



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών Μηχανικών και

Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΟΔΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ,
ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΚΕΙΜ ΚΟΣΣΙΩΡΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών Μηχανικών και

Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΟΔΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ,
ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΚΕΙΜ ΚΟΣΣΙΩΡΗΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής Ιωάννης Τσομπανάκης (Επιβλέπων), Π.Κ.

Καθηγητής Κωνσταντίνος Προβιδάκης, Π.Κ.

Δρ. Πρόδρομος Ψαρρόπουλος Ε.Μ.Π.

«Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.»

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, για την ευκαρία που μου έδωσε να ερευνήσω και να αναπτύξω το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Δρ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο μέλος ΕΔΙΠ του Ε.Μ.Π. για την καθοδήγηση του και το χρόνο που αφιέρωσε για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας μου, αλλά και τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή.

Ειδική αναφορά θέλω να κάνω και να ευχαριστήσω, τους πολύ καλούς μου φίλους Γιάννη Κυψίδα και Ευστάθιο Φώτη που με στήριξαν τόσο πολύ όλα αυτά τα χρόνια που ζήσαμε στα Χανιά. Επίσης, δεν γίνεται να μην αναφερθώ στη σύντροφό μου Κωνσταντίνα Παρασκευοπούλου που με στήριξε και με άντεξε όλη αυτήν την περίοδο της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Αθανάσιο Κοσσιώρη που ήταν, είναι και θα είναι πάντα δίπλα μου να με στηρίζει σε οποιαδήποτε απόφαση παίρνω στη ζωή μου και να με βοηθάει σε οτιδήποτε χρειαστώ. Χανιά σας ευχαριστώ για όλα.

Ιωακείμ Κοσσιώρης
Χανιά, Οκτώβριος 2024

Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζονται εντονότερα καιρικά φαινόμενα λόγω της κλιματικής αλλαγής. Για παράδειγμα, παρατηρείται αύξηση της έντασης φαινομένων, όπως οι βροχοπτώσεις, οι χιονοπτώσεις, ενώ ακόμα και οι περίοδοι ξηρασίας είναι μεγαλύτερες σε διάρκεια. Τα παραπάνω επηρεάζουν την ευστάθεια των πρανών και τη συχνότητα των κατολισθήσεων. Η ευστάθεια των φυσικών αλλά και των τεχνητών πρανών (δηλαδή, επιχωμάτων και ορυγμάτων) αποτελεί ένα από τα βασικά αντικείμενα της γεωτεχνικής μηχανικής, αφού μία ενδεχόμενη αστοχία τους μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών των πρανών επηρεάζουν σημαντικά τους μηχανισμούς αστοχίας τους, και κατ' επέκταση την πρόκληση κατολισθήσεων. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζουν ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, αλλά και πιθανά πλημμυρικά φαινόμενα. Η επιρροή του νερού στη συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή ενδιαφέροντος, συνεπιδρώντας με τη διαδικασία της διάβρωσης των πρανών, η οποία παρεμποδίζεται μεν από την παρουσία βλάστησης, αλλά επιδεινώνεται από τις πλημμύρες. Δυσμενείς παράγοντες για την ευστάθεια ενός πρανού/επιχώματος είναι η απότομη κλίση, η μικρή συνοχή ή/και γωνία εσωτερικής τριβής, αλλά και τα σεισμικά/δυναμικά φορτία.

Επιπροσθέτως, το νερό, είτε εσωτερικά με την παρουσία υδροφόρου ορίζοντα σε κορεσμένα εδάφη, είτε εξωτερικά, εξαιτίας των πλημμυρών, επιδρά στην ευστάθεια του πρανού, οδηγώντας σε μεταβολές του συντελεστή ασφάλειας. Πρέπει δε να τονισθεί το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη αύξηση της έντασης και της συχνότητας των πλημμυρικών φαινομένων λόγω της κλιματικής αλλαγής. Συνεπώς, η μελέτη της ευστάθειας ενός πρανού/επιχώματος είναι απαραίτητο να γίνεται όχι μόνο υπό στατικές, αλλά και υπό σεισμικές και πλημμυρικές συνθήκες. Οι δυνάμεις βαρύτητας αποτελούν τον καθοριστικό παράγοντα αστοχίας ενός πρανού, ενώ ο συνδυασμός με σεισμική ή/και πλημμυρική δραστηριότητα μπορεί να αποβεί καταστροφικός σε περιοχές που τα παραπάνω φαινόμενα μπορούν να συνυπάρξουν, όπως έχει αποδειχτεί από πολλά περιστατικά σε σεισμογενείς περιοχές.

Βάσει των προαναφερθέντων, στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης δυνάμεων βαρύτητας και σεισμικών φορτίων, αλλά και πλημμυρικών φαινομένων στην ευστάθεια οδικών και σιδηροδρομικών επιχωμάτων, ειδικά όταν έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τους ένα ελαφρό υλικό πλήρωσής, όπως η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS). Για αυτόν τον σκοπό, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες αναλυτικές σχέσεις και πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D. Συμπερασματικά, επιβεβαιώνεται πως η αύξηση στη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και τα σεισμικά φορτία επιδρούν αρνητικά στην ευστάθεια των επιχωμάτων, ενώ ο συνδυασμός τους κρίνεται δυσμενέστερος. Αντιθέτως, τα επιφανειακά νερά μπορεί να έχουν υπό προϋποθέσεις ακόμα και ευεργετική επίδραση στην ευστάθεια των εδαφικών πρανών.

Abstract

In recent years, extreme weather events have become more pronounced due to climate change. Consequently, there is a substantial increase in the intensity of phenomena such as rainfall, snowfall, and extended drought periods. These phenomena can have a detrimental impact on the stability of slopes and increase the frequency of landslides. The stability of natural and artificial slopes (such as embankments and excavations) is a key issue in geotechnical engineering, as any potential failure can have catastrophic consequences. The physical and mechanical properties of slope materials significantly influence failure mechanisms, thereby contributing to landslides. Additionally, the groundwater table and the impact of flooding events play a crucial role. The effect of water on soil behavior depends on the prevailing conditions in the area of interest, in conjunction with the process of slope erosion, which is stalled by the presence of vegetation, but intensified by flooding. Adverse factors for the stability of a slope/embankment include steep inclination, low cohesion and/or internal friction angle of soil materials, as well as seismic/dynamic loads.

Moreover, the presence of water, either internally due to the presence of groundwater in saturated soils, or externally due to floods, affects slope stability by altering the safety factor. It is important to emphasize that in recent years there has been a significant increase in the intensity and frequency of flooding events due to climate change. Therefore, the study of slope/embankment stability must consider not only static, but also seismic and flooding conditions. Gravitational forces are a determining factor in slope failure, and their combination with seismic or/and intense rainfall activity can be catastrophic in areas where these phenomena coexist, as it has been observed in many incidents in seismic-prone regions.

Based on the above, the aim of this diploma thesis is to investigate the impact of gravitational forces, seismic loads, and flooding phenomena on the stability of road and railway embankments, especially when a lightweight filling material, such as expanded polystyrene (EPS), has been used. For this purpose, analytical expressions were employed and parametric numerical analyses were performed utilizing Plaxis 2D finite-element software. In conclusion, it is confirmed that the rise of water table level and seismic loads can have an unfavourable impact on embankment stability, while their combination is particularly detrimental. On the other hand, surface water may have even a beneficial impact on soil slope stability, depending on the circumstances.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	ii
Abstract.....	iii
Περιεχόμενα.....	iv
Ευρετήριο πινάκων.....	vi
Ευρετήριο εικόνων.....	vi
Ευρετήριο σχημάτων.....	x
Κεφάλαιο 1 ^ο	1
Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγικές έννοιες.....	1
1.1.1 Πρανή.....	1
1.1.2 Κύκλος του Mohr – κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb.....	2
Κεφάλαιο 2 ^ο	3
Πρανή.....	3
2.1 Βασικές γεωκατασκευές τεχνητών πρανών.....	3
2.2 Ευστάθεια πρανών.....	5
2.2.1 Παράγοντες επιρροής ευστάθειας πρανών.....	5
2.2.2 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών.....	8
2.3 Αστοχία πρανών - κατολισθήσεις.....	9
2.3.1 Ταξινόμηση κατολισθήσεων.....	10
2.3.2 Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων.....	17
2.3.3 Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων.....	19
2.4 Κλιματική αλλαγή – κρίση.....	19
2.4.1 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στα φυσικά πρανή.....	20
Κεφάλαιο 3 ^ο	23
Διογκωμένη Πολυστερίνη.....	23
3.1 Περιγραφή της διογκωμένης πολυστερίνης.....	23
3.1.1 Τύποι και μηχανικές ιδιότητες διογκωμένης πολυστερίνης.....	24
3.1.2 Η επίδραση της διογκωμένης πολυστερίνης στο περιβάλλον.....	25
3.2 Χρήση διογκωμένης πολυστερίνης σε γεωτεχνικά έργα.....	26
3.2.1 Οδικά – σιδηροδρομικά επιχώματα.....	27
3.2.2 Ευστάθεια πρανών.....	28
3.2.3 Γέφυρες.....	28

3.2.4 Τοίχοι αντιστήριξης.....	29
3.2.5 Προστασία υπόγειων αγωγών και κατασκευών.....	30
3.2.6 Διαμόρφωση τοπίου.....	31
Κεφάλαιο 4ο.....	33
Αναλυτική μέθοδος.....	33
4.1 Μέθοδοι οριακής ισορροπίας.....	33
4.1.1 Επίπεδη μεταφορική ολίσθηση – απειρομήκες πρανές.....	33
4.1.2 Μέθοδος της σφήνας – πεπερασμένου ύψους.....	34
4.1.3 Μέθοδος Fellenius – λωρίδων.....	35
4.1.4 Απλοποιημένη μέθοδος Bishop.....	36
4.1.5 Ψευδοστατική μέθοδος ανάλυσης.....	37
4.1.6 Δυναμική μέθοδος ανάλυσης.....	38
4.2 Αναλυτική μεθοδολογία ευστάθειας εδαφικών πρανών.....	39
4.2.1 Απειρομήκες πρανές.....	39
4.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων απειρομήκους πρανούς.....	45
4.2.3 Πρανή πεπερασμένου ύψους.....	49
4.2.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων πρανών πεπερασμένου ύψους.....	57
4.3 Συμπεράσματα αναλυτικών μεθόδων.....	60
Κεφάλαιο 5ο.....	63
Αριθμητική μέθοδος.....	63
5.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	63
5.2 Λογισμικό Plaxis 2D.....	64
5.3 Αριθμητική προσομοίωση οδικού επιχώματος.....	68
1 ^η Περίπτωση: Αριθμητική προσομοίωση οδικού επιχώματος από εδαφικό υλικό.....	69
2 ^η Περίπτωση: Αριθμητική προσομοίωση οδικού επιχώματος από διογκωμένη πολυστερίνη.....	75
5.4 Αριθμητική προσομοίωση σιδηροδρομικών επιχωμάτων.....	82
1 ^η Περίπτωση: Αριθμητική προσομοίωση σιδηροδρομικού επιχώματος από εδαφικό υλικό.....	82
2 ^η Περίπτωση: Αριθμητική προσομοίωση σιδηροδρομικού επιχώματος από διογκωμένη πολυστερίνη.....	88
5.5 Συμπεράσματα αριθμητικής μεθόδου.....	94
Κεφάλαιο 6ο.....	97
Συμπέρασμα.....	97
6.1 Γενικά συμπεράσματα – Σύγκριση αναλυτικής και αριθμητικής μεθόδου.....	97
6.2 Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.....	99

Βιβλιογραφία.....	101
Διεθνής Βιβλιογραφία	101
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	102

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση τον τύπο μετακίνησης (Varnes, 1978)..	11
Πίνακας 2.2: Παράγοντες εμφάνισης κατολισθήσεων (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).....	18
Πίνακας 3.1: Κατηγοριοποίηση τύπων EPS και οι αντίστοιχες ονομαστικές θλιπτικές αντοχές τους(ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).....	24
Πίνακας 4.1: Αναλυτικές εξισώσεις για συνεκτικά εδάφη.	45
Πίνακας 4.2: Αναλυτικές εξισώσεις για μη συνεκτικά εδάφη..	45
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.	48
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.	49
Πίνακας 4.5: Αναλυτικές εξισώσεις για συνεκτικά εδάφη..	56
Πίνακας 4.6: Αναλυτικές εξισώσεις για μη συνεκτικά εδάφη.	57
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο..	59
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.	60
Πίνακας 4.9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας.	61
Πίνακας 5.1: Δεδομένα υλικών εισαγωγής στο Plaxis 2D.....	69
Πίνακας 5.2: Δεδομένα υλικών εισαγωγής στο Plaxis 2D.....	70
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.	75
Πίνακας 5.4: Δεδομένα διογκωμένης πολυστερίνης για το Plaxis 2D.....	76
Πίνακας 5.5: Συγκριτικά αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.....	81
Πίνακας 5.6: Δεδομένα προσομοίωσης στο Plaxis 2D.....	81
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.	87
Πίνακας 5.8: Συγκριτικά αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.....	93
Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας	94
Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας με αναλυτική και αριθμητική μέθοδο, για οδικό και σιδηροδρομικό επίχωμα εδαφικού υλικού	96
Πίνακας 6.2: Συγκριτικά αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας για τη κατασκευή οδικών και σιδηροδρομικών επιχωμάτων με εδαφικό υλικό ή διογκωμένη πολυστερίνη.....	96

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 2.1: Σιδηροδρομικό επίχωμα (CommercialContact railway construction, 2020)	3
Εικόνα 2.2: Όρυγμα για τη διαμόρφωση οδοστρώματος (Antigoldgreece, 2014).....	3
Εικόνα 2.3: Φράγμα Κρεμαστών (Kardaras Riverview Project, 2021)	4
Εικόνα 2.4: Φράγμα αποβλήτων μεταλλείων (Mining Journal, 2022).....	4
Εικόνα 2.5: Πιθανές επιπτώσεις των καιρικών συνθηκών στη διάβρωση και τη σταθερότητα ενός εδαφικού πρανού (Psarroropoulos et al., 2022)	6

Εικόνα 2.6: Ρευστοποίηση του εδάφους στο δυτικό Κολοράντο κοντά στη πόλη Collbran (Geoengineer.org, Wark, 2014).....	7
Εικόνα 2.7: Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδος (Φ.Ε.Κ. Β' 1154/2003)....	8
Εικόνα 2.8: Κατάπτωση (U.S Geological Survey, 2004).....	11
Εικόνα 2.9: Κατάπτωση βράχων στην ακτή Jurassic Coast, του Dorset (Finnbarr Webster & Getty Images, 2020).	12
Εικόνα 2.10: Ανατροπή (U.S Geological Survey, 2004).	12
Εικόνα 2.11: Ανατροπή στην περιοχή του εθνικού πάρκου Jasper, στο Καναδά (ResearchGate, Bobrowsky, 2018).....	12
Εικόνα 2.12: Περιστροφική ολίσθηση (U.S Geological Survey, 2004).....	13
Εικόνα 2.13: Περιστροφική ολίσθηση στη βορειοδυτική Washington (U.S Geological Survey, Godt, 2014).....	13
Εικόνα 2.14: Μεταθετική ολίσθηση (U.S Geological Survey, 2004).....	14
Εικόνα 2.15: Μεταθετική ολίσθηση στο Port Gannoy, στη Βόρεια Ιρλανδία (ResearchGate, Politero, 2008).....	14
Εικόνα 2.16: Πλευρική εξάπλωση (U.S Geological Survey, 2004).....	14
Εικόνα 2.17: Πλευρική εξάπλωση σε εξαιρετικά ευαίσθητη άργιλο (Ministère des Transports du Québec, 2020).....	15
Εικόνα 2.18: Ροή (U.S Geological Survey, 2004).	15
Εικόνα 2.19: Ροή εδαφικών υλικών που έθαψε ένα χωριό στο Guinsaugon, στο Νότιο Λέιτε των Φιλιππίνων (University of Tokyo Geotechnical Team, 2006).	16
Εικόνα 2.20: Ερπυσμός (U.S Geological Survey, 2004)..	16
Εικόνα 2.21: Παραμόρφωση κορμών δέντρων από ερπυστική μετακίνηση, σε δάσος της Αλβανίας (Alikaj2582 Getty Images & Stockphoto, 2023).	16
Εικόνα 2.22: Ερπυσμός σε πλαγιά στο Σαν Σαλβαδόρ (ResearchGate, Ferdowsi, 2018)	17
Εικόνα 2.23: Μεταβολή της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του CO ₂ σε βάθος χρόνων στο παρατηρητήριο MaunaLoa (Green, 2011)	20
Εικόνα 3.1: Μπλοκ διογκωμένης πολυστερίνης (EPS Industry Alliance, 2020).	23
Εικόνα 3.2: Κατασκευή οδικού και σιδηροδρομικού επιχώματος με τη χρήση EPS (EPS Industry Alliance, 2020).	27
Εικόνα 3.3: Χρήση γεωφρού EPS στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).	27
Εικόνα 3.4: Τοποθέτηση μπλοκ EPS στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ (EPS Hellas)..	28
Εικόνα 3.5: Σταθεροποίηση εδαφικού πρηνούς με χρήση γεωφρού EPS (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).....	28
Εικόνα 3.6: Κατασκευή ακρόβαθρων γέφυρας με τη χρήση EPS (EPS Industry Alliance, 2020).	29
Εικόνα 3.7: Χρήση γεωφρού EPS σε ακροβάθρο γέφυρας (Lyrtzakakis, 2021).	29
Εικόνα 3.8: Κατασκευή τοίχου αντιστήριξης με τη χρήση γεωφρού EPS (EPS Industry Alliance, 2020).....	30
Εικόνα 3.9: Τοίχος αντιστήριξης EPS για την επίχωση τοίχων στις φοιτικές εστίες του Πανεπιστημίου της Δυτικής Βιρτζίνια, στη Morgantown (EPS Industry Alliance, 2020).	30
Εικόνα 3.10: Προστασία αγωγού με τη χρήση γεωφρού EPS (EPS Industry Alliance, 2020).....	31

Εικόνα 3.11: Διαμόρφωση τοπίου με τη χρήση γεωαφρού EPS (EPS Industry Alliance, 2020).....	32
Εικόνα 3.12: Διαμόρφωση τοπίου με τη χρήση EPS (Κατσιράκης, 2021).....	46
Εικόνα 5.1: Βασικά είδη πεπερασμένων στοιχείων.....	63
Εικόνα 5.2: Ορισμός μονάδων μέτρησης, όρια και είδος πεπερασμένων στοιχείων.	64
Εικόνα 5.3: Ορισμός τιμών βασικών ποσοτήτων.....	65
Εικόνα 5.4: Ρυθμίσεις δημιουργίας πλέγματος.....	66
Εικόνα 5.5: Στάδια υπολογισμού εδαφικού επιχώματος.	66
Εικόνα 5.6: Παραμόρφωση προσομοιώματος.....	67
Εικόνα 5.7: Συνολικές μετατοπίσεις.....	67
Εικόνα 5.8: Τροχιές κυρίων τάσεων.....	67
Εικόνα 5.9: Περιοχή μελέτης.....	68
Εικόνα 5.10: Στρωματογραφία εδάφους (Παπαχαλαράμπους κ.α., 2008).	68
Εικόνα 5.11: Αστοχία κατά την κατασκευή του οδικού επιχώματος στο ΠΑΘΕ (Παπαχαλαράμπους κ.α., 2008).....	69
Εικόνα 5.12: Εδαφικό προφίλ προσομοιώματος.....	70
Εικόνα 5.13: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό στατικές συνθήκες.	71
Εικόνα 5.14: Συνολικές μετατοπίσεις υπό στατικές συνθήκες.....	71
Εικόνα 5.15: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό στατικές συνθήκες..	71
Εικόνα 5.16: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό στατικές συνθήκες.	72
Εικόνα 5.17: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες.	72
Εικόνα 5.18: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες.....	72
Εικόνα 5.19: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ παρουσία υδροφόρου ορίζοντα..	72
Εικόνα 5.20: Συνολικές μετατοπίσεις παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.....	73
Εικόνα 5.21: Σημεία πιθανής αστοχίας παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.	73
Εικόνα 5.22: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες.....	74
Εικόνα 5.23: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες.....	74
Εικόνα 5.24: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες.....	74
Εικόνα 5.25: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών..	74
Εικόνα 5.26: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών..	75
Εικόνα 5.27: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών.	75
Εικόνα 5.28: Εδαφικό προφίλ προσομοιώματος.....	76
Εικόνα 5.29: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό στατικές συνθήκες.....	76
Εικόνα 5.30: Συνολικές μετατοπίσεις υπό στατικές συνθήκες.....	76
Εικόνα 5.31: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό στατικές συνθήκες.....	77
Εικόνα 5.32: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές συνθήκες.....	77
Εικόνα 5.33: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες.....	77
Εικόνα 5.34: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες.....	77
Εικόνα 5.35: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.....	78
Εικόνα 5.36: Συνολικές μετατοπίσεις παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.....	78
Εικόνα 5.37: Σημεία πιθανής αστοχίας παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.....	78
Εικόνα 5.38: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές, συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.....	79

Εικόνα 5.39: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα	79
Εικόνα 5.40: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.....	79
Εικόνα 5.41: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες.....	79
Εικόνα 5.42: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες.....	80
Εικόνα 5.43: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες.	80
Εικόνα 5.44: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών.	80
Εικόνα 5.45: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών.	80
Εικόνα 5.46: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών.	81
Εικόνα 5.47: Εδαφικό προφίλ προσομοιώματος	82
Εικόνα 5.48: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό στατικές συνθήκες.	82
Εικόνα 5.49: Συνολικές μετατοπίσεις υπό στατικές συνθήκες.	83
Εικόνα 5.50: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό στατικές συνθήκες.	83
Εικόνα 5.51: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές συνθήκες.	83
Εικόνα 5.52: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες.....	84
Εικόνα 5.53: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες..	84
Εικόνα 5.54: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες..	85
Εικόνα 5.55: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες.....	85
Εικόνα 5.56: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες.	85
Εικόνα 5.57: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών.	86
Εικόνα 5.58: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών..	86
Εικόνα 5.59: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών.	86
Εικόνα 5.60: Εδαφικό προφίλ προσομοιώματος.	87
Εικόνα 5.61: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό στατικές συνθήκες.	87
Εικόνα 5.62: Συνολικές μετατοπίσεις υπό στατικές συνθήκες.	88
Εικόνα 5.63: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό στατικές συνθήκες.	88
Εικόνα 5.64: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές συνθήκες.	88
Εικόνα 5.65: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες.	89
Εικόνα 5.66: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες.....	89
Εικόνα 5.67: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.	89
Εικόνα 5.68: Συνολικές μετατοπίσεις παρουσία υδροφόρου ορίζοντα..	90
Εικόνα 5.69: Σημεία πιθανής αστοχίας παρουσία υδροφόρου ορίζοντα..	90
Εικόνα 5.70: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές, συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.	90
Εικόνα 5.71: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.....	91
Εικόνα 5.72: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.....	91
Εικόνα 5.73: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες.....	91
Εικόνα 5.74: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες.....	92
Εικόνα 5.75: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες.	92

Εικόνα 5.76: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών.	92
Εικόνα 5.77: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών.	93
Εικόνα 5.78: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών	93

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1.1: Κύκλος τάσεων του Mohr.	2
Σχήμα 1.2: Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.	2
Σχήμα 4.1: Μορφές αστοχίας α) σφήνας β) πολυεπίπεδη γ) κυκλική δ) μη κυκλική (Kramer, 1996).	33
Σχήμα 4.2: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες.	34
Σχήμα 4.3: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες.	34
Σχήμα 4.4: Εδαφικό τμήμα ανάλυσης με τη μέθοδο των λωρίδων.	35
Σχήμα 4.5: Ανάλυση δυνάμεων στη λωρίδα.	36
Σχήμα 4.6: Ανάλυση δυνάμεων σε απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες.	38
Σχήμα 4.7: Απειρομήκες πρανές σε στατικές συνθήκες.	40
Σχήμα 4.8: Απειρομήκες πρανές παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.	41
Σχήμα 4.9: Απειρομήκες πρανές με την εφαρμογή ψευδοστατικών συνθηκών.	42
Σχήμα 4.10: Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές και υγρές συνθήκες.	43
Σχήμα 4.11: Απειρομήκες βυθισμένο πρανές.	44
Σχήμα 4.12: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες.	50
Σχήμα 4.13: Πρανές πεπερασμένου ύψους παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.	52
Σχήμα 4.14: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές συνθήκες.	53
Σχήμα 4.15: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές συνθήκες και παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.	54
Σχήμα 4.16: «Βυθισμένο» πρανές πεπερασμένου ύψους.	55

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη της επίδρασης των δυνάμεων βαρύτητας, των σεισμικών φορτίων, την παρουσία νερού στο υπέδαφος αλλά και των πλημμυρικών φαινομένων στην ευστάθεια των οδικών και των σιδηροδρομικών επιχωμάτων πρανών. Αρχικά, η μελέτη της ευστάθειας διεξάγεται σε επιχώματα, τα οποία αποτελούνται από εδαφικό υλικό και εν συνεχεία γίνεται έλεγχος της ευστάθειας σε επιχώματα τα οποία έχουν κατασκευαστεί με ελαφρύ υλικό πλήρωσης, τη διογκωμένη πολυστερίνη EPS, αξιολογώντας την εφαρμογή της ως εναλλακτικό υλικό κατασκευής οδικών και σιδηροδρομικών επιχωμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο καταγράφονται τα κύρια είδη γεωκατασκευών τεχνητών πρανών, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθειά τους, οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας και οι πιθανοί τρόποι αστοχίας τους. Επιπλέον, γίνεται αναλυτική ταξινόμηση των κατολισθήσεων, αναφέρονται οι παράγοντες εκδήλωσής τους και τα μέτρα αντιμετώπισής τους. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζει η κλιματική αλλαγή στη συμπεριφορά των φυσικών πρανών. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τύποι και οι μηχανικές ιδιότητες της διογκωμένης πολυστερίνης και εν συνεχεία καταγράφονται οι χρήσεις της σε γεωτεχνικά έργα.

Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται αντίστοιχα η αναλυτική και η αριθμητική ανάλυση της ευστάθειας των οδικών και σιδηροδρομικών επιχωμάτων που εξετάστηκαν. Στο τέταρτο κεφάλαιο, αρχικά παρουσιάζονται οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας και μετέπειτα πραγματοποιείται η ανάλυση της ευστάθειας των επιχωμάτων με τις αναλυτικές μεθόδους για την περίπτωση τόσο απειρομήκων όσο και πρανών πεπερασμένου ύψους. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, το λογισμικό Plaxis 2D, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική ανάλυση των επιχωμάτων. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση της αναλυτικής με την αριθμητική μέθοδο και περιγράφονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ενώ δίνονται και προτάσεις για τη συνέχιση της έρευνας.

1.1 Εισαγωγικές έννοιες

1.1.1 Πρανή

Με τον όρο «πρανή» εννοούνται οι κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί, εδάφους ή βράχου. Τα πρανή κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, φυσικά και τεχνητά (Σακελλαρίου, 2009):

- **Φυσικά πρανή**, είναι αυτά που έχουν δημιουργηθεί σταδιακά μέσω φυσικών διεργασιών, κυρίως διαβρώσεων, σε μεγάλο χρονικό διάστημα.

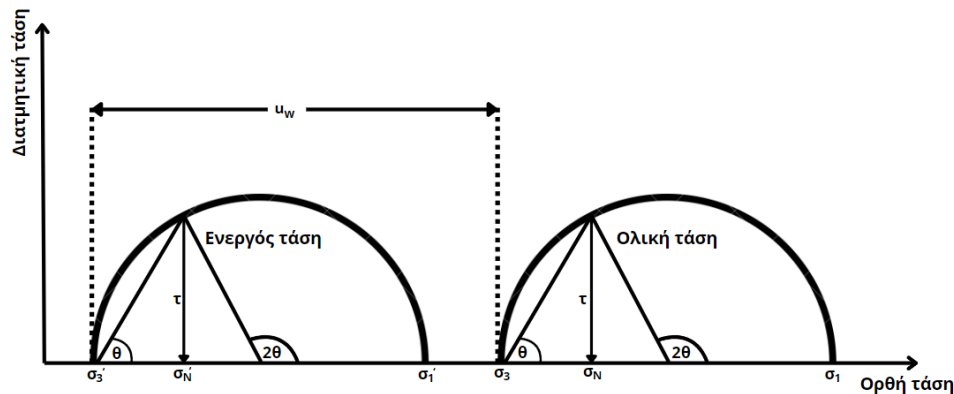
- **Τεχνητά πρανή**, είναι αυτά που έχουν κατασκευαστεί από τον άνθρωπο χρησιμοποιώντας και το υπάρχον έδαφος (Barnes, 2010).

Τα πρανή όμως, είτε φυσικά είτε τεχνητά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες αναλόγως τη γεωμετρία τους σε:

- **Απειρομήκη πρανή**, θεωρούνται εκείνα που το μήκος τους είναι πολύ μεγάλο συγκριτικά με το ύψος τους και τα όρια τους δεν είναι ευκρινή.
- **Πρανή πεπερασμένου ύψους**, θεωρούνται τα πρανή που έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό ότι το ύψος τους είναι συγκρίσιμο του μήκους τους.

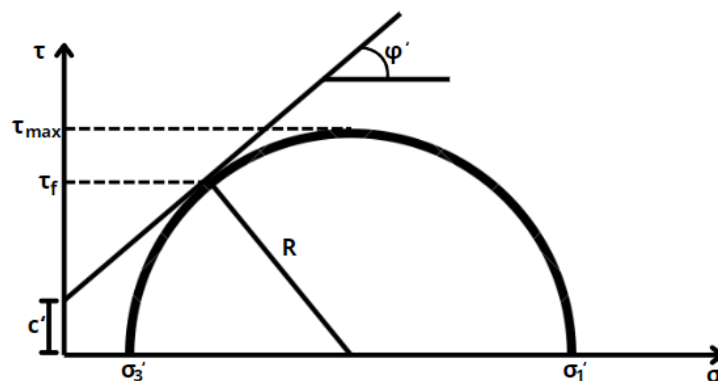
1.1.2 Κύκλος του Mohr – κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb

Ο κύκλος του Mohr είναι ένας χρήσιμος τρόπος να προσδιοριστούν η διατμητική (τ) και η ορθή τάση (σ), που δρουν σε ένα επίπεδο υπό οποιαδήποτε γωνία μέσα σε ένα στοιχείο εδάφους, εάν είναι γνωστές οι τιμές των κυρίων τάσεων (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Κύκλος τάσεων του Mohr.

Το κριτήριο Mohr – Coulomb (Σχέση 1.1) είναι ένα βασικό κριτήριο αστοχίας που εφαρμόζεται στην εδαφομηχανική, το οποίο συσχετίζει τη διατμητική αντοχή σε μία επιφάνεια ολίσθησης με την κάθετη ενεργό τάση (σ'_N) που δρα σε αυτή την επιφάνεια. Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.

Για να μετακινηθεί μία μάζα ενός πρανού θα πρέπει η διατμητική τάση η οποία δρα σε αυτό να ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή του:

$$\tau_f = c' + \sigma'_N \cdot \tan \varphi' \quad (1.1)$$

2.1 Βασικές γεωκατασκευές τεχνητών πρανών

Επιχώματα:

Κατασκευάζονται συσσωρεύοντας εδαφικό υλικό επίχωσης πάνω από μία επιφάνεια εδάφους, σχηματίζοντας ένα τραπέζιο πρίσμα. Η πιο συνηθισμένη γεωκατασκευή επιχώματος συναντάται για οδική και σιδηροδρομική υποστήριξη, για τα οποία γίνεται ανάλυση στο τέταρτο (μέθοδοι οριακής ισορροπίας) και πέμπτο κεφάλαιο (μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων).



Εικόνα 2.1: Σιδηροδρομικό επίχωμα (CommercialContact railway construction).

Εκσκαφές:

Είναι βραχυπρόθεσμες υποστηρικτικές εργασίες, οι οποίες επιτρέπουν την διεξαγωγή κατασκευής υπόγειων έργων, όπως εξορύξεις.

Ορύγματα:

Δημιουργούνται από εκσκαφές στο έδαφος, σχηματίζοντας κεκλιμένες πλευρές στα άκρα του και η μεταβολή στο έδαφος είναι μόνιμη.



Εικόνα 2.2: Όρυγμα για τη διαμόρφωση οδοστρώματος (Antigoldgreece, 2014).

Χωμάτινα φράγματα:

Είναι ψηλές κατασκευές και απαιτούν προσοχή κατά την κατασκευή τους, διότι σε περίπτωση αστοχίας τα αποτελέσματα μπορεί να είναι καταστροφικά.



Εικόνα 2.3: Φράγμα Κρεμαστών (Kardaras Riverview Project, 2021).

Σωροί απορριμμάτων και φράγματα από άχρηστα μεταλλείων:

Πρόκειται για συσσωρεύσεις αποβλήτων και υλικών από βιομηχανικές διεργασίες, που τοποθετούνται με τη βοήθεια βαρέων οχημάτων, σε στερεή ή υγρή μορφή, σε πολύ απότομες πλαγιές που έχουν διαμορφωθεί έτσι ώστε να αποφευχθεί ρύπανση του περιβάλλοντος (Barnes, 2010).



Εικόνα 2.4: Φράγμα αποβλήτων μεταλλείων (Mining Journal, 2022).

2.2 Ευστάθεια πρανών

Η ευστάθεια ενός πρανούς περιγράφεται ως η ευστάθεια μιας κεκλιμένης εδαφικής μάζας, φυσικής ή τεχνητής, σε κεκλιμένη ελεύθερη επιφάνεια. Ωστόσο, το κεκλιμένο έδαφος μπορεί να γίνει ασταθές, εάν οι διατμητικές τάσεις που δρουν στο εσωτερικό του, υπερβούν τη διατμητική αντοχή του, με αποτέλεσμα να προκύπτει καθοδική κίνηση της εδαφικής μάζας του πρανούς (Barnes, 2010). Παράγοντες που επιδρούν στην ευστάθεια του πρανούς και ενδέχεται να παρουσιάσει αστοχία, είναι η κλίση του, οι βαρυτικές δυνάμεις, η πιθανή παρουσία νερού στο υπέδαφος, ο σεισμός ή και ο συνδυασμός τους. Οι αστοχίες των πρανών δυνητικά μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλους κινδύνους, πρωτίστως για τη ανθρώπινη ζωή, υγεία και μετέπειτα για τις ανθρώπινες περιουσίες και το περιβάλλον. Για να αποφευχθούν τα συγκεκριμένα σενάρια απαιτείται η εξασφάλιση της ευστάθειας των πρανών, πραγματοποιώντας αναλύσεις, ώστε να εκτιμάται η ευστάθεια και εν συνεχεία να κατασκευάζονται κατάλληλα έργα υποστήριξης στις δυσμενείς περιοχές, όπως τοίχοι αντιστήριξης, διαφράγματα από αγκυρώσεις, οπλισμένο έδαφος, γεωυφάσματα, κ.α.

2.2.1 Παράγοντες επιρροής ευστάθειας πρανών

Η ευστάθεια των πρανών εξαρτάται από συνδυασμό συνθηκών και δεν επηρεάζεται εξολοκλήρου από έναν και μόνο παράγοντα. Τα γεωμετρικά, εδαφικά χαρακτηριστικά, οι γεωμορφολογικές, οι φυσικές αλλά και οι ανθρωπογενείς διεργασίες επηρεάζουν συνολικά την ευστάθεια ενός πρανούς. Ένα από τα κυριότερα στοιχεία που καθορίζουν την ευστάθεια ενός πρανούς, είναι οι μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού από το οποίο αποτελείται. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές που παίρνουν, η συνοχή c και η γωνία εσωτερικής τριβής φ (τείνει να διατηρήσει ενωμένα τα υλικά από τα οποία αποτελείται μια εδαφική μάζα), καθορίζουν την διατμητική αντοχή του υλικού, καθώς όσο μεγαλύτερες είναι τόσο μεγαλύτερη είναι και η ευστάθεια του (Psarropoulos et al., 2022). Ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει την ευστάθεια ενός πρανούς είναι η βαρύτητα, καθώς καθορίζει τις διατμητικές τάσεις που δημιουργούνται στο εσωτερικό του. Επιπλέον, υπάρχουν εξωτερικοί παράγοντες που τείνουν να μειώσουν τη διατμητική αντοχή ενός υλικού ή να αυξήσουν τις διατμητικές τάσεις που δέχεται το πρανές, καθιστώντας το πιο ασταθές, κάποια παραδείγματα αυτών, είναι οι βροχοπτώσεις, οι πλημμύρες, το λιώσιμο των πάγων, οι σεισμοί, ακόμα και αστοχίες τεχνικών κατασκευών, κ.α.

2.2.1.1 Νερό

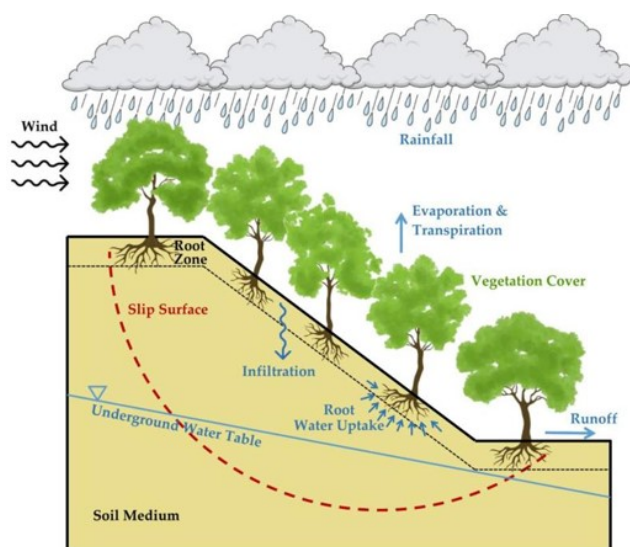
Το νερό αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες επιρροής στην ευστάθεια των πρανών, διότι δημιουργεί συνθήκες μείωσης της διατμητικής αντοχής των υλικών αλλά και αύξησης των διατμητικών τάσεων. Στη φύση, το νερό μπορεί να ρέει είτε επιφανειακά είτε υπόγεια, δίχως να προκαλεί αστάθεια σε ένα πρανές, όμως με την εκδήλωση μιας έντονης βροχόπτωσης, μίας χιονόπτωσης ή την τήξη των πάγων, ενδέχεται να μεταβάλει τα επίπεδα ροής των υπόγειων υδάτων και του υδροφόρου ορίζοντα, προκαλώντας ακόμα έντονη διάβρωση λόγω απορροής στην επιφάνεια του εδάφους.

Αρχικά, με τη διείσδυση υπέργρων ποσοτήτων νερού στο έδαφος, αυξάνεται το βάρος του πρανούς, με συνέπεια να αυξάνονται και οι δυνάμεις βαρύτητας, συνεπώς αυξάνονται οι διατμητικές τάσεις. Το νερό που εισέρχεται στο έδαφος αυξάνει τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, το οποίο αρχικά αυξάνει την πίεση των πόρων και συγχρόνως μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διατμητική αντοχή (Tsarapas, 2001).

Σύμφωνα με τα φαινόμενα που προαναφέρθηκαν, προκαλούνται διαβρώσεις στην επιφάνεια του εδάφους δημιουργώντας τη δυσμενή συνθήκη της απορροής. Η φυσική ροή του νερού θέτει επιφανειακά υλικά του εδάφους σε κίνηση προκαλώντας απορροή, κατά την οποία δημιουργείται επιπλέον διάβρωση της επιφάνειας του εδάφους, μειώνοντας την διατμητική αντοχή του υλικού. Επιπρόσθετα, ενδέχεται να μεταβληθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (ύψος, κλίση) του πρανούς, καθώς ο συνδυασμός φερτών υλικών και νερού, που βρίσκονται σε κίνηση, απομακρύνουν στρώματα εδάφους, πετρώματα κ.α. συμπαρασύροντάς τα όλα μαζί σε κοίτες. Ενδεχομένως, πολλές φορές να προκληθούν και κατολισθήσεις κατά την κίνηση των φερτών υλικών.

Όσον αφορά το νερό, τα προαναφερθέντα συμβάλλουν αρνητικά στην ευστάθεια ενός πρανούς και δημιουργούνται συνθήκες κατά τις οποίες τα πρανή εμφανίζουν αστοχίες. Σημαντικό ρόλο στην αλληλεπίδραση νερού - εδαφικού υλικού, έχει το υλικό από το οποίο αποτελείται ένα πρανές. Για παράδειγμα, τα αργιλικά εδάφη έχουν πολύ μικρή διηθητικότητα και συνήθως υψηλό υδροφόρο ορίζοντα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν αστάθειες, ενώ τα αμμώδη εδάφη παρουσιάζουν υψηλή διηθητικότητα και το νερό ρέει με ευκολία στο εσωτερικό τους.

Η απορροή σχετίζεται άμεσα με την πιθανή διάβρωση της επιφάνειας του εδάφους, ενώ ακόμα, η διήθηση επηρεάζεται από το ύψος της στάθμης και του σχήματος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, επιδρώντας στην ευστάθεια του πρανούς. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στην Εικόνα 2.5, όπου απεικονίζεται ένα εδαφικό πρανές που υπόκειται σε βροχόπτωση. Απεικονίζονται ακόμα, η κλίση του πρανούς, η φυτοκάλυψη και οι ιδιότητες του εδάφους, τα οποία καθορίζουν την αναλογία της διαδικασίας της εξατμισοδιαπνοής (Psarropoulos et al., 2022).



Εικόνα 2.5: Πιθανές επιπτώσεις των καιρικών συνθηκών στη διάβρωση και τη σταθερότητα ενός εδαφικού πρανούς (Psarropoulos et al., 2022).

2.2.1.2 Σεισμός

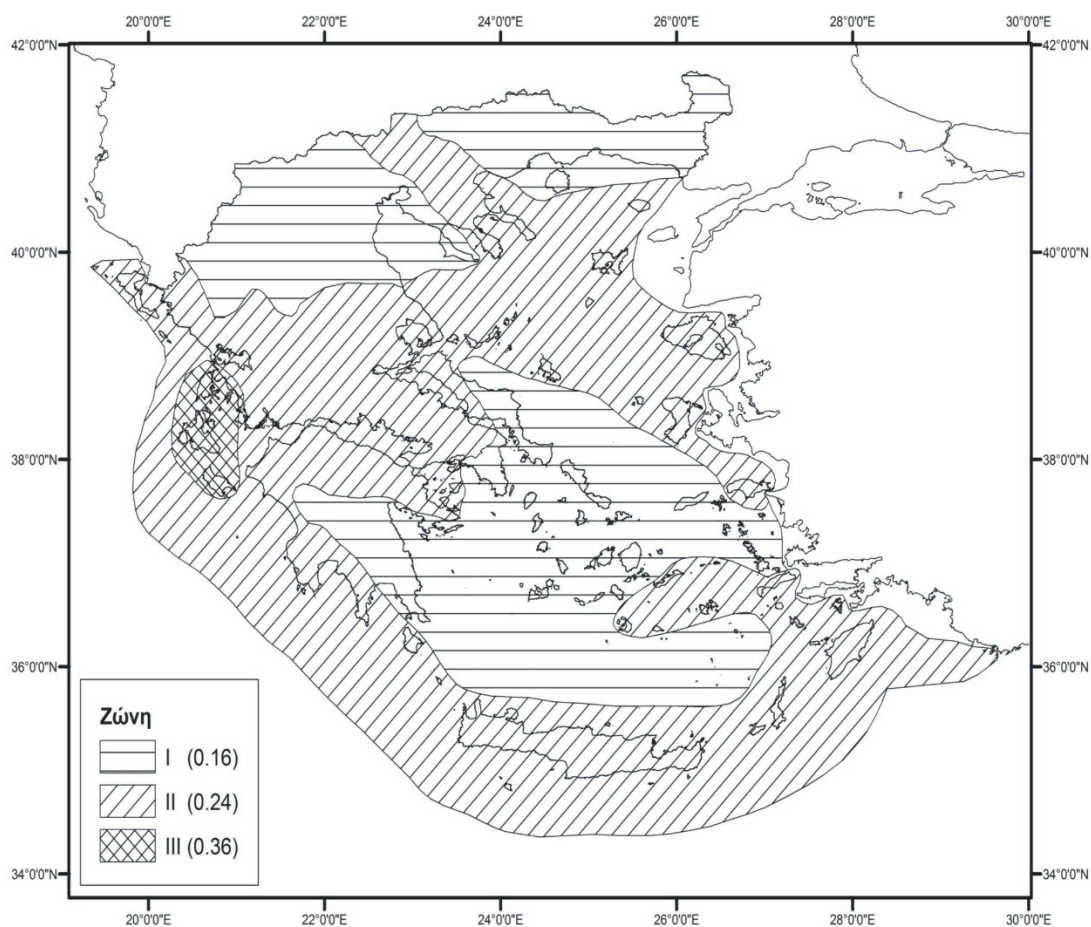
Οι σεισμικές φορτίσεις μπορεί να επιφέρουν παραμορφώσεις και μετατοπίσεις σε τεχνητά και φυσικά πρανή, αλλά το μέγεθος τους εξαρτάται από έναν συνδυασμό γεωλογικών παραγόντων που επικρατούν στο πρανές, όπως τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού από το οποίο αποτελείται, τη γεωμετρία του κ.α. (Matasovic, 1991). Συνήθως, μετά από την επίδραση ενός σεισμού σε ένα πρανές, παρουσιάζονται φαινόμενα ρηγματώσεων και θραύσεων, τα οποία δημιουργούνται από τις αναπτυσσόμενες τάσεις σεισμικών δονήσεων, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι διατμητικές τάσεις που επιδρούν στο εσωτερικό ενός πρανού επηρεάζοντας την ευστάθεια του, προκαλώντας αστοχίες.

Οι αστοχίες των πρανών λόγω σεισμικών διεγέρσεων, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες σύμφωνα με τον Krammer (1996). Στα πρανή όπου η διατμητική αντοχή τους δεν επηρεάζεται από τις σεισμικές φορτίσεις και σε αυτά που προκύπτει μείωση της διατμητικής αντοχής. Οι κραδασμοί που προκαλούνται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, μειώνουν τη διατμητική αντοχή των υλικών και διαταράσσεται η ισορροπία τους, λόγω της δημιουργίας αδρανειακών δυνάμεων, αυτό μπορεί να προκαλέσει ρευστοποίηση του εδάφους (Εικόνα 2.6), συνήθως όταν αποτελείται από κορεσμένα υλικά (Παπαζάχος, 1989).



Εικόνα 2.6: Ρευστοποίηση του εδάφους στο δυτικό Κολοράντο κοντά στη πόλη Collbran (Geoengineer.org, Wark, 2014).

Η ένταση των σεισμών χαρακτηρίζεται από διάφορες παραμέτρους, μία από τις βασικές είναι η εδαφική επιτάχυνση που χρησιμοποιείται στον αντισεισμικό σχεδιασμό διάφορων κατασκευών και τεχνικών έργων. Στην Ελλάδα υπάρχουν τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας, όπου η κάθε μία αντιστοιχεί και σε μία επιτάχυνση. Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται ο χάρτης επικινδυνότητας της Ελλάδας, όπου η ζώνη I με επιτάχυνση σχεδιασμού 0.16 g, χαρακτηρίζεται ως χαμηλής έντασης, η ζώνη II με επιτάχυνση σχεδιασμού 0.24 g, χαρακτηρίζεται ως μεσαίας έντασης και τέλος η ζώνη III με επιτάχυνση σχεδιασμού 0.36g, χαρακτηρίζεται ως υψηλής έντασης (Φ.Ε.Κ. Β' 1154/2003).



Εικόνα 2.7: Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδος (Φ.Ε.Κ. Β' 1154/2003).

2.2.1.3 Θερμοκρασία

Οι θερμοκρασιακές μεταβολές (κρύο - ζέστη) προκαλούν θρυμματισμό των πετρωμάτων λόγω της συστολής - διαστολής και της επαναλαμβανόμενης αυτής διεργασίας, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου η διατμητική αντοχή του υλικού ενός εδαφικού πρανούς. Συνήθως, η διάβρωση που προκαλείται από το προαναφερθέν φαινόμενο είναι επιφανειακή (U.S Army Corps of Engineers, 1994). Λόγω πτώσης της θερμοκρασίας τα υπόγεια ύδατα συχνά παγώνουν στο εσωτερικό των ασυνεχειών (ρωγμές) των πετρωμάτων του εδάφους, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο όγκος του νερού και να προκύπτει η θραύση τους.

2.2.2 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών

Οι μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας, έχουν ως στόχο την αξιολόγηση της ασφάλειας ενός πρανούς ως προς την ισορροπία του. Ανάλογα τα αποτελέσματα της ανάλυσης, κρίνεται εάν είναι απαραίτητο να ληφθούν προληπτικά ή διορθωτικά μέτρα. Η επιλογή μεθόδου

ανάλυσης εξαρτάται τόσο από τις συνθήκες που επικρατούν, όσο και από τον τρόπο ολίσθησης του πρανούς.

Οι βασικές μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών είναι οι εξής:

1. Μέθοδος οριακής ισορροπίας (LEM – Limit Equilibrium Method)
2. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM – Finite Element Method)

Εκτενέστερη ανάλυση των δύο αυτών μεθόδων γίνεται στο κεφάλαιο 4 και κεφάλαιο 5, αντίστοιχα.

Κατά την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων, τελικώς υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος χαρακτηρίζει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το υπό μελέτη πρανές και εάν κρίνεται ασφαλές.

Ως συντελεστή ασφαλείας (SF), ορίζεται το πηλίκο της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού, προς τη συνολική διατμητική δύναμη που ασκείται στο εδαφικό υλικό:

$$SF = \frac{\text{Διαθέσιμη διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού}}{\text{Διατμητική δύναμη που ασκείται στο εδαφικό υλικό}} \quad (2.1)$$

Για να κριθεί ασφαλές το πρανές, ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να είναι μεγαλύτερος της μονάδας ($SF > 1.0$). Στην περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με τη μονάδα ($SF = 1.0$), τότε το πρανές βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ευστάθειας και πρόκειται να αστοχήσει. Τέλος, στη περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος του μηδενός ($SF < 1.0$), το πρανές θεωρείται πως ολισθαίνει και παρουσιάζει αστοχία.

Σύμφωνα με το ΦΕΚ 1221/30-11-98, οι αποδεκτές τιμές συντελεστή ασφαλείας για γεωτεχνικά έργα σε πρανή είναι 1.4 ($SF \geq 1.4$) υπό στατικές συνθήκες φόρτισης, 1.3 ($SF \geq 1.3$) για ακραία κατάσταση ανύψωσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και η ζωή του έργου να διαρκέσει 50 χρόνια. Τέλος, σε περίπτωση σεισμού, αποδεκτή τιμή είναι 1.0 ($SF \geq 1.0$). Ωστόσο, άλλες τιμές μπορούν να γίνουν αποδεκτές αναλόγως το αντικείμενο της μελέτης, η οποία θα πρέπει να είναι πλήρως αιτιολογημένη στις ιδιαιτερότητες του έργου, με την πλήρη ευθύνη του μηχανικού. Για βραχύωδη πρανή ισχύουν για τις αντίστοιχες περιπτώσεις, οι ενδεικτικές τιμές συντελεστή ασφαλείας 1.3, 1.2 και 1.0.

2.3 Αστοχία πρανών - κατολισθήσεις

Η αστοχία των πρανών μπορεί να αποδοθεί σε πολλούς παράγοντες, όπως στη φύση του πρανούς, στη συμπεριφορά του υλικού του εδάφους, στα καιρικά φαινόμενα, στην περιορισμένη κάλυψη βλάστησης, στις μεγάλες ποσότητες νερού και στην ανεπαρκή αποστράγγιση που επηρεάζει την σταθερότητα του πρανούς, η οποία οδηγεί σε μαζικές μετακινήσεις που μπορούν να εξελιχθούν σε κατολισθήσεις. Εκτός από αυτό, οι κατασκευές σε λόφους καθώς και η ταχεία αύξηση του πληθυσμού στις αστικές, ιδιαίτερα σε λοφώδεις περιοχές, μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια ενός πρανούς λόγω των διαταραχών στο περιβάλλον (Omar, 2018).

Στη βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί από ερευνητές, πολλοί και διαφορετικοί ορισμοί για να περιγραφεί ο όρος «κατολίσθηση», όμως αυτός που έχει επικρατήσει και

χρησιμοποιείται από την ευρύτερη επιστημονική κοινότητα είναι του Varnes (1978), ο οποίος όρισε την κατολίσθηση ως μία μετακίνηση μαζών, περιλαμβάνοντας κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς που μπορεί να οφείλεται σε ολίσθηση, πτώση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό, καθώς διαχώρισε την καθίζηση και την κατάρρευση από την κατολίσθηση.

Στην Ελλάδα, ο όρος κατολίσθηση χρησιμοποιείται πολλές φορές για να εκφράσει κάθε μορφή αστοχίας ενός φυσικού ή τεχνητού πρανούς, όμως οι όροι «κατολίσθηση» και «αστοχία πρανούς», μπορεί να έχουν κοινό χαρακτήρα, αλλά εμφανίζουν διαφορές μεταξύ τους. Συνεπώς, δημιουργήθηκε η ανάγκη να καταγραφούν στην ελληνική ορολογία της εδαφομηχανικής αυτά τα δύο φαινόμενα, ώστε να παρατεθούν οι διαφορές τους:

- **Κατολίσθηση:** Συνεχής, περιοδική, συνήθως αργή, ολίσθηση μίας διακεκριμένης μάζας κατά μήκος μίας γεωλογικά καθορισμένης επιφάνειας.
- **Αστοχία πρανούς:** Απότομη, συνήθως ταχεία ολίσθηση εδαφικής μάζας, με ακόλουθη έντονη διατάραξη της (Αναγνωστόπουλος, 1988).

2.3.1 Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Σύμφωνα με τον Varnes (1978), η ταξινόμηση των κατολισθήσεων γίνεται βάσει δύο κριτηρίων:

1. **Τύπος μετακίνησης των υλικών**, όπου οι κατολισθήσεις κατηγοριοποιούνται σε πτώσεις, ανατροπές, ολίσθήσεις (περιστροφική, μεταθετική), πλευρικές εξαπλώσεις, ροές, ερπυσμούς και στις σύνθετες, οι οποίες είναι συνδυασμός μετακινήσεων. Στον Πίνακα 2.1 ταξινομούνται οι κατολισθητικές μετακινήσεις.
2. **Είδος του μετακινημένου υλικού**, όπου οι κατολισθητικές κινήσεις εμφανίζονται σε βραχώδεις και εδαφικούς σχηματισμούς:
 - A. **Βραχώδεις σχηματισμοί:** αποτελούνται από βραχώδη πετρώματα, τα οποία είναι σκληρά συνεκτικά υλικά και βρίσκονται στη φυσική τους θέση πριν την έναρξη της μετακίνησής τους.
 - B. **Εδαφικοί σχηματισμοί:** περιλαμβάνουν χαλαρούς, μη στερεοποιημένους ή χαλαρά στερεοποιημένους σχηματισμούς πετρωμάτων, οι οποίοι δημιουργούνται από αποσαθρωμένα πετρώματα, που είτε προϋπάρχουν είτε μεταφέρονται και οι πόροι των σχηματισμών πληρώνονται με νερό ή παραμένουν κενοί. Οι εδαφικοί σχηματισμοί χωρίζονται σε χονδρόκοκκους (κορήματα) και λεπτόκοκκους (γαίες).
 - i. **Κορήματα:** είναι εδαφικά υλικά που το 20 – 80% της μάζας τους αποτελείται από χονδρόκοκκα υλικά, των οποίων το μέγεθος είναι μεγαλύτερο από 2 χιλιοστά (χαλίκια, κροκάλες, κ.α).
 - ii. **Γαίες:** είναι εδαφικά υλικά που το 80% της μάζας τους αποτελείται από λεπτόκοκκα υλικά, των οποίων το μέγεθος είναι μικρότερο από 2 χιλιοστά (άμμος, άργιλος, ιλύς, κ.α.) (Αγγέλου & Γεωργίου, 2019).

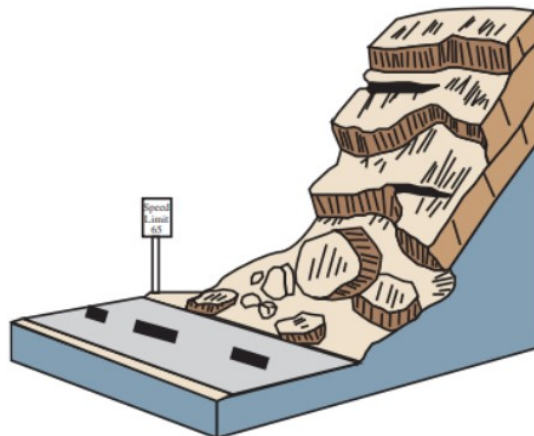
Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση τον τύπο μετακίνησης (Varnes, 1978).

Τύπος μετακινήσεων		Τύπος υλικού	
		Βραχώδεις υπέδαφος	Εδάφη
			Χονδρόκοκκα Λεπτόκοκκα
Καταπτώσεις		Βράχων	Κορημάτων Γαιών
Ανατροπές		Βράχων	Κορημάτων Γαιών
Ολισθήσεις	Περιστροφικές	Βράχων	Κορημάτων Γαιών
	Μεταθετικές	Βράχων	Κορημάτων Γαιών
Πλευρικές εξαπλώσεις		Βράχων	Κορημάτων Γαιών
Ροές		Ροές βράχων	Ροές κορημάτων Ροές γαιών
		Ερπυσμός βράχων	Ερπυσμός κορημάτων Ερπυσμός γαιών
Σύνθετες μετακινήσεις		Συνδυασμός δύο ή περισσότερων μετακινήσεων	

Οι κατολισθήσεις με βάση τον τύπο μετακίνησής τους, καταγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω:

Καταπτώσεις (falls):

Οι καταπτώσεις είναι απότομες αποκολλήσεις μαζών, οποιουδήποτε μεγέθους, που συνήθως εμφανίζονται σε απότομα πρανή ή γκρεμούς, πολύ συνεκτικού εδάφους ή βράχων (U.S Geological Survey, 2004).



Εικόνα 2.8: Κατάπτωση (U.S Geological Survey, 2004).

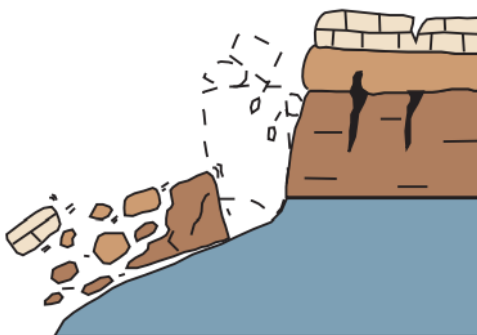
Κατά το φαινόμενο αυτό, η απόσπαση του εδάφους γίνεται κατά μήκος μιας ασυνεχούς επιφάνειας, στην οποία η διατμητική μετατόπιση είναι μικρή έως και μηδενική και η πτώση γίνεται κυρίως μέσω της βαρύτητας, των καιρικών συνθηκών και του νερού που υπάρχει στο εσωτερικό του εδάφους (Αλαμάνης, 2017). Οι πτώσεις πραγματοποιούνται με ελεύθερη πτώση, πηδώντας ή κυλώντας. Οι μετακινήσεις είναι πολύ γρήγορες και μπορεί να μην έχουν προηγηθεί μικρότερες μετακινήσεις που να οδηγούν σε διαχωρισμό της μάζας εκτροπής από την κύρια μάζα (Varnes, 1978).



Εικόνα 2.9: Κατάπτωση βράχων στην ακτή Jurassic Coast, του Dorset (Finnbarr Webster & Getty Images, 2020).

Ανατροπές (topples):

Οι ανατροπές αναγνωρίστηκαν σχετικά πρόσφατα σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη κατολισθήσεων και αποτελούν ξεχωριστό τύπο κίνησης, καθώς πρόκειται για κλίση χωρίς κατάρρευση. Αυτό το είδος κίνησης, αποτελείται από την προς τα εμπρός περιστροφή της αποσπώμενης μάζας από ένα κυρίως βραχώδες πρηνές (Varnes, 1978).



Εικόνα 2.10: Ανατροπή (U.S Geological Survey, 2004).

Η περιστροφική κίνηση της εδαφικής μάζας πραγματοποιείται γύρω από έναν άξονα περιστροφής, ο οποίος βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους του τεμαχίου που αποκολλάται (Αλαμάνης, 2017).



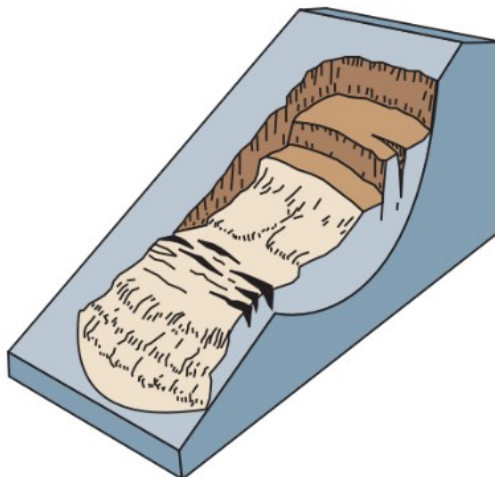
Εικόνα 2.11: Ανατροπή στην περιοχή του εθνικού πάρκου Jasper, στο Καναδά (ResearchGate, Bobrowsky, 2018).

Ολισθήσεις (slides):

Στις ολισθήσεις, η κίνηση αποτελείται από διατμητική παραμόρφωση και μετατόπιση κατά μήκος μίας ή περισσότερων επιφανειών που είναι ορατές ή μπορούν να προκύψουν. Η μετατοπισμένη μάζα μπορεί να ολισθαίνει πέρα από την αρχική επιφάνεια αστοχίας, δηλαδή την αρχική επιφάνεια του εδάφους, η οποία έγινε επιφάνεια διαχωρισμού. Η φύση της διατμητικής επιφάνειας καθορίζει εάν η ολίσθηση θα είναι περιστροφική ή μεταθετική (Coates, 1977).

Περιστροφικές ολισθήσεις (rotational slides):

Στις περιστροφικές ολισθήσεις, ανάντη της επιφάνεια αστοχίας αποκτάται ένα κυρτό σχήμα μεγάλου βάθους και η κίνηση της ολίσθησης είναι περιστροφική γύρω από έναν άξονα ο οποίος είναι παράλληλος προς την επιφάνεια του εδάφους και εγκάρσιος στην ολίσθηση (U.S Geological Survey, 2004).



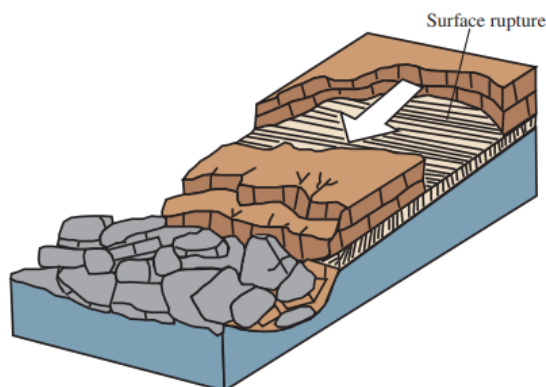
Εικόνα 2.12: Περιστροφική ολίσθηση (U.S Geological Survey, 2004).



Εικόνα 2.13: Περιστροφική ολίσθηση στη βορειοδυτική Washington (U.S Geological Survey, Godt, 2014).

Μεταθετικές ολισθήσεις (translational slides):

Στις μεταθετικές ολισθήσεις, η μάζα της κατολίσθησης κινείται κατά μήκος ενός επιπέδου και κατάντη της, δημιουργείται μια ελαφριά κοίλη με μικρό βάθος. Η ολισθαίνουσα μάζα κινείται προς τα κάτω ως ένα τεμάχιο ή ως πολύ λίγα, άρρηκτα συνδεδεμένα τεμάχια (U.S Geological Survey, 2004).



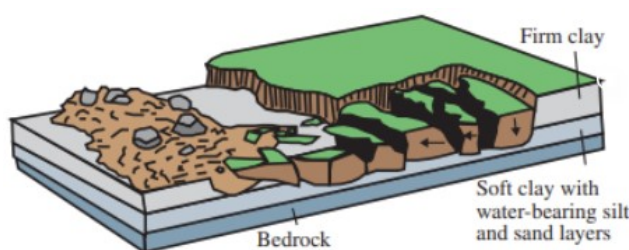
Εικόνα 2.14: Μεταθετική ολίσθηση (U.S Geological Survey, 2004).



Εικόνα 2.15: Μεταθετική ολίσθηση στο Port Ganny, στη Βόρεια Ιρλανδία

Πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads):

Οι πλευρικές εξαπλώσεις, συνήθως εμφανίζονται σε ήπιες πλαγιές ή σε επίπεδο έδαφος και ο βασικός τρόπος κίνησης τους οφείλεται σε διατμητικά και εφελκυστικά ρήγματα. Ο μηχανισμός αστοχίας τους μπορεί να περιλαμβάνει στοιχεία κατά κύριο λόγο μεταθετικής ολίσθησης, λιγότερο περιστροφικής αλλά και ροής, συνεπώς οι κατολίσθησεις πλευρικής εξάπλωσης μπορούν να θεωρηθούν και σύνθετες (Varnes, 1978).



Εικόνα 2.16: Πλευρική εξάπλωση (U.S Geological Survey, 2004).

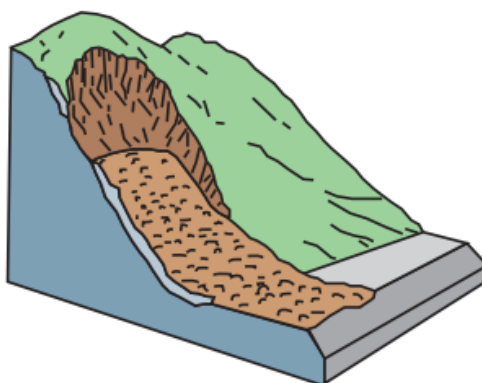
Οι μετακινήσεις με πλευρική εξάπλωση προκαλούνται από ρευστοποίηση σε κορεσμένα χαλαρά εδαφικά υλικά, σε ρηχά πρανή, ιδίως σε ευαίσθητη ιλύ, άμμο και άργιλο που χάνουν το μεγαλύτερο μέρος ή το σύνολο της διατμητικής τους αντοχής και η κατάστασή τους μετατρέπεται από στερεή σε υγροποιημένη. Η αστοχία τους είναι ξαφνική, αρχίζοντας τοπικά σε μια περιοχή, ενώ μετέπειτα εξαπλώνεται γρήγορα σε τεμάχια (U.S Geological Survey, 2004).



Εικόνα 2.17: Πλευρική εξάπλωση σε εξαιρετικά ευαίσθητη άργιλο (Ministère des Transports du Québec, 2020).

Ροές (flows):

Οι ροές είναι συνεχείς κινήσεις εδαφικών υλικών, που έχουν υποστεί ρευστοποίηση, πάνω από μία άλλη σταθερής επιφάνειας μάζα, δηλαδή η ταχύτητα μετακίνησης της εκτοπιζόμενης μάζας μοιάζει με εκείνη ενός ιξώδους υγρού (Lee & Abramson, 2002).



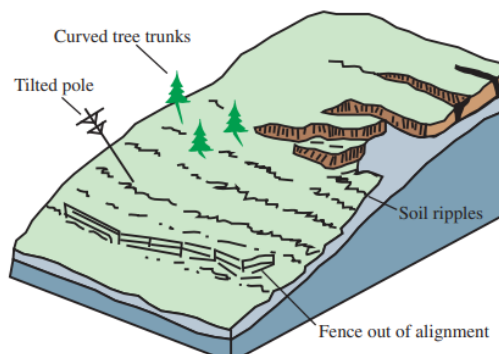
Εικόνα 2.18: Ροή (U.S Geological Survey, 2004).

Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται η ροή του εδάφους, είτε γαιών είτε πλευρικών κορημάτων, διαφέρουν και εξαρτώνται από την περιεκτικότητα των εδαφικών σχηματισμών σε νερό, ακόμα, η ταχύτητα τους δεν προσδιορίζεται επακριβώς και κυμαίνεται από αργή έως πολύ γρήγορη (Αλαμάνης, 2017).



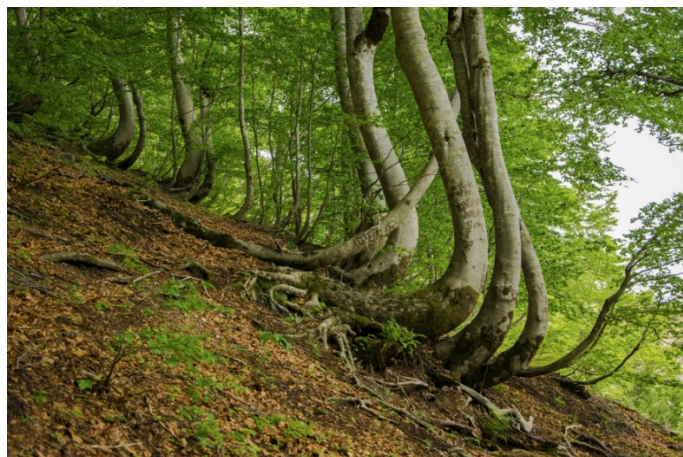
Εικόνα 2.19: Ροή εδαφικών υλικών που έθαψε ένα χωριό στο Guinsaungon, στο Νότιο Λέιτε των Φιλιππίνων (University of Tokyo Geotechnical Team, 2006).

Ερπυσμός (creep):



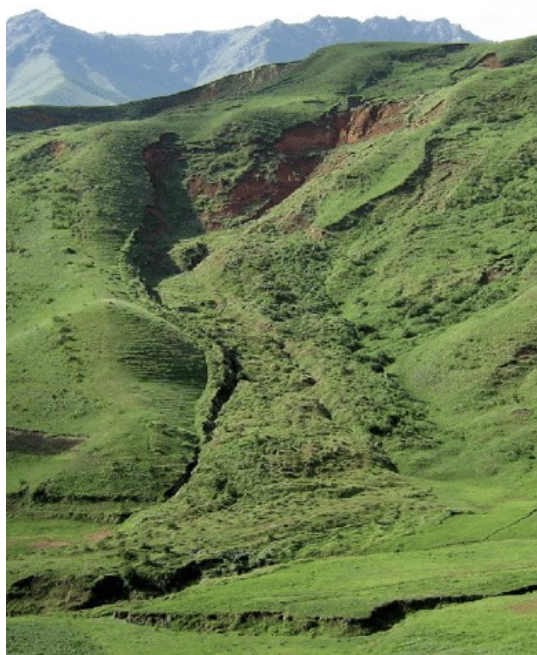
Εικόνα 2.20: Ερπυσμός (U.S Geological Survey, 2004).

Ο ερπυσμός είναι ανεπαίσθητα αργή, σταθερή, καθοδική κίνηση βράχων ή εδαφικών σχηματισμών που σχηματίζουν κλίση, η οποία συνήθως δεν είναι ευδιάκριτη και παρατηρείται από αντικείμενα που αποκτούν καμπύλη μορφή, όπως κορμούς δέντρων (Εικόνα 2.21), λυγισμένους φράχτες, ακόμα και τοίχους αντιστήριξης.



Εικόνα 2.21: Παραμόρφωση κορμών δέντρων από ερπυστική μετακίνηση, σε δάσος της Αλβανίας (Alikaj2582 Getty Images & Stockphoto, 2023).

Η μετακίνηση προκαλείται από διατμητική τάση, που επαρκεί για να προκαλέσει μόνιμη παραμόρφωση, αλλά μικρή για να προκύψει διατμητική αστοχία. Υπάρχουν γενικά τρεις τύποι ερπυσμού, πρώτον ο εποχιακός, όπου η μετακίνηση επηρεάζεται από την υγρασία που υπάρχει στο έδαφος ανάλογα την εποχή, δεύτερον ο συνεχής ερπυσμός, όπου η διατμητική τάση υπερβαίνει συνεχώς τη διατμητική αντοχή του υλικού και τέλος ο σταδιακός, όπου τα πρηνή φθάνουν το σημείο αστοχίας όπως και οι υπόλοιποι τύποι κατολισθητικών κινήσεων (U.S Geological Survey, 2004).



Εικόνα 2.22: Ερπυσμός σε πλαγιά στο Osh, Kyrgyzstan (ResearchGate, Ferdowsi, 2018).

Σύνθετες μετακινήσεις (complex movements):

Οι σύνθετες μετακινήσεις περιλαμβάνουν συνδυασμό δύο ή περισσότερων τύπων κίνησης, από αυτούς που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή να υπάρχουν οι συνθήκες ώστε να μπορεί ένας τύπος κίνησης να μετατραπεί σε κάποιον άλλον ή ταυτόχρονα να δρουν δύο ή και παραπάνω τύποι σε ένα φυσικό πρηνές.

2.3.2 Παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων

Ό,τι αναφέρεται στην υποενότητα 2.2.1 (Παράγοντες επιρροής ευστάθειας πρηνών), ισχύει για τις κατολισθήσεις. Παρουσιάζονται ονομαστικά παράγοντες που επηρεάζουν στην εμφάνιση κατολισθήσεων στο Πίνακα 2.2 σύμφωνα με το WP/WLI 1994 (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007):

Πίνακας 2.2: Παράγοντες εμφάνισης κατολισθήσεων.

Εδαφικές συνθήκες	
1	Πλαστικό, χαμηλής αντοχής υλικό
2	Ευαίσθητο υλικό
3	Υλικό επιρρεπές σε θραύση
4	Αποσαθρωμένο υλικό
5	Διατμημένο υλικό
6	Ρωγματωμένο ή διακλασμένο υλικό
7	Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις)
8	Βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (ρήγματα, επιφάνειες επαφής, ασυμφωνίες)
9	Διαφοροποιήσεις στην υδροπερατότητα
10	Διαφοροποιήσεις στην δυσκαμψία
Γεωμορφολογικές διεργασίες	
11	Τεκτονική ανύψωση
12	Ανύψωση λόγω ηφαιστείων
13	Επίδραση παγετώνων
14	Ποτάμια διάβρωση της βάσης του πρानού
15	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρानού
16	Διάβρωση της βάσης του πρानού από παγετώνα
17	Διάβρωση των πλευρών του πρानού
18	Εσωτερική διάβρωση
19	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέψη του πρानού
20	Απομάκρυνση φυτοκάλυψης από πυρκαγιά, διάβρωση κ.α.
Φυσικές διεργασίες	
21	Έντονη μικρής διάρκειας βροχόπτωση
22	Γρήγορο λιώσιμο χιονιού
23	Παρατεταμένη υψηλή βροχόπτωση
24	Γρήγορη πτώση στάθμης νερού μετά από πλημμύρες, παλίρροιες ή διάρρηξη φυσικών φραγμάτων
25	Σεισμοί
26	Εκρήξεις ηφαιστείων
27	Διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστείων
28	Λιώσιμο παγωμένου εδάφους
29	Αποσάθρωση λόγω παγετού
30	Αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών
Ανθρωπογενείς διεργασίες	
31	Εσκαφές στον πόδα του πρानού
32	Φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω από την στέψη του πρανού
33	Υποβιβασμός της στάθμης σε ταμιευτήρες
34	Άρδευση
35	Κακή συντήρηση αποστραγγιστικών έργων
36	Διαρροή νερών από τεχνικά έργα (δίκτυα, δεξαμενές, κ.α.)
37	Αποψίλωση
38	Λατομεία και μεταλλεία
39	Δημιουργία χωματερών
40	Τεχνητές δονήσεις (κυκλοφορία οχημάτων, λειτουργία μηχανών, κ.α.)

2.3.3 Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων

Τα μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων έχουν ως στόχο την σταθεροποίηση της ολισθαίνουσας μάζας, τα οποία χωρίζονται σε μέτρα ελέγχου και μέτρα συγκράτησης. Τα μέτρα ελέγχου περιλαμβάνουν, έργα επιφανειακής, ρηχής ή βαθιάς αποστράγγισης, εκσκαφές, αντίβαρα επιχωμάτων στον πόδα και έργα σταθεροποίησης ποταμίων. Για την αντιμετώπιση των επιφανειακών υδάτων, ώστε να μην διηθηθούν στο έδαφος και προκληθούν δυσμενείς καταστάσεις για το υπέδαφος, μπορούν να κατασκευαστούν έργα αποστράγγισης (υπόγειοι οχετοί, στραγγιστήρια, κανάλια απομάκρυνσης, κ.α.) για την γρήγορη απομάκρυνση των υδάτων. Επιπρόσθετα έργα γίνονται στα σημεία συγκέντρωσης νερού τα οποία στεγανοποιούνται, ενώ ακόμα, γίνεται σφράγιση των ρωγμών.

Εκτός από την αντιμετώπιση των επιφανειακών υδάτων, έργα αποστράγγισης μπορούν να κατασκευαστούν και για την αντιμετώπιση υπόγειων υδάτων σε βάθος, ώστε να επιφέρουν ελάφρυνση σε επιβαρυμένα πρανή. Μέτρα για την ελάττωση φορτίων από ζώνες κατολίσθησης, είναι τα έργα εκσκαφής, τα οποία μειώνουν τις δυνάμεις ολίσθησης. Τα συγκεκριμένα έργα, πρέπει να γίνονται υπό μελέτες ανάλυσης ευστάθειας, έτσι ώστε να καθορίζεται ο όγκος που πρέπει να αφαιρείται από το κύριο τμήμα του εδάφους καθώς και να προστατεύεται από φαινόμενα διάβρωσης.

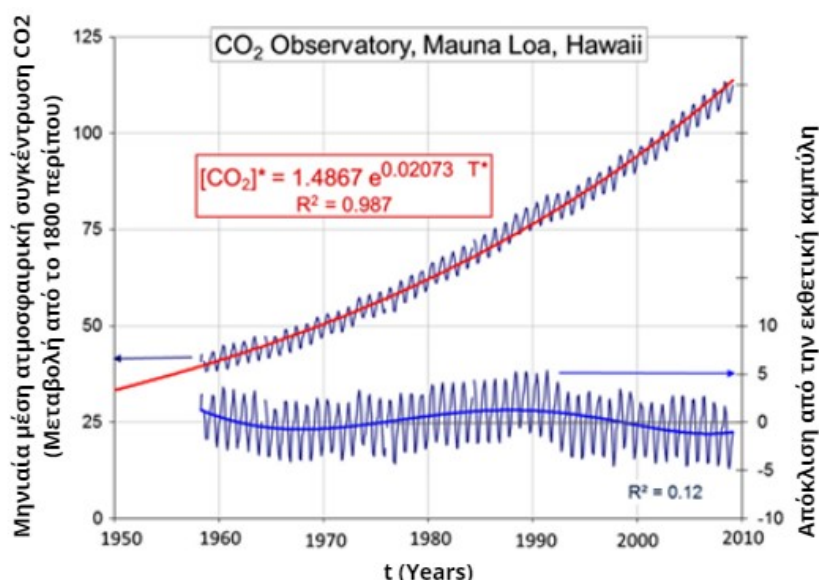
Στα πρανή πολλές φορές προκαλούνται κατολισθήσεις στον πόδα τους, που συνήθως είναι το πιο ευάλωτο σημείο τους. Για την αντιμετώπιση τους και την σταθεροποίηση των πρανών κατασκευάζονται επιχώματα στον πόδα τους, τα οποία λειτουργούν ως αντίβαρα και εξισορροπούν τα φορτία του πρανούς. Επίσης, σε αυτά τα γεωτεχνικά έργα, πρέπει να πραγματοποιηθούν μελέτες ανάλυσης ευστάθειας για τον πόδα του πρανούς, διότι συνήθως είναι το πιο κορεσμένο μέρος τους, ώστε να αποφευχθούν ή να μην δημιουργηθούν προβλήματα ευστάθειας που δεν προϋπήρχαν. Τελευταία γεωτεχνική κατασκευή για την αντιμετώπιση κατολισθήσεων, είναι τα έργα σταθεροποίησης στις όχθες των ποταμών, καθώς παρουσιάζουν στα συγκεκριμένα μέρη αστάθεια τα γύρω πρανή, λόγω των υδάτων των ποταμών.

Τα μέτρα συγκράτησης περιλαμβάνουν, κατασκευές τοίχων αντιστήριξης, πασσάλους, φρεατοπασσάλους και αγκυρώσεις. Οι τοίχοι αντιστήριξης μεμονωμένα χρησιμοποιούνται σε ελάχιστες περιπτώσεις, σε ελαφριές κατολισθήσεις, συνήθως χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις αγκυρώσεις. Τα τεχνικά έργα αγκυρώσεων, αυξάνουν την αντοχή κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, οι οποίες συνήθως τοποθετούνται στη περιοχή του πόδα του πρανούς και μεταβιβάζουν στο έδαφος τις δυνάμεις αγκύρωσης. Τέλος, οι πάσσαλοι και οι φρεατοπάσσαλοι χρησιμοποιούνται για να αναχαιτίσουν κατολισθήσεις ενώ ακόμα, χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τις δυνάμεις που αντιστέκονται στην ολίσθηση (Αναγνωστόπουλος, 1988).

2.4 Κλιματική αλλαγή – κρίση

Τα αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου και η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, θεωρούνται οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν το κλίμα της γης και τα καιρικά φαινόμενα. Παρατηρείται έντονη αλλαγή του

κλίματος της γης τις τελευταίες δεκαετίες λόγω ανθρωπίνων παρεμβάσεων (καύση ορυκτών καυσίμων, βιομηχανικές διεργασίες, αποψιλώσεις δασικών εκτάσεων, κ.α.) στο περιβάλλον που αυξάνουν τις συγκεντρώσεις και το ρυθμό μεταβολής των αερίων στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 2.23), προκαλώντας έντονα καιρικά φαινόμενα, όπως την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη με αποτέλεσμα να προκαλούνται μακροβιότερα διαστήματα καύσωνα (Green, 2011).



Εικόνα 2.23: Μεταβολή της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του CO_2 σε βάθος χρόνων στο παρατηρητήριο MaunaLoa (Green, 2011).

Η υπερθέρμανση του πλανήτη έχει άμεση επίδραση στο κλίμα της γης, τις μετεωρολογικές συνθήκες και στην αλλαγή του καιρού. Ένα από τα κυριότερα προβλήματα που δημιουργείται από την αύξηση της θερμοκρασίας της γης, είναι ότι αυξάνονται τα ποσοστά εξάτμισης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες πρόκλησης έντονων καιρικών φαινομένων. Απόρροια αυτού, είναι οι συχνότερες και μεγαλύτερης διάρκειας ξηρασίες, καύσωνες, καταιγίδες και πλημμύρες, με συνέπεια να διαβρώνεται η επιφάνεια του εδάφους με αντίκτυπο στη βλάστηση. Επιπλέον, η κατανομή των πάγων, του χιονιού, του νερού και της βλάστησης αναμένεται να μεταβληθούν τα επόμενα χρόνια, με αποτέλεσμα να υπάρξουν αλλαγές στο περιβάλλον, οι οποίες δεν θα επηρεάσουν μόνο το φυσικό περιβάλλον αλλά και την ανθρώπινη ζωή. Υπό αυτές τις συνθήκες, αυξάνονται οι φυσικοί κίνδυνοι, με ένα από τα αποτελέσματα αυτού να είναι η αρνητική επίδραση στην ευστάθεια των φυσικών πρανών (Psarropoulos et al., 2022).

2.4.1 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στα φυσικά πρανή

Τα φυσικά πρανή έχουν συνήθως συντελεστή ασφαλείας οριακά άνω της μονάδας, υποδεικνύοντας τις σοβαρές συνθήκες που επικρατούσαν ήδη στο παρελθόν. Σύμφωνα με την αύξηση της έντασης των καιρικών φαινομένων που παρατηρείται σήμερα, τα φυσικά πρανή βρίσκονται συχνότερα σε δυσχερέστερες καταστάσεις, ώστε να επηρεάζεται η ισορροπία τους. Επιπλέον, τα εδάφη που από τη φύση τους είναι ευαίσθητα, μπορούν με

ευκολία να κατολισθήσουν, λόγω των κλιματικών αλλαγών. Η υπερθέρμανση του πλανήτη για μεγάλες χρονικές περιόδους προκαλεί αλλαγές στη συμπεριφορά πολλών παραγόντων, οι οποίοι ευθύνονται για την διατήρηση της ευστάθειας των φυσικών πρηνών, όπως του νερού, της βλάστησης και του αέρα, τα οποία αναλύονται παρακάτω:

2.4.1.1 Νερό

Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, επηρεάζει τα υπόγεια ύδατα, καθώς η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους εξαρτάται από το ιξώδες του ρευστού που ρέει στο εσωτερικό του και η ταχύτητα διήθησης αυξάνεται με αποτέλεσμα να διεισδύουν μεγαλύτερες ποσότητες νερού. Τα μόρια του νερού υπόκεινται σε θερμική διαστολή, δηλαδή αυξάνεται ο όγκος του νερού, προκαλώντας αύξηση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η σταθερότητα των εδαφικών πρηνών. Οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν αποξήρανση και μείωση της συνοχής του εδάφους, καθώς τα ποσοστά εξάτμισης αυξάνονται, συνεπώς αυξάνεται η διηθητική ικανότητα των υλικών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα μεγαλύτερα ποσοστά εξάτμισης αυξάνουν τη σταθερότητα των πρηνών, διότι μειώνεται το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι διατμητικές τάσεις που δρουν στο εσωτερικό του. Παράλληλα, τα πρηνή γίνονται πολύ ευαίσθητα απέναντι στις βροχοπτώσεις, καθώς η διηθητικότητα αυξάνεται και η συνοχή των υλικών μειώνεται.

Η υπερθέρμανση της γης μειώνει τη συχνότητα και τη διάρκεια με την οποία εκδηλώνονται οι βροχοπτώσεις, αλλά αυξάνει τις καταιγίδες και τις έντονες βροχοπτώσεις σύντομης διάρκειας (Kristo et al., 2017). Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για την αλλαγή συμπεριφοράς των βροχοπτώσεων και του νερού στο έδαφος, υπό την κλιματική αλλαγή, δημιουργούνται συνθήκες που επηρεάζουν την ισορροπία των εδαφικών πρηνών. Μετά από μεγάλες περιόδους ξηρασίας, εάν εκδηλωθούν έντονες βροχοπτώσεις, αυξάνονται οι πιθανότητες διάβρωσης της επιφάνειας του εδάφους, αφαιρώντας την προϋπάρχουσα βλάστηση και αυξάνοντας τη διήθηση της απορροής. Επιπλέον, παρατηρείται γρήγορη μεταβολή του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα ανάλογα με τις περιόδους έντονων ξηρασιών ή βροχοπτώσεων. Αυτές οι διακυμάνσεις δυνητικά οδηγούν στην βύθιση των πρηνών ή στη χαλάρωση κάποιου εδαφικού στρώματος στο εσωτερικό τους, δημιουργώντας ρευστοποίηση.

2.4.1.2 Βλάστηση

Η βλάστηση έχει ευεργετικό χαρακτήρα στη διατήρηση της ισορροπίας των φυσικών πρηνών, αλλά οι υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν συνθήκες ξηρασίας που μπορούν να αφανίσουν την βλάστηση. Αρχικά, οι ρίζες των φυτών και των δέντρων ενισχύουν σημαντικά τα επιφανειακά εδάφη, καθώς οι ρίζες απορροφούν νερό, το οποίο μπορεί να μην είναι ωφέλιμο για το έδαφος ενώ ακόμα, τα επιφανειακά εδάφη γίνονται ανθεκτικότερα στη διάβρωση, λόγω των ριζών. Επίσης, το φύλλωμα των φυτών αναχαιτίζει τη βροχή με αποτέλεσμα να αυξάνει το ρυθμό απορροής του νερού και εν συνεχεία μειώνει τη διήθηση. Συνεπώς, σε περίπτωση απώλειας της βλάστησης από την επιφάνεια του εδάφους η

διάβρωσή του θα ήταν εντονότερη και η διήθηση θα αυξανόταν, με αποτέλεσμα να αυξηθεί το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Τέλος, σε απότομες πλαγιές που έχουν αυξημένες πιθανότητες κατολίσθησης, τα δέντρα λειτουργούν ενισχυτικά, συμβάλλοντας στο να κρατηθούν σταθερές.

2.4.1.3 Αέρας

Ο αέρας επηρεάζει έμμεσα το έδαφος, μέσω της βλάστησης. Αρχικά, όταν η χαμηλή βλάστηση θανατώνεται τα μεγάλα δέντρα σε μία εδαφική περιοχή μένουν απροστάτευτα και βρίσκονται εκτεθειμένα στον άνεμο μεταφέροντας μεγαλύτερες δυνάμεις του ανέμου στο έδαφος, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η ευστάθεια των πρανών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συνδυασμός δυνατών ανέμων και των παρατεταμένων διαστημάτων ξηρασίας της βλάστησης και του εδάφους, αυξάνουν την επικινδυνότητα να εκδηλωθούν μεγάλες πυρκαγιές. Στην περίπτωση εκδήλωσης καταιγίδων και ισχυρών ανέμων που πνέουν κάθετα προς το έδαφος, δημιουργούνται πολύ μεγάλα πλευρικά φορτία στα δέντρα, τα οποία μεταβιβάζονται στο έδαφος, προκαλώντας αποσταθεροποίηση στα πρανή.

Διογκωμένη Πολυστερίνη

3.1 Περιγραφή της διογκωμένης πολυστερίνης

Η διογκωμένη πολυστερίνη (Expanded Polystyrene) ή σε συντομία γεωαφρός EPS, αποτελεί ένα ελαφροβαρές, άκαμπτο, πλαστικό και αφρώδες συνθετικό υλικό που χρησιμοποιείται συχνά ως δομικό υλικό σε γεωτεχνικές κατασκευές (Πατενιώτης, 2010). Ο γεωαφρός παράγεται από συμπαγείς κυψέλες πολυστυριλίου, οι οποίες συγκολλούνται θερμικά μεταξύ τους. Η τελική σύσταση του προϊόντος αποτελείται κατά 98% αέρα και 2% από την πλαστική δομή των κυψελών (Κατσιράκης, 2021). Συνήθως, το σχήμα κατά το οποίο παράγεται ένα τέμαχος (μπλοκ) είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με διαστάσεις πάχους μεγαλύτερο των 0.5 m και πλάτους μεγαλύτερο του 1.0 m.



Εικόνα 3.1: Μπλοκ διογκωμένης πολυστερίνης (EPS Industry Alliance, 2020).

Παρατηρείται, πως ο γεωαφρός που προτιμάται σε τεχνικά έργα είναι η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS), σε σχέση με άλλα συνθετικά υλικά, γιατί το EPS ανταποκρίνεται σε πολλές ανάγκες που προκύπτουν σε ένα έργο. Επιπλέον, αποτελεί αξιόπιστη τεχνικο-οικονομική λύση και δύναται η παραγωγή του σε μεγάλη ποικιλία τύπων και διαστάσεων. Σημαντικό να αναφερθεί, ότι υπάρχει δυνατότητα παραγωγής του υλικού, στις περισσότερες περιοχές τις χώρας, με αποτέλεσμα να μπορεί να διανέμεται άμεσα για χρήση (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).

Τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν το EPS, είναι αρχικά το βάρος του, το οποίο αντιστοιχεί περίπου στο 1% του εκάστοτε όγκου εδάφους, η πυκνότητά του, που κυμαίνεται από 12 έως 60 kg/m³ και η συμπίεστότητά του, η οποία παίρνει πολύ μικρές τιμές και υπάρχει η δυνατότητα να μειωθεί επιπλέον, εάν υποβληθεί σε περαιτέρω επεξεργασία (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017). Συνεπώς, το EPS καθιστάτε το ελαφρύτερο υλικό πλήρωσης κατά 10% σε σχέση με τα υπόλοιπα. Η χρησιμοποίησή του σε γεωτεχνικά έργα έχει ως αποτέλεσμα την σταθεροποίηση των εδαφών, καθώς μειώνονται τα φορτία αλλά και οι καθιζήσεις τους. Επιπλέον, είναι εύκολη η μεταφορά, η τοποθέτηση, αλλά και η διαμόρφωση

του γεωαφρού στις ανάγκες κάθε τεχνικού έργου, καθώς δεν απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για τη διαχείρισή του. Επιπρόσθετα, η διογκωμένη πολυστερίνη δεν διαβρώνεται από τις καιρικές συνθήκες και είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στην υγρασία. Τελικώς, ο γεωαφρός EPS, δεν υφίσταται γήρανση, αποδόμηση και ο όγκος του παραμένει σταθερός, οπότε η διάρκεια ζωής του είναι απεριόριστη. Αναφέρεται, ότι ακόμα και μετά από 100 χρόνια συνεχόμενης καταπόνησης σε τεχνικά έργα, οι ιδιότητες του υλικού παραμένουν αμετάβλητες (Πατενιώτης, 2010).

Εν κατακλείδι, το EPS κρίνεται ιδανικό υλικό για τεχνικά έργα, γιατί είναι εξαιρετικά ανθεκτικό και εύκολο στη χρήση του, καθώς επιταχύνεται η κατασκευή, μειώνεται το κόστος αλλά και οι απαιτήσεις συντήρησης ενός έργου (EPS Industry Alliance, 2020).

3.1.1 Τύποι και μηχανικές ιδιότητες διογκωμένης πολυστερίνης

Θλιπτική αντοχή:

Σύμφωνα με τις εθνικές τεχνικές προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017), ο γεωαφρός EPS κατηγοριοποιείται σε διάφορους τύπους, οι οποίοι βασίζονται στην ονομαστική θλιπτική αντοχή σ_{10} ή CS10, η οποία αντιστοιχεί σε παραμόρφωση $\varepsilon = 10\%$ (συμβατική τιμή). Δηλαδή, το EPS100 έχει θλιπτική αντοχή $\sigma_{10} = 100\text{kPa}$. Επισημαίνεται, ότι σε ορισμένες περιπτώσεις το EPS κατηγοριοποιείται βάσει των ονομαστικών θλιπτικών αντοχών σ_5 (CS5), σ_2 (CS2), σ_1 (CS1), όπου οι αντίστοιχες παραμορφώσεις τους είναι $\varepsilon = 5\%$, $\varepsilon = 2\%$, $\varepsilon = 1\%$. Στο πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι κατηγορίες του EPS, βάσει των παραμορφώσεών τους και της πυκνότητας του κάθε υλικού (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).

Πίνακας 3.1: Κατηγοριοποίηση τύπων EPS και οι αντίστοιχες ονομαστικές θλιπτικές αντοχές τους (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).

Παραμόρφωση	10%	5%	2%	1%	Πυκνότητα (kg/m³)
Κατηγορία	Θλιπτική αντοχή (kPa)				
EPS 40	40	35	30	15	11.0
EPS 50	50	40	35	20	12.0
EPS 60	60	50	45	23	14.0
EPS 70	70	60	50	25	15.0
EPS 80	80	70	60	30	16.0
EPS 90	90	80	65	33	17.5
EPS 100	100	90	75	37	19.0
EPS 110	110	95	80	40	20.0
EPS 120	120	100	90	45	21.0
EPS 130	130	110	95	48	22.0
EPS 140	140	120	105	52	23.5
EPS 150	150	130	110	55	25.0
EPS 200	200	170	150	75	29.0
EPS 250	250	215	190	95	33.0
EPS 270	270	230	200	100	35.0
EPS 280	280	240	205	105	36.0

Σημειώνεται, ότι σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1997, για τον υπολογισμό της τιμής σχεδιασμού θλιπτικής αντοχής, θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένας μειωτικός συντελεστής

υλικού $\gamma_m = 1.25$. Για παράδειγμα επιλέγεται EPS100, το οποίο έχει θλιπτική αντοχή $\sigma_{10} = 100$ kPa.

Συνεπώς,

$$\sigma_{10\text{design}} = \frac{100}{1.25} = 80 \text{ kPa}$$

Ο μειωτικός συντελεστής $\gamma_m = 1.25$ ισχύει και για την μόνιμη θλιπτική αντοχή (2.2), αλλά και για τη θλιπτική αντοχή υπό ανακυκλική φόρτιση (2.3). Συνεπώς, σε όλες τις αντοχές (θλιπτική, μόνιμη θλιπτική, θλιπτική υπό ανακυκλική φόρτιση) υπολογίζονται ονομαστικές τιμές αλλά και τιμές σχεδιασμού.

Μέτρο ελαστικότητας:

Σύμφωνα με τον Horvath (1995), ύστερα από εργαστηριακές δοκιμές σε αρκετούς τύπους διογκωμένης πολυστερίνης, παρουσιάζεται γραμμική σχέση μεταξύ της πυκνότητας και του μέτρου ελαστικότητας του εκάστοτε τύπου γεωαφρού (2.1), για χαμηλές παραμορφώσεις έως και 1%:

$$E_t = 0.45\rho - 3 \quad (2.1)$$

Μόνιμη θλιπτική αντοχή:

Το EPS εάν υποβάλλεται σε μόνιμη θλιπτική τάση μικρότερη από $0.3 \cdot \sigma_{10}$ (kPa) για περισσότερο από 50 χρόνια, ενδέχεται να παρουσιάσει ερπυστικές θλιπτικές παραμορφώσεις έως 2%:

$$\sigma_{10\text{permanently}} = 0.3 \cdot \sigma_{10} \quad (2.2)$$

Θλιπτική αντοχή υπό ανακυκλική φόρτιση:

Σύμφωνα με τον Duskon (1997), ύστερα από μελέτες, προκύπτει ότι εάν η ανακυκλική φόρτιση στον γεωαφρό είναι μικρότερη από 0.4%, τότε η παραμόρφωση που παρουσιάζεται είναι ελαστική και δεν είναι μόνιμη. Συνεπώς, η μέγιστη επιτρεπτή τιμή ανακυκλικής φόρτισης είναι ίση με $0.35 \cdot \sigma_{10}$ (kPa):

$$\sigma_{10\text{cycle}} = 0.35 \cdot \sigma_{10} \quad (2.3)$$

Λόγος Poisson:

Ο λόγος Poisson της διογκωμένης πολυστερίνης παίρνει πολύ μικρότερες τιμές σε σχέση με του εδάφους. Όταν ο γεωαφρός λειτουργεί στην ελαστική περιοχή, η τιμή του λόγου Poisson μπορεί να εκτιμηθεί από την εμπειρική σχέση σύμφωνα με τον Horvath (1995):

$$\nu = 0.056\rho + 0.0024 \quad (2.4)$$

3.1.2 Η επίδραση της διογκωμένης πολυστερίνης στο περιβάλλον

Για να χαρακτηριστεί ένα υλικό οικολογικό και φιλικό προς το περιβάλλον, αρχικά εξετάζονται οι πρώτες ύλες που χρειάζονται για την δημιουργία του, μετέπειτα η ενέργεια

που χρειάζεται να δαπανηθεί κατά την παραγωγή του και τελικώς αν το υλικό μπορεί να ανακυκλωθεί με ευκολία (Lyrtatzakis, 2021).

Η διογκωμένη πολυστερίνη είναι ένα από τα καλύτερα υλικά, που χρησιμοποιούνται σε τεχνικά έργα όσον αφορά τον οικολογικό τους χαρακτήρα. Αρχικά, το EPS είναι 100% ανακυκλώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς είναι μη τοξικό, εντελώς αδρανές και συγκριτικά με τα υπόλοιπα μονωτικά υλικά καταναλώνει πολύ λίγη ενέργεια για να δημιουργηθεί αλλά και για να ανακυκλωθεί. Δεν εμπεριέχει χλωροφθοράνθρακες (CFCs) ή υδροφθοράνθρακες (HCFCs) και ούτε δημιουργεί καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του. Επιπλέον, δεν δημιουργεί μικροοργανισμούς και μυκητιάσεις, καθώς δεν περιέχει καμία διατροφική αξία σαν υλικό.

Όταν το EPS δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί στην αρχική του μορφή, μπορεί να ανακυκλωθεί με διάφορους τρόπους. Ένας σημαντικός τρόπος ανακύκλωσής του, είναι η απευθείας χρησιμοποίησή του σε άλλα έργα χωρίς καμία προεπεξεργασία, ενώ ακόμα, μπορεί να εκμεταλλευτεί ως καθαρό καύσιμο, εάν αποτεφρωθεί. Γενικότερα, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της παραγωγής της πρώτης ύλης (κυψέλες διογκωμένης πολυστερίνης) και της μετατροπής της σε μπλοκ διογκωμένης πολυστερίνης, είναι πολύ μικρός. Καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του EPS, ο μόνος αρνητικός αντίκτυπος που δημιουργείται προς το περιβάλλον, εντοπίζεται στο στάδιο της παραγωγής του, όπου απελευθερώνονται αέρια στην ατμόσφαιρα για την απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται για να παραχθεί.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το EPS δεν θέτει σε κίνδυνο την υγεία των ανθρώπων, τόσο κατά τη διάρκεια της εγκατάστασής του, όσο και κατά τη χρήση του. Δεν επηρεάζει την υγεία των εργαζομένων που βρίσκονται εκτεθειμένοι σε αυτό, ενώ ακόμα, δεν απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για την επεξεργασία του. Εν κατακλείδι, το EPS είναι ένα υλικό ελαφρύ, μαλακό, συμπαγές, βιολογικά καθαρό, φιλικό προς το περιβάλλον, το οποίο δεν παράγει καμία παθογόνο ουσία καθ' όλη της διάρκεια της ζωής του (Πατενιώτης, 2010).

3.2 Χρήση διογκωμένης πολυστερίνης σε γεωτεχνικά έργα

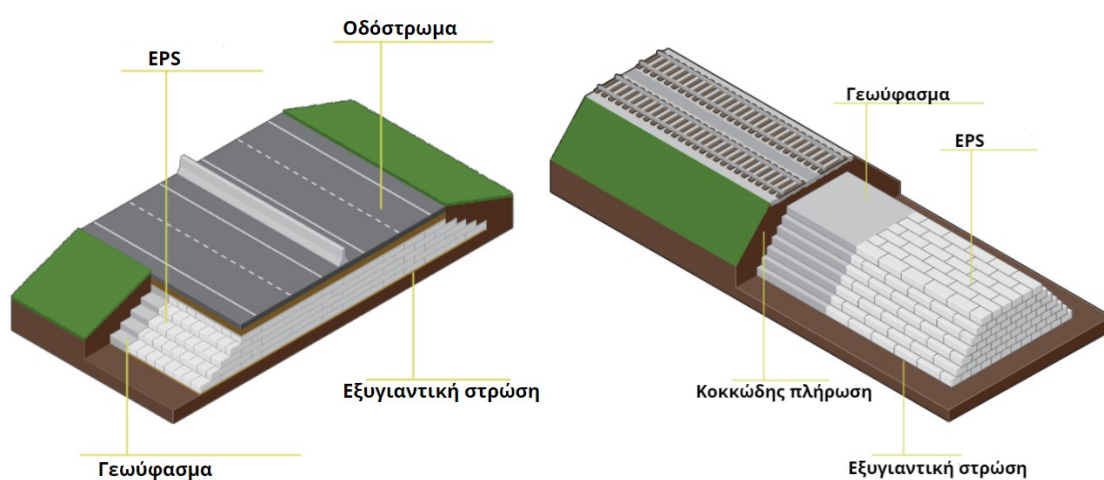
Η διογκωμένη πολυστερίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλά διαφορετικά γεωτεχνικά έργα, έχοντας διάφορες εφαρμογές, λόγω των χαρακτηριστικών της και των μηχανικών ιδιοτήτων της. Ως επί το πλείστον, το EPS χρησιμοποιείται σε γεωτεχνικά έργα, ως ελαφροβαρές υλικό πλήρωσης σε επιχώματα, οδικά και σιδηροδρομικά. Ωστόσο, χρησιμοποιείται ακόμα ως συμπιεστό περίβλημα σε έργα, όπου αλληλεπιδρά το έδαφος με κατασκευές (τοίχοι αντιστήριξης, γέφυρες, υπόγειες κατασκευές, κ.λπ.), καθώς και ως μονωτικό υλικό παρέμβλημα για τη μείωση θορύβου και την απόσβεση ταλαντώσεων μικρού πλάτους (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017). Για να κριθεί κατάλληλος όμως ένας τύπος EPS, που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα έργο, θα πρέπει να πληροί κάποια συγκεκριμένα κριτήρια και επιπλέον θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου.

Αρχικά, το βασικότερο κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου τύπου EPS σε ένα γεωτεχνικό έργο, είναι οι μηχανικές ιδιότητές του. Θα πρέπει αυτές να είναι γνωστές, τόσο για ανεμπόδιση όσο και για τριαξονική θλίψη, γιατί αναλόγως τις ιδιότητες του κάθε τύπου, προκύπτει διαφορετική παραμόρφωση του υλικού. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο ερπυσμός του γεωαφρού, δηλαδή να προβλέπονται οι παραμορφώσεις που προκύπτουν

καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του γεωαφρού υπό μία σταθερή τάση, σε μία κατασκευή. Τέλος, πρέπει να εξασφαλίζεται η αντίσταση στην ολίσθηση του EPS, με οποιοδήποτε άλλο δομικό υλικό έρχεται σε επαφή, όπως το υποκείμενο - υπερκείμενο έδαφος, σκυρόδεμα ή τα γεωσυνθετικά υλικά (Κατσιράκης, 2021).

3.2.1 Οδικά – σιδηροδρομικά επιχώματα

Ο γεωαφρός EPS είναι ένα πολυλειτουργικό υλικό, πολύ ανθεκτικό, το οποίο είναι ιδανικό για την κατασκευή οδικών και σιδηροδρομικών επιχωμάτων σε περιοχές με μαλακό και συμπίεστο έδαφος, το οποίο δεν είναι ικανό να υποστηρίξει μεγάλα φορτία από βαριά υλικά πλήρωσης και να προστατέψει τα υποστρώματα του εδάφους ή και γειτονικές κατασκευές (EPS Industry Alliance, 2020).



Εικόνα 3.2: Κατασκευή οδικού και σιδηροδρομικού επιχώματος με τη χρήση EPS (EPS Industry Alliance, 2020).

Στην Ελλάδα, η πρώτη εφαρμογή της διογκωμένης πολυστερίνης έγινε στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ, στη περιοχή των Θερμοπυλών το 2008 (Εικόνες 3.3, 3.4). Στη συγκεκριμένη περιοχή επικρατούν δυσμενείς εδαφικές συνθήκες, διότι το έδαφος είναι ιδιαίτερα μαλακό και συμπίεστο. Η αρχική προσπάθεια δημιουργίας ενός συμβατικού οδικού επιχώματος κατέληξε σε αποτυχία. Συνεπώς, μετά από μελέτες κρίθηκε απαραίτητη η χρήση γεωαφρού EPS για την κατασκευή του οδικού επιχώματος, ώστε να μειωθούν τα επιβαλλόμενα φορτία στο ασθενές υπέδαφος της περιοχής. Εκτενέστερη ανάλυση του έργου στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ γίνεται στο Κεφάλαιο 5.



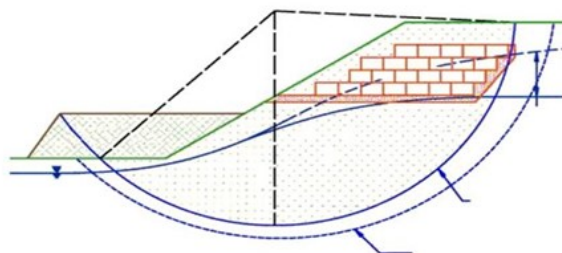
Εικόνα 3.3: Χρήση γεωαφρού EPS στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).



Εικόνα 3.4: Τοποθέτηση μπλοκ EPS στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ (EPS Hellas).

3.2.2 Ευστάθεια πρανών

Μια από τις χρήσεις της διογκωμένης πολυστερίνης είναι ως υλικό σταθεροποίησης εδαφικού πρανού (Εικόνα 3.5), ώστε να ελαττωθεί η πιθανότητα αστοχίας του εδαφικού πρίσματος. Για να βελτιωθεί η ευστάθεια ενός πρανού αφαιρείται η κορυφή του και στη θέση της τοποθετείται διογκωμένη πολυστερίνη (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).

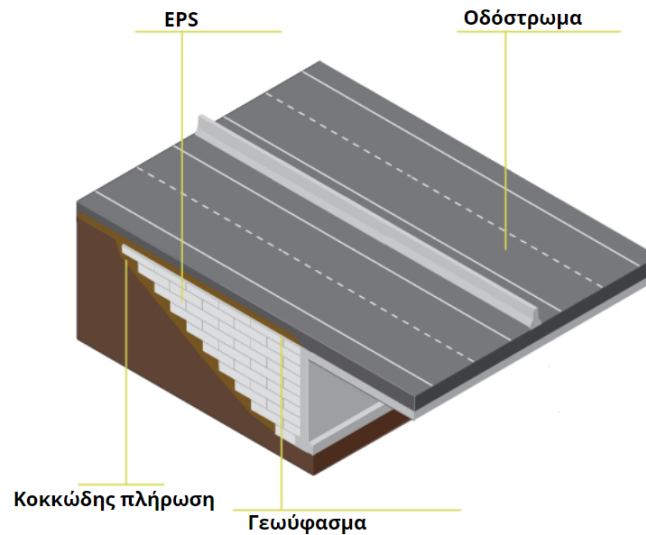


Εικόνα 3.5: Σταθεροποίηση εδαφικού πρανού με χρήση γεωαφρού EPS (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).

Με την αφαίρεση της εδαφικής μάζας, τοποθετείται στη θέση της γεωαφρός EPS με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η αύξηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι μελλοντικών ολισθήσεων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους και πρόληψη πιθανής αστοχίας.

3.2.3 Γέφυρες

Σημαντική εφαρμογή του γεωαφρού εντοπίζεται στην κατασκευή ακροβάθρας, η οποία λειτουργεί ως αντιστήριξη, αλλά και στα μεταβατικά επιχώματα είτε σε οδικές είτε σε σιδηροδρομικές γέφυρες. Όπως και προηγουμένως, έτσι και σε αυτή τη περίπτωση το EPS χρησιμοποιείται σε περιοχές που το έδαφος παρουσιάζει μεγάλα προβλήματα, όπως έντονες καθιζήσεις.



Εικόνα 3.6: Κατασκευή ακροβάθρας γέφυρας με τη χρήση EPS (EPS Industry Alliance, 2020).

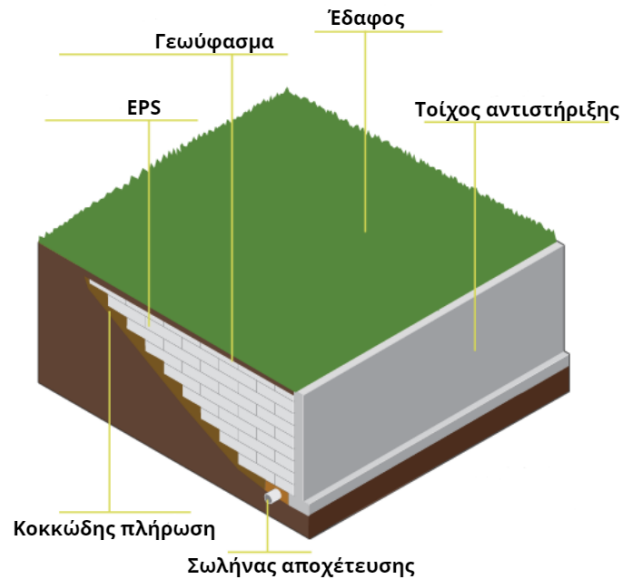
Το μεγάλο πλεονέκτημα του γεωαφρού είναι το χαμηλό του βάρος, κάτι το οποίο το καθιστά εξαιρετικό υλικό πλήρωσης, για τα αντιστηρίγματα ή τις υποστυλώσεις των γεφυρών. Λόγω της υψηλής αντοχής του EPS, οι διαφορικές μετατοπίσεις μειώνονται στην πλάκα επιφάνειας επαφής της γέφυρας με το υλικό πλήρωσης, γεγονός που μειώνει το κόστος κατασκευής αλλά και τη συντήρηση της γέφυρας. Σημειώνεται ότι συγκριτικά με τις κοινές κατασκευές γεφυρών, η χρήση γεωαφρού μειώνει σημαντικά τις πλευρικές δυνάμεις στα τοιχώματα των ακροβάθρων, στα θεμέλια και στις αντιστηρίξεις. Το παραπάνω συμβαίνει καθώς οι πλευρικές δυνάμεις είναι ανάλογες του βάρους του επιχώματος, οπότε με τη χρήση γεωαφρού το βάρος μειώνεται αισθητά (Lyratzakis, 2021).



Εικόνα 3.7: Χρήση γεωαφρού EPS σε ακροβάθρο γέφυρας (Lyratzakis, 2021).

3.2.4 Τοίχοι αντιστήριξης

Η χρήση του γεωαφρού EPS ως εδαφική αντιστήριξη, αποτελεί μια ακόμα σημαντική εφαρμογή του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται ως επίχωση πίσω από μια κατασκευή αντιστήριξης (Εικόνα 3.9), ώστε να μειώσει σημαντικά τις πλευρικές πιέσεις σε αυτή.



Εικόνα 3.8: Κατασκευή τοίχου αντιστήριξης με τη χρήση γεωαφρού EPS (EPS Industry Alliance, 2020).

Όπως αναφέρθηκε στην περίπτωση των γεφυρών (Υποενότητα 3.2.4), επειδή οι οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται σε ένα τοίχο αντιστήριξης είναι ανάλογες του βάρους της επίχωσης, το κομμάτι εδάφους που βρίσκεται πίσω από το τοίχο αντιστήριξης αντικαθιστάται με διογκωμένη πολυστερίνη για να μειωθεί το βάρος. Έτσι, περιορίζονται οι οριζόντιες δυνάμεις που μπορούν να δημιουργηθούν κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Κατά, την κατασκευή ενός τέτοιου έργου, θα πρέπει να υπάρχουν αρκετές αποχετεύσεις, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αύξηση της υδροστατικής πίεσης για να μην δημιουργηθούν προβλήματα άνωσης του γεωαφρού (EPS Industry Alliance, 2020).



Εικόνα 3.9: Τοίχος αντιστήριξης EPS για την επίχωση τοίχων στις φοιτικές εστίες του Πανεπιστημίου της Δυτικής Βιρτζίνια, στη Morgantown (EPS Industry Alliance, 2020).

3.2.5 Προστασία υπόγειων αγωγών και κατασκευών

Πολλές φορές η κάλυψη των αγωγών γίνεται με εδαφικά υλικά, ωστόσο αυτό δεν εξασφαλίζει την προστασία τους, καθώς μπορεί να υπάρξει εσφαλμένη ή ελλιπής μελέτη για

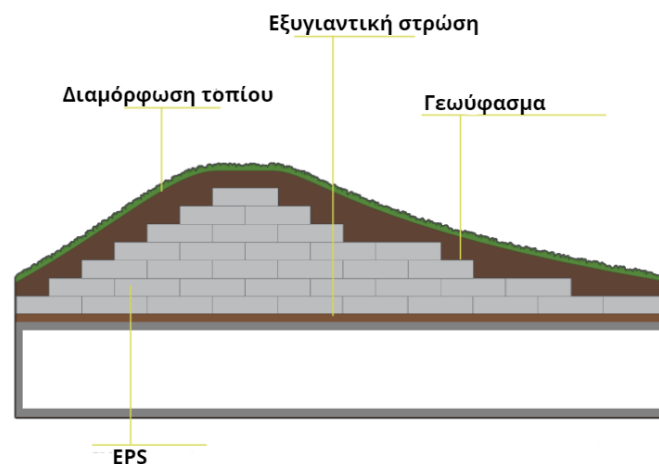
τον έλεγχο της αντοχή τους σε αυξημένα φορτία. Ειδικότερα, όταν οι αγωγοί βρίσκονται σε μεγάλο βάθος, δημιουργούνται πολύ μεγάλες τάσεις που δύναται να τους καταπονήσουν σημαντικά. Συνεπώς, για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό, αφαιρούνται τα εδαφικά υλικά που έχουν τοποθετηθεί πάνω από τον αγωγό και αντικαθιστούνται με διογκωμένη πολυστερίνη (Κατσιράκης, 2021).



Εικόνα 3.10: Προστασία αγωγού με τη χρήση γεωφωρού EPS (EPS Industry Alliance, 2020).

3.2.6 Διαμόρφωση τοπίου

Ως τελική χρήση του γεωφωρού EPS, αναφέρεται η διαμόρφωση τοπίων. Κατά την περίπτωση αυτή το EPS, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να δημιουργηθεί νέα τοπογραφία χωρίς να προστεθεί μεγάλο φορτίο σε υποκείμενες δομές ενώ επιπλέον τις προστατεύει από εξωγενείς παράγοντες, όπως οι κατολισθήσεις.



Εικόνα 3.11: Διαμόρφωση τοπίου με τη χρήση γεωφωρού EPS (EPS Industry Alliance, 2020).

Παραδείγματα αυτής της εφαρμογής, αποτελούν οι οροφές σε αστικά κτίρια καθώς και η διαμόρφωση εξωτερικής επιφάνειας μιας σήραγγας, με στόχο τη δημιουργία ενός νέου

δάσους. Το παραπάνω συναντάται στο Αμβούργο της Γερμανίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.12 (Κατσιράκης, 2021).



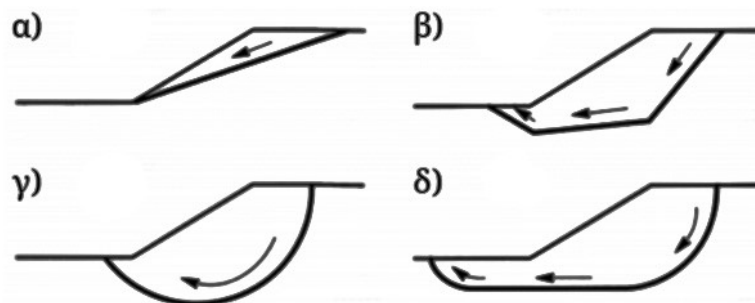
Εικόνα 3.12: Διαμόρφωση τοπίου με τη χρήση EPS (Κατσιράκης, 2021).

Αναλυτική μέθοδος

4.1 Μέθοδοι οριακής ισορροπίας

Η ανάλυση με μεθόδους οριακής ισορροπίας εξετάζει την ισορροπία δυνάμεων και ροπών, μεμονωμένα ή και ταυτόχρονα, σε μία εδαφική μάζα πάνω από μία αυθαίρετη επιφάνεια αστοχίας (Kramer, 1996). Παράλληλα, γίνεται η υπόθεση ότι το κριτήριο αστοχίας επικρατεί σε όλη την επιφάνεια αστοχίας, θεωρώντας το έδαφος πάνω από την επιφάνεια αστοχίας, άκαμπτο και τέλεια πλαστικό. Συνεπώς, ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίδιος σε όλο το μήκος της επιφάνειας αστοχίας. Οπότε, η ανάλυση οριακής ισορροπίας αξιολογεί την ισορροπία των δυνάμεων ή και ροπών και υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας, χωρίς να παρέχει καμία πληροφορία για τις παραμορφώσεις που προκαλούνται στην εδαφική μάζα (Αλεξίου, 2019).

Βάσει των μεθόδων που παρουσιάζονται παρακάτω, δίνεται η δυνατότητα μελέτης εδαφικών πρανών σε ξηρές, υγρές και ψευδοστατικές συνθήκες, ενώ η αστοχία τους βασίζεται στο κριτήριο Mohr Coulomb. Αρχικά, προσδιορίζεται η γεωμετρία του εδαφικού πρανούς και στη συνέχεια, προσδιορίζεται η επιφάνεια αστοχίας. Τα είδη αστοχίας έχουν προσδιοριστεί σύμφωνα με τον Kramer (1996). Το πρώτο είδος αστοχίας είναι στο επίπεδο (σφηνοειδής μορφή), ενώ το δεύτερο, είναι η αστοχία πρανούς σε πολλαπλά επίπεδα με κυκλική ή μη κυκλική μορφή (Δασκαλάκη, 2023).

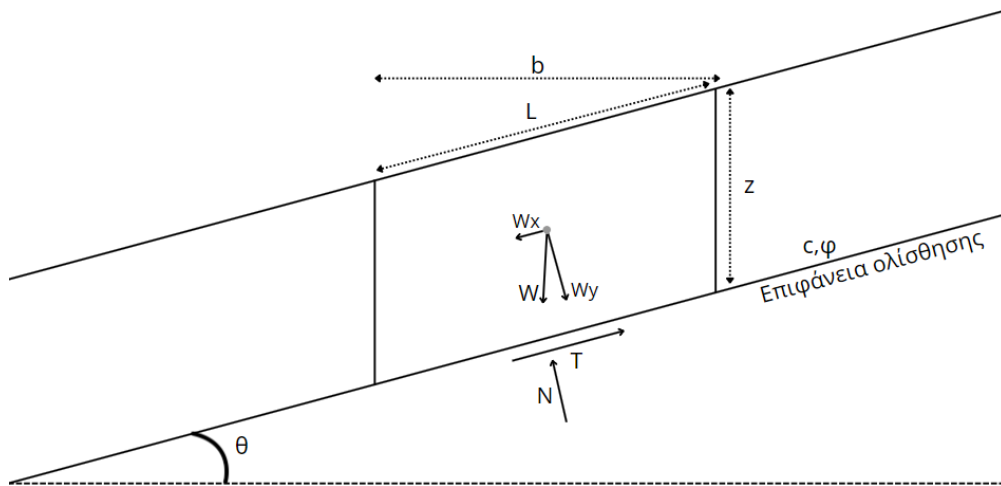


Σχήμα 4.1: Μορφές αστοχίας α) σφήνας β) πολυεπίπεδη γ) κυκλική δ) μη κυκλική (Kramer, 1996).

Λόγω της διαφορετικότητας και πολυπλοκότητας της κάθε αστοχίας, έχουν δημιουργηθεί διάφορες προσεγγίσεις οριακής ισορροπίας για τον έλεγχο της ευστάθειας ενός πρανούς, οι οποίες μελετούνται στις παρακάτω υποενότητες.

4.1.1 Επίπεδη μεταφορική ολίσθηση – απειρομήκες πρανές

Η επίπεδη μεταφορική ολίσθηση βασίζεται στη θεώρηση ότι μία εδαφική μάζα μετακινείται επάνω σε επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης παράλληλα με τη κεκλιμένη επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται συνήθως σε κοκκώδη, μη συνεκτικά εδάφη ($c' = 0$). Η συγκεκριμένη μέθοδος αναλύεται εκτενέστερα στην υποενότητα 4.2.1 που περιγράφει τη περίπτωση των απειρομήκων πρανών (Δασκαλάκη, 2023).



Σχήμα 4.2: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες.

Ο συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες δίνεται από τον τύπο:

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \quad (4.1)$$

Όπου:

b: το πλάτος της εδαφικής λωρίδας [m],

θ: η γωνία του πρανούς [deg],

φ: η γωνία εσωτερικής τριβής [deg],

c: η συνοχή [kPa],

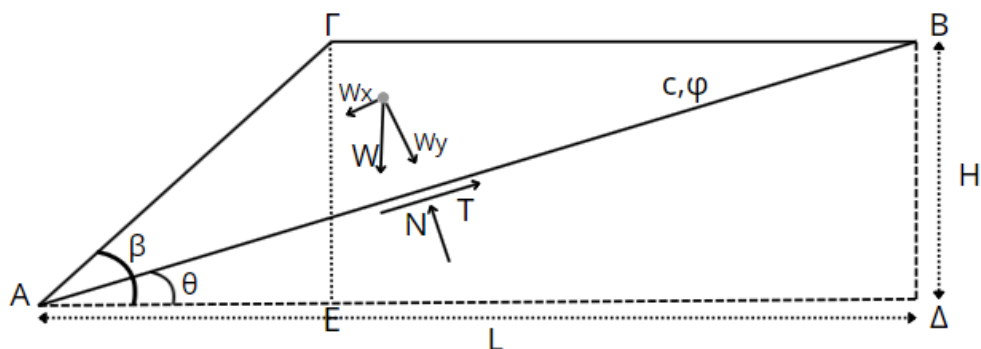
γ: το ειδικό βάρος του εδαφικού υλικού [kN/m³],

z: το ύψος του πρανούς [m]

Η σχέση 4.1 αποδεικνύεται στην υποενότητα 4.2.1.

4.1.2 Μέθοδος της σφήνας – πεπερασμένου ύψους

Η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρεί εδαφικό πρανές που έχει ως κύριο χαρακτηριστικό, ότι το ύψος του είναι συγκρίσιμο του μήκους του. Στην παρούσα μέθοδο, η αστοχία που προκαλείται, γίνεται σε ένα επίπεδο και έχει σφηνοειδή μορφή. Συνήθως, αυτή εφαρμόζεται σε σχεδόν κατακόρυφα πρανή και συνεκτικά εδάφη ($c' > 0$). Η συγκεκριμένη μέθοδος αναλύεται εκτενέστερα στην υποενότητα 4.2.3, που περιγράφει τη προσομοίωση των πρανών πεπερασμένου ύψους (Barnes, 2010).



Σχήμα 4.3: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες.

Ο συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες δίνεται από τον τύπο:

$$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \quad (4.2)$$

Όπου:

β : η γωνία του πρανούς [deg],

θ : η κρίσιμη γωνία [deg],

φ : η γωνία εσωτερικής τριβής [deg],

c : η συνοχή [kPa],

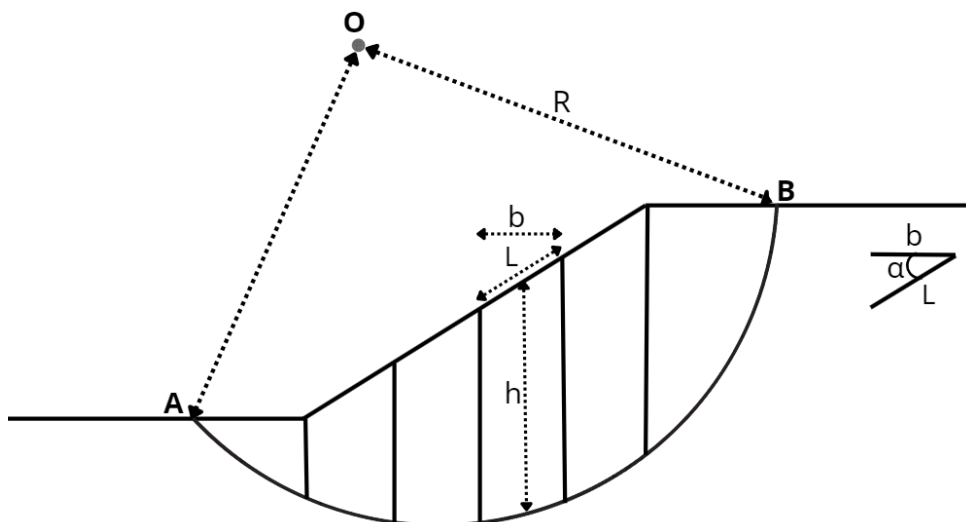
γ : το ειδικό βάρος εδαφικού υλικού [kN/m^3],

H : το ύψος του πρανού [m]

Η σχέση 4.2 αποδεικνύεται στην υποενότητα 4.2.3.

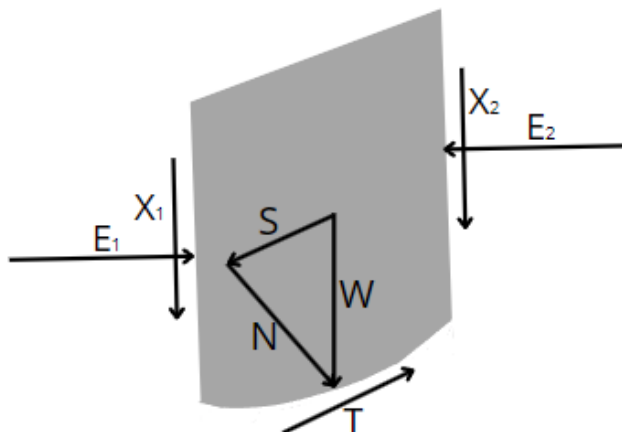
4.1.3 Μέθοδος Fellenius – λωρίδων

Η μέθοδος των λωρίδων, την οποία κατέγραψε ο Fellenius (1936), εξετάζει αστοχίες κυκλικής επιφάνειας. Αρχικά, θεωρείται κυκλική επιφάνεια ολίσθησης με ακτίνα R . Το χερσαίο τμήμα που βρίσκεται άνω του κυκλικού τόξου, έχει μοναδιαίο πάχος και χωρίζεται σε κατακόρυφες λωρίδες ίσου πλάτους και μεταβαλλόμενου ύψους (Καβαλιεράτου, 2023).



Σχήμα 4.4: Εδαφικό τμήμα ανάλυσης με τη μέθοδο των λωρίδων.

Για το πρανές γίνεται η θεώρηση, πως περιστρέφεται προς το κέντρο του κύκλου σαν στερεό σώμα, με αποτέλεσμα ο συντελεστής ασφαλείας να παραμένει ίδιος σε κάθε μία λωρίδα του πρανού. Ταυτόχρονα, θεωρείται ότι οι εφαπτομενικές και κάθετες δυνάμεις (X_i, E_i) είναι ίσες και αντίθετες, δηλαδή $X_1 = X_2$ και $E_1 = E_2$, ώστε να επέλθει ισορροπία δυνάμεων. Σκοπός των παραπάνω θεωρήσεων είναι η αντιμετώπιση του προβλήματος της υπερστατικότητας (Barnes, 2010).



Σχήμα 4.5: Ανάλυση δυνάμεων στη λωρίδα.

Ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τον τύπο:

$$SF = \frac{c' \cdot L_{AB} + \tan \varphi \cdot \sum N'}{\sum W \cdot \sin \alpha} \Rightarrow$$

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^n [c \cdot \Delta L + (W_i \cos \alpha_i - u_i \cdot \Delta L) \cdot \tan \varphi]}{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot \sin \alpha_i)} \quad (4.3)$$

Όπου:

W_i : το βάρος της κάθε λωρίδας [kN/m^3],

N' : η ενεργός κάθετη δύναμη [kN/m^3],

L_{AB} : το συνολικό μήκος του τόξου μεταξύ A και B [m],

ΔL : το μήκος της κάθε λωρίδας [m],

u_i : η πίεση των πόρων στη βάση κάθε λωρίδας [kN/m^2],

α_i : η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ πάχους b και μήκους L της λωρίδας [deg],

c' : η συνοχή [kPa],

φ : η γωνία εσωτερικής τριβής [deg],

b: το πάχος της κάθε λωρίδας [m]

4.1.4 Απλοποιημένη μέθοδος Bishop

Η παρούσα μέθοδος όπως και η μέθοδος του Fellenius, αναφέρεται σε κυκλική επιφάνεια αστοχίας και διαιρεί το εδαφικό τμήμα σε λωρίδες. Ωστόσο, η μέθοδος Bishop (1955) καταργεί τη θεώρηση του Fellenius (1936) ότι οι εφαπτομενικές και οι κάθετες δυνάμεις είναι ίσες και αντίθετες (X_i, E_i), αλλά θεωρεί ότι $X_1 = X_2$ και $E_1 \neq E_2$ (Barnes, 2010).

Ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τον τύπο:

$$SF = \frac{1}{\sum (W \cdot \sin \alpha)} \cdot \sum \frac{[c \cdot b + (W - u \cdot b) \cdot \tan \varphi] \cdot \sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \varphi}{SF}} \quad (4.4)$$

Όπου:

- W: το βάρος της κάθε λωρίδας [kN/m³],
u: η πίεση των πόρων στη βάση κάθε λωρίδας [kN/m²],
α: η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ πλάτους b και μήκους L της λωρίδας [deg],
c: η συνοχή [kPa],
φ: η γωνία εσωτερικής τριβής [deg],
b: το πάχος της κάθε λωρίδας [m]

Λόγω της παρουσίας του συντελεστή ασφαλείας και στα δύο μέρη της εξίσωσης, επιλέγεται μία δοκιμαστική τιμή για το συντελεστή ασφαλείας που βρίσκεται στο δεξί μέρος, ώστε να υπολογιστεί το αριστερό μέρος με διαδοχικές επαναλήψεις, έως ότου επιτευχθεί η σύγκλιση και των δύο πλευρών της έκφρασης και βρεθεί η πραγματική τιμή του συντελεστή ασφαλείας.

Η μέθοδος Bishop (1955), είναι η πιο διαδεδομένη για την ανάλυση ευστάθειας χερσαίων πρανών, ενώ ακόμα, είναι πιο ακριβής από τη μέθοδο των λωρίδων. Προφανώς, η μέθοδος Bishop (1955) δεν ενδείκνυται για επίλυση στο «χέρι» γιατί είναι χρονοβόρα, αλλά προτιμάται η επίλυση της με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού προγράμματος, με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας.

4.1.5 Ψευδοστατική μέθοδος ανάλυσης

Σύμφωνα με τη ψευδοστατική μέθοδο ανάλυσης, ο σεισμός πραγματοποιείται μέσω δύο σταθερών και συνεχών επιταχύνσεων. Οι δύο αυτές επιταχύνσεις, δημιουργούνται επιλέγοντας δυο σταθερούς ψευδοστατικούς συντελεστές επιτάχυνσης, έναν για την οριζόντια και έναν για την κάθετη κατεύθυνση. Μέσω αυτών των δύο επιταχύνσεων, δημιουργούνται για κάθε κατεύθυνση, οι αντίστοιχες αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται στο κέντρο μάζας του υλικού (Ρούμπος, 2022).

Οριζόντια αδρανειακή δύναμη:

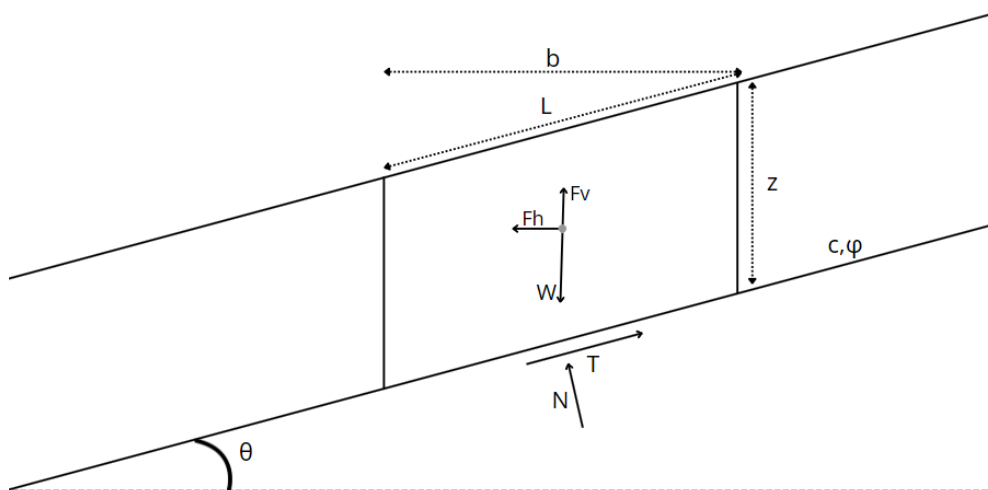
$$F_h = \frac{\alpha_h \cdot W}{g} = k_h \cdot W \quad (4.5. \alpha)$$

Κάθετη αδρανειακή δύναμη:

$$F_v = \frac{\alpha_v \cdot W}{g} = k_v \cdot W \quad (4.5. \beta)$$

Όπου:

- W: το βάρος του πρανού [kN/m³],
 α_h : η οριζόντια ψευδοστατική επιτάχυνση [m/s²],
 α_v : η κάθετη ψευδοστατική επιτάχυνση [m/s²],
 k_h : ο οριζόντιος ψευδοστατικός συντελεστής [αδιάστατος],
 k_v : ο κάθετος ψευδοστατικός συντελεστής [αδιάστατος]



Σχήμα 4.6: Ανάλυση δυνάμεων σε απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες.

Οι δύο αδρανειακές δυνάμεις δεν επιδρούν στην ευστάθεια του πρανού με τον ίδιο τρόπο. Η οριζόντια δύναμη κρίνεται βαρύνουσας σημασίας, γιατί μειώνει τη διατμητική αντοχή του πρανού ενώ συγχρόνως, αυξάνει τις συνολικές τάσεις που ασκούνται σε αυτό, με αποτέλεσμα να αποτελεί μεγαλύτερο κίνδυνο για την ευστάθεια του. Συνεπώς, η κάθετη δύναμη αμελείται, γιατί η επίδραση της είναι μικρότερη και ανάλογη της κατεύθυνσής της.

Οι συντελεστές επιτάχυνσης επιλέγονται ανάλογα με τους συντελεστές σεισμικότητας της κάθε περιοχής, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν πραγματικές σεισμικές επιταχύνσεις προκειμένου να υπάρχουν ακριβέστερα αποτελέσματα. Ωστόσο, αν και η ψευδοστατική μέθοδος είναι αρκετά διαδεδομένη για αναλύσεις ευστάθειας υπό σεισμικές συνθήκες, δεν θεωρείται ακριβής, διότι βάσει της μεθόδου, η σεισμική φόρτιση που προκαλείται σε ένα πρανές αντικαθίσταται από μία σταθερή δύναμη μίας κατεύθυνσης. Επιπλέον, θεωρείται αναξιόπιστη, για εδάφη που παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση πίεσης του νερού των πόρων λόγω σεισμικής φόρτισης. Τέλος, σημειώνεται ότι δεν έχει τη δυνατότητα να επεξηγήσει την παρουσία αστοχίας αμέσως μετά το σεισμό (Πανταζής, 2011).

4.1.6 Δυναμική μέθοδος ανάλυσης

Η δυναμική μέθοδος ανάλυσης είναι πρακτικά μια επέκταση της στατικής ανάλυσης. Τα χερσαία πρανή αλλά και οι ανθρωπογενείς κατασκευές, δεν παρουσιάζουν μόνο στατική αλλά και δυναμική φόρτιση. Αναλυτικότερα, τα εδάφη συμπεριφέρονται δυναμικά, συνεπώς, οι αδρανειακές δυνάμεις ($2^{\text{ος}}$ νόμος του Νεύτωνα) ισούνται με την επιτάχυνση πολλαπλασιασμένη με τη μάζα του εκάστοτε εδαφικού σχηματισμού (Καβαλιεράτου, 2023). Εάν τα φορτία ή οι μετατοπίσεις εφαρμόζονται με πολύ αργό ρυθμό, οι αδρανειακές δυνάμεις μπορούν να αγνοηθούν, με αποτέλεσμα να προκύπτει η στατική προσέγγιση. Οι επιταχύνσεις, συχνά δημιουργούν δονήσεις είτε λόγω ανθρωπογενών ενεργειών (έμπηξη πασσάλων στο έδαφος, εκρήξεις, μετακίνηση βαρέων οχημάτων), είτε φυσικών αιτιών που ως επί το πλείστον είναι οι σεισμοί, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία σεισμικών κυμάτων. Επομένως, η δυναμική ανάλυση παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης συμπεριφοράς του εδάφους, υπό την επίδραση δυναμικών φορτίσεων και εδαφικών ταλαντώσεων. Σημαντικό κρίνεται, ότι η παρούσα μέθοδος λαμβάνει υπόψη την αδράνεια, τον χρόνο

μεταφοράς του φορτίου αλλά και την απόσβεση εδαφικών υλικών. Σημειώνεται, ότι η απόσβεση αποτελεί μηχανισμό ελάττωσης σεισμικών ταλαντώσεων, με αποτέλεσμα να εκτονώνει την κυματική κίνηση. Άλλοι τρόποι εξασθένησης ενός κύματος είναι οι ρηγματώσεις (Πανταζής, 2011).

4.2 Αναλυτική μεθοδολογία ευστάθειας εδαφικών πρανών

Στη παρούσα ενότητα μελετάται η ευστάθεια απειρομήκων και πεπερασμένου ύψους πρανών, με την βοήθεια αναλυτικών εξισώσεων, οι οποίες αρχικά αποδεικνύονται και μετέπειτα ακολουθεί ο υπολογισμός των συντελεστών ασφαλείας της κάθε περίπτωσης. Στην επόμενη υποενότητα, παρουσιάζονται οι μέθοδοι, με τις οποίες αποδείχθηκαν οι αναλυτικές εξισώσεις βάσει των οποίων γίνεται η μελέτη. Οι συνθήκες υπό τις οποίες γίνεται η μελέτη ευστάθειας πρανών, είναι στατικές, ψευδοστατικές, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα, συνδυαστικά οι προαναφερθείσες συνθήκες και τέλος βυθισμένο πρανές από νερό. Οι υπολογισμοί που προκύπτουν, πραγματοποιούνται στο υπολογιστικό πρόγραμμα Microsoft Excel.

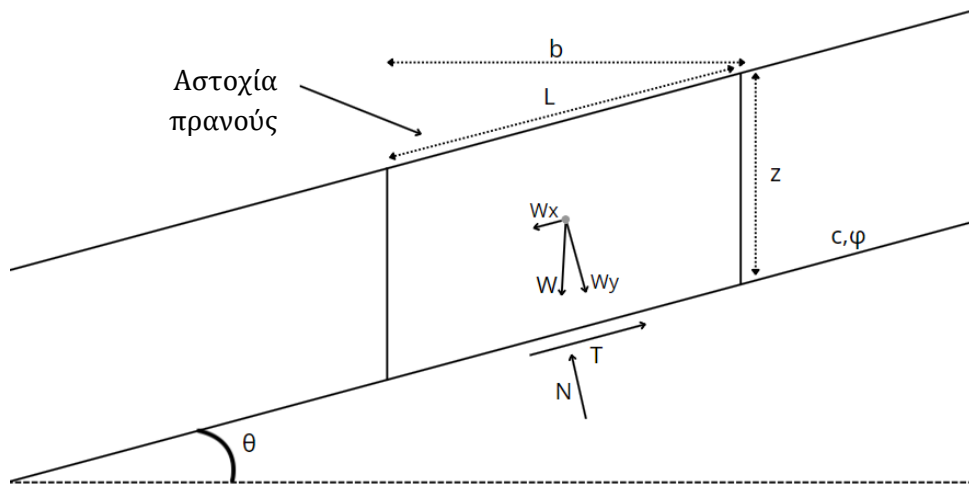
4.2.1 Απειρομήκες πρανές

Πρανή άπειρου μήκους θεωρούνται εκείνα που το μήκος τους είναι πολύ μεγάλο συγκριτικά με το ύψος τους και τα όρια τους δεν είναι εύκολο να καθοριστούν. Θεωρείται η απλούστερη μορφή ανάλυσης ευστάθειας πρανών και επειδή τα περισσότερα πρανή που συναντώνται στη φύση θεωρούνται πεπερασμένου ύψους, δεν χρησιμοποιείται συχνά. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, θεωρείται λωρίδα απειρομήκους πρανούς πλάτους b , μήκους L , ύψους z , ειδικού βάρους γ και υπό κλίση θ . Επίσης, το πρανές χαρακτηρίζεται από τις τιμές του εδαφικού υλικού c και φ , δηλαδή τη συνοχή για τη γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού. Η μελέτη που πραγματοποιείται, αφορά στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες, ενώ παράλληλα μελετάται η παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και η περίπτωση που το πρανές είναι βυθισμένο σε νερό.

1^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας υπό στατικές συνθήκες, θεωρείται απειρομήκης λωρίδα πρανούς με:

- πλάτος b
- μοναδιαίο πάχος
- γωνία πρανούς θ
- γωνία εσωτερικής τριβής φ
- συνοχή c
- ειδικό βάρος εδαφικού υλικού γ
- ύψος z



Σχήμα 4.7: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες.

Επομένως, γίνεται ο υπολογισμός των δυνάμεων:

Βάρος λωρίδας:

$$W = \gamma \cdot b \cdot z \quad (4.6)$$

Το βάρος αναλύεται στο x, y άξονα:

$$W_x = W \cdot \sin \theta$$

$$W_y = W \cdot \cos \theta$$

$$W_x = \gamma \cdot b \cdot z \cdot \sin \theta \quad (4.6. \alpha)$$

$$W_y = \gamma \cdot b \cdot z \cdot \cos \theta \quad (4.6. \beta)$$

Ορθή ενεργός δύναμη:

$$N = W_y = W \cdot \cos \theta \Rightarrow$$

$$N = \gamma \cdot b \cdot z \cdot \cos \theta \quad (4.7)$$

Διατμητική δύναμη:

$$T = W_x = W \cdot \sin \theta \Rightarrow$$

$$T = \gamma \cdot b \cdot z \cdot \sin \theta \quad (4.8)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ενεργές τάσεις:

Ορθή τάση:

$$\sigma = \frac{N \cos \theta = \frac{b}{L}}{A} \Rightarrow \sigma = \frac{\gamma \cdot b \cdot z \cdot \cos \theta}{L \cdot 1} = \frac{\gamma \cdot b \cdot z \cdot \cos \theta}{\frac{b}{\cos \theta}} = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta \Rightarrow$$

$$\sigma = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta \quad (4.9)$$

Διατμητική τάση:

$$\tau = \frac{T \cos \theta = \frac{b}{L}}{L \cdot 1} \Rightarrow \tau = \frac{\gamma \cdot b \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{\frac{b}{\cos \theta}} = \gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \Rightarrow$$

$$\tau = \gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (4.10)$$

Τέλος, ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τη σχέση:

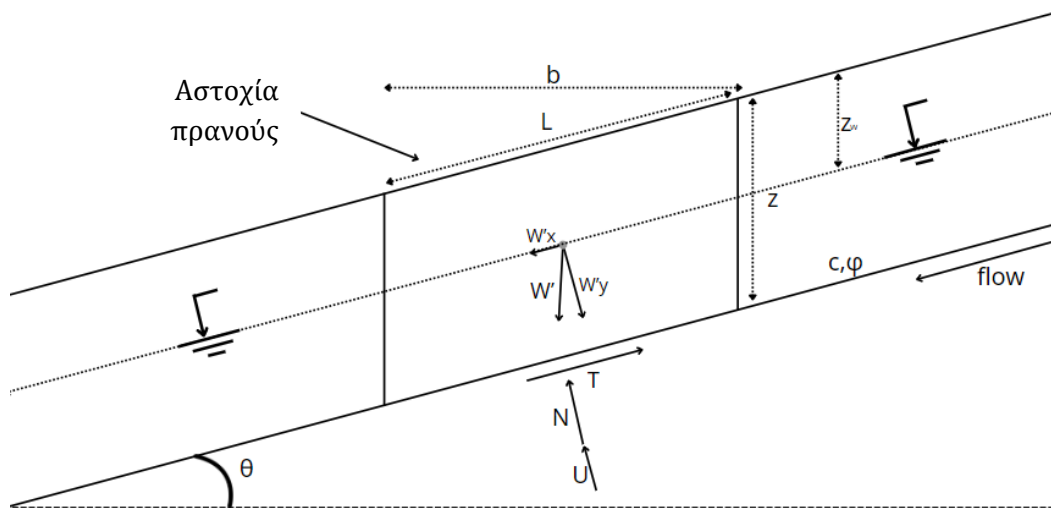
$$SF = \frac{\text{Διαθέσιμη διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού}}{\text{Διατμητική δύναμη που ασκείται στο εδαφικό υλικό}} = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + \sigma \cdot \tan \varphi}{\tau} \Rightarrow$$

$$SF = \frac{c + z \cdot \gamma \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} = \frac{\frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta} + \tan \varphi}{\frac{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta}} = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \quad (4.11)$$

2° Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (4.6), (4.7), (4.8), (4.9), (4.10). Επιπλέον, επειδή υπάρχει ροή και ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται παράλληλος προς την επιφάνεια του εδάφους, η εξίσωση (4.9) διαμορφώνεται ως εξής:



Σχήμα 4.8: Απειρομήκες πρανές παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

Συμπεριλαμβανομένης της πίεσης των πόρων λόγω του νερού, η ορθή τάση υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma' = \sigma - u = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta - (z - z_w) \cdot \gamma_w \cdot \cos^2 \theta \Rightarrow$$

$$\sigma' = \cos^2 \theta \cdot (\gamma \cdot z - z \cdot \gamma_w + z_w \gamma_w) \xrightarrow{\gamma' = \gamma - \gamma_w}$$

$$\sigma' = (\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \cos^2 \theta \quad (4.12)$$

Όπου:

$$\gamma_w = 10 \text{ [kN/m}^3\text{]},$$

$$u = \gamma_w \cdot z_w: \text{πίεση πόρων [kN/m}^2\text{]}$$

Κατά συνέπεια, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

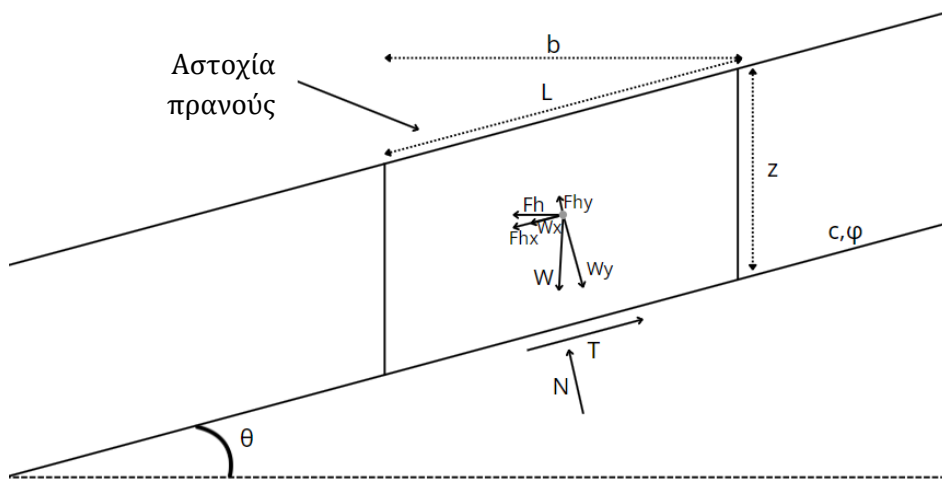
$$SF = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + \sigma' \cdot \tan \varphi}{\tau} \Rightarrow$$

$$SF = \frac{c + (\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \varphi \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \theta} = \frac{1}{\tan \theta}}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}$$

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \tan \theta} \quad (4.13)$$

3° Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με ψευδοστατική μέθοδο ανάλυσης, χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (4.6), (4.7), (4.8), (4.9), (4.10). Γίνεται η εφαρμογή μίας οριζόντιας σεισμικής δύναμης και η κατακόρυφη σεισμική δύναμη αμελείται, για την απλοποίηση του προβλήματος.



Σχήμα 4.9: Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες.

Αρχικά, γίνεται ο υπολογισμός της οριζόντιας σεισμικής δύναμης:

$$F_h = k_h \cdot W \quad (4.14)$$

Η οριζόντια σεισμική δύναμη αναλύεται σε x, y άξονες:

$$F_{hx} = k_h \cdot W \cdot \cos \theta, \quad (4.14. \alpha) \quad F_{hy} = k_h \cdot W \cdot \sin \theta \quad (4.14. \beta)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ενεργές τους τάσεις:

$$f_{hx} = k_h \cdot \gamma \cdot b \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \frac{\cos \theta}{b} = k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta \Rightarrow$$

$$f_{hx} = k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta \quad (4.15)$$

$$f_{hy} = k_h \cdot \gamma \cdot b \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \frac{\cos \theta}{b} = k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \Rightarrow$$

$$f_{hy} = k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (4.16)$$

Η διαθέσιμη διατμητική αντοχή τ_f στην βάση της λωρίδας προκύπτει ως εξής:

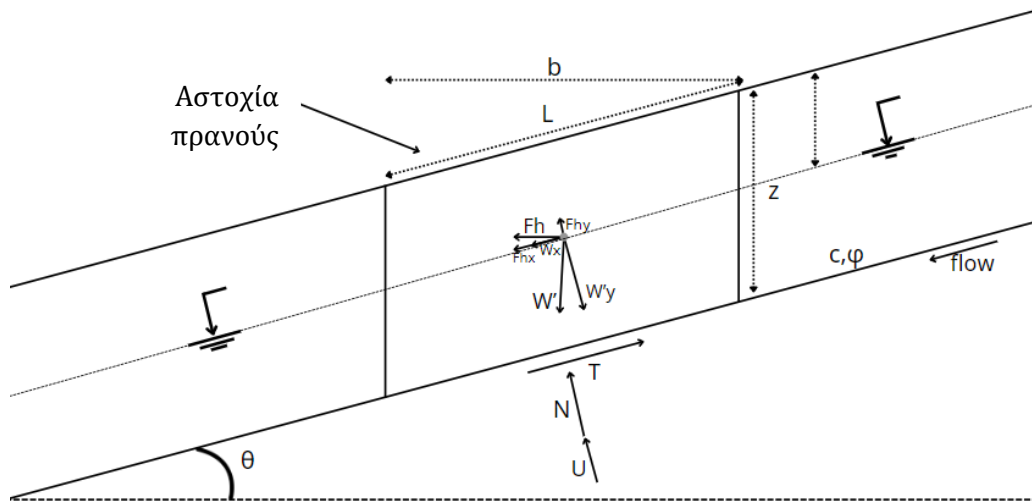
$$\tau_f = c + (\sigma - f_{hy}) \cdot \tan \varphi$$

Τέλος, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας:

$$\begin{aligned}
 SF &= \frac{\tau_f}{\tau + f_{hx}} = \frac{c + (\sigma - f_{hy}) \cdot \tan \varphi}{\tau + f_{hx}} \Rightarrow \\
 SF &= \frac{c + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta - k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta} = \\
 &= \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\cos \theta - k_h \cdot \sin \theta) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} = \\
 &= \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(\cos \theta - k_h \cdot \sin \theta) \cdot \tan \varphi}{\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta} \xrightarrow{\div \cos \theta} \\
 SF &= \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\tan \theta + k_h} \Rightarrow \\
 SF &= \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta} \quad (4.17)
 \end{aligned}$$

4^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες και παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (4.6), (4.7), (4.8), (4.9), (4.10), (4.12), (4.15), (4.16) και ο αρχικός τύπος του συντελεστή ασφαλείας παραμένει ο ίδιος με του 3^{ου} σεναρίου.



Σχήμα 4.10: Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές και υγρές συνθήκες.

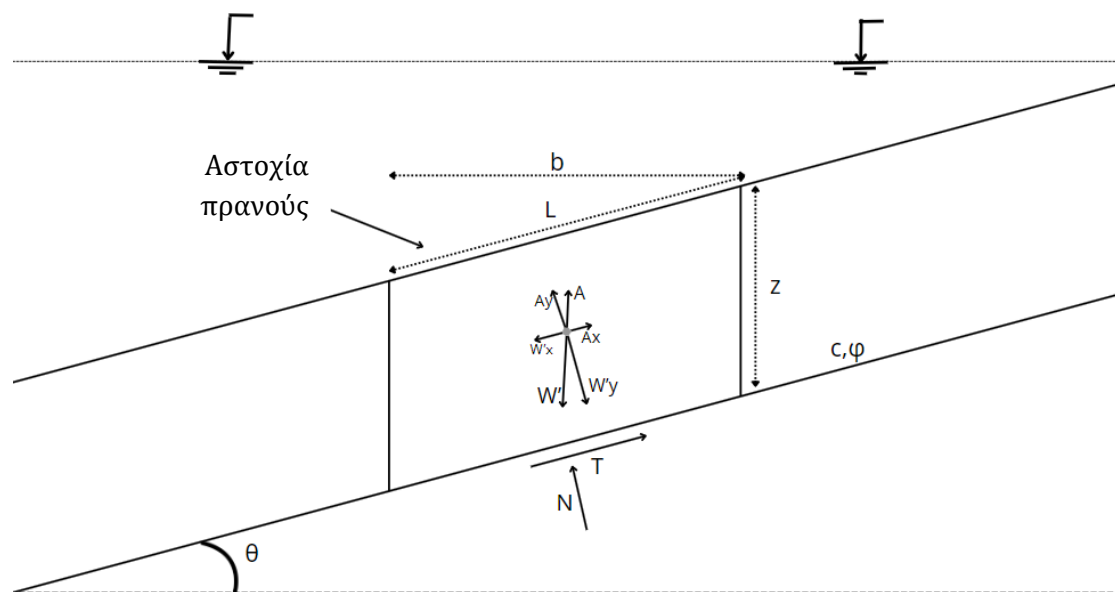
Κατά συνέπεια, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 SF &= \frac{\tau_f}{\tau + f_{hx}} = \frac{c + (\sigma - f_{hy}) \cdot \tan \varphi}{\tau + f_{hx}} \Rightarrow \\
 SF &= \frac{c + [(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \cos^2 \theta - k_h \cdot (\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta] \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta} =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{[(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \cos \theta \cdot (\cos \theta - k_h \cdot \sin \theta)] \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} = \\ &= \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta)}{(\tan \theta + k_h)} \cdot \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w)}{\gamma \cdot z} \cdot \tan \varphi \Rightarrow \\ \mathbf{SF} &= \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta)}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right)} \cdot \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w)}{\gamma \cdot z} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \quad (4.18) \end{aligned}$$

5^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές βυθισμένο σε νερό (πλημμύρα)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας σε βυθισμένο πρανές υπολογίζονται οι δυνάμεις:



Σχήμα 4.11: «Βυθισμένο» απειρομήκες πρανές.

Βάρος λωρίδας:

$$\mathbf{W} = \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{z} \quad (4.19)$$

Άνωση:

$$\mathbf{A} = \gamma_{\mathbf{w}} \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{z} \cdot \mathbf{1} \quad (4.20)$$

Αφαιρείται η εξίσωση (4.19) από τη (4.20):

$$\begin{aligned} W - A &= (\gamma - \gamma_w) \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{z} \Rightarrow \\ \mathbf{W}' &= \boldsymbol{\gamma}' \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{z} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Οπότε, η ορθή ενεργός και η διατμητική δύναμη:

$$\mathbf{N}' = \boldsymbol{\gamma}' \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{z} \cdot \cos \theta \quad (4.22)$$

Ομοίως, η ορθή και η διατμητική τάση:

$$\sigma' = \gamma' \cdot \mathbf{z} \cdot \cos^2 \theta \quad (4.24)$$

Τέλος, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας:

$$SF = \frac{\tau_f}{\tau'} = \frac{c + \sigma' \cdot \tan \varphi}{\tau'} = \frac{c + z \cdot \gamma' \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \varphi}{\gamma' \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} = \frac{c}{\gamma' \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = \frac{c}{\gamma' \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \quad (4.26)$$

Στους πίνακες 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι αναλυτικές εξισώσεις για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 4.1: Αναλυτικές εξισώσεις για συνεκτικά εδάφη.

Είδος πρανούς	Εξισώσεις
Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες	$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$
Απειρομήκες πρανές υπό υγρές συνθήκες	$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \tan \theta}$
Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες	$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta}$
Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές και υγρές συνθήκες	$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta)}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right)} \cdot \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \tan \theta}$
Απειρομήκες βυθισμένο πρανές	$SF = \frac{c}{\gamma' \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$

Πίνακας 4.2: Αναλυτικές εξισώσεις για μη συνεκτικά εδάφη.

Είδος πρανούς	Εξισώσεις
Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες	$SF = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$
Απειρομήκες πρανές υπό υγρές συνθήκες	$SF = \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \tan \theta}$
Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες	$SF = \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta}$
Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές και υγρές συνθήκες	$SF = \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta)}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right)} \cdot \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \tan \theta}$

4.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων απειρομήκους πρανούς

Στη παρούσα υποενότητα, γίνεται μελέτη της ευστάθειας και ανάλυση των αποτελεσμάτων για πρανή πεπερασμένου ύψους, σύμφωνα με τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 4.2.3. Μελετούνται δύο περιπτώσεις εδαφικών πρανών, το οδικό και το σιδηροδρομικό επίχωμα, τα οποία διαφέρουν στη γεωμετρία τους και έχουν τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά. Οι εδαφικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας είναι χαρακτηριστικές για την περιοχή των Θερμοπυλών, συγκεκριμένα στην περιοχή του αυτοκινητοδρόμου ΠΑΘΕ. Οι υπολογισμοί

έγιναν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Microsoft Excel και οι περιπτώσεις που εξετάζονται είναι οι ακόλουθες:

1^η Περίπτωση: Οδικό επίχωμα

Το οδικό επίχωμα χαρακτηρίζεται από γωνία θ , η οποία ισούται με 33.5° , συνοχή υλικού $5(\text{kPa})$, γωνία εσωτερικής τριβής 32° , ύψος επιχώματος $4.4(\text{m})$ και ειδικό βάρος εδαφικού υλικού $20(\text{kN/m}^3)$.

1^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες:

Στο πρώτο σενάριο, η ανάλυση για απειρομήκη πρανή, γίνεται σε ξηρές και στατικές συνθήκες, χωρίς την παρουσία νερού και σεισμικής διέγερσης, πιο συγκεκριμένα ελέγχεται η ευστάθεια του πρανούς μόνο υπό την επίδραση των βαρυτικών δυνάμεων.

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$
$$SF = 1.07$$

2^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα:

Στο δεύτερο σενάριο, η ανάλυση για απειρομήκη πρανή, γίνεται σε υγρές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα, χωρίς τη παρουσία σεισμικής διέγερσης. Κατά τη διαδικασία αυτή, ελέγχεται η ευστάθεια του πρανούς υπό στατικές συνθήκες με ροή νερού. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα στους παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των πρανών σε στατικές συνθήκες. Η επιφάνεια του νερού βρίσκεται σε ύψος $z_w = z/2 = 4.4/2 = 2.2\text{m}$.

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$
$$SF = 0.87$$

3^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες:

Στο τρίτο σενάριο, η ανάλυση για απειρομήκη πρανή, γίνεται σε ξηρές και ψευδοστατικές συνθήκες, χωρίς την παρουσία νερού. Ειδικότερα, μελετάται η επιρροή των σεισμικών φορτίσεων στους παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των πρανών σε στατικές και ξηρές συνθήκες. Ο οριζόντιος σεισμικός συντελεστής που επιλέγεται για την περιοχή των Θερμοπυλών αντιστοιχεί σε σεισμικό συντελεστή ζώνης II, συνεπώς ο οριζόντιος σεισμικός συντελεστής που επιλέγεται είναι $k_h = 0.24$. Ο κατακόρυφος σεισμικός συντελεστής αμελείται για την απλοποίηση της ανάλυσης.

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = 0.67$$

4° Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες και παρουσία υδροφόρου ορίζοντα:

Στο τέταρτο σενάριο, πραγματοποιείται η ανάλυση για απειρομήκη πρανή υπό ψευδοστατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα, ελέγχοντας δηλαδή την ευστάθεια του πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες με ροή νερού. Ισχύει ό,τι προαναφέρθηκε στο δεύτερο και στο τρίτο σενάριο. Συνεπώς, η επιφάνεια του νερού βρίσκεται σε ύψος $z_w = z/2 = 4.4/2 = 2.2\text{m}$ και ο οριζόντιος σεισμικός συντελεστής που επιλέγεται είναι $k_h = 0.24$.

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta)}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right)} \cdot \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w)}{\gamma \cdot z} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = 0.53$$

5° Σενάριο: Απειρομήκες πρανές βυθισμένο σε νερό (πλημμύρα):

Στο πέμπτο σενάριο, η ανάλυση για απειρομήκη πρανή, γίνεται σε βυθισμένο πρανές από νερό, υπό στατικές συνθήκες. Το πρανές είναι πλήρως βυθισμένο.

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{c}{\gamma' \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = 1.19$$

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που υπολογίσθηκαν για κάθε ένα από τα πέντε σενάρια:

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.

Σενάριο	Συντελεστής ασφαλείας (SF)
1°: Στατικές συνθήκες	1.07
2°: Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	0.87
3°: Ψευδοστατικές συνθήκες	0.67
4°: Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	0.53
5°: Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	1.19

2^η Περίπτωση: Σιδηροδρομικό επίχωμα

Το σιδηροδρομικό επίχωμα χαρακτηρίζεται από γωνία θ , η οποία ισούται με 35° , συνοχή υλικού $5(\text{kPa})$, γωνία εσωτερικής τριβής 32° , ύψος επιχώματος $4.0(\text{m})$ και ειδικό βάρος εδαφικού υλικού $20(\text{kN/m}^3)$. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση του σιδηροδρομικού επιχώματος, ισχύει ότι προαναφέρθηκε σε κάθε αντίστοιχο σενάριο της περίπτωσης του οδικού επιχώματος.

1^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$
$$SF = 1.03$$

2^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$
$$SF = 0.88$$

3^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$
$$SF = 0.65$$

4^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες και παρουσία υδροφόρου ορίζοντα:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$
$$SF = 0.51$$

5^ο Σενάριο: Απειρομήκες πρανές βυθισμένο σε νερό(πλημμύρα):

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{c}{\gamma' \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$
$$SF = 1.16$$

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που υπολογίσθηκαν για κάθε ένα από τα πέντε σενάρια:

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.

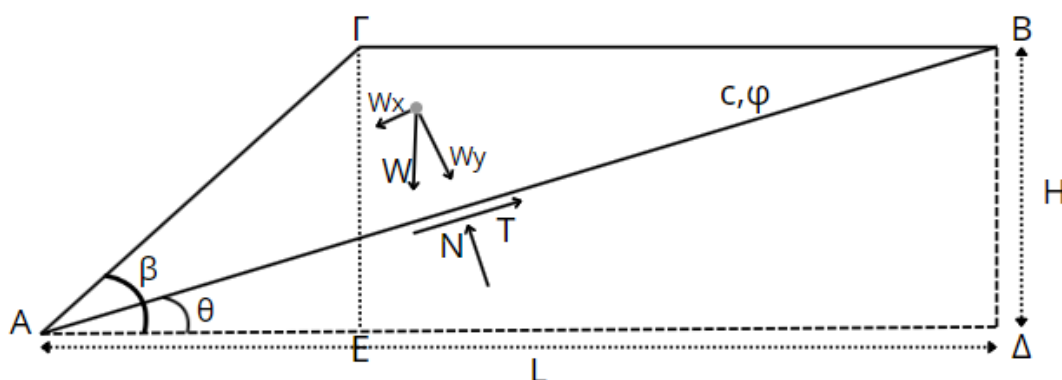
Σιδηροδρομικό επίχωμα	Συντελεστής ασφαλείας (SF)
1 ^ο : Στατικές συνθήκες	1.03
2 ^ο : Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	0.88
3 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες	0.65
4 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	0.51
5 ^ο : Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	1.16

4.2.3 Πρανή πεπερασμένου ύψους

Πρανή πεπερασμένου ύψους θεωρούνται τα πρανή που έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό ότι το ύψος τους είναι συγκρίσιμο του μήκους τους. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, θεωρείται χερσαίο πρανές ύψους H , ειδικού βάρους γ , υπό κλίση πρανούς β . Σε αντίθεση με τα απειρομήκη πρανή, τα πεπερασμένου ύψους εμφανίζουν την γωνία θ , η οποία αφορά τη κρίσιμη γωνία αστοχίας του πρανούς. Επίσης, το πρανές χαρακτηρίζεται από τις τιμές του εδαφικού υλικού c και φ , δηλαδή τη συνοχή για τη γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού. Η μελέτη που πραγματοποιείται, αφορά στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες. Επιπλέον, μελετήθηκε η παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και η περίπτωση που το χερσαίο πρανές είναι βυθισμένο με νερό.

1^ο Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας υπό στατικές συνθήκες, θεωρείται πρανές πεπερασμένου ύψους με:



Σχήμα 4.12: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες.

Αρχικά, γίνεται ο υπολογισμός των δυνάμεων:

Βάρος εδαφικού τμήματος:

$$W = \gamma \cdot (AB\Gamma)$$

Οπότε, για να υπολογιστεί το βάρος του εδαφικού τμήματος πρώτα πρέπει να βρεθεί το εμβαδό του τριγώνου ΑΒΓ.

$$\begin{aligned} (AB\Gamma) &= (A\Delta B\Gamma) - (A\Delta B) = \frac{(A\Delta + \Gamma B) \cdot H}{2} - \frac{A\Delta \cdot H}{2} = \frac{A\Delta \cdot H + \Gamma B \cdot H - A\Delta \cdot H}{2} = \\ &= \frac{\Gamma B \cdot H}{2} \Rightarrow \boxed{(AB\Gamma) = \frac{(A\Delta - AE) \cdot H}{2}} \quad (4.27. \alpha) \end{aligned}$$

$$\cos \beta = \frac{AE}{A\Gamma} \Rightarrow \boxed{AE = \cos \beta \cdot A\Gamma} \quad (4.27. \beta) \quad \sin \beta = \frac{\Gamma E}{A\Gamma} = \frac{H}{A\Gamma} \Rightarrow \boxed{A\Gamma = \frac{H}{\sin \beta}} \quad (4.27. \gamma)$$

$$\cos \theta = \frac{A\Delta}{AB} \Rightarrow \boxed{A\Delta = \cos \theta \cdot AB} \quad (4.27. \delta) \quad \sin \theta = \frac{H}{AB} \Rightarrow \boxed{AB = \frac{H}{\sin \theta}} \quad (4.27. \epsilon)$$

$$(\beta) \stackrel{(\gamma)}{\Rightarrow} \boxed{AE = H \cdot \frac{\cos \beta}{\sin \beta}} \quad (4.27. \zeta) \quad (\delta) \stackrel{(\epsilon)}{\Rightarrow} \boxed{A\Delta = H \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \theta}} \quad (4.27. \sigma\tau)$$

Κατά συνέπεια, το εμβαδόν του τριγώνου:

$$\begin{aligned} (\alpha) \stackrel{(\zeta, \sigma\tau)}{\Rightarrow} (AB\Gamma) &= \frac{\left(H \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \theta} - H \cdot \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \right) \cdot H}{2} = \frac{H^2 \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \theta} - H^2 \cdot \frac{\cos \beta}{\sin \beta}}{2} \stackrel{\sin \theta \cdot \sin \beta}{\Rightarrow} \\ (AB\Gamma) &= \frac{H^2 \cdot \cos \theta \cdot \sin \beta - H^2 \cdot \cos \beta \cdot \sin \theta}{2 \cdot \sin \theta \cdot \sin \beta} = \frac{1}{2} \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \Rightarrow \\ (AB\Gamma) &= \frac{1}{2} \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \quad (4.27) \end{aligned}$$

Οπότε, το βάρος του εδαφικού τμήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} W &= \gamma \cdot (AB\Gamma) = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \Rightarrow \\ W &= \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \quad (4.28) \end{aligned}$$

Επιπλέον, το βάρος αναλύεται στο x, y άξονα:

$$W_x = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \cdot \sin \theta \quad (4.28. \alpha)$$

$$W_y = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \cdot \cos \theta \quad (4.28. \beta)$$

Ορθή ενεργός δύναμη:

$$\begin{aligned} N &= W_y = W \cdot \cos \theta \Rightarrow \\ N &= \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \cdot \cos \theta \quad (4.29) \end{aligned}$$

Διατμητική δύναμη:

$$T = W_x = W \cdot \sin \theta \Rightarrow$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \quad (4.30)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ενεργές τάσεις:

Ορθή τάση:

$$\sigma = \frac{N}{AB} \xrightarrow{AB = \frac{H}{\sin \theta}} \sigma = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \cdot \cos \theta \cdot \frac{\sin \theta}{H} \Rightarrow$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta \quad (4.31)$$

Διατμητική τάση:

$$\tau = \frac{T}{AB} \xrightarrow{AB = \frac{H}{\sin \theta}} \tau = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \frac{\sin \theta}{H} \Rightarrow$$

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta \quad (4.32)$$

Τέλος, ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τη σχέση:

$$SF = \frac{\text{Διαθέσιμη διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού}}{\text{Διατμητική δύναμη που ασκείται στο εδαφικό υλικό}} = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + \sigma \cdot \tan \varphi}{\tau} \Rightarrow$$

$$SF = \frac{c + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi}{\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta} =$$

$$= \frac{c}{\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta} + \frac{\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi}{\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta} =$$

$$= \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{\cos \theta \cdot \tan \varphi}{\sin \theta} \Rightarrow$$

$$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \quad (4.33)$$

2° Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας παρουσία υδροφόρου ορίζοντα χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (4.28), (4.29), (4.30), (4.31), (4.32). Επιπλέον, επειδή υπάρχει ο υδροφόρος ορίζοντας, η εξίσωση (4.31) διαμορφώνεται ως εξής:

Αρχικά, γίνεται ο υπολογισμός της οριζόντιας σεισμικής δύναμης:

$$\mathbf{F}_h = \mathbf{k}_h \cdot \mathbf{W} \quad (4.36)$$

Η οριζόντια σεισμική δύναμη αναλύεται σε x, y άξονα:

$$F_{hx} = k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \cdot \cos \theta \quad (4.36. \alpha)$$

$$F_{hy} = k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \cdot \sin \theta \quad (4.36. \beta)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ενεργές τους τάσεις:

$$\begin{aligned} f_{hx} &= k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \cdot \cos \theta \cdot \frac{\sin \theta}{H} \Rightarrow \\ f_{hx} &= k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} f_{hy} &= k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \cdot \sin \theta \cdot \frac{\sin \theta}{H} \Rightarrow \\ f_{hy} &= k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (4.38)$$

Η διαθέσιμη διατμητική αντοχή τ_f στην βάση της λωρίδας μετατρέπεται ως εξής:

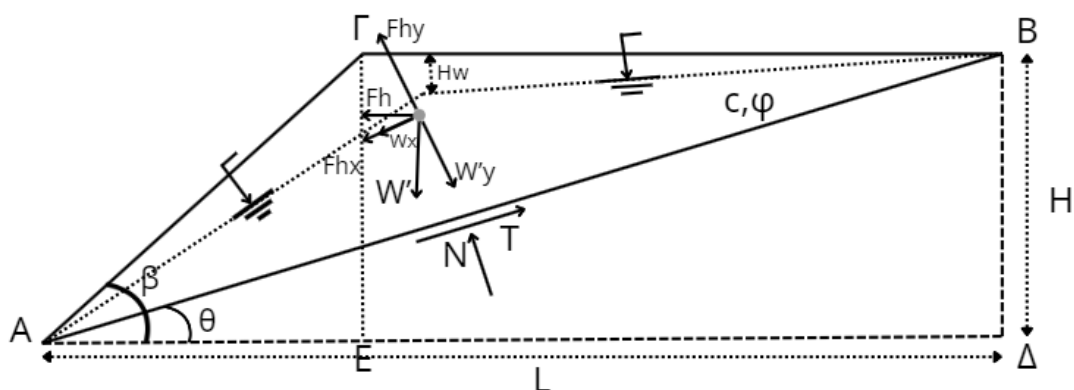
$$\tau_f = c + (\sigma - f_{hy}) \cdot \tan \varphi$$

Τέλος, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας:

$$\begin{aligned} SF &= \frac{\tau_f}{\tau + f_{hx}} = \frac{c + (\sigma - f_{hy}) \cdot \tan \varphi}{\tau + f_{hx}} \Rightarrow \\ SF &= \frac{c + \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta - k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta \right) \cdot \tan \varphi}{\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta + k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta} = \\ &= \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(\cos \theta - k_h \cdot \sin \theta) \cdot \tan \varphi}{\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta} = \\ &= \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\tan \theta + k_h} \Rightarrow \\ SF &= \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta} \end{aligned} \quad (4.39)$$

4^ο Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές συνθήκες και παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (4.28), (4.29), (4.30), (4.31), (4.32), (4.34), (4.36), (4.37), (4.38) και ο αρχικός τύπος του συντελεστή ασφαλείας παραμένει ο ίδιος με του 3^{ου} σεναρίου.



Σχήμα 4.15: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές συνθήκες και παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

Συνεπώς, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 SF &= \frac{\tau_f}{\tau + f_{hx}} = \frac{c + (\sigma - f_{hy}) \cdot \tan \varphi}{\tau + f_{hx}} = \\
 &= \frac{c + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta \cdot (\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w) - k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta \cdot (\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w) \right) \cdot \tan \varphi}{\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta + k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta} \\
 &= \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{(\cos \theta - k_h \cdot \sin \theta) \cdot \tan \varphi}{(\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} \\
 SF &= \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{(1 - k_h \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta} \quad (4.40)
 \end{aligned}$$

5^ο Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους βυθισμένο σε νερό (πλημμύρα)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας σε βυθισμένο πρανές υπολογίζονται οι δυνάμεις:


$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \quad (4.41)$$
$$A = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \quad (4.42)$$
$$\begin{aligned} W - A &= \frac{1}{2} \cdot (\gamma - \gamma_w) \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \Rightarrow \\ \mathbf{W}' &= \frac{1}{2} \cdot \boldsymbol{\gamma}' \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\theta})}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \end{aligned} \quad (4.43)$$
$$\mathbf{N}' = \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \cdot \cos \theta \quad (4.44) \quad \mathbf{T}' = \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot H^2 \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \theta \cdot \sin \beta} \cdot \sin \theta \quad (4.45)$$
$$\sigma' = \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta \quad (4.46)$$
$$\begin{aligned} \text{SF} = \frac{\tau_f}{\tau'} &= \frac{c + \sigma' \cdot \tan \varphi}{\tau'} = \frac{c + \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi}{\frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta} = \\ \text{SF} &= \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma' \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \end{aligned} \quad (4.48)$$

Για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας σε κάθε ένα σενάριο, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η κρίσιμη γωνία ($\theta_{critical}$) κατά την οποία το πρανές αστοχεί. Επειδή η κρίσιμη γωνία δεν είναι γνωστή όπως τα υπόλοιπα στοιχεία που περιγράφουν το εδαφικό τμήμα, λύνονται οι εξισώσεις (4.33), (4.35), (4.39), (4.40), (4.48) με διαδοχικές επαναλήψεις για τιμές του θ από 0 έως την τιμή της γωνίας β . Για τη τιμή του θ , που θα προκύψει η μικρότερη η τιμή συντελεστή ασφαλείας, τότε αυτή η γωνία είναι η κρίσιμη γωνία. Συνεπώς, η κρίσιμη γωνία που προκύπτει σε κάθε ένα σενάριο, επιλέγεται για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας σε κάθε ένα σενάριο ξεχωριστά.

Στους πίνακες 4.5 και 4.6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι αναλυτικές εξισώσεις για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 4.5: Αναλυτικές εξισώσεις για συνεκτικά εδάφη.

Είδος πρανούς	Εξισώσεις
Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες	$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$
Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό υγρές συνθήκες	$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$
Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές συνθήκες	$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta}$
Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές και υγρές συνθήκες	$SF = \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta}$
Πρανές πεπερασμένου ύψους βυθισμένο	$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma' \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$

Πίνακας 4.6: Αναλυτικές εξισώσεις για μη συνεκτικά εδάφη.

Είδος πρανούς	Εξισώσεις
Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες	$SF = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$
Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό υγρές συνθήκες	$SF = \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$
Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές συνθήκες	$SF = \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta}$
Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές και υγρές συνθήκες	$SF = \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta)}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right)} \cdot \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$
Πρανές πεπερασμένου ύψους βυθισμένο	$SF = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$

4.2.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων πρανών πεπερασμένου ύψους

Στην παρούσα υποενότητα, γίνεται μελέτη της ευστάθειας και ανάλυση των αποτελεσμάτων για πρανή πεπερασμένου ύψους, σύμφωνα με τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 4.2.3. Σημειώνεται ότι τα γεωμετρικά, τα μηχανικά χαρακτηριστικά και οι συνθήκες υπό τις οποίες έγιναν οι υπολογισμοί στην υποενότητα 4.2.2 για απειρομήκη πρανή, ισχύουν για τις αντίστοιχες περιπτώσεις οδικού και σιδηροδρομικού επιχώματος της ανάλυσης πρανών πεπερασμένου ύψους. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται είναι οι ακόλουθες:

1^η Περίπτωση: Οδικό επίχωμα

Το οδικό επίχωμα χαρακτηρίζεται από τη γωνία $\beta = 33.5^\circ$, τη συνοχή υλικού $c = 5$ (kPa), τη γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi = 32^\circ$, το ύψος του επιχώματος $H = 4.4$ (m) και το ειδικό βάρος του εδαφικού υλικού $\gamma = 20$ (kN/m³). Η κρίσιμη γωνία υπολογίζεται με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Microsoft Excel σε κάθε ένα σενάριο ξεχωριστά.

1^ο Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$
$$SF = 2.34$$

Όπου:

$$\theta_{\text{critical}} = 24^\circ$$

2^ο Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$
$$SF = 1.98$$

Όπου:

$$\theta_{\text{critical}} = 23.5^\circ$$

3^ο Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές συνθήκες:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$
$$SF = 1.40$$

Όπου:

$$\theta_{\text{critical}} = 22^\circ$$

4° Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές συνθήκες και παρουσία υδροφόρου ορίζοντα:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = 1.18$$

Όπου:

$$\theta_{\text{critical}} = 20.5^\circ$$

5° Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους βυθισμένο σε νερό(πλημμύρα):

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma' \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = 3.23$$

Όπου:

$$\theta_{\text{critical}} = 22^\circ$$

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που υπολογίσθηκαν για κάθε ένα από τα πέντε σενάρια:

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.

Σενάριο	Συντελεστής ασφαλείας (SF)
1°: Στατικές συνθήκες	2.34
2°: Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	1.98
3°: Ψευδοστατικές συνθήκες	1.40
4°: Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	1.18
5°: Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	3.23

2^η Περίπτωση: σιδηροδρομικό επίχωμα

Το σιδηροδρομικό επίχωμα χαρακτηρίζεται από γωνία θ , η οποία ισούται με 35° , συνοχή υλικού 5(kPa), γωνία εσωτερικής τριβής 32° , ύψος επιχώματος 4.0(m) και ειδικό βάρος εδαφικού υλικού 20(kN/m³). Η κρίσιμη γωνία υπολογίζεται με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Microsoft Excel σε κάθε ένα σενάριο ξεχωριστά.

1° Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = 2.32$$

Όπου:

$$\theta_{\text{critical}} = 25^\circ$$

2° Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot H \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = 1.98$$

Όπου:

$$\theta_{\text{critical}} = 24^\circ$$

3° Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους ψευδοστατικές συνθήκες:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = 1.41$$

Όπου:

$$\theta_{\text{critical}} = 22.5^\circ$$

4° Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό ψευδοστατικές συνθήκες και παρουσία υδροφόρου ορίζοντα:

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta)} + \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta) \cdot \tan \varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right) \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = 1.19$$

Όπου:

$$\theta_{\text{critical}} = 21.5^\circ$$

5° Σενάριο: Πρανές πεπερασμένου ύψους βυθισμένο σε νερό(πλημμύρα):

Αποτέλεσμα συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma' \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \Rightarrow$$

$$SF = 3.24$$

Όπου:

$$\theta_{\text{critical}} = 23^\circ$$

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που υπολογίσθηκαν για κάθε ένα από τα πέντε σενάρια.

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.

Σενάριο	Συντελεστής ασφαλείας (SF)
1 ^ο : Στατικές συνθήκες	2.32
2 ^ο : Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	1.98
3 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες	1.41
4 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	1.19
5 ^ο : Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	3.24

4.3 Συμπεράσματα αναλυτικών μεθόδων

Με την ολοκλήρωση της εφαρμογής των παραπάνω αναλυτικών μεθόδων σε οδικά και σιδηροδρομικά επιχώματα, υπό ορισμένες συνθήκες, εξάγονται μερικά συμπεράσματα. Παρατηρείται στο Πίνακα 4.9 ,που παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα που υπολογίζονται στο Κεφάλαιο 4, πως οι μικρές διαφορές στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο επιχωμάτων, οριακά δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα του συντελεστή ασφαλείας σε κάθε σενάριο και πρακτικά οι διαφορές είναι πολύ μικρές μεταξύ οδικού και σιδηροδρομικού επιχώματος. Συνεπώς, ότι σχόλιο ακολουθήσει ισχύει για το οδικό αλλά και το σιδηροδρομικό επίχωμα.

Αρχικά, στο πρώτο σενάριο γίνεται έλεγχος ευστάθειας υπό στατικές συνθήκες, με τη μέθοδο των απειρομήκων πρανών προκύπτει πως τα πρανή οριακά ισορροπούν και ενδέχεται να αστοχήσουν εάν υποβληθούν σε δυσμενέστερες συνθήκες, ενώ με τη μέθοδο πεπερασμένου παρατηρείται ότι τα πρανή ισορροπούν και μπορούν να δεχτούν παραπάνω τάσεις. Στο δεύτερο σενάριο, όπου λαμβάνεται υπόψη ο υδροφόρος ορίζοντας, προκύπτει και για τις δύο μεθόδους ανάλυσης, πτώση του συντελεστή ασφαλείας, αλλά στα απειρομήκη παρατηρείται και αστοχία. Εν συνεχεία, στο τρίτο σενάριο κατά το οποίο εισάγονται ψευδοστατικές συνθήκες χωρίς τη παρουσία νερού παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη πτώση συγκριτικά με αυτή του δεύτερου σεναρίου. Οπότε, στο τέταρτο σενάριο προκύπτει ακόμα μεγαλύτερη πτώση του συντελεστή ασφαλείας, όπου συνδυάζονται ψευδοστατικές συνθήκες υπό την παρουσία υδροφόρου ορίζοντα. Τέλος, στο πέμπτο σενάριο παρατηρείται κάτι αξιοσημείωτο, πως στη περίπτωση της πλημμύρας τα επιχώματα τα οποία μελετήθηκαν με οποιαδήποτε μέθοδο, έγιναν πιο σταθερά και ο συντελεστής ασφαλείας αυξήθηκε σημαντικά

Οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν αποτελέσματα με σημαντική αριθμητική διαφορά μεταξύ τους αλλά με την ίδια συμπεριφορά. Δηλαδή, τα επιχώματα που ελέγχονται με τη μέθοδο πεπερασμένου ύψους βρίσκονται σε ισορροπία σε όλα τα σενάρια, αλλά παρουσιάζεται μείωση του συντελεστή ασφαλείας στο δεύτερο, τρίτο, τέταρτο σενάριο και υπάρχει αύξηση στο πέμπτο, ομοίως με τη μέθοδο απειρομήκους πρανές αρχικά βρίσκονται σε οριακή ισορροπία και μετέπειτα αστοχούν στο δεύτερο, τρίτο, τέταρτο σενάριο και στο πέμπτο αυξάνεται.

Πίνακας 4.9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας.

SF Επίχωμα	Απειρομήκες		Πεπερασμένου ύψους	
	Οδικό	Σιδηροδρομικό	Οδικό	Σιδηροδρομικό
1 ^ο : Στατικές συνθήκες	1.07	1.03	2.34	2.32
2 ^ο : Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	0.87	0.88	1.98	1.98
3 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες	0.67	0.65	1.40	1.41
4 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	0.53	0.51	1.18	1.19
5 ^ο : Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	1.19	1.16	3.23	3.24

Αριθμητική μέθοδος

5.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Fine Elemental Method - FEM) είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος αριθμητικής ανάλυσης και εκτίμησης της ευστάθειας εδαφικών πρηνών. Η εν λόγω μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες είναι πρακτικά αδύνατο να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους, στοχεύοντας στην αποτίμηση της συμπεριφοράς του εδάφους για διάφορες συνθήκες (Βότσιος, 2022). Επιγραμματικά, αυτή η μέθοδος διαιρεί το πρηνές σε επιμέρους τμήματα, τα πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία θεωρούνται συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω κόμβων. Σε κάθε κόμβο ξεχωριστά επιλύονται εξισώσεις κίνησης και ισορροπίας ώστε να υπολογιστούν οι άγνωστες ποσότητες σε κάθε σημείο του πεδίου. Η διαδικασία κατάτμησης του πρηνούς σε μικρότερα τμήματα ονομάζεται διακριτοποίηση (Τσαίμου, 2006). Η FEM συνήθως χρησιμοποιείται για αναλύσεις ευστάθειας και υπολογισμό των παραμορφώσεων, με τη χρήση κάποιου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων και έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Στη παρούσα διπλωματική εργασία οι αριθμητικές προσομοιώσεις της ανάλυσης των εξεταζόμενων πρηνών πραγματοποιούνται με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων διακρίνεται σε τρία βασικά στάδια:

1. Προ-επεξεργασία

Στο πρώτο στάδιο, ορίζεται το υπό μελέτη εδαφικό πρηνές. Αρχικά, εισάγεται η γεωμετρία και οι αρχικές συνοριακές συνθήκες του μοντέλου, εν συνεχεία ορίζεται το είδους των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται και εισάγονται οι ιδιότητες του/των υλικών. Στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία διακριτοποίησης του μοντέλου, δημιουργώντας ένα πλέγμα (mesh), όπου επιλέγεται το πόσο πυκνό θα είναι, δηλαδή επιλέγεται το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων. Σημαντικό για τη σωστή διεξαγωγή της ανάλυσης, είναι η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας του πλέγματος, διότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός στοιχείων, συνεπάγεται και μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται και ο χρόνος επίλυσης.

2. Ανάλυση

Στο δεύτερο στάδιο, γίνεται η επίλυση γραμμικών και μη γραμμικών σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων, οι οποίες χαρακτηρίζουν το προσομοίωμα που κατασκευάστηκε στη προ-επεξεργασία. Η επίλυση των εξισώσεων πραγματοποιείται, λαμβάνοντας υπόψη τις αρχικές συνοριακές συνθήκες, ορίζοντας τα μητρώα ακαμψίας, τα διανύσματα φόρτισης και το μητρώο των άγνωστων μεταβλητών.

Οι άγνωστες μεταβλητές υπολογίζονται από τη σχέση:

$$[K]_m \cdot \{q\}_m = \{F\}_m \quad (5.1)$$

Όπου:

$[K]_m$: τετραγωνικός πίνακας που αποτελεί το μητρώο δυσκαμψίας,

$\{q\}_m$: το διάνυσμα των αγνώστων μετατοπίσεων στους επικόμβιους βαθμούς ελευθερίας,

$\{F\}_m$: το διάνυσμα των δράσεων που ασκείται στους επικόμβιους βαθμούς ελευθερίας.

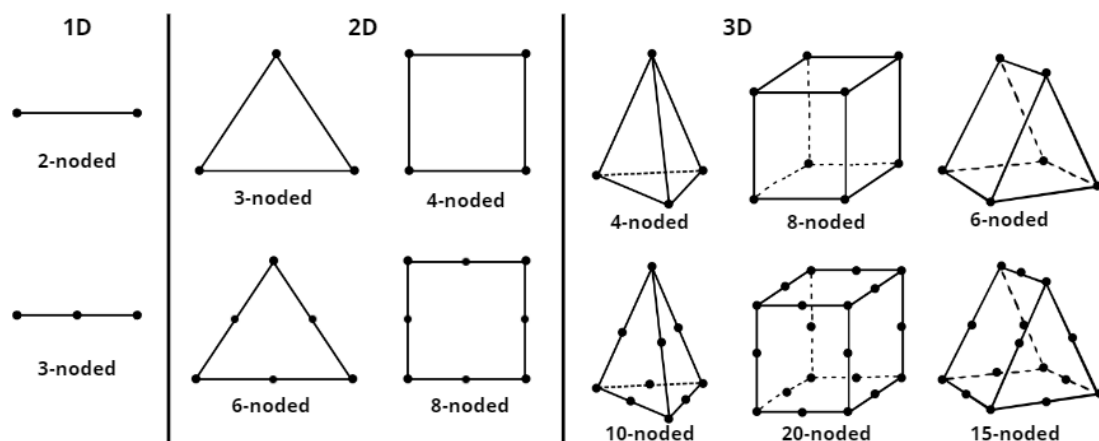
Το μητρώο δυσκαμψίας προκύπτει από τη γεωμετρία και τις ιδιότητες του υλικού, εάν αυτά τα παραμένουν σταθερά τότε οι σχέσεις είναι γραμμικές, εάν μεταβάλλονται χαρακτηρίζονται ως μη γραμμικές.

3. Μετεπεξεργασία

Στο τρίτο στάδιο, αποτυπώνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση, με τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας και με γραφικές απεικονίσεις. Οι γραφικές παραστάσεις παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων, των τάσεων και των παραμορφώσεων και επίσης στην μετεπεξεργασία παρουσιάζεται η απεικόνιση του παραμορφωμένου προσομοιώματος (Βότσιος, 2022).

5.2 Λογισμικό Plaxis 2D

Το πρόγραμμα Plaxis 2D αποτελεί ένα λογισμικό αριθμητικής ανάλυσης γεωτεχνικής μηχανικής, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιείται για αναλύσεις δισδιάστατων μοντέλων, που προσομοιώνουν εδαφικές μάζες σε διάφορες συνθήκες (στατικές, ψευδοστατικές, υγρές συνθήκες και δυναμική φόρτιση). Τα πεπερασμένα στοιχεία εκτός από διδιάστατα, μπορεί να είναι μονοδιάστατα και τριδιάστατα. Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται τα βασικά είδη πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 5.1: Βασικά είδη πεπερασμένων στοιχείων.

Με το παρόν λογισμικό υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης του εδάφους με σύνθετη στρωματογραφία, διαφόρων κατασκευών (σήραγγες, τοίχη αντιστήριξης, θεμέλια, οδικά, σιδηροδρομικά επιχώματα, κ.α) και ταυτόχρονα να υποβάλεται το μοντέλο σε σύνθετες

καταστάσεις, όπως βροχοπτώσεις, σεισμούς, αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας και πλημμύρες.

Στο Plaxis 2D η ανάλυση προσομοιωμάτων εδάφινων πρυνών γίνεται σε τρεις φάσεις, οι οποίες βασίζονται στα τρία βασικά στάδια ανάλυσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, που προαναφέρθηκαν στην ενότητα 5.1 και υπάρχει και μια τέταρτη φάση απεικόνισης αποτελεσμάτων. Οι φάσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

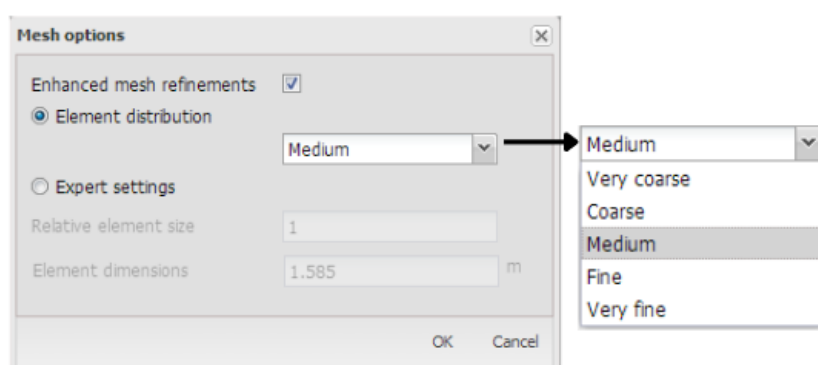
1. Εισαγωγή δεδομένων

Η πρώτη φάση (input) βασίζεται στο στάδιο της προ-επεξεργασίας, κατά την οποία δημιουργείται το προσομοίωμα που μελετάται. Αρχικά, γίνεται ο ορισμός των μονάδων μέτρησης, οι τιμές βασικών ποσοτήτων και τα όρια που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και παράλληλα επιλέγεται το είδος των πεπερασμένων στοιχείων για το τρέχον προσομοίωμα.

Εικόνα 5.2: Ορισμός μονάδων μέτρησης, όρια και είδος πεπερασμένων στοιχείων.

Εικόνα 5.3: Ορισμός τιμών βασικών ποσοτήτων.

Η επιλογή των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται μεταξύ 6-κομβικών και 15-κομβικών (τριγωνικά στοιχεία), γιατί αυτά διαθέτει το λογισμικό. Η επιλογή κρίνεται από τη επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων, την ταχύτητα που πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί αλλά και την μνήμη που μπορεί να διατεθεί. Αν κρίνεται απαραίτητη υψηλή ακρίβεια, τότε επιλέγονται 15-κομβικά στοιχεία, με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο χρόνος εξαγωγής των αποτελεσμάτων αλλά και η μνήμη των αρχείων. Εν αντιθέση, αν επιλεχθούν 6-κομβικά η ακρίβεια, ο χρόνος και η μνήμη μειώνονται. Στη συνέχεια, ορίζεται η γεωμετρία των εδαφικών στρώσεων και όποιων κατασκευών και επιπλέον γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων των υλικών που χρησιμοποιούνται για το υπό μελέτη μοντέλο. Το τελευταίο βήμα της προ-επεξεργασίας είναι ο καθορισμός του πλέγματος, δηλαδή η διακριτοποίηση, και οι επιλογές πυκνότητας του πλέγματος είναι πολύ αραιό (very coarse), αραιό (coarse), μέτριο (medium), πυκνό (fine) και πολύ πυκνό (very fine), βέβαια υπάρχει και η δυνατότητα να ορισθεί χειροκίνητα η πυκνότητα του πλέγματος.



Εικόνα 5.4: Ρυθμίσεις δημιουργίας πλέγματος.

2. Υπολογισμοί

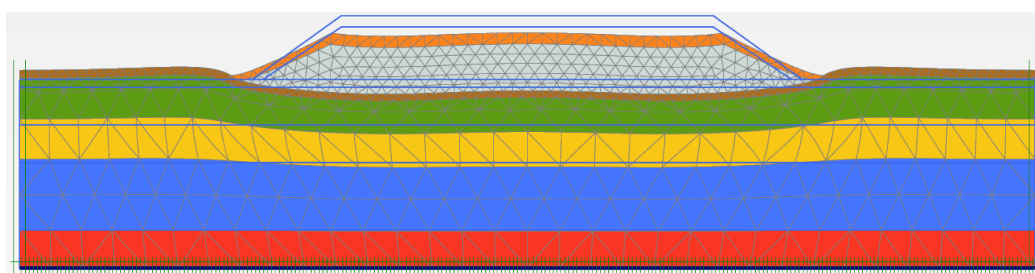
Η δεύτερη φάση (Calculation) βασίζεται στο στάδιο της ανάλυσης, κατά την οποία στήνονται τα στάδια που θα πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί. Αρχικά, γίνεται ο προσδιορισμός των αρχικών συνθηκών (Initial Phase) που επικρατούν στο υπό μελέτη προσομοίωμα. Στις αρχικές συνθήκες υπολογίζονται οι αρχικές υδροστατικές πιέσεις και οι αρχικές γεωστατικές τάσεις που επικρατούν στο μοντέλο. Μετέπειτα, δημιουργούνται τα σενάρια κατά τα οποία υποβάλλεται το προσομοίωμα, όπως στατικές, ψευδοστατικές συνθήκες, ροή νερού, αλλαγή θέσης του υδροφόρου ορίζοντα, βυθισμένο σε νερό, αλλαγές στη θερμοκρασία του μοντέλου, κ.α. Αφού δημιουργήθουν τα σενάρια στα οποία υποβάλλεται το υπό μελέτη προσομοίωμα, για να υπάρξει η δυνατότητα εύρεσης του συντελεστή ασφαλείας σε κάθε σενάριο, πρέπει να δημιουργήθουν στάδια υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας σε κάθε σενάριο. Οπότε, δημιουργούνται τα στάδια υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας σε όποιο σενάριο κρίνεται απαραίτητη η εύρεση του. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας γίνεται με τη μέθοδο Phi-c Reduction-Safety, κατά την οποία μειώνεται σταδιακά η αντοχή του εδάφους και όταν υπάρξει αστοχία ο αντίστοιχος συντελεστής μείωσης αντοχής θεωρείται ο παράγοντας ασφαλείας στην αντοχή του εδάφους. Στην Εικόνα 5.4 δίνεται ένα παράδειγμα υπολογισμών σε ένα εδαφικό επίχωμα.



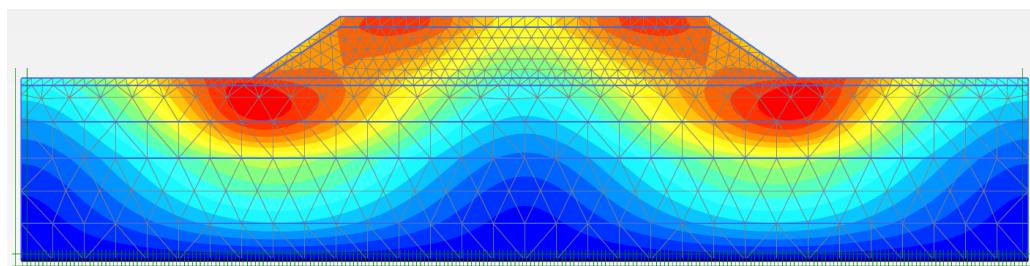
Εικόνα 5.5: Στάδια υπολογισμού εδαφικού επιχώματος.

3. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

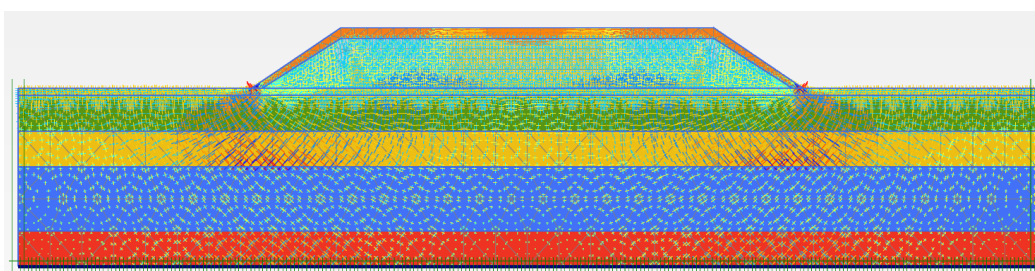
Η τρίτη φάση (Output) βασίζεται στο στάδιο της μετα-επεξεργασίας, κατά το οποίο εξάγονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με γραφικές απεικονίσεις και αριθμητικά αποτελέσματα για κάθε ένα στάδιο υπολογισμού. Δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης παραμορφώσεων, μετατοπίσεων που υφίσταται το μοντέλο, καθώς και οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτό. Δίνονται κάποια παραδείγματα στις Εικόνες 5.5, 5.6, 5.7 για τις γραφικές απεικονίσεις που προκύπτουν για μία προσομοίωση.



Εικόνα 5.6: Παραμόρφωση προσομοιώματος.



Εικόνα 5.7: Συνολικές μετατοπίσεις.



Εικόνα 5.8: Τροχιές κυρίων παραμορφώσεων.

4. Γραφικές παραστάσεις

Τέλος, η τέταρτη φάση (Curves), όπως και η τρίτη (Output), αφορά το στάδιο της μετεπεξεργασίας, κατά την οποία δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει γραφικές παραστάσεις βάσει των αριθμητικών αποτελεσμάτων που υπολογίσθηκαν στην φάση του Calculation για κάθε επιμέρους στάδιο των υπολογισμών.

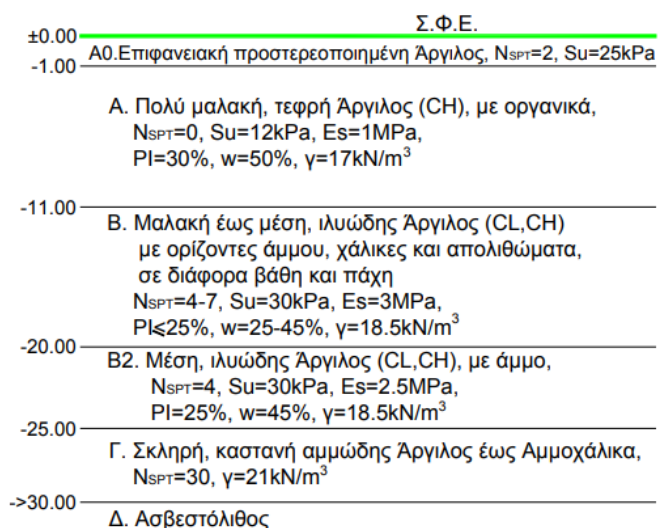
5.3 Αριθμητική προσομοίωση οδικού επιχώματος

Στη παρούσα ενότητα, εισάγονται δεδομένα στο πρόγραμμα Plaxis 2D, που αφορούν μια πραγματική περίπτωση, αφού χαρακτηρίζουν το οδικό επίχωμα της περιοχής των Θερμοπυλών και πιο συγκεκριμένα, της περιοχής του αυτοκινητοδρόμου ΠΑΘΕ. Βάσει μελέτης που έγινε το 2008 με σκοπό την κατασκευή οδικού επιχώματος στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ, καταγράφεται ότι ο αυτοκινητόδρομος διέρχεται από επίπεδη, βαλτώδη περιοχή και καλύπτεται από θαλάσσιες αποθέσεις. Η περιοχή βρίσκεται περίπου 1.0 m άνω της στάθμης της θάλασσας και ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας περίπου 0.5 m. Στην περιοχή αυτή (Εικόνα 5.8), προβλέπεται η κατασκευή οδικού επιχώματος ύψους 7.5 – 8.5 m και βελτίωση της κατάστασης εδάφους με τη κατασκευή μίας εξυγιαντικής στρώσης πάχους 1.0 m (Παπαχαραλάμπους κ.α., 2008).



Εικόνα 5.9: Περιοχή μελέτης.

Το έδαφος της περιοχής, χαρακτηρίζεται από την παρουσία πολύ μαλακής συμπίεστης αργίλου, υψηλής πλαστικότητας μέχρι το βάθος των 10 – 12 m, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος, μέχρι τα 25 m περίπου, συναντώνται μαλακοί αργιλικόι σχηματισμοί (Εικόνα 5.9).



Εικόνα 5.10: Στρωματογραφία εδάφους (Παπαχαραλάμπους κ.α., 2008).

Κατά την κατασκευή του επιχώματος υπήρξε αστοχία σε μήκος 200 m δημιουργώντας ρωγμή, με άνοιγμα περίπου 2.0 m και καθίζηση 1.0 m (Εικόνα 5.10), όταν το ύψος του επιχώματος έφτασε τα 4 – 4.5 m (Παπαχαραλάμπους κ.α., 2008).



Εικόνα 5.11: Αστοχία κατά την κατασκευή του οδικού επιχώματος στον ΠΑΘΕ (Παπαχαλαράμπους κ.α., 2008).

Η λύση στην παραπάνω αστοχία ήταν η κατασκευή του επιχώματος από ελαφρά υλικά διογκωμένης πολυστερίνης (EPS), ώστε το επίχωμα να έχει το απαραίτητο ύψος των 8.5 m (Παπαχαλαράμπους κ.α., 2008). Βάσει των προαναφερθέντων, δημιουργείται η ανάγκη κατασκευής δύο προσομοιώσεων. Στην πρώτη προσομοίωση εξετάζεται οδικό επίχωμα ύψους 4.4 m, το οποίο αποτελείται από εδαφικό υλικό και στη δεύτερη ένα οδικό επίχωμα ύψους 8.5 m, το οποίο αποτελείται από διογκωμένη πολυστερίνη και εδαφικό υλικό.

1^η Περίπτωση: Αριθμητική προσομοίωση οδικού επιχώματος από εδαφικό υλικό

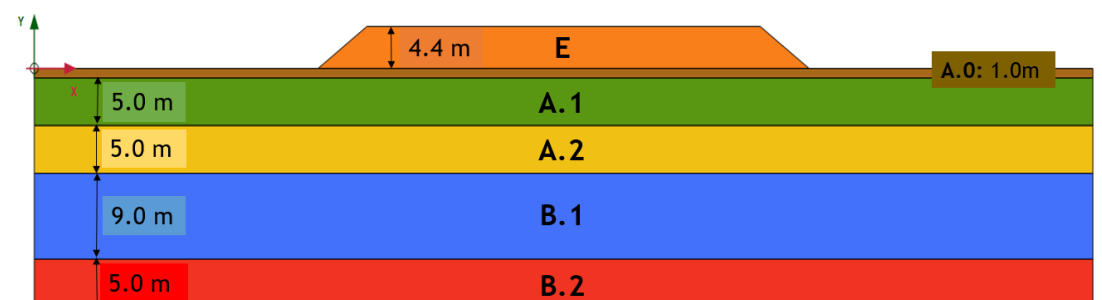
Στην πρώτη περίπτωση πραγματοποιείται η αριθμητική ανάλυση, για τη διερεύνηση της ευστάθειας του οδικού επιχώματος, το οποίο κατασκευάζεται από εδαφικό υλικό και παρουσιάζει αστοχία σε ύψος 4.4 m. Βάσει της γεωμετρίας και των εδαφικών χαρακτηριστικών του εδάφους και του επιχώματος, κατασκευάστηκε μοντέλο προς επίλυση στο λογισμικό Plaxis 2D. Οι συνολικές διαστάσεις του μοντέλου είναι 29.4 m ύψος, 143.2 m πλάτος και διαστάσεις επιχώματος 66.4 m βάσης και 53.2 m άνω πλευράς με κλίση 33.5° (Εικόνα 5.10). Η συμπεριφορά των εδαφικών υλικών προσεγγίζεται με το κριτήριο Mohr – Coulomb, ώστε να αποτυπώνεται η ρεαλιστική συμπεριφορά του επιχώματος και του υπεδάφους. Τα δεδομένα των εδαφικών υλικών και της γεωμετρίας, που εισάγονται στο λογισμικό, παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.1 και 5.2.

Πίνακας 5.1: Δεδομένα υλικών.

Στρώσεις	Υλικό	Πάχος (m)	Τύπος υλικού	Συνθήκες Στράγγισης
Επίχωμα (Ε)	Γαιώδες ή βραχώδες	4.4	Mohr – Coulomb	Στραγγισμένες
Εξυγιαντική στρώση (Α.0)	Προστεροποιημένη άργιλος	1.0	Mohr – Coulomb	Αστράγγιστες
A.1	Πολύ μαλακή τέφρη άργιλος	5.0	Mohr – Coulomb	Αστράγγιστες
A.2	Πολύ μαλακή τέφρη άργιλος	9.0	Mohr – Coulomb	Αστράγγιστες
B.1	Μαλακή – μέση ιλυώδης άργιλος	5.0	Mohr – Coulomb	Αστράγγιστες
B.2	Μέση ιλυώδης άργιλος	5.0	Mohr – Coulomb	Αστράγγιστες

Πίνακας 5.2: Παράμετροι υλικών.

Στρώσεις	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c (kN/m ²)	E (kN/m ²)	ν	ϕ (deg)
E	20	21.5	5	300.0E3	0.3	32
A.0	17	18.5	25	2500	0.3	0
A.1	17	20	12	1000	0.35	1.5
A.2	17	20	15	1000	0.35	0
B.1	18.5	20.5	30	3000	0.3	0
B.2	18.5	20.5	30	2500	0.3	0



Εικόνα 5.12: Εδαφικό προφίλ προσομοιώματος.

Εν συνεχεία, αφού εισαχθούν τα δεδομένα στο λογισμικό και επιλεγθούν 15-κομβικά τριγωνικά στοιχεία, γίνεται η διακριτοποίηση του προσομοιώματος, όπου επιλέγεται πολύ πυκνό πλέγμα για υψηλότερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Οι οριακές συνθήκες που επιλέγονται για το μοντέλο, συγκρατούν τη βάση του σταθερή, ενώ υπάρχει ελευθερία κίνησης στο κατακόρυφο άξονα.

Το προσομοίωμα ελέγχεται ως προς την ευστάθεια του, σε έξι σενάρια, σε στατικές, ψευδοστατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα, συνδυαστικά τα προαναφερθέντα, πλημμύρα και πλημμυρά εξ αριστερών του επιχώματος. Σε όλα τα σενάρια, τα στάδια των υπολογισμών παραμένουν τα ίδια (τρία στάδια), το μόνο που τα διαφοροποιεί είναι οι συνθήκες κάτω από τις οποίες βρίσκεται το μοντέλο. Στο πρώτο στάδιο υπολογισμού (Initial phase) γίνεται ο υπολογισμός των αρχικών τάσεων του εδάφους χωρίς το επίχωμα. Εν συνεχεία, στο δεύτερο στάδιο ενεργοποιείται το επίχωμα και γίνεται ο υπολογισμός των παραμορφώσεων, τάσεων, μετατοπίσεων κ.α, με πλαστική παραμόρφωση (Calculation type: Plastic). Στο τρίτο στάδιο και τελευταίο, γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας (Calculation type: Safety) του προσομοιώματος. Τα σενάρια παρουσιάζονται παρακάτω:

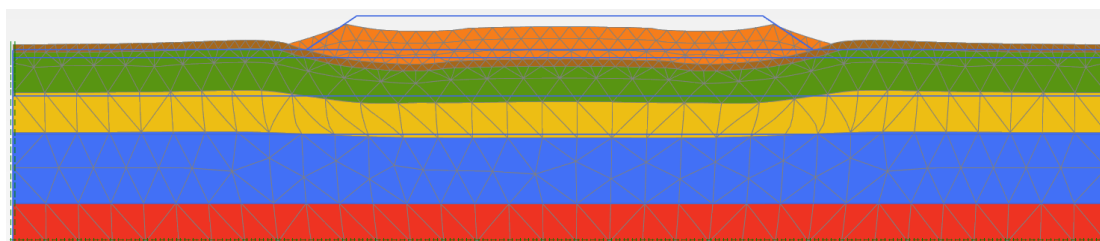
1^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες

Στο πρώτο σενάριο γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος υπό στατικές συνθήκες, δηλαδή ως προς τις βαρυτικές δυνάμεις που δημιουργούνται στο προσομοίωμα χωρίς τη παρουσία νερού.

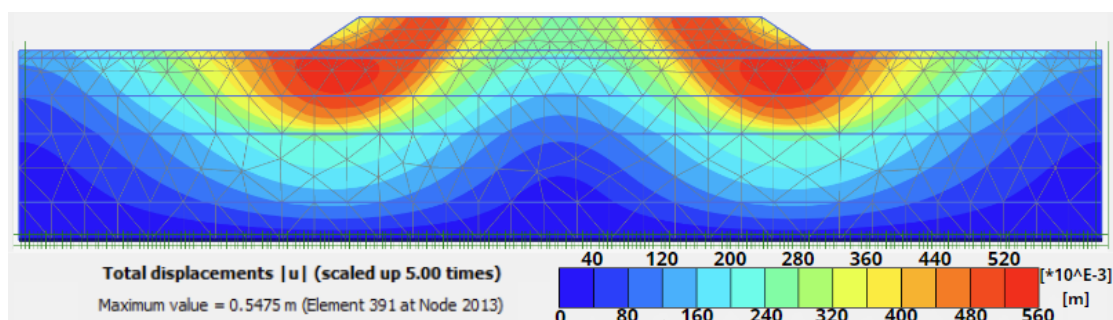
Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

$$SF = 1.04$$

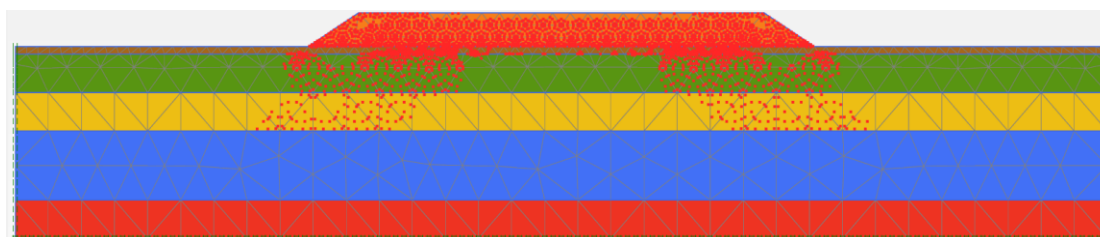
Επιπλέον, παρουσιάζονται γραφήματα στις εικόνες 5.11, 5.12, 5.13, για την περαιτέρω κατανόηση της συμπεριφοράς του οδικού επιχώματος, του εδάφους και των πιθανών αστοχιών που προκύπτουν.



Εικόνα 5.13: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό στατικές συνθήκες.



Εικόνα 5.14: Συνολικές μετατοπίσεις υπό στατικές συνθήκες.



Εικόνα 5.15: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό στατικές συνθήκες.

2^ο Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες

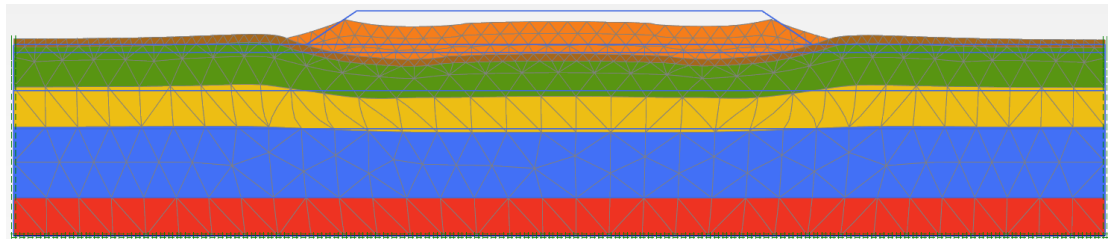
Στο δεύτερο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος υπό ψευδοστατικές συνθήκες χωρίς την παρουσία νερού. Ο οριζόντιος σεισμικός συντελεστής που επιλέγεται για την περιοχή των Θερμοπυλών αντιστοιχεί σε σεισμικό συντελεστή ζώνης II, συνεπώς ο οριζόντιος σεισμικός συντελεστής που επιλέγεται είναι $a_h = 0.24$, ενώ ο κατακόρυφος σεισμικός συντελεστής θεωρείται μηδενικός.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

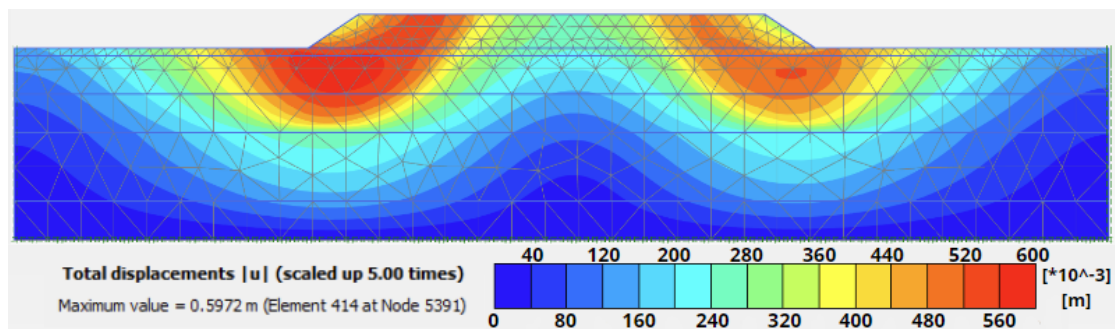
$$SF < 0 \rightarrow \text{Αστοχία}$$

Σημειώνεται, πως όταν προκύπτει αστοχία στο προσομοίωμα, αυτομάτως οι υπολογισμοί σταματούν, οπότε τα γραφήματα που ακολουθούν (Εικόνες 5.14, 5.15, 5.16), δεν παρουσιάζουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά του εδάφους. Όσο περισσότερο διαρκέσουν οι υπολογισμοί μέχρι να αστοχήσει το μοντέλο και σταματήσουν, τόσο πιο ρεαλιστικά είναι και τα γραφήματα που εξάγονται. Σε ιδιαίτερα δυσμενείς περιπτώσεις οι υπολογισμοί δεν

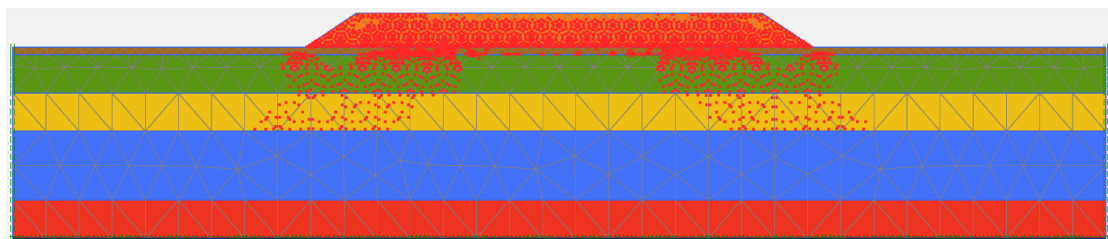
πραγματοποιούνται και το προσομοίωμα αστοχεί απευθείας, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής γραφημάτων.



Εικόνα 5.16: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό στατικές συνθήκες.



Εικόνα 5.17: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες.



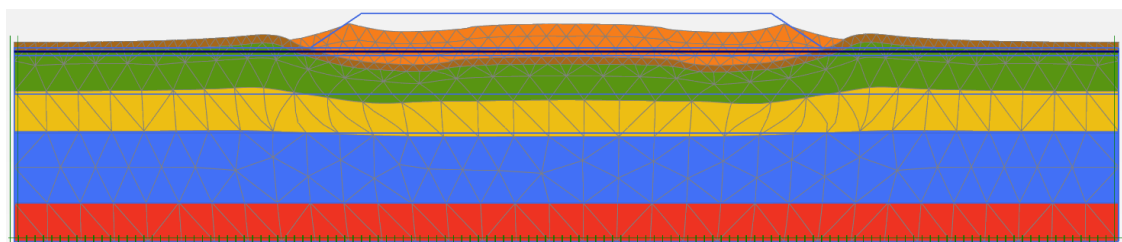
Εικόνα 5.18: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες.

3^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

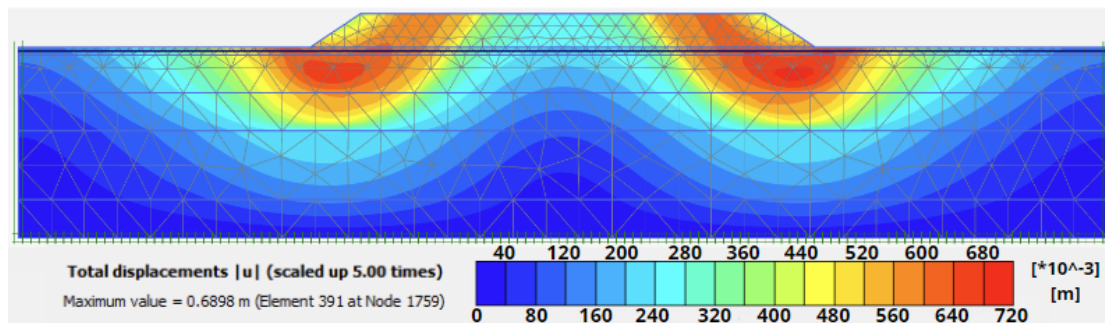
Στο τρίτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος υπό στατικές συνθήκες, παρουσία νερού. Ο υδροφόρος ορίζοντας τοποθετήθηκε στο μέσο της εξυγιαντικής στρώσης, δηλαδή 0.5 m κάτω από την βάση του επιχώματος.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

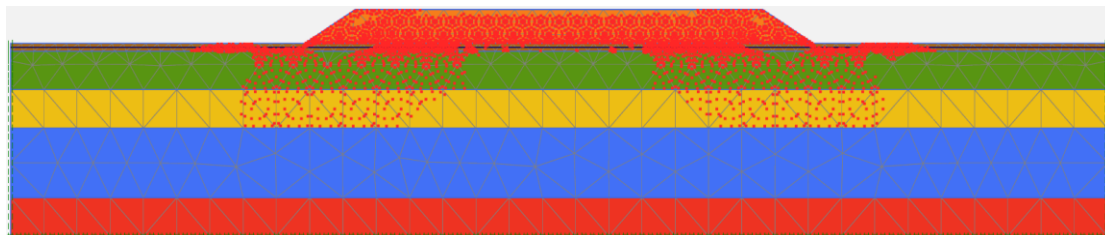
$$SF < 0 \rightarrow \text{Αστοχία}$$



Εικόνα 5.19: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 5.20: Συνολικές μετατοπίσεις παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 5.21: Σημεία πιθανής αστοχίας παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

4° Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

Στο τέταρτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος ύπο ψευδοστατικές συνθήκες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα. Για τον συντελεστή οριζόντιας επιτάχυνσης και για τον υδροφόρο ορίζοντα ισχύει ό,τι προαναφέρθηκε στο 2° και 3° σενάριο αντίστοιχα.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

$$SF < 0 \rightarrow \text{Αστοχία}$$

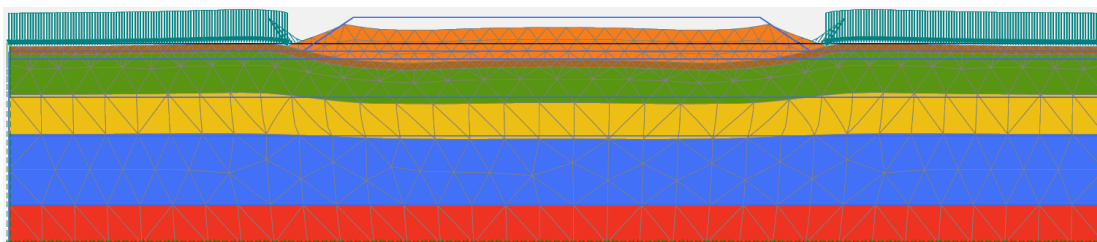
Σημειώνεται ότι στο συγκεκριμένο σενάριο, αστοχεί απευθείας το μοντέλο και δεν δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής γραφημάτων.

5° Σενάριο: Πλημμύρα παρουσία στατικών συνθηκών

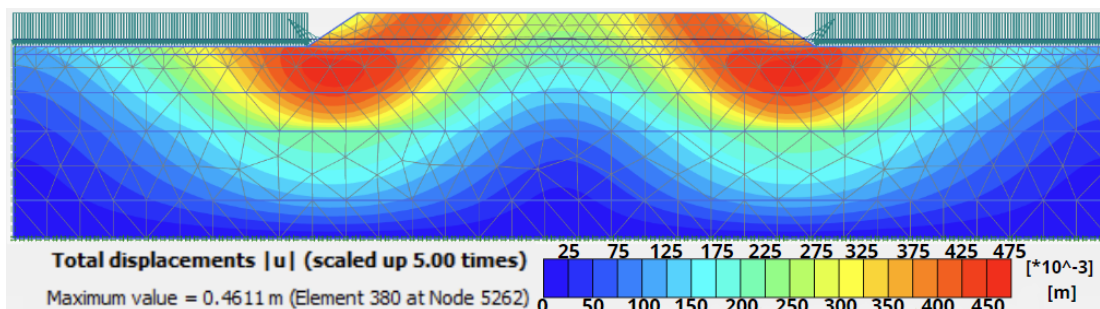
Στο πέμπτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα, άνω της επιφάνειας του εδάφους (πλημμύρα). Η στάθμη της πλημμύρας τοποθετήθηκε 1.0 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (εξυγιαντική στρώση), καθώς έχουν ληφθεί μέτρα αποστράγγισης και συλλογής του νερού με δίκτυο πλευρικών τάφρων (Γ. Παπαχαραλάμπους κ.α., 2008).

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

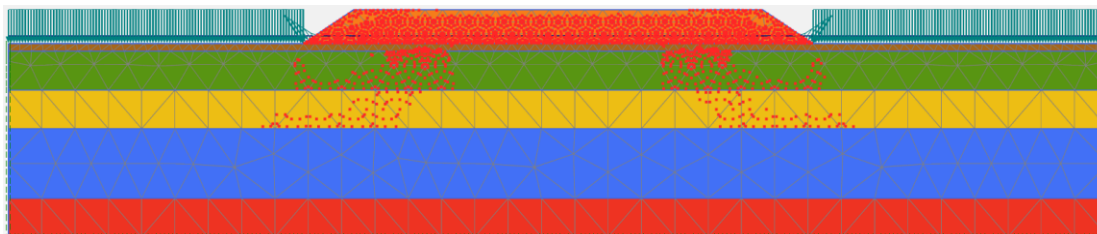
$$SF = 1.08$$



Εικόνα 5.22: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες.



Εικόνα 5.23: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες.



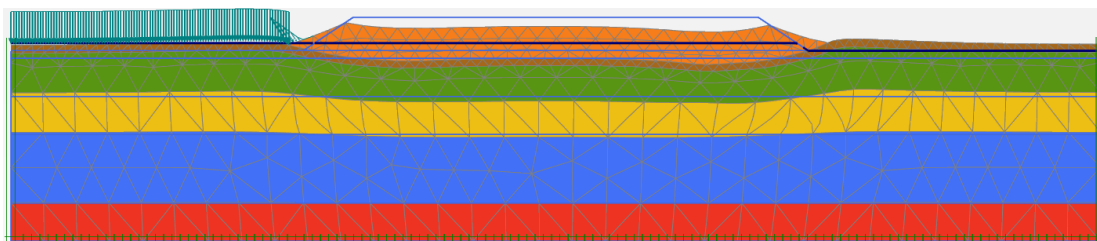
Εικόνα 5.24: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες.

6^ο Σενάριο: Πλημμύρα εξ αριστερών του οδικού επιχώματος παρουσία στατικών συνθηκών

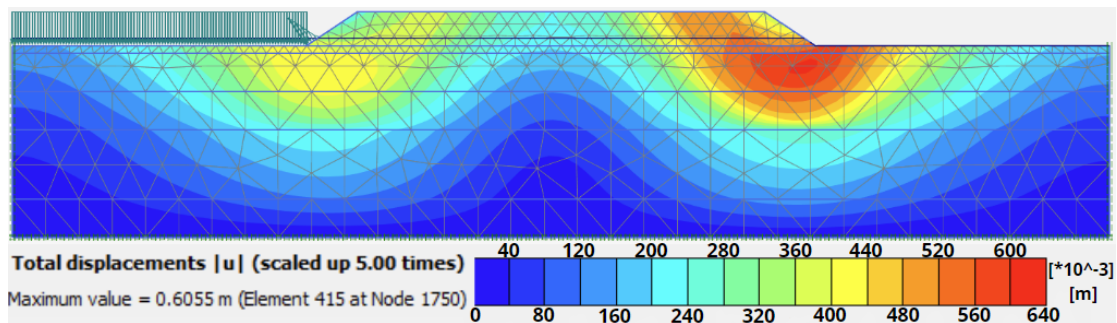
Στο έκτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος προκαλώντας πλημμύρα μόνο από την αριστερή πλευρά του επιχώματος. Για την ανώτατη στάθμη της πλημμύρας ισχύει ό,τι και στο 5^ο σενάριο.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

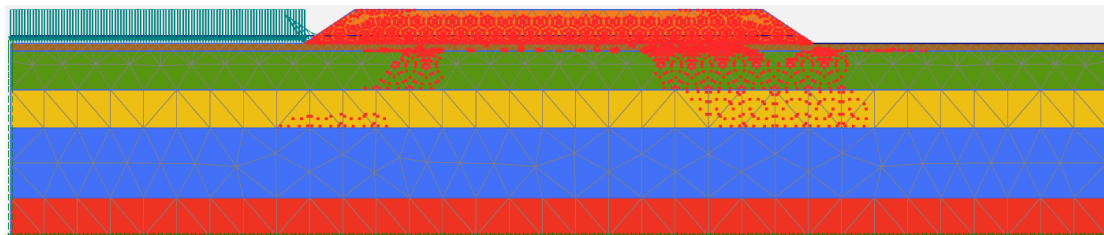
$$SF = 1.02$$



Εικόνα 5.25: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.



Εικόνα 5.26: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.



Εικόνα 5.27: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που υπολογίσθηκαν για κάθε ένα από τα έξι σενάρια.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.

Σενάριο	SF
1 ^ο : Στατικές συνθήκες	1.04
2 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες	Αστοχία
3 ^ο : Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία
4 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία
5 ^ο : Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	1.08
6 ^ο : Πλημμύρα εξ αριστερών υπό στατικές συνθήκες	1.02

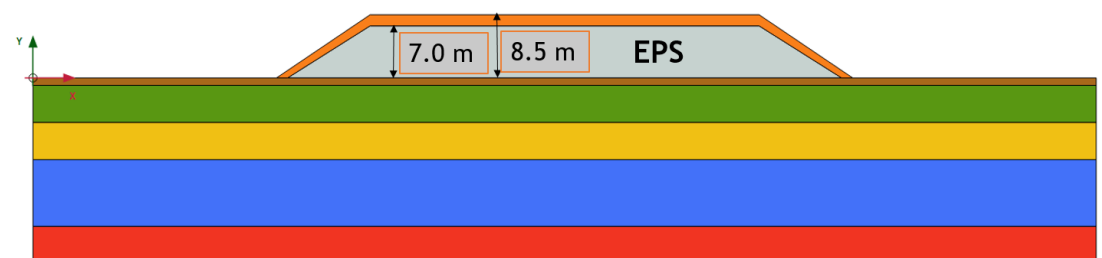
2^η Περίπτωση: Αριθμητική προσομοίωση οδικού επιχώματος από διογκωμένη πολυστερίνη

Στη δεύτερη περίπτωση πραγματοποιείται η αριθμητική ανάλυση, για τη διερεύνηση της ευστάθειας του οδικού επιχώματος, το οποίο κατασκευάζεται από ελαφρά υλικά διογκωμένης πολυστερίνης (EPS), για να αντιμετωπιστούν οι αστοχίες της πρώτης περίπτωσης. Το ύψος του επιχώματος είναι 8.5 m και η κλίση του παραμένει ίδια (33.5°), όπως και τα εδαφικά υλικά που αναφέρθηκαν στη πρώτη περίπτωση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εισάγονται δεδομένα στο λογισμικό για τη δημιουργία υλικού EPS (Πίνακας 5.4), με το οποίο κατασκευάζεται το εσωτερικό του επιχώματος (Εικόνα 5.17). Η κατασκευή που αποτελείται από EPS φτάνει στα 7.0 m και έχει σχήμα τραπεζίου. Στα σενάρια που

ακολουθούν, όπου εξετάζεται η ευστάθεια του οδικού επιχώματος με EPS, ισχύει ό,τι αναφέρθηκε και στην πρώτη περίπτωση.

Πίνακας 5.4: Δεδομένα και παράμετροι διογκωμένης πολυστερίνης.

EPS	Υλικό		Πάχος(m)	Τύπος υλικού		Συνθήκες Στράγγισης	
Δεδομένα	Διογκωμένη πολυστερίνη		7.0	Mohr – Coulomb		Αστράγγιστες	
EPS	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c (kN/m ²)	E (kN/m ²)	ν	φ (deg)	
Παράμετροι	0.5	1.15	100	5500	0.1	32	



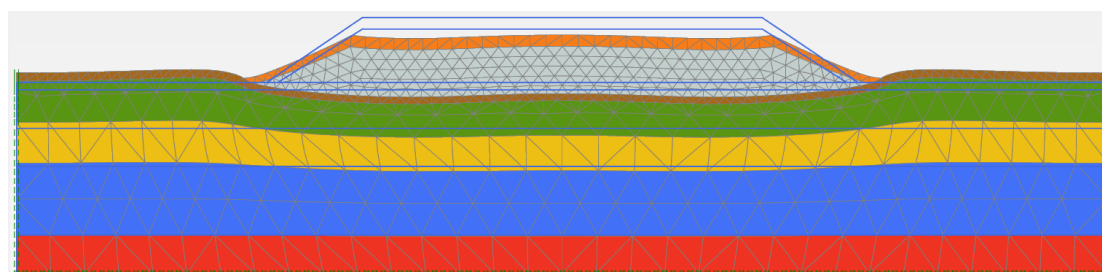
Εικόνα 5.28: Εδαφικό προφίλ προσομοιώματος.

1^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες

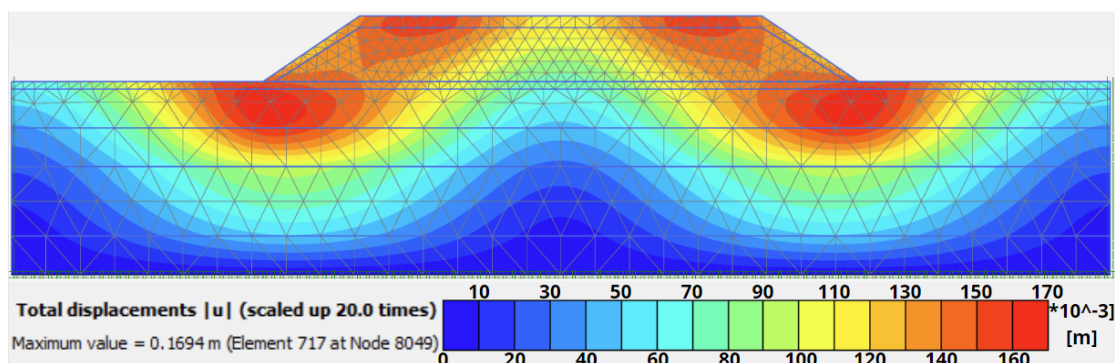
Στο πρώτο σενάριο γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος υπό στατικές συνθήκες, χωρίς τη παρουσία νερού.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

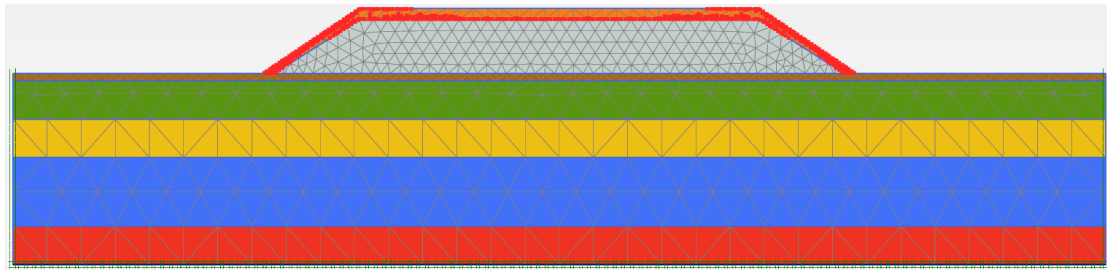
$$SF = 1.51$$



Εικόνα 5.29: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό στατικές συνθήκες.



Εικόνα 5.30: Συνολικές μετατοπίσεις υπό στατικές συνθήκες.



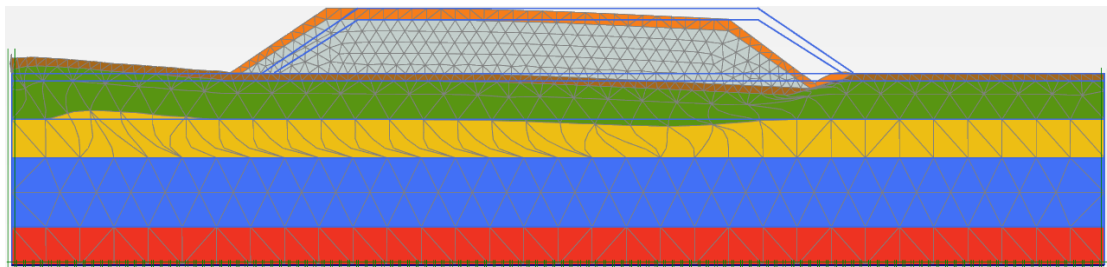
Εικόνα 5.31: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό στατικές συνθήκες.

2^ο Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες

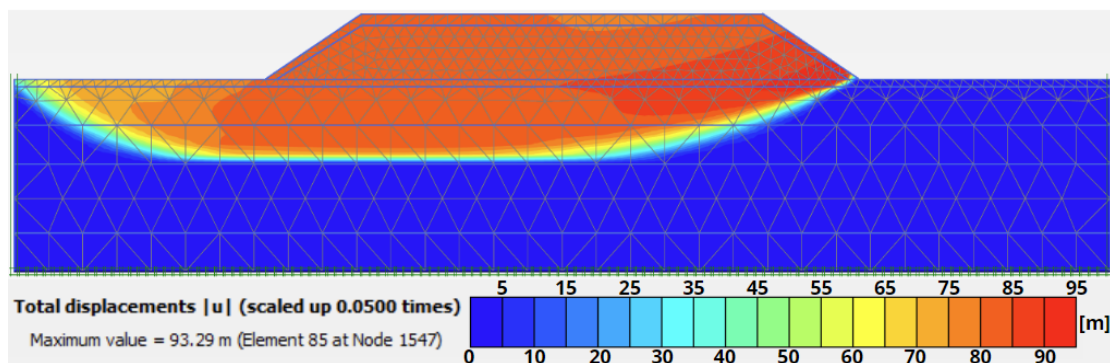
Στο δεύτερο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος υπό ψευδοστατικές συνθήκες χωρίς τη παρουσία νερού.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

$$SF < 0 \rightarrow \text{Αστοχία}$$



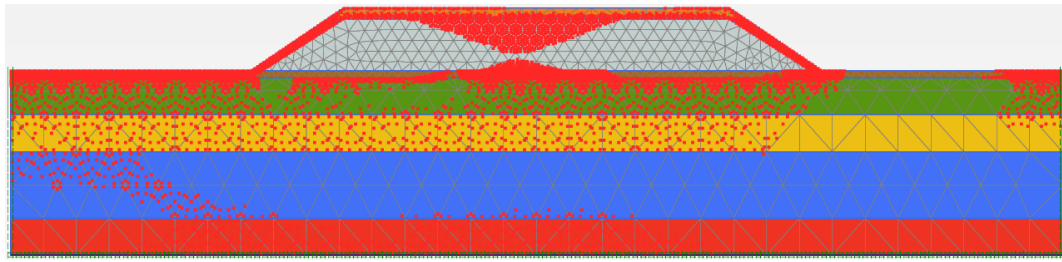
Εικόνα 5.32: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές συνθήκες.



Εικόνα 5.33: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες.

Οι τιμές των μετακινήσεων στην Εικόνα 5.33 δεν είναι ρεαλιστικές, οφείλονται στη μεθοδολογία του c-φ reduction για την εύρεση συντελεστή ασφαλείας του Plaxis κι εφόσον υπάρχει αστοχία οι τιμές είναι μη πραγματικές. Η συνθήκη της αστοχίας επηρεάζει τα εξαγόμενα αποτελέσματα και γραφήματα, γιατί οι υπολογισμοί σταματούν με το που προκύψει αστοχία και τα γραφήματα που εξαγονται βασίζονται σε μη ολοκληρωμένα αποτελέσματα. Επίσης, σημαντικό ρόλο έχει σε τι βαθμό θα ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί μέχρι να αστοχήσει το κάθε προσομοίωμα. Δηλαδή εάν αστοχήσει απευθείας το μοντέλο χωρίς να «τρέξει» καθόλου δεν θα εξαχθούν αποτελέσματα, ενώ αν ολοκληρωθούν κατά το ήμισυ ή κατά τα 9/10 οι υπολογισμοί και μετά αστοχήσει το προσομοίωμα, θα εξαχθούν αντίστοιχης «ποιότητας» αποτελέσματα. Συνεπώς, η ποιότητα και η ρεαλιστική αποτύπωση

των αποτελεσμάτων που εξάγονται σε προσομοιώματα που στοχεύουν βασίζονται στο ποσόστο ολοκλήρωσης των υπολογισμών μέχρι να προκύψει η αστοχία.



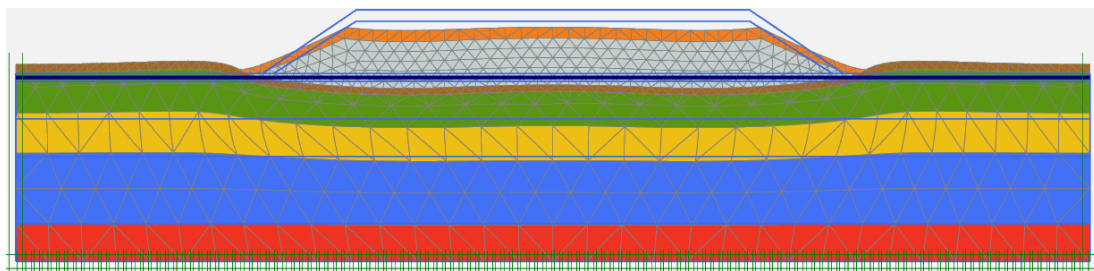
Εικόνα 5.34: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες.

3^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

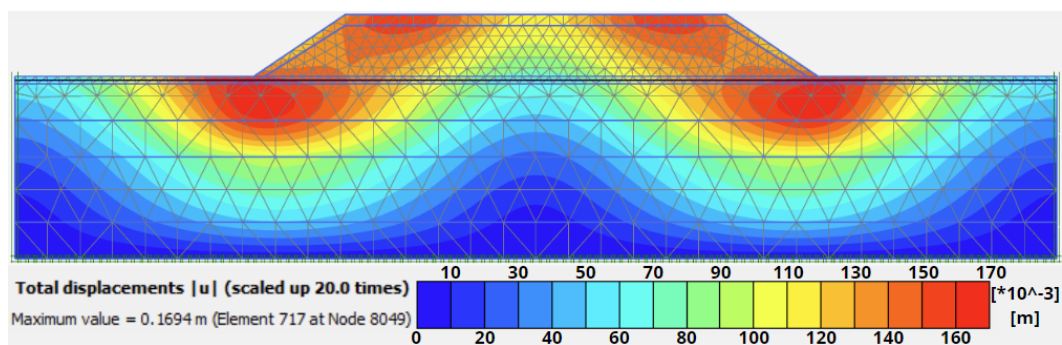
Στο τρίτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος ύπο στατικές συνθήκες παρουσία νερού.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

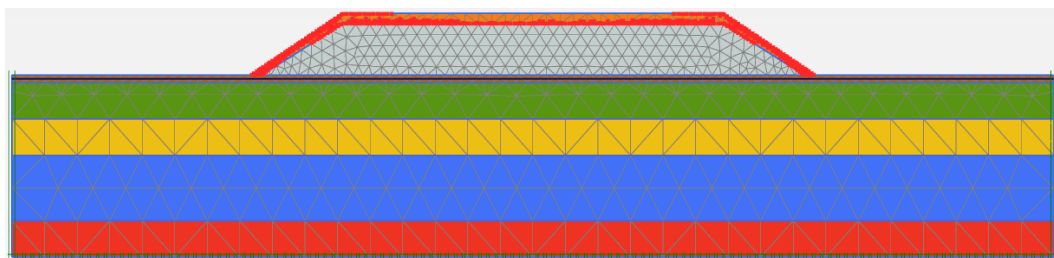
$$SF = 1.50$$



Εικόνα 5.35: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 5.36: Συνολικές μετατοπίσεις παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.



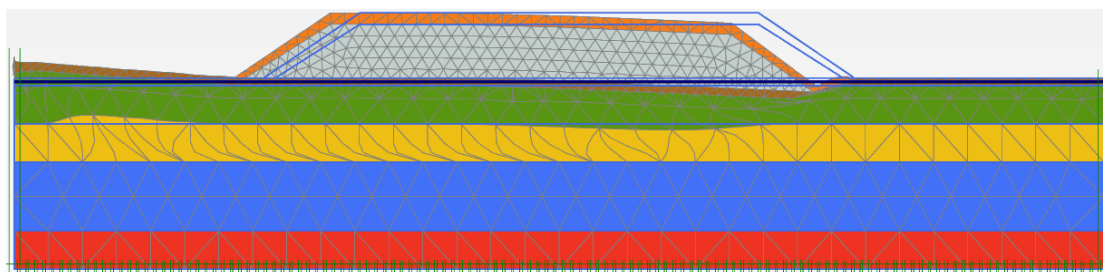
Εικόνα 5.37: Σημεία πιθανής αστοχίας παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

4^ο Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

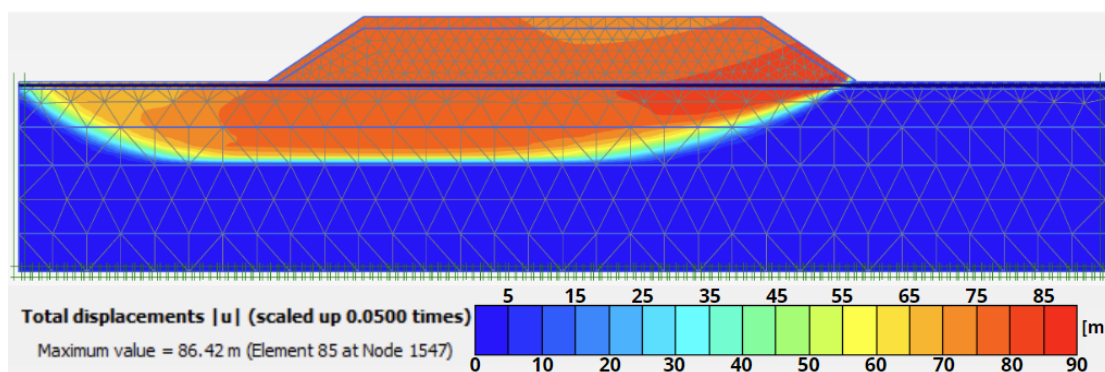
Στο τέταρτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος ύπο ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

$$SF < 0 \rightarrow \text{Αστοχία}$$

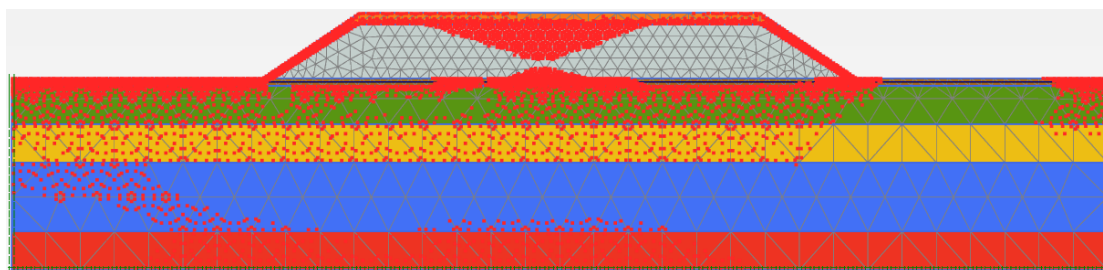


Εικόνα 5.38: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 5.39: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

Σημειώνεται ότι οι τιμές των μετακινήσεων στην Εικόνα 5.39 δεν είναι ρεαλιστικές, οφείλονται στη μεθοδολογία του c-φ reduction για την εύρεση συντελεστή ασφαλείας του Plaxis κι εφόσον υπάρχει αστοχία οι τιμές είναι εξωπραγματικές. Ισχύει, ότι προαναφέρθηκε στα αποτελέσματα της Εικόνας 5.33.



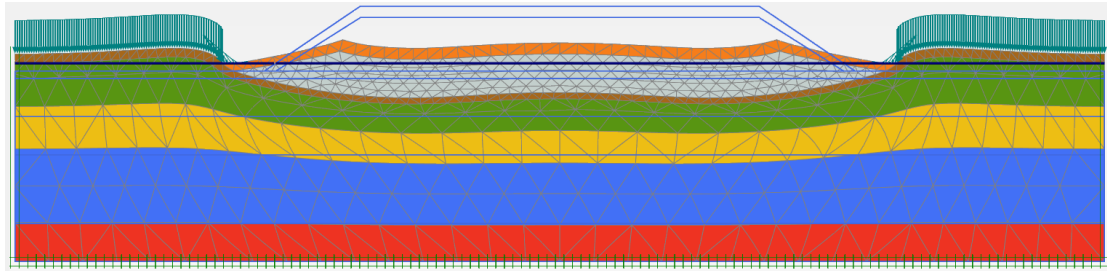
Εικόνα 5.40: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

5° Σενάριο: Πλημμύρα παρουσία στατικών συνθηκών

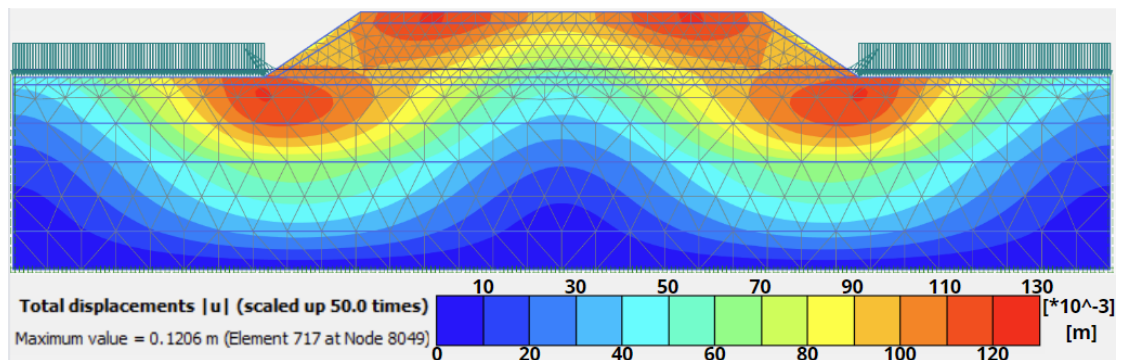
Στο πέμπτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα άνω της επιφάνειας του εδάφους (πλημμύρα).

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

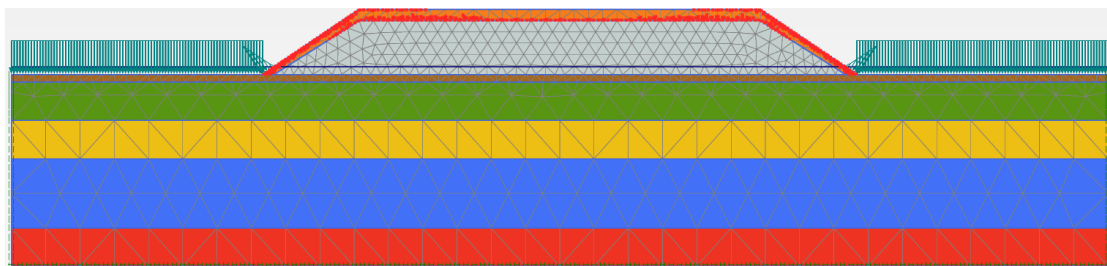
$$SF = 1.47$$



Εικόνα 5.41: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες.



Εικόνα 5.42: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες.



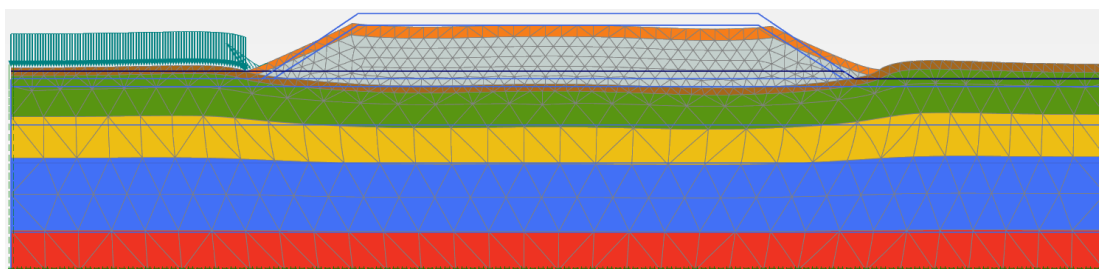
Εικόνα 5.43: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες.

6° Σενάριο: Πλημμύρα εξ αριστερών του οδικού επιχώματος παρουσία στατικών συνθηκών

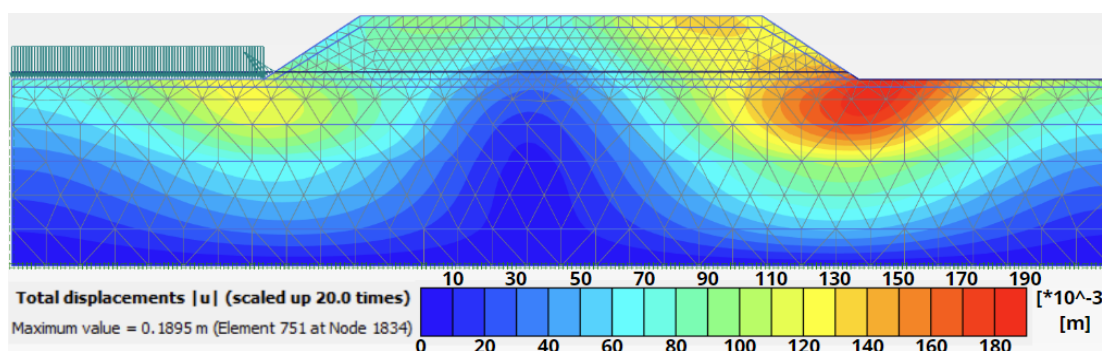
Στο έκτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος προκαλώντας πλημμύρα μόνο από την αριστερή πλευρά του επιχώματος.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

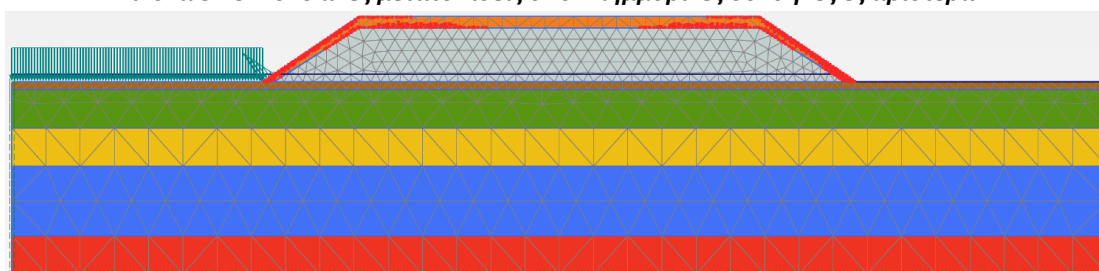
$$SF = 1.32$$



Εικόνα 5.44: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.



Εικόνα 5.45: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.



Εικόνα 5.46: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που υπολογίσθηκαν για κάθε ένα από τα έξι σενάρια και συγκρίνονται με τον Πίνακα 5.3 της πρώτης περίπτωσης.

Πίνακας 5.5: Συγκριτικά αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.

Σενάριο	SF (Εδαφικό υλικό)	SF (EPS)
1 ^ο : Στατικές συνθήκες	1.04	1.51
2 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες	Αστοχία	Αστοχία
3 ^ο : Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία	1.50
4 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία	Αστοχία
5 ^ο : Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	1.08	1.47
6 ^ο : Πλημμύρα εξ αριστερών υπό στατικές συνθήκες	1.02	1.32

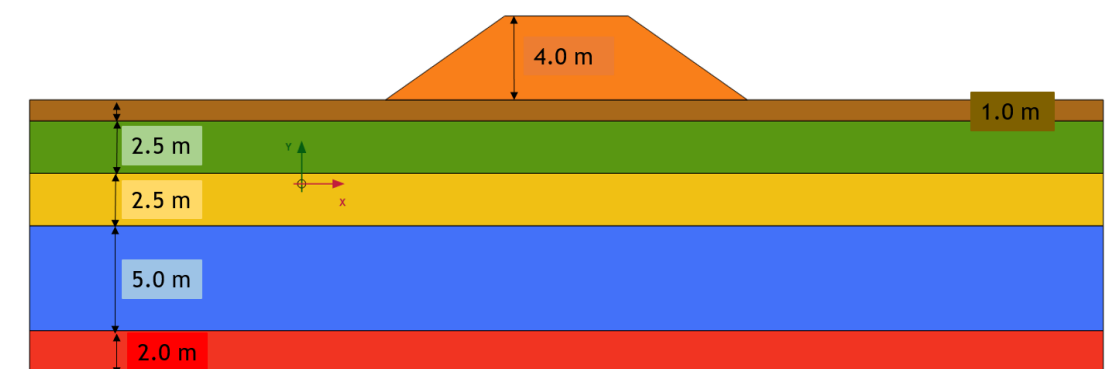
5.4 Αριθμητική προσομοίωση σιδηροδρομικών επιχωμάτων

Στη παρούσα ενότητα, εισάγονται δεδομένα στο λογισμικό Plaxis 2D, για τη δημιουργία δύο μοντέλων σιδηροδρομικού επιχώματος, ένα από εδαφικό υλικό και ένα με EPS. Τα συγκεκριμένα μοντέλα είναι υποθετικά και βασίζονται στα οδικά επιχώματα που προσομοιώθηκαν στην ενότητα 5.3. Τα εδαφικά υλικά παραμένουν ίδια για τη δημιουργία των προσομοιωμάτων, αλλά η γεωμετρία τους είναι διαφορετική. Οι συνολικές διαστάσεις των προσομοιωμάτων είναι 51.3 m πλάτος, 17 m ύψος και οι διαστάσεις των σιδηροδρομικών επιχωμάτων είναι 17.3 m βάσης, 5.9 m άνω πλευράς και 4 m ύψους με κλίση 35°. Τέλος αναφέρεται, ότι η διακριτοποίηση των μοντέλων, καθώς και η διαδικασία υπολογισμών για την εξαγωγή αποτελεσμάτων παραμένουν ίδιες με τις αντίστοιχες των οδικών προσομοιωμάτων. Οι παράμετροι που εισάγονται στο Plaxis 2D παραμένουν ίδια με του οδικού επιχώματος (βλ. Πίνακα 5.2).

Πίνακας 5.6: Δεδομένα σιδηροδρομικού επιχώματος.

Στρώσεις	Υλικό	Πάχος(m)
Επίχωμα (Ε)	Γαιώδες ή βραχώδες	4.0
Εξυγιαντική στρώση (Α.0)	Προστεροποιημένη άργιλος	1.0
A.1	Πολύ μαλακή τέφρη άργιλος	2.5
A.2	Πολύ μαλακή τέφρη άργιλος	2.5
B.1	Μαλακή – μέση ιλυώδης άργιλος	5.0
B.2	Μέση ιλυώδης άργιλος	2.0

1^η Περίπτωση: Αριθμητική προσομοίωση σιδηροδρομικού επιχώματος από εδαφικό υλικό



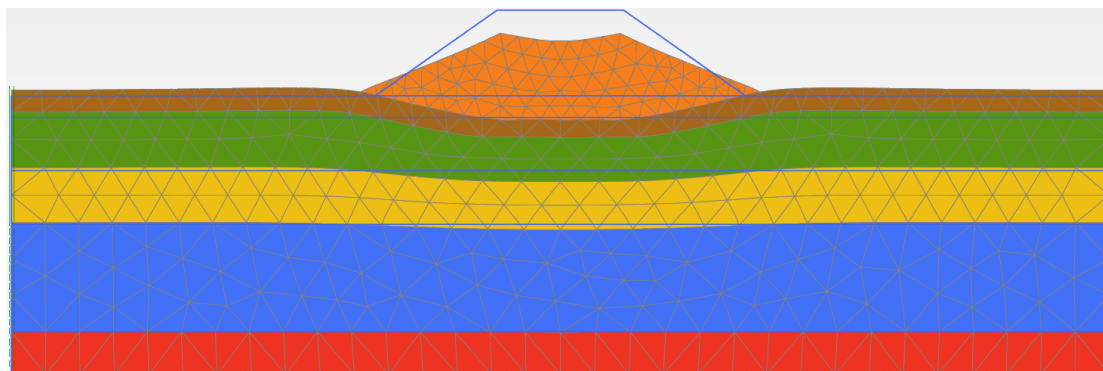
Εικόνα 5.47: Εδαφικό προφίλ σιδηροδρομικού προσομοιώματος.

1^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες

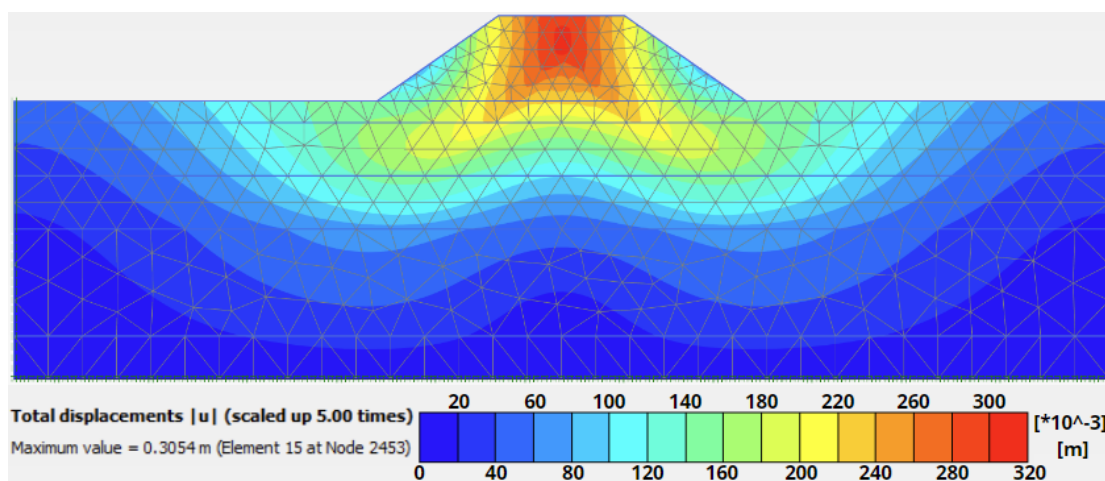
Στο πρώτο σενάριο γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος υπό στατικές συνθήκες χωρίς την παρουσία νερού.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

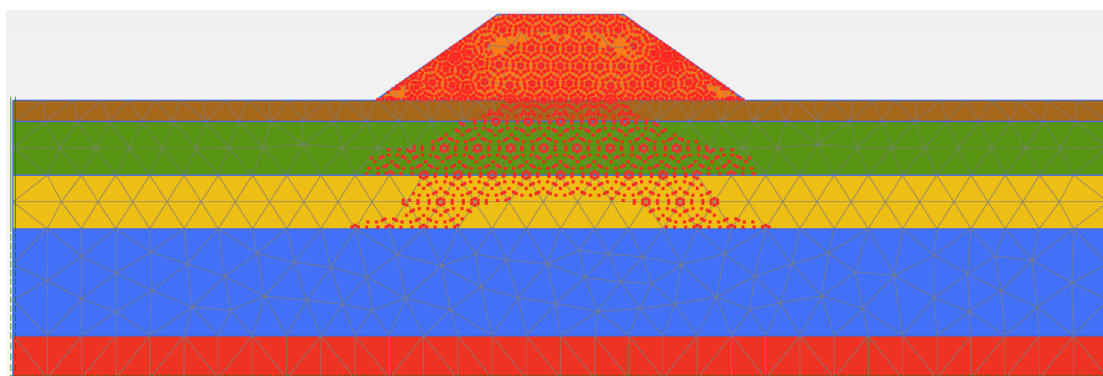
$$SF = 1.14$$



Εικόνα 5.48: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό στατικές συνθήκες.



Εικόνα 5.49: Συνολικές μετατοπίσεις υπό στατικές συνθήκες.



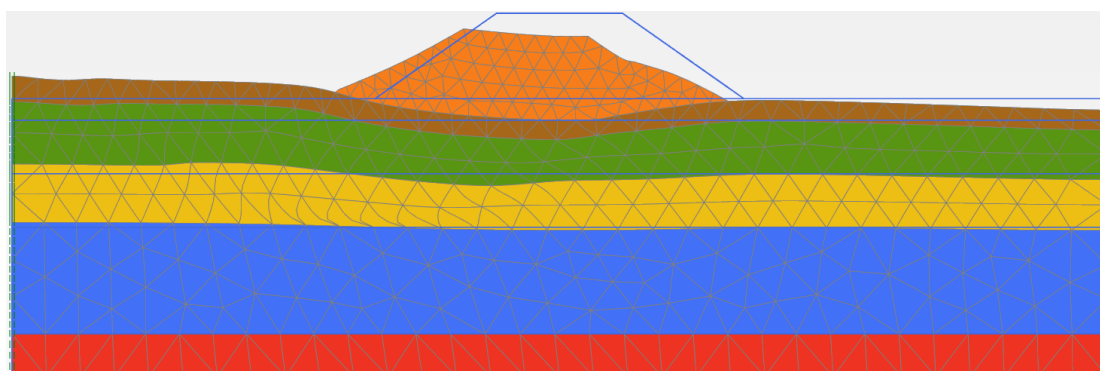
Εικόνα 5.50: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό στατικές συνθήκες.

2^ο Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες

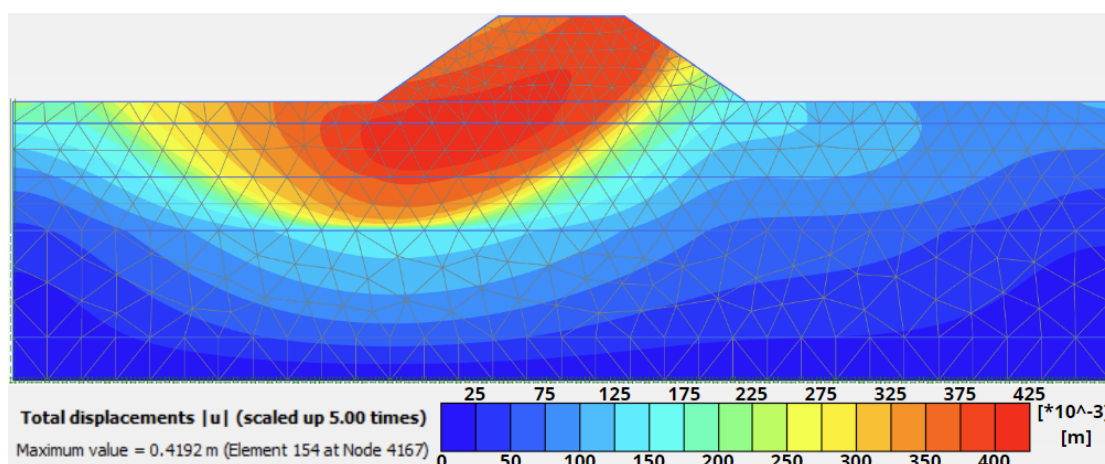
Στο δεύτερο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος υπό ψευδοστατικές συνθήκες χωρίς τη παρουσία νερού.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

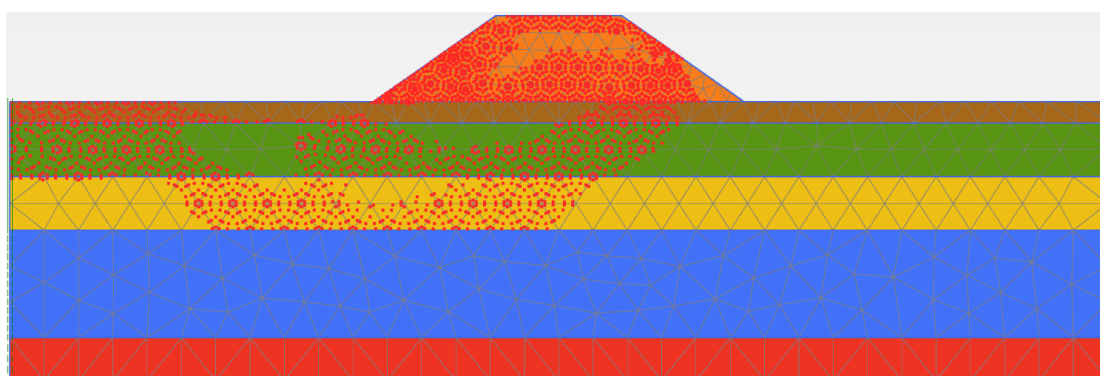
$$SF < 0 \rightarrow \text{Αστοχία}$$



Εικόνα 5.51: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές συνθήκες.



Εικόνα 5.52: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες.



Εικόνα 5.53: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες.

3^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

Στο τρίτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος υπό στατικές συνθήκες με παρουσία νερού.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

$$SF < 1 \rightarrow \text{Αστοχία}$$

Σημειώνεται ότι, στο συγκεκριμένο σενάριο αστοχεί το μοντέλο και οι υπολογισμοί διαρκούν μικρό χρονικό διάστημα και τα γραφήματα που εξάγονται δίνουν μη ρεαλιστικά αποτελέσματα.

4° Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

Στο τέταρτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος ύπο ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

$$SF < 1 \rightarrow \text{Αστοχία}$$

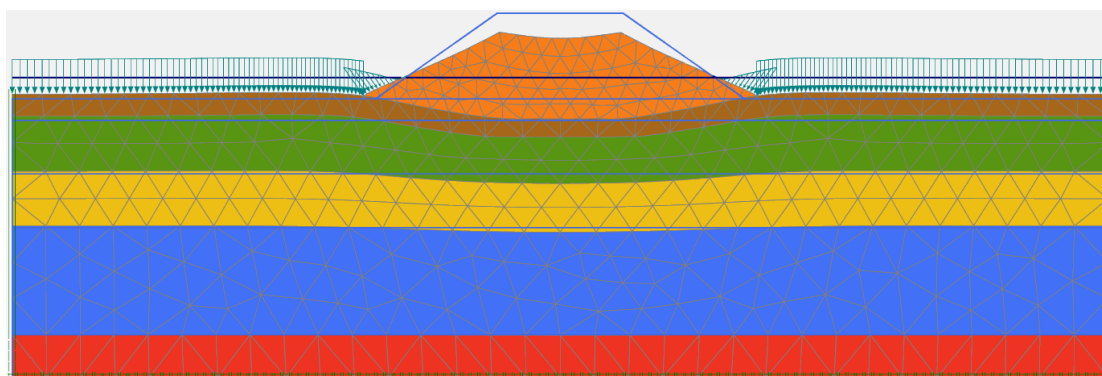
Σημειώνεται ότι, στο συγκεκριμένο σενάριο αστοχεί απευθείας το μοντέλο και δεν δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής γραφημάτων.

5° Σενάριο: Πλημμύρα παρουσία στατικών συνθηκών

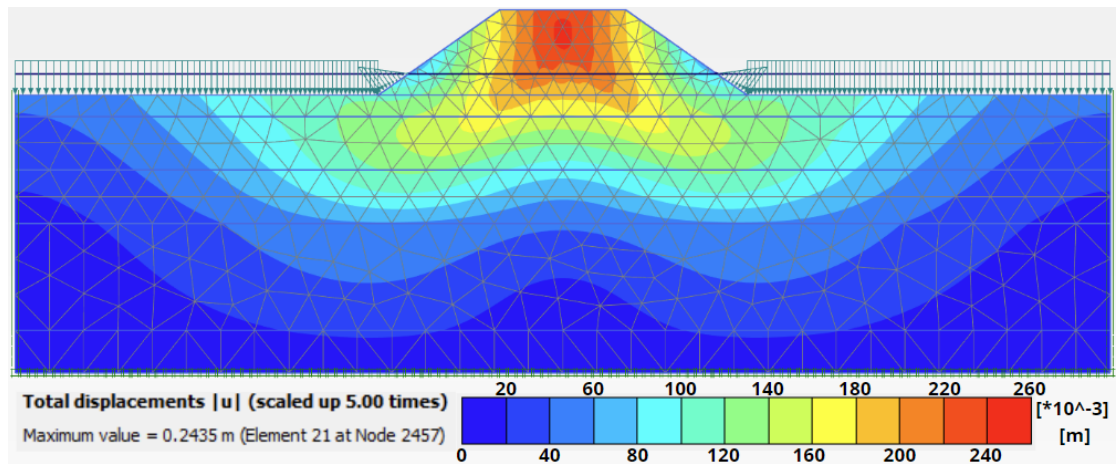
Στο πέμπτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα άνω της επιφάνειας του εδάφους (πλημμύρα).

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

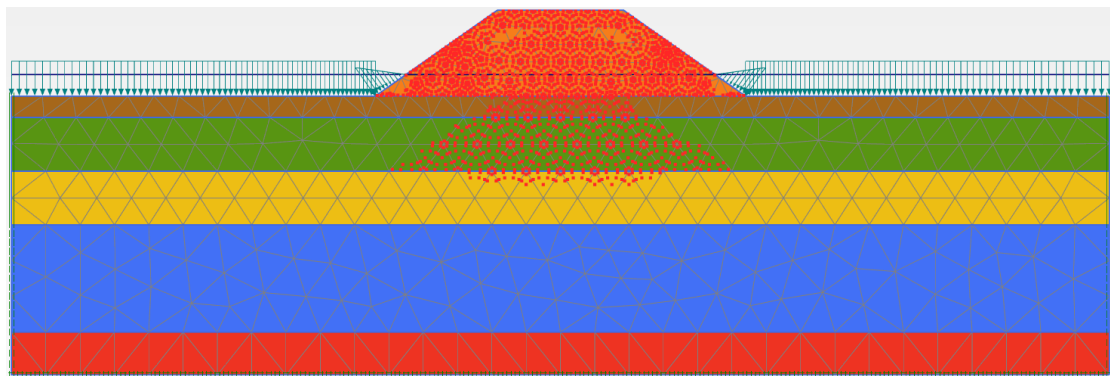
$$SF = 1.20$$



Εικόνα 5.54: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες.



Εικόνα 5.55: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες.



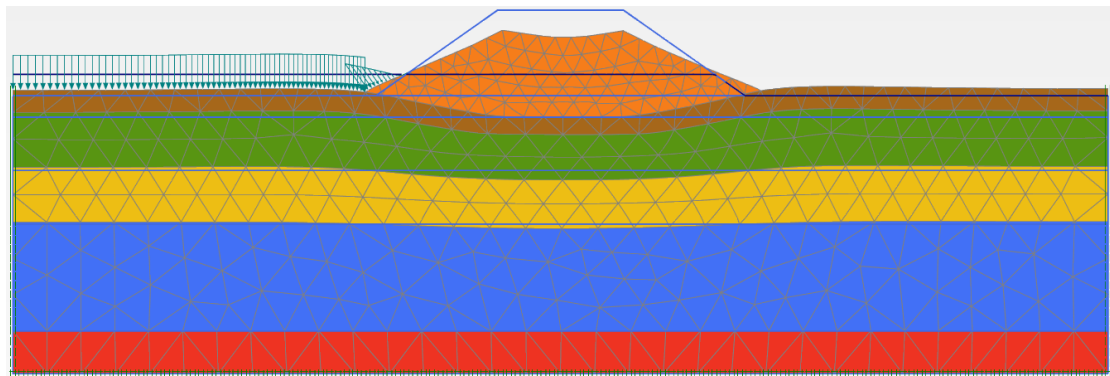
Εικόνα 5.56: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες.

6° Σενάριο: Πλημμύρα εξ αριστερών του οδικού επιχώματος παρουσία στατικών συνθηκών

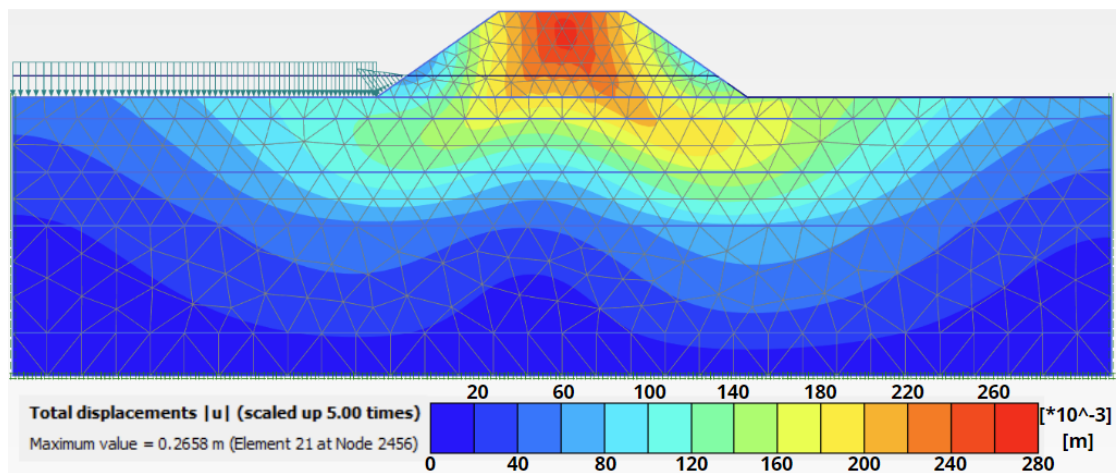
Στο έκτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του οδικού επιχώματος για την περίπτωση πλημμύρας μόνο από την αριστερή πλευρά του επιχώματος.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

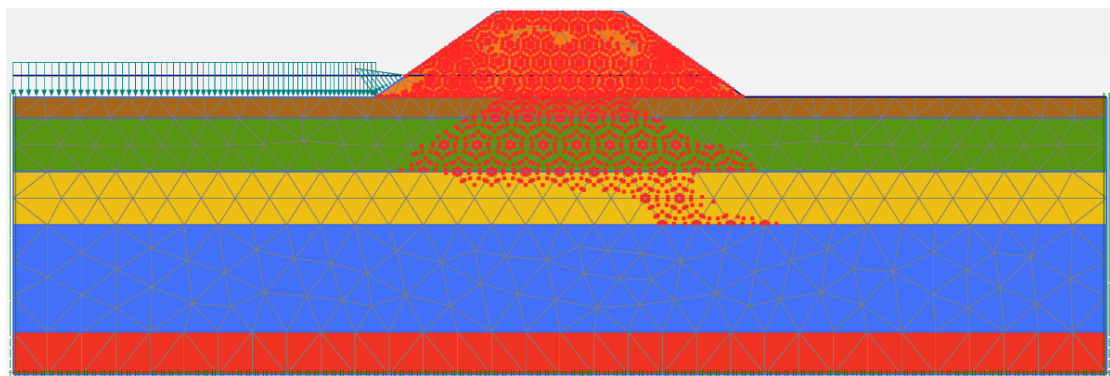
$$SF = 1.16$$



Εικόνα 5.57: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.



Εικόνα 5.58: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.



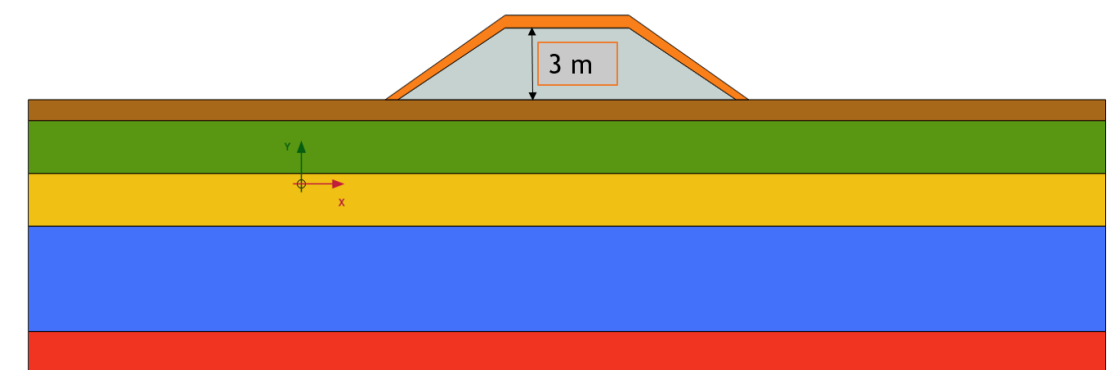
Εικόνα 5.59: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.

Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν για κάθε ένα από τα έξι σενάρια.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.

Σενάριο	SF
1°: Στατικές συνθήκες	1.14
2°: Ψευδοστατικές συνθήκες	Αστοχία
3°: Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία
4°: Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία
5°: Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	1.20
6°: Πλημμύρα εξ αριστερών υπό στατικές συνθήκες	1.16

2^η Περίπτωση: Αριθμητική προσομοίωση σιδηροδρομικού επιχώματος από διογκωμένη πολυστερίνη



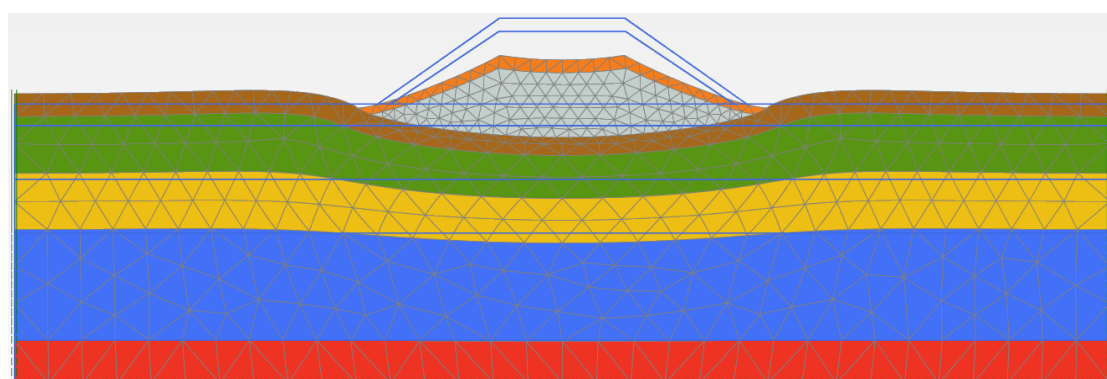
Εικόνα 5.60: Εδαφικό προφίλ προσομοιώματος.

1^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες

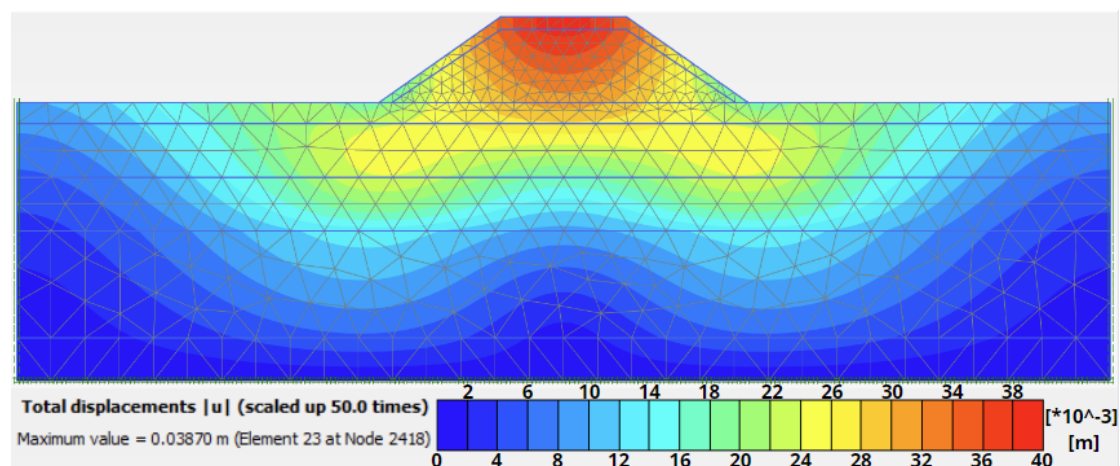
Στο πρώτο σενάριο γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος υπό στατικές συνθήκες χωρίς τη παρουσία νερού.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

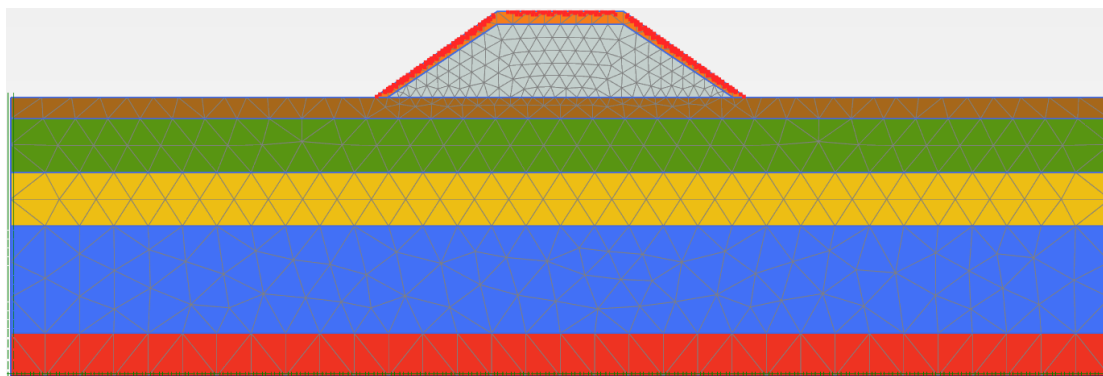
$$SF = 2.23$$



Εικόνα 5.61: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό στατικές συνθήκες.



Εικόνα 5.62: Συνολικές μετατοπίσεις υπό στατικές συνθήκες.



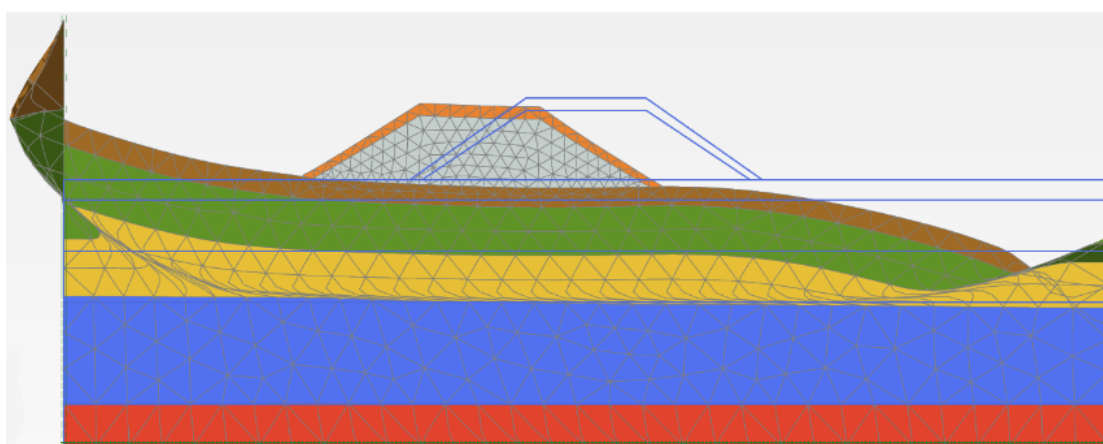
Εικόνα 5.63: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό στατικές συνθήκες.

2^ο Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες

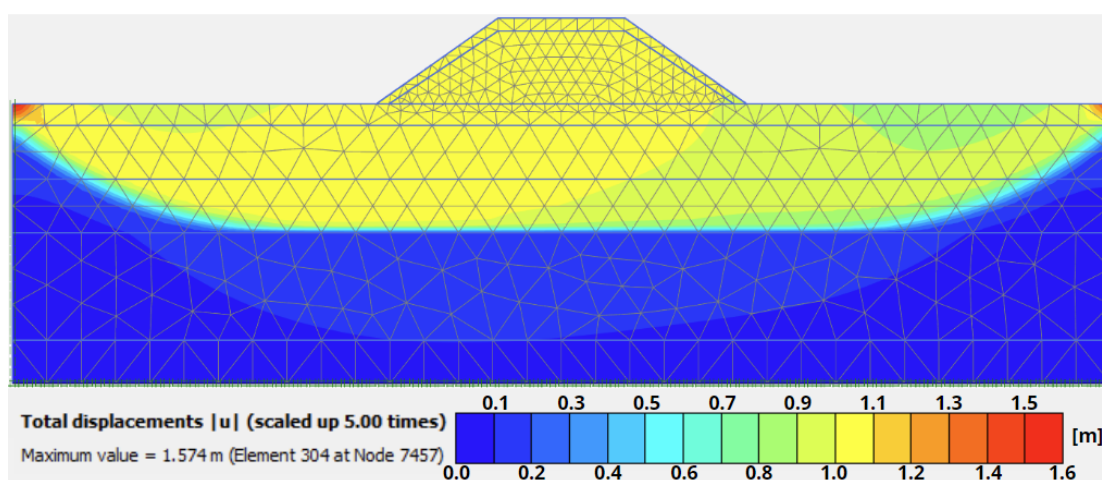
Στο δεύτερο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος υπό ψευδοστατικές συνθήκες χωρίς τη παρουσία νερού.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

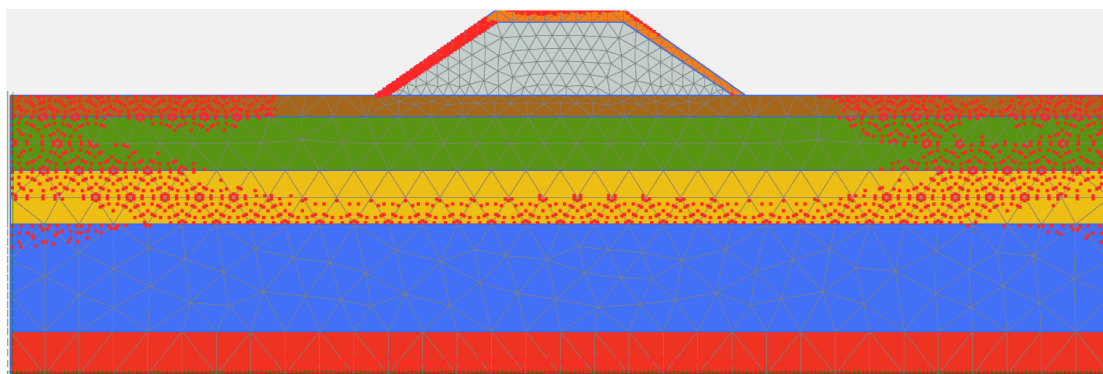
$$SF = 1.01$$



Εικόνα 5.64: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές συνθήκες.



Εικόνα 5.65: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες.



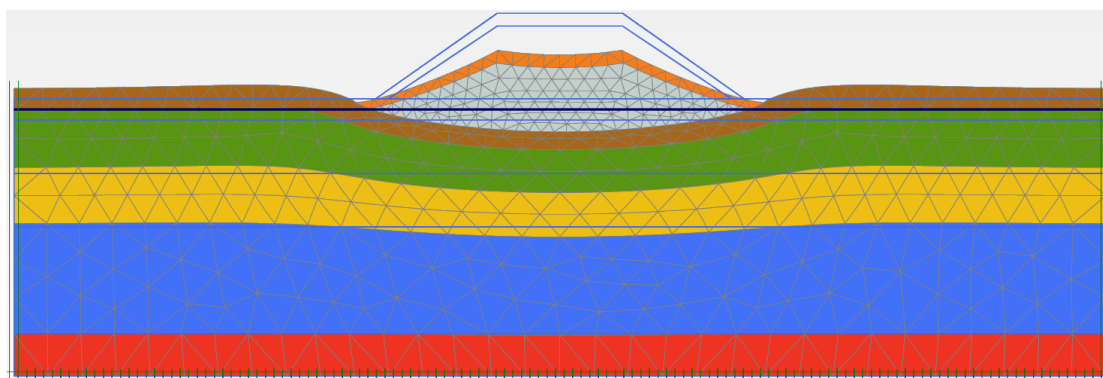
Εικόνα 5.66: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες.

3^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

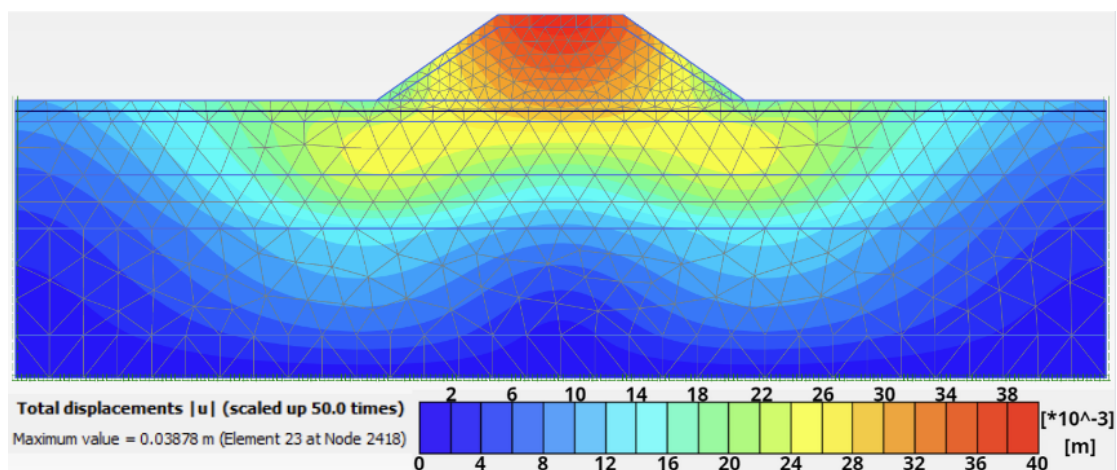
Στο τρίτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος υπό στατικές συνθήκες παρουσία νερού.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

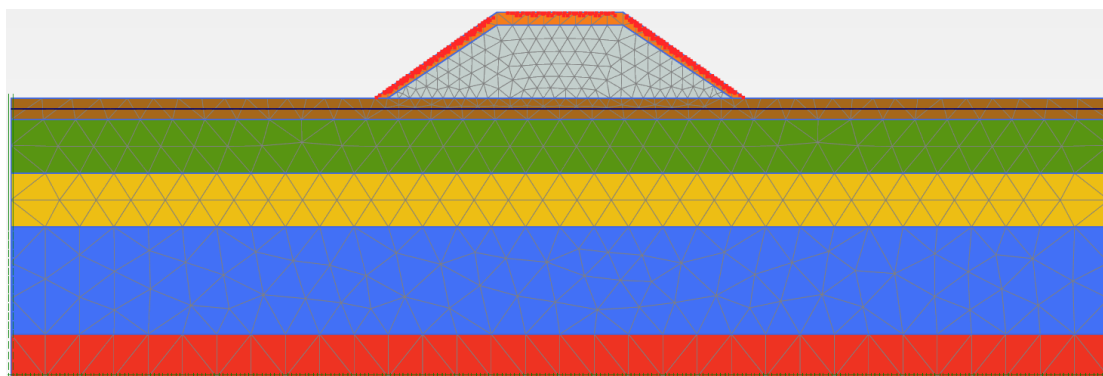
$$SF = 2.24$$



Εικόνα 5.67: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 5.68: Συνολικές μετατοπίσεις παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.



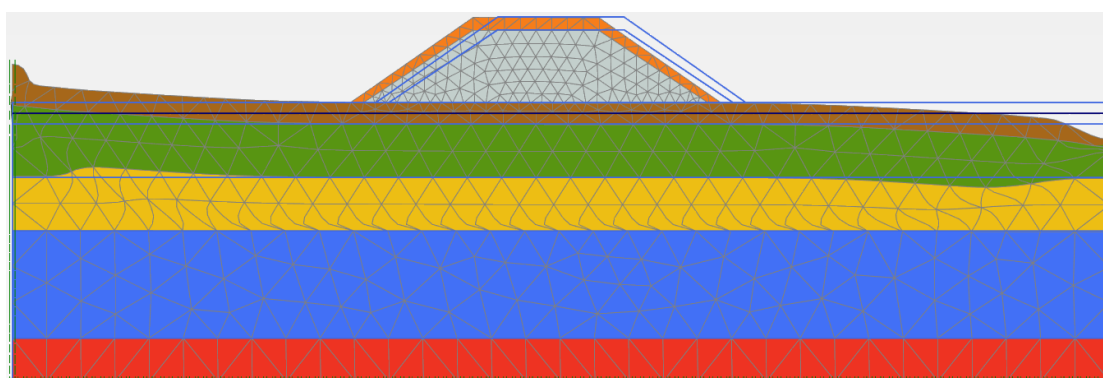
Εικόνα 5.69: Σημεία πιθανής αστοχίας παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

4^ο Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

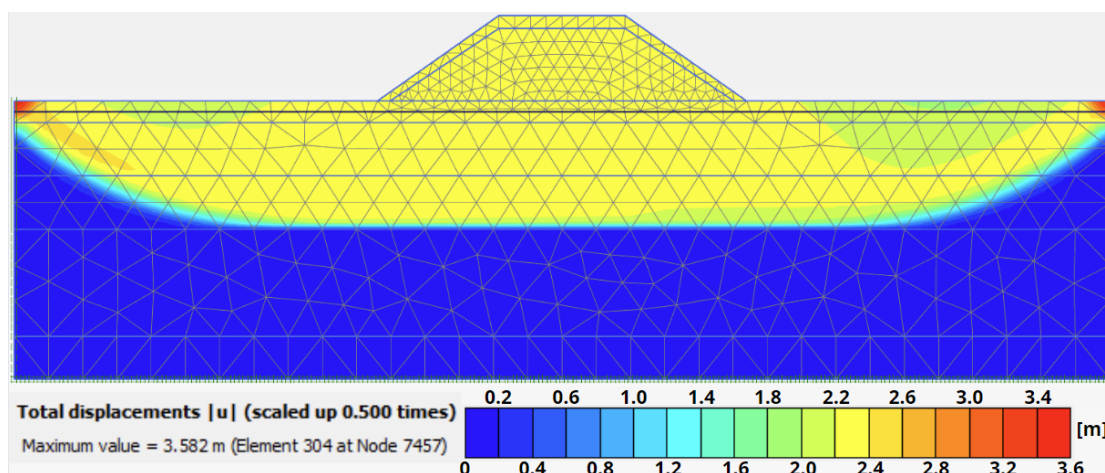
Στο τέταρτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος υπό ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

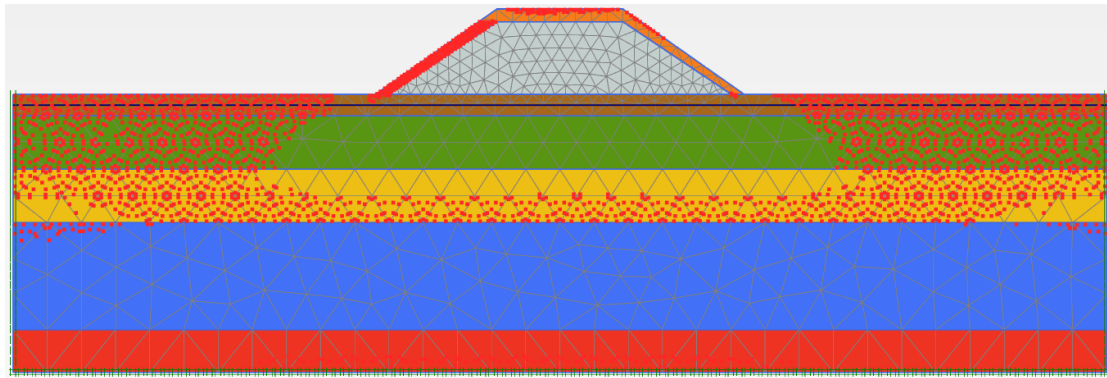
$$SF < 0 \rightarrow \text{Αστοχία}$$



Εικόνα 5.70: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 5.71: Συνολικές μετατοπίσεις υπό ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.



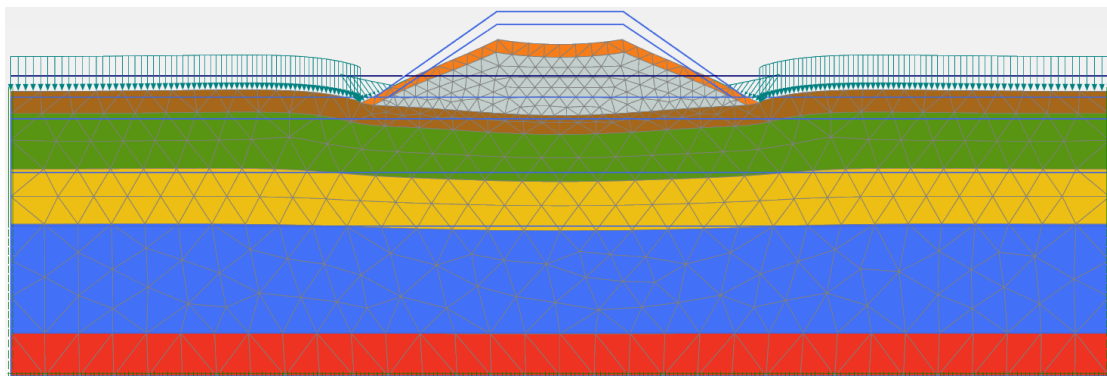
Εικόνα 5.72: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

5^ο Σενάριο: Πλημμύρα παρουσία στατικών συνθηκών

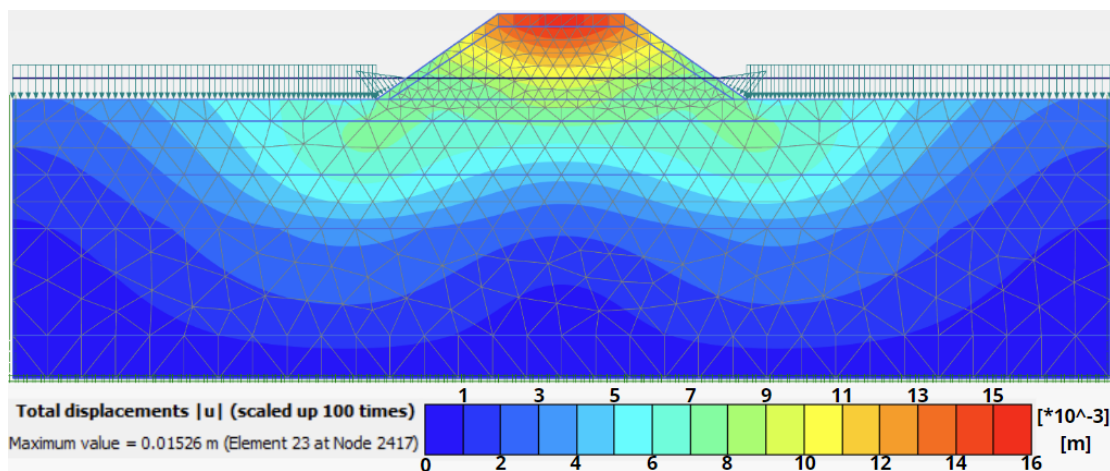
Στο πέμπτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα άνωθεν της επιφάνειας του εδάφους (πλημμύρα).

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

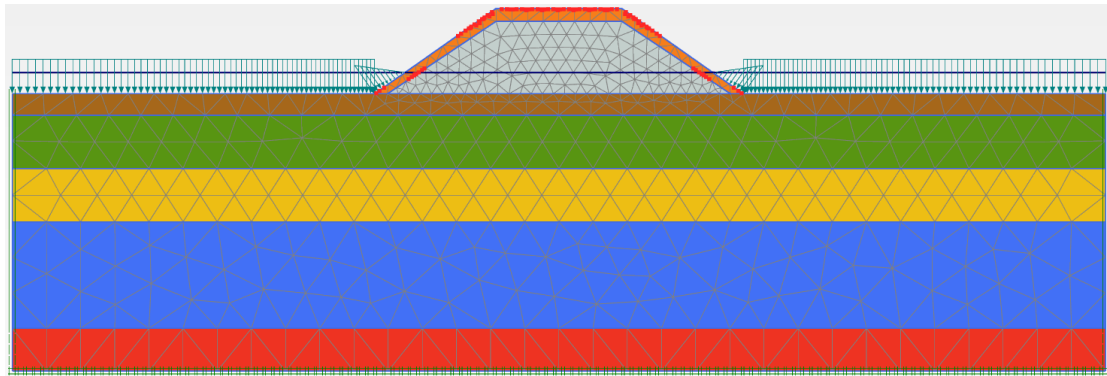
$$SF = 2.26$$



Εικόνα 5.73: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες.



Εικόνα 5.74: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες.



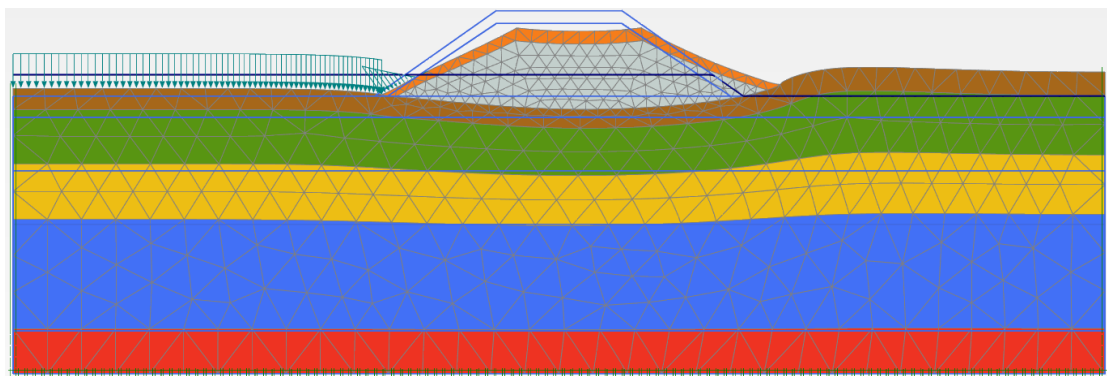
Εικόνα 5.75: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες.

6° Σενάριο: Πλημμύρα εξ αριστερών του οδικού επιχώματος παρουσία στατικών συνθηκών

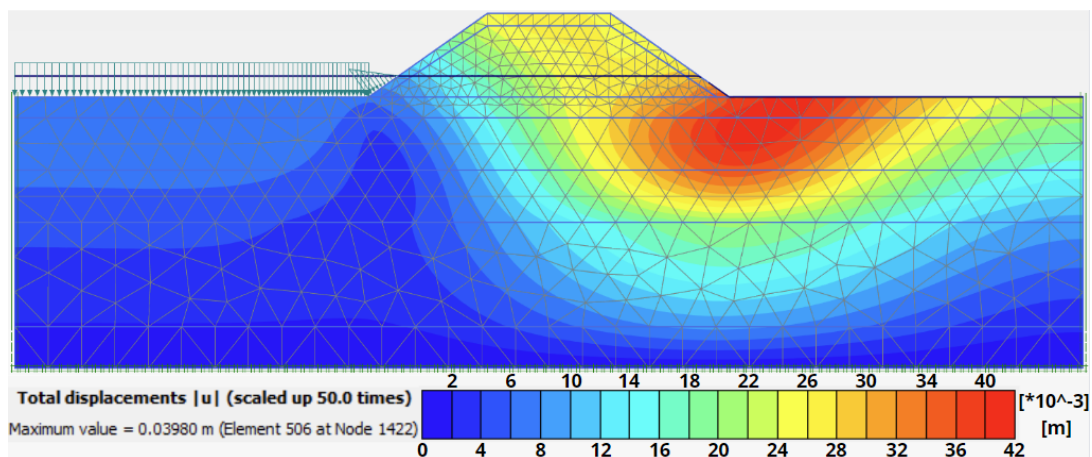
Στο έκτο σενάριο, γίνεται έλεγχος ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος για την περίπτωση πλημμύρας μόνο από την αριστερή πλευρά του επιχώματος.

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι:

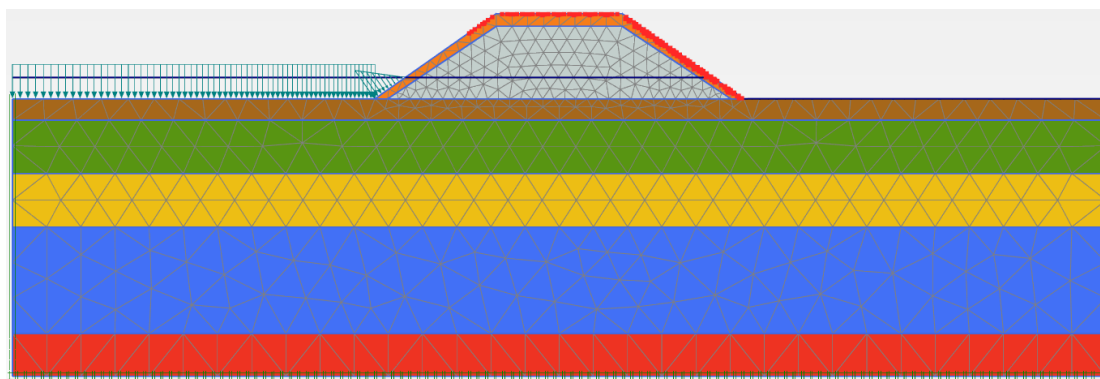
$$SF = 2.07$$



Εικόνα 5.76: Παραμόρφωση του εδαφικού προφίλ υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.



Εικόνα 5.77: Συνολικές μετατοπίσεις υπό πλημμυρικές συνθήκες εξ αριστερών.



Εικόνα 5.78: Σημεία πιθανής αστοχίας υπό πλημμυρικές συνθήκες, εξ αριστερών.

Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν για κάθε ένα από τα έξι σενάρια και συγκρίνονται με τον Πίνακα 5.7 της πρώτης περίπτωσης.

Πίνακας 5.8: Συγκριτικά αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κάθε σενάριο.

Σενάριο	SF (Εδαφικό υλικό)	SF (EPS)
1 ^ο : Στατικές συνθήκες	1.14	2.23
2 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες	Αστοχία	1.01
3 ^ο : Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία	2.24
4 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία	Αστοχία
5 ^ο : Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	1.20	2.26
6 ^ο : Πλημμύρα εξ αριστερών υπό στατικές συνθήκες	1.16	2.07

5.5 Συμπεράσματα αριθμητικής μεθόδου

Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης των παραπάνω μοντέλων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για το οδικό και το σιδηροδρομικό επίχωμα υπό συγκεκριμένες συνθήκες, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, εξάγονται ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα. Παρατηρείται στον Πίνακα 5.9 που παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα των συντελεστών ασφαλείας που υπολογίζονται στο Κεφάλαιο 5 πως υπάρχουν μεγάλες διαφορές ως προς την ευστάθεια των επιχωμάτων, που κατασκευάζονται με εδαφικό υλικό, συγκριτικά με αυτά που κατασκευάζονται με τη χρήση διογκωμένης πολυστερίνης. Επίσης, παρατηρείται ότι το σιδηροδρομικό επίχωμα είναι πιο σταθερό από το οδικό επίχωμα και αυτό βασίζεται στη διαφορετική γεωμετρία κατασκευής τους.

Παρατηρώντας τις τιμές των συντελεστών ασφαλείας για τα επιχώματα από εδαφικό υλικό σε συνδυασμό με την κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι εδαφικές στρώσεις του υπεδάφους δημιουργούν πολύ δύσκολες συνθήκες ως προς την ευστάθεια των επιχωμάτων στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ, στη περιοχή των Θερμοπυλών. Αρχικά, το οδικό επίχωμα από εδαφικό υλικό βρίσκεται σε οριακές καταστάσεις ισορροπίας στο **πρώτο (στατικές συνθήκες), πέμπτο (βυθισμένο πρανές), έκτο σενάριο (βυθισμένο πρανές εκ των αριστερών)**

και στα υπόλοιπα τρία σενάρια αστοχεί. Παρόμοια κατάσταση παρατηρείται και στο σιδηροδρομικό επίχωμα, όπου υπάρχει μία υποτυπώδης αύξηση του συντελεστή ασφαλείας στο πρώτο, πέμπτο και έκτο σενάριο λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας του επιχώματος, αλλά αστοχεί και αυτό στα ίδια σενάρια.

Για να βελτιωθεί η κατάσταση ευστάθειας των επιχωμάτων χρησιμοποιήθηκε EPS ως υλικό πλήρωσης, το οποίο σταθεροποίησε ικανοποιητικά τα επιχώματα. Στο οδικό επίχωμα παρατηρείται μεγάλη αύξηση του συντελεστή ασφαλείας στο πρώτο, πέμπτο, έκτο σενάριο, επιπλέον και στο **τρίτο σενάριο** (παρουσία υδροφόρου ορίζοντα) δεν αστοχεί πλέον, το οποίο είναι πολύ σημαντικό αλλά παραμένει η αστοχία στο **δεύτερο** (σεισμικές συνθήκες) και **τέταρτο σενάριο** (σεισμικές συνθήκες παρουσία υδροφόρου ορίζοντα). Στο σιδηροδρομικό επίχωμα υπάρχει ακόμα καλύτερη συμπεριφορά του επιχώματος με EPS, καθώς η αύξηση του συντελεστή ασφαλείας είναι πολύ μεγάλη. Επίσης, στα σενάρια που υπήρχε ευστάθεια και με το εδαφικό υλικό (πρώτο, πέμπτο, έκτο) αυξήθηκε πάρα πολύ ο συντελεστής ασφαλείας μετά την χρήση της διογκωμένης πολυστερίνης και επίσης στο δεύτερο και τρίτο σενάριο δεν αστοχεί πλέον, ειδικά στο τρίτο σενάριο η αύξηση είναι πολύ μεγάλη, ενώ στο δεύτερο σενάριο οριακά ισορροπεί. Αστοχία παραμένει στο τέταρτο σενάριο που προκύπτουν οι πιο δύσκολες συνθήκες ισορροπίας.

Συμπεραίνεται, πως η πιο δύσκολη συνθήκη να αντιμετωπιστεί είναι ο σεισμός σε συνδυασμό με τη παρουσία νερού. Αυτός είναι ένας πολύ δυσμενής συνδυασμός, κι όπως έχει παρατηρηθεί και από πολλά περιστατικά κατολισθήσεων, μπορεί να επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα στις γεωκατασκευές. Ωστόσο, η κατασκευή των επιχωμάτων με χρήση διογκωμένης πολυστερίνης βελτίωσε σημαντικά την ευστάθεια των επιχωμάτων και σε συνδυασμό με τη κατάλληλη γεωμετρία, μπορούν να γίνουν ακόμη πιο ευσταθή, όπως φαίνεται στο σιδηροδρομικό επίχωμα.

Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας.

SF	Οδικό επίχωμα		Σιδηροδρομικό επίχωμα	
	Εδαφικό υλικό	EPS	Εδαφικό υλικό	EPS
1 ^ο : Στατικές συνθήκες	1.04	1.51	1.14	2.23
2 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες	Αστοχία	Αστοχία	Αστοχία	1.01
3 ^ο : Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία	1.50	Αστοχία	2.24
4 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία	Αστοχία	Αστοχία	Αστοχία
5 ^ο : Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	1.08	1.47	1.20	2.26
6 ^ο : Πλημμύρα εξ αριστερών υπό στατικές συνθήκες	1.02	1.32	1.16	2.07

6.1 Γενικά συμπεράσματα – Σύγκριση αναλυτικής και αριθμητικής μεθόδου

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της ευστάθειας πρηνών επιχωμάτων σε οδικά και σιδηροδρομικά έργα, υπό διάφορες συνθήκες, στατικές, ψευδοστατικές, υγρές και πλημμυρικές. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις της ευστάθειας με αναλυτικές μεθόδους για πρηνή άπειρου μήκους και πεπερασμένου ύψους, κατά τις οποίες αναπτύχθηκαν ορισμένες εξισώσεις με τις οποίες μετέπειτα υπολογίσθηκαν οι συντελεστές ασφαλείας για τα παρακάτω σενάρια:

- 1^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες
- 2^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα*
- 3^ο Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες*
- 4^ο Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα
- 5^ο Σενάριο: Πλημμυρικές συνθήκες

Υπό αυτές τις συνθήκες μελετήθηκαν δύο είδη επιχωμάτων, ένα οδικό και ένα σιδηροδρομικό επίχωμα, τα οποία διαφέρουν ελαφρώς ως προς τη γεωμετρία τους. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της αριθμητικής μεθόδου, όπου τα παραπάνω επιχώματα προσομοιώθηκαν στο λογισμικό Plaxis 2D και επιλύθηκαν προσομοιώματα για τα εξής σενάρια:

- 1^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες
- 2^ο Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες*
- 3^ο Σενάριο: Στατικές συνθήκες παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα*
- 4^ο Σενάριο: Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα
- 5^ο Σενάριο: Πλημμυρικές συνθήκες
- 6^ο Σενάριο: Πλημμυρικές συνθήκες εκ των αριστερών του επιχώματος

**Το 2^ο Σενάριο των αναλυτικών μεθόδων αντιστοιχεί στο 3^ο Σενάριο της αριθμητικής μεθόδου και το 3^ο Σενάριο των αναλυτικών μεθόδων αντιστοιχεί στο 2^ο Σενάριο της αριθμητικής μεθόδου. Συνεπώς, όσα αναφέρονται παρακάτω για κάθε μία από αυτές τις δύο περιπτώσεις ισχύουν και για τις δύο μεθοδολογίες.*

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται όλοι οι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίσθηκαν αναλυτικά και με την αριθμητική μέθοδο. Παρατηρείται πως τα αποτελέσματα των άπειρομήκων πρηνών κυμαίνονται κοντά στις τιμές που εξήχθησαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά διαφέρουν αρκετά στα πρηνή πεπερασμένου ύψους. Στην πραγματικότητα όμως, οι μέθοδοι αναλυτικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν, δεν μπορούν να συγκριθούν με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Plaxis 2D, καθώς με το λογισμικό μπορούν να συμπεριληφθούν πολλές παράμετροι, που δεν εξετάζονται στις αναλυτικές μεθόδους. Για παράδειγμα το Plaxis 2D

μπορεί να ληφθεί υπόψη και το έδαφος που βρίσκεται κάτω από το επίχωμα, το οποίο μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια του επιχώματος που μελετάται, όπως στην περίπτωση του επιχώματος του ΠΑΘΕ.

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας με αναλυτική και αριθμητική μέθοδο, για οδικό και σιδηροδρομικό επίχωμα εδαφικού υλικού.

SF	Οδικό επίχωμα εδαφικού υλικού			Σιδηροδρομικό επίχωμα εδαφικού υλικού		
	Αναλυτική μέθοδος		Αριθμητική μέθοδος	Αναλυτική μέθοδος		Αριθμητική μέθοδος
	Απειρομήκες	Πεπερασμένου		Απειρομήκες	Πεπερασμένου	
1 ^ο Σενάριο	1.07	2.34	1.04	1.03	2.32	1.14
2 ^ο Σενάριο	0.67	1.40	Αστοχία	0.65	1.41	Αστοχία
3 ^ο Σενάριο	0.87	1.98	Αστοχία	0.88	1.98	Αστοχία
4 ^ο Σενάριο	0.53	1.18	Αστοχία	0.51	1.19	Αστοχία
5 ^ο Σενάριο	1.19	3.23	1.08	1.16	3.24	1.20
6 ^ο Σενάριο	-	-	1.02	-	-	1.16

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν μέσω του Plaxis 2D και παρουσιάζονται στο Πίνακα 6.2, συμπεραίνεται πως η διογκωμένη πολυστερίνη EPS αποτελεί μία αξιόπιστη λύση για τη βελτίωση της ευστάθειας γεωκατασκευών συγκοινωνιακών έργων σε περιοχές με μαλακά εδάφη. Προς το παρόν, στην Ελλάδα το EPS έχει χρησιμοποιηθεί μόνο σε οδικά έργα αλλά όχι σε σιδηροδρομικά.

Πίνακας 6.2: Συγκριτικά αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας για τη κατασκευή οδικών και σιδηροδρομικών επιχωμάτων με εδαφικό υλικό ή διογκωμένη πολυστερίνη.

SF	Οδικό επίχωμα		Σιδηροδρομικό επίχωμα	
	Εδαφικό υλικό	EPS	Εδαφικό υλικό	EPS
1 ^ο : Στατικές συνθήκες	1.04	1.51	1.14	2.23
2 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες	Αστοχία	Αστοχία	Αστοχία	1.01
3 ^ο : Στατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία	1.50	Αστοχία	2.24
4 ^ο : Ψευδοστατικές συνθήκες παρουσία υ.ο.	Αστοχία	Αστοχία	Αστοχία	Αστοχία
5 ^ο : Πλημμύρα υπό στατικές συνθήκες	1.08	1.47	1.20	2.26
6 ^ο : Πλημμύρα εξ αριστερών υπό στατικές συνθήκες	1.02	1.32	1.16	2.07

6.2 Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

Με την επιτυχημένη εφαρμογή της διογκωμένης πολυστερίνης ως υλικό πλήρωσης στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ, αλλά και με τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην ενότητα 5.4 για σιδηροδρομικό επίχωμα (δεν έχει κατασκευαστεί κανένα σιδηροδρομικό επίχωμα με EPS στην Ελλάδα) με αποτελέσματα αρκετά ευμενή ως προς την ευστάθεια των γεωκατασκευών. Συνεπώς, τα δεδομένα αυτά είναι ενθαρρυντικά για την αξιοποίηση του EPS και σε άλλα γεωτεχνικά έργα σε περιοχές με πολύ μαλακά εδάφη, όπως τη μείωση της καταπόνησης ακροβάθρων γεφυρών. Γενικά, η διογκωμένη πολυστερίνη δεν θα πρέπει να αξιολογείται μόνο σαν ένα πολύ καλό θερμομονωτικό υλικό υψηλής απόδοσης, αλλά γενικότερα ως ένα άριστο δομικό υλικό με εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες, υψηλές μηχανικές αντοχές, αντοχή στο χρόνο και ικανότητα αντισεισμικής προστασίας τεχνικών έργων, εφόσον φυσικά πληρούνται τα μέτρα προστασίας από φυσικές, χημικές κι άλλες διεργασίες.

Προφανώς, θα πρέπει να γίνουν εκτενέστερες αναλύσεις από τους μηχανικούς ως προς τη χρησιμοποίηση της διογκωμένης πολυστερίνης σε γεωτεχνικά έργα, ώστε να αξιοποιείται συχνότερα σε επικίνδυνες περιοχές (ειδικά υπό το κίνδυνο πλημμυρας και των προβλημάτων λόγω άνωσης σε τέτοια ελαφροβαρή επίχωματα) που επρόκειτο να κατασκευαστούν καινούργια έργα, αλλά και σε υφιστάμενα έργα που κρίνεται απαραίτητη η ανακατασκευή τους. Συμπεριλαμβάνοντας στους πιθανούς κινδύνους και την κλιματική αλλαγή, τα επόμενα χρόνια αναμένεται να παρουσιάζονται προβλήματα σε φυσικά και τεχνητά πρανή που σήμερα είναι σταθερά ή οριακά ισορροπούν, καθώς η διάβρωση τους θα είναι εντονότερη λόγω της μεγαλύτερης κι εντονότερης απορροής των επιφανειακών υδάτων εξαιτίας των «τροπικών» βροχοπτώσεων. Από την άλλη πλευρά, η διήθηση θα είναι μικρότερη σε σχέση με τις «κανονικές» βροχοπτώσεις με ότι αυτό συνεπάγεται για τη στάθμη και τη ροή των υπογείων υδάτων. Οπότε, συνίσταται να εξετάζονται όλες οι συνθήκες για την εξαγωγή ρεαλιστικών και αξιόπιστων αποτιμήσεων της ευστάθειας ενός φυσικού ή τεχνητού πρανούς. Γενικά, με βάση και τις αναλύσεις που έγιναν, επιβεβαιώνεται πως ο ρόλος του νερού στο υπέδαφος σε συνδυασμό με τον σεισμό έχουν τον μεγαλύτερο αντίκτυπο, αφού επηρεάζουν αρνητικά την ευστάθεια των επιχωμάτων.

Οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι περιορισμένων δυνατοτήτων συγκριτικά με τις δυνατότητες αριθμητικής ανάλυσης πιο σύνθετων προβλημάτων που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Plaxis 2D. Όμως, και το Plaxis 2D σε σύγκριση με άλλα προγράμματα αριθμητικής ανάλυσης είναι χαμηλότερων δυνατοτήτων, καθώς η ανάλυση γίνεται σε δύο διαστάσεις. Συνεπώς, για την εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων που θα προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματικότητα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα λογισμικό τριδιάστατης ανάλυσης για τη δημιουργία των προσομοιωμάτων και επιπρόσθετα να διεξαχθούν δυναμικές μη-γραμμικές αναλύσεις με πραγματικές σεισμικές καταγραφές.

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Barnes G., (2010). Soil Mechanics – Principles and practice, 3rd edition. Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- Bo M. W., Fabius M., Fabius K., (2008). Impact of Global Warming on Stability of Natural Slopes. Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management. Presse de l'Université Laval, Québec.
- Coates D., (1977). Reviews in Engineering Geology Volume III. The Geological Society of America.
- Duncan J.M., Wright G.S., and Brandon T.L., (2014). Soil Strength and Slope Stability. Wiley and Sons, New Jersey.
- Duskov M., (1997). EPS as a Light-Weight Sub-base Material in Pavement Structures.
- EPS Industry Alliance Geofoam Civil Engineering, (2020). Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam Applications and Technical Data. EPS Industry Alliance.
- Fellenius W., (1936). Calculation of the stability of earth dams. Proceedings of the 2nd Congress on Large Dams, Washington DC, Pennsylvania, USA.
- Elia G., Cotecchia F., Pedone G., Vaunat J., Vardon P. J., Pereira C., ... Osinski P., (2017). Numerical modelling of slope–vegetation–atmosphere interaction: an overview. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology.
- Green T. R., Taniguchi M., Kooi H., Gurdak J. J., Allen D. M., Hiscock, K. M., ... Aureli, A., (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. Journal of Hydrology.
- Highland L., (2004). Landslide types and processes. U.S. Geological Survey.
- Hoek E. & Bray J., (1981). Rock Slope Engineering, 3rd edition, Inst. Mining and Metallurgy, London, UK.
- Hovarth J.S., (1995). Geofoam Geosynthetic. Hovarth Engineering, P.C. Scarsdale, N.Y, U.S.A, 217p.
- Kramer L. S., (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, New Jersey, USA.

- Kristo, C., Rahardjo, H., & Satyanaga, A., (2017). Effect of variations in rainfall intensity on slope stability in Singapore. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(4), 258–264.
- Lee W. Abramson, Thomas S. Lee, Sharma S., Boyce G., (2002). *Slope stability and stabilization methods* 2nd edition. John Wiley & Sons, inc., Canada.
- Lyratzakis A., (2021). Application of Expanded Polysterene (EPS) Geofoam for the Mitigation of Dynamic Vibrations and Distress of Civil Infrastructure. Ph.D., Thesis. School of Chemical and Environmental Engineering. Technical University of Crete.
- Matasovic N., (1991). Selection of Method for Seismic Slope Stability Analysis. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*.
- RC Omar, INZ Baharuddin, Hairin Taha, R.Roslan, Hazwani NK, Muzad MF., (2018). Slope Stability Analysis of Granitic Residual Soil Using SLOPE/W, Resistivity and Seismic. *International Journal of Engineering & Technology*.
- Psarropoulos, P., Tsobanakis, I., Makrakis, N., (2022). Impact of Climate Change on the Integrity of Onshore Gas Pipelines crossing Mountainous or Hilly areas. *Pipeline Technology Conference*, Berlin.
- Terzaghi K. & Peck R. B., (1969). *Soil Mechanics in Engineering practice* 3rd edition. John Wiley & Sons, inc., Canada.
- Tsagaras, I., Rahardjo, H., Toll, D.G., Leong, E.C., (2001). Controlling parameters for rainfall-induced landslides. NTU-PWD Geotechnical Research Centre, School of Civil and Structural Engineering, Nanyang Technological University, BlkN1, 1A-37, Nanyang Avenue, 639798 Singapore.
- U. S. Army Corps of Engineers, (1995). *Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering*. Eng. Tech. Letter.
- Varnes D.J., (1978), Slope movement types and processes, in Schuster, R.L., and Krizek, R.J., eds., *Landslides—Analysis and control*: National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report 176, p.p. 11–33.
- Varnes D.J., (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Commission on Landslides of the IAEG, UNESCO.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αλαμανής Ν.,(2017). Επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας των ιδιοτήτων του εδάφους στις μόνιμες σεισμικές μετατοπίσεις οδικών πρανών. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

- Αλεξίου Α., (2019). Μέθοδοι ευστάθειας πρανών και τοίχων αντιστήριξης – Παραδείγματα προσομοιώσεων με τοίχους αντιστήριξης. Μεταπτυχική διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Αναγνωστόπουλος Χ., (1988). Αντιμετώπιση των κατολισθήσεων με πασσάλους. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- ΕΛΟΤ EN 14933, (2007). Θερμομονωτικά και ελαφροβαρή προϊόντα πλήρωσης για εφαρμογές πολιτικού μηχανικού – Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS), Αθήνα.
- Κατσιράκης Ε., (2021). Μελέτη της σεισμικής απόκρισης του περιμετρικού τοίχους της Ακρόπολης και διερεύνηση μέτρων απομείωσης των δυναμικών ωθήσεων. Μεταπτυχιακή διατριβή. Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κούκης Γ. & Σαμπατάκης Ν., (2022). Γεωλογία Τεχνικών Έργων, 2η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Παπαζάχος Β. & Παπαζάχου Κ., (1989). Οι σεισμοί της Ελλάδας. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Παπαχααραλάμπους Γ., Καββαδάς Μ., Καραϊσκού Ε., Κοντού Μ., Σωτηρόπουλος Η., (2008). Μελέτη και Κατασκευή Οδικού Επιχώματος επί Πολύ Μαλακής Αργίλου, από Ελαφρά Υλικά Διογκωμένης Πολυστερίνης (EPS).
- Πατενιώτης Π., (2020). Το EPS Σήμερα στη Βιομηχανία των Κατασκευών.
- ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00., (2017). Εφαρμογές Γεωαφρού Διογκωμένης Πολυστερίνης (EPS) σε έργα Πολιτικού Μηχανικού.
- Σακελλαρίου Μ., (2009). Σημειώσεις Ευστάθειας Πρανών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Φ.Ε.Κ. Β' 1154/12-8-2003, Απόφαση Αριθ. Δ17α/115/9/ΦΝ275: Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ), 2003. Σύμφωνα με τις τροποποιήσεις από το (ΦΕΚ 1154Β'/12-08-03).
- ΦΕΚ 1221/30-11-98 τεύχος Β, Αριθ. Πρωτ. Δ17α/10/1/Φ.4.8: Κοινοποίηση απόφασης έγκρισης τεύχους ανάλυσης τιμών Γεωτεχνικών Ερευνών-Μελετών Γεωτεχνικών Έργων και Γεωτεχνικών Μελετών.
- EPSHellas, (2017). Υδατοαπορροφητικότητα προϊόντων Διογκωμένης Πολυστερίνης EPS.

Διπλωματικές Εργασίες

- Αγγέλου Δ. & Γεωργίου Α., (2019). Γεωλογικές & τεχνικογεωλογικές συνθήκες των κατολισθητικών φαινομένων στην επαρχιακή οδό Λυκαίου-Νέδα, Νομού Αρκαδίας. Πτυχιακή εργασία. Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος. Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Βότσου Ν., (2022). Αναλυτική και αριθμητική εκτίμηση κινδύνου αστάθειας πρανών υπό τη δράση υπόγειων υδάτων. Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- Δασκαλάκη Δ., (2023). Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στον συντελεστή ασφαλείας φυσικών και τεχνητών πρανών. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής.
- Καβαλιεράτου Ε., (2023). Ο ρόλος του νερού στην ευστάθεια χερσαίων και υποθαλάσσιων εδαφικών πρανών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Πανταζής Ε., (2011). Στατική και δυναμική επίλυση πρανών με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ρούμπος Α., (2022). Μελέτη ευστάθειας οδικών και σιδηροδρομικών επιχωμάτων με χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τσαίμου Α., (2006). Παραμετρική διερεύνηση ευστάθειας και παραμορφωσιμότητας πρανών σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις λιγνίτη με χρήση ελαστοπλαστικών μοντέλων. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης.