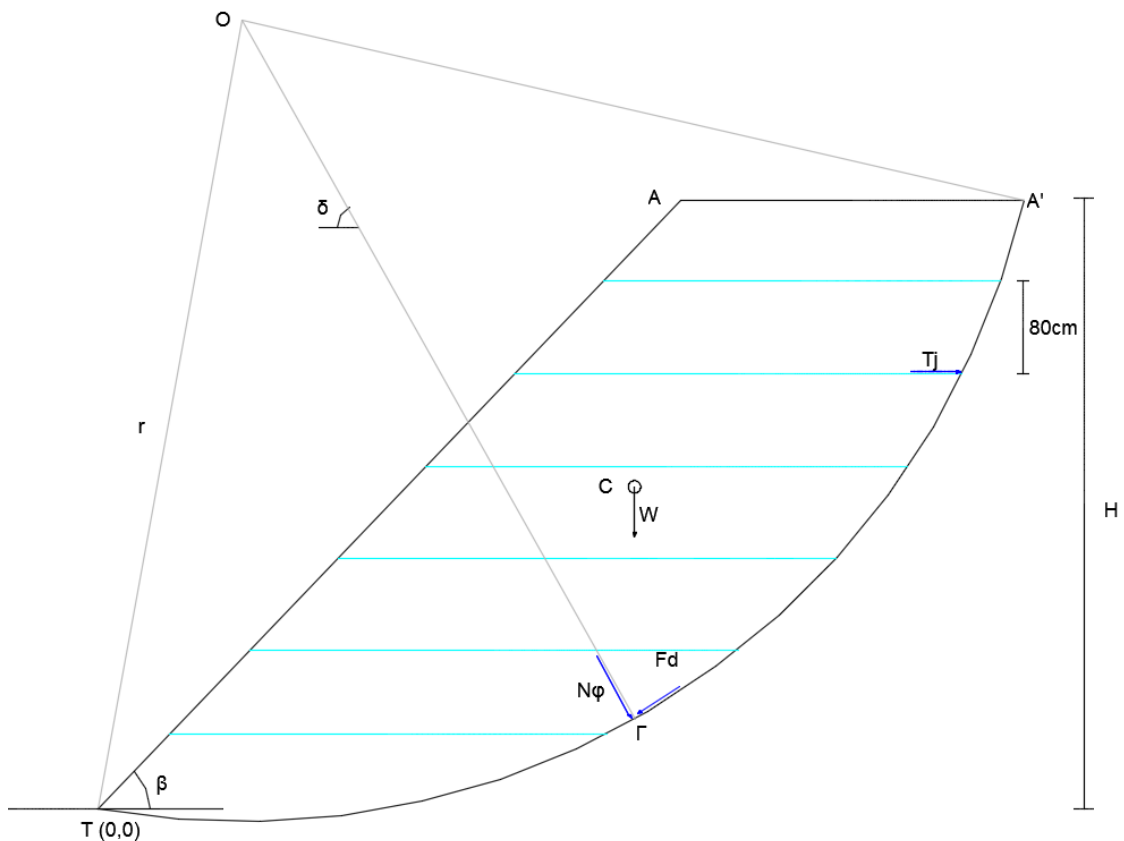
Η εφελκυστική αντοχή του γεωσυνθετικού υλικού, που χρησιμοποιείται για ενίσχυση του πρανούς, δίνεται από την Εξίσωση 7. Εξαρτάται από την χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή T_{ult} που προκύπτει από δοκιμές, τον μειωτικό συντελεστή βλάβης κατά την τοποθέτηση του υλικού RF_{ID} , τον συντελεστή μείωσης λόγω ερπυσμού RF_{CR} και τον μειωτικό συντελεστή ανθεκτικότητας RF_D .

Η χαρακτηριστική αντοχή εφελκυσμού T_{ult} , που επιλέγεται για σχεδιαστικούς λόγους, αποτελεί την ελάχιστη μέση τιμή αντοχής ενός ρολού του γεωπλέγματος, που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή. Εν συνεχεία, ο συντελεστής μείωσης RF_{ID} οφείλεται σε βλάβες κατά την εγκατάσταση του γεωσυνθετικού υλικού, όπως είναι η τριβή, η διάτρηση και το σχίσσιμο του υλικού. Προκειμένου να αποφευχθούν αυτές οι ζημιές, θα πρέπει τα γεωπλέγματα να μεταφέρονται προσεχτικά και να αποφεύγεται η κίνηση των μηχανημάτων από πάνω τους. Παράλληλα, ο μειωτικός συντελεστής ερπυσμού RF_{CR} οφείλεται στην μακροπρόθεσμη παραμόρφωση του εδάφους, λόγω άσκησης φορτίου. Αυτού του είδους απώλεια αντοχής παρατηρείται προς το τέλος του κύκλου ζωής του γεωσυνθετικού υλικού που επιλέγεται, υπό τη δράση δεδομένου επιπέδου φόρτισης. Εν τέλει, ο μειωτικός συντελεστής ανθεκτικότητας RF_D εξαρτάται από την ευαισθησία του υλικού στην υδρόλυση, στην οξειδωση, στη θερμότητα, στις χημικές ουσίες, στη ρηγμάτωση και στην περιβαλλοντική καταπόνηση. Τα γεωσυνθετικά υλικά θα πρέπει να αποθηκεύονται σε

στεγανές και μονωμένες αποθήκες, ώστε να προστατεύονται από τους παράγοντες που τα βλάπτουν (BS 8006 2010).

$$T_j = \frac{T_{ult}}{RF_{ID} * RF_{CR} * RF_D} \quad \text{Εξίσωση 7}$$

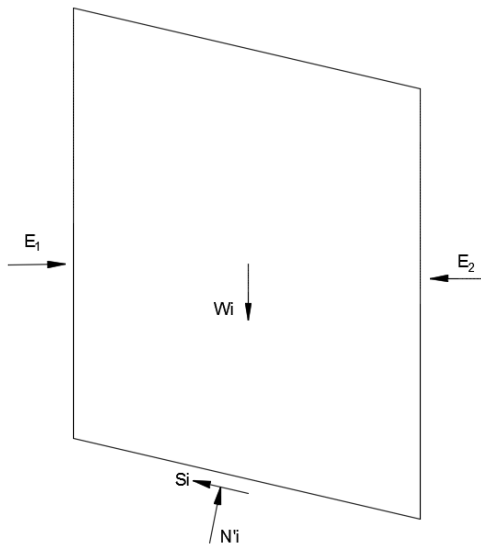
Σύμφωνα με το 'Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I', οι αποστάσεις μεταξύ των γεωσυνθετικών υλικών, εντός του τοίχου αντιστήριξης, συνίσταται να είναι περί τα 80 εκατοστά (Σχήμα 21). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται επαρκής χώρος για την τοποθέτηση και διάστρωση του υλικού επίχωσης μεταξύ των στρώσεων οπλισμού και παράλληλα εγκαθίσταται ικανοποιητικός αριθμός γεωπλεγμάτων για την ενίσχυση του πρανούς.



Σχήμα 21: Τοποθέτηση γεωπλεγμάτων ανά 80cm

3.2 Αναπροσαρμοσμένος συντελεστής ασφαλείας

Στο Βρετανικό Πρότυπο ‘Code of practice for strengthened reinforced soils and other fills’, ο συντελεστής ασφαλείας για οπλισμένη γη προκύπτει από την απλουστευμένη μέθοδο Bishop και ορίζεται μαθηματικά από την Εξίσωση 8. Η απλουστευμένη μέθοδος Bishop βασίζεται στην μέθοδο των λωρίδων με την παραδοχή ότι αγνοούνται οι διατμητικές δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων, ενώ παράλληλα λαμβάνονται υπόψιν οι ορθές δυνάμεις (Σχήμα 22). Μελετώντας τον συντελεστή ασφαλείας, παρατηρείται ότι, η εξίσωση είναι μη γραμμική, διότι ο συντελεστής εμφανίζεται και στα δύο μέλη, με αποτέλεσμα να απαιτείται επαναληπτική διαδικασία επίλυσης, εωσότου να υπάρξει σύγκλιση (Bishop 1955).



Σχήμα 22: Απεικόνιση λωρίδας για την μέθοδο Bishop

$$\frac{M_{RS} + M_{RR}}{M_D} \geq 1$$

Εξίσωση 8

Όπου οι ροπές αυτές ορίζονται ως εξής:

$$M_{RS} = \sum_{i=1}^n \frac{\left[\frac{c b_i}{f_{ms}} + (f_{fs} W_i + f_q b_i w_{si})(1 - r_u) \frac{\tan \varphi_p}{f_{ms}} \right] \sec \alpha_i R_d}{1 + \frac{\tan \varphi_p \tan \alpha_i}{f_{ms}}}$$

Εξίσωση 9

$$M_{RR} = \sum_{j=1}^m T_j y_j$$

Εξίσωση 10

$$M_D = \sum_{i=1}^n [(f_{fs} W_i + f_q b_i w_{si}) \sin \alpha_i] R_d$$

Εξίσωση 11

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος κλειστού τύπου για τον έλεγχο της ευστάθειας του συστήματος, αναπροσαρμόζεται ο συντελεστής ασφαλείας, σύμφωνα με την αντίστοιχη εξίσωση για οπλισμένη γη, καθώς εξαρτάται πλέον και από την εφελκυστική δύναμη του κάθε γεωπλέγματος T_j (Εξίσωση 12).

$$SF = \frac{cLr + W \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \tan(\varphi) r - U \tan(\varphi) r + \sum(T_j y_j)}{W \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) r} \geq 1$$

Εξίσωση 12

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο ‘Σημειώσεις για τον Ευρωκώδικα 7 (EN 1997)’, τίθεται το θέμα του ορθού διαχωρισμού μεταξύ δράσεων και αντιστάσεων, καθώς επηρεάζεται η μορφή του συντελεστή ασφαλείας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ως παράδειγμα η δύναμη αγκύρωσης ενός τοίχου αντιστήριξης ή πρανούς, εφόσον αποτελεί ευνοϊκή δράση και όχι δύναμη αντίστασης. Ομοίως στην υπό μελέτη περίπτωση, η δύναμη του κάθε γεωπλέγματος δρα ευνοϊκά, με αποτέλεσμα, το άθροισμα των ροπών των γεωπλεγμάτων να μπορεί να τοποθετηθεί στον παρονομαστή της εξίσωσης του συντελεστή ασφαλείας (Εξίσωση 13). Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στο πρόσημο του όρου, το οποίο είναι αρνητικό, καθώς πρόκειται για ευνοϊκή δράση και όχι δράση που εντείνει την αστοχία.

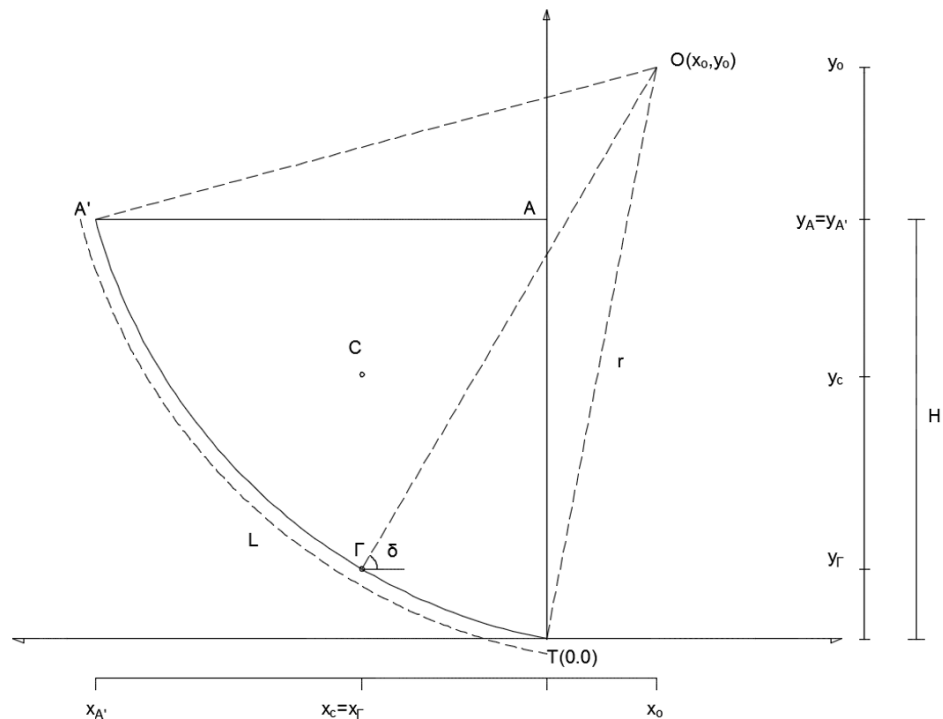
$$SF' = \frac{cLr + W \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \tan(\varphi) r - U \tan(\varphi) r}{W \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) r - \sum(T_j y_j)}$$

Εξίσωση 13

3.3 Δεδομένα του συστήματος έδαφος-ΜΣΤ

Σημειώνεται ότι, στο Σχήμα 23 που ακολουθεί, παρουσιάζονται όλα τα σημεία του πρανούς σε Καρτεσιανές Συντεταγμένες, για την διευκόλυνση της εξαγωγής των σχέσεων που προαναφέρθηκαν. Το τμήμα ΓΑ αντιπροσωπεύει τον κατακόρυφο τοίχο και το μήκος

τόξου L αποτελεί την κυκλική επιφάνεια ολίσθησης. Επιπλέον, το σημείο O είναι το κέντρο του κύκλου ολίσθησης και το C το κέντρο βάρους της ολισθαίνουσας μάζας, ενώ το Γ αφορά στο σημείο κατακόρυφης προβολής της συνισταμένης του βάρους στην επιφάνεια ολίσθησης.



Σχήμα 23: Απεικόνιση πρανούς εφαρμογής

* Ακτίνα κύκλου ολίσθησης:

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}, \text{ διότι } r^2 = (x_T - x_0)^2 + (y_T - y_0)^2 \text{ και } (x_T, y_T) = (0,0)$$

* Μήκος τόξου επιφάνειας ολίσθησης:

$$L = 2\pi r(\widehat{\Gamma O A'} / 360^\circ), \text{ όπου η γωνία } \widehat{\Gamma O A'} \text{ ορίζεται σε μοίρες.}$$

* Υ συντεταγμένη του σημείου προβολής του κέντρου βάρους στην επιφάνεια ολίσθησης:

$$y_\Gamma = y_0 - \sqrt{r^2 - (x_c - x_0)^2}$$

* Γωνία δ :

$$\delta = \tan^{-1}[(y_0 - y_\Gamma)/(x_c - x_0)]$$

* Βάρος ολισθαίνουσας μάζας:

$W = \int_{x_A}^{x_{A'}} \gamma_s [y_o - H + \sqrt{r^2 - (x - x_o)^2}] dx$, όπως προκύπτει από την Εξίσωση 1,

για κατακόρυφο τοίχο ($x_T = x_A = 0$) και $x_{A'} = x_o + \sqrt{r^2 - (y_o - H)^2}$

* Οριζόντια συντεταγμένη κέντρου βάρους:

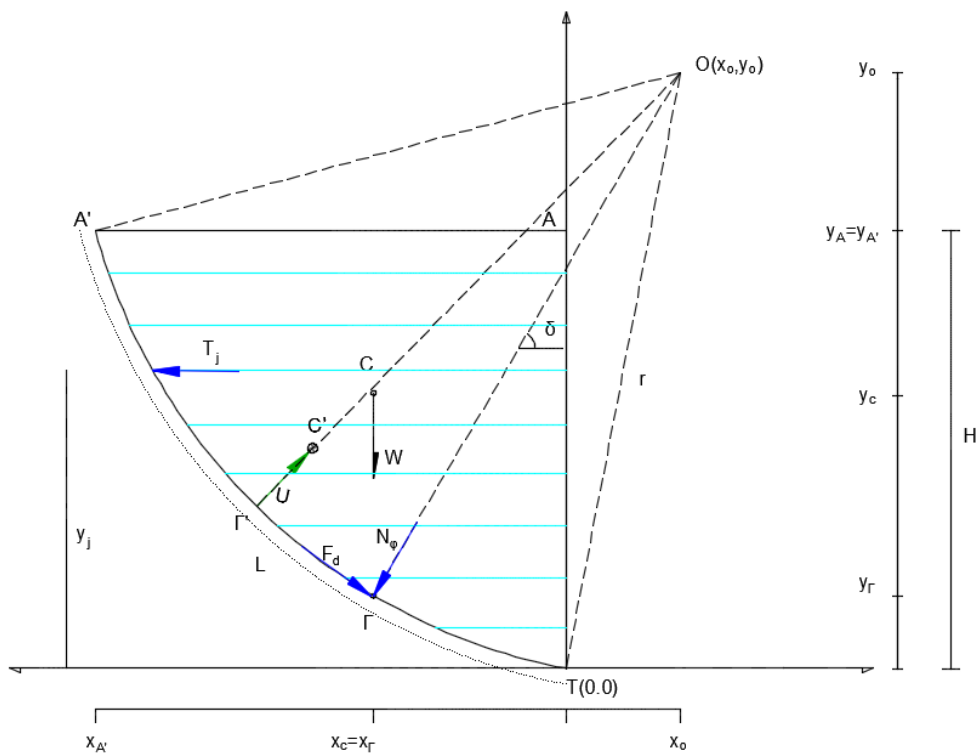
$$x_c = \frac{\int_{x_A}^{x_{A'}} \gamma_s x [y_o - H + \sqrt{r^2 - (x - x_o)^2}] dx}{\int_{x_A}^{x_{A'}} \gamma_s [y_o - H + \sqrt{r^2 - (x - x_o)^2}] dx}$$

* Συντελεστής Ασφαλείας:

Ο Συντελεστής Ασφαλείας υπολογίζεται σύμφωνα με τις Εξισώσεις 12 και 13 Εξίσωση 12. Στο Σχήμα 24, που έπεται, απεικονίζονται όλες οι δυνάμεις που ασκούνται στο πρηνές και συμβάλλουν στον υπολογισμό του συντελεστή.

$$SF = \frac{cLr + W \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \tan(\varphi) r - U \tan(\varphi) r + \sum(T_j y_j)}{W \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) r}$$

$$SF = \frac{cLr + W \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \tan(\varphi) r - r_u \tan(\varphi) r}{W \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) r - \sum(T_j y_j)} \geq 1$$



Σχήμα 24: Σύνολο δυνάμεων που ασκούνται στο πρηνές της παρούσας εφαρμογής

3.4 Επίλυση στο λογισμικό Matlab

Με τη χρήση του λογισμικού Matlab, δίνεται η δυνατότητα μοντελοποίησης του υπό μελέτη συστήματος μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος-πρανές, ώστε να εντοπιστεί το ιδανικό κέντρο του κύκλου ολίσθησης, που θα αντιστοιχεί στον μικρότερο δυνατό συντελεστή ασφαλείας. Για την επίλυσή του χρειάζεται η δήλωση δύο βασικών συναρτήσεων, εκ των οποίων η μία περιέχει όλες τις απαραίτητες εξισώσεις (Παράρτημα 1) και η άλλη χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση του συντελεστή ασφαλείας (Παράρτημα 2). Έπειτα, δηλώνεται μια επιπλέον συνάρτηση, με σκοπό τον έλεγχο της ορθότητας της τιμής του συντελεστή (Παράρτημα 3).

3.4.1 Συνάρτηση δεδομένων

- * `function [x1,F1]=FOSmin_unconstrained()`: σε αυτή τη συνάρτηση δηλώνονται όλα τα δεδομένα που χρειάζονται για τον υπολογισμό των εξισώσεων. Χρησιμοποιείται για την εύρεση του κέντρου του κύκλου, που δίνει τον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας.
- * `H=5`: Ύψος πρανούς, σε μέτρα.
- * `phi=20`: Γωνία τριβής, σε μοίρες.
- * `gamma=16`: Ειδικό βάρος εδάφους, σε kN/m^3 .
- * `U=0`: Πίεση του νερού των πόρων, σε kN/m .
- * `t=10`: Δύναμη του κάθε γεωπλέγματος, σε kN/m .
- * `lambda_cphi=1`: έμμεσος τρόπος δήλωσης της συνοχής του εδάφους. Το $\lambda_{c\phi}$ ορίζεται ως $\lambda_{c\phi} = \frac{\gamma H \tan \varphi}{c}$, επομένως, η συνοχή προκύπτει συναρτήσει του $\lambda_{c\phi}$, $c = \frac{\gamma H \tan \varphi}{\lambda_{c\phi}}$. Είναι χρήσιμος κυρίως στην παραγωγή διαγραμμάτων ευστάθειας, καθώς πρανή με τον ίδιο συντελεστή $\lambda_{c\phi}$ και ίδια κλίση, έχουν και τον ίδιο συντελεστή ασφαλείας.
- * `x0y0_in= [0 H]`: δηλώνονται οι αρχικές τιμές των συντεταγμένων του κέντρου κύκλου. Έστω ότι το αρχικό x_0 είναι μηδέν και το αρχικό y_0 είναι ίσο με το ύψος του πρανούς.
- * `[x1,F1]=fminsearch(@(x0y0_in)Main_w1(x0y0_in,H,phi,gamma,ru,lambda_cphi,t),x0y0_in)`: η συνάρτηση `fminsearch` έχει ως σκοπό την βελτιστοποίηση του συντελεστή

ασφαλείας, ο οποίος αποτελεί έξοδο της Main_w1. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται εύρεση εκείνου του κύκλου ολίσθησης που αντιστοιχεί στον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας. Με την εκτέλεσή της επιστρέφει υπό μορφή διανύσματος (x_1) τα x_0 και y_0 , στα οποία βρίσκεται η ελάχιστη τιμή του συντελεστή ασφαλείας.

3.4.2 Κύρια συνάρτηση

- * function [Sf]=Main_w1(x0y0_in,H,phi,gamma,U,lambda_cphi,t): Με αυτόν τον τρόπο δηλώνεται η κύρια συνάρτηση επίλυσης του πρσανούς. Λαμβάνει ως εισόδους τα δεδομένα που περιέχει η FOSmin_unconstrained, όπως είναι οι αρχικές τιμές του κέντρου κύκλου, το ύψος του τοίχου, η γωνία τριβής, το ειδικό βάρος, η δύναμη του νερού, η μεταβλητή $\lambda_{c\phi}$ και η δύναμη του κάθε γεωπλέγματος.
- * $x0=x0y0_in(1)$ και $y0=x0y0_in(2)$: με αυτή τη δήλωση ζητείται για το x_0 και y_0 να λάβουν τις αντίστοιχες αρχικές τιμές τους.
- * $r=\sqrt{x0.^2+y0.^2}$: είναι η εξίσωση που αντιπροσωπεύει την ακτίνα της επιφάνειας ολίσθησης.
- * $xmin=0$ και $xmax= x0-\sqrt{r.^2-(H-y0).^2}$: είναι τα όρια των ολοκληρωμάτων του βάρους και της οριζόντιας συντεταγμένης του. Αντιστοιχούν στις οριζόντιες συντεταγμένες του σημείου A και A'.
- * $fun=@(x)(H-y0+\sqrt{r.^2-(x-x0).^2})$
 $w=\text{gamma}*\text{integral}(fun,xmax,xmin)$: με αυτόν τον τρόπο δηλώνεται το ολοκλήρωμα του βάρους.
- * $fun2=@(x)((H-y0+\sqrt{r.^2-(x-x0).^2})).*x$
 $Xc=(\text{gamma}*\text{integral}(fun2,xmax,xmin))/w$: αντιπροσωπεύει την οριζόντια συντεταγμένη του κέντρου βάρους της ολισθαίνουσας μάζας
- * $Ycs=y0-\sqrt{r.^2-((Xc-x0).^2)}$: χρησιμοποιείται για την εύρεση της κατακόρυφης συντεταγμένης του κέντρου μάζας αστοχίας.
- * $\text{delta}=\text{atan}(\text{abs}((Ycs-y0)/(Xc-x0)))$: υπολογισμός της γωνίας δ .

- * $Y=H$: δηλώνει το ύψος που θα τοποθετηθεί το κάθε γεώπλεγμα και δεν ξεπερνά το ύψος του πρανούς.
- * $n=0$: γίνεται αρχικοποίηση του n , το οποίο δηλώνει τον αριθμό των γεωπλεγμάτων, που θα τοποθετηθούν στο πρανές.
- * `while (Y>0.2)`
 $Y=Y-0.6$
 $n=n+1$
 end: Σε αυτόν το βρόχο (while loop), δηλώνεται ότι τα γεωπλέγματα θα απέχουν 0,6 μέτρα μεταξύ τους, όπου το τελευταίο γεώπλεγμα δεν μπορεί να απέχει από τον πόδα του πρανούς λιγότερο των 0,2 μέτρων. Επιπλέον, κάθε φορά που θα επαναλαμβάνεται ο βρόχος, ο αριθμός των γεωπλεγμάτων αυξάνεται κατά ένα.
- * $Y_j=H$
 $S=0$
 for $j = 1:n$
 $Y_j=Y_j-0.6$
 $S=S+(t*Y_j)$
 end: Αυτός ο βρόχος επαναλαμβάνεται τόσες φορές, όσες είναι ο αριθμός των γεωπλεγμάτων που υπολογίστηκαν πριν. Η δήλωση αυτή συμβάλλει στον υπολογισμό του αθροίσματος των γινομένων της δύναμης του κάθε γεωπλέγματος, με τα αντίστοιχα ύψη τους. Πιο συγκεκριμένα, αποδίδει τις ροπές αντίστασης που ασκούν τα γεωπλέγματα στην κατασκευή. Αρχικά, το γινόμενο είναι μηδενικό και κάθε φορά που θα υπολογίζεται το επόμενο, θα προστίθεται στο αμέσως προηγούμενο. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας θα αποδοθεί το συνολικό άθροισμα, το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί στον συντελεστή ασφαλείας.
- * $a=\sqrt{x_{\max}^2+H^2}$: Ως a ορίζεται η απόσταση TA' , η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της γωνίας $\widehat{TOA'}$.
- * $m=2*\text{asind}((a/2)/r)$: m χαρακτηρίζεται η γωνία $\widehat{TOA'}$.
- * $L=2*\pi*r*(m/360)$: είναι το μήκος τόξου μεταξύ των σημείων T και A' .

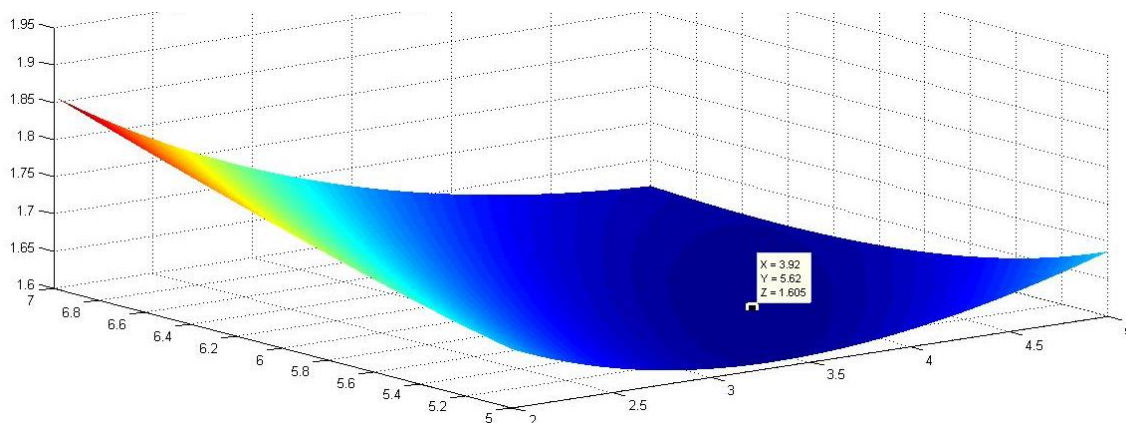
- * $Sf = \frac{((\gamma * H * \tan(\phi) * L * r) / \lambda_{c\phi}) + (w * \cos((\pi/2) - \delta) * \tan(\phi) * r) - (U * \tan(\phi) * r + S)}{(w * \sin((\pi/2) - \delta) * r)}$
 if (Sf < 1)
 disp('Error: Sf is smaller than 1')
 end: Με την δήλωση SF αποδίδεται ο συντελεστής ασφαλείας. Αποτελεί λόγο των ροπών αντίστασης, προς το σύνολο των ροπών που ευνοούν την ολίσθηση. Προκειμένου να διαπιστωθεί ο ορθός υπολογισμός του συντελεστή, δηλώνεται με την εντολή 'if' να εμφανίζει 'error' όταν είναι μικρότερος της μονάδας.

3.4.3 Συνάρτηση γραφικής παράστασης

- * function [F]=FOSmin_graphical(): η συνάρτηση αυτή δηλώνεται με σκοπό την απεικόνιση του μικρότερου συντελεστή ασφαλείας, ώστε να γίνει σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει από την FOSmin_unconstrained.
- * H=5: Ύψος πρανούς, σε μέτρα.
- * phi=20: Γωνία τριβής, σε μοίρες.
- * gamma=16: Ειδικό βάρος εδάφους, σε kN/m³.
- * U=0: Πίεση του νερού των πόρων, σε kN/m.
- * t=10: Δύναμη του κάθε γεωπλέγματος, σε kN/m.
- * lambda_cphi=1: έμμεσος τρόπος δήλωσης της συνοχής του εδάφους, όπως στην FOSmin_unconstrained.
- * [X,Y]=meshgrid(2:0.01:5,H:0.01:7): με την δήλωση της συνάρτησης meshgrid δημιουργούνται δύο πίνακες, ο x και ο y. Ο πρώτος επαναλαμβάνει το διάνυσμα x (2:0.01:5) τόσες φορές, όσο είναι το μέγεθος του διανύσματος y (H:0.01:7). Δηλαδή δημιουργείται πίνακας με 201 σειρές και 301 στήλες. Ομοίως, δημιουργείται ο πίνακας y, με 301 σειρές και 201 στήλες.
- * sizeX=size(X): το sizeX θέτει ως μεταβλητή το size(X) και πιάνει πόσα στοιχεία έχει το διάνυσμα x.

- * `FOS=zeros(sizeX)`: η δήλωση αυτή αποδίδει πίνακα του ίδιου μεγέθους με τον προηγούμενο, αλλά με μηδενικά στοιχεία. Με αυτό το τρόπο γίνεται αρχικοποίηση για να συμπληρωθεί στην συνέχεια ο πίνακας 201x301 με στοιχεία. Για να συμβεί αυτό, πρέπει να περνά κάθε φορά και από τις σειρές και τις στήλες του.
- * `for i=1:sizeX(1)`
`for j=1:sizeX(2)`: το `sizeX` αποδίδει διάνυσμα 1x2, δηλαδή δύο στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά είναι οι σειρές και οι στήλες του πίνακα. Τα 1 και 2 των παρενθέσεων αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των σειρών και στηλών, αντίστοιχα. Ο πεπλεγμένος βρόχος επαναλαμβάνεται 201x301 φορές, όπου το `i=1:sizeX(1)` αποδίδει 1 έως 201 σειρές και το `j=1:sizeX(2)` 1 έως 301 στήλες. Σημειώνεται ότι πρώτα γίνεται ο εσωτερικός βρόχος και έπειτα ο εξωτερικός.
- * `[F]=Main_w1([X(i,j),Y(i,j)],H,phi,gamma,U,lambda_cphi,t)`: καλείται η `Main_w1`, η οποία λαμβάνει τα x_{ij} και y_{ij} του νέου πίνακα που δημιουργείται, αντί των αρχικών x_0 και y_0 . Θα επαναλαμβάνεται 201x301 φορές και θα περνά από κάθε στοιχείο του πίνακα, έχοντας ως έξοδο τον αντίστοιχο συντελεστή ασφαλείας.
- * `FOS(i,j)=F`: με αυτή τη δήλωση, ζητείται να γεμίζει ο πίνακας των μηδενικών στοιχείων με τους συντελεστές ασφαλείας, που υπολογίζονται σε κάθε κλίση της κύριας συνάρτησης.
- * `figure`
`surf(X,Y,FOS)`: ζητείται να αποδοθεί γραφική παράσταση τρισδιάστατης απεικόνισης του συντελεστή ασφαλείας, ώστε να μπορεί να διαπιστωθεί αν αντιστοιχεί σε εκείνον που υπολογίστηκε προηγουμένως.
- * `hold on`: η εντολή αυτή αφορά την εύρεση του ελάχιστου σημείου της γραφικής παράστασης, που αντιστοιχεί στον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας (Διάγραμμα 1).
- * `[~,i] = min(FOS(:))`: με τη δήλωση αυτή, δίνεται εντολή να βρεθεί το ελάχιστο σημείο της γραφικής παράστασης, ψάχνοντας σε όλες τις γραμμές και στήλες του πίνακα.
- * `h = scatter3(X(i),Y(i),FOS(i),'filled')`: με την δήλωση `scatter` βρίσκεται το σημείο αυτό, πάνω στην τρισδιάστατη γραφική παράσταση και σημειώνεται με μια τελεία.

- * `h.SizeData = 150`: η τελεία που προαναφέρθηκε, μεγεθύνεται κατά 150 για να είναι διακριτή πάνω στην γραφική παράσταση.
- * `hold off`: αφού ολοκληρωθούν τα άνωθεν, στο επιθυμητό σημείο μπαίνουν οι συντεταγμένες του.



Διάγραμμα 1: Γραφική παράσταση στο λογισμικό Matlab. Απεικόνιση ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας.

3.5 Παρατηρήσεις

Σύγκριση αποτελεσμάτων κύριας και γραφικής συνάρτησης

Με την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης στο λογισμικό Matlab, εντοπίζεται ο μικρότερος δυνατός συντελεστής ασφαλείας, που αντιστοιχεί στο ιδανικό κέντρο του κύκλου ολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η κύρια συνάρτηση επίλυσης του πρανούς, η οποία λαμβάνει ως εισόδους τα δεδομένα που περιέχει η `FOSmin_unconstrained`. Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν, ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, δίδοντας τιμή του συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο της μονάδας. Για την επιβεβαίωση της ορθότητάς τους, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση γραφικής παράστασης, κατά την οποία απεικονίζεται σε τρισδιάστατο μοντέλο ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας, χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα με την κύρια συνάρτηση.

Συγκρίνοντας τον συντελεστή ασφαλείας (Πίνακας 5), που προκύπτει από το ιδανικό κέντρο κύκλου ολίσθησης όπως αποδίδεται από την εκτέλεση της κύριας συνάρτησης, με τον αντίστοιχο συντελεστή που δίνει ως αποτέλεσμα η γραφική παράσταση, παρατηρείται ότι η διαφορά τους είναι μηδαμινή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι ίδιες εξισώσεις και δεδομένα. Επιπλέον, η επιλογή του αριθμού

επαναλήψεων και της αντίστοιχης αύξησης των x και y , γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τον αριθμό επαναλήψεων της πρώτης περίπτωσης, για τον εντοπισμό του μικρότερου συντελεστή ασφαλείας. Εν τέλει, και στις δύο συναρτήσεις, τα αποτελέσματα που προκύπτουν φέρουν λογικές τιμές.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα της κύριας συνάρτησης και της συνάρτησης της γραφικής παράστασης

Αποτελέσματα	Main_w1	FOSmin_graphical
x_0 (m)	3.9216	3.9200
y_0 (m)	5.6185	5.6200
SF	1.6047	1.6050

Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφορετικών εξισώσεων συντελεστή ασφαλείας

Όπως προαναφέρθηκε, ο συντελεστής ασφαλείας που χρησιμοποιείται στη μέθοδο κλειστού τύπου, προκύπτει ως ο λόγος των ροπών αντίστασης, προς το σύνολο των ροπών που προκαλούν την αστοχία. Στην εξίσωσή του περιλαμβάνεται η συνοχή του εδάφους, το βάρος της ολισθαίνουσας μάζας και η πίεση του νερού των πόρων. Ως πρόσθετη δύναμη χρησιμοποιείται εκείνη του κάθε γεωπλέγματος. Το σύνολο των ροπών που προκύπτει από το γινόμενο της δύναμης αυτής με το αντίστοιχο ύψος τοποθέτησης του κάθε γεωπλέγματος, μπορεί να τοποθετηθεί με αρνητικό πρόσημο, στο άθροισμα των ροπών που προκαλούν την αστοχία. Η χρήση του αρνητικού πρόσημου υποδηλώνει ότι πρόκειται για ροπή που ενισχύει το πρανές.

Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα, που προκύπτουν από τους δύο διαφορετικούς ορισμούς του συντελεστή ασφαλείας, το συστήματος μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος-πρανές μοντελοποιείται ξανά στο λογισμικό Matlab (Παράρτημα 4), με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται πλέον η Εξίσωση 13. Στον Πίνακα 6 που ακολουθεί παρατίθενται δέκα παραδείγματα, στα οποία αλλάζει κάθε φορά το ύψος του τοίχου και η δύναμη του κάθε γεωπλέγματος. Οι τροποποιήσεις γίνονται μόνο σε αυτά τα δύο δεδομένα, διότι από αυτά επηρεάζεται η τιμή του μεγαλύτερου όρου του παρονομαστή (Εξίσωση 13), που τυγχάνει να είναι το $\Sigma(T_j y_j)$. Μελετώντας τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας, όπως προκύπτουν από την κάθε εξίσωση, παρατηρείται αύξηση στη δεύτερη περίπτωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όσο αυξάνεται το ύψος, τόσο περισσότερα γεωπλέγματα

χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, όσο αυξάνει η δύναμη, αυξάνεται και το γινόμενο της με την αντίστοιχη θέση που τοποθετείται το κάθε γεώπλεγμα.

Πίνακας 6: αποτελέσματα της κύριας συνάρτησης, με διαφορετική δήλωση του συντελεστή ασφαλείας

Παράδειγμα	Αποτελέσματα	Κύρια Συνάρτηση	
		SF από την εξίσωση 12	SF από την εξίσωση 13
1	H=5m Tj=10 KN/m	1.6047	1.7831
2	H=7m Tj=10 KN/m	1.6582	1.7831
3	H=10m Tj=10 KN/m	1.6910	1.7831
4	H=12m Tj=10 KN/m	1.7024	1.7827
5	H=14m Tj=10 KN/m	1.7103	1.7813
6	H=5m Tj=22 KN/m	1.1895	1.7831
7	H=7m Tj=22 KN/m	1.4189	1.7831
8	H=10m Tj=22 KN/m	1.5615	1.7831
9	H=12m Tj=22 KN/m	1.6079	1.7831
10	H=14m Tj=22 KN/m	1.6370	1.7831

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, δίνεται έμφαση στην χρησιμότητα των μηχανικά σταθεροποιημένων τοίχων, ως τεχνική ενίσχυσης εδαφικών μαζών. Με στόχο την επιβεβαίωση ότι οι ΜΣΤ αποτελούν την καταλληλότερη λύση, γίνεται σύγκριση με τις συμβατικές κατασκευές αντιστήριξης, όπως είναι οι τοίχοι βαρύτητας, οι τοίχοι μορφής προβόλου και οι αγκυρωμένοι τοίχοι. Κατά την περιγραφή αυτών των μορφών τοίχων αντιστήριξης παρουσιάζονται οι τρόποι αστοχίας τους, ενώ παράλληλα τονίζεται η ικανότητα των ΜΣΤ να αντέχουν σε παραμορφώσεις. Επιπλέον, αποτελούν οικονομική επιλογή, εφόσον δίνεται η δυνατότητα χρήσης υλικών επίχωσης κατώτερης ποιότητας, χωρίς να επηρεάζεται η αποδοτικότητα του έργου.

Επιλέγοντας τον μηχανικά σταθεροποιημένο τοίχο, για την ενίσχυση της εδαφικής μάζας, ακολουθεί ο έλεγχος της οριακής ισορροπίας του συστήματος έδαφος-ΜΣΤ, με μια από τις απλές υπολογιστικές μεθόδους. Κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας μελετάται η μέθοδος κλειστού τύπου, που αποτελεί μια καινοτόμα μέθοδο ανάλυσης. Εφόσον γίνουν κατανοητά όλα τα στοιχεία που συνθέτουν τη μέθοδο, στη συνέχεια γίνεται προσαρμογή για τη χρήση της σε μηχανικά σταθεροποιημένους τοίχους. Η προσαρμογή αυτή αφορά συγκεκριμένα τον συντελεστή ασφαλείας και βασίζεται στον ορισμό του συντελεστή στο Βρετανικό πρότυπο, που σχετίζεται με την οπλισμένη γη. Έπειτα, σύμφωνα με τις Σημειώσεις του Ευρωκώδικα 7, παρατηρείται ότι ο συντελεστής μπορεί να εκφραστεί με διαφορετική εξίσωση, εφόσον η δύναμη του κάθε γεωπλέγματος αποτελεί ευνοϊκή δράση και όχι αντίσταση στην αστοχία της εδαφικής μάζας.

Το σύστημα έδαφος-ΜΣΤ μοντελοποιήθηκε στο λογισμικό Matlab και για τις δύο εξισώσεις του συντελεστή ασφαλείας. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, παρατηρείται ότι στην δεύτερη περίπτωση ο συντελεστής είναι μεγαλύτερος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το άθροισμα των γινομένων της δύναμης του κάθε γεωπλέγματος με το αντίστοιχο ύψος τοποθέτησης, έχει μεγαλύτερη τιμή από τον άλλο όρο του παρονομαστή. Τα αποτελέσματα των δύο εξισώσεων δεν θα μπορούσαν να φέρουν της ίδια τιμή, εφόσον ο ίδιος όρος βρίσκεται στον αριθμητή της πρώτης περίπτωσης και στον παρονομαστή της δεύτερης. Εν κατακλείδι, οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας είναι λογικές και αυτό επιβεβαιώνεται επιπλέον από την γραφική απεικόνιση τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αναγνωστόπουλος Α., Καββαδάς Μ., Παπαδόπουλος Β., (2009). ‘Σημειώσεις για τον Ευρωκώδικα 7 (EN 1997)’, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Οκτώβριος 2009.
2. Γεωργιάδης Μ., Γεωργιάδης Κ., (2009). ‘Στοιχεία εδαφομηχανικής’, 2013.
3. Κίρτας Ε., (2010). ‘Θεμελιώσεις’, Αντιστηρίξεις, 2010.
4. Μπελόκας Γ., (n.d.). ‘Τοίχοι αντιστήριξης’, Γεωτεχνικά έργα.
5. Μπουκοβάλας Γ.Δ., (2006). ‘Υπολογιστικές μέθοδοι στην γεωτεχνική’, Γεωτεχνική, 2006.
6. Παντελίδης Α., (2012). ‘Ευστάθεια πρανών’, Κατολισθήσεις, ΠΟΜ 226 Εδαφομηχανική, 2012.
7. Παντελίδης Α., (2013). ‘Πλευρικές ωθήσεις εδαφών, ΠΟΜ 226 Εδαφομηχανική, 2012.
8. Παπαδόπουλος Β., Λουπασάκης Κ., (n.d.). ‘Εδαφομηχανική και στοιχεία θεμελιώσεων’.
9. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., (2006). ‘Προσωρινές τεχνικές προδιαγραφές’, Τεύχος 1: ΠΕΤΕΠ 11-02-05-00, 2006.
10. Bishop A.W., (1955). ‘The use of the slip circle in the stability analysis of slopes’, Geotechnique, 1955.
11. BS 8006, (2010). ‘Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills’, Volume 1: BS 8006-1:2010, October 2010.
12. Chen Z.Y., Morgenstern N.R., (1983). ‘Extensions to the generalized method of slices for stability analysis’, Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20:104–19.
13. Corps of Engineers, (1970). ‘Stability of earth and rock-fill dams’, EM 1110-2-1902. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station: Vicksburg, MS, 1970.

14. Fellenius W., (1936). 'Calculations of the stability of earth dams', Trans. of the 2nd Congress on Large Dams, Volume 4, Washington, D.C., 1936, 445–463.
15. FHWA, (2009). 'Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes', Volume 1: FHWA GEC 011, November 2009.
16. Hunt R.E., Deschamps R.J., (2003). 'Stability of slopes', 2003
17. Janbu N., (1968). 'Slope stability computations', Institutt for Geoteknikk og Fundamenteringslære, Norges Tekniske Høgskole, Soils Mechanics and Foundation Engineering, the Technical University of Norway, 1968.
18. Janbu N., (1973). 'Slope stability computations', In: Embankment Dam Engineering—Casagrande Volume, John Wiley and Sons: New York, 1973.
19. Kramer L.S., (1996). 'Geotechnical earthquake engineering', Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
20. Lowe J., Karafiath L., (1960). 'Stability of earth dams upon drawdown', In: Proc of the First Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico DF: Mexican Society of Soil Mechanics, 1960, 537–552.
21. Morgenstern N.R., Price V.E., (1965). 'The analysis of the stability of generalised slip surfaces', Geotechnique, 1965, 15:79–93.
22. Pantelidis L., Griffiths D.V., (2012). 'Stability of earth slopes. Part I: two-dimensional analysis in closed-form', 2012.
23. Sarma S.K., (1973). 'Stability analysis of embankments and slopes', Geotechnique, 1973, 23(3):423–33.
24. Spencer E., (1967). 'A method for analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces', Geotechnique, 1967, 17(1):11–26.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα 1: Συνάρτηση Δεδομένων

```
function [x1,F1]=FOSmin_unconstrained()
%Provide Constants
H=5; % γεωμετρικά στοιχεία πρανούς
phi=20;
gamma=16; % στοιχεία εδάφους
U=0; % πίεση νερού των πόρων
t=10;

lambda_cphi=1;

%Provide Starting values for x0,y0
x0y0_in= [0 H];

%USING fminsearch - Optimization without constraints
[x1,F1]=fminsearch(@(x0y0_in)Main_w1(x0y0_in,H,phi,gamma,ru,lambda_cphi,t),x0y0_in);

end
```

Παράρτημα 2: Κύρια Συνάρτηση Main_w1

```
function [Sf]=Main_w1(x0y0_in,H,phi,gamma,U,lambda_cphi,t)

x0=x0y0_in(1);
y0=x0y0_in(2);

r=sqrt(x0.^2+y0.^2); % ακτίνα επιφάνειας ολίσθησης

% Ορισμός ορίων ολοκληρώματος χ1 χ2
xmin=0;
xmax= x0-sqrt(r.^2-(H-y0).^2)

syms x;
%Εύρεση w
fun=@(x) (H-y0+sqrt(r.^2-(x-x0).^2));
w=gamma*integral(fun,xmax,xmin)

%Εύρεση Xc
fun2=@(x) ((H-y0+sqrt(r.^2-(x-x0).^2)).*x);
Xc=(gamma*integral(fun2,xmax,xmin))/w % συντεταγμένη x του κέντρου μάζας
αστοχίας

%Εύρεση Ycs
Ycs=y0-sqrt(r.^2-((Xc-x0).^2)) % συντεταγμένη y του κέντρου μάζας αστοχίας

%Εύρεση γωνίας δ
delta=atan(abs((Ycs-y0)/(Xc-x0)))

Y=H; %Y δηλώνει το ύψος γεωπλεγμάτων
n=0; %n δηλώνει τον αριθμό γεωπλεγμάτων
while (Y>0.2)
    Y=Y-0.6;
    n=n+1;
end

%Υπολογισμός Σ(tj*yj)
Yj=H;
S=0;
```

```

for j = 1:n
    Yj=Yj-0.6;
    S=S+(t*Yj);
end

%Ορίζω ως a την απόσταση TA'
a=sqrt(xmax^2+H^2);

m=2*asind((a/2)/r); % Γωνία TOA'
L=2*pi*r*(m/360);

Sf = ((gamma*H*tand(phi)*L*r)/lambda_cphi)+(w*cos((pi/2)-
delta)*tand(phi)*r)-(U*tand(phi)*r+S)/(w*sin((pi/2)-delta)*r)

if (Sf<1)
    disp('Error: Sf is smaller than 1')
end

end

```

Παράρτημα 3: Συνάρτηση Γραφικής Παράστασης

```
function [F]=FOSmin_graphical()

H=5; % γεωμετρικά στοιχεία πρανούς
phi=20;
gamma=16; % στοιχεία εδάφους
U=0; % πίεση νερού των πόρων
t=10;
lambda_cphi=1;

[X,Y]=meshgrid(2:0.01:5,H:0.01:7);
sizeX=size(X);
FOS=zeros(sizeX);

for i=1:sizeX(1)
    for j=1:sizeX(2)
        [F]=Main_w1([X(i,j),Y(i,j)],H,phi,gamma,U,lambda_cphi,t);
        FOS(i,j)=F;
    end
end

%Plot a surface and find graphically the minimum
figure;
surf(X,Y,FOS);

hold on
[~,i] = min(FOS(:));
h = scatter3(X(i),Y(i),FOS(i),'filled');
h.SizeData = 150;
hold off

end
```

Παράρτημα 4: Κύρια Συνάρτηση Main_w2

```
function [Sf]=Main_w2(x0y0_in,H,phi,gamma,U,lambda_cphi,t)

x0=x0y0_in(1);
y0=x0y0_in(2);

r=sqrt(x0.^2+y0.^2); % ακτίνα επιφάνειας ολίσθησης

% Ορισμός ορίων ολοκληρώματος χ1 χ2
xmin=0;
xmax= x0-sqrt(r.^2-(H-y0).^2)

syms x;
%Εύρεση w
fun=@(x) (H-y0+sqrt(r.^2-(x-x0).^2));
w=gamma*integral(fun,xmax,xmin)

%Εύρεση Xc
fun2=@(x) ((H-y0+sqrt(r.^2-(x-x0).^2)).*x);
Xc=(gamma*integral(fun2,xmax,xmin))/w % συντεταγμένη x του κέντρου μάζας
αστοχίας

%Εύρεση Ycs
Ycs=y0-sqrt(r.^2-((Xc-x0).^2)) % συντεταγμένη y του κέντρου μάζας αστοχίας

%Εύρεση γωνίας δ
delta=atan(abs((Ycs-y0)/(Xc-x0)))

Y=H; %Y δηλώνει το ύψος γεωπλεγμάτων
n=0; %n δηλώνει τον αριθμό γεωπλεγμάτων
while (Y>0.2)
    Y=Y-0.6;
    n=n+1;
end

%Υπολογισμός Σ(tj*yj)
Yj=H;
S=0;
```

```

for j = 1:n
    Yj=Yj-0.6;
    S=S+(t*Yj);
end

%Ορίζω ως a την απόσταση TA'
a=sqrt(xmax^2+H^2);

m=2*asind((a/2)/r); % Γωνία TOA'
L=2*pi*r*(m/360);

Sf = ((gamma*H*tand(phi)*L*r)/lambda_cphi)+(w*cos((pi/2)-
delta)*tand(phi)*r)-(U*tand(phi)*r)/((w*sin((pi/2)-delta)*r)-S)

if (Sf<1)
    disp('Error: Sf is smaller than 1')
end

end

```

Παράρτημα 5: Εξισώσεις

1. Ακτίνα κύκλου ολίσθησης

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$$

2. Μήκος τόξου επιφάνειας ολίσθησης

$$L = 2\pi r(\widehat{\Gamma O A'} / 360^\circ)$$

3. Υ συντεταγμένη του σημείου Γ

$$y_\Gamma = y_0 - \sqrt{r^2 - (x_c - x_0)^2}$$

4. Γωνία δ

$$\delta = \tan^{-1}[(y_0 - y_\Gamma)/(x_c - x_0)]$$

5. Οριζόντια συντεταγμένη του σημείου Α'

$$x_{A'} = x_0 + \sqrt{r^2 - (y_0 - H)^2}$$

6. Βάρος ολισθαίνουσας μάζας

$$W = \int_{x_{A'}}^{x_A} \gamma_s [f_{A'A}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx + \int_{x_A}^{x_T} \gamma_s [f_{AT}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx$$

$$W = \int_{x_A}^{x_{A'}} \gamma_s [y_0 - H + \sqrt{r^2 - (x - x_0)^2}] dx$$

7. Οριζόντια συντεταγμένη κέντρου βάρους C

$$x_c = \frac{\int_{x_{A'}}^{x_A} \gamma_s x [f_{A'A}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx + \int_{x_A}^{x_T} \gamma_s x [f_{AT}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx}{W}$$

$$x_c = \frac{\int_{x_A}^{x_{A'}} \gamma_s x [y_0 - H + \sqrt{r^2 - (x - x_0)^2}] dx}{\int_{x_A}^{x_{A'}} \gamma_s [y_0 - H + \sqrt{r^2 - (x - x_0)^2}] dx}$$

8. Δύναμη αντίστασης λόγω συνοχής

$$F_c = \int_{a_i}^{a_f} c ds = \int_{a_i}^{a_f} cr da = cr(a_f - a_i)$$

9. Πίεση του νερού των πόρων

$$U = \gamma_w A_w = \gamma_w \left\{ \int_{x_{B'}}^{x_B} [f_{B'B}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx + \int_{x_B}^{x_T} [f_{BT}(x) - f_{\text{circ}}(x)] dx \right\}$$

10. Δύναμη Γεωσυνθετικού Υλικού

$$T_j = \frac{T_{ult}}{RF_{ID} * RF_{CR} * RF_D}$$

11. Κριτήριο Mohr-Coulomb

$$\tau = c + (\sigma - u)\tan\varphi$$

12. Συντελεστής Ασφαλείας του Βρετανικού προτύπου

$$\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{cb_i}{f_{ms}} + (f_{fs}W_i + f_q b_i w_{si})(1 - r_u) \frac{\tan \varphi_p}{f_{ms}} \right] \sec \alpha_i R_d + \sum_{j=1}^m T_j y_j}{1 + \frac{\tan \varphi_p \tan \alpha_i}{f_{ms}}} \geq 1$$
$$\frac{\sum_{i=1}^n [(f_{fs}W_i + f_q b_i w_{si}) \sin \alpha_i] R_d}{\sum_{i=1}^n [(f_{fs}W_i + f_q b_i w_{si}) \sin \alpha_i] R_d} \geq 1$$

13. Τροποποιημένος Συντελεστής Ασφαλείας κατά τη μέθοδο κλειστού τύπου για μηχανικά σταθεροποιημένο τοίχο

$$SF = \frac{cLr + W \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \tan(\varphi) r - r_u \tan(\varphi) r + \sum(T_j y_j)}{W \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) r} \geq 1$$

$$SF = \frac{cLr + W \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \tan(\varphi) r - r_u \tan(\varphi) r}{W \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) r - \sum(T_j y_j)} \geq 1$$

