



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΛΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΓΕΝΙΑ-ΕΥΝΟΜΙΑ ΚΑΒΑΛΙΕΡΑΤΟΥ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2023



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΛΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΓΕΝΙΑ-ΕΥΝΟΜΙΑ ΚΑΒΑΛΙΕΡΑΤΟΥ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής Ιωάννης Τσομπανάκης (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ), 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.»

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Ο ρόλος του νερού στην ευστάθεια χερσαίων και υποθαλάσσιων εδαφικών πρηνών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες» πραγματοποιήθηκε στο τμήμα Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και συγκεκριμένα στο εργαστήριο Υπολογιστικής Δυναμικής και Ενέργειας υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ιωάννη Τσομπανάκη.

Με τη σειρά μου θέλω να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου για την ευκαιρία που μου δόθηκε να ερευνήσω και να αναπτύξω αυτήν την διπλωματική εργασία. Η διαδικασία ήταν εξαιρετικά εποικοδομητική και μου προσέφερε πολύτιμες γνώσεις.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα μου Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, κύριο Ιωάννη Τσομπανάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση και κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, αλλά και για την αμέριστη υποστήριξη και τις συμβουλές του.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Δρ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο μέλος ΕΔΙΠ του Ε.Μ.Π. για την καθοδήγηση, τις γνώσεις του καθώς και την επιμονή του για το καλύτερο της εργασίας μου, αλλά και τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη για την συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή. Επίσης, να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες Μου και στον διδακτορικό φοιτητή κ. Νίκο Μακράκη για τις συμβουλές του.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που μου παρείχε αμέτρητη υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια σπουδών μου, αλλά και να εκφράσω ευγνωμοσύνη στο ακαδημαϊκό προσωπικό και το προσωπικό της βιβλιοθήκης του ιδρύματος που με βοήθησαν να αποκτήσω πρόσβαση στις απαραίτητες πηγές και πληροφορίες για την έρευνά μου.

Σας ευχαριστώ όλους

Ευγενία Ευνομία Καβαλιεράτου

Χανιά, Οκτώβριος 2023

Τα τελευταία χρόνια, αφενός υπάρχει μία σημαντική αύξηση τεχνικών έργων μέσα στη θάλασσα, όπως τα ενεργειακά δίκτυα, αφετέρου παρατηρείται το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Η κλιματική αλλαγή, δηλαδή η έντονη αλλαγή των καιρικών συνθηκών, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση των αέριων του θερμοκηπίου που οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας της Γης. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες αυξάνουν το φαινόμενο της εξάτμισης προκαλώντας, εκτός των άλλων, και έντονες βροχοπτώσεις, με αποτέλεσμα να προκαλούνται προβλήματα και κατολισθήσεις σε φυσικά και τεχνητά εδαφικά πρανή.

Η αστοχία των εδαφικών πρανών δύναται να προκαλέσει ακόμα και μεγάλες μετακινήσεις της μάζας τους, δημιουργώντας έτσι κατολισθήσεις, οι οποίες αποτελούν ένα σημαντικό γεωκίνδυνο παγκοσμίως. Οι ιδιότητες των υλικών, η γεωμετρία του πρανούς, η θέση (χερσαία ή υποθαλάσσια) επηρεάζουν σημαντικά τους μηχανισμούς των κατολισθήσεων. Ειδικά σε χερσαία πρανή, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο υδροφόρος ορίζοντας, καθώς και η επίδραση φαινομένων έντονης βροχόπτωσης εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Η επιρροή του νερού στην ευστάθεια του πρανούς εξαρτάται από τις (στραγγιζόμενες ή αστράγγιστες) συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, συνεπιδρώνοντας 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 πρανούς είναι η απότομη κλίση, η μικρή συνοχή ή/και η γωνία εσωτερικής τριβής του εδαφικού υλικού, αλλά και τα σεισμικά/δυναμικά φορτία.

Επιπροσθέτως, το νερό, είτε εσωτερικά με την παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα σε κορεσμένα εδάφη, είτε εξωτερικά, εξαιτίας των πλημμυρών, επιδρά στην ευστάθεια, οδηγώντας σε μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας. Με δεδομένο ότι τα τελευταία χρόνια έχουν παρατηρηθεί αλλαγές στο κλίμα (βλ., φαινόμενο κλιματικής αλλαγής), έχουν διαπιστωθεί σημαντικές αυξομειώσεις στη συχνότητα εμφάνισης, στην ένταση και στη διάρκεια των βροχοπτώσεων. Υπό αυτές τις συνθήκες, διαφοροποιείται η διήθηση του νερού στο έδαφος σε σύγκριση με τις κανονικές βροχοπτώσεις (γεγονός που επηρεάζει τον υδροφόρο ορίζοντα), καθώς και η επιφανειακή απορροή (γεγονός που επηρεάζει τη διάβρωση, και κατ' επέκταση τις κλίσεις των πρανών). Ο συνδυασμός δε μίας έντονης βροχόπτωσης με έναν ισχυρό σεισμό δεν μπορεί να αποκλειστεί σε χώρες με έντονη σεισμικότητα, όπως είναι η Ελλάδα.

Με βάση τα προαναφερθέντα, στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η ποσοτική εκτίμηση της ευστάθειας χερσαίων και υποθαλάσσιων εδαφικών πρανών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες μέσω αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες αναλυτικές σχέσεις και πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS 2D. Συμπερασματικά, επιβεβαιώνεται ο σημαντικότερος ρόλος του υπόγειου και του επιφανειακού νερού και αποδεικνύεται, εμμέσως πλην σαφώς, η ενδεχόμενη επίδραση (επιβλαβής ή ευεργετική) της κλιματικής αλλαγής στην ευστάθεια των εδαφικών πρανών και κατ' επέκταση των κατασκευών που βρίσκονται θεμελιωμένα πάνω ή κοντά σε αυτά.

ABSTRACT

In recent years, on one hand, there is a significant increase of offshore infrastructure, e.g., energy lifelines, while on the other hand, there has been a dramatic increase in the intensity and frequency of flooding phenomena due to climate change. Climate change, i.e., the change in weather conditions is mainly attributed to the increase of greenhouse gases, which leads to an increase of Earth's temperature. Higher temperatures increase evaporation causing, among others, intense rainfalls, resulting in problems and landslides on natural and artificial soil slopes.

The failure of soil slopes may result in large movements of soil masses, thus creating landslides, which constitute a crucial geohazard worldwide. The mechanical properties of the materials, the geometry of the slope, the location (onshore or offshore) affect the mechanisms of landslides. Especially for onshore slopes, the underground water table plays an important role, as well as the precipitation conditions, which are altered due to climate change. The influence of water on soil strength depends on the (drained or undrained) prevailing conditions in the area, interacting with the process of soil erosion, which is stalled by the presence of vegetation, but intensified by flooding phenomena. Adverse factors for the stability of a slope are high inclinations, low cohesion and/or angle of internal friction of the soil, as well as seismic and dynamic loads.

In addition, water, either internally with the presence of a water table in saturated soils, or externally, due to floods, has an impact on slope stability, altering the safety factor. Moreover, due to climate change, there has been a significant increase (increased frequency and duration) of flooding phenomena. Under these adverse conditions, the infiltration of water into the soil (a factor affecting the aquatic horizon), as well as surface runoff (a factor affecting erosion and the slope inclination) are also different compared to normal rainfalls. Obviously, the combination of a heavy rainfall with a strong earthquake event cannot be ruled out in countries with high seismicity, such as Greece.

Based on the aforementioned remarks, the present diploma thesis attempts to quantify the stability of onshore and offshore soil slopes under static and seismic conditions by analytical and numerical methods. For this purpose, analytical relationships as well as numerical simulations, utilizing the finite element software PLAXIS 2D, have been used. The parametric study confirms the crucial role of groundwater and surface water and indirectly demonstrates the potential (detrimental or beneficial) impact of climate change on the stability of soil slopes, as well as on the adjacent structures.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | i |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | iii |
| ABSTRACT | iv |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ..... | v |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. | 1 |
| 1.1 Εισαγωγικές έννοιες | 1 |
| 1.2 Κλιματική Αλλαγή | 3 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. | 5 |
| 2.1 Ευστάθεια πρανών..... | 5 |
| 2.2 Φυσικά και τεχνητά Πρανή | 5 |
| 2.2.1 Χερσαία εδαφικά πρανή | 5 |
| 2.2.2 Υποθαλάσσια εδαφικά πρανή | 6 |
| 2.2.3 Τεχνητά Πρανή | 7 |
| 2.3 Ορισμός Κατολισθήσεων..... | 7 |
| 2.3.1 Κατηγοριοποίηση Κατολισθήσεων | 8 |
| 2.3.2 Παράγοντες δημιουργίας κατολισθήσεων | 12 |
| 2.3.3 Κατολισθήσεις και ο ρόλος του νερού | 13 |
| 2.3.4 Μέτρα αντιμετώπισης κατολισθήσεων | 13 |
| 2.4. Σεισμικά Φορτία..... | 13 |
| 2.5. Ο κύκλος του νερού..... | 15 |
| 2.6. Υπόγειοι υδροφορείς | 16 |
| 2.7. Φαινόμενο βροχόπτωσης..... | 17 |
| 2.8. Κλιματική Κρίση | 17 |
| 2.9. Υδρογεωλογία | 19 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. | 27 |
| 3.1. Μέθοδος της Οριακής Ισορροπίας | 27 |
| 3.1.1. Επίπεδη Μεταφορική Ολίσθηση..... | 28 |
| 3.1.2. Μέθοδος των Λωρίδων | 29 |
| 3.1.3. Μέθοδος Bishop | 29 |
| 3.1.4. Ψευδοστατική Μέθοδος Ανάλυσης..... | 30 |
| 3.1.5. Δυναμική Μέθοδος Ανάλυσης | 31 |
| 3.2. Αναλυτική προσομοίωση πρανών | 32 |
| 3.2.1. Απειρομήκες πρανές..... | 32 |

| | |
|--|----|
| 1 ^η Περίπτωση: Απειρομήκες ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες: | 32 |
| 2 ^η Περίπτωση: Απειρομήκες ξηρό πρανές με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα υπό στατικές συνθήκες..... | 33 |
| 3 ^η Περίπτωση: Απειρομήκες ξηρό πρανές υπό σεισμικές συνθήκες : | 34 |
| 4 ^η Περίπτωση: Απειρομήκες πρανές παρουσία υδροφόρου ορίζοντα υπό σεισμικές συνθήκες..... | 36 |
| 5 ^η Περίπτωση: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες βυθισμένο σε νερό. | 37 |
| 3.2.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων για απειρομήκη πρανή | 39 |
| 3.2.3. Πρανή Πεπερασμένου ύψους | 50 |
| 1 ^η Περίπτωση: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες. | 51 |
| 2 ^η Περίπτωση: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες, με ροή | 52 |
| 3 ^η Περίπτωση: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό σεισμικές συνθήκες | 53 |
| 4 ^η Περίπτωση: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό σεισμικές συνθήκες με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα..... | 55 |
| 5 ^η Περίπτωση: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες, βυθισμένο σε νερό οριζόντιο στο επίπεδο | 56 |
| 3.2.4. Ανάλυση αποτελεσμάτων για πεπερασμένα πρανή | 58 |
| 3.3. Συμπεράσματα Αναλυτικής μεθόδου | 65 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. | 69 |
| 4.1. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων | 69 |
| 4.2. Λογισμικό Plaxis 2D..... | 70 |
| 4.3. Προσομοίωση πεπερασμένου πρανούς..... | 70 |
| 4.4. Αποτελέσματα Πεπερασμένου Πρανούς | 72 |
| 4.4.1. Συμπεράσματα αριθμητικής μεθόδου | 85 |
| 4.4.2. Σύγκριση Μεθόδων- Συμπεράσματα | 85 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. | 91 |
| Βιβλιογραφία | 93 |
| Διεθνής Βιβλιογραφία | 93 |
| Ελληνική Βιβλιογραφία | 94 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1.1 Απειρομήκες πρανές..... | 1 |
| Εικόνα 1.2 Πετρερασμένο πρανές..... | 1 |
| Εικόνα 1.3. Εισροή βροχόπτωσης στη μάζα του πρανούς..... | 2 |
| Εικόνα 1.4 Διάβρωση παραθαλάσσιων πρανών..... | 2 |
| Εικόνα 1.5 Μετακίνηση εδαφικού υλικού λόγω βαρύτητας και σεισμικών διεγέρσεων..... | 3 |
| Εικόνα 2.1 Κατολίσθηση και ροή εδαφικής μάζας το 1995 στην Νότια Καλιφόρνια (USGS, 2004). | 6 |
| Εικόνα 2.2 Σχηματική Αναπαράσταση υποθαλάσσιας κατολίσθησης από τσουνάμι..... | 7 |
| Εικόνα 2.3: Εικονική αναπαράσταση κατάπτωσης βράχων (USGS, 2004)..... | 8 |
| Εικόνα 2.4: Αναπαράσταση κατάπτωσης βράχων (BGS, 2012). | 9 |
| Εικόνα 2.5: Εικονική αναπαράσταση ανατροπής βράχων (USGS, 2004). | 9 |
| Εικόνα 2.6: Αναπαράσταση ανατροπής βράχων (Alejano et al., 2009). | 9 |
| Εικόνα 2.7 Εικονική αναπαράσταση της περιστροφικής ολίσθησης βράχων (USGS, 2004). | 10 |
| Εικόνα 2.8: Εικονική αναπαράσταση της μεταθετικής ολίσθησης βράχων (USGS, 2004). | 10 |
| Εικόνα 2.9: Εικονική αναπαράσταση της πλευρικής εξάπλωσης (USGS, 2004). | 11 |
| Εικόνα 2.10: Αστοχία οδικού πρανούς λόγω πλευρικής εξάπλωσης στη Βιρμανία (2010). | 11 |
| Εικόνα 2.11: Σχηματική αναπαράσταση της ροής (USGS, 2004). | 11 |
| Εικόνα 2.12: Αναπαράσταση ροής (Colorado Geological Survey, 2014). | 11 |
| Εικόνα 2.13: Όλοι οι τύποι μετακινήσεων μάζας (USGS, 2004). | 12 |
| Εικόνα 2.14: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας (ΟΑΣΠ, 2003). | 14 |
| Εικόνα 2.15 Υδρολογικός Κύκλος (Psarropoulos et al. 2022). | 15 |
| Εικόνα 2.16: Κίνηση Υπόγειου Νερού (Βουδούρης, 1997). | 16 |
| Εικόνα 2.17 Αλλαγές στην παγκόσμια μέση θερμοκρασία επιφάνειας σε σχέση με το 1986–2005 για τα διαφορετικά σενάρια εκπομπών σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2018). | 18 |
| Εικόνα 2.18 Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας (FS) με την πάροδο του χρόνου λόγω έντονων βροχοπτώσεων ή/και διάβρωσης στον πόδα του πρανούς (Popescu, 2002). | 19 |
| Εικόνα 2.19: Διαγράμματα Βροχόπτωσης συναρτήσει του χρόνου. | 21 |
| Εικόνα 2.20: Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου..... | 21 |
| Εικόνα 2.21: Διαγράμματα Βροχόπτωσης συναρτήσει του χρόνου..... | 22 |
| Εικόνα 2.22: Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου..... | 22 |
| Εικόνα 2.23 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου για CN=40..... | 23 |
| Εικόνα 2.24 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου για CN=60..... | 23 |
| Εικόνα 2.25 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου για CN=80..... | 24 |
| Εικόνα 2.26 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου CN=40..... | 24 |
| Εικόνα 2.27 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου για CN=60..... | 25 |
| Εικόνα 2.28 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου για CN=80..... | 25 |
| Εικόνα 3.1 Διάγραμμα Mohr-Coulomb..... | 28 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 3.2 Επίπεδη μεταφορική ολίσθηση. | 29 |
| Εικόνα 3.3 Μέθοδος των λωρίδων (Barnes 2010). | 29 |
| Εικόνα 3.4 : Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα εδαφικό πρανές (Psarropoulos & Antoniou 2015). | 31 |
| Εικόνα 3.5 Απειρομήκες εδαφικό πρανές σε ξηρές συνθήκες. | 33 |
| Εικόνα 3.6 Απειρομήκες εδαφικό πρανές σε υγρές συνθήκες. | 34 |
| Εικόνα 3.7 Απειρομήκες εδαφικό πρανές σε ξηρές συνθήκες, με σεισμική διέγερση. | 35 |
| Εικόνα 3.8: Απειρομήκες εδαφικό πρανές σε υγρές συνθήκες, με σεισμική διέγερση. | 36 |
| Εικόνα 3.9 Βυθισμένο σε νερό Απειρομήκες εδαφικό πρανές. | 38 |
| Εικόνα 3.10: Ξηρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$ | 41 |
| Εικόνα 3.11: Ξηρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ | 41 |
| Εικόνα 3.12 : Ξηρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=20$ kPa, $z=10$ m με διαφορετικές τιμές για την γωνία εσωτερικής τριβής. | 42 |
| Εικόνα 3.13: Ξηρό απειρομήκες πρανές, υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$ | 43 |
| Εικόνα 3.14: Ξηρό απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ | 43 |
| Εικόνα 3.15: Ξηρό απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=20$ kPa, $z=10$ m, με διαφορετικές τιμές για την γωνία εσωτερικής τριβής. | 43 |
| Εικόνα 3.16: Υγρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$ | 44 |
| Εικόνα 3.17: Υγρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=0$ kPa, $z=10$ m, $\phi=30^\circ$, για διαφορετικές τιμές στάθμης νερού. | 44 |
| Εικόνα 3.18: Υγρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=20$ kPa, $z=10$ m, με διαφορετικές τιμές για την γωνία εσωτερικής τριβής. | 45 |
| Εικόνα 3.19: Υγρό απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με ροή νερού, | 46 |
| Εικόνα 3.20 : Υγρό απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=20$ kPa, με διαφορετικές τιμές για την γωνία εσωτερικής τριβής. | 46 |
| Εικόνα 3.21: Υγρό απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ | 46 |
| Εικόνα 3.22: Υγρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$ | 47 |
| Εικόνα 3.23 : Υγρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$, $z=20$ m. | 47 |
| Εικόνα 3.24: Ξηρό απειρομήκες πρανές με $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$, $z=10$ m. | 48 |
| Εικόνα 3.25: Υγρό απειρομήκες πρανές με ροή νερού, με $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$, $z=10$ m. | 48 |
| Εικόνα 3.26: Ξηρό απειρομήκες πρανές με $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$, $z=10$ m. | 49 |
| Εικόνα 3.27: Υγρό απειρομήκες πρανές με $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$, $z=10$ m. | 49 |
| Εικόνα 3.28: Συντελεστής ασφαλείας για όλες τις αναλυόμενες περιπτώσεις για αμμώδη εδάφη, ($c=0$ kPa), $z=10$ m, $\phi=30^\circ$ | 49 |
| Εικόνα 3.29: Συντελεστής ασφαλείας για όλες τις αναλυόμενες περιπτώσεις για αργιλικά εδάφη ($c=20$ kPa), $z=10$ m, $\phi=30^\circ$ | 50 |
| Εικόνα 3.30: Πεπερασμένο εδαφικό πρανές σε ξηρές συνθήκες. | 51 |
| Εικόνα 3.31: Γεωμετρία Πεπερασμένου εδαφικού πρανούς σε ξηρές συνθήκες. | 53 |
| Εικόνα 3.32: Πεπερασμένο εδαφικό πρανές σε ξηρές συνθήκες, με σεισμική διέγερση. | 54 |
| Εικόνα 3.33: Γεωμετρία Πεπερασμένου εδαφικού πρανούς σε ξηρές συνθήκες. | 55 |
| Εικόνα 3.34: Πεπερασμένο εδαφικό πρανές βυθισμένο σε νερό. | 57 |
| Εικόνα 3.35: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$ σε διάφορα ύψη. | 59 |

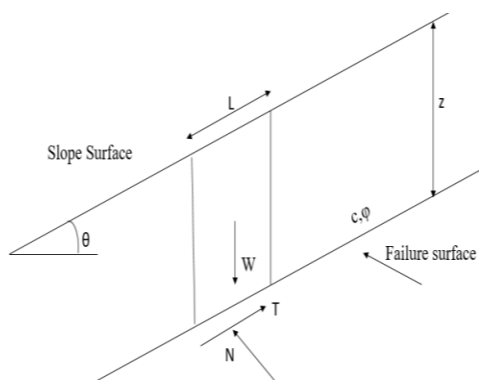
| | |
|---|----|
| Εικόνα 3.36: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $c=20$ kPa, σε διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής. | 60 |
| Εικόνα 3.37: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $c=0$ kPa, σε διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής. | 60 |
| Εικόνα 3.38: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πεπερασμένο πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες, με $\phi=30^\circ$, σε διάφορες τιμές συνοχής. | 61 |
| Εικόνα 3.39: Σύγκριση στατικών συνθηκών με ψευδό-στατικών συνθηκών σε αμμώδη εδάφη $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$ | 61 |
| Εικόνα 3.40: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες με ροή νερού 10° ως προς το επίπεδο, ύψους 10m, $\phi=30^\circ$ | 62 |
| Εικόνα 3.41: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες, με ροή νερού, με $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$ | 63 |
| Εικόνα 3.42: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες, με ροή νερού, με $c=0$ kPa $\phi=30^\circ$ | 63 |
| Εικόνα 3.43: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $z=10$ m, $\phi=30^\circ$ | 64 |
| Εικόνα 3.44: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $z=10$ m, $c=20$ kPa. | 64 |
| Εικόνα 3.45: Συντελεστής ασφαλείας για όλες τις αναλυόμενες περιπτώσεις για αμμώδη εδάφη, $z=10$ m, $\phi=30^\circ$ | 65 |
| Εικόνα 3.46: Συντελεστής ασφαλείας για όλες τις αναλυόμενες περιπτώσεις για αργιλικά εδάφη, $z=10$ m, $\phi=30^\circ$ | 65 |
| Εικόνα 4.1: Προσομοίωση γεωμετρίας μοντέλου με πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. | 72 |
| Εικόνα 4.2: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με συνοχή 0 kPa ύψος 10 m, $\beta=30^\circ$, $\phi=15^\circ$, $FS=0.49$ | 73 |
| Εικόνα 4.3: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με $c=0$ kPa, $H=10$ m, $\beta=45^\circ$, $\phi=15^\circ$, $FS=0.291$ | 73 |
| Εικόνα 4.4: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=30^\circ$, $\phi=15^\circ$, $FS=1.51$ | 74 |
| Εικόνα 4.5: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με $c=0$ kPa, $H=10$ m, $\beta=15^\circ$, $\phi=30^\circ$ $FS=2.35$ | 74 |
| Εικόνα 4.6: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=15^\circ$, $\phi=15^\circ$ $FS=2.37$ | 74 |
| Εικόνα 4.7: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=30^\circ$, $\phi=30^\circ$ $FS=2.27$ | 75 |
| Εικόνα 4.8: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $\phi=30^\circ$ | 75 |
| Εικόνα 4.9: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $c=0$ kPa. | 76 |
| Εικόνα 4.10: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με σεισμική διέγερση με $kh=0.1$, $c=0$ kPa, $H=10$ m, $\beta=45^\circ$, $\phi=15^\circ$ $FS=0.27$ | 76 |
| Εικόνα 4.11: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με σεισμική διέγερση με $kh=0.1$, $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=30^\circ$, $\phi=15^\circ$ $FS=1.24$ | 77 |
| Εικόνα 4.12: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με σεισμική διέγερση με $kh=0.1$, $c=0$ kPa, $H=10$ m, $\beta=15^\circ$, $\phi=30^\circ$ $FS=1.72$ | 77 |
| Εικόνα 4.13: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με σεισμική διέγερση με $kh=0.1$, $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=15^\circ$, $\phi=15^\circ$ $FS=1.6$ | 77 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 4.14 : Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες, $z=10\text{m}$, $\varphi=30^\circ$ | 78 |
| Εικόνα 4.15: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πρανές υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες, $z=10\text{m}$, $c=20\text{ kPa}$, $\varphi=30^\circ$ | 79 |
| Εικόνα 4.16: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς με $c=20\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\varphi=15^\circ$, $FS=1.38$. β)Επιφάνειας αστοχίας υγρού πρανούς με $c=20\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\varphi=15^\circ$, $FS=1.38$ | 80 |
| Εικόνα 4.17: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς με $c=0\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\varphi=15^\circ$, $FS=0.71$. β)Επιφάνειας αστοχίας υγρού πρανούς με $c=0\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\varphi=15^\circ$, $FS=0.71$ | 80 |
| Εικόνα 4.18: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς με σεισμική διέγερση $kh=0.1$, με $c=0\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\varphi=15^\circ$, $FS=0.41$. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς με σεισμική διέγερση $kh=0.1$, $c=0\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\varphi=15^\circ$ $FS=0.41$ | 81 |
| Εικόνα 4.19: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς με σεισμική διέγερση $kh=0.1$, με $c=20\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $FS=1.68$. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς με σεισμική διέγερση $kh=0.1$, $c=20\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\varphi=30^\circ$ $FS=1.68$ | 81 |
| Εικόνα 4.20 α)Γεωμετρία υγρού πρανούς. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς $c=20\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=15^\circ$, $\varphi=15^\circ$, $FS=4.64$ | 82 |
| Εικόνα 4.21: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς με $c=0\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=15^\circ$, $\varphi=15^\circ$ $FS=1.05$ | 83 |
| Εικόνα 4.22: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς με $c=0\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=15^\circ$, $\varphi=30^\circ$ $FS=2.44$ | 83 |
| Εικόνα 4.23: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς με $c=20\text{ kPa}$, $H=10\text{ m}$, $\beta=15^\circ$, $\varphi=15^\circ$ $FS=4.64$ | 83 |
| Εικόνα 4.24: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πρανές υπό στατικές συνθήκες, $z=10\text{m}$, $\varphi=15^\circ$. 84 | |
| Εικόνα 4.25: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πρανές υπό στατικές συνθήκες, $z=10\text{m}$, $c=20\text{kPa}$ | 84 |
| Εικόνα 4.26: Σύγκριση Μεθόδων για ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=0\text{kPa}$, $\varphi=30^\circ$. .86 | |
| Εικόνα 4.27: Σύγκριση Μεθόδων για ξηρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=0\text{ kPa}$, $\varphi=30^\circ$ | 86 |
| Εικόνα 4.28: Σύγκριση Μεθόδων για ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=20\text{kPa}$, $\varphi=30^\circ$.87 | |
| Εικόνα 4.29 Σύγκριση Μεθόδων για ξηρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=20\text{kPa}$, $\varphi=30^\circ$ | 87 |
| Εικόνα 4.30: Σύγκριση Μεθόδων για υγρό πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=0\text{kPa}$, $\varphi=30^\circ$. .88 | |
| Εικόνα 4.31: Σύγκριση Μεθόδων για υγρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=20\text{kPa}$, $\varphi=30^\circ$ | 88 |

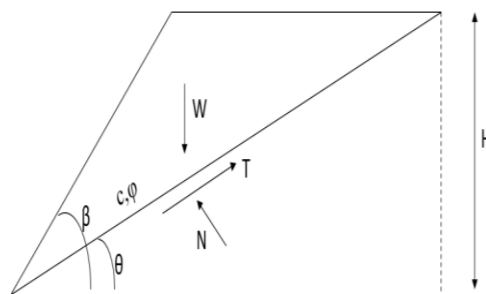
Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικές έννοιες

Η κατανόηση της εργασίας αυτής, προϋποθέτει την ανάγκη ορισμού πολλών εννοιών που σχετίζονται με την έννοια του εδαφικού πρανούς. Εδαφικό πρανός είναι ο εδαφικός σχηματισμός ο οποίος έχει κλίση ως προς το επίπεδο και μπορεί να είναι φυσικό ή τεχνητό. Τα πρανή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη γεωμετρία τους σε πεπερασμένα και απειρομήκη, και ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος τους, σε χερσαία και υποθαλάσσια. Τα απειρομήκη πρανή χαρακτηρίζονται από το μεγάλο μήκος τους συγκριτικά με το ύψος τους, ενώ τα πεπερασμένα χαρακτηρίζονται από συγκρίσιμα μεγέθη στο μήκος και το ύψος τους.

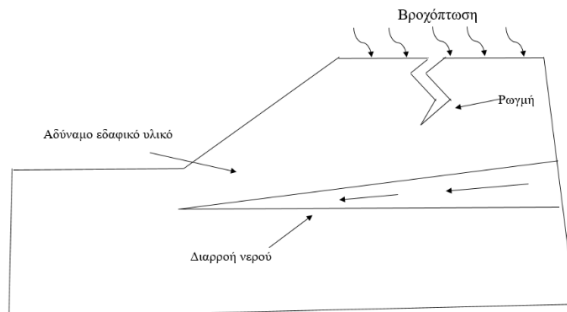


Εικόνα 1.1 Απειρομήκες πρανές.



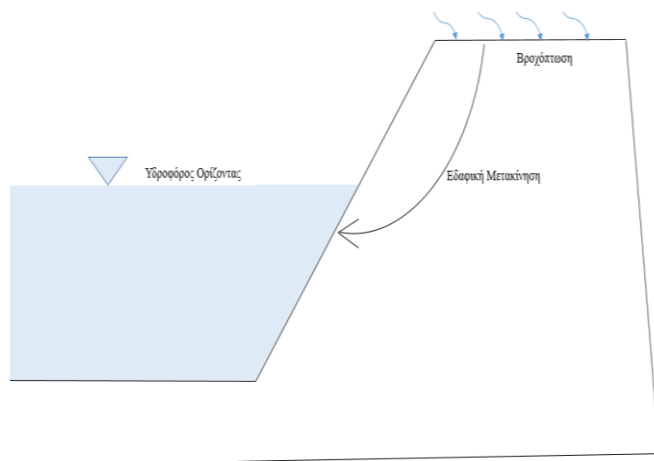
Εικόνα 1.2 Πεπερασμένο πρανές

Η ευστάθεια πρανών σχετίζεται με την ικανότητα ενός πρανούς να αντιστέκεται στην κίνηση της μάζας του. Είναι ένας σημαντικός πρόβλημα της γεωτεχνικής μηχανικής, καθώς η αστάθεια των πρανών μπορεί να προκαλέσει αסοχίες στα πρανή, κατολισθήσεις αυτών, πτώσεις βράχων και άλλους τύπους κίνησης μαζών που μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στις υποδομές και να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Η εκτίμηση της ευστάθειας χερσαίων και υποθαλάσσιων εδαφικών πρανών γίνεται με την αξιολόγηση διαφορών παραγόντων που την επηρεάζουν, στους οποίους συμπεριλαμβάνεται και το νερό. Το νερό που εισχωρεί στο εδαφικό υλικό, είτε από βροχοπτώσεις, είτε από πλημμύρες, είτε από παραθαλάσσιες και παραλίμνιες περιοχές, επηρεάζει την εσωτερική δομή του γεωλογικού σχηματισμού, προκαλώντας εσωτερική διάβρωση και υπονόμηση της βάσης των πρανών. Το υπόγειο νερό επιφέρει πρόσθετη πίεση στο πρανές, με αποτέλεσμα τη μείωση της ευστάθειας του. Η κίνηση του νερού μειώνει τη διατμητική αντοχή του υλικού με αποτέλεσμα αυτό να είναι πιο ευάλωτο.



Εικόνα 1.3. Εισροή βροχόπτωσης στη μάζα του πρανούς.

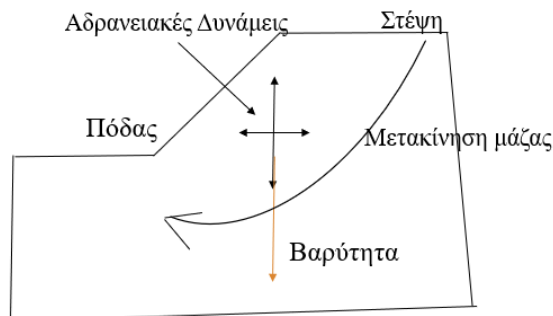
Πέρα από τη διάβρωση που προκαλεί το νερό, αυτό εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, με αποτέλεσμα η υπόγεια κίνηση του νερού να αυξάνει την πίεση των πόρων, ελαττώνοντας και αποδυναμώνοντας τις δυνάμεις αντίστασης ενώ αυξάνει τις δυνάμεις ολίσθησης. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ευστάθεια του υλικού, προκαλώντας εσωτερικές αλλά και εξωτερικές μετακινήσεις μαζών (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).



Εικόνα 1.4 Διάβρωση παραθαλάσσιων πρανών.

Ένας ακόμη παράγοντας που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία και επηρεάζει την ευστάθεια των πρανών είναι αυτός των σεισμικών διεγέρσεων. Η σεισμικότητα στην Ελλάδα αποτελεί κρίσιμο πρόβλημα της γεωτεχνικής μηχανικής, καθώς καθίσταται προφανές ότι η απειλείται ακεραιότητα υποδομών σε τέτοιες περιοχές. Ο σεισμικός κίνδυνος και ο συνδυασμός του με ταυτόχρονα πλημμυρικά φαινόμενα δύναται να οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση της ευστάθειας των εδαφικών πρανών, κάτι που δεν έχει μελετηθεί επαρκώς. Επιπρόσθετα, ο αντίκτυπος της κλιματικής κρίσης στις καιρικές συνθήκες μπορεί να οδηγήσει και σε επιδείνωση της ευστάθειας των εδαφικών πρανών κυρίως στην ξηρά, γεγονός που επίσης δεν έχει μελετηθεί ενδελεχώς στη διεθνή βιβλιογραφία. Η διπλωματική εργασία στοχεύει να εμπλουτίσει τη σχετική βιβλιογραφία, αλλά και να οδηγήσει σε βελτίωση των πρακτικών (αντισεισμικού) σχεδιασμού

τεχνητών και φυσικών πρηνών υπό ένα πρίσμα ανάλυσης πολλαπλών κινδύνων (multi-hazard analysis).



Εικόνα 1.5 Μετακίνηση εδαφικού υλικού λόγω βαρύτητας και σεισμικών διεγέρσεων.

1.2 Κλιματική Αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή σχετίζεται με την εμφάνιση περισσότερων ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι έντονες βροχοπτώσεις. Δεδομένου ότι η αστάθεια ενός φυσικού ή τεχνητού εδαφικού πρηνούς σχετίζεται με τη συχνότητα, τη διάρκεια και την ένταση των βροχοπτώσεων, καθίσταται προφανές ότι η ακεραιότητα κτιρίων και υποδομών σε αυτές τις περιοχές μπορεί να επηρεαστεί έμμεσα από την κλιματική αλλαγή κατά τη διάρκεια ζωής τους. Υπό αυτό το πρίσμα, η παρούσα εργασία εστιάζει στη δυνητική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην ευστάθεια των εδαφικών πρηνών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επίδραση μπορεί να είναι επιζήμια ή ευεργετική, ανάλογα με τις επικρατούσες εδαφικές και τοπογραφικές συνθήκες.

Η ακεραιότητα όλων των κτιρίων και των υποδομών που έχουν κατασκευαστεί (ή πρόκειται να κατασκευαστούν στο μέλλον) σε ορεινές ή λοφώδεις περιοχές σχετίζεται άμεσα με τα διάφορα φαινόμενα αστάθειας φυσικών (εδαφικών ή βραχωδών) πρηνών. Παράλληλα, σε διάφορα τεχνικά έργα η ευστάθεια των τεχνητών πρηνών (των ορυγμάτων ή/και των επιχωμάτων) αποτελεί ζήτημα καθοριστικής σημασίας. Είναι γνωστό ότι η αστάθεια των εδαφικών πρηνών σχετίζεται άμεσα ή έμμεσα με τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων καθώς αυτές καθορίζουν, αφενός τις μεταβολές της στάθμης των υπογείων υδάτων και της υπόγειας υδραυλικής ροής λόγω του φαινομένου της διήθησης, αφετέρου την πιθανή διάβρωση της επιφάνειας του εδάφους λόγω του φαινομένου της επιφανειακής απορροής. Όπως θα περιγράψει στη συνέχεια, η μεταβολή της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και η επιφανειακή διάβρωση επηρεάζουν σημαντικά τον συντελεστή ασφαλείας ενός εδαφικού πρηνούς.

Στην παρούσα εργασία μελετώνται εκτενώς τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την ευστάθεια των πρηνών, δηλαδή την τιμή του συντελεστή ασφαλείας, όπως η κλίση του πρηνούς, η γωνία εσωτερικής τριβής και η συνοχή του εδάφους, το επίπεδο της σεισμικής επιτάχυνσης, καθώς και η ένταση της βροχόπτωσης. Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων γίνεται αναλυτικά και αριθμητικά. Η ανάπτυξη των αριθμητικών προσομοιωμάτων γίνεται με το λογισμικό PLAXIS 2D, το οποίο βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιείται ευρέως σε δισδιάστατες γεωτεχνικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, στην αναλυτική μεθοδολογία μελετήθηκαν και διαμορφώθηκαν κατάλληλα οι σχέσεις ευστάθειας πρηνών της βιβλιογραφίας

για στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες και παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα τους, όσον αφορά για την τιμή του συντελεστή ασφαλείας, με κατάλληλες γραφικές παραστάσεις. Στη συνέχεια, στο πλαίσιο της αριθμητικής ανάλυσης δημιουργήθηκαν κατάλληλα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, καθώς έγινε εκτενής παραμετρική διερεύνηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο προσεγγίσεων για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής, δηλαδή στον ρόλο του νερού στην ευστάθεια χερσαίων και υποθαλάσσιων εδαφικών πρανών σε συνθήκες σεισμικής δραστηριότητας αλλά και έντονων φαινομένων βροχοπτώσης. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι ορισμοί των φυσικών φαινομένων: των σεισμών και των βροχοπτώσεων και γίνεται αναφορά στην κλιματική κρίση των τελευταίων χρόνων. Αναφέρεται επίσης η επίδραση αυτών των φαινομένων στην ευστάθεια των εδαφικών πρανών. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα είδη των υπό μελέτη εδαφικών πρανών (χερσαίων, υποθαλάσσιων), τα είδη κινήσεων μαζών που δημιουργούν, αλλά και οι αστοχίες που υποβάλλονται. Σε αυτό το κεφάλαιο επίσης γίνεται η ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την σταθερότητα αυτών των πρανών. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αναλυτικές μέθοδοι για την ευστάθεια των πρανών, που εκτιμάται ο συντελεστής ασφαλείας σύμφωνα με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας. Η διαδικασία αυτή γίνεται με επίλυση μαθηματικών εξισώσεων για διάφορα πρανή καθώς και για διαφορετικές συνθήκες. Μελετήθηκαν απειρομήκη και πεπερασμένα πρανή με η χωρίς υδροφόρο ορίζοντα, βυθισμένα πρανή αλλά και πρανή που δέχονται σεισμική φόρτιση. Δημιουργήθηκαν συγκεντρωτικά διαγράμματα για επεξήγηση της κάθε αλλαγής που συνέβαινε στις συνθήκες. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται η διαδικασία της αριθμητικής ανάλυσης και τα αριθμητικά προσομοιώματα για την ευστάθεια πρανών, μέσω του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D. Η μελέτη έγινε σε πρανή με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα αλλά και σεισμικής φόρτισης. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και γίνεται συζήτηση για περαιτέρω επέκταση της μελέτης.

Ευστάθεια Πρανών

2.1 Ευστάθεια πρανών

Το εξωτερικό ανάγλυφο του εδάφους τείνει να επηρεάζεται από τα καιρικά φαινόμενα, τα οποία συμβάλλουν στους μηχανισμούς της φύσης και ενισχύουν την αλλοίωση του. Το βάρος του ίδιου του γεωλογικού σχηματισμού σε συνδυασμό με την επίδραση της αιολικής δύναμης και του νερού, αποσαθρώνουν και διαβρώνουν το έδαφος, με αποτέλεσμα να αποδομούνται οι εδαφικές μάζες και να υποβάλλονται σε μηχανισμούς αστοχίας. Κάποιοι από τους παράγοντες που αυξάνουν τους ρυθμούς αστοχίας είναι το κλίμα της περιοχής, η σύσταση του υπεδάφους, ο βαθμός τεκτονισμού αλλά και η δομή των πετρωμάτων. Τα κύρια αίτια αστάθειας των εδαφικών μαζών είναι ανθρωπογενή και φυσικά. Οι φυσικές και χημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται στην φύση σε συνδυασμό με τις ανθρωπίνες επεμβάσεις, δημιουργούν εδαφικές κινήσεις, αστοχίες και κατολισθήσεις. Τις αστοχίες αυτές τις ενισχύουν οι χαμηλές μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, η απότομη κλίση του εδάφους, το ύψος του, η παρουσία υπόγειας ή επιφανειακής ροής, οι σεισμικές δονήσεις αλλά και οι κατασκευές έργων, οι εκσκαφές, τα έργα οδοποιίας και η αδιάκοπη χρήση γεωτρήσεων σε περιόδους αυξημένης ζήτησης όπως είναι οι καλοκαιρινοί μήνες λόγω αυξημένων αναγκών λόγω του τουρισμού και της άρδευσης.

2.2 Φυσικά και τεχνητά Πρανή

2.2.1 Χερσαία εδαφικά πρανή

Τα φυσικά χερσαία πρανή είναι επικλινείς περιοχές που βρίσκονται στο φυσικό τοπίο της Γης λόγω φυσικών διεργασιών που συμβαίνουν με την πάροδο του χρόνου. Ο σχηματισμός τους γίνεται από κινήσεις πλακών, την ηφαιστειακή δραστηριότητα και τη διάβρωση λόγω γεωλογικών δυνάμεων. Με αυτές τις διεργασίες σχηματίζονται λόφοι, βουνά, κοιλάδες, παράκτιοι βράχοι. Ο τύπος του εδάφους, η γωνία κλίσης του πρανού, η συνεκτικότητα του εδάφους, η παρουσία νερού, η βλάστηση αλλά και τα φυσικά φαινόμενα, είναι οι κυριότεροι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ευστάθεια των χερσαίων εδαφικών πρανών. Τα κυριότερα φυσικά φαινόμενα που επιδρούν αρνητικά στην ευστάθεια ενός πρανού, είναι οι βροχοπτώσεις και οι σεισμοί.

Στην εκτίμηση ευστάθειας πρανών χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι ανάλυσης, συμπεριλαμβανόμενων αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων, όπως η μέθοδος οριακής ισορροπίας και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Οι μεθοδολογίες αυτές εφαρμόζονται για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας (*Safety Factor*), ο οποίος είναι ο λόγος δυνάμεων αντίστασης προς δυνάμεων ολίσθησης. Για συντελεστές μικρότερους του 1, το πρανές θεωρείται ότι υπόκειται σε αστοχία.

Η ευστάθεια των εδαφικών χερσαίων πρανών μπορεί να επηρεαστεί από την κλιματική αλλαγή η οποία, τα τελευταία χρόνια, αυξάνεται με ταχύτερους ρυθμούς επηρεάζοντας τα φυσικά φαινόμενα. Με την μεταβολή των καιρικών συνθηκών, προκαλούνται πλημμύρες, οι οποίες θα έχουν σημαντικό αντίκτυπο σε υποδομές και σε ανθρώπινες ζωές. Το νερό που συσσωρεύεται, διεισδύει στο έδαφος και αυξάνει το βάρος της εδαφικής μάζας κάνοντάς την επιρρεπή σε αστοχίες. Επιπλέον επιδεινώνει και το φαινόμενο της διάβρωσης, το οποίο ενισχύει την αστάθεια των εδαφικών πρανών. Όπως προαναφέρθηκε, η ευστάθεια των χερσαίων εδαφικών πρανών

επηρεάζεται από τα δύο κύρια φυσικά φαινόμενα, τη βροχόπτωση και τη σεισμική δραστηριότητα. Οι βροχοπτώσεις, αυξάνουν το βάρος της εδαφικής μάζας με το πρόσθετο νερό, αυξάνοντας την πίεση των πότων του νερού και έτσι μειώνεται η αντοχή του εδάφους δημιουργώντας κατολισθήσεις και άλλες κινήσεις μαζών. Τα σεισμικά κύματα μπορούν να προκαλέσουν ρευστοποίηση και παραμόρφωση του εδάφους και της επιφάνειας του πρανούς. Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών φαινομένων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στα εδαφικά πρανή.



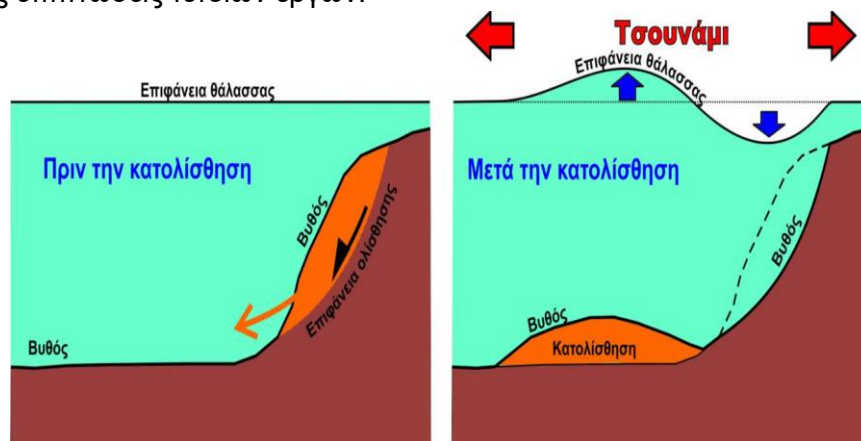
Εικόνα 2.1 Κατολίσθηση και ροή εδαφικής μάζας το 1995 στην Νότια Καλιφόρνια (USGS, 2004).

2.2.2 Υποθαλάσσια εδαφικά πρανή

Τα υποθαλάσσια πρανή είναι επικλινείς περιοχές που βρίσκονται κάτω από την θάλασσα. Στα υποθαλάσσια πρανή, έχουμε την επίδραση των κυμάτων, της παλίρροιας, καθώς και των ρευμάτων τα οποία μπορούν να επηρεάζουν την σταθερότητα των πρανών. Πολύπλευρη είναι η επιρροή της κλιματικής κρίσης στην ευστάθεια των εδαφικών πρανών. Με την άνοδο της θερμοκρασίας της Γης, αυξάνεται το λιώσιμο των πάγων και έτσι μπορούν να αποσταθεροποιηθούν τα πρανή στις ψυχρές περιοχές. Ακόμη μπορεί να επηρεαστεί το επίπεδο της θάλασσας και έτσι να επηρεαστεί το φαινόμενο της διάβρωσης. Το βρόχινο νερό που διεισδύει στο έδαφος μειώνει τη δύναμη του εδάφους, αυξάνοντας τις δυνάμεις ολίσθησης που δρουν στο πρανές και μειώνει την τριβή μεταξύ των σωματιδίων, διευκολύνοντας τη ροή του εδαφικού υλικού. Οι υποθαλάσσιες διεργασίες που προαναφέρθηκαν μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση η οποία ενισχύει την αστάθεια των υποθαλάσσιων πρανών. Όπως στα χερσαία, έτσι και στα υποθαλάσσια πρανή, τα σεισμικά κύματα προκαλώντας ρευστοποίηση του εδάφους, σε συνδυασμό, με τη διάβρωση του εδάφους από το νερό και την πρόσκρουση των κυμάτων μπορούν να προκαλέσουν αστοχίες στα πρανή. Συνοψίζοντας, το νερό της βροχόπτωσης έχει σημαντικό ρολό στην ευστάθεια των χερσαίων αλλά και των υποθαλάσσιων εδαφικών πρανών, αυξάνοντας το βάρος του εδάφους και μειώνοντας την αντοχή του.

Η ευστάθεια των υποθαλάσσιων εδαφικών πρανών αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για κατασκευές που βρίσκονται παράκτια ή υπεράκτια. Η ευστάθεια σε αυτά τα πρανή επηρεάζεται από την κλίση του πρανούς, από τις μηχανικές του ιδιότητες, από τη στάθμη της θάλασσας, από τα κύματα, αλλά και από τις υδροστατικές δυνάμεις που δρουν πάνω στο υποθαλάσσιο εδαφικό πρανές. Για την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας στα κορεσμένα-βυθισμένα πρανή

χρησιμοποιούνται αναλυτικές μέθοδοι αλλά και αριθμητικά προσομοιώματα, τα οποία προσομοιώνουν μία ρεαλιστική κατάσταση για τη μελέτη των εδαφικών πρηνών. Μέτρα για την ενίσχυση της ευστάθειας κορεσμένων πρηνών είναι υποδομές που βοηθούν στη στήριξη της εδαφικής μάζας με τεχνητά μέσα όπως, τοιχώματα και μεμβράνες επικάλυψης από τη θάλασσα (γεωυφάσματα) ή αλλιώς τροποποίηση της γεωμετρίας της εκτεθειμένης εδαφικής μάζας για προστασία από τυχόν μελλοντικές αστοχίες. Για την επιλογή όμως του καταλληλότερου τρόπου αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων είναι ζωτικής σημασίας να μελετηθούν και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τέτοιων έργων.



Εικόνα 2.2 Σχηματική Αναπαράσταση υποθαλάσσιας κατολίσθησης από τσουνάμι.

2.2.3 Τεχνητά Πρανή

Τεχνητά πρανή ονομάζονται οι κατασκευές που δημιουργούνται από τον άνθρωπο για συγκεκριμένους σκοπούς. Οι κυριότερες γεωκατασκευές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως:

- Εκσκαφές, χαρακτηρίζονται ως προσωρινή απομάκρυνση εδαφικού υλικού για την κατασκευή ενός έργου κάτω από το έδαφος.
- Ορύγματα, είναι μόνιμη σχηματιζόμενη τάφρος η οποία γίνεται κατόπιν εκσκαφής με κεκλιμένες πλευρές.
- Επιχώματα, είναι η συσσώρευση και η συμπίκνωση εδαφικού υλικού πάνω στην επιφάνεια του εδάφους με κεκλιμένες πλευρές.
- Χωμάτινα φράγματα, είναι ψηλές κατασκευές και αποτελούνται από διάφορα υλικά.

2.3 Ορισμός Κατολισθήσεων

Κατολίσθηση (Landslide) είναι κάθε αλλαγή ή μετακίνηση μικρή ή μεγάλη που συμβαίνει στην επιφάνεια υλικών με αργό ή γρήγορο ρυθμό που προέρχεται από δυνάμεις βαρύτητας μέχρις ότου να βρεθεί νέα κατάσταση ισορροπίας του υλικού. Αυτές οι κινήσεις συμβαίνουν κυρίως σε περιοχές με απότομες κλίσεις, ασταθές έδαφος, περιοχές με έντονα καιρικά φαινόμενα (βροχοπτώσεις, λιώσιμο πάγου, ηφαιστειακές εκρήξεις) ή ανθρώπινες παρεμβάσεις (αποψίλωση δασών, εκσκαφές, κατασκευές). Το φαινόμενο αυτό, επηρεάζεται από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, όμως με κατάλληλα μέτρα μπορεί να επιβραδυνθεί.

2.3.1 Κατηγοριοποίηση Κατολισθήσεων

Κατά τον Varnes (1978) η κατηγοριοποίηση των κατολισθήσεων γίνεται με δύο τρόπους:

- I. Με τον τύπο της μάζας που αποκολλάται.
- II. Με την μορφή κίνησης των γεωλογικών υλικών.

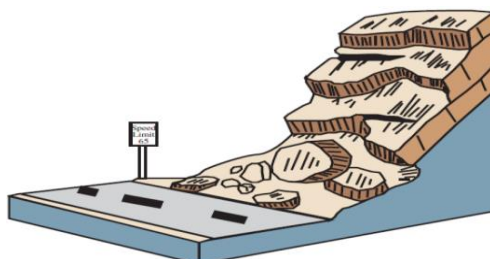
Ο τύπος μετακίνησης υλικών διακρίνεται σε καταπτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές εξάπλωσεις, ροές καθώς και συνδυασμό των μετακινήσεων αυτών. Στον Πίνακα 2.1 γίνεται η ταξινόμηση των κατολισθήσεων με βάση το είδος μετακίνησης.

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση το είδος μετακίνησης (Varnes, 1978)

| Τύπος Μετακίνησης | | Τύπος Μετακινούμενου Υλικού | | |
|--------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| | | Βραχώδεις Υπόβαθρο | Εδάφη | |
| | | | Χονδρόκοκκα | Λεπτόκοκκα |
| Κατάπτωση | | Κατάπτωση Βράχων | Κατάπτωση Κορημάτων | Κατάπτωση Γαιών |
| Ανατροπή | | Ανατροπή Βράχων | Ανατροπή Κορημάτων | Ανατροπή Γαιών |
| Ολίσθηση | Περιστροφική Ολίσθηση | Περιστροφική Ολίσθηση Βράχων | Περιστροφική Ολίσθηση Κορημάτων | Περιστροφική Ολίσθηση Γαιών |
| | Μεταθετική Ολίσθηση | Μεταθετική Ολίσθηση Βράχων | Μεταθετική Ολίσθηση Κορημάτων | Μεταθετική Ολίσθηση Γαιών |
| Ροές | | Ροή Βράχων | Ροή Κορημάτων | Ροή Γαιών |
| Πλευρική Εξάπλωση | | Εξάπλωση Βράχων | Εξάπλωση Κορημάτων | Εξάπλωση Γαιών |
| Σύνθετη Μετακίνηση | | Συνδυασμός Μετακινήσεων | | |

▪ Κατάπτωση

Οι καταπτώσεις είναι οι απότομες μετακινήσεις γεωλογικών μαζών (και συνεκτικών εδαφών), όπως βράχοι και ογκόλιθοι που αποσπώνται από απότομες πλαγιές ή γκρεμούς. Γενικά, αυτή η αποσύνδεση των γεωλογικών υλικών συμβαίνει κατά μήκος ασυνεχειών. Η κίνηση αυτή γίνεται με ελεύθερη πτώση, αναπήδηση και κύλιση πάνω στην επιφάνεια της μάζας. Οι καταπτώσεις επηρεάζονται από τη βαρύτητα, από τις καιρικές συνθήκες και από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Συνηθέστερο είναι αυτές οι απότομες κινήσεις να συμβαίνουν σε βραχώδη υλικά, τα οποία έχουν επηρεαστεί είτε από ανθρωπογενείς παράγοντες, είτε από τα έντονα καιρικά φαινόμενα τα οποία αλλάζουν την ροή των υπόγειων υδάτων.



Εικόνα 2.3: Εικονική αναπαράσταση κατάπτωσης βράχων (USGS, 2004).



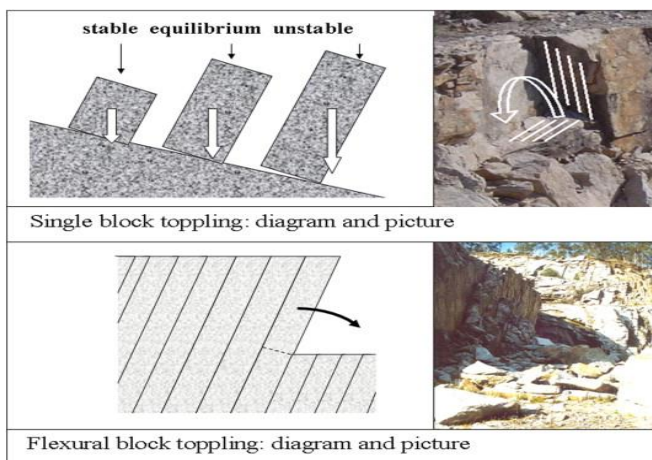
Εικόνα 2.4: Αναπαράσταση κατάπτωσης βράχων (BGS, 2012).

▪ Ανατροπή

Αυτό το είδος κίνησης αφορά απότομες περιστροφές βραχωδών μαζών προς τα εμπρός, όταν αποχωρίζεται από τον άξονα περιστροφής, ο οποίος βρίσκεται κάτω ή χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μάζας του μετακινούμενου πρανού. Ο λόγος που επιταχύνει τις βραχώδεις ανατροπές είναι η διαρροή του νερού μέσα από τις ρωγμές και τις ασυνέχειες του πρανού, λόγω έντονων καιρικών συνθηκών σε συνδυασμό με την επίδραση δυνάμεων βαρύτητας, αναπτύσσοντας μεγάλες υδροστατικές πιέσεις. Τέτοιο είδος κίνησης είναι ελάχιστες οι πιθανότητες να δημιουργηθεί σε εδαφικά υλικά γαιών. Οι κινήσεις διαφοροποιούνται σε πτώσεις και ολισθήσεις.



Εικόνα 2.5: Εικονική αναπαράσταση ανατροπής βράχων (USGS, 2004).

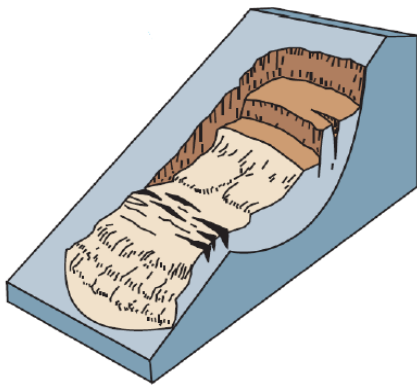


Εικόνα 2.6: Αναπαράσταση ανατροπής βράχων (Alejano et al., 2009).

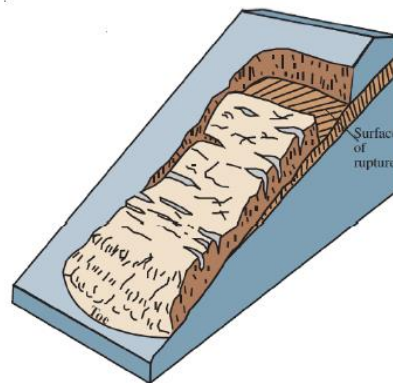
▪ Ολίσθηση

Η ολίσθηση χαρακτηρίζει κινήσεις μαζών που γίνεται εμφανής μία ζώνη αδυναμίας-ασυνέχειας που διαχωρίζει το υλικό ολίσθησης από την πιο σταθερή μάζα. Η ολίσθηση λαμβάνει ως δεδομένη τη διατμητική παραμόρφωση και θραύση του υλικού κατά μήκος μίας επιφάνειας η οποία εκδηλώνεται σταδιακά με τον χρόνο. Η μάζα που τίθεται σε μηχανισμό ολίσθησης παραμένει ενιαία μέχρις πλήρους αστοχίας. Αυτός ο μηχανισμός μετακίνησης χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- I. Περιστροφική Ολίσθηση
- II. Μεταθετική Ολίσθηση



Εικόνα 2.7 Εικονική αναπαράσταση της περιστροφικής ολίσθησης βράχων (USGS, 2004).



Εικόνα 2.8: Εικονική αναπαράσταση της μεταθετικής ολίσθησης βράχων (USGS, 2004).

I. Περιστροφική Ολίσθηση

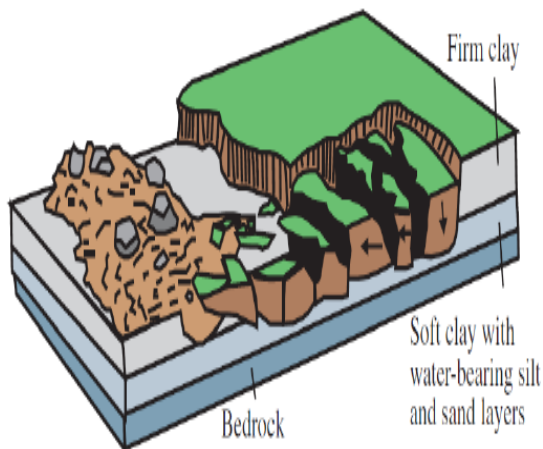
Ο μηχανισμός της περιστροφικής ολίσθησης είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος εδαφικής κίνησης που εμφανίζεται. Είναι η μετακίνηση στην οποία η επιφάνεια ρήξης είναι κυρτή (με τα κοίλα προς τα άνω) και η κίνηση της ολίσθησης είναι περιστροφική γύρω από έναν άξονα που είναι παράλληλος με το έδαφος, όμως με μικρή παραμόρφωση. Εδάφη επιρρεπή σε τέτοιες μετακινήσεις είναι κυρίως βραχώδη και ομογενή. Περιοχές που έχουν επηρεαστεί από περιστροφική ολίσθηση είναι πιθανό να ξανά υποστούν τον ίδιο τύπο μετακίνησης στο μέλλον. Ο πόδας του πρανούς είναι το πιο αδύναμο σημείο, εμφανίζοντας τις ρωγμές και τις αστοχίες πριν την ένδειξη κινήσεων ολίσθησης (Εικόνα 2.7).

II. Μεταθετική Ολίσθηση

Σε αυτό το είδος μετακίνησης, η αποκολλώμενη μάζα μετακινείται παράλληλα με την επιφάνεια προς τα κάτω. Είναι η μετακίνηση στην οποία η επιφάνεια ρήξης είναι κοίλη (με τα κοίλα προς τα κάτω) και η κίνηση της ολίσθησης είναι περιστροφική γύρω από έναν άξονα που είναι παράλληλος με το έδαφος (Εικόνα 2.8). Αυτού του είδους η μετακίνηση αναπτύσσεται με ανεξέλεγκτο τρόπο και ρυθμό εμφανίζοντας τεράστιες παραμορφώσεις στα εδαφικά υλικά. Η μεταθετική ολίσθηση μπορεί να μετατραπεί σε ροή εδαφικών υλικών με πολύ μεγάλη εδαφική έκταση.

▪ Πλευρική Εξάπλωση

Είναι η μορφή κατολίσθησης που εμφανίζεται σε ήπιες πλαγιές. Η κίνηση είναι πλάγια ενώ εμφανής είναι η διάτμηση και ο εφελκυσμός. Η σεισμική ρευστοποίηση σε αμμώδη εδάφη είναι ο κύριος λόγος τέτοιας αστοχίας. Σε αυτό το είδος μετακίνησης γίνεται εξάπλωση εδαφικών μαζών, εξάπλωση λόγω ρευστοποίησης του εδαφικού υλικού και σύνθετη εξάπλωση. Η εξάπλωση των εδαφικών υλικών γίνεται με αργούς ρυθμούς και διαφοροποιεί τη μάζα που αστοχεί από το ασθενέστερο έδαφος.



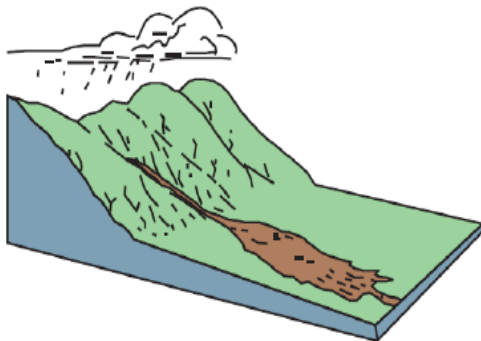
Εικόνα 2.9: Εικονική αναπαράσταση της πλευρικής εξάπλωσης (USGS, 2004).



Εικόνα 2.10: Αστοχία οδικού πρηνούς λόγω πλευρικής εξάπλωσης στη Βιρμανία (2010).

▪ Ροή

Οι ροές καταγράφονται κυρίως σε χαλαρά υλικά με αργή ή γρήγορη ταχύτητα υπό ξηρές ή υγρές συνθήκες. Η ροή αφορά και τον ερπυσμό που δεν είναι ευδιάκριτη κίνηση, αλλά παρατηρείται από την κλίση των δέντρων. Οι περιπτώσεις που μπορεί να έχουμε είναι ροές γαιών, κορημάτων και βράχων. Στις ροές βράχων παρατηρείται πλαστική παραμόρφωση ενώ η κίνηση αυτή γίνεται αργά σε βάθος χρόνου, ενώ στις ροές γαιών και κορημάτων χαρακτηρίζονται από μεγάλες εμφανείς κινήσεις που μπορεί να προκληθούν από απουσία βλάστησης και από απότομες κλίσεις πρηνών.



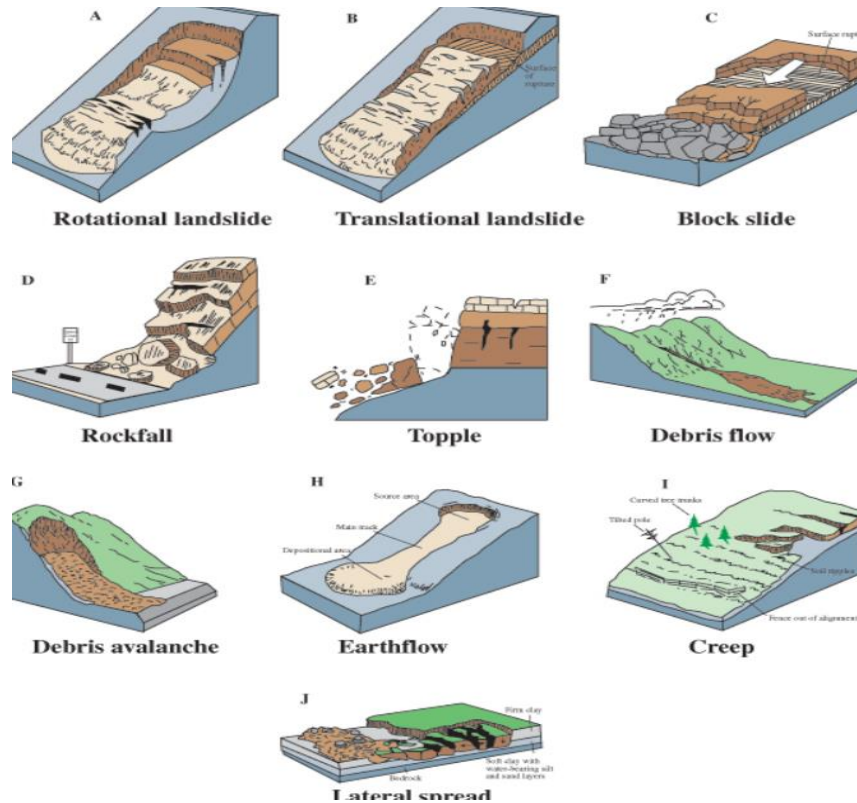
Εικόνα 2.11: Σχηματική αναπαράσταση της ροής (USGS, 2004).



Εικόνα 2.12: Αναπαράσταση ροής (Colorado Geological Survey, 2014).

▪ Σύνθετη Μετακίνηση Πρανών

Σε αυτού του είδους μετακίνηση γίνεται ένας συνδυασμός των παραπάνω κυρίων τύπων μετακινήσεων (Εικόνα 2.13). Συνδυάζονται παραπάνω από δύο τρόποι μετακίνησης καθώς έτσι είναι και οι πραγματικές μετακινήσεις των υλικών στο περιβάλλον.



Εικόνα 2.13: Όλοι οι τύποι μετακινήσεων μάζας (USGS, 2004).

2.3.2 Παράγοντες δημιουργίας κατολισθήσεων

Οι κατολισθήσεις που συμβαίνουν σε διάφορες περιοχές δημιουργούνται κυρίως από παράγοντες που αλλάζουν τα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού αλλά και τους μηχανισμούς σταθερότητας τους. Αυτοί οι παράγοντες οφείλονται σε εξωτερικά αίτια, όπως έντονες βροχοπτώσεις και πλημμύρες, από την σεισμική δραστηριότητα, από την μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα, από τις αλλαγές στη σύσταση του πρανού, αλλά και από ανθρωπογενή δραστηριότητα. Οι αιτίες των κατολισθήσεων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες, στα γεωλογικά αίτια, στα μορφολογικά αίτια και τέλος στα ανθρωπογενή αίτια. Στα γεωλογικά αίτια οι παράγοντες που αυξάνουν την αστοχία των πρανών είναι αδύναμα και εύθραυστα υλικά, άκαμπτα υλικά, καθώς και οι ασυνέχειες που βρίσκονται στα πετρώματα και τα εδαφικά υλικά. Στα μορφολογικά αίτια υπάγονται και οι φυσικές καταστροφές, φωτιές, ξηρασίες, απομάκρυνση βλάστησης, διάβρωση εδαφών, αλλά και η τεκτονική και ηφαιστειακή ανάταση. Στα ανθρωπινά αίτια κατατάσσονται έργα για τη διευκόλυνση της ανθρώπινης ζωής, όπως εκσκαφές, αποφιλώσεις δασών, εξορύξεις ορυκτών, άρδευση καλλιεργειών, διαρροές νερού καθώς και τεχνητές δονήσεις.

2.3.3 Κατολισθήσεις και ο ρόλος του νερού

Η κύρια αιτία κατολισθήσεων είναι ο κορεσμός των πρηνών από νερό. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκληθεί από έντονες βροχοπτώσεις, λιώσιμο των πάγων και με μεταβολές στα επίπεδα υπόγειων υδάτων και υδροφόρου ορίζοντα. Οι κατολισθήσεις και οι πλημμύρες συσχετίζονται με το φαινόμενο της βροχόπτωσης, την απορροή και τον κορεσμό του υπόγειου εδάφους με νερό.

2.3.4. Μέτρα αντιμετώπισης κατολισθήσεων

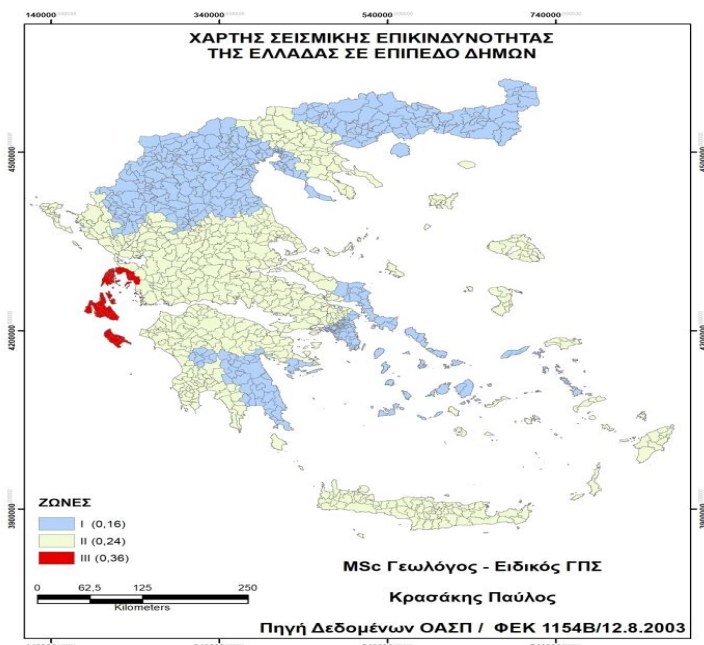
Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων των υδρογεωλογικών μηχανισμών, όπως της διάβρωσης, θεμιτή λύση είναι η βλάστηση και η φυτοκάλυψη περιοχών που είναι επιρρεπή σε αστοχίες που προέρχονται από διάβρωση. Η βλάστηση αυξάνει τη διηθητική ικανότητα του εδάφους λόγω των ριζών των φυτών που έχουν ανάγκη για νερό κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης τους. Για τη μείωση των εδαφικών κινήσεων και την αύξηση των δυνάμεων αντίστασης, προσοδοφόρα είναι η διαδικασία των εκσκαφών και των μορφοποιήσεων της γεωμετρίας των εδαφικών πρηνών μέσω αναβαθμών. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η κλίση του πρηνούς (αύξηση του συντελεστή ασφαλείας) και η επιφάνεια αστοχίας ελαχιστοποιείται. Μία ακόμη θετική ενέργεια είναι η εγκατάσταση διεργασιών αποστράγγισης, η οποία δεν είναι οικονομική, αλλά σε εδάφη επιρρεπή σε πλημμύρες και βροχοπτώσεις λόγω χαμηλής διήθησης και υψηλής επιφανειακής απορροής, έχουν σκοπό να μειώσουν τις αναπτυσσόμενες πιέσεις των πόρων μεταξύ των κόκκων, μειώνοντας έτσι τις δυνάμεις ολίσθησής που θέτουν το πρηνές σε αστοχία. Επιπλέον μέτρα αντιμετώπισης των δυνάμεων ολίσθησης, είναι τα έργα αντιστήριξης, όπως τεχνικά έργα τοίχων αντιστήριξης και γεφυρών τα οποία ενισχύουν τις δυνάμεις αντίστασης και αυξάνουν τον συντελεστή ασφαλείας.

Ανακεφαλαιώνοντας, τα μέτρα αντιμετώπισης και μετριασμού των αστοχιών και των κατολισθήσεων συμπεριλαμβάνουν τεχνικές αποστράγγισης, ηλεκτρώσμωση, στραγγιστικές σήραγγες, αλλαγή της γεωμετρίας του χερσαίου και υποθαλάσσιου εδαφικού πρηνούς αλλά και χρήση γεώ-υλικών, καθώς είναι πολύ σημαντικό να αποφευχθούν οι εδαφικές αστοχίες που έχουν σημαντικές συνέπειες. Τέλος, σημαντικής σημασίας είναι η παρακολούθηση των βροχοπτώσεων της περιοχής, έτσι ώστε να προλαμβάνονται μελλοντικές αστοχίες και να ελέγχονται παλιές κατολισθήσεις που είναι πιθανό να ενεργοποιηθούν εκ νέου.

2.4. Σεισμικά Φορτία

Τα φυσικά αλλά και τα τεχνητά πρηνή μπορεί να υποστούν παραμορφώσεις όταν καταπονηθούν από σεισμικές διεγέρσεις. Μετά από ένα σεισμό μπορεί να έχουμε ρηγματώσεις και θραύσεις, ενώ κατά τον Kramer (1996) κατηγοριοποιήθηκαν οι αστοχίες των πρηνών σε δύο είδη. Ο πρώτος τύπος αφορά τα πρηνή όπου η διατμητική τους αντοχή δεν επηρεάζεται από τα σεισμικά φορτία και ο δεύτερος τύπος αφορά τα πρηνή όπου η διατμητική τους αντοχή επηρεάζεται από τα σεισμικά φορτία. Στη διαδικασία ερμηνείας της σεισμικής δραστηριότητας μίας περιοχής, είναι σημαντικό να δοθούν οι ορισμοί για αυτά τα φαινόμενα για την διευκόλυνση της μελέτης τους. Το φυσικό φαινόμενο του σεισμού λαμβάνει δράση όταν ο γήινος φλοιός διαρρηγνύεται και απελευθερώνει ενέργεια με την μορφή σεισμικών κυμάτων. Με τη διαδικασία αυτή προκαλούνται διάφοροι τύποι κίνησης εδαφικής μάζας οι οποίοι μπορούν να υποβάλλουν σε αστοχία τα χερσαία αλλά και υποθαλάσσια εδαφικά πρηνή.

Οι σεισμοί προκαλούνται από κινήσεις τεκτονικών πλακών, από ηφαιστειακή δραστηριότητα αλλά και από ανθρώπινη παρέμβαση (εξορύξεις ορυκτών καυσίμων). Το υπόκεντρο ή εστία του σεισμού ορίζεται το σημείο εντός του φλοιού όπου ξεκινά η ρήξη, ενώ επίκεντρο ονομάζεται το σημείο της επιφάνειας του εδάφους πάνω από το υπόκεντρο. Η ένταση ενός σεισμού μετρείται σε μια αριθμητική κλίμακα η οποία λέγεται κλίμακα Ρίχτερ και παίρνει τιμές από 0 έως 10, με κάθε ακέραιο αριθμό να υποδεικνύει μία αριθμητική τάξη μεγέθους. Αυτή η τάξη μεγέθους συμβολίζει την αύξηση στο πλάτος των σεισμικών κυμάτων. Σεισμοί μεγέθους 2.5 Ρίχτερ δεν γίνονται αισθητοί στον άνθρωπο, αντιθέτως σεισμοί μεγέθους 7 Ρίχτερ θεωρούνται επικίνδυνοι για τον άνθρωπο και είναι πολύ καταστροφικοί.



Εικόνα 2.14: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας (ΟΑΣΠ, 2003).

Η Ελλάδα χωρίζεται σε τρεις σεισμικές ζώνες (Εικόνα 2.14) σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ. 2000. Η ζώνη 1 εμφανίζει επιταχύνσεις 0.16g και χαρακτηρίζεται ως χαμηλής έντασης ζώνη. Η ζώνη 2 εμφανίζει επιταχύνσεις 0.24g, ενώ η ζώνη 3 εμφανίζει μέγιστη επιτάχυνση 0.36g. Στην εικόνα φαίνονται οι ζώνες που αντιστοιχούν σε κάθε περιοχή. Αποτέλεσμα των σεισμικών δονήσεων είναι οι κατολισθήσεις, τσουνάμι, εκρήξεις ηφαιστειών αλλά και διάφορα είδη κίνησης εδαφικών μαζών. Για τον μετριασμό της επικινδυνότητας των σεισμών έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια έγκυρα συστήματα προειδοποίησης για ενημέρωση των ανθρώπων κατά την επέλαση σεισμών. Τα σεισμικά κύματα προέρχονται από σεισμούς, οι οποίοι προκαλούν δονήσεις στο έδαφος, αυξάνοντας την πιθανότητα ρευστοποίησης του εδάφους μειώνοντας την αντοχή του, με αποτέλεσμα αστοχίες και κατολισθήσεις. Σε περιοχές επιρρεπείς σε φυσικές καταστροφές είναι θεμιτό να λαμβάνεται ο ασφαλέστερος και εποικοδομητικότερος σχεδιασμός στις κατασκευές.

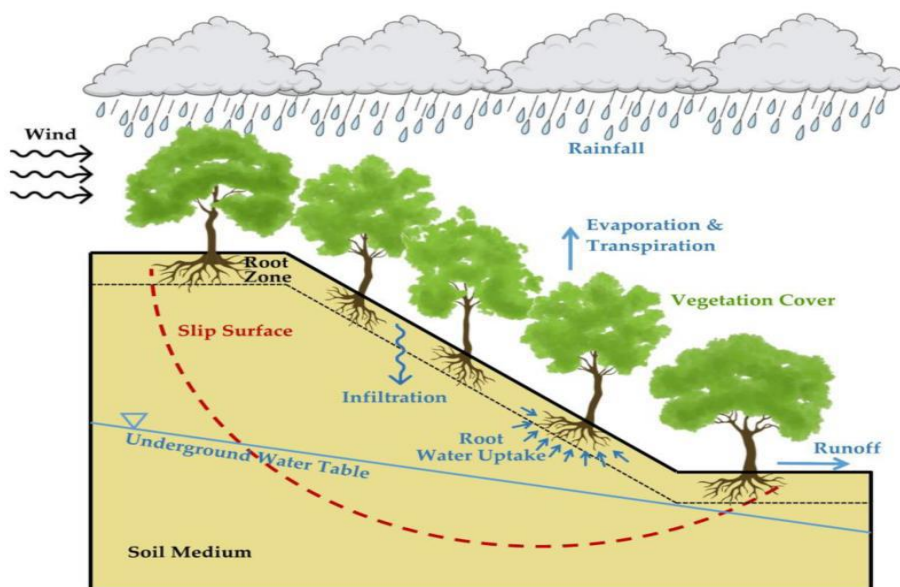
Η εμφάνιση σεισμών σε απότομα πρανή αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα κατολίσθησης, λόγω δόνησης του εδάφους ή λόγω διαστολής των υλικών του εδάφους με την οποία επιταχύνεται η διείδυση του νερού ανάμεσα σε ρωγμές και ασυνέχειες του πρανούς. Οι κατολισθήσεις λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι από τους πιο επικίνδυνους και

καταστροφικούς τύπους. Η λάβα των ηφαιστείων λιώνει με γρήγορο ρυθμό το χιόνι στις αρκτικές περιοχές, προκαλώντας κατολισθήσεις στα πρανή των ηφαιστείων έχοντας καταστρεπτικά αποτελέσματα.

2.5. Ο κύκλος του νερού

Ο κύκλος του νερού εξηγεί την συμπεριφορά της κίνησης του νερού επιφανειακά και υπόγεια της Γης. Ο κύκλος αυτός είναι υψίστης σημασίας για την ύπαρξη ζωής στον πλανήτη, διασφαλίζοντας την αρμονική λειτουργία των οικοσυστημάτων. Ξεκινώντας από τη διεργασία της εξάτμισης-διαπνοής η οποία λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια των φυτικών οργανισμών μέσω της διεργασίας της διαπνοής τους, αλλά και λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας από την ηλιακή ακτινοβολία μετατρέποντας το νερό του πλανήτη (θάλασσες, ποτάμια, λίμνες, ρυάκια) σε υδρατμούς. Στη συνέχεια, συμβαίνει το φαινόμενο της συμπύκνωσης, όπου οι υδρατμοί της εξάτμισης ανεβαίνουν ψηλά στην ατμόσφαιρα και ψύχονται, σχηματίζοντας σταγόνες νερού και στην συνέχεια τα σύννεφα. Με την πάροδο του χρόνου όταν οι υδρατμοί αυτοί γίνουν βαρύτεροι και δεν μπορούν να παραμείνουν σε αιώρηση, επιστρέφουν στην γη ως κατακρημνίσματα, έχοντας μορφή βροχής, χιονιού και χαλαζιού.

Μετά από αυτήν την διαδικασία μέρος των κατακρημνισμάτων διηθείται στο έδαφος εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς, ενώ το υπόλοιπο μέρος, δεν απορροφάτε από το έδαφος και απορρέει στην επιφάνεια, επαναφορτίζοντας τους υδροφόρους ορίζοντες. Το νερό των υπόγειων υδροφορέων κινείται ενδιάμεσα των εδαφικών σχηματισμών, με αυτόν τον τρόπο οι φυτικοί οργανισμοί με την σειρά τους απορροφούν το υπόγειο νερό με τις ρίζες τους και το ξανά απελευθερώνουν από τα φύλλα τους κατά την διαπνοή τους συνεχίζοντας τον υδρολογικό κύκλο (Εικόνα 2.15). Ο υδρολογικός κύκλος είναι πολύ σημαντικός στη διαχείριση των υδάτινων πόρων, αλλά και στον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, καθώς είναι κρίσιμος στη ρύθμιση της θερμοκρασίας επηρεάζοντας τα καιρικά φαινόμενα, αλλά και τα οικοσυστήματα.

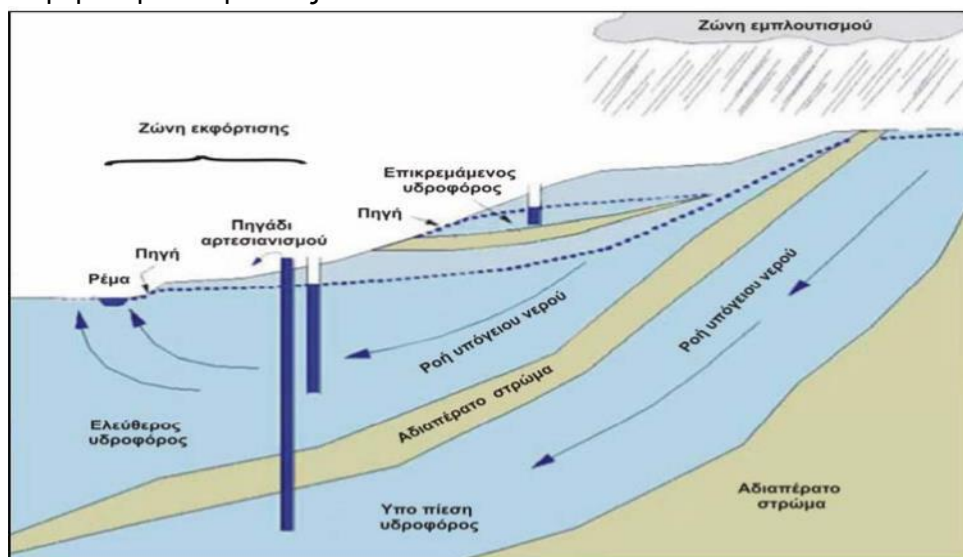


Εικόνα 2.15 Υδρολογικός Κύκλος (Psarropoulos et al. 2022)

2.6. Υπόγειοι υδροφορείς

Οι υπόγειοι υδροφορείς είναι υπόγεια στρώματα εδάφους που περιέχουν νερό, οι οποίοι αποθηκεύουν και μεταφέρουν υπόγεια ύδατα. Η σύσταση των υπόγειων υδροφορέων αποτελείται από πορώδη υλικά (άμμος, χαλίκια) που επιτρέπουν την κίνηση του νερού μέσα από τα διάκενα. Το πορώδες εκφράζει την ποσότητα του κενού χώρου μεταξύ των πόρων, ενώ η διαπερατότητα είναι η ικανότητα διάδοσης του νερού. Οι υπόγειοι υδροφορείς εμπλουτίζονται από βροχοπτώσεις και πλημμύρες σε εδάφη υψηλής διηθητικότητας. Το υπόγειο νερό, το οποίο εξάγεται από γεωτρήσεις, είναι πολύτιμο για την ζωή, για την πόση και την άρδευση, διαρρέοντας από εδάφη μεγάλης διαπερατότητας, με διαφορά κλίσης.

Οι υδροφορείς ταξινομούνται σε περιορισμένους και ελεύθερους, με τους περιορισμένους να οριοθετούνται μεταξύ δύο αδιαπερατών στρωμάτων, ενώ οι ελεύθεροι διαθέτουν υδροφόρο ορίζοντα (Εικόνα 2.16). Είναι απαραίτητο σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι όλοι οι υδροφορείς έχουν ευαισθησία στις μολύνσεις από ανθρώπινες δραστηριότητες, κυρίως από την ανεξέλεγκτη διάθεση αποβλήτων. Η βιώσιμη διαχείριση των υδροφορέων διασφαλίζει την μακροπρόθεσμη διαθεσιμότητά τους και μειώνει τους κινδύνους ρύπανσης. Η ευστάθεια των εδαφικών πρανών με την παρουσία υδροφόρου ορίζοντα αποτελεί έναν σημαντικό κλάδο της γεωτεχνικής μηχανικής. Καθώς τα υπόγεια ύδατα αυξάνουν την πίεση των πόρων, μειώνεται η διατμητική αντοχή του εδάφους με αποτέλεσμα να προκαλούνται εδαφικές μετακινήσεις και αστοχίες στα πρανή. Το νερό γεμίζοντας του πόρους του εδαφικού υλικού, αυξάνει το βάρος του προκαλώντας αποδυνάμωση της αντοχής του και συνεργώντας με τους μηχανισμούς διάβρωσης έχει καταστρεπτικά αποτελέσματα. Για τη μείωση των κινδύνων των αστοχιών διεξάγονται μελέτες των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών, της γεωμετρίας τους, αλλά και της κίνησης του νερού που τα διαπερνά. Η εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών γίνεται με αριθμητικές μεθόδους, προσομοιώματα και αναλυτικές εξισώσεις όπου υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας του εδαφικού πρανούς σε συγκεκριμένες συνθήκες καταπόνησης. Για τη μελέτη αυτή χρειάζονται στοιχεία για την γεωμετρία του πρανούς, την τοποθεσία και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά, επιλέγοντας με αυτόν τον τρόπο την εγκατάσταση κατάλληλων μέτρων ασφαλείας για τον μετριασμό πιθανών αστοχιών και κατολισθήσεων όπως συστήματα αποστράγγισης και τοίχους αντιστήριξης στην βάση του πρανούς.



Εικόνα 2.16: Κίνηση Υπόγειου Νερού (Βουδούρης, 1997).

2.7. Φαινόμενο βροχόπτωσης

Η επίδραση των βροχοπτώσεων στα εδαφικά πρανή μελετάται με έρευνες πεδίου, μετρήσεις αλλά και με αριθμητικά προσομοιώματα. Η επιρροή της σταθερότητας μία μάζας επηρεάζεται από τις μηχανικές ιδιότητες αλλά και από εξωτερικούς παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες (βροχοπτώσεις) αλλά και οι σεισμοί. Με το φαινόμενο της βροχόπτωσης να αποκτά ολοένα και περισσότερη ένταση και συχνότητα, το νερό συσσωρεύεται στην επιφάνεια του εδάφους. Όταν το νερό διεισδύει στο έδαφος, το βάρος της εδαφικής μάζας αυξάνεται με αποτέλεσμα το πρόσθετο αυτό βάρος να προκαλέσει αστάθειες αλλά και αστοχία στο πρανές. Ο κορεσμός του εδάφους από το νερό, μειώνει την διατμητική αντοχή του εδάφους και το καθιστά επιρρεπές σε αστοχίες. Η ποσότητα του νερού της βροχόπτωσης που θα διεισδύσει στο έδαφος και θα συσσωρευτεί, καθώς και η γωνία κλίσης του πρανούς αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ευστάθεια των εδαφικών πρανών.

Ένα απότομο πρανές επηρεάζεται περισσότερο από μία ήπια κλίση πρανούς, έτσι υπό στατικές συνθήκες το νερό αυξάνει την πίεση που λαμβάνει το πρανές, κρίνοντας το ασταθές. Υπό σεισμικές συνθήκες, το πρανές είναι πιο εύκολο να αστοχήσει καθώς το νερό μπορεί να προκαλέσει ρευστοποίηση της εδαφικής μάζας, αυτό σημαίνει ότι το χώμα που είναι κορεσμένο με νερό, καθίσταται ασταθές διότι μειώνεται η διατμητική αντοχή του. Η διαδικασία της ρευστοποίησης από σεισμικά κύματα μπορεί να προκαλέσει κατολισθήσεις καθώς και άλλα είδη αστοχίας στα πρανή. Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην ευστάθεια πρανών γίνεται, με την αύξηση της θερμοκρασίας της Γης, αυξάνεται και η διεργασία της εξατμισοδιαπνοής των φυτών με αποτέλεσμα αλλαγές στα πρότυπα βροχοπτώσεων και γενικά καιρικών συνθηκών, ερμηνεύοντας το σε συχνές και έντονες βροχοπτώσεις με εντονότερες πλημμύρες, αυξάνοντας την πίεση των πόρων του εδάφους και έτσι μειώνοντας την αντοχή του εδάφους, καθιστώντας το επιρρεπές σε μετακινήσεις μάζας και αστοχίες. Με την αλλαγή του κλίματος επηρεάζεται και η βλάστηση του εδάφους, η οποία αλλοτριώνει την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, ελαχιστοποιώντας την ευστάθεια των χερσαίων εδαφικών πρανών (μείωση συντελεστή ασφαλείας).

2.8. Κλιματική Κρίση

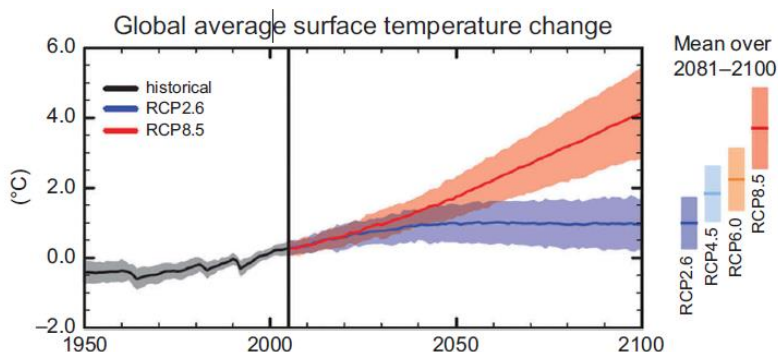
Τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται έντονες αλλαγές στα καιρικά φαινόμενα, οι οποίες περιγράφονται με τον όρο της κλιματικής αλλαγής. Η κλιματική αλλαγή χαρακτηρίζεται από μακροπρόθεσμες μεταβολές στα κλιματικά πρότυπα, λόγω ανθρωπίνων παρεμβάσεων, κυρίως με την εκπομπή των λεγόμενων αερίων του θερμοκηπίου στον ατμοσφαιρικό αέρα. Αυτά τα αέρια, προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο, τον άνθρακα, αλλά και άλλα αέρια επιβλαβή για τον άνθρωπο αλλά και το περιβάλλον. Αυτό το φαινόμενο ενισχύεται από βιομηχανικές διεργασίες και από αποψιλώσεις δασικών εκτάσεων. Από αυτήν την αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου, έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης, δημιουργώντας καύσωνες και ξηρασίες με μεγάλη συχνότητα και ένταση.

Το φαινόμενο της αλλαγής του κλίματος σε παγκόσμιο επίπεδο, το οποίο περιγράφεται με τον όρο «κλιματική αλλαγή», περιλαμβάνει τόσο την υπερθέρμανση του πλανήτη που προκαλείται από ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όσο και τις επακόλουθες μεγάλες αλλαγές στις κλιματολογικές συνθήκες. Αν και υπήρξαν προηγούμενες περιόδους κλιματικής αλλαγής, από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα και εξής οι ανθρωπίνες δραστηριότητες είχαν μία άνευ προηγουμένου επίδραση στο κλιματικό σύστημα της Γης και έχουν προκαλέσει αλλαγές σε

πλανητικό επίπεδο. Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής έχει ποικίλες επιπτώσεις στο κλίμα, καθώς και στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της κλιματικής αλλαγής είναι το γεγονός ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες αυξάνουν τους ρυθμούς εξάτμισης, προκαλώντας εντονότερες καταιγίδες και βροχοπτώσεις, ακόμη και το καλοκαίρι και σε χώρες όπου τέτοια φαινόμενα ήταν πολύ σπάνια στην πρόσφατη ιστορία. Δεδομένου ότι η κλιματική αλλαγή σχετίζεται με τη συχνότητα, τη διάρκεια και την ένταση των βροχοπτώσεων, ενδέχεται να έχει μία ουσιαστική έμμεση επίδραση στην ακεραιότητα των κτιρίων και των υποδομών σε ορεινές ή λοφώδεις περιοχές.

Υπό αυτό το πρίσμα, η παρούσα εργασία εστιάζει στη δυνητική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην αστάθεια των εδαφικών πρανών σε ορεινές ή λοφώδεις περιοχές και κατ' επέκταση στην ακεραιότητα κτιρίων και υποδομών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής μπορεί να είναι είτε επιζήμιες, είτε ευεργετικές, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Σύμφωνα με διάφορους ερευνητές (π.χ., Stewart et al. (2014), Nasr et al. (2021)), πληθώρα αποδεικτικών στοιχείων (τόσο καταγεγραμμένων, όσο και από προβολές προσομοιώσεων) δείχνουν ότι οι αλλαγές στο κλιματικό σύστημα λαμβάνουν χώρα με πρωτοφανείς ρυθμούς και θα έχουν μεγάλη επίδραση στο περιβάλλον και τις κατασκευές. Αν και η εκτίμηση του μεγέθους αυτών των αλλαγών περιλαμβάνει πολλές αβεβαιότητες, το γεγονός ότι το κλίμα της Γης αλλάζει είναι αδιαμφισβήτητο..

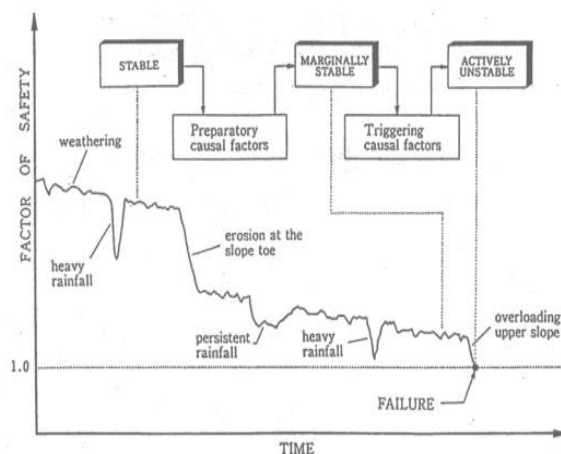
Πολλά σενάρια για την αξιολόγηση της κλιματικής αλλαγής έχουν εξεταστεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Ωστόσο, στην πέμπτη έκθεση αξιολόγησης (AR5), η IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) αναφέρεται σε τέσσερα διαφορετικά σενάρια (IPCC, 2014 & IPCC, 2018). Εξετάζοντας το εύρος αυτών των σεναρίων και τις υποθέσεις που σχετίζονται με αυτά, ο μεγάλος βαθμός αβεβαιοτήτων που εμπλέκονται στην προβολή του μελλοντικού κλίματος γίνεται εύκολα αντιληπτός, σε συνδυασμό με τις αβεβαιότητες που προστίθενται από τα προσομοιώματα σε πλανητικό επίπεδο. Επομένως, το κάθε σενάριο επηρεάζει έντονα το μέγεθος της κλιματικής αλλαγής, καθώς και τις βασικές παραμέτρους και τα συνακόλουθα φαινόμενα.



Εικόνα 2.17 Αλλαγές στην παγκόσμια μέση θερμοκρασία επιφάνειας σε σχέση με το 1986–2005 για τα διαφορετικά σενάρια εκπομπών σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2018).

Τα ακραία καιρικά φαινόμενα, στα οποία ανήκουν οι βροχοπτώσεις, οι πλημμύρες, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, το λιώσιμο των πάγων, οι καύσωνες, εμφανίζουν σοβαρές οικονομικές και ανθρωπιστικές επιπτώσεις. Η άνοδος της θερμοκρασίας λιώνει τους πάγους του Βόρειου Πόλου με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των θαλασσών, οδηγώντας σε κίνδυνο παράκτιες υποδομές αλλά και θαλάσσια οικοσυστήματα. Οι εντονότερες και συχνότερες βροχοπτώσεις διαταράσσουν την ισορροπία των βιολογικών διεργασιών των μικροοργανισμών. Η αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού απαιτεί προσπάθειες παγκόσμιας κλίμακας, με κύριο

στόχο την υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και προώθηση της βιώσιμης διαχείρισης χερσαίων και υποθαλάσσιων οικοσυστημάτων. Προκειμένου να γίνει πιο εύκολη η κατανόηση των αιτιών της αστάθειας των εδαφικών πρανών (δηλαδή των κατολισθήσεων), στην *Εικόνα 2.18* παρουσιάζεται η διακύμανση του συντελεστή ασφάλειας (FS) για μια δεδομένη κλίση ως συνάρτηση του χρόνου (Porrescu, 2002). Είναι προφανές ότι ο FS μειώνεται σταδιακά σε σχέση με τον χρόνο λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως οι έντονες βροχοπτώσεις ή/και η διάβρωση στον πόδα του πρανούς.



Εικόνα 2.18 Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας (FS) με την πάροδο του χρόνου λόγω έντονων βροχοπτώσεων ή/και διάβρωσης στον πόδα του πρανούς (Porrescu, 2002).

2.9. Υδρογεωλογία

Στην ανάλυση της ευστάθειας πρανών κρίσιμο ρόλο κατέχει η ροή του νερού και οι επιπτώσεις της, καθώς κρίνεται απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση αστοχιών και κινδύνων κατολισθήσεων. Στην ευστάθεια των πρανών βασικές πτυχές της υδρολογίας είναι οι πηγές του νερού, η διήθησή του νερού, η πίεση των πόρων του νερού, ο κορεσμός, η διαρροή, η επιφανειακή απορροή, το σύστημα αποστράγγισης καθώς και τα πρότυπα των βροχοπτώσεων. Κατά τη διάρκεια μίας βροχοπτώσης υπάρχει ένα υδατικό ισοζύγιο το οποίο εξαρτάται από τις επικρατούσες συνθήκες. Ο όγκος του νερού της βροχοπτώσης επιμερίζεται κυρίως στην επιφανειακή απορροή (V_R) και στη διήθηση (V_I), ενώ μικρότερες ποσότητες νερού «καταναλώνονται» λόγω της εξάτμισης – διαπνοής και της απορρόφησης νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών (εάν αυτά υπάρχουν) (*Εικόνα 2.15*).

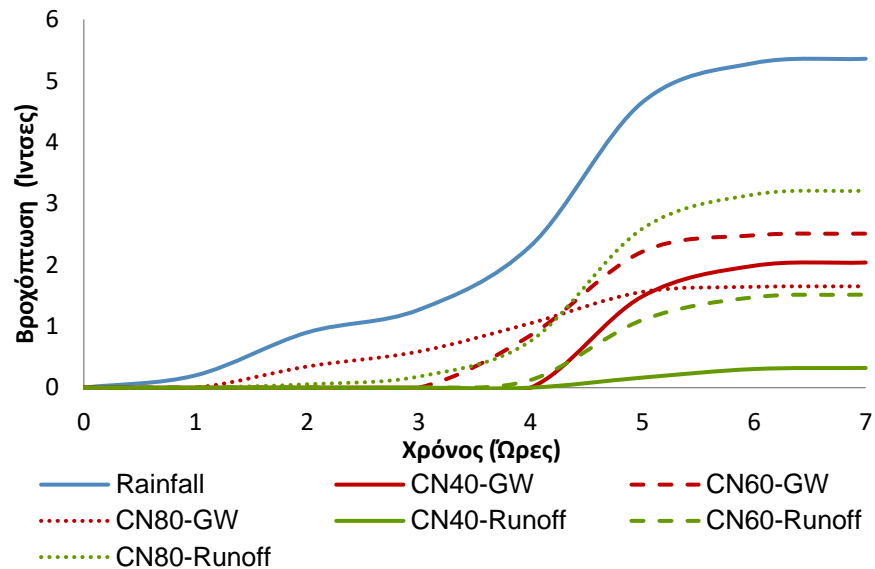
Τα εδαφικά πρανά που εκτίθενται σε πηγές νερού, όπως βροχοπτώσεις, τήξη χιονιού, υπόγεια και επιφανειακά ύδατα επηρεάζονται από διαφορετικούς μηχανισμούς. Η διαδικασία της διήθησης είναι η διείσδυση του νερού στο έδαφος. Η ταχύτητα διείσδυσης αλλάζει ανάλογα με τις ιδιότητες του εδάφους όπως το πορώδες. Η υψηλή ικανότητα διήθησης οδηγεί σε αυξημένη πίεση του νερού στους πόρους που οδηγεί στην αστάθεια του πρανούς. Η πίεση που ασκείται από το νερό στους πόρους του εδάφους μειώνει την αντοχή του εδάφους καταπονώντας το έδαφος και προκαλώντας αστοχία, με αλλαγή στην περιεκτικότητα του νερού ή στην ροή του νερού λαμβάνονται τα ίδια αποτελέσματα. Ο κορεσμός συμβαίνει όταν οι πόροι του εδάφους γεμίζουν με νερό, μειώνοντας την διατμητική αντοχή του εδάφους λόγω αύξησης του βάρους του εδάφους προσθέτοντας επιπλέον πίεση στο πρανές. Η διαρροή συμβαίνει με κίνηση του νερού μέσα από εδαφικά στρώματα ή πετρώματα, διαβρώνοντας και αποδυναμώνοντας το έδαφος.

Η επιφανειακή απορροή είναι η ροή του νερού στην επιφάνεια του εδάφους που προκαλεί διάβρωση του και εξασθένηση της αντοχής του πρανούς, αυξάνοντας την πίεση του νερού. Τα συστήματα αποστράγγισης, οι επιφανειακές και υπόγειες αποχετεύσεις καθώς και οι τοίχοι αντιστήριξης βελτιώνουν την ευστάθειά του πρανούς. Τα πρότυπα των βροχοπτώσεων πρέπει να μελετώνται διεξοδικά διότι είναι πολύ σημαντικά για την ευστάθεια των χερσαίων εδαφικών πρανών, καθώς οι έντονες και συχνότερες βροχοπτώσεις αυξάνουν την είσοδο του νερού στα πρανή, αυξάνοντας την πίεση των πόρων, μειώνοντας τελικά τον συντελεστή ασφαλείας. Η ανάλυση της ευστάθειας εδαφικών πρανών στο πλαίσιο της υδρογεωλογίας γίνεται με διάφορες μεθόδους και μοντέλα όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Οι προσεγγίσεις αυτές ενσωματώνουν τους υδρολογικούς παράγοντες για την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών και την πρόβλεψη του κινδύνου των κατολισθήσεων.

Η επιφανειακή απορροή (Runoff) καθορίζει το φαινόμενο της διάβρωσης του εδάφους παράλληλα με το πρανές και του φαινομένου της διάβρωσης στο πόδα του πρανούς λόγω της εγκάρσιας συνολικής απορροής, ενώ η διήθηση (Infiltration) καθορίζει τη στάθμη των υπόγειων υδάτων. Η αναλογία μεταξύ V_R και V_I εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης και τα χαρακτηριστικά του πρανούς (κλίση του πρανούς, ιδιότητες του εδάφους). Σύμφωνα με τα μέχρι σήμερα δεδομένα, η κλιματική αλλαγή οδηγεί σε πιο έντονες βροχοπτώσεις, οι οποίες όμως χαρακτηρίζονται από μικρότερη διάρκεια και μικρότερη συχνότητα εμφάνισης. Τα φαινόμενα αυτά συνεπάγονται: (α) σχετικά αυξημένη επιφανειακή απορροή (και κατ' επέκταση, εντονότερα φαινόμενα διάβρωσης) και (β) σχετικά μειωμένη διήθηση εντός του εδάφους (και κατ' επέκταση, χαμηλότερη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα).

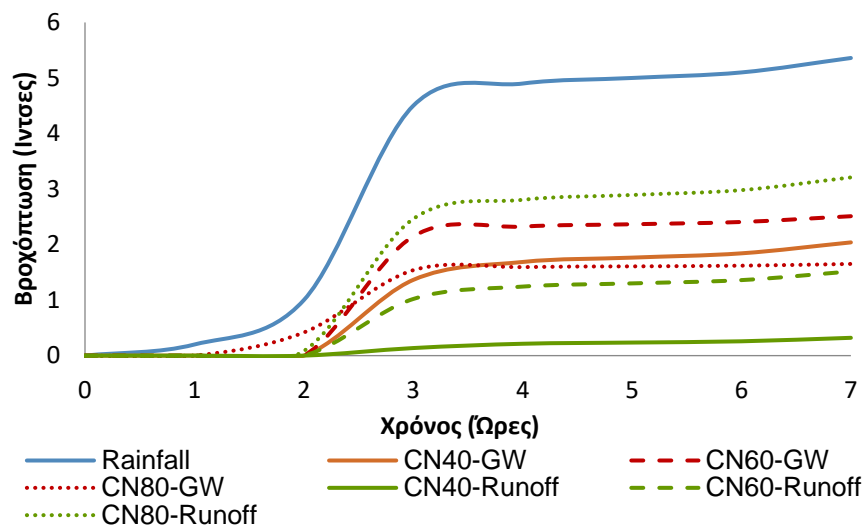
Εφαρμόσθηκε η μεθοδολογία της Soil Conservation Service (SCS, 1972), η οποία εκτιμά ποσοτικά την επιφανειακή απορροή μίας περιοχής που υπόκειται σε βροχόπτωση και περιγράφεται αναλυτικά από τους Chow et al. (1988). Εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις διαπερατότητας του εδάφους και δύο σενάρια βροχόπτωσης διαφορετικής έντασης. Ως προς τη διαπερατότητα του εδάφους, εξετάστηκαν οι περιπτώσεις: (α) υψηλής διαπερατότητας (CN=40), (β) μέτριας διαπερατότητας (CN=60) και (γ) χαμηλής διαπερατότητας (CN=80), όπου το CN αποτελεί δείκτη που σχετίζεται με τις επικρατούσες συνθήκες. Όσον αφορά τη βροχόπτωση, το πρώτο σενάριο βροχόπτωσης αναφέρεται σε μία τυπική βροχόπτωση διάρκειας επτά (7) ωρών με συνολικό ύψος βροχής 5.36 in, ενώ το δεύτερο σενάριο, που υποτίθεται ότι αντιστοιχεί σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής (CC), διακρίνεται από την ίδια διάρκεια και τον ίδιο συνολικό όγκο νερού, ο οποίος όμως θεωρείται ότι κατακρημνίζεται με ταχύτερο ρυθμό.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες του αθροιστικού και του απόλυτου ύψους βροχής των δύο σεναρίων βροχόπτωσης. Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 2.19) εμφανίζεται η γραφική παράσταση της βροχόπτωσης που πέφτει σε 3 διαφορετικά υλικά CN=40, CN=60, CN=80, καθώς και οι γραφικές παραστάσεις όπου ένα μέρος του νερού της βροχόπτωσης περνά στους υπόγειους υδροφορείς και ένα μέρος διαχωρίζεται σε επιφανειακή απορροή. Παρατηρήθηκε ότι στο υλικό CN=40 υπάρχει η μικρότερη ποσότητα επιφανειακής απορροής ενώ στο υλικό CN=80 υπάρχει η μεγαλύτερη ποσότητα επιφανειακής απορροής, το οποίο είναι λογικό διότι το υλικό CN=40 έχει μεγάλη διαπερατότητα ενώ το CN=80 έχει μικρή διαπερατότητα και η λιγότερη ποσότητα της βροχόπτωσης γίνεται επιφανειακή απορροή.



Εικόνα 2.19: Διαγράμματα Βροχόπτωσης συναρτήσει του χρόνου.

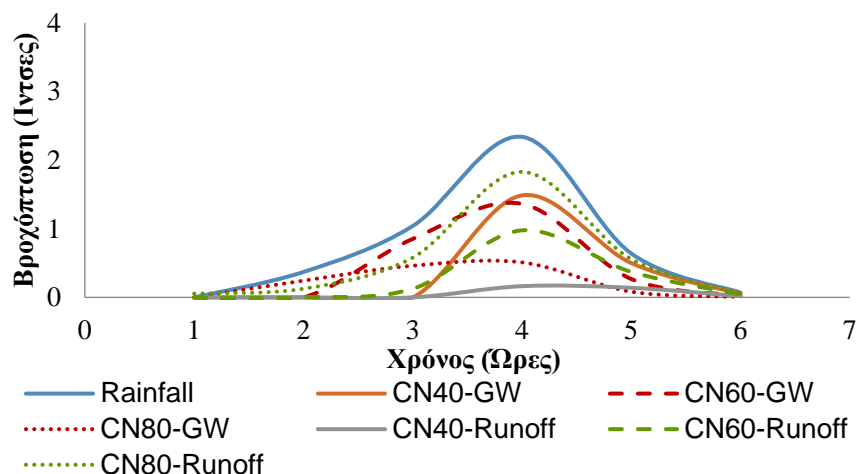
Με την επιρροή της κλιματικής αλλαγής παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά με τις συνθήκες χωρίς την κλιματική αλλαγή με διαφορά ότι οι τιμές της βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερα σε συντομότερο χρονικό διάστημα, όμως η συμπεριφορά του υλικού παραμένει ίδια. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της βροχόπτωσης, του υπόγειου νερού και της επιφανειακής απορροής με την επίδραση της κλιματικής αλλαγής (Εικόνα 2.20).



Εικόνα 2.20: Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου

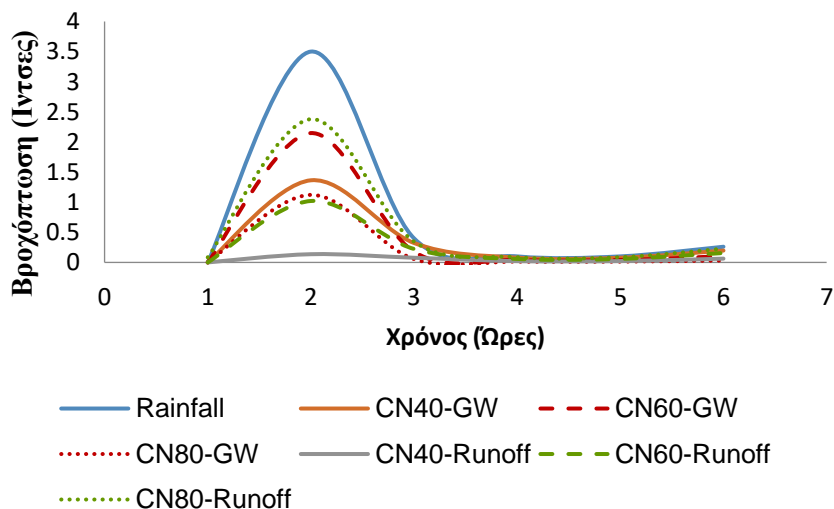
Στο παρακάτω γράφημα (Εικόνα 2.21) απεικονίζεται η διαφορά ποσότητας της βροχόπτωσης μεταξύ των ωρών συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζοντας με αυτόν τον τρόπο

την συμπεριφορά των διαπερατών υλικών, με χαμηλότερη τιμή επιφανειακής απορροής του υλικού CN=40 και υψηλότερη τιμή της επιφανειακής απορροής του υλικού CN=80.



Εικόνα 2.21: Διαγράμματα Βροχόπτωσης συναρτήσει του χρόνου

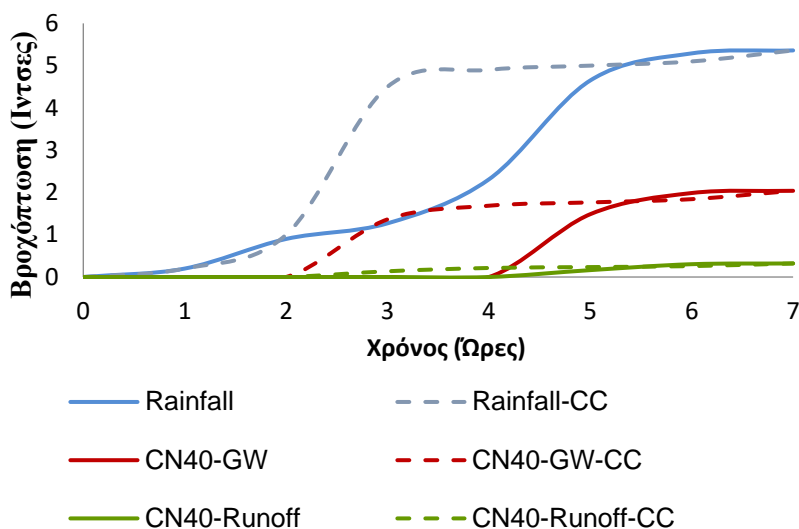
Στο παρακάτω γράφημα (Εικόνα 2.22) αποτυπώνεται η συμπεριφορά της βροχόπτωσης, του υπόγειου νερού και της επιφανειακής απορροής υπό την επιρροή της κλιματικής αλλαγής. Παρατηρήθηκε ότι οι καμπύλες εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά με τις καμπύλες στις κανονικές συνθήκες με μόνη διαφορά ότι έχουμε μεγαλύτερες και εντονότερες ποσότητες νερού σε μικρότερο χρόνο σε κάθε περίπτωση, εξαιτίας της επιρροής της κλιματικής αλλαγής.



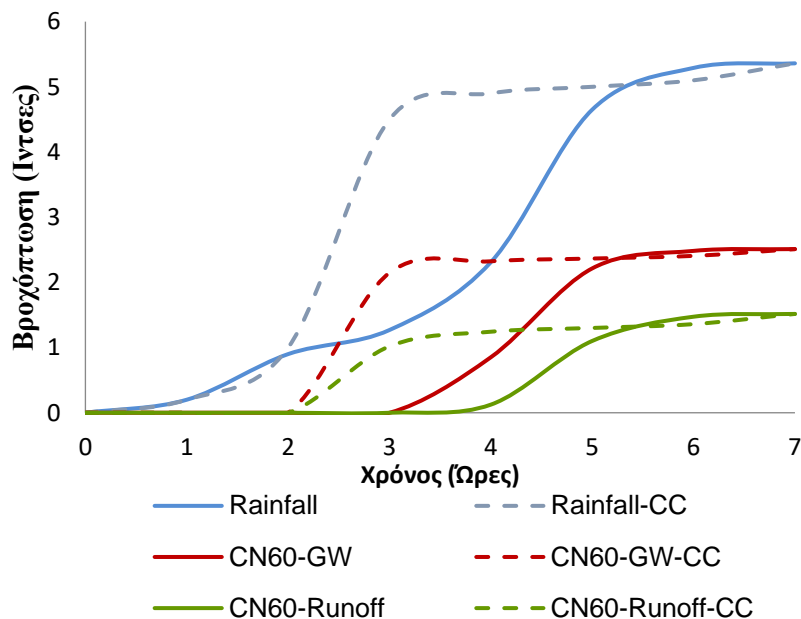
Εικόνα 2.22: Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου.

Στις παρακάτω τρεις εικόνες (2.23, 2.24, 2.25) απεικονίζονται τα διαγράμματα που δείχνουν τη σύγκριση της συμπεριφοράς της βροχόπτωσης, του υπογείου νερού και της επιφανειακής απορροής σε κανονικές συνθήκες και σε συνθήκες όπου έχουμε κλιματική αλλαγή. Είναι εμφανές ότι η κλιματική αλλαγή προκαλεί μεγαλύτερες τιμές στις τρεις αυτές περιπτώσεις καθώς οι απότομες και συχνές βροχοπτώσεις με μεγαλύτερες εντάσεις αλλάζουν τους

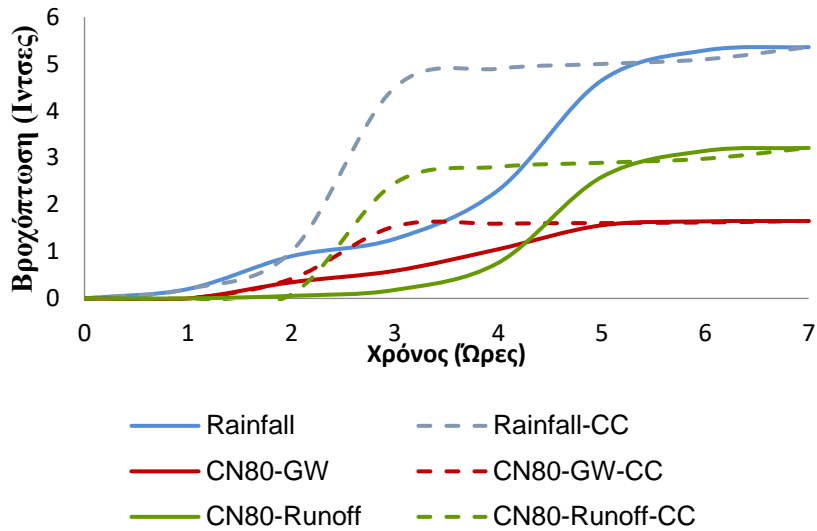
μηχανισμούς της φύσης όπως της διήθησης του νερού στο έδαφος διότι, αλλάζει η ποσότητα του νερού και το έδαφος και οι ρίζες των φυτών διαδέχονται μεγαλύτερες ποσότητες νερού σε συχνότερο διάστημα με αποτέλεσμα μεγαλύτερων ποσοτήτων νερού επιφανειακής απορροής αλλά και γρηγορότερο εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων. Παρουσιάζονται οι περιπτώσεις αυτές για τα υλικά CN=40, CN=60 και CN=80.



Εικόνα 2.23 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου για CN=40.

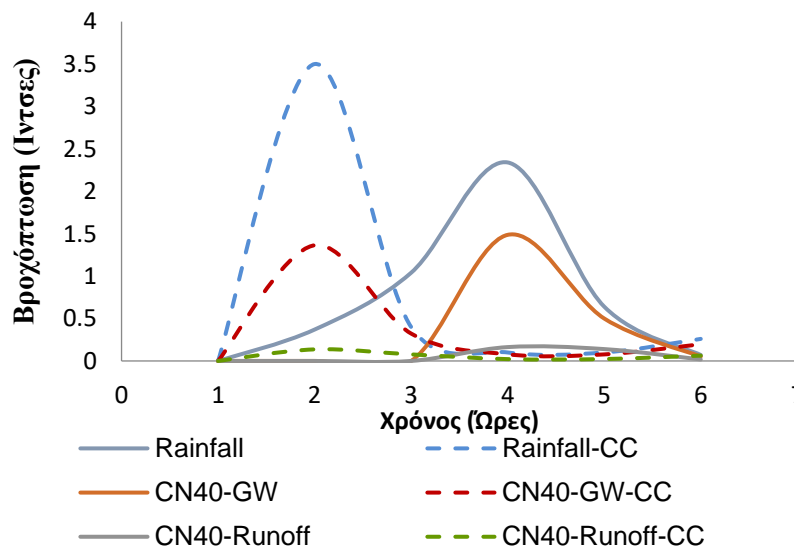


Εικόνα 2.24 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου για CN=60.

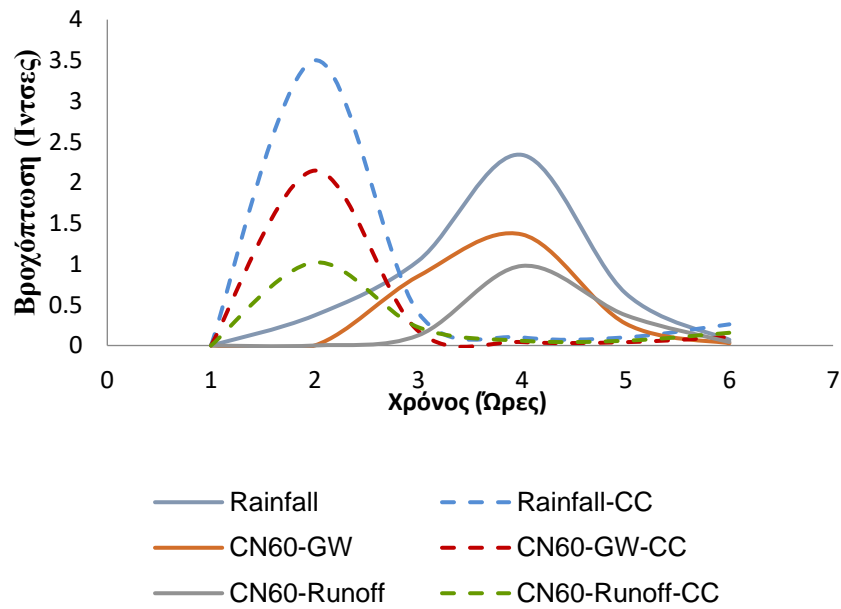


Εικόνα 2.25 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου για CN=80.

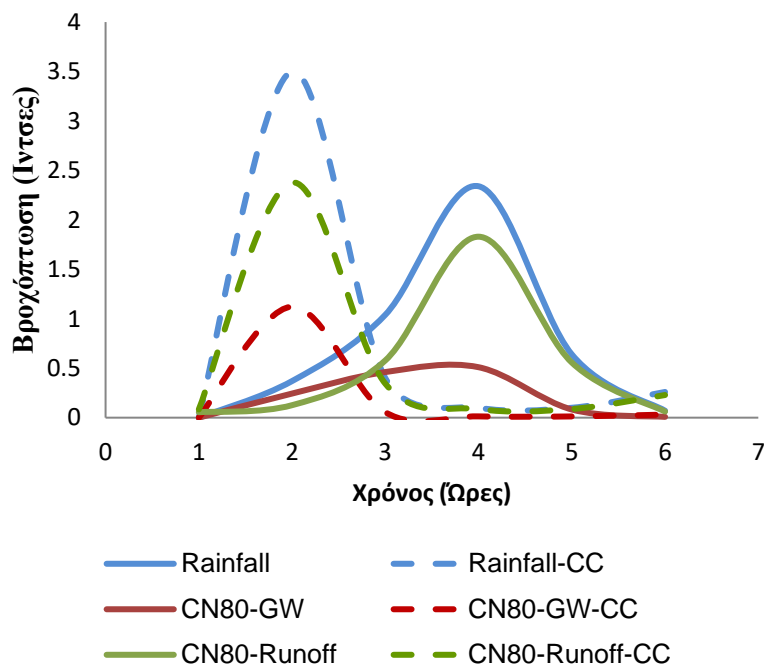
Τέλος, παρουσιάζονται τα γραφήματα για την διαφορά της ποσότητας της βροχόπτωσης ανά ώρα συναρτήσει του χρόνου. Η οπτικοποίηση αυτών των αποτελεσμάτων συγκρίνεται για κανονικές συνθήκες και συνθήκες που υπάρχει η επιρροή της κλιματικής αλλαγής. Τα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνες 2.26, 2.27 και 2.28) απεικονίζουν την έντονη αύξηση της βροχόπτωσης αλλά και των μηχανισμών της υπό την επίδραση της κλιματικής αλλαγής αλλά και τις κανονικές συνθήκες οι οποίες φαίνονται αισθητά μικρότερες καμπύλες. Παρουσιάζονται οι περιπτώσεις αυτές για τα υλικά CN=40, CN=60 και CN=80.



Εικόνα 2.26 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου CN=40.



Εικόνα 2.27 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου για CN=60.



Εικόνα 2.28 Διαγράμματα Βροχόπτωσης με κλιματική αλλαγή συναρτήσει του χρόνου για CN=80.

Αναλυτική Μέθοδος

3.1. Μέθοδος της Οριακής Ισορροπίας

Η μέθοδος της Οριακής Ισορροπίας (Limit Equilibrium Method – LEM) είναι μια αναλυτική μέθοδος και είναι από τις πιο γνωστές μεθόδους εκτίμησης ευστάθειας πρανών. Με την μέθοδο αυτή μελετώνται εδαφικές μάζες πρανών σε κανονικές ξηρές συνθήκες χωρίς σεισμική διέγερση, ενώ ο τρόπος που αστοχούν βασίζεται στο κριτήριο Mohr-Coulomb. Η μέθοδος αξιολογεί την ισορροπία δυνάμεων ολίσθησης και αντίστασης που δρουν σε ένα εδαφικό πρανές και υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας, σε αστοχίες, συγκρίνοντας τις δυνάμεις ολίσθησης που προκαλούν αστοχία και τις δυνάμεις αντίστασης που βοηθούν στην ευστάθεια του πρανούς. Στη μέθοδο αυτή προσδιορίζεται η γεωμετρία του εδαφικού πρανούς, δηλαδή η το ύψος του το σχήμα του και η γωνία κλίσης του. Το επόμενο βήμα της μεθόδου είναι ο εντοπισμός πιθανών επιφανειών αστοχίας, οι οποίες μπορεί να είναι κυκλικές, επίπεδες αλλά και οποιοδήποτε σχήμα ανάλογα με τους μηχανισμούς αστοχίας. Υπάρχουν διάφορα είδη αστοχίας που μπορεί να προκύψουν και έχουν προσδιοριστεί σύμφωνα με τον Kramer (1996), το πρώτο είδος αστοχίας είναι στο επίπεδο ή με σφηνοειδής μορφή, το δεύτερο είδος εκφράζει αστοχία πρανούς σε πολλά επίπεδα με κυκλική μορφή και μη κυκλική μορφή αστοχίας.

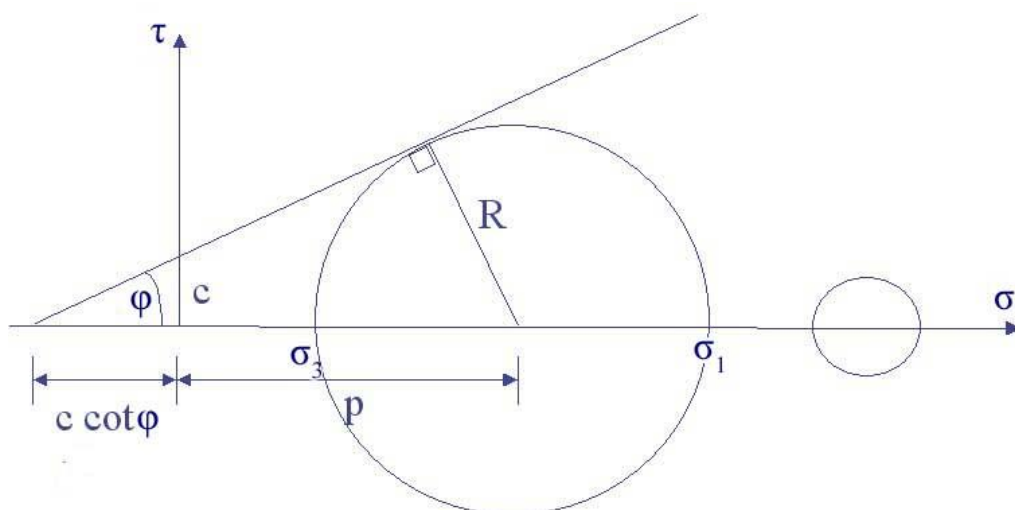
Η μέθοδος LEM διαιρεί την επιφάνεια του πρανούς σε πολλά τμήματα η φέτες και υπολογίζει τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται σε αυτές. Σε κάθε τμήμα ή φέτα εφαρμόζεται η αρχή της στατικής ισορροπίας, όπου το άθροισμα των δυνάμεων ολίσθησης ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων αντίστασης. Η βαρύτητα, η πίεση του νερού και τα εξωτερικά φορτία, όπως βροχοπτώσεις και σεισμικές δονήσεις, αποτελούν τις δυνάμεις ολίσθησης ή κινητήριες δυνάμεις, ενώ η διατμητική αντοχή, η συνεκτικότητα του υλικού και η κλίση της τριβής αποτελούν δυνάμεις αντίστασης. Αυτή η ισορροπία εκφράζει τον συντελεστή ασφαλείας του πρανούς, που είναι ο λόγος των δυνάμεων αντίστασης προς των δυνάμεων ολίσθησης. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας σε ένα χερσαίο ή υποθαλάσσιο εδαφικό πρανές υπολογίζεται ως το κλάσμα των δυνάμεων αντίστασης προς τις δυνάμεις ολίσθησης. Στις δυνάμεις αντίστασης ανήκουν η συνοχή, η ορθή ενεργός τάση καθώς. Στις δυνάμεις ολίσθησης ανήκουν η διατμητική ενεργός τάση, καθώς και πρόσθετες δυνάμεις, όπως του νερού και της σεισμικής διέγερσης.

Όταν η τιμή του συντελεστή ασφάλειας είναι μεγαλύτερη από 1, δηλαδή η διατμητική αντοχή είναι μεγαλύτερη από την διατμητική δύναμη που ασκείται τότε θεωρείται ότι το πρανές βρίσκεται σε κατάσταση ευστάθειας και δεν μετακινείται. Όταν όμως η τιμή του συντελεστή Ασφαλείας είναι μικρότερη από 1 τότε θεωρείται ότι το πρανές βρίσκεται ή υπόκειται σε αστοχία. Για τιμές που ισούνται με 1 θεωρείται ότι το πρανές βρίσκεται σε οριακή ισορροπία. Στις αναλύσεις με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας λαμβάνουν χώρα αναλύσεις μεταβάλλοντας τις μηχανικές ιδιότητες και τις συνθήκες του νερού για την εύρεση του συντελεστή, αναπτύσσοντας ποικιλία στην μελέτη και περισσότερη ακρίβεια. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η κρισιμότερη επιφάνεια αστοχίας είναι αυτή με τον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας. Επίσης, στην μέθοδο γίνεται απλοποίηση της συμπεριφοράς των εδαφικών πρανών με την υπόθεση ότι η αστοχία γίνεται κατά

μήκος μίας καθορισμένης επιφάνειας. Η ακρίβεια της μεθόδου της ανάλυσης εξαρτάται από τα δεδομένα που εισάγουμε, την επιλογή της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας αλλά και την πολυπλοκότητα των εξωτερικών παραγόντων, δηλαδή καιρικών φαινομένων και σεισμών.

Κριτήριο Mohr-Coulomb

Το κριτήριο Mohr-Coulomb εφαρμόζεται για να περιγράψει την αντοχή των υλικών όταν σε αυτά εφαρμόζονται τάσεις. Σε αυτό το κριτήριο η διατμητική αντοχή αυξάνεται γραμμικά με τη θλιπτική τάση. Το κριτήριο περιγράφεται από το διάγραμμα Mohr-Coulomb:



Εικόνα 3.1 Διάγραμμα Mohr-Coulomb

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$$

Όπου

τ : θλιπτική τάση

σ : τάση

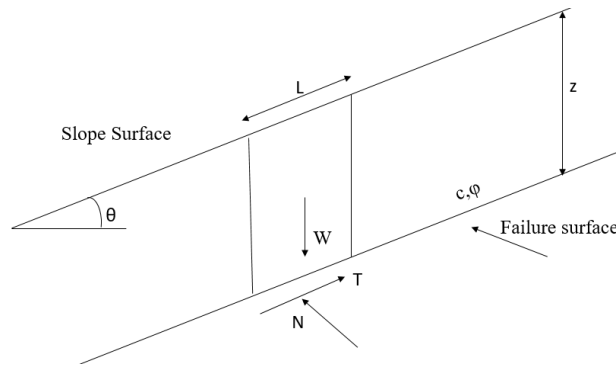
c : Συνοχή του υλικού

φ : γωνία εσωτερικής τριβής

3.1.1. Επίπεδη Μεταφορική Ολίσθηση

Η μέθοδος θεωρεί μετακίνηση εδαφικής μάζας επάνω από μία επιφάνεια ολίσθησης παράλληλη στο έδαφος αγνοώντας τις άκρες και τις πλευρές του. Αυτή η μέθοδος ανάλυσης καταλήγει σε μη συνεκτικά εδάφη ($c=0$), δηλαδή σε αμμώδη εδαφικά υλικά, σε συντελεστή ασφαλείας ως εξής:

$$FS = \frac{\frac{c}{(\cos \theta)^2} + z \cdot \gamma \cdot \tan \varphi}{z \cdot \gamma \cdot \tan \varphi}$$



Εικόνα 3.2 Επίπεδη μεταφορική ολίσθηση.

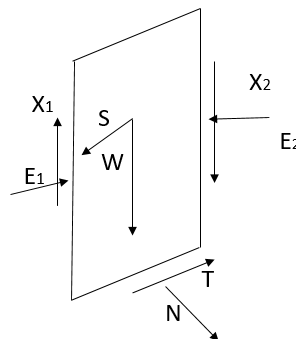
3.1.2. Μέθοδος των Λωρίδων

Σύμφωνα με τον Fellenius (1936) θεωρείται μία κυκλική επιφάνεια ακτίνας R. Το εδαφικό τμήμα επάνω από το τόξο της κυκλικής επιφάνειας έχει μοναδιαίο πάχος και υποδιαιρείται σε τμήματα (λωρίδες) ίσου πλάτους και μεταβαλλόμενου ύψους. Θεωρείται κλίση α και μήκος $l = b \cdot \sec \alpha$. Ο συντελεστής ασφάλειας παραμένει ίδιος σε κάθε λωρίδα:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c \cdot \Delta l + (W_i \cdot \cos \alpha_i - u_i \cdot \Delta l) \cdot \tan \phi]}{\sum_{i=1}^{i=n} (W_i \cdot \sin \alpha_i)}$$

Όπου c: συνοχή εδάφους [kPa]

φ: γωνία εσωτερικής τριβής εδάφους



Εικόνα 3.3 Μέθοδος των λωρίδων (Barnes 2010).

3.1.3. Μέθοδος Bishop

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος ανάλυσης ευστάθειας εδαφικών πρανών είναι η μέθοδος Bishop (1955) και βασίζεται στην μέθοδο οριακής ισορροπίας. Υποθέτει ότι η αστοχία συμβαίνει κατά μήκος μίας κυκλικής επιφάνειας ολίσθησης λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία δυνάμεων που δρα στο πρηνές, αλλά αγνοεί τις επιδράσεις της τρισδιάστατης γεωμετρίας και δεν

μπορεί να εξηγήσει την συμπεριφορά ρεαλιστικά. Το εδαφικό υλικό συμπεριφέρεται ως γραμμικό-ελαστικό υλικό και η αστοχία γίνεται κατά μήκος μίας καθορισμένης κυκλικής επιφάνειας αστοχίας:

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

$$\sec(\alpha) = \frac{1}{\cos \alpha}$$

Το ολισθαίνον έδαφος θεωρείται ως ένα άκαμπτο σώμα που περιστρέφεται γύρω από το κέντρο ενός κύκλου και η δύναμη ολίσθησης και η αντιολισθητική δύναμη βασίζονται σε κάθε λωρίδα. Βρίσκει τον συντελεστή ασφάλειας χρησιμοποιώντας Mohr-Coulomb αντοχή με γωνιά τριβής και συνοχή σαν παραμέτρους.

Όπου

c: συνοχή εδάφους [kPa]

φ:γωνία εσωτερικής τριβής εδάφους

3.1.4. Ψευδοστατική Μέθοδος Ανάλυσης

Η ψευδοστατική μέθοδος και η στατική μέθοδος χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ευστάθειας πρανών που υπόκεινται σε σεισμικά φορτία. Για τον σεισμικό σχεδιασμό γεωτεχνικών αναλύσεων χρησιμοποιείται κυρίως η ψευδοστατική μέθοδος. Σε αυτήν την μέθοδο θεωρείται ότι η δύναμη της επιτάχυνσης που εφαρμόζεται είναι σταθερή σε όλο το τμήμα του πρανούς, το οποίο αποτελείται από πλαστικό υλικό, δρώντας στην οριζόντια κατεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο το ποσοστό της ενεργής διατμητικής αντοχής να είναι ίδιο σε όλο το μήκος της επιφάνειας που ολισθαίνει. Σύμφωνα με την μέθοδο LEM (Limit Equilibrium Method) στην ανάλυση των σεισμικών φορτίων για την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών υπάρχει μία οριζόντια και μία κατακόρυφη δύναμη. Αυτές οι δυνάμεις είναι αδρανειακές και προέρχονται από σεισμικές επιταχύνσεις δρώντας στο κέντρο της μάζας του πρανούς που ολισθαίνει.

$$\text{Οριζόντια δύναμη: } F_h = \frac{ah}{g} \cdot W$$

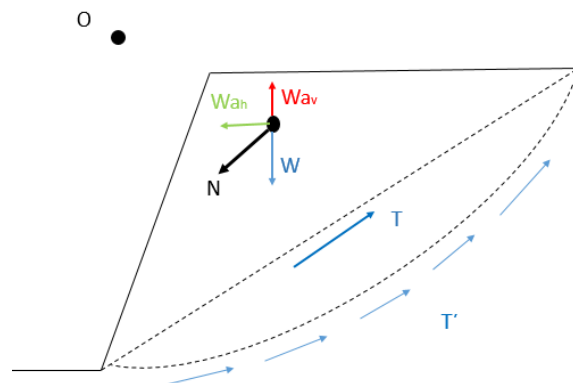
$$\text{Κατακόρυφη δύναμη : } F_v = \pm k_v \cdot W$$

$$\text{Οριζόντια δύναμη: } F_h = k_h \cdot W$$

Όπου

W: Είναι το βάρος της μάζας του πρανούς που ολισθαίνει

k_h, k_v είναι ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος σεισμικός συντελεστής



Εικόνα 3.4 : Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα εδαφικό πρανές (Psarropoulos & Antoniou 2015).

Από τις εξισώσεις διαπιστώνεται ότι η δύναμη που κινεί την μάζα αυξάνεται από την σεισμική οριζόντια δύναμη, από την αντίθετη πλευρά όμως η κατακόρυφη σεισμική δύναμη είτε μειώνει, είτε αυξάνει την κινούσα δύναμη αλλά και την δύναμη αντίστασης. Όμως στην ψευδοστατική μέθοδο, για απλοποίηση των συνθηκών οι κατακόρυφες σεισμικές δυνάμεις δεν λαμβάνονται υπόψιν. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας για επίπεδες κυκλικές ή μη κυκλικές επιφάνειες στην ψευδοστατική μέθοδο λαμβάνεται ο ίδιος τύπος με την στατική ανάλυση. Η μέθοδος της ψευδοστατικής κατάστασης θεωρείται μη ακριβής καθώς απλοποιεί τις δύο αδρανειακές δυνάμεις σε μία, μίας κατεύθυνσης. Επίσης, με την παρουσία υδροφόρου ορίζοντα παρουσιάζονται οι πιέσεις των πόρων που καθιστούν αναξιόπιστη την ανάλυση για τα συγκεκριμένα εδάφη με την παρουσία σεισμικών διεγέρσεων (Seed 1979). Τέλος, υπάρχει αδυναμία επεξήγησης της ακολουθούμενης αστοχίας μετά από τα σεισμικά φορτία. Θεωρείται ότι η συμπεριφορά του πρανούς περιγράφεται σαν ένα άκαμπτο σώμα.

Η επιτάχυνση πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή (k_h) ο οποίος είναι η αδρανειακή δύναμη προς την βαρυτική δύναμη που ασκούνται στο πρανές. Αυτός ο συντελεστής παίρνει τιμές από 0.1-0.3 αναλόγως με τη σεισμικότητα της εξεταζόμενης περιοχής. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας σε ψευδοστατικές συνθήκες, χρησιμοποιείται η ίδια εξίσωση, που χρησιμοποιείται και για στατικές συνθήκες με μόνη διαφορά ότι εισάγεται και η σεισμική δύναμη. Επιπλέον η ψευδοστατική μέθοδος δεν είναι πάντα ρεαλιστική για έναν ακόμη λόγο, καθώς περιγράφει την συμπεριφορά της εδαφικής μάζας σαν άκαμπτη χωρίς να συμπεριλαμβάνει την δυναμική απόκριση. Για μία πιο ρεαλιστική εκτίμηση της ευστάθειας πρανών υπό σεισμική φόρτιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι, όπως των πεπερασμένων στοιχείων.

3.1.5. Δυναμική Μέθοδος Ανάλυσης

Η ανάλυση απόκρισης ενός πρανούς σε δυναμικά φορτία, είναι η ανάλυση της χρονικά μεταβαλλόμενης συμπεριφοράς της εδαφικής μάζας, η οποία αστοχεί λόγω των δυναμικών φορτίων. Τα εδαφικά υλικά έχουν δυναμική συμπεριφορά, δηλαδή οι αδρανειακές δυνάμεις (2^{ος} νόμος του Νεύτωνα) είναι ίσες με την μάζα πολλαπλασιασμένη με την επιτάχυνση. Με επιβραδυμένη εφαρμογή των φορτίων αυτών θεωρούνται αμελητέες αυτές οι δυνάμεις, όντας δικαιολογημένος ο τρόπος της στατικής επίλυσης. Οι επιταχύνσεις δημιουργούν δονήσεις που

προκαλούνται από φυσικούς ή ανθρωπογενής παράγοντες. Στους ανθρωπογενής παράγοντες ανήκουν η έμπηξη πασσάλων στο έδαφος, η κίνηση οχημάτων καθώς και οι εκρήξεις. Στα φυσικά αίτια ανήκουν οι σεισμικές διεγέρσεις. Στη δυναμική ανάλυση στα πρανή, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η αδράνεια του υπεδάφους, η απόσβεση (μηχανισμός ελάττωσης σεισμικών κυμάτων) και μεταφοράς των φορτίων τα οποία διαφέρουν από υλικό σε υλικό. Επιπλέον μηχανισμοί ελαχιστοποίησης ή μηδενισμού κίνησης σεισμικών κυμάτων είναι οι ρηγματώσεις και η μεταβολή ιξώδους (πλήρωση πόρων εδάφους με νερό). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για όλες τις μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας πρανών συνιστάται μελέτη και εξέταση των παραγόντων από επιστήμονες και ειδικούς σε θέματα ευστάθειας χερσαίων και υποθαλάσσιων πρανών.

3.2. Αναλυτική προσομοίωση πρανών

Σε αυτό το κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας θα μελετηθεί η ευστάθεια πρανών με την βοήθεια αναλυτικών εξισώσεων οι οποίες αποδεικνύονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα. Παρουσιάζονται οι εξισώσεις και τα διαγράμματα που αφορούν στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες σε κορεσμένα και ακόρεστα εδάφη σε απειρομήκη και πεπερασμένα πρανή. Τα αποτελέσματα των εξισώσεων μορφοποιούνται στο λογισμικό Excel.

3.2.1. Απειρομήκες πρανές

Τα απειρομήκη πρανή χαρακτηρίζονται από το ότι το μήκος τους είναι πολύ μεγαλύτερο του ύψους του. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για απειρομήκη πρανή υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες, κορεσμένα και ακόρεστα. Καταστρωθήκαν εξισώσεις για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας, εφαρμόζοντας την μέθοδο λωρίδας.

1^η Περίπτωση: Απειρομήκες ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες:

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας υπό στατικές συνθήκες, θεωρούμε ότι το πρανές είναι μία απειρομήκη λωρίδα με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Πλάτος b
- Μήκος ίσο με την μονάδα
- Γωνία εδαφικού πρανούς θ
- Συνοχή c
- Γωνία εσωτερικής τριβής φ

Συνεπώς, υπολογίζεται το βάρος της λωρίδας :

$$W = \gamma \cdot b \cdot h \cdot l \quad (3.1.α)$$

Η ορθή ενεργός δύναμη κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης:

$$N = \gamma \cdot b \cdot h \cdot \cos\theta \quad (3.1.β)$$

Η διατμητική δύναμη της επιφάνειας ολίσθησης:

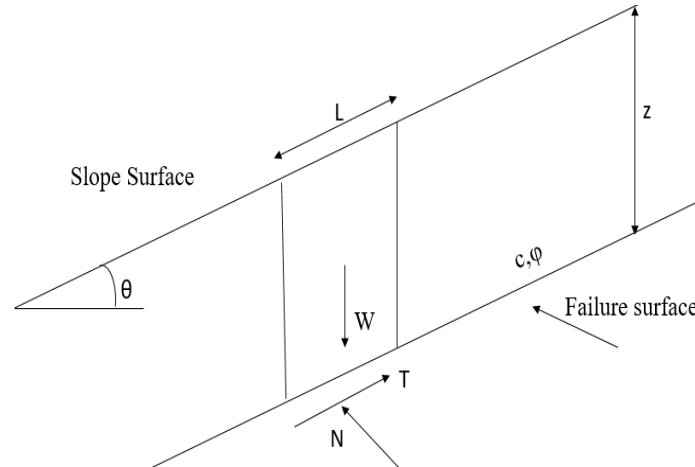
$$T = \gamma \cdot b \cdot h \cdot \sin\theta \quad (3.1.γ)$$

Όπου $h = z \cdot \cos\theta$

Υπολογίζονται οι ενεργές τάσεις:

$$\tau = \gamma \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \quad (3.1.δ)$$

$$\sigma = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta \quad (3.1.ε)$$



Εικόνα 3.5 Απειρομήκες εδαφικό πρανές σε ξηρές συνθήκες.

Η διατμητική αντίσταση τ_f στην βάση του τμήματος της λωρίδας $\tau_f = c + \sigma \cdot \tan\phi$ (διαθέσιμη διατμητική αντοχή)

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + \sigma \cdot \tan\phi}{\tau} \Rightarrow$$

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

Η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας για απειρομήκες ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες υπολογίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} + \frac{\tan\phi}{\tan\theta} \quad (3.1)$$

2^η Περίπτωση: Απειρομήκες ξηρό πρανές με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα υπό στατικές συνθήκες.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας κάθε περίπτωσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις 3.1.α, 3.1.β, 3.1.γ, 3.1.δ, 3.1.ε. Για διήθηση νερού παράλληλη με την βάση, η ορθή ενεργός τάση είναι σ' στην βάση του εδαφικού τμήματος:

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

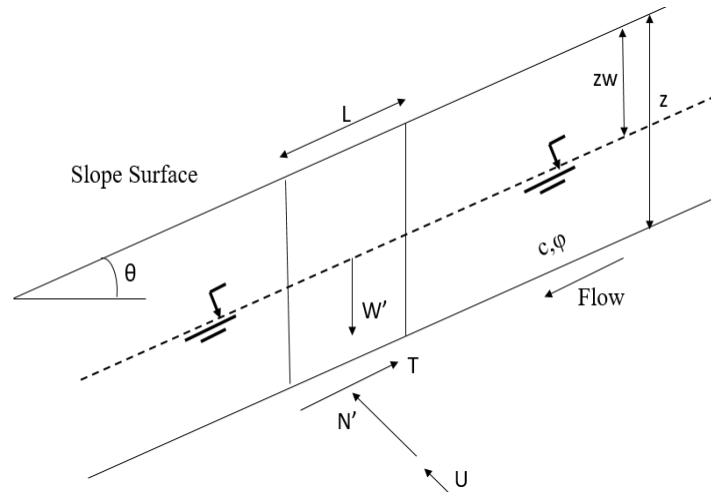
$$\sigma' = \cos^2 \theta (\gamma \cdot z - \gamma_w \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \Rightarrow$$

$$\sigma' = (\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \cos^2 \theta \quad (3.2.α)$$

Όπου $\gamma_w = 10 \frac{kN}{m^3}$ είναι το ειδικό βάρος του νερού

$\gamma' = \gamma - \gamma_w$ είναι το κορεσμένο ειδικό βάρος του πρανούς

Πίεση των πόρων $u = \gamma_w \cdot z_w$



Εικόνα 3.6 Απειρομήκες εδαφικό πρανές σε υγρές συνθήκες

Η διατμητική αντίσταση τ_f στην βάση του τμήματος της λωρίδας $\tau_f = c + \sigma' \cdot \tan \phi$ (διαθέσιμη διατμητική αντοχή):

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + \sigma' \cdot \tan \phi}{\tau} \Rightarrow$$

$$FS = \frac{c + (\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \Rightarrow$$

Η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας για απειρομήκες υγρό πρανές υπό στατικές συνθήκες υπολογίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} + \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w)}{\gamma \cdot z} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \quad (3.2)$$

3^η Περίπτωση: Απειρομήκες ξηρό πρανές υπό σεισμικές συνθήκες :

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας κάθε περίπτωσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις 3.1.α, 3.1.β, 3.1.γ, 3.1.δ, 3.1.ε.

Ψευδό-στατική μέθοδος ανάλυσης:

Οριζόντια σεισμική δύναμη:

$$F_h = k_h \cdot W \quad (3.3.α)$$

W: Είναι το βάρος της μάζας του πρανούς που ολισθαίνει

k_h : Είναι ο οριζόντιος σεισμικός συντελεστής

Η κατακόρυφη σεισμική δύναμη αμελείται, για λόγους απλοποίησης του προβλήματος. Η σεισμική δύναμη $F_h = k_h \cdot W$ αναλύεται σε:

$$F_{h_x} = k_h \cdot W \cdot \cos\theta \quad (3.3.\beta)$$

$$F_{h_y} = k_h \cdot W \cdot \sin\theta \quad (3.3.\gamma)$$

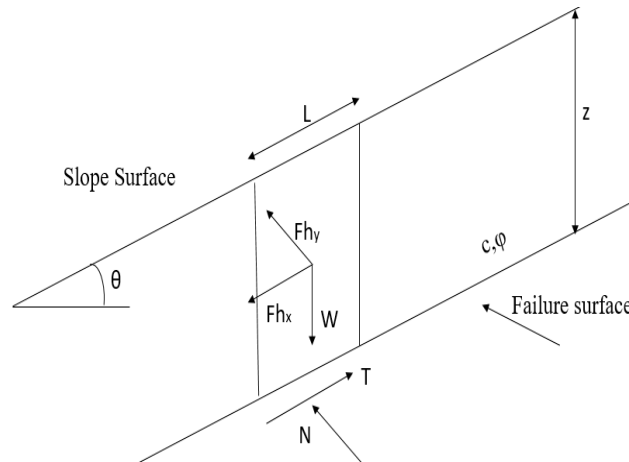
Σε ενεργές τάσεις:

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

$$f_{h_x} = k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos^2\theta \quad (3.3.\delta)$$

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

$$f_{h_y} = k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \quad (3.3.\epsilon)$$



Εικόνα 3.7 Απειρομήκες εδαφικό πρηνές σε ξηρές συνθήκες, με σεισμική διέγερση

Η διατμητική αντίσταση τ_f στην βάση του τμήματος της λωρίδας

$$\tau_f = c + (\sigma - f_{h_y}) \cdot \tan\phi \quad (\text{διαθέσιμη διατμητική αντοχή})$$

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau + f_{h_x}} = \frac{c + (\sigma - f_{h_y}) \cdot \tan\phi}{\tau + f_{h_x}} =$$

$$FS = \frac{c + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2\theta - k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta) \cdot \tan\phi}{\gamma \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos^2\theta} =$$

$$FS = \frac{\frac{c}{\gamma \cdot z \cdot (\cos\theta)^2} + (1 - k_h \cdot \tan\theta) \tan\varphi}{\frac{\sin\theta}{\cos\theta} + k_h} =$$

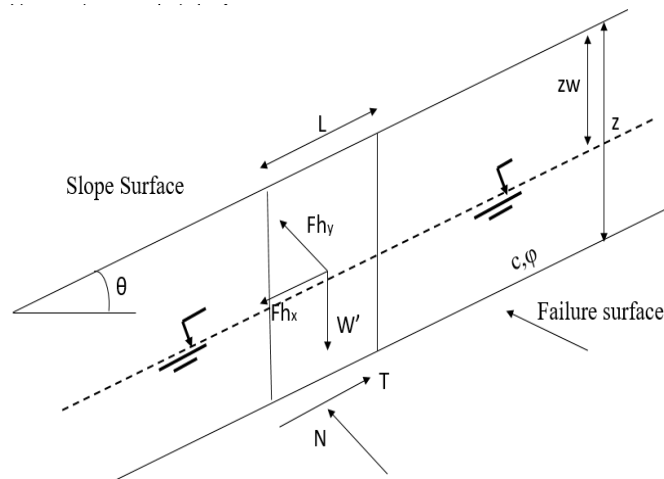
$$FS = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot (\cos\theta)^2 \cdot \tan\theta + \gamma \cdot z \cdot (\cos\theta)^2 \cdot k_h} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta} =$$

Τελικά, η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας για απειρομήκες ξηρό πρανές υπό σεισμικές συνθήκες υπολογίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot (\sin\theta \cdot \cos\theta + (\cos\theta)^2 \cdot k_h)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta} \quad (3.3)$$

4^η Περίπτωση: Απειρομήκες πρανές παρουσία υδροφόρου ορίζοντα υπό σεισμικές συνθήκες.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας κάθε περίπτωσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις 3.1.α, 3.1.β, 3.1.γ, 3.1.δ, 3.1.ε., 3.2.α, 3.3.α, 3.3.β, 3.3.γ, 3.3.δ, 3.3.ε.



Εικόνα 3.8: Απειρομήκες εδαφικό πρανές σε υγρές συνθήκες, με σεισμική διέγερση

Η διατμητική αντίσταση τ_f στη βάση του τμήματος της λωρίδας:

$$\tau_f = c + (\sigma' - fh_y) \cdot \tan\varphi \quad (\text{διαθέσιμη διατμητική αντοχή})$$

$$\begin{aligned}
FS &= \frac{\tau f}{\tau + fh_x} = \frac{C + (\sigma' - fh_y) \cdot \tan \varphi}{\tau + fh_x} = \\
FS &= \frac{c + ((\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \cos^2 \theta - k_h \cdot (\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta) \cdot \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + k_h \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta} = \\
FS &= \frac{\frac{c}{\gamma \cdot z \cdot (\cos \theta)^2} + \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w)}{\gamma \cdot z} \cdot (1 - k_h \cdot \tan \theta) \tan \varphi}{\tan \theta + k_h} = \\
FS &= \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot (\cos \theta)^2 \cdot \tan \theta + \gamma \cdot z \cdot (\cos \theta)^2 \cdot k_h} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta)}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right)} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \cdot \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w)}{\gamma \cdot z} =
\end{aligned}$$

Οπότε, η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας για απειρομήκες υγρά πρανές υπό σεισμικές συνθήκες υπολογίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot (\sin \theta \cdot \cos \theta + (\cos \theta)^2 \cdot k_h)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan \theta)}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan \theta}\right)} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \cdot \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w)}{\gamma \cdot z} \quad (3.4)$$

5^η Περίπτωση: Απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες βυθισμένο σε νερό.

Υπολογίζεται το βάρος της λωρίδας :

$$W_1 = \gamma \cdot b \cdot h \cdot l \quad (3.5.α)$$

η Άνωση της λωρίδας :

$$W_2 = \gamma_w \cdot b \cdot h \cdot l \quad (3.5.β)$$

$$W' = W_1 - W_2 = \gamma \cdot b \cdot h - \gamma_w \cdot b \cdot h \Rightarrow$$

$$W' = \gamma' \cdot b \cdot h \quad (3.5.γ)$$

Η ορθή ενεργός δύναμη κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης:

$$N' = \gamma' \cdot b \cdot \cos \theta \quad (3.5.δ)$$

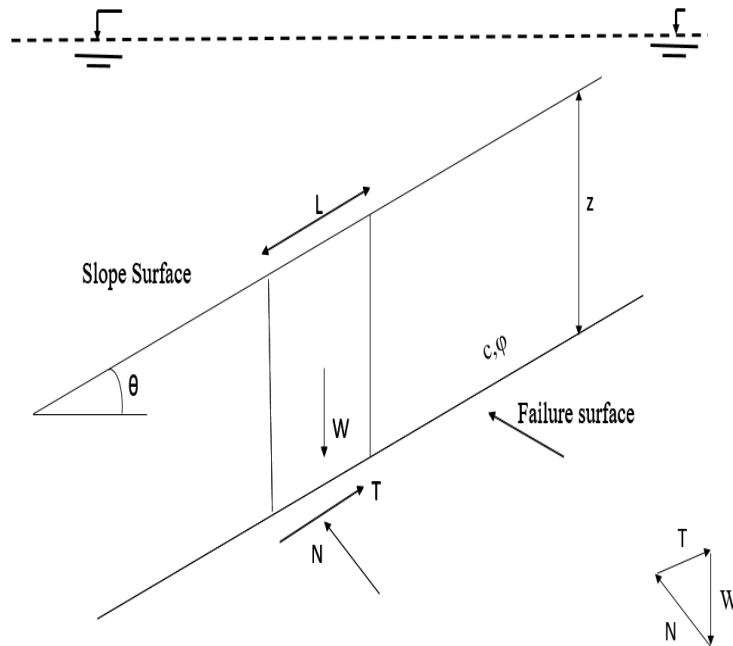
Η διατμητική δύναμη:

$$T' = \gamma' \cdot b \cdot h \cdot \sin \theta \quad (3.5.ε)$$

Υπολογίζονται οι ενεργές τάσεις:

$$\tau = \gamma' \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (3.5.στ)$$

$$\sigma = \gamma' \cdot z \cdot \cos^2 \theta \quad (3.5.ζ)$$



Εικόνα 3.9 Βυθισμένο σε νερό Απειρομήκες εδαφικό πρανές

$$FS = \frac{\tau f}{\tau} = \frac{c + \sigma \cdot \tan \varphi}{\tau} \Rightarrow$$

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

$$FS = \frac{\frac{c}{(\cos \theta)^2} + z \cdot \gamma' \cdot \tan \varphi}{z \cdot \gamma' \cdot \tan \theta} \Rightarrow$$

Η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας για απειρομήκες βυθισμένο σε νερό πρανές υπό στατικές συνθήκες υπολογίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{c}{z \cdot \gamma' \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \quad (3.5)$$

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται σε συγκεντρωτικό πίνακα οι αναλυτικές εξισώσεις κάθε περίπτωσης:

Για συνεκτικά εδάφη, $c \neq 0$:

Πίνακας 3.1: Αναλυτικές εξισώσεις για συνεκτικά εδάφη.

| Είδος Πρανούς | Εξισώσεις |
|---|--|
| Απειρομήκες ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες | $FS = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} + \frac{\tan\varphi}{\tan\theta}$ |
| Απειρομήκες ξηρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες | $FS = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot (\sin\theta \cdot \cos\theta + (\cos\theta)^2 \cdot k_h)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta}$ |
| Απειρομήκες υγρό πρανές υπό στατικές συνθήκες (με ροή) | $FS = \frac{\frac{c}{(\cos\theta)^2} + (\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \tan\varphi}{z \cdot \gamma \cdot \tan\theta}$ |
| Απειρομήκες υγρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες (με ροή) | $FS = \frac{c}{\gamma \cdot z \cdot (\sin\theta \cdot \cos\theta + (\cos\theta)^2 \cdot k_h)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta} \cdot \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w)}{\gamma \cdot z}$ |
| Απειρομήκες πρανές βυθισμένο σε νερό υπό στατικές συνθήκες | $FS = \frac{c}{\gamma' \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} + \frac{\tan\varphi}{\tan\theta}$ |

Για μη συνεκτικά εδάφη, $c=0$:

Πίνακας 3.2: Αναλυτικές εξισώσεις για μη συνεκτικά εδάφη.

| Είδος Πρανούς | Εξισώσεις |
|--|--|
| Απειρομήκες ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες | $FS = \frac{\tan\varphi}{\tan\theta}$ |
| Απειρομήκες ξηρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες | $FS = \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta}$ |
| Απειρομήκες υγρό πρανές υπό στατικές συνθήκες | $FS = \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w) \cdot \tan\varphi}{z \cdot \gamma \cdot \tan\theta}$ |
| Απειρομήκες υγρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες | $FS = \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta} \cdot \frac{(\gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z_w)}{\gamma \cdot z}$ |
| Απειρομήκες πρανές βυθισμένο σε νερό υπό στατικές συνθήκες | $FS = \frac{\tan\varphi}{\tan\theta}$ |

3.2.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων για απειρομήκη πρανή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων για απειρομήκη πρανή με πίνακες και διαγράμματα. Για διάφορες τιμές συνοχής, γωνιά εσωτερικής τριβής, κλίσης πρανού και

ύψους της εδαφικής μάζας μελετώνται με τις αναλυτικές εξισώσεις που αποδείχτηκαν παραπάνω, στο πρόγραμμα Microsoft Excel. Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν είναι οι εξής :

- ❖ Κλίση πρανούς θ (σε μοίρες) με τιμές 5° 30° 60°
- ❖ Συνοχή εδαφικής μάζας c (σε kPa) 0 kPa και 20 kPa
- ❖ Γωνία τριβής ϕ (σε μοίρες) με τιμές 0° , 15° , 30°
- ❖ Ύψος εδαφικής μάζας z (σε μέτρα) με τιμές 10m, 20m
- ❖ Ειδικό βάρος εδαφικής μάζας $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$
- ❖ Ειδικό βάρος νερού $\gamma_w=10 \text{ kN/m}^3$

Παρακάτω παρατίθενται όλες οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν με τις αναλυτικές εξισώσεις, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι στην πραγματικότητα δεν μπορεί να υπάρξει η περίπτωση όπου ταυτόχρονα και η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής είναι μηδέν και γι' αυτόν τον λόγο δεν μελετήθηκε τέτοια περίπτωση.

Πίνακας 3.3: . Χαρακτηριστικά του εδάφους για τις μελετώμενες περιπτώσεις.

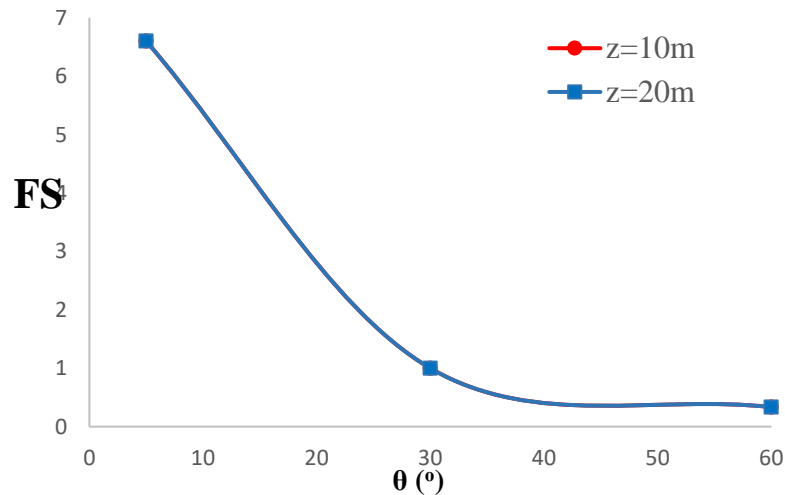
| | $\theta(^\circ)$ | $c(\text{kPa})$ | $\phi(^\circ)$ | $z(\text{m})$ |
|-------------|---------------------------------|-----------------|----------------|---------------|
| Περίπτωση 1 | 5° 30° 60° | 0 | 15 | 10 |
| Περίπτωση 2 | 5° 30° 60° | 0 | 30 | 10 |
| Περίπτωση 3 | 5° 30° 60° | 20 | 15 | 10 & 20 |
| Περίπτωση 4 | 5° 30° 60° | 20 | 30 | 10 & 20 |

Μετά τον καθορισμό των εξισώσεων, οι παράγοντες που επηρεάζουν το συντελεστή ασφαλείας δέχτηκαν διάφορες τιμές για να γίνουν οι επιλύσεις των εξισώσεων (πίνακας 3.3). Η επίλυση των εξισώσεων έγινε στο Excel. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται διαγράμματα που απεικονίζουν την επίπτωση της αλλαγής του ύψους του πρανούς στον συντελεστή ασφαλείας, ενώ διατηρείται η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής σταθερή. Επίσης, παρουσιάζεται και η περίπτωση όπου $c=0\text{kPa}$ και $\phi \neq 0^\circ$, αλλά και η συνοχή να παραμένει σταθερή για διάφορες τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής.

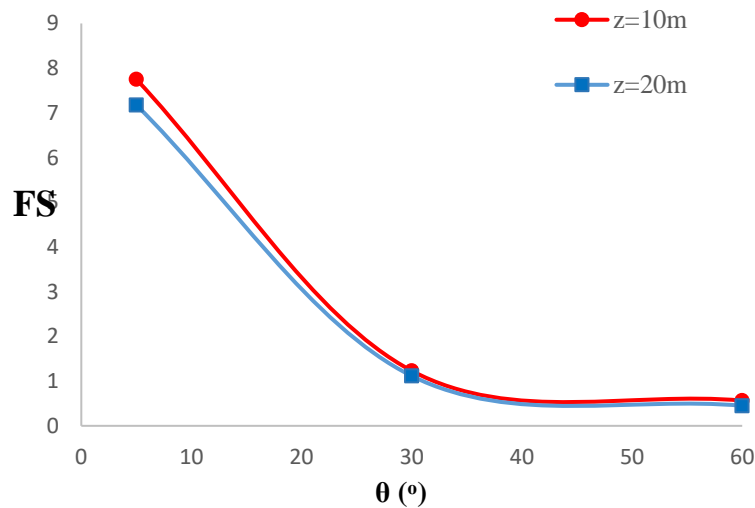
1. Απειρομήκες πρανές χωρίς την παρουσία νερού υπό στατικές συνθήκες

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει παρουσία νερού και σεισμικής διέγερσης κρίθηκε απαραίτητο να διερευνηθεί η επιρροή της αύξησης της κλίσης αλλά και η αύξηση της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής, έτσι ώστε να εκτιμηθεί και να αξιολογηθεί η ευστάθεια των εδαφικών πρανών, επομένως να ερμηνευτούν οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας αλλά και να κατανοηθεί η επίδραση τους στην ευστάθεια των χερσαίων αυτών πρανών. Ο σημαντικότερος παράγοντας στην ευστάθεια των πρανών είναι η κλίση της γεωμετρίας του πρανούς, καθώς οποιαδήποτε αύξηση της κλίσης οδηγεί σε κατολισθήσεις και αστοχίες ιδιαίτερα σε μη συμπαγή εδάφη που διακρίνονται από υδροφόρο ορίζοντα. Επίσης, κρίσιμη παράμετρος στην ευστάθεια της εδαφικής κλίσης αποτελεί η συνοχή του υλικού, που κρίνουν το υλικό ανθεκτικότερο για

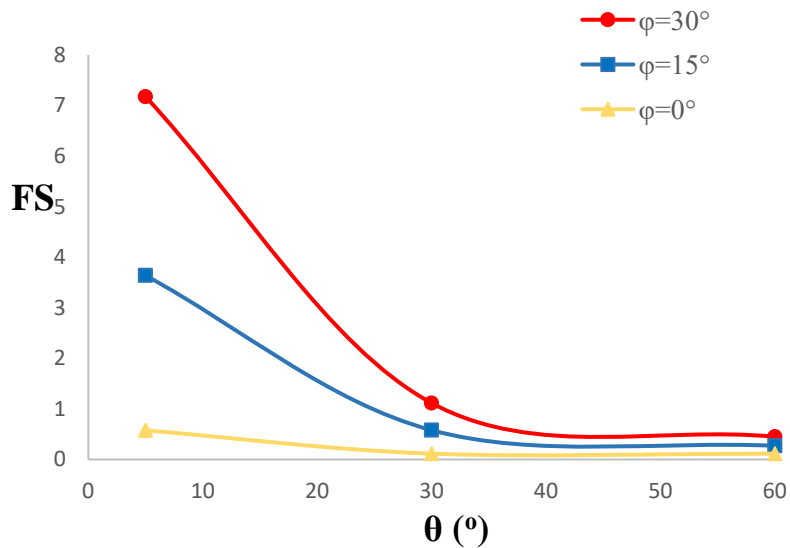
υψηλότερες τιμές και το εμποδίζουν από τυχόν παραμορφώσεις. Ακόμη, η εσωτερική γωνία τριβής αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα διότι αναφέρεται στην αντίσταση των σωματιδίων στην κίνηση εμποδίζοντας προκαλούμενες κινήσεις. Έγιναν οι αναλύσεις για απειρομήκη πρανή από τις εξισώσεις του παρόντος κεφαλαίου στο πρόγραμμα Excel και έτσι υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας για ένα σημαντικό πλήθος περιπτώσεων. Για γωνίες πρανούς 5° , 30° και 60° αξιολογήθηκε ο συντελεστής ασφαλείας για αμμώδη και αργιλικά εδάφη με γωνίες εσωτερικής τριβής 15° και 30° .



Εικόνα 3.10: Ξηρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$



Εικόνα 3.11: Ξηρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$

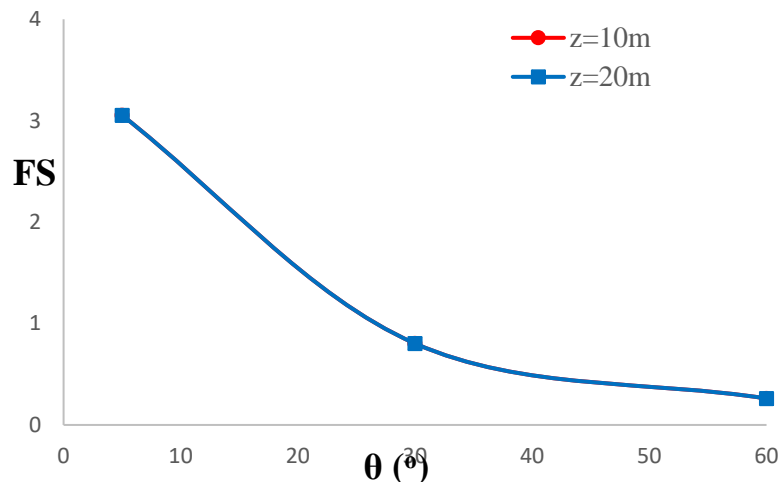


Εικόνα 3.12 : Ξηρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=20$ kPa, $z=10$ m με διαφορετικές τιμές για την γωνία εσωτερικής τριβής.

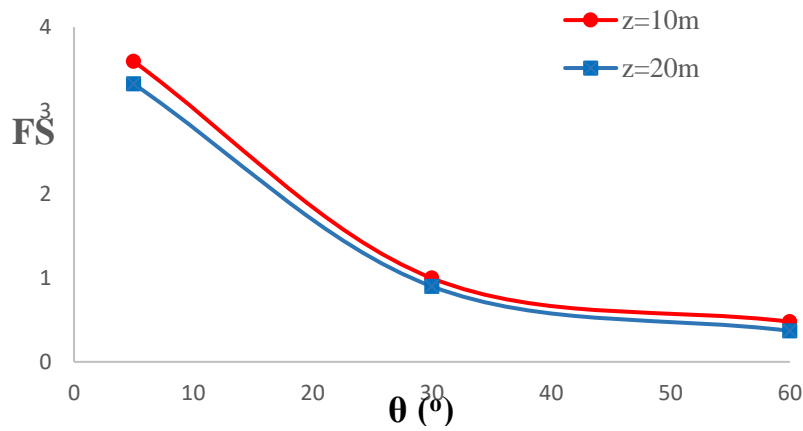
Στις παραπάνω αναλύσεις για απειρομήκη πρανή χωρίς την παρουσία νερού και χωρίς σεισμικές διεγέρσεις, παρατηρείται ότι σε μη συνεκτικά εδάφη το ύψος του πρανούς δεν επηρεάζει τον συντελεστή ασφαλείας αλλά η αύξηση της κλίσης του μειώνει τον συντελεστή ασφαλείας αισθητά. Αντιθέτως, σε συνεκτικά εδάφη με την αύξηση του ύψους του πρανούς μειώνεται ελάχιστα ο συντελεστής ασφαλείας και με τη μείωση της εσωτερικής γωνίας τριβής η μείωση του συντελεστή είναι μεγάλη.

2. Απειρομήκες πρανές χωρίς την παρουσία νερού υπό ψευδοστατικές συνθήκες.

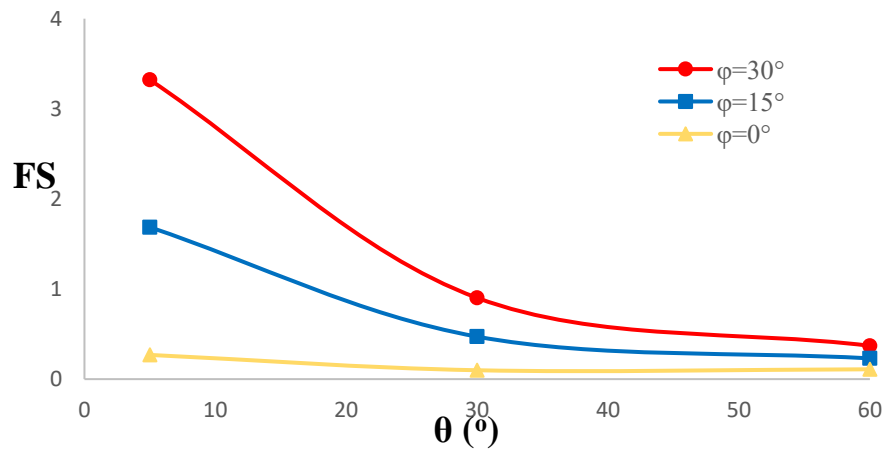
Στην περίπτωση αυτή εξετάζονται ψευδοστατικές συνθήκες, μελετάται η επιρροή των σεισμικών φορτίσεων στους παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των πρανών σε στατικές συνθήκες και εισάγεται μία νέα μεταβλητή, ο σεισμικός συντελεστής. Παρουσιάζονται διαγράμματα που απεικονίζουν την επίπτωση της αλλαγής του ύψους του πρανούς στον συντελεστή ασφαλείας, ενώ διατηρείται η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής σταθερή, προσθέτοντας τον σεισμικό συντελεστή. Παρουσιάζονται περιπτώσεις με διαφορετικές τιμές συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής έτσι ώστε να διαπιστωθεί το αντίκτυπο των δύο αυτών παραγόντων στην ευστάθεια των χερσαίων πρανών. Επίσης, παρουσιάζεται η συνεκτικότητα να είναι μηδέν, αλλά και η συνοχή να παραμένει σταθερή για διάφορες τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής, με σεισμικό συντελεστή 0.1. Ο σεισμικός συντελεστής αναλύεται για την κατανόηση της επίδρασης του στην ευστάθεια των εδαφικών μαζών. Τα συμπεράσματα των αναλύσεων αποτελούν κρίσιμης σημασίας καθώς η επίδραση του σεισμού επηρεάζει αισθητά τον συντελεστή ασφαλείας, καθώς αυτός μειώνεται αισθητά, μειώνεται με αυτόν το τρόπο και η ευστάθεια του πρανούς.



Εικόνα 3.13: Ξηρό απειρομήκες πρανές, υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=0\text{kPa}$, $\phi=30^\circ$



Εικόνα 3.14: Ξηρό απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=20\text{kPa}$, $\phi=30^\circ$

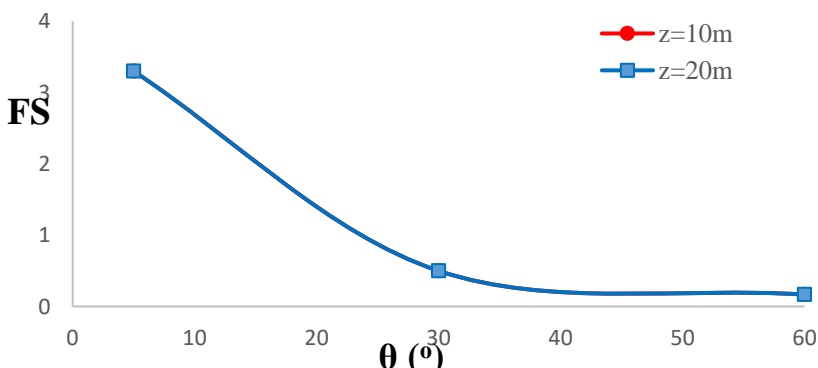


Εικόνα 3.15: Ξηρό απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=20\text{kPa}$, $z=10\text{m}$, με διαφορετικές τιμές για την γωνία εσωτερικής τριβής.

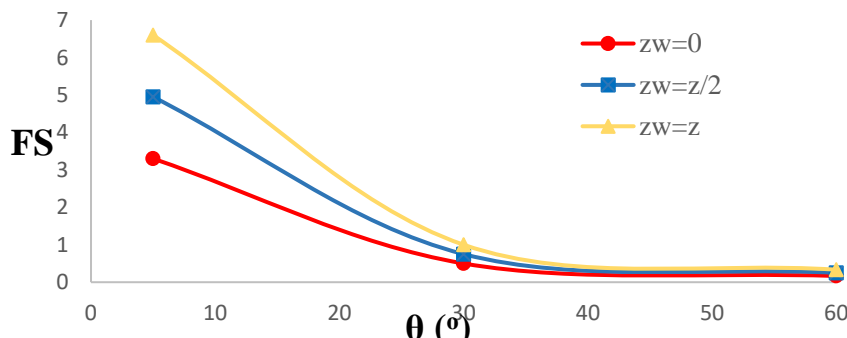
Στις παραπάνω αναλύσεις για απειρομήκη πρηνή χωρίς την παρουσία νερού αλλά με σεισμικές διεγέρσεις, παρατηρείται ίδια συμπεριφορά με τις στατικές συνθήκες αλλά με μικρότερες τιμές συντελεστή ασφαλείας, δηλαδή σε μη συνεκτικά εδάφη το ύψος του πρηνούς δεν επηρεάζει τον συντελεστή ασφαλείας αλλά η αύξηση της κλίσης του μειώνει τον συντελεστή ασφαλείας αισθητά. Αντιθέτως, σε συνεκτικά εδάφη με την αύξηση του ύψους του πρηνούς μειώνεται ελάχιστα ο συντελεστής ασφαλείας και με την μείωση της εσωτερικής γωνίας τριβής η μείωση του συντελεστή είναι μεγάλη.

3. Αποτελέσματα Απειρομήκης πρηνές με ροή νερού υπό στατικές συνθήκες

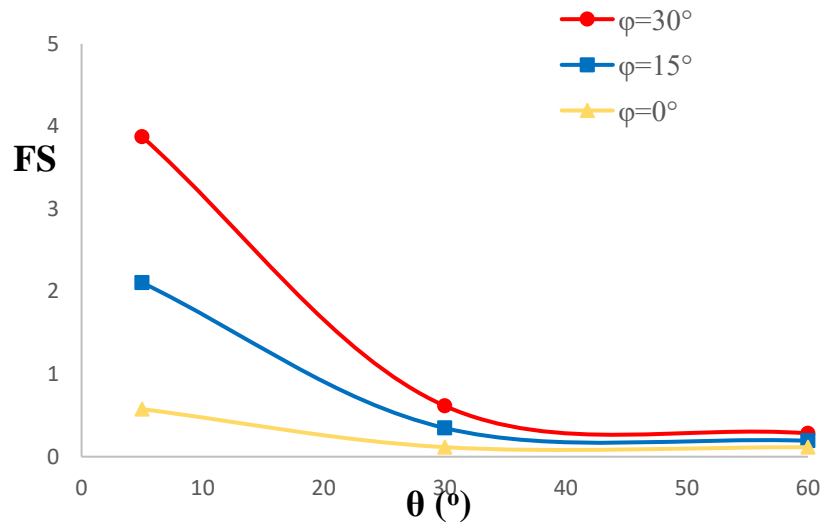
Η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα αλλάζει τις αρχικές συνθήκες για την ευστάθεια ενός πρηνούς. Η νέα τιμή που εισάγεται στις εξισώσεις είναι η στάθμη του νερού με μεταβλητή z_w . Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα αλλάζει αλλά οι δυνατοί συνδυασμοί για συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής και ύψους παραμένουν ίδιοι (Πίνακας 3.3). Ένα ξηρό πρηνές έχει βάθος νερού ίσο με το βάθος του πρηνούς. Στις αναλύσεις οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν δείχνουν την επιφάνεια του νερού $z_w=0$, $z_w=z/2$, $z_w=z$. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν την μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας για τα διαφορετικά βάθη της στάθμης του νερού. Διατηρείται η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής σταθερή, ενώ παρουσιάζεται η συνοχή να παραμένει σταθερή για διάφορες τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής.



Εικόνα 3.16: Υγρό απειρομήκης πρηνές υπό στατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$.



Εικόνα 3.17: Υγρό απειρομήκης πρηνές υπό στατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=0$ kPa, $z=10m$, $\phi=30^\circ$, για διαφορετικές τιμές στάθμης νερού.

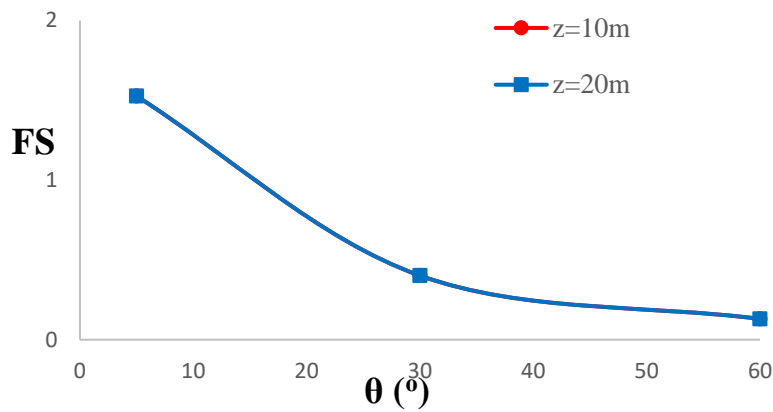


Εικόνα 3.18: Υγρό απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=20$ kPa, $z=10m$, με διαφορετικές τιμές για την γωνία εσωτερικής τριβής.

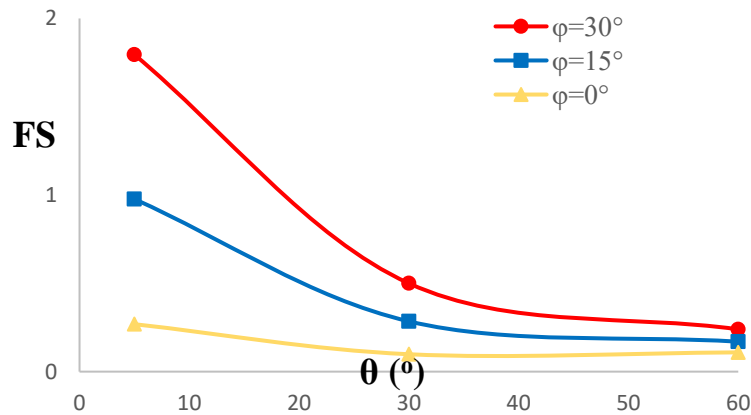
Στις παραπάνω αναλύσεις για απειρομήκη πρανή με την παρουσία ροής νερού αλλά χωρίς σεισμικές διεγέρσεις, παρατηρείται ίδια συμπεριφορά με τις στατικές συνθήκες χωρίς την παρουσία νερού αλλά με μικρότερες τιμές συντελεστή ασφαλείας, δηλαδή σε μη συνεκτικά εδάφη το ύψος του πρανούς δεν επηρεάζει τον συντελεστή ασφαλείας αλλά η αύξηση της κλίσης του μειώνει τον συντελεστή ασφαλείας αισθητά. Αντιθέτως σε συνεκτικά εδάφη με την αύξηση του ύψους του πρανούς μειώνεται ελάχιστα ο συντελεστής ασφαλείας και με την μείωση της εσωτερικής γωνίας τριβής η μείωση του συντελεστή είναι μεγάλη.

4. Αποτελέσματα Απειρομήκες πρανές με ροή υπό ψευδοστατικές συνθήκες

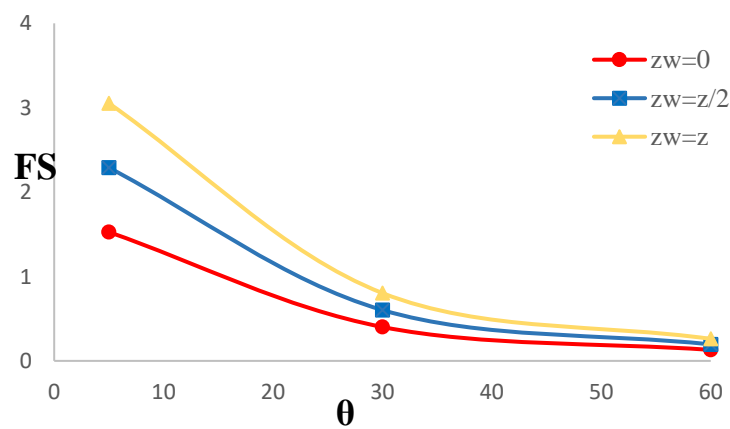
Η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα αλλάζει τις αρχικές συνθήκες για την ευστάθεια ενός πρανούς όπως έχει προαναφερθεί. Οι νέες τιμές που εισάγονται στις εξισώσεις είναι η στάθμη του νερού με μεταβλητή το z_w , και τον σεισμικό συντελεστή k_h . Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα αλλάζει αλλά οι δυνατοί συνδυασμοί για συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής και ύψους παραμένουν ίδιοι (Πίνακας 3.3). Στις αναλύσεις οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν παρουσιάζουν την επιφάνεια του νερού $z_w=0$, $z_w=z/2$, $z_w=z$, και με σεισμικό συντελεστή ίσο με 0.1. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν την μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας για τα διαφορετικά βάθη της στάθμης του νερού και την επίδραση μίας σεισμικής δόνησης. Διατηρείται η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής σταθερή, ενώ παρουσιάζεται και η συνοχή να παραμένει σταθερή για διάφορες τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής.



Εικόνα 3.19: Υγρό απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=0 \text{ kPa}$, $\phi=30^\circ$



Εικόνα 3.20 : Υγρό απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=20 \text{ kPa}$, με διαφορετικές τιμές για την γωνία εσωτερικής τριβής.

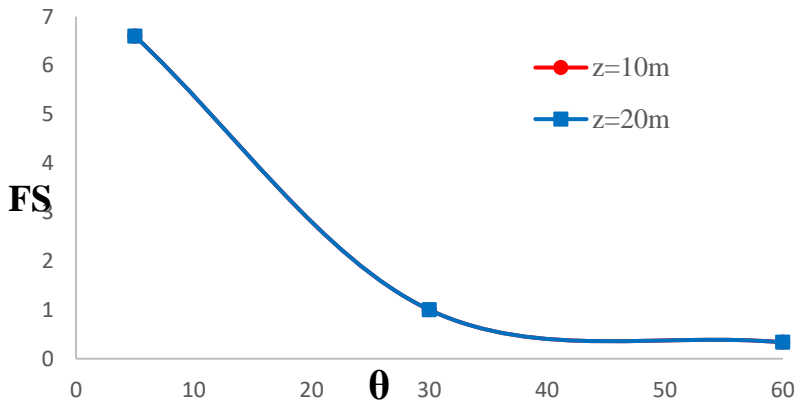


Εικόνα 3.21: Υγρό απειρομήκες πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με ροή νερού, με $c=20 \text{ kPa}$, $\phi=30^\circ$.

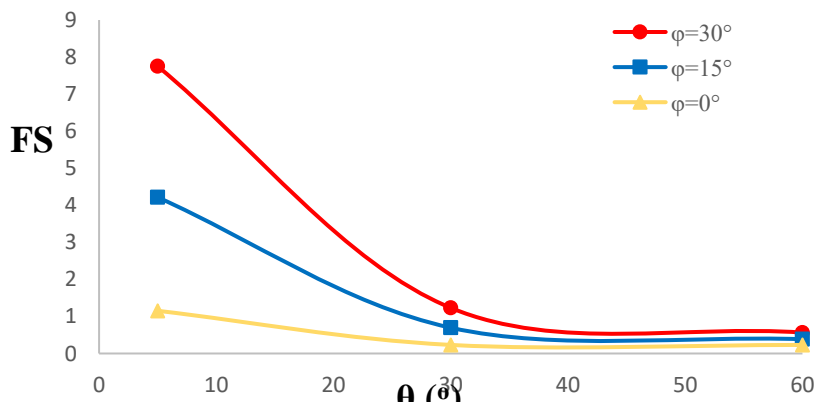
Στις παραπάνω αναλύσεις για απειρομήκη πρηνή με την παρουσία ροής νερού και με σεισμικές διεγέρσεις, παρατηρείται ίδια συμπεριφορά με τις στατικές συνθήκες αλλά με πολύ μικρότερες τιμές συντελεστή ασφαλείας, δηλαδή σε μη συνεκτικά εδάφη το ύψος του πρηνούς δεν επηρεάζει τον συντελεστή ασφαλείας αλλά η αύξηση της κλίσης του μειώνει τον συντελεστή ασφαλείας αισθητά. Αντιθέτως, σε συνεκτικά εδάφη με την αύξηση του ύψους του πρηνούς μειώνεται ελάχιστα ο συντελεστής ασφαλείας και με τη μείωση της εσωτερικής γωνίας τριβής η μείωση του συντελεστή είναι μεγάλη.

5. Αποτελέσματα Απειρομήκης πρηνές βυθισμένο σε νερό υπό στατικές συνθήκες

Σε αυτήν την περίπτωση μελέτης παρατηρούμε την επίδραση του βάρους του νερού σε όλη την μάζα του πρηνούς, ενώ επιδρά στο πρηνές η δύναμη της άνωσης. Θεωρητικά γνωρίζοντας ότι το νερό επιδρά αρνητικά στον συντελεστή ασφάλειας, ο υδροφόρος ορίζοντας σχηματικά θεωρήθηκε πάνω από την μάζα του πρηνούς, επομένως η επίδραση της άνωσης συνυπολογίστηκε στις εξισώσεις. Παρουσιάζονται διαγράμματα που οπτικοποιούν την επίδραση του συντελεστή ασφαλείας από το ύψος του πρηνούς αλλά και την επιρροή της γωνίας εσωτερικής τριβής στον συντελεστή σε αργιλικά και αμμώδη εδάφη.

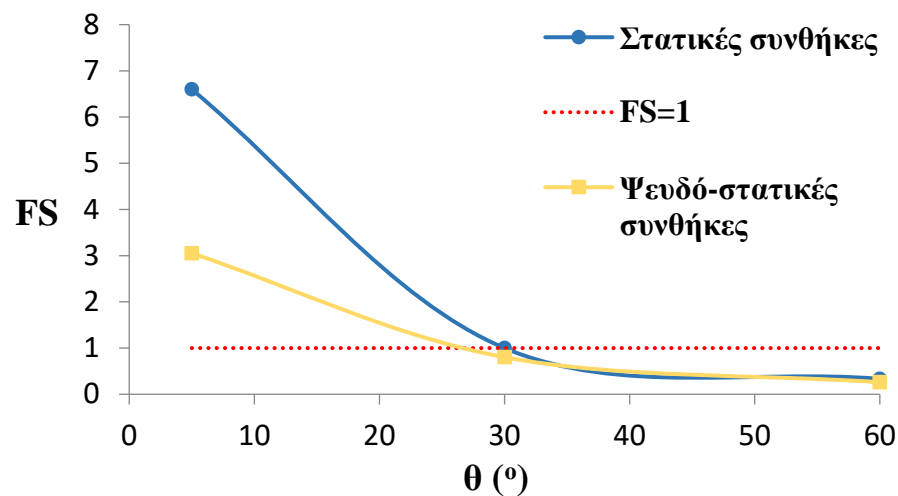


Εικόνα 3.22: Υγρό απειρομήκης πρηνές υπό στατικές συνθήκες, με $c=0$ kPa, $\phi=30^\circ$.

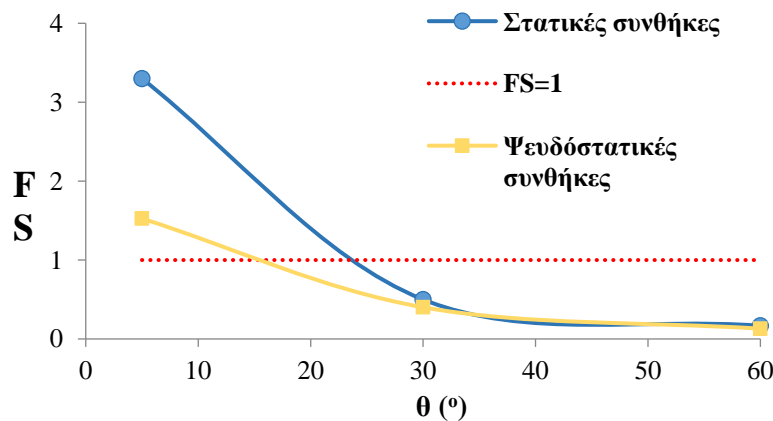


Εικόνα 3.23 : Υγρό απειρομήκης πρηνές υπό στατικές συνθήκες, με $c=20$ kPa, $\phi=30^\circ$, $z=20m$.

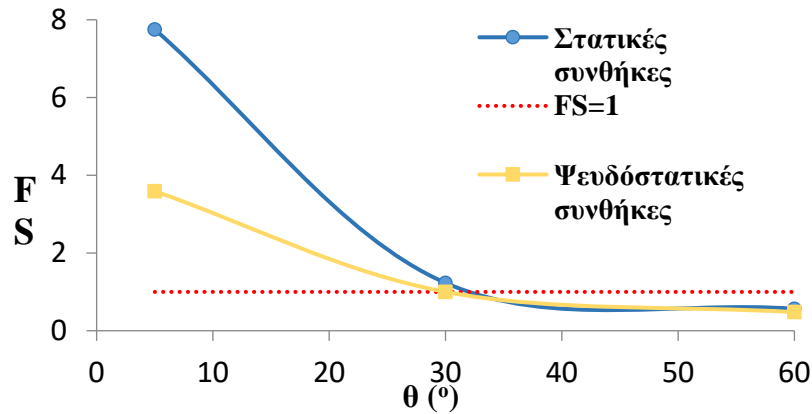
Στις παραπάνω αναλύσεις για απειρομήκη πρανή βυθισμένα σε νερό και χωρίς σεισμικές διεγέρσεις, παρατηρείται ίδια συμπεριφορά με τις στατικές συνθήκες αλλά με πολύ μικρότερες αυξήσεις στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας, δηλαδή σε μη συνεκτικά εδάφη το ύψος του πρανούς δεν επηρεάζει τον συντελεστή ασφαλείας αλλά η αύξηση της κλίσης του μειώνει τον συντελεστή ασφαλείας αισθητά. Αντιθέτως σε συνεκτικά εδάφη έχουμε μικρή αύξηση στον συντελεστή ασφαλείας έχοντας θετική επίδραση στην ευστάθεια των πρανών. Ο συντελεστής έχει την ίδια τιμή όπως στην περίπτωση που δεν έχουμε νερό. Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα που συγκρίνουν τον συντελεστή ασφαλείας σε στατικές συνθήκες, σε ψευδοστατικές αλλά και το όριο της μονάδας, που συμβολίζει την οριακή ισορροπία της εδαφικής μάζας.



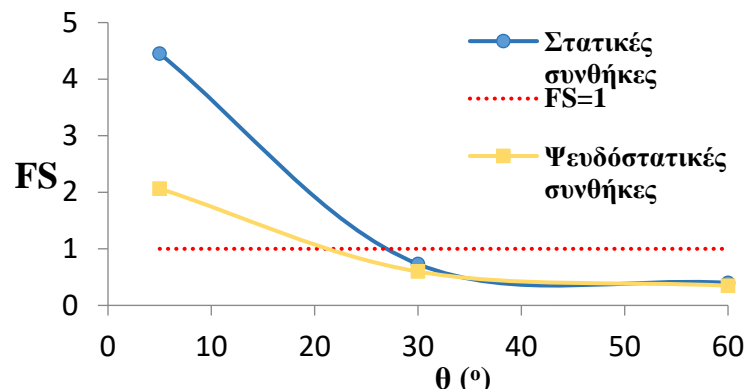
Εικόνα 3.24: Ξηρό απειρομήκη πρανές με $c=0kPa$, $\phi=30^\circ$, $z=10m$.



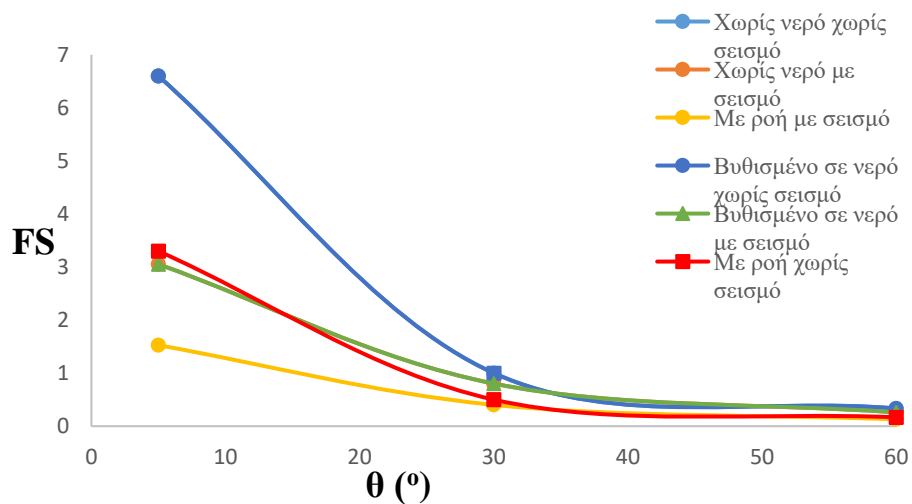
Εικόνα 3.25: Υγρό απειρομήκη πρανές με ροή νερού, με $c=0kPa$, $\phi=30^\circ$, $z=10m$.



Εικόνα 3.26: Ξηρό απειρομήκες πρανές με $c=20kPa$, $\phi=30^\circ$, $z=10m$.



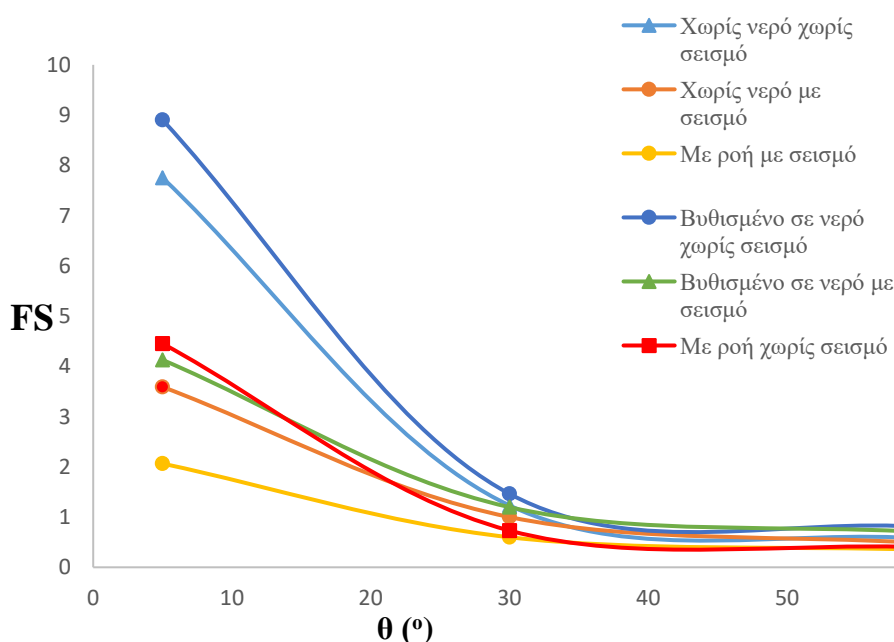
Εικόνα 3.27: Υγρό απειρομήκες πρανές με $c=20kPa$, $\phi=30^\circ$, $z=10m$.



Εικόνα 3.28: Συντελεστής ασφαλείας για όλες τις αναλυόμενες περιπτώσεις για αμμώδη εδάφη, ($c=0kPa$), $z=10m$, $\phi=30^\circ$.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις κάθε περίπτωσης συγκεντρωτικά για την πλήρη απεικόνιση τους και την διεξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων. Να τονιστεί ότι

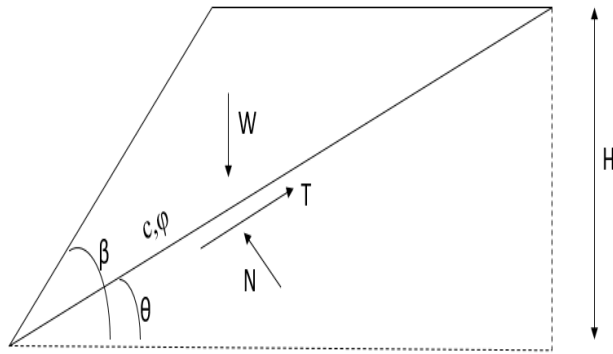
στην καμπύλη χωρίς νερό χωρίς σεισμό ταυτίζεται με την καμπύλη βυθισμένο σε νερό χωρίς σεισμό. Όπως και η καμπύλη χωρίς νερό με σεισμό ταυτίζεται με την καμπύλη βυθισμένο σε νερό με σεισμό, διότι οι εξισώσεις ταυτίζονται. Παρατηρήθηκε ότι οι δυσμενέστερες περιπτώσεις αφορούσαν τον συνδυασμό πολλών παραγόντων αλλά κυρίως της ψευδοστατικής κατάστασης με την επιρροή υπόγειου νερού. Ενώ σε αντίθεση, οι ευνοϊκότερες περιπτώσεις αποδείχτηκαν, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι είναι εκείνες που δεν χαρακτηρίζονται από σεισμικές διεγέρσεις και επιρροή νερού.



Εικόνα 3.29: Συντελεστής ασφαλείας για όλες τις αναλυόμενες περιπτώσεις για αργιλικά εδάφη ($c=20\text{kPa}$), $z=10\text{m}$, $\phi=30^\circ$.

3.2.3. Πρανή Πεπερασμένου ύψους

Τα πρανή πεπερασμένου ύψους αναφέρονται σε κομμάτια γης όπου η επιφάνεια τους είναι κεκλιμένη υπό γωνία προς το οριζόντιο επίπεδο και έχουν κύριο χαρακτηριστικό ότι το ύψος τους είναι συγκρίσιμο με το μήκος τους. Τα πεπερασμένα πρανή βρίσκονται σε φυσικά εδάφη αλλά και σε ανθρώπινες κατασκευές όπως τα επιχώματα δρόμων. Η ευστάθεια των πεπερασμένων πρανών αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την επιστήμη της γεωτεχνικής μηχανικής, καθώς τυχόν αστοχίες μπορεί να έχουν πολύτιμες οικονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για πεπερασμένα πρανή υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες, κορεσμένα και ακόρεστα. Καταστρωθήκαν εξισώσεις για την εύρεση του συντελεστή ασφάλειας λαμβάνοντας υπόψιν ότι η αστοχία πραγματοποιείται σε ένα επίπεδο και έχει μορφή σφήνας. Απαραίτητο είναι να γνωρίζουμε την γωνία που αστοχεί το πρανές. Η μικρότερη τιμή FS υπολογίζεται στην κρίσιμη γωνία, άρα επιλέχθηκε εκείνη η τιμή για τη γωνία θ .



Εικόνα 3.30: Πεπερασμένο εδαφικό πρανές σε ξηρές συνθήκες.

- ❖ Γωνία αστοχίας πρανούς (θ)
- ❖ Κλίση πρανούς (β)
- ❖ Συνοχή εδαφικού υλικού (c)
- ❖ Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ)
- ❖ Ύψος εδαφικού πρανούς (H)
- ❖ Ειδικό βάρος (γ)

1^η Περίπτωση: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας υπό στατικές συνθήκες, υπολογίζεται το βάρος του εδαφικού τμήματος :

Αποδεικνύεται ότι $W = \gamma \cdot \text{Εμβαδόν τριγώνου} \Rightarrow$

$$\text{Εμβαδόν τριγώνου} = \frac{1}{2} \cdot \text{βάση} \cdot \text{ύψος} \Rightarrow$$

$$\text{Εμβαδόν τριγώνου} = \frac{1}{2} \cdot \frac{H}{\sin\theta} \cdot (\sin(\beta - \theta)) \cdot \frac{H}{\sin\beta} \Rightarrow$$

Το βάρος του εδαφικού τμήματος είναι:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta \cdot \sin\theta} \quad (3.6.\alpha)$$

Η ορθή ενεργός δύναμη είναι : $N = W \cdot \cos\theta = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta \cdot \sin\theta} \cdot \cos\theta$

Η διατμητική δύναμη: $T = W \cdot \sin\theta = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta \cdot \sin\theta} \cdot \sin\theta$

Υπολογίζονται οι ενεργές τάσεις:

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

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta} \cdot \cos\theta \quad (3.6.\beta)$$

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

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta} \cdot \sin\theta \quad (3.6.\gamma)$$

Επομένως υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας:

$$FS = \frac{\tau f}{\tau} = \frac{c + \sigma \cdot \tan\varphi}{\tau} \Rightarrow$$

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

Η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας για πεπερασμένο ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες υπολογίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{2 \cdot c \cdot \sin\beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin\theta \cdot \sin(\beta - \theta)} + \frac{\tan\varphi}{\tan\theta} \quad (3.6)$$

Η κρίσιμη γωνία αστοχίας εδαφικών πρανών υπολογίζεται με τον εξής τρόπο:

$$\theta_{critical} = \min FS$$

Η παράγωγος που μηδενίζει την εξίσωση μας δίνει την κρίσιμη γωνία αστοχίας:

$$W \cdot \sin\theta = c \cdot L + W \cdot \cos\theta \cdot \tan\varphi \Rightarrow c = \frac{W}{L} [\sin\theta - \cos\theta \cdot \tan\varphi] \Rightarrow$$

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

Για να καθορίσουμε την κρίσιμη γωνία αστοχίας του πρανούς παραγωγίζεται η εξίσωση από Abramson (1996):

$$\frac{\partial}{\partial\theta} (\sin(\beta - \theta) [\sin\theta - \cos\theta \cdot \tan\varphi]) \Rightarrow$$

$$= -\cos(\beta - \theta) [\sin\theta - \cos\theta \cdot \tan\varphi] + \sin(\beta - \theta) [\cos\theta - \sin\theta \cdot \tan\varphi] \Rightarrow$$

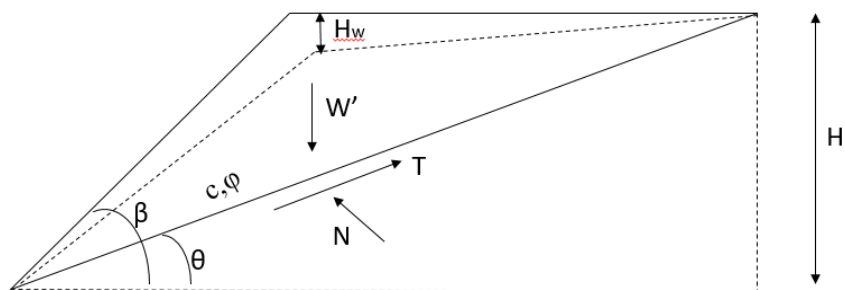
$$\sin(2\theta - \beta) = \tan\varphi [\cos(2\theta - \beta)]$$

$$\tan(2\theta - \beta) = \tan\varphi$$

$$\theta_{critical} = \frac{\beta + \varphi}{2} \quad (3.6.\delta)$$

2^η Περίπτωση: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες, με ροή

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας κάθε περίπτωσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις 3.6.α, 3.6.β, 3.6.γ.



Εικόνα 3.31: Γεωμετρία Πεπερασμένου εδαφικού πρανούς σε ξηρές συνθήκες

Λαμβάνοντάς υπόψη όμως και το u που είναι η δύναμη της πίεσης των πόρων λόγω νερού:

$$\begin{aligned}\sigma' = \sigma - u &= \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta} \cdot \cos\theta - \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot (H - H_w) \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta} \cdot \cos\theta = > \\ \sigma' &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta} \cdot \cos\theta \cdot (\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)\end{aligned}\quad (3.7.a)$$

Υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας :

$$FS = \frac{\tau f}{\tau} = \frac{c + \sigma' \cdot \tan \varphi}{\tau} \Rightarrow$$

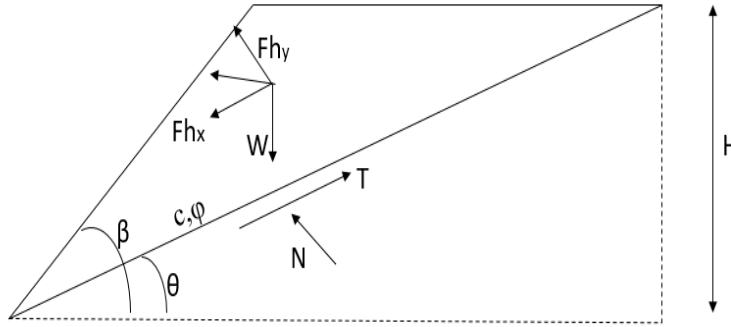
$$FS = \frac{c + \frac{1}{2} \cdot (\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w) \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi}{\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta} \cdot \sin \theta} \Rightarrow$$

Η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας για πεπερασμένο υγρό πρανές υπό στατικές συνθήκες υπολογίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin \theta \cdot \sin (\beta - \theta)} + \frac{(\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w)}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} \quad (3.7)$$

3^η Περίπτωση: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό σεισμικές συνθήκες

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας κάθε περίπτωσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις 3.6.α, 3.6.β, 3.6.γ, 3.3.α, 3.3.β, 3.3.γ.



Εικόνα 3.32: Πεπερασμένο εδαφικό πρανές σε ξηρές συνθήκες, με σεισμική διέγερση

Οι ενεργές τάσεις δίδονται από:

$$fh_x = k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta} \cdot \cos\theta \quad (3.8.\alpha)$$

$$fh_y = k_h \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta} \cdot \sin\theta \quad (3.8.\beta)$$

Υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας :

$$FS = \frac{\tau f}{\tau + fh_x} = \frac{c + (\sigma - fh_y) \cdot \tan\varphi}{\tau + fh_x} \Rightarrow$$

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

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

Η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας για πεπερασμένο ξηρό πρανές υπό σεισμικές συνθήκες υπολογίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{2 \cdot c \cdot \sin\beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin\theta \left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta} \quad (3.8)$$

Η παράγωγος που μηδενίζει την εξίσωση μας δίνει την κρίσιμη γωνία αστοχίας:

Για την κρίσιμη γωνία $\theta_{critical}$:

$$\theta_{critical} = \min FS$$

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

Για να καθοριστεί η κρίσιμη γωνία αστοχίας του πρανούς παραγωγίζεται η εξίσωση :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin(\beta - \theta) [\sin\theta + k_h \cdot \cos\theta - \tan\varphi \cdot \cos\theta + k_h \cdot \sin\theta \cdot \tan\varphi]) = \\ = -\cos(\beta - \theta) [\sin\theta + \cos\theta \cdot k_h] - \tan\varphi [\cos\theta + k_h \cdot \sin\theta] + \sin(\beta - \theta) [-\cos\theta + \sin\theta \cdot k_h] \\ - \tan\varphi [\sin\theta - k_h \cdot \cos\theta] \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\sin(2\theta - \beta) [1 + \tan\varphi k_h] = \tan\varphi [\cos(2\theta - \beta)] [1 - k_h] \Rightarrow$$

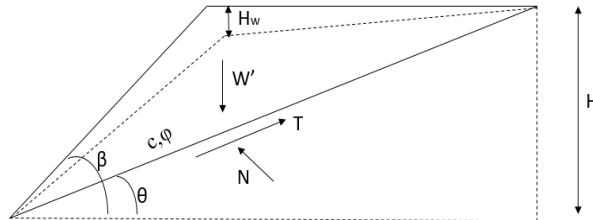
$$\tan(2\theta - \beta) = \frac{\tan\varphi [1 - k_h]}{[1 + \tan\varphi k_h]} \Rightarrow$$

$$(2\theta - \beta) = \varphi \frac{[1 - k_h]}{[1 + \tan\varphi k_h]} \Rightarrow$$

$$\theta_{critical} = \frac{\left[\varphi \frac{[1 - k_h]}{[1 + \tan\varphi k_h]} + \beta \right]}{2} \quad (3.8.\gamma)$$

4^η Περίπτωση: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό σεισμικές συνθήκες με παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας κάθε περίπτωσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις 3.6.α, 3.6.β, 3.6.γ, 3.7.α, 3.8.α, 3.8.β.



Εικόνα 3.33: Γεωμετρία Πεπερασμένου εδαφικού πρανούς σε ξηρές συνθήκες.

$$FS = \frac{\tau f}{\tau - fh_x} = \frac{c + (\sigma' - fh_y) \cdot \tan\varphi}{\tau + fh_x} \Rightarrow$$

FS

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

=>

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

Η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας για πεπερασμένο υγρό πρανές υπό σεισμικές συνθήκες υπολογίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{2 \cdot c \cdot \sin\beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin\theta \left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta} \right)} + \left(\frac{\gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H_w}{\gamma \cdot H} \right) \cdot \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta} \right) \cdot \tan\theta} \quad (3.9)$$

5^η Περίπτωση: Πρανές πεπερασμένου ύψους υπό στατικές συνθήκες, βυθισμένο σε νερό οριζόντιο στο επίπεδο

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας του πρανούς υπό στατικές συνθήκες, βυθισμένο σε νερό, το βάρος του εδαφικού τμήματος είναι:

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta \cdot \sin\theta} \quad (3.10.α)$$

ενώ η άνωση της λωρίδας :

$$W_2 = \gamma_w \cdot \frac{1}{2} \cdot H_w^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta \cdot \sin\theta} \quad (3.10.β)$$

$$W' = W_1 - W_2 =>$$

$$W' = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta \cdot \sin\theta} - \gamma_w \cdot \frac{1}{2} \cdot H_w^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta \cdot \sin\theta} =>$$

$$W' = \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta \cdot \sin\theta} \quad (3.10.γ)$$

Η ορθή ενεργός δύναμη είναι : $N' = W' \cdot \cos\theta = \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot H^2 \cdot \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta \cdot \sin\theta} \cdot \cos\theta$

Πίνακας 3.4: Αναλυτικές εξισώσεις σε πεπερασμένα αργιλικά πρανή

| Είδος Πρανούς | Εξισώσεις |
|--|--|
| Πεπερασμένο ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες | $FS = \frac{2 \cdot c \cdot \sin\beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin\theta \cdot \sin(\beta - \theta)} + \frac{\tan\varphi}{\tan\theta}$ |
| Πεπερασμένο ξηρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες | $FS = \frac{2 \cdot c \cdot \sin\beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin\theta \left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta}$ |
| Πεπερασμένο υγρό πρανές υπό στατικές συνθήκες | $FS = \frac{2 \cdot c \cdot \sin\beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin\theta \cdot \sin(\beta - \theta)} + \frac{\tan\varphi}{\tan\theta} \cdot [1 - ru(1 + \tan^2\theta)]$ |
| Πεπερασμένο υγρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες | $FS = \frac{2 \cdot c \cdot \sin\beta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot \sin\theta \left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right)} + \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta} \cdot [1 - ru(1 + \tan^2\theta)]$ |
| Πεπερασμένο πρανές βυθισμένο σε νερό υπό στατικές συνθήκες | $FS = \frac{2 \cdot c \cdot \sin\beta}{\gamma' \cdot H \cdot \sin\theta \cdot \sin(\beta - \theta)} + \frac{\tan\varphi}{\tan\theta}$ |

Για μη συνεκτικά εδάφη, $c=0$ kPa:

Πίνακας 3.5: Αναλυτικές εξισώσεις σε πεπερασμένα αμμώδη εδάφη

| Είδος Πρανούς | Εξισώσεις |
|--|---|
| Πεπερασμένο ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες | $FS = \frac{\tan\varphi}{\tan\theta}$ |
| Πεπερασμένο πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες | $FS = \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta}$ |
| Πεπερασμένο υγρό πρανές υπό στατικές συνθήκες | $FS = [1 - ru(1 + \tan^2\theta)] \cdot \frac{\tan\varphi}{\tan\theta}$ |
| Πεπερασμένο υγρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες | $FS = \frac{(1 - k_h \cdot \tan\theta) \cdot \tan\varphi}{\left(1 + \frac{k_h}{\tan\theta}\right) \cdot \tan\theta} \cdot [1 - ru(1 + \tan^2\theta)]$ |
| Πεπερασμένο πρανές βυθισμένο σε νερό υπό στατικές συνθήκες | $FS = \frac{\tan\varphi}{\tan\theta}$ |

3.2.4. Ανάλυση αποτελεσμάτων για πεπερασμένα πρανή

Σε αυτή την ενότητα γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων για πεπερασμένα πρανή με πίνακες και διαγράμματα. Για διάφορες τιμές συνοχής, γωνιά εσωτερικής τριβής, κλίσης πρανούς

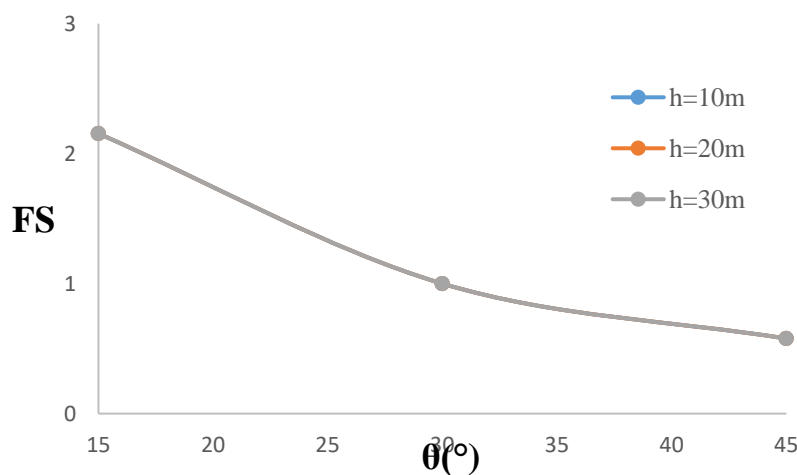
β και ύψος της εδαφικής μάζας μελετώνται με τις αναλυτικές εξισώσεις στο πρόγραμμα Microsoft Excel. Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν είναι οι εξής:

- Κλίση πρανούς β (σε μοίρες) επιλέχθηκαν οι τιμές 15° , 30° , 45°
- Συνοχή εδαφικής μάζας c (σε kPa) επιλέχθηκαν οι τιμές 0kPa, 20kPa
- Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (σε μοίρες) επιλέχθηκαν οι τιμές 15° , 30°
- Ύψος εδαφικής μάζας H (σε μέτρα) επιλέχθηκε η τιμή 10m
- Ειδικό βάρος εδαφικής μάζας $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$
- Ειδικό βάρος νερού $\gamma_w=10 \text{ kN/m}^3$

Όπως και στα απειρομήκη πρανή οι αναλύσεις έγιναν για τις ίδιες περιπτώσεις σε πεπερασμένα πρανή (Πίνακας 3.3). Έπειτα από την εύρεση των εξισώσεων για τον συντελεστή ασφαλείας δόθηκαν οι τιμές για τις διάφορες παραμέτρους και έγινε η επίλυση τους στο λογισμικό Excel. Παρουσιάζονται τα αξιοσημείωτα αποτελέσματα που βρέθηκαν σε γραφικές παραστάσεις έπειτα από προσεκτική επιλογή κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους που επηρεάζουν τον συντελεστή ασφαλείας.

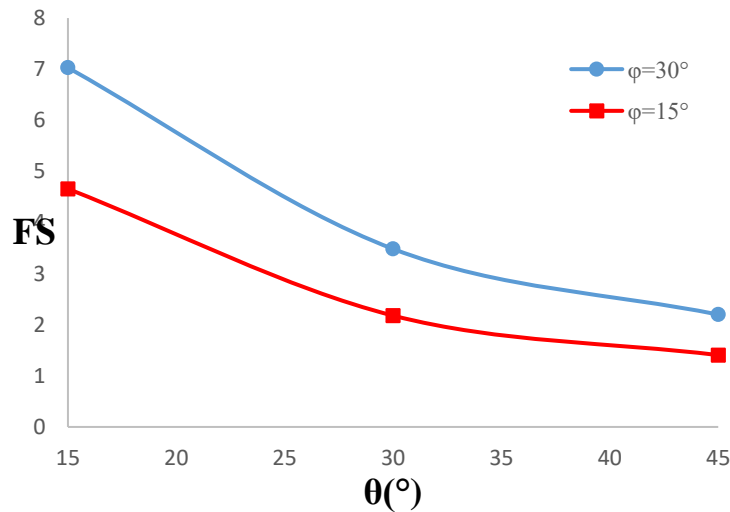
1. Πεπερασμένο πρανές χωρίς την παρουσία νερού υπό στατικές συνθήκες

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει παρουσία νερού και σεισμικής διέγερσης κρίθηκε απαραίτητο να διερευνηθεί η επιρροή της αύξησης του ύψους του πρανούς αλλά και η αύξηση της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής, έτσι ώστε να ερμηνευτούν οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας αλλά και να κατανοηθεί η επίδραση στην ευστάθεια των πεπερασμένων αυτών πρανών. Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα όπου απεικονίζεται ο συντελεστής ασφαλείας με διαδοχική αύξηση του ύψους του πρανούς. Επιπλέον, παρουσιάζεται η περίπτωση οπου έχουμε αμμώδη υλικό με συνοχή ίση με το μηδέν με γωνία εσωτερικής τριβής 15° και 30° και τέλος η περίπτωση με αργιλικό εδαφικό πρανές με γωνία εσωτερικής τριβής 15° και 30° .

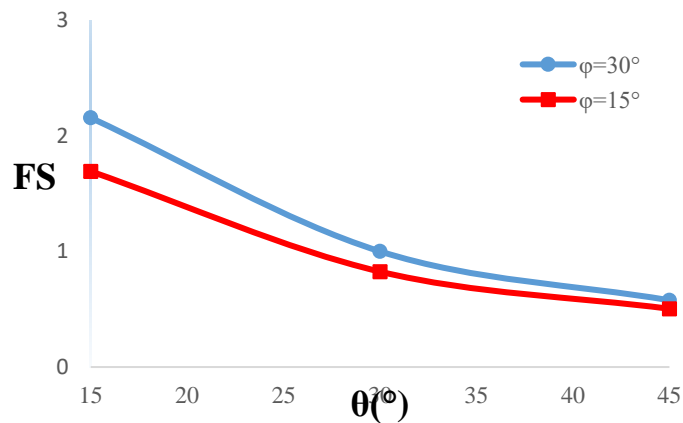


Εικόνα 3.35: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $c=0 \text{ kPa}$, $\phi=30^\circ$ σε διάφορα ύψη.

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας δεν επηρεάζεται από το ύψος του εδαφικού πρανούς, αυτό φαίνεται και από την αρχική εξίσωση για μη συνεκτικά υλικά που εξαρτάται από τη συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής μόνο (για $c=0 \text{ kPa}$).



Εικόνα 3.36: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $c=20$ kPa, σε διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής.



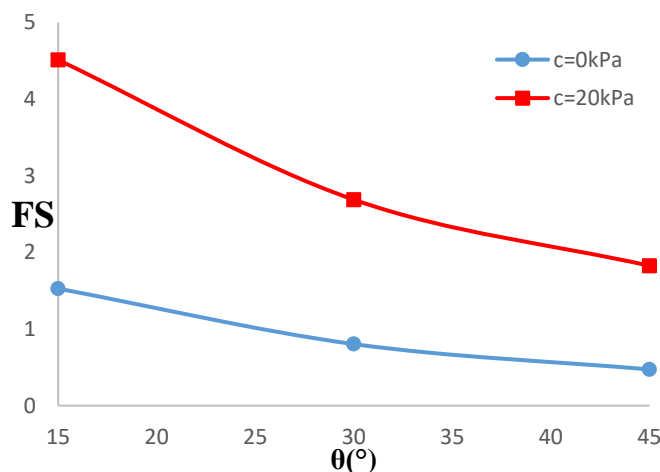
Εικόνα 3.37: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $c=0$ kPa, σε διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής.

Στα παραπάνω γραφήματα για ξηρό πρανές χωρίς σεισμική διέγερση παρατηρήθηκε ότι, όσο αυξάνεται η κλίση της τριβής τόσο αυξάνεται και ο συντελεστής ασφαλείας, αλλά με την αύξηση της κλίσης της εδαφικής μάζας ο συντελεστής παίρνει μικρότερες τιμές με αποτέλεσμα την αστοχία του πρανούς. Με την αύξηση του ύψους του πρανούς σε αμμώδη εδάφη ο συντελεστής ασφαλείας παραμένει ο ίδιος.

2. Πεπερασμένο πρανές χωρίς την παρουσία νερού υπό ψευδοστατικές συνθήκες

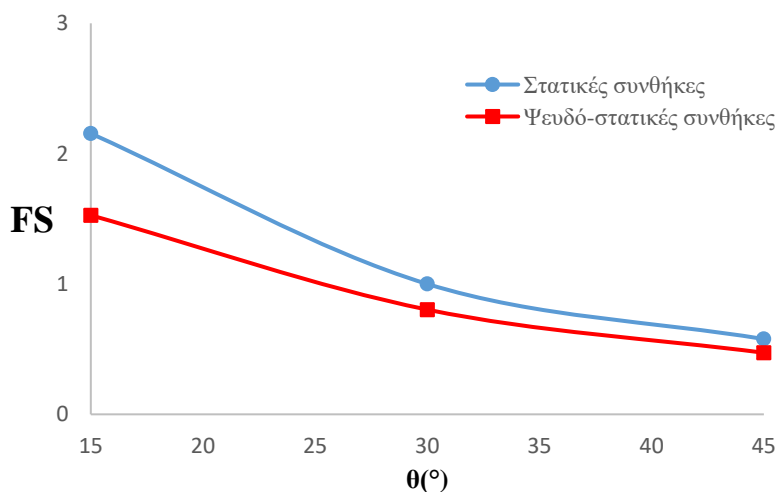
Στην περίπτωση αυτή που εξετάζονται ψευδοστατικές συνθήκες, εισάγεται μία νέα μεταβλητή, ο σεισμικός συντελεστής, παρουσιάζοντας διαγράμματα που απεικονίζουν την επίπτωση της αλλαγής του ύψους του πρανούς στον συντελεστή ασφαλείας, ενώ διατηρείται η συνοχή και η

γωνία εσωτερικής τριβής σταθερή, ενώ προστίθεται ο σεισμικός συντελεστής. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της περίπτωσης όπου η συνοχή και ο σεισμικός συντελεστής παραμένουν σταθεροί, αλλά η γωνία εσωτερικής τριβής μεταβάλλεται.



Εικόνα 3.38: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πεπερασμένο πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες, με $\phi=30^\circ$, σε διάφορες τιμές συνοχής.

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρήθηκε ότι για μεγαλύτερη συνοχή υλικού έχουμε μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή ασφαλείας αλλά ο σεισμικός συντελεστής μειώνει αρκετά την ευστάθεια του πρανούς. Επομένως, συγκριτικά οι στατικές συνθήκες έχουμε μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας από ότι οι ψευδοστατικές συνθήκες, αυτή η σύγκριση παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα.

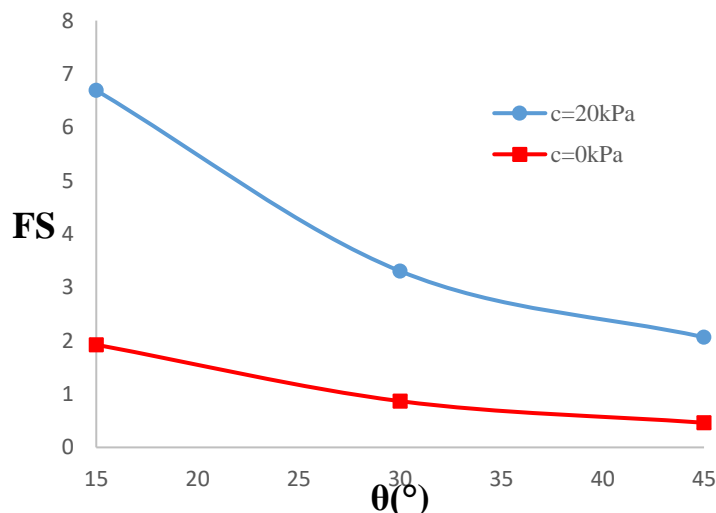


Εικόνα 3.39: Σύγκριση στατικών συνθηκών με ψευδο-στατικών συνθηκών σε αμμώδη εδάφη $c=0kPa$, $\phi=30^\circ$.

3. Πεπερασμένο πρανές με ροή νερού υπό στατικές συνθήκες.

Η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα αλλάζει τις αρχικές συνθήκες για την ευστάθεια ενός πρανούς. Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα αλλάζει αλλά οι δυνατοί συνδυασμοί για συνοχή,

γωνία εσωτερικής τριβής και ύψους παραμένουν ίδιοι (Πίνακας 3.3). Τα διαγράμματα παρουσιάζουν την μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας για συνεκτικά και μη συνεκτικά εδάφη. Επίσης, εξετάζεται η περίπτωση όπου η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής διατηρούνται σταθερά.

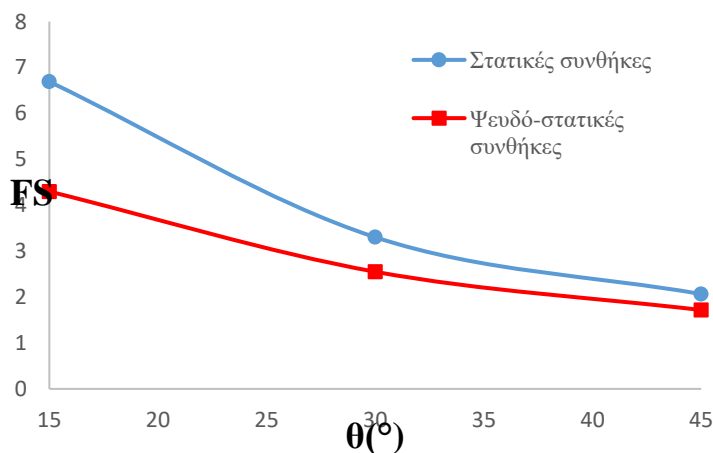


Εικόνα 3.40: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες με ροή νερού 10° ως προς το επίπεδο, ύψους $10m$, $\phi=30^\circ$.

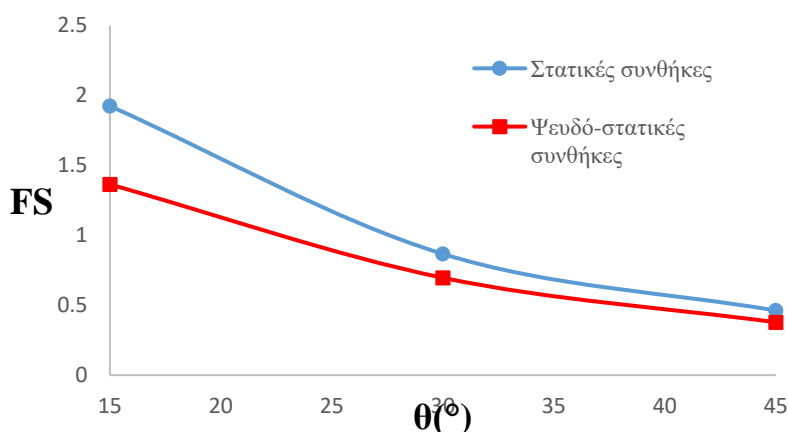
Η συνοχή του εδαφικού υλικού διακατέχει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια του πρανούς στο οποίο υπάρχει υδροφόρος ορίζοντας. Επομένως, από τα διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι για μικρότερη συνοχή το εδαφικό υλικό βρίσκεται σε οριακή ισορροπία αλλά με την αύξηση της κλίσης του πρανούς διαπερνά την οριακή ισορροπία και αστοχεί.

4. Πεπερασμένο πρανές με ροή υπό ψευδοστατικές συνθήκες

Η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα αλλάζει τις αρχικές συνθήκες για την ευστάθεια ενός πρανούς όπως έχει προαναφερθεί. Οι νέες τιμές που εισάγονται στις εξισώσεις είναι η στάθμη του νερού με μεταβλητή το z_w , και τον σεισμικό συντελεστή k_h . Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα αλλάζει αλλά οι δυνατοί συνδυασμοί για συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής και ύψους παραμένουν ίδιοι (Πίνακας 3.3). Στις αναλύσεις οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν ήταν με σεισμικό συντελεστή ίσο με 0.1. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν την μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας για τα διαφορετικά βάθη της στάθμης του νερού και την επίδραση μίας σεισμικής διέγερσης.



Εικόνα 3.41: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες, με ροή νερού, με $c=20 \text{ kPa}$, $\phi=30^\circ$.

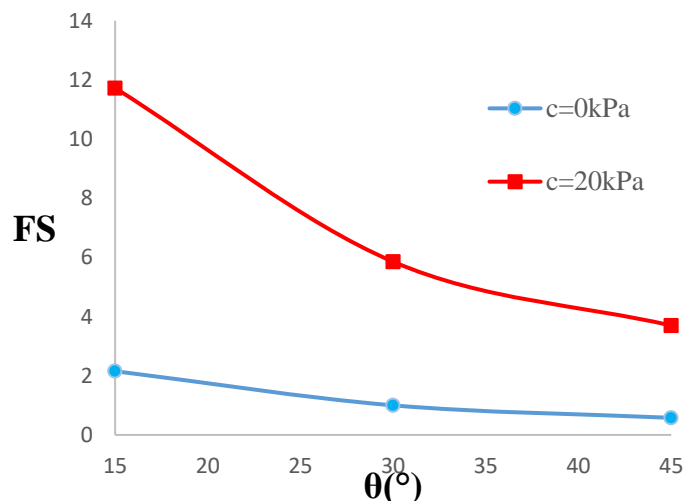


Εικόνα 3.42: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες, με ροή νερού, με $c=0 \text{ kPa}$, $\phi=30^\circ$.

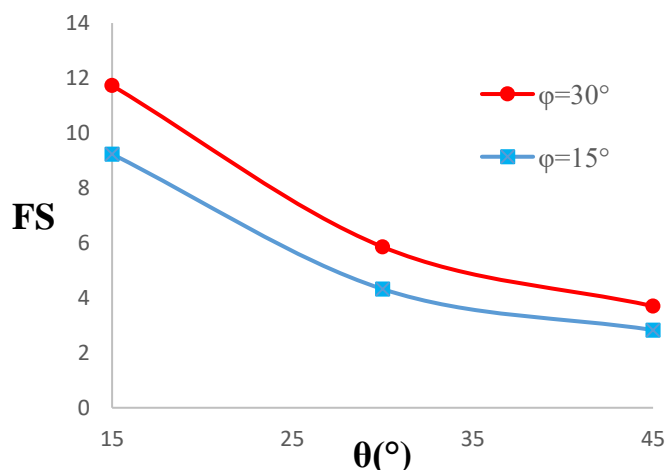
Στις Εικόνες 3.41 και 3.42 απεικονίζονται τα διαγράμματα του συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της κλίσης του πρανούς. Σε αυτά γίνεται η σύγκριση μεταξύ στατικών και ψευδο-στατικών συνθηκών, και ο συντελεστής ασφαλείας είναι σαφώς μικρότερος στις ψευδοστατικές συνθήκες. Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρήθηκε ότι για μεγαλύτερη συνοχή υλικού έχουμε μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή ασφαλείας αλλά ο σεισμικός συντελεστής συνεπιδρώντας με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μειώνει αρκετά την ευστάθεια του πρανούς καθώς διαπερνά την οριακή τιμή της μονάδας και το καθιστά ασταθές. όπως διαπιστώνεται σε όλες τις γραφικές παραστάσεις όσο αυξάνεται η κλίση του πρανούς, τόσο μειώνεται και ο συντελεστής ασφαλείας.

5. Πεπερασμένο πρανές βυθισμένο σε νερό υπό στατικές συνθήκες

Σε αυτήν την περίπτωση μελέτης παρατηρούμε την επίδραση του βάρους του νερού σε όλη την μάζα του πρανούς, ενώ επιδρά στο πρανές η δύναμη της άνωσης. Θεωρητικά γνωρίζοντας ότι το νερό επιδρά αρνητικά στον συντελεστή ασφαλείας, ο υδροφόρος ορίζοντας σχηματικά θεωρήθηκε πάνω από την μάζα του πρανούς, επομένως η επίδραση της άνωσης συνυπολογίστηκε στις εξισώσεις. Σε αυτό το σημείο είναι κρίσιμο να αναφερθεί πώς το νερό έχει ευεργετικές ή αρνητικές επιπτώσεις ανάλογα τις συνθήκες που επικρατούν.

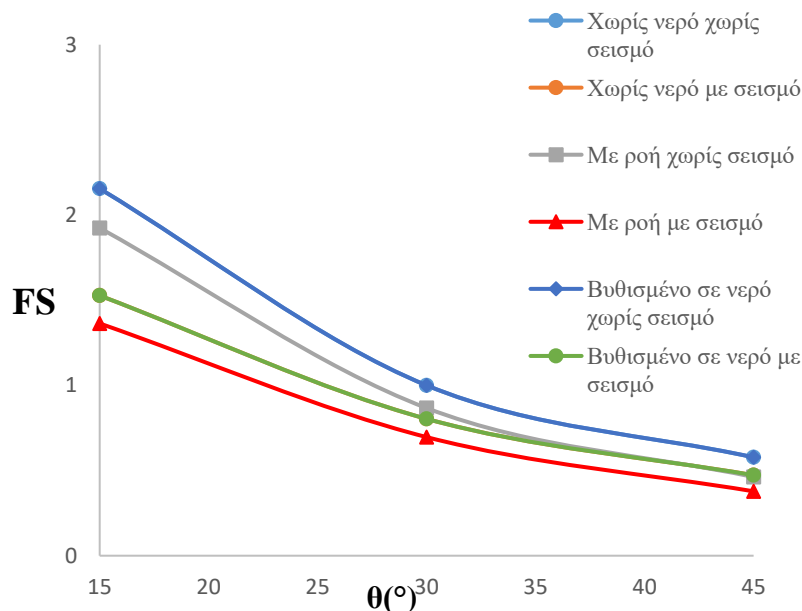


Εικόνα 3.43: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $z=10\text{m}$, $\varphi=30^\circ$.

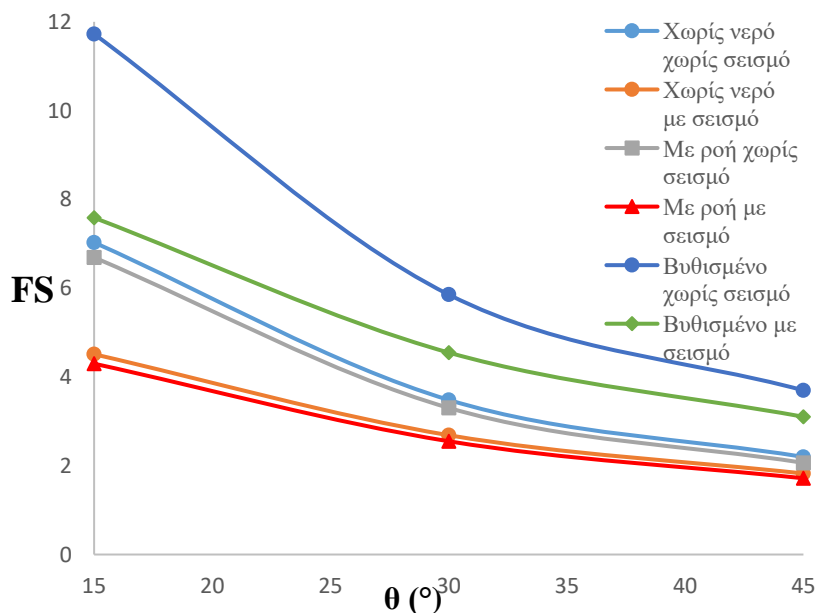


Εικόνα 3.44: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $z=10\text{m}$, $c=20\text{kPa}$.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις κάθε περίπτωσης συγκεντρωτικά για την πλήρη απεικόνιση τους και την διεξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων. Να τονιστεί ότι στην καμπύλη χωρίς νερό χωρίς σεισμό ταυτίζεται με την καμπύλη βυθισμένο σε νερό χωρίς σεισμό. Όπως και η καμπύλη χωρίς νερό με σεισμό ταυτίζεται με την καμπύλη βυθισμένο σε νερό με σεισμό, διότι οι εξισώσεις ταυτίζονται. Παρατηρήθηκε ότι οι δυσμενέστερες περιπτώσεις αφορούσαν τον συνδυασμό πολλών παραγόντων αλλά κυρίως της ψευδοστατικής κατάστασης με την επιρροή υπόγειου νερού. Ενώ, οι ευνοϊκότερες περιπτώσεις αποδείχτηκαν, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι είναι εκείνες που δεν χαρακτηρίζονται από σεισμικές διεγέρσεις και επιρροή νερού.



Εικόνα 3.45: Συντελεστής ασφαλείας για όλες τις αναλυόμενες περιπτώσεις για αμμώδη εδάφη, $z=10m$, $\varphi=30^{\circ}$.



Εικόνα 3.46: Συντελεστής ασφαλείας για όλες τις αναλυόμενες περιπτώσεις για αργιλικά εδάφη, $z=10m$, $\varphi=30^{\circ}$.

3.3. Συμπεράσματα Αναλυτικής μεθόδου

Συμπερασματικά, από τις αναλυτικές επιλύσεις εξήχθησαν αξιοσημείωτα αποτελέσματα, ελαχιστοποιώντας τα πειραματικά λάθη, είναι κρίσιμο στην αποφυγή αστοχιών και κατολισθήσεων, να υπάρχει ακρίβεια. Κύριος παράγοντας όπως μελετήθηκε και θεωρητικά στο δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί η γεωμετρία του πρανούς, γεγονός που αποδείχτηκε ακράδαντα στα αποτελέσματα των αναλυτικών εξισώσεων. Ο συντελεστής ασφαλείας

σημείωσε πτώση στις περιπτώσεις όπου η γωνία κλίσης και το ύψος του πρανούς αυξανόταν. Μία ακόμη παρατήρηση, είναι στα μη συνεκτικά υλικά, όπως η άμμος που μελετήθηκε, ο συντελεστής δεν επηρεάζεται από το ύψος, όμως επηρεάζεται από την γωνία εσωτερικής τριβής και την κλίση του πρανούς.

Στις αναλύσεις όπου λήφθηκε υπόψη η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, παρουσιάστηκε αρνητική επιρροή στην ευστάθεια του πρανούς με αποτέλεσμα μείωση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας. Με τη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων παρατηρείται άμεση επιρροή στον συντελεστή ασφαλείας. Με αύξηση της συνοχής αλλά και της γωνίας εσωτερικής τριβής παρατηρείται αύξηση και στον συντελεστή ασφαλείας. Στις περιπτώσεις ψευδο-στατικής ανάλυσης με την εισαγωγή του σεισμικού συντελεστή παρατηρήθηκε μεγάλη μείωση του συντελεστή ασφαλείας και με τον συνδυασμό της ροής του νερού ο συντελεστής των αναλύσεων αποδείχτηκε μικρότερος από την μονάδα, δηλώνοντας αστοχία και πιθανές κατολισθήσεις. Τέλος, στην περίπτωση που έχουμε βυθισμένο σε νερό πρανές είτε απειρομήκες είτε πεπερασμένο αποδείχτηκε με τις αναλυτικές εξισώσεις, ότι σε μη συνεκτικά εδάφη έχουμε ίδιες τιμές συντελεστή όπως στις περιπτώσεις αναλύσεων σε στατικές συνθήκες χωρίς την παρουσία νερού και σεισμού, ενώ σε συνεκτικά εδάφη έχουμε θετική επίδραση στον συντελεστή ασφαλείας, δηλαδή την αύξηση του συγκριτικά με τις περιπτώσεις χωρίς την παρουσία νερού. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συγκεντρωτικοί πίνακες της αναλυτικής μεθόδου του συντελεστή ασφαλείας για απειρομήκες και πεπερασμένο πρανές για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Πίνακας 3.6: Αναλυτική μέθοδος σε απειρομήκες πρανές.

| θ | ΑΜΜΟΣ ($c=0$ kPa) | | | | | |
|----------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| | FS Χωρίς νερό + χωρίς Σεισμό | FS Χωρίς Νερό + με Σεισμό | FS Με Ροή + χωρίς Σεισμό | FS Με Ροή + με Σεισμό | FS Με νερό + Χωρίς σεισμό | FS Με νερό + Με σεισμό |
| 5 | 6.60 | 3.05 | 3.30 | 1.53 | 6.60 | 3.05 |
| 30 | 1.00 | 0.80 | 0.50 | 0.40 | 1.00 | 0.80 |
| 60 | 0.33 | 0.26 | 0.17 | 0.13 | 0.33 | 0.26 |
| θ | ΑΡΓΙΛΟΣ ($c=20$ kPa) | | | | | |
| | FS Χωρίς νερό + χωρίς Σεισμό | FS Χωρίς Νερό + με Σεισμό | FS Με Ροή + χωρίς Σεισμό | FS Με Ροή + με Σεισμό | FS Με νερό + Χωρίς σεισμό | FS Με νερό + Με σεισμό |
| 5 | 7.75 | 4.45 | 3.59 | 2.06 | 8.90 | 4.13 |
| 30 | 1.23 | 0.73 | 1.00 | 0.60 | 1.46 | 1.20 |
| 60 | 0.56 | 0.40 | 0.48 | 0.35 | 0.80 | 0.70 |

Πίνακας 3.7: Αναλυτική μέθοδος σε πεπερασμένο πρανές.

| β | ΑΜΜΟΣ ($c=0$ kPa) | | | | | |
|---------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| | FS Χωρίς νερό + χωρίς Σεισμό | FS Χωρίς Νερό + με Σεισμό | FS Με Ροή + χωρίς Σεισμό | FS Με Ροή + με Σεισμό | FS Με νερό + Χωρίς σεισμό | FS Με νερό + Με σεισμό |
| 15 | 2.15 | 1.53 | 1.924 | 1.363 | 2.15 | 1.53 |
| 30 | 1.00 | 0.80 | 0.867 | 0.696 | 1.00 | 0.80 |
| 45 | 0.58 | 0.47 | 0.462 | 0.378 | 0.58 | 0.47 |
| β | ΑΡΓΙΛΟΣ ($c=20$ kPa) | | | | | |
| | FS Χωρίς νερό + χωρίς Σεισμό | FS Χωρίς Νερό + με Σεισμό | FS Με Ροή + χωρίς Σεισμό | FS Με Ροή + με Σεισμό | FS Με νερό + Χωρίς σεισμό | FS Με νερό + Με σεισμό |
| 15 | 7.03 | 4.51 | 6.69 | 4.30 | 11.73 | 7.59 |
| 30 | 3.48 | 2.69 | 3.30 | 2.55 | 5.86 | 4.55 |
| 45 | 2.20 | 1.83 | 2.07 | 1.72 | 3.70 | 3.10 |

Αριθμητική Προσομοίωση

4.1. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Μία ακόμη ευρέως γνωστή μέθοδος εκτίμησης της ευστάθειας εδαφικών πρηνών είναι αυτή των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method). Σε αυτή την ανάλυση το πρηνές προσομοιώνεται ως ένα σύνολο διασυνδεδεμένων στοιχείων και επιλύονται οι εξισώσεις κίνησης και ισορροπίας για κάθε στοιχείο. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά του εδάφους. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για αναλύσεις σταθερότητας και παραμορφώσεων. Αυτές οι αναλύσεις σταθερότητας και παραμορφώσεων επιλύονται με χρήση διαθέσιμων λογισμικών. Με τις επιλύσεις αυτών των παραμορφώσεων υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας. Στην συγκεκριμένη διπλωματική, για τη γεωτεχνική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων δισδιάστατης απεικόνισης PLAXIS 2D. Η FEM προσομοιώνει όλη την επιφάνεια του πρηνούς ως ενιαία και εξετάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ της δομής του και του εδαφικού υλικού.

Πρώτο στάδιο της μεθόδου είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του πρηνούς, δηλαδή το σχήμα και οι διαστάσεις του πρηνούς έτσι ώστε να έχουμε όσο πιο ρεαλιστική απεικόνιση του προβλήματος. Έπειτα, γίνεται διακριτοποίηση των στοιχείων σε μικρότερα κομμάτια πιο αντιπροσωπευτικά για την κάθε ανάλυση. Γίνεται η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, συνήθως σε τριγωνική μορφή, αλλά αυτό εξαρτάται από την ακρίβεια που χρειαζόμαστε ή τις απαιτήσεις της ανάλυσης. Στην συνέχεια καθορίζονται, έπειτα από εργαστηριακές μελέτες, οι ιδιότητες των εδαφικών υλικών, οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους η συνεκτικότητα αλλά και η γωνία εσωτερικής τριβής. Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των οριακών συνθηκών, δηλαδή τα σταθερά όρια της γεωμετρίας του πρηνούς, και προσδιορίζονται τα φορτία καταπόνησης, όπως η βαρύτητα, οι πιέσεις των πόρων λόγω υδροφόρου ορίζοντα, οι βροχοπτώσεις αλλά και οι σεισμικές φορτίσεις που ασκούνται στα εδαφικά πρηνή. Τέλος, πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων με αριθμητική μέθοδο και προσδιορίζονται οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις. Με βάση της μετατοπίσεις υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας. Στις αναλύσεις ευστάθειας εδαφικών πρηνών χρησιμοποιείται κυρίως το κριτήριο θραύσης Mohr-Coulomb ή άλλα εξειδικευμένα μοντέλα που περιγράφουν την συμπεριφορά αστοχίας. Η μέθοδος επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία συντίθεται από τρία στάδια, την προ επεξεργασία, την ανάλυση και την μετά-επεξεργασία:

Προ-επεξεργασία: Σε αυτό το στάδιο επίλυσης γίνεται η εισαγωγή της γεωμετρίας του μοντέλου των ιδιοτήτων των υλικών που απαιτούνται, η διακριτοποίηση των στοιχείων της κατασκευής καθώς γίνεται και η εισαγωγή δυναμικών ή άλλων φορτίσεων. Αρχικά, γίνεται ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του προσομοιώματος και έπειτα γίνεται η διακριτοποίηση της, με την

δημιουργία πλέγματος επιλέγοντας το πλήθος των γεωμετρικών στοιχείων (πεπερασμένα στοιχεία) που περιγράφει καλύτερα το προσομοίωμα.

Ανάλυση: Στο επόμενο στάδιο γίνεται ο υπολογισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων του σταδίου της προ-επεξεργασίας, δηλαδή της γεωμετρίας που κατασκευάστηκε με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Μετά-επεξεργασία: Σε αυτό το στάδιο αποτυπώνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, με γραφικές παραστάσεις εικόνες και σκίτσα με διαφορετικά χρώματα τάσεων, παραμορφώσεων και δυνάμεων

4.2. Λογισμικό Plaxis 2D

Οι αναλύσεις της διπλωματικής εργασίας έγιναν με το λογισμικό Plaxis 2D V.20. Το λογισμικό PLAXIS 2D βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιείται στην γεωτεχνική μηχανική, για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των εδαφικών μαζών σε διάφορες συνθήκες (στατική και δυναμική φόρτιση). Γίνεται προσομοίωση της παραμόρφωσης του εδάφους, καθώς μπορούν να προσομοιωθούν υποδομές όπως σήραγγες, θεμέλια επιχώματα, τοίχοι αντιστήριξης. Το λογισμικό μπορεί να καθορίσει τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τις οριακές συνθήκες και προσομοιώσεις βροχοπτώσεων αλλά και σεισμών. Η μέθοδος επίλυσης ενός προβλήματος γίνεται σε τέσσερα στάδια:

- i. Input: Δημιουργείται η γεωμετρία της κατασκευής που τίθεται προς μελέτη σε σχεδιαστικό παράθυρο.
- ii. Calculation: Εισάγονται τα απαιτούμενα δεδομένα για την επίλυση και γίνεται διακριτοποίηση της κατασκευής σε τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία.
- iii. Output: Εδώ εμφανίζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης
- iv. Curves: Εμφανίζονται διαγράμματα

Η εύρεση του συντελεστή ασφάλειας των πρανών που εξετάστηκαν γίνεται με την μέθοδο Phi-c Reduction-Safety, όπου η αντοχή του εδάφους μειώνεται σταδιακά και όταν συμβαίνει αστοχία ο αντίστοιχος συντελεστής μείωσης αντοχής μπορεί να θεωρηθεί παράγοντας ασφάλειας στην αντοχή του εδάφους.

4.3. Προσομοίωση πεπερασμένου πρανούς

Η συμπεριφορά των εδαφικών μαζών προσεγγίζεται με το Κριτήριο Mohr-Coulomb διότι προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά αστοχίας του εδαφικού πρανούς.

Οι παράμετροι κριτηρίου Mohr-Coulomb:

- Μέτρο ελαστικότητας Young (E)
- Λόγος Poisson (ν)
- Συνοχή (c)
- Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ)
- Γωνία διασταλτικότητας (ψ)

Η αριθμητική μελέτη έγινε σε πρανή υπό στατικές συνθήκες και υπό ψευδοστατικές συνθήκες με διάφορα ύψη και κλίσεις, με ροή νερού αλλά και βυθισμένα σε νερό. Αρχικά,

προσδιορίζεται η γεωμετρία του μοντέλου του πρανούς στο παράθυρο εισαγωγής δεδομένων, οι ιδιότητες της εδαφικής στρώσης, οι οριακές συνθήκες και έπειτα γίνεται η διακριτοποίηση των στοιχείων του μοντέλου (δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων). Σε επόμενο στάδιο προστίθενται οι παραπάνω πληροφορίες για τις αρχικές συνθήκες του πρανούς, δηλαδή για τον υδροφόρο ορίζοντα αλλά και οι ψευδο-στατικοί συντελεστές στις περιπτώσεις που μελετώνται οι σεισμικές διεγέρσεις. Ακολουθώντας, λαμβάνουν χώρα οι υπολογισμοί οι οποίοι χωρίζονται σε φάσεις υπολογισμού αναλόγως την περίπτωση (στατική, ψευδοστατική). Ολοκληρώνοντας τους υπολογισμούς εξάγεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας αλλά και πολύτιμα διαγράμματα με τις επιφάνειες που αστοχούν αλλά και το τρόπο που μετακινείται η εδαφική μάζα. Στη συγκεκριμένη μελέτη των χερσαίων και υποθαλάσσιων εδαφικών πρανών δημιουργήθηκαν τέσσερα μοντέλα προσομοίωσης. Όσον αφορά την γεωμετρία των μοντέλων οι γωνίες κλίσης που μελετήθηκαν ήταν 15° 30° 45° ενώ το ύψος του πρανούς ήταν 10 μέτρα. Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν εμφανίζονται στους παρακάτω πίνακες 4.1 και 4.2.

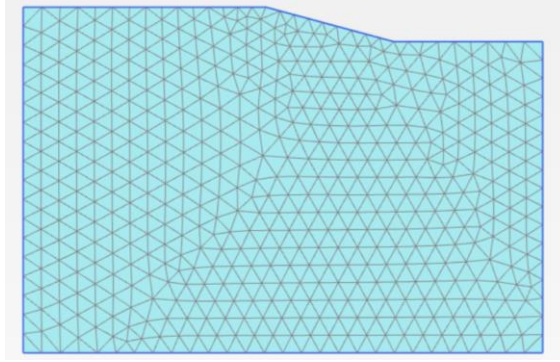
Πίνακας 4.1 Δεδομένα προσομοιώσεων στο Plaxis

| Μοντέλο | C Συνοχή (kPa) | Φ Γωνία Εσωτερικής Τριβής (deg) | Material Model | Material Type | γ_{unsat} [kN/m ³] | γ_{sat} [kN/m ³] |
|---------|----------------------|---|-------------------|------------------|--|--|
| 1 | 0 | 15 | Mohr-Coulomb | Drained | 17 | 20 |
| 2 | 0 | 30 | Mohr-Coulomb | Drained | 17 | 20 |
| 3 | 20 | 15 | Mohr-Coulomb | Drained | 17 | 18 |
| 4 | 20 | 30 | Mohr-Coulomb | Drained | 17 | 18 |

Πίνακας 4.2 Δεδομένα προσομοιώσεων στο Plaxis

| Μοντέλο | k_x [m/day] | k_y [m/day] | E [kN/m ²] | ν | ψ [deg] |
|---------|------------------|------------------|---------------------------|-------|-----------------|
| 1 | 1 | 1 | 2000 | 0.3 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 2000 | 0.3 | 0 |
| 3 | 0.001 | 0.001 | 2000 | 0.35 | 0 |
| 4 | 0.001 | 0.001 | 2000 | 0.35 | 0 |

Το εδαφικό υλικό χαρακτηρίζεται από την συνοχή του εδάφους, την γωνία κλίσης του και το ειδικό βάρος του υλικού, τα οποία παίρνουν ίδιες τιμές με την αναλυτική μέθοδο. Για την υψηλή ακρίβεια των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά 15-κομβικά στοιχεία με μεγάλη πυκνότητα δικτύου. Για τις οριακές συνθήκες του προσομοιώματος επιλέχθηκε το μοντέλο να είναι σταθερό στην βάση του, αλλά να μπορεί να μετακινείται στον κατακόρυφο άξονα. Όσον αφορά τις διαστάσεις της γεωμετρίας του πρανούς επιλέχθηκε το ύψος της γεωμετρίας να είναι 100 μέτρα και το πλάτος να είναι 150 μέτρα. Το ύψος, η συνοχή και η γωνία τριβής του πρανούς αποτέλεσαν τις μεταβαλλόμενες παραμέτρους.



Εικόνα 4.1: Προσομοίωση γεωμετρίας μοντέλου με πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων.

Οι αρχικές συνθήκες είναι απαραίτητες για κάθε μελετώμενο μοντέλο, γι' αυτόν τον λόγο το ειδικό βάρος του νερού γ_w θεωρήθηκε ίσο με 10 kN/m^3 . Για τα ξηρά εδαφικά πρανή δεν υπάρχει ροή οπότε ο υδροφόρος ορίζοντας τοποθετήθηκε στα κάτω όρια του μοντέλου. Στην περίπτωση που υπάρχει ροή, ο υδροφόρος ορίζοντας σχηματίζει γωνία με το πρανές ίση με 10° με τις κατάλληλες συντεταγμένες. Για τα ένυδρα, βυθισμένα σε νερό εδαφικά πρανή, ο υδροφόρος ορίζοντας τοποθετήθηκε πάνω από την γεωμετρία του πρανούς, κατά μήκος της κλίσης του. Το πλέγμα επιλέχθηκε πολύ πυκνό για να υπάρχει μεγάλη ακρίβεια. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας των χερσαίων και υποθαλάσσιων εδαφικών πρανών, η διαδικασία επίλυσης χωρίστηκε σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση (Initial phase) εφαρμόζονται οι δυνάμεις βαρύτητας και οι τάσεις της. Ο συντελεστής βαρύτητας ΣM_{weight} παίρνει την τιμή 1, ενώ στην περίπτωση που μελετήθηκε η ψευδοστατική κατάσταση ο συντελεστής θεωρήθηκε ίσος με $k_h=0.1$. Ο υπολογισμός έγινε με πλαστική παραμόρφωση (Είναι σημαντικό να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι σε υλικά με συνοχή ίση με το μηδέν έπρεπε να αγνοηθεί η αστράγγιστη συμπεριφορά για πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Στη δεύτερη φάση υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας με τύπο υπολογισμού (calculation type: safety). Για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων και των διαγραμμάτων θεωρήθηκε σημείο αναφοράς ο πόδας του πρανούς.

4.4. Αποτελέσματα Πεπερασμένου Πρανούς

Δημιουργήθηκαν τα αριθμητικά προσομοιώματα με τις κατάλληλες παραμέτρους και έγινε ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας των πρανών. Οι μηχανικές ιδιότητες παρέμειναν αμετάβλητες έτσι ώστε να ερμηνευθεί η επίδραση της αλλαγής της κλίσης, στην ευστάθεια των προσομοιωμάτων σε στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες. Μελετήθηκαν και οι περιπτώσεις όπου η κλίση παραμένει ίδια και οι συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής μεταβάλλονται. Παρουσιάζονται οι επιφάνειες αστοχίας καθώς και οι γραφικές παραστάσεις του συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της γωνίας β του πρανούς με την αριθμητική μέθοδο ανάλυσης.

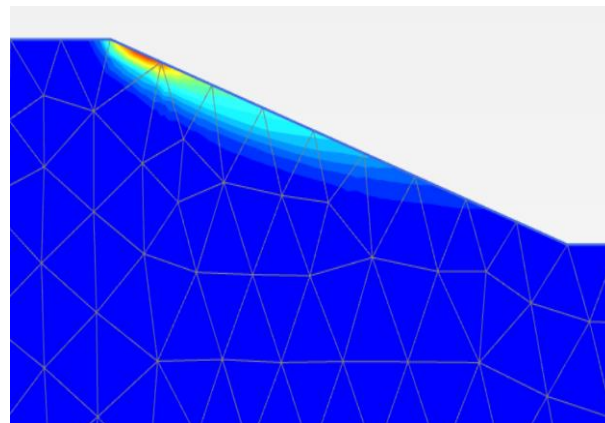
1. Πεπερασμένο πρανές χωρίς την παρουσία νερού υπό στατικές συνθήκες

Στην περίπτωση ξηρού πρανούς υπό στατικές συνθήκες μετά από τους υπολογισμούς έγινε γνωστός ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς σε ξηρές συνθήκες και χωρίς την επίδραση των σεισμικών συντελεστών. Στους παρακάτω πίνακες 4.2, 4.3, αναγράφονται οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας και στις παρακάτω εικόνες εμφανίζονται οι επιφάνειες αστοχίας των πρανών στις συγκεκριμένες συνθήκες ύψους 10 μέτρων με γωνίες πρανών 30° , 45° όταν οι μηχανικές ιδιότητες δεν μεταβάλλονται. Με τις συγκεκριμένες περιπτώσεις γίνεται εμφανής η επιρροή της κλίσης του

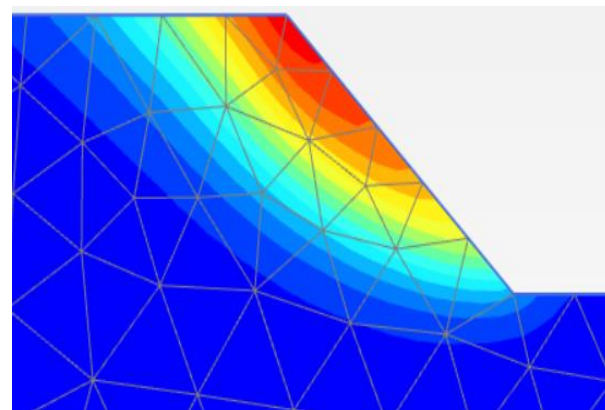
πρανούς στην σταθερότητα του πρανούς. Περιεκτικά παρουσιάζονται οι αστοχίες των πρανών ύψους 10 μέτρων και παρουσιάζονται τα γραφήματα του συντελεστή ασφαλείας για κατανοηθεί η συμπεριφορά ευστάθειας των αριθμητικών προσομοιωμάτων. Παρουσιάζονται οι εικόνες των προσομοιωμάτων με έμφαση στην επιφάνεια αστοχίας του πρανούς:

Πίνακας 4.3: Συντελεστής ασφαλείας για γωνία πρανούς β , ύψους $h=10m$.

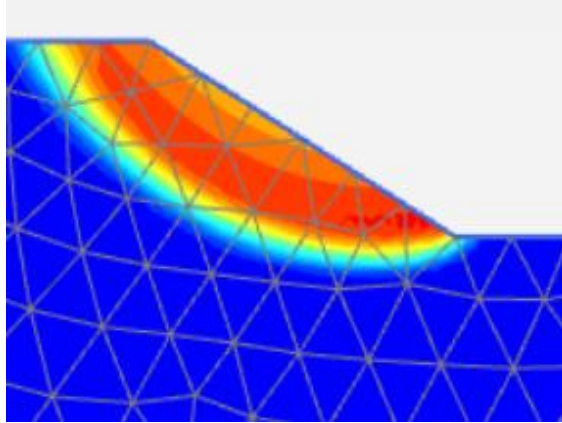
| | ΑΜΜΟΣ ($c=0$ kPa με $\varphi=30^\circ$) | ΑΡΓΙΛΟΣ ($c=20$ kPa με $\varphi=30^\circ$) |
|---------------------------------|---|--|
| Γωνία πρανούς (β) | Συντελεστής Ασφαλείας (FS) | Συντελεστής Ασφαλείας (FS) |
| 15 | 2.35 | 4.10 |
| 30 | 1.17 | 2.27 |
| 45 | 0.70 | 1.69 |



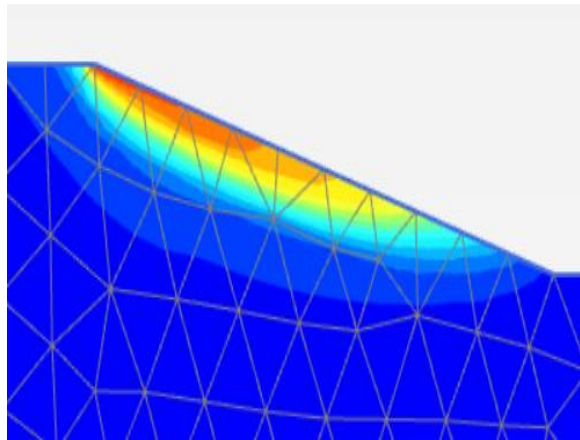
Εικόνα 4.2: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με συνοχή 0 kPa ύψος 10 m, $\beta= 30^\circ$, $\varphi=15^\circ$, FS=0.49.



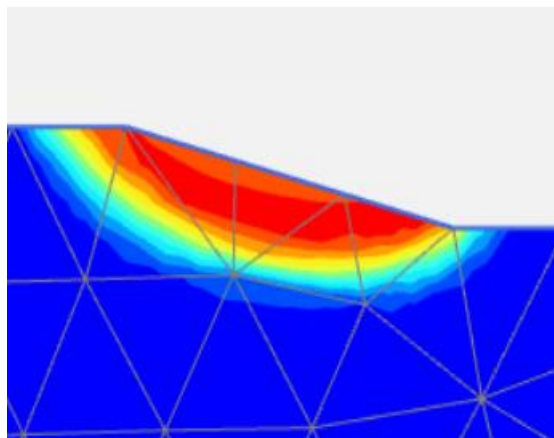
Εικόνα 4.3: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με $c=0$ kPa, $H=10$ m, $\beta=45^\circ$, $\varphi=15^\circ$, FS=0.291.



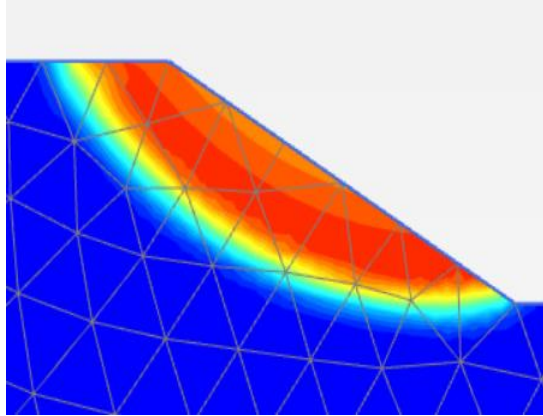
Εικόνα 4.4: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με $c=20 \text{ kPa}$, $H=10 \text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\varphi=15^\circ$, $FS=1.51$.



Εικόνα 4.5: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με $c=0 \text{ kPa}$, $H=10 \text{ m}$, $\beta=15^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $FS=2.35$.

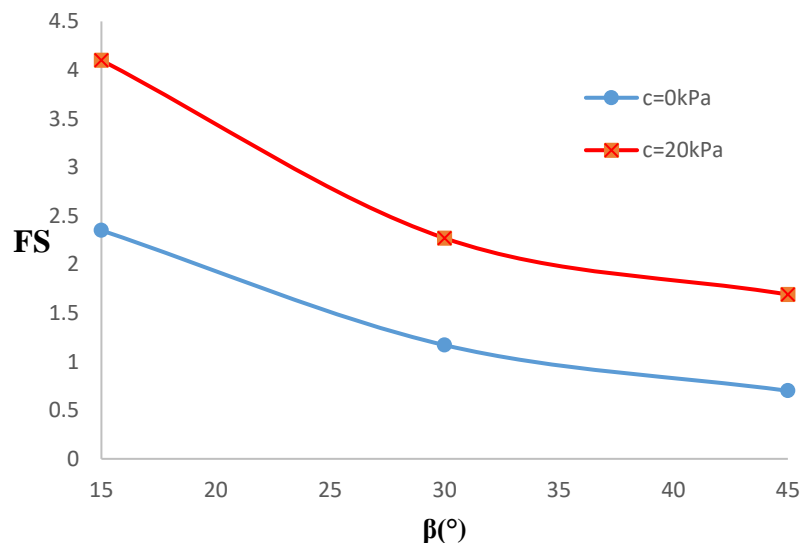


Εικόνα 4.6: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με $c=20 \text{ kPa}$, $H=10 \text{ m}$, $\beta=15^\circ$, $\varphi=15^\circ$, $FS=2.37$.

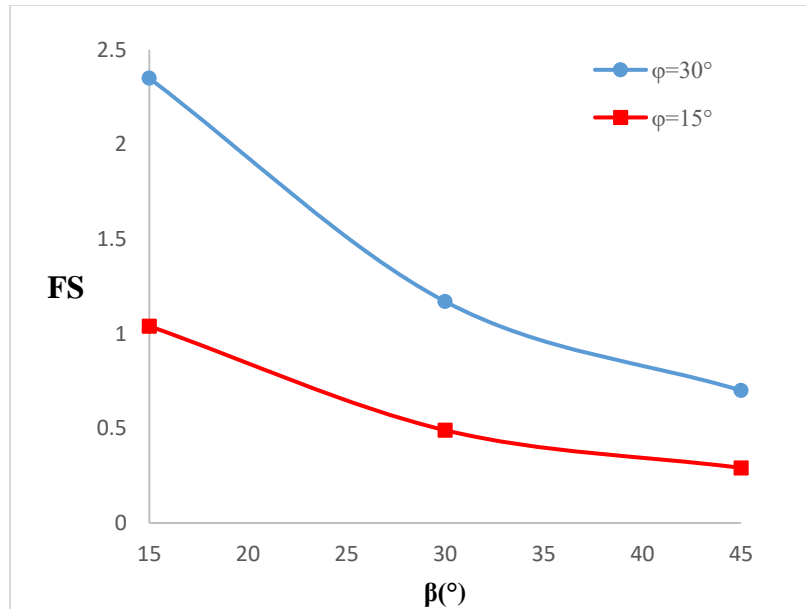


Εικόνα 4.7: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με $c=20 \text{ kPa}$, $H=10 \text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\phi=30^\circ$ $FS=2.27$.

Για τα παραπάνω προσομοιώματα υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας των πρανών ότι είναι 0.49, 0.29, 1.51, 2.35, 2.37, 2.27, αντίστοιχα. Για την προσέγγιση της αριθμητικής ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών αξιοσημείωτη ήταν η ανάγκη για διερεύνηση της περίπτωσης όπου οι μηχανικές ιδιότητες μεταβάλλονται αλλά το ύψος και η κλίση παραμένουν σταθερά. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα προσομοιώματα για σταθερή γωνία εσωτερικής τριβής και μεταβαλλόμενη συνοχή αλλά και το αντίστροφο. Το ύψος του πρανούς διατηρήθηκε στα 10 μέτρα ενώ η κλίση του 30° . Σε γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται οι μεταβολές του συντελεστή ασφαλείας σε κάθε περίπτωση συναρτήσει της γωνίας κλίσης του πρανούς, επομένως για σταθερό ύψος ερευνήθηκε η περίπτωση όπου η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής αυξάνονται, οπτικοποιώντας τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων.



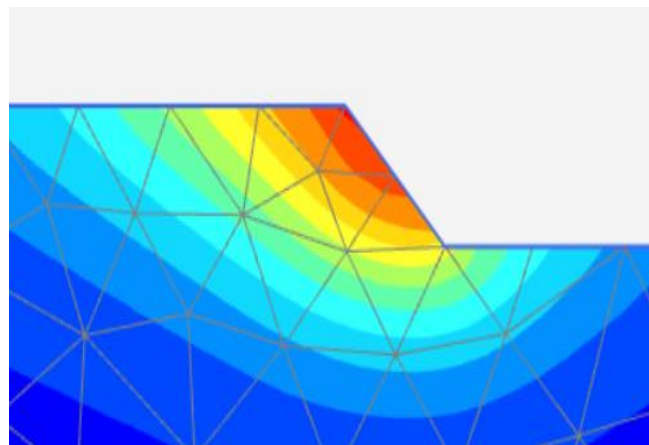
Εικόνα 4.8: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πεπερασμένο πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $\phi=30^\circ$.



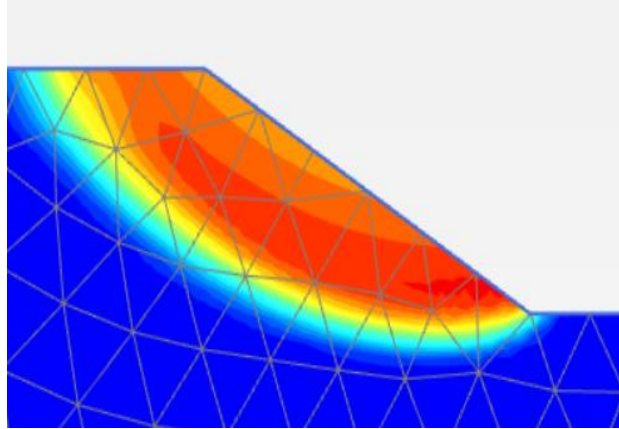
Εικόνα 4.9: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες, με $c=0kPa$.

2. Πεπερασμένο πρανές χωρίς την παρουσία νερού υπό ψευδοστατικές συνθήκες

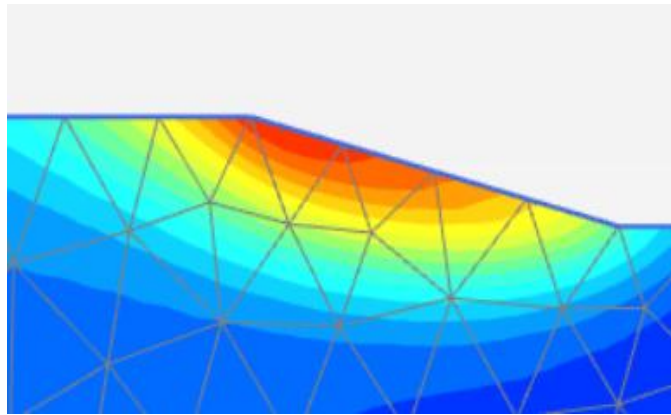
Στην περίπτωση ξηρού πρανούς υπό ψευδοστατικές συνθήκες μετά από τους υπολογισμούς έγινε γνωστός ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς σε ξηρές συνθήκες και με την επίδραση των σεισμικών συντελεστών, με τιμή συντελεστή ίσο με 0.1. Στις παρακάτω εικόνες 4.10, 4.11, εμφανίζονται οι επιφάνειες αστοχίας των πρανών στις συγκεκριμένες συνθήκες ύψους 10 μέτρων με γωνίες πρανών 15° , 30° , 45° όταν οι μηχανικές ιδιότητες δεν μεταβάλλονται. Με τις συγκεκριμένες περιπτώσεις γίνεται εμφανής η επιρροή της κλίσης του πρανούς στην σταθερότητα του πρανούς. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι αστοχίες των πρανών ύψους 10 μέτρων και παρουσιάζονται τα γραφήματα του συντελεστή ασφαλείας για κατανοηθεί η συμπεριφορά ευστάθειας των πρανών μέσω των αριθμητικών προσομοιωμάτων.



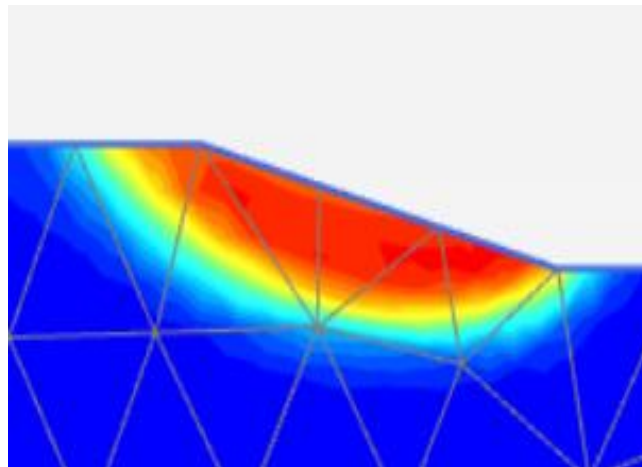
Εικόνα 4.10: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με σεισμική διέγερση με $kh=0.1$, $c=0 kPa$, $H=10 m$, $\beta=45^{\circ}$, $\phi=15^{\circ}$ $FS=0.27$.



Εικόνα 4.11 Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με σεισμική διέγερση με $kh=0.1$, $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=30^\circ$, $\varphi=15^\circ$ $FS=1.24$.



Εικόνα 4.12 Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με σεισμική διέγερση με $kh=0.1$, $c=0$ kPa, $H=10$ m, $\beta=15^\circ$, $\varphi=30^\circ$ $FS=1.72$.

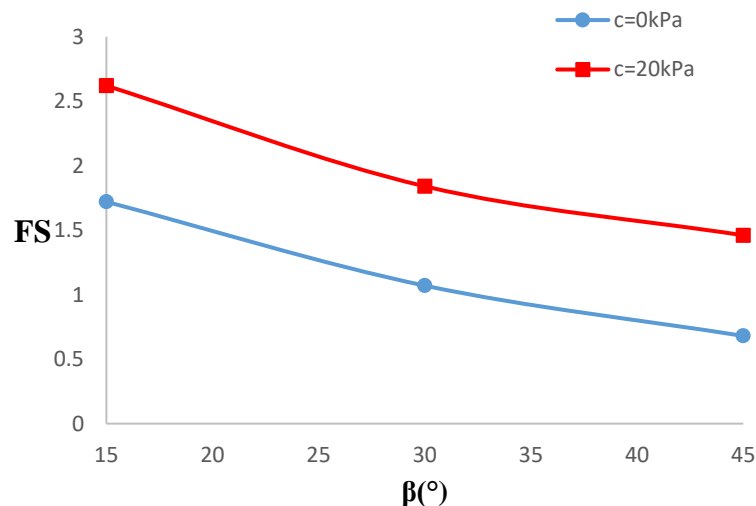


Εικόνα 4.13: Επιφάνεια αστοχίας ξηρού πρανούς με σεισμική διέγερση με $kh=0.1$, $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=15^\circ$, $\varphi=15^\circ$ $FS=1.6$.

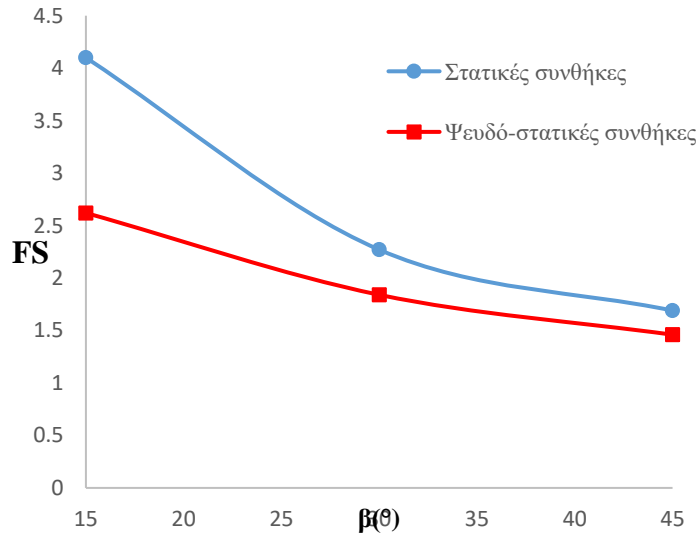
Πίνακας 4.4 :Συντελεστής ασφαλείας για γωνία πρανούς β , ύψους 10m.

| | ΑΜΜΟΣ ($c=0$ kPa με $\varphi=30^\circ$) | ΑΡΓΙΛΟΣ ($c=20$ kPa με $\varphi=30^\circ$) |
|---------------------------------|---|--|
| Γωνία πρανούς (β) | Συντελεστής Ασφαλείας (FS) | Συντελεστής Ασφαλείας (FS) |
| 15 | 1.72 | 2.62 |
| 30 | 1.07 | 1.84 |
| 45 | 0.68 | 1.46 |

Αναφορικά με την επίδραση σεισμικών φορτίων στην ευστάθεια των πρανών, παρατηρήθηκε ότι οι συντελεστές που υπολογίστηκαν ήταν σαφώς μικρότεροι από τις στατικές συνθήκες, ενώ η συμπεριφορά των μηχανικών ιδιοτήτων και της κλίσης ταυτίζεται με τις στατικές συνθήκες. Όπως είναι αναμενόμενο ο σεισμικός συντελεστής μειώνει αρκετά τον συντελεστή ασφαλείας σε όλες της εξεταζόμενες περιπτώσεις, όπως στις δύο περιπτώσεις συνοχής των υλικών αλλά και στις περιπτώσεις με την εσωτερική γωνία τριβής. Στην εικόνα 4.15 απεικονίζεται η απόκλιση μεταξύ στατικών και ψευδο-στατικών συνθηκών, η οποία σε μικρότερες κλίσεις εμφανίζει μεγαλύτερη μείωση του συντελεστή ασφάλειας.



Εικόνα 4.14 : Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες, $z=10m$, $\varphi=30^\circ$.



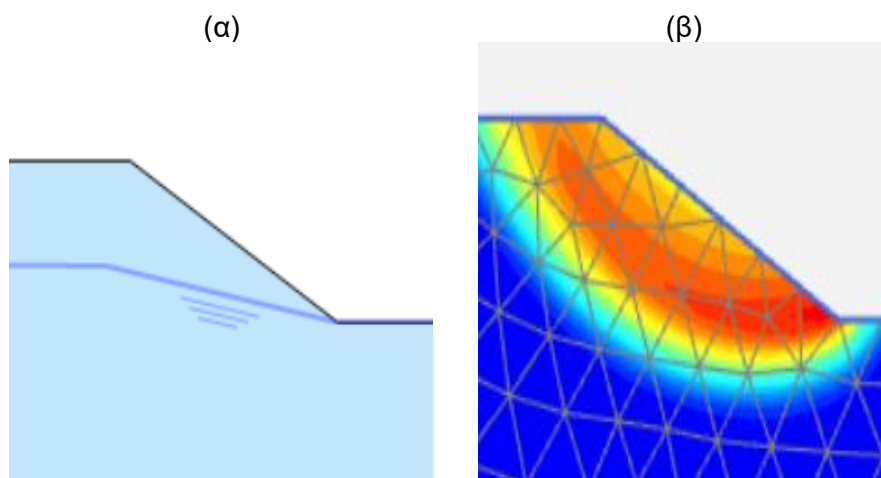
Εικόνα 4.15: Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρό πρανές υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες, $z=10m$, $c=20\text{ kPa}$, $\varphi=30^\circ$.

3. Πεπερασμένο πρανές με ροή νερού υπό στατικές συνθήκες

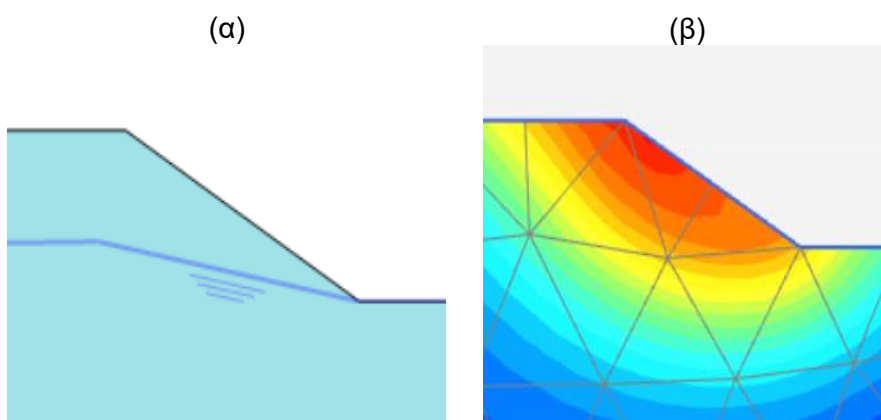
Σε αυτήν την περίπτωση εισάγεται η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, υπολογίζοντας έτσι την επιρροή του νερού στα ξηρά προσομοιώματα για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας. Η γωνία που σχηματίζει ο υδροφόρος ορίζοντας με το πρανές παίρνει τιμές 10° και 20° . Παρακάτω εμφανίζονται τα προσομοιώματα με την επιφάνεια αστοχίας, για πρανή ύψους 10 μέτρων με γωνία πρανούς ίση με 30° και με σταθερές μηχανικές ιδιότητες για αμμώδη και αργιλικά εδάφη. Παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για την πλήρη εικόνα των συντελεστών ασφαλείας για την περίπτωση που έχουμε ροή νερού. Οι γραφικές παραστάσεις διεξάγονται με την βοήθεια του λογισμικού Excel. Η εμφάνιση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής μεθόδου παρουσιάζεται σε γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν τον συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της γωνίας του υδροφόρου ορίζοντα δίνοντας έμφαση στην επίδραση του νερού.

Πίνακας 4.5 Συντελεστής ασφαλείας για γωνία πρανούς β , ύψους $h=10m$.

| | ΑΜΜΟΣ ($c=0\text{ kPa}$, $\varphi=15^\circ$, $\beta=30^\circ$) | ΑΡΓΙΛΟΣ ($c=20\text{ kPa}$, $\varphi=15^\circ$, $\beta=30^\circ$) |
|--------------------------------|---|--|
| Γωνία υδροφόρου ορίζοντα | Συντελεστής Ασφαλείας (FS) | Συντελεστής Ασφαλείας (FS) |
| 10° | 0.71 | 1.38 |



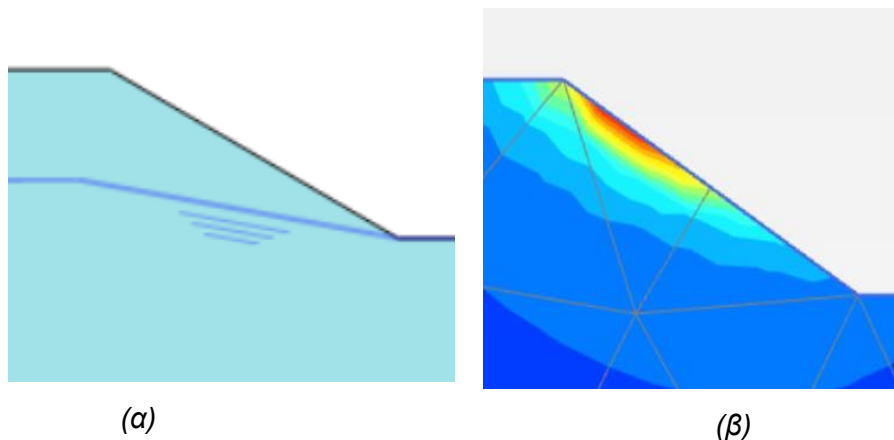
Εικόνα 4.16: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς με $c=20 \text{ kPa}$, $H=10 \text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\phi=15^\circ$, $FS=1.38$. β)Επιφάνειας αστοχίας υγρού πρανούς με $c=20 \text{ kPa}$, $H=10 \text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\phi=15^\circ$, $FS=1.38$.



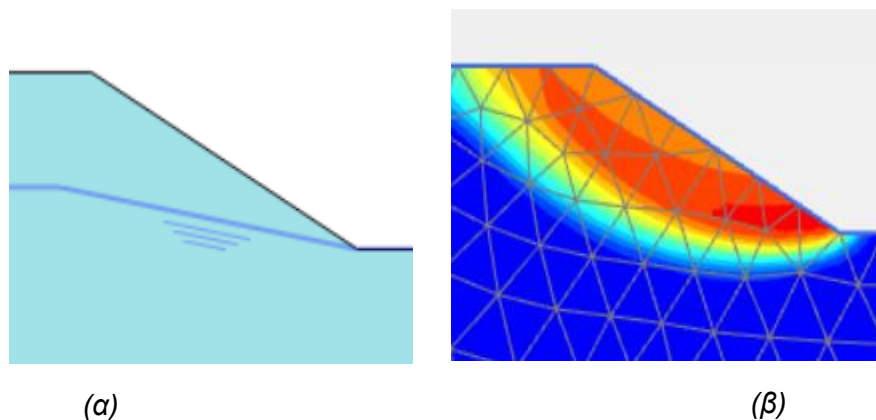
Εικόνα 4.17: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς με $c=0 \text{ kPa}$, $H=10 \text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\phi=15^\circ$, $FS=0.71$. β)Επιφάνειας αστοχίας υγρού πρανούς με $c=0 \text{ kPa}$, $H=10 \text{ m}$, $\beta=30^\circ$, $\phi=15^\circ$, $FS=0.71$.

4. Πεπερασμένο πρανές με ροή νερού υπό ψευδοστατικές συνθήκες

Σε αυτήν την περίπτωση εισάγεται η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, υπολογίζοντας έτσι την επιρροή του νερού στα ξηρά προσομοιώματα συνεπιδρώντας με τον σεισμικό συντελεστή που είναι ίσος με 0.1, για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας. Η γωνία που σχηματίζει ο υδροφόρος ορίζοντας με το πρανές παίρνει τιμές 10° και 20° . Παρακάτω εμφανίζονται τα προσομοιώματα με την επιφάνεια αστοχίας, για πρανή ύψους 10 μέτρων με γωνία πρανούς ίση με 30° και με σταθερές μηχανικές ιδιότητες για αμμώδη και αργιλικά εδάφη. Παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για την πλήρη εικόνα των συντελεστών ασφαλείας για την περίπτωση που έχουμε ροή νερού υπό ψευδοστατικές συνθήκες. Οι γραφικές παραστάσεις διεξάγονται με την βοήθεια του λογισμικού Excel.



Εικόνα 4.18: α) Γεωμετρία υγρού πρανούς με σεισμική διέγερση $kh=0.1$, με $c=0$ kPa, $H=10$ m, $\beta=30^\circ$, $\varphi=15^\circ$, $FS=0.41$. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς με σεισμική διέγερση $kh=0.1$, $c=0$ kPa, $H=10$ m, $\beta=30^\circ$, $\varphi=15^\circ$ $FS=0.41$



Εικόνα 4.19: α) Γεωμετρία υγρού πρανούς με σεισμική διέγερση $kh=0.1$, με $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=30^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $FS=1.68$. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς με σεισμική διέγερση $kh=0.1$, $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=30^\circ$, $\varphi=30^\circ$ $FS=1.68$.

Όσο αυξάνεται η συνοχή και η κλίση της τριβής τόσο αυξάνεται και ο συντελεστής ασφαλείας του εδαφικού προσομοιώματος, όμως με την συμβολή του νερού και του σεισμικού συντελεστή ο συντελεστής μειώνεται συγκριτικά με τις αρχικές συνθήκες της περίπτωσης 1. Με την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του προσομοιώματος παρατηρήθηκε εξαίρετη μείωση του συντελεστή καθώς η συν επίδραση όλων των παραγόντων, των μηχανικών ιδιοτήτων, του σεισμικού συντελεστή αλλά και της ροής του νερού αποδεικνύει και το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης.

5. Πεπερασμένο πρανές βυθισμένο σε νερό υπό στατικές συνθήκες

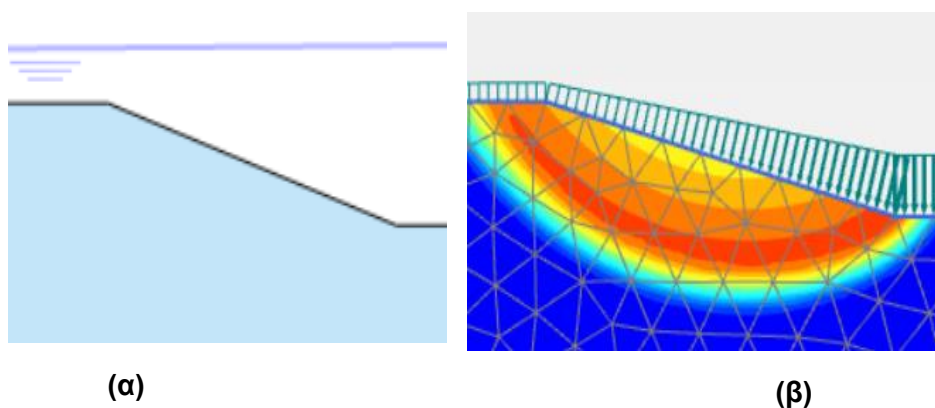
Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται πεπερασμένο πρανές βυθισμένο σε νερό, για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας τοποθετήθηκε ο υδροφόρος ορίζοντας πάνω από την γεωμετρία του πρανούς, έτσι ώστε να καλύπτει όλη την εξεταζόμενη περιοχή. Στην αριθμητική προσέγγιση της ανάλυσης της ευστάθειας πρανών με παρουσία νερού είναι σημαντική η διερεύνηση των

περιπτώσεων όπου η κλίση και το ύψος μένουν σταθερά και οι μηχανικές ιδιότητες μεταβάλλονται. Σε όλες τις αναλύσεις το ύψος του πρανούς είναι 10 μέτρα.

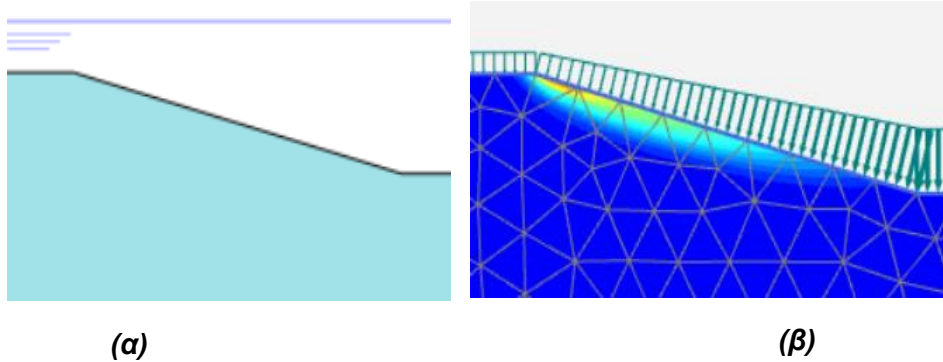
Πίνακας 4.6: Συντελεστής ασφαλείας για γωνία πρανούς β , ύψους $h=10m$.

| | ΑΜΜΟΣ ($c=0$ kPa, $\varphi=30^\circ$) | ΑΡΓΙΛΟΣ ($c=20$ kPa, $\varphi=30^\circ$) |
|---------------------------------|---|--|
| Γωνία πρανούς (β) | Συντελεστής Ασφαλείας (FS) | Συντελεστής Ασφαλείας (FS) |
| 15 | 2.44 | 4.64 |
| 30 | 1.21 | 2.85 |
| 45 | 0.75 | 2.25 |

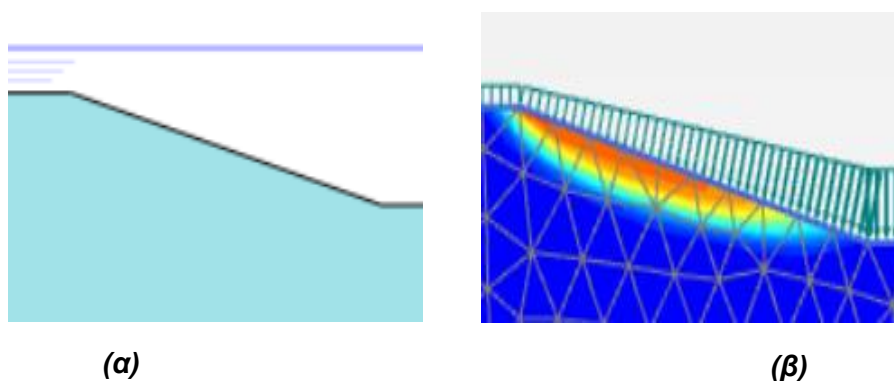
Στις παρακάτω εικόνες εμφανίζονται τέσσερις προσομοιώσεις με διαφορετικές περιπτώσεις παραμέτρων για τις οποίες απεικονίζεται η γεωμετρία του βυθισμένου πρανούς αλλά και η επιφάνεια αστοχίας του πρανούς. Έμφαση της χρωματικής απεικόνισης του κόκκινου και του πορτοκαλί χρώματος δίνεται στα σημεία όπου υπάρχει αστοχία της μάζας της προσομοίωσης. Στην εικόνα 4.20 του μοντέλου με συνοχή 20 kPa (συνεκτικό υλικό), παρατηρείται αρκετά μεγάλη επιφάνεια αστοχίας με βαθιά αστοχία, ενώ σε αντίθεση με την εικόνα 4.21 του προσομοιώματος με συνοχή 0 kPa (μη συνεκτικό υλικό), εμφανίζεται πιο ρηχή αστοχία με αποτέλεσμα να αποδεικνύεται και η διαφορά μεταξύ συνεκτικών και μη συνεκτικών υλικών. Η διαφορά αυτή επικεντρώνεται στο σχήμα της επιφάνειας αστοχίας, όπου στα συνεκτικά υλικά είναι κυκλική, ενώ στα μη συνεκτικά υλικά είναι επίπεδη. Η αντίστοιχη παρατήρηση προκύπτει και από τα άλλα δύο μοντέλα μεταξύ συνεκτικών και μη συνεκτικών υλικών στις εικόνες 4.22 και 4.23.



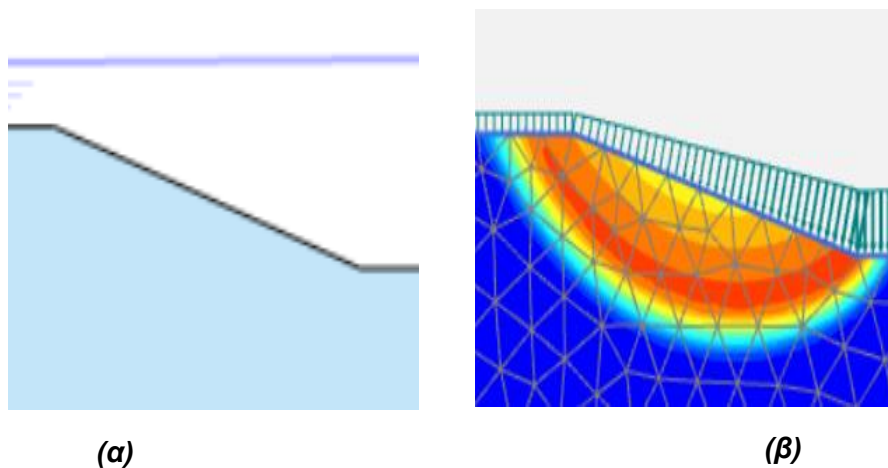
Εικόνα 4.20 α) Γεωμετρία υγρού πρανούς. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=15^\circ$, $\varphi=15^\circ$, $FS=4.64$.



Εικόνα 4.21: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς με $c=0$ kPa, $H=10$ m, $\beta=15^\circ$, $\varphi=15^\circ$ FS=1.05.

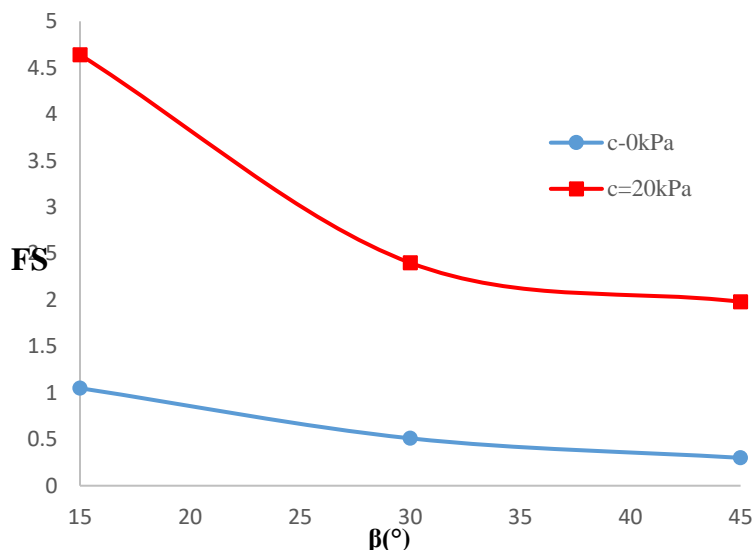


Εικόνα 4.22: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς με $c=0$ kPa, $H=10$ m, $\beta=15^\circ$, $\varphi=30^\circ$ FS=2.44.

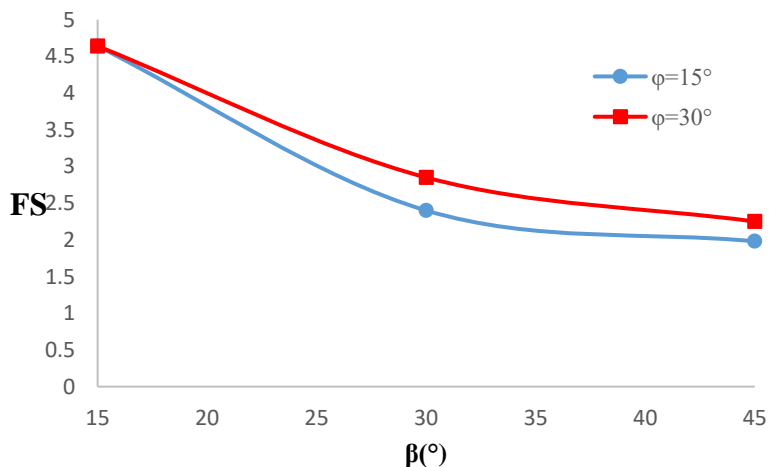


Εικόνα 4.23: α)Γεωμετρία υγρού πρανούς. β) Επιφάνεια αστοχίας υγρού πρανούς με $c=20$ kPa, $H=10$ m, $\beta=15^\circ$, $\varphi=15^\circ$ FS=4.64.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής μεθόδου παρουσιάζεται σε γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν τον συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της κλίσης του πρανού, ενώ η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι οριζόντια και πάνω από την εδαφική μάζα. Για τιμή συνοχής 20 kPa παρατηρείται αύξηση του συντελεστή ασφαλείας, επεξηγώντας την ευεργετική επίδραση του νερού, όπως βρέθηκε στο Κεφαλαίο 3 στην εξίσωση της περίπτωσης 5 (εξίσωση 3.10), όπου σε περιπτώσεις συνεκτικών υλικών ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται. Όσον αφορά την γωνία εσωτερικής τριβής, ο συντελεστής για 30° και 15° εμφανίζει πολύ μικρή απόκλιση, με συμπέρασμα ότι η επίδραση του νερού επιδρά θετικά στην επιρροή της γωνίας τριβής.



Εικόνα 4.24: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρά πρηνές υπό στατικές συνθήκες, $z=10\text{m}$, $\varphi=15^{\circ}$.



Εικόνα 4.25: Συντελεστής ασφαλείας σε υγρά πρηνές υπό στατικές συνθήκες, $z=10\text{m}$, $c=20\text{kPa}$.

4.4.1. Συμπεράσματα αριθμητικής μεθόδου

Η αριθμητική μέθοδος έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκριτικά με τις αναλυτικές εξισώσεις που βρέθηκαν με την αναλυτική μεθοδολογία αλλά η επιφάνεια που αστοχεί της αριθμητικής προσέγγισης είναι κυκλική και λαμβάνει χώρα στον πόδα του πρανούς, ενώ η πραγματική επιφάνεια αστοχίας δεν είναι κυκλική και γι' αυτόν τον λόγο η σύγκριση ίσως να μην είναι αντιπροσωπευτική. Ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται αισθητά στις περιπτώσεις όπου οι μηχανικές ιδιότητες δεν μεταβάλλονται, αλλά όταν αυξάνεται το ύψος ή η γωνία του πρανούς. Όσον αφορά την παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα, παρατηρήθηκε ότι ανάλογα την στάθμη, ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς επηρεάζεται είτε θετικά είτε αρνητικά. Η αύξηση της στάθμης της ροής του νερού επιφέρει μείωση του συντελεστή ασφαλείας. Για τα βυθισμένα πρανή με συνοχή παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής ασφαλείας έχει μία θετική αύξηση, ενώ για μη συνεκτικά εδάφη ο συντελεστής παραμένει περίπου ίδιος όπως στις ξηρές συνθήκες. Η παρουσία του σεισμικού συντελεστή μείωσε τον συντελεστή ασφαλείας στα προσομοιώματα, πράγμα που επιβεβαιώνει την ανάγκη μελέτης αυτού του κλάδου. Είναι πολύ σημαντικό να γίνουν μελέτες πάνω στις σεισμικές συνθήκες στην ευστάθεια των πρανών για τον εμπλουτισμό της βιβλιογραφίας αλλά και πρόληψή τυχόν μελλοντικών αστοχιών στην οδοποιία αλλά και σε οικισμούς που βρίσκονται σε περιοχές με πρανή. Παρακάτω παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας της αριθμητικής μεθόδου για πεπερασμένο πρανές για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Πίνακας 4.7 Αριθμητική μέθοδος σε πεπερασμένο πρανές

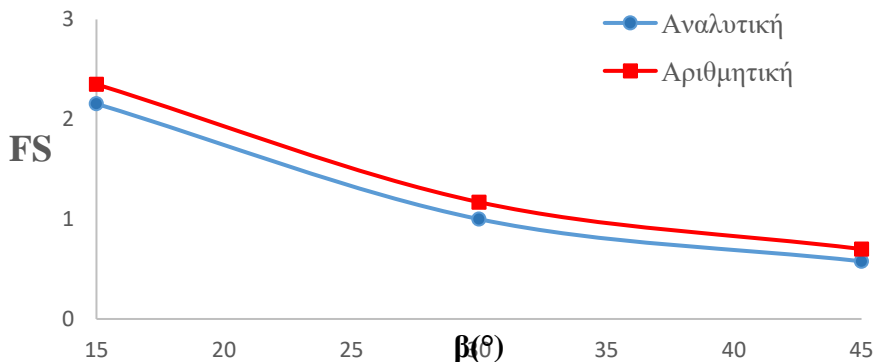
| β | ΑΜΜΟΣ ($c=0$ kPa) | | | |
|---------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| | FS Χωρίς νερό + χωρίς Σεισμό | FS Χωρίς Νερό + με Σεισμό | FS Με νερό + Χωρίς σεισμό | FS Με νερό + Με σεισμό |
| 15 | 2.35 | 1.72 | 2.44 | 1.28 |
| 30 | 1.17 | 1.07 | 1.21 | 0.87 |
| 45 | 0.7 | 0.68 | 0.75 | 0.62 |
| β | ΑΡΓΙΛΟΣ ($c=20$ kPa) | | | |
| | FS Χωρίς νερό + χωρίς Σεισμό | FS Χωρίς Νερό + με Σεισμό | FS Με νερό + Χωρίς σεισμό | FS Με νερό + Με σεισμό |
| 15 | 4.1 | 2.62 | 4.64 | 2.44 |
| 30 | 2.27 | 1.84 | 2.85 | 1.95 |
| 45 | 1.69 | 1.46 | 2.25 | 1.66 |

4.4.2. Σύγκριση Μεθόδων- Συμπεράσματα

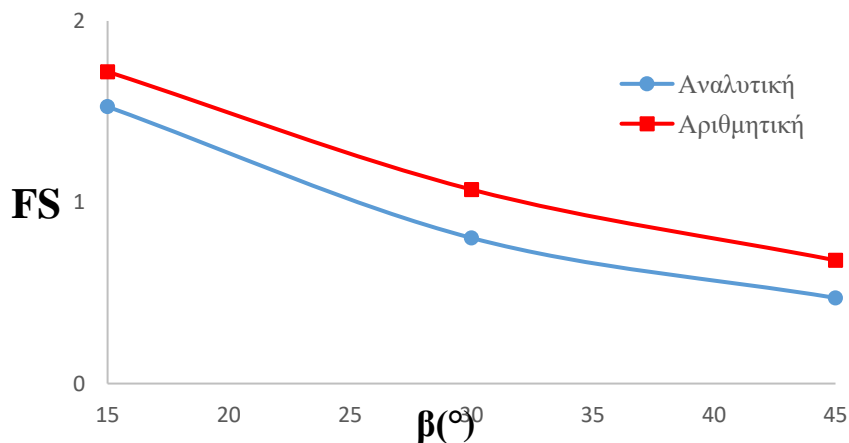
Συγκρίνοντας την αναλυτική και αριθμητική μέθοδο παρουσιάζονται διαφορές στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας κυρίως στα συνεκτικά εδάφη, όπως η άργιλος που μελετήθηκε. Η σύγκριση αυτή έγινε σε πρανή πεπερασμένου ύψους με κύρια διαφορά την επιφάνεια αστοχίας,

όπως προαναφέρθηκε. Η γεωμετρία του πρανούς δημιουργεί διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα καθώς δεν εξετάζεται ίδια συμπεριφορά αστοχίας. Ακόμη η πυκνότητα του πλέγματος που επιλέγεται για τις αναλύσεις ενδέχεται να αλλάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης, καθώς αλλάζει η ακρίβεια του προσομοιώματος.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, σε συνεκτικά εδάφη όπου η συνοχή είναι μεγαλύτερη του μηδενός και η γωνία του πρανούς και της εσωτερικής τριβής είναι μικρές ($\beta=15^\circ$, $\varphi=15^\circ$) παρουσιάζονται αισθητά μεγάλες διαφορές στους συντελεστές ασφαλείας. Αντιθέτως, υλικά χωρίς συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής άνω του μηδενός έχουμε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα ταύτισης των μεθόδων, γεγονός που επαληθευθεί τις δύο μεθόδους. Επίσης γι' αυτήν την περίπτωση, τα αποτελέσματα δεν εξαρτώνται από το ύψος ή την κλίση του πρανούς, αλλά μόνο από την γωνία φ . Συγκεντρωτικά παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις ώστε να αποτυπωθούν καλύτερα τα παραπάνω συμπεράσματα. Αναλύονται διάφοροι συνδυασμοί κλίσεων, ύψους και μηχανικών ιδιοτήτων στο λογισμικό Excel για τις αναλυτικές επιλύσεις αλλά και στο Plaxis για τις αριθμητικές προσομοιώσεις. Στην περίπτωση πρανών χωρίς την παρουσία νερού και σεισμού παρατηρείται μικρή διαφορά, δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα σύγκρισης των μεθόδων.

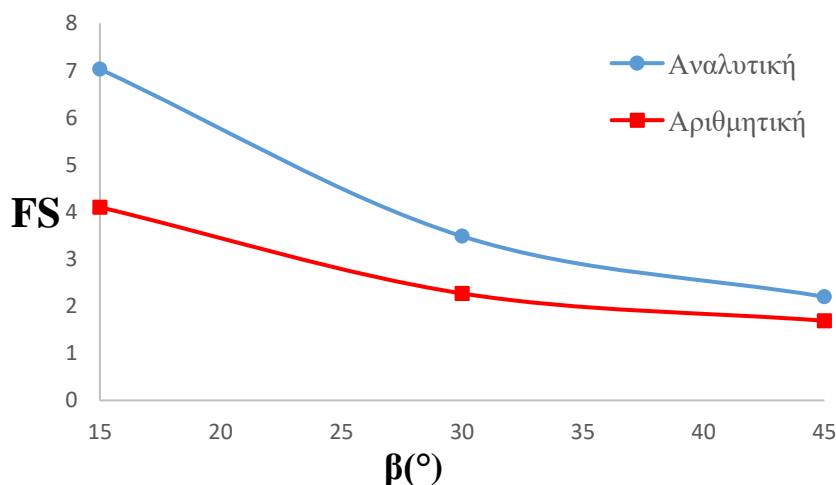


Εικόνα 4.26: Σύγκριση Μεθόδων για ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=0kPa$, $\varphi=30^\circ$.

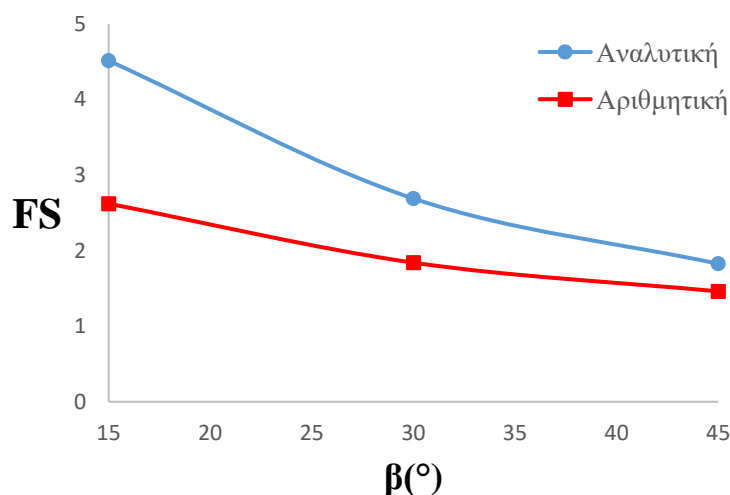


Εικόνα 4.27: Σύγκριση Μεθόδων για ξηρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=0 kPa$, $\varphi=30^\circ$.

Στην περίπτωση πρανών χωρίς την παρουσία νερού υπό στατικές συνθήκες, παρατηρείται ελάχιστη διαφορά μεταξύ της αναλυτικής και της αριθμητικής μεθόδου, ενώ υπό ψευδοστατικές συνθήκες προκύπτει μία μεγαλύτερη απόκλιση που πιθανώς να οφείλεται στον σεισμικό συντελεστή και την εφαρμογή του στην αριθμητική μέθοδο. Τα αποτελέσματα όμως, είναι ικανοποιητικά για τα ξηρά πρανά, με πιθανό πρόβλημα τη διαφορά στον τύπο αστοχίας μεταξύ συνεκτικών και μη συνεκτικών υλικών. Όπως φαίνεται και στις επόμενες εικόνες 4.28 και 4.29 για συνεκτικά υλικά υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση των μεθόδων και αυτό εξηγείται στο ότι τα συνεκτικά υλικά συνήθως αστοχούν σε κυκλική επιφάνεια αστοχίας, ενώ τα μη συνεκτικά υλικά με επίπεδη επιφάνεια αστοχίας. Όσο μεγαλώνει η κλίση του πρανούς τόσο περισσότερο συμπίπτουν οι μέθοδοι ανάλυσης, δηλαδή για μικρές γωνίες κλίσης έχουμε μεγαλύτερη απόκλιση του συντελεστή ασφαλείας μεταξύ των δύο μεθόδων.

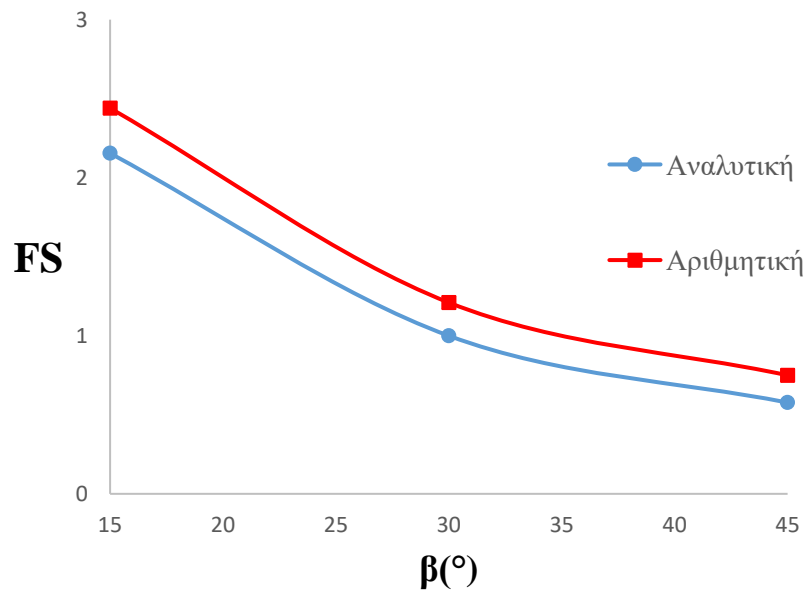


Εικόνα 4.28: Σύγκριση Μεθόδων για ξηρό πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=20\text{kPa}$, $\varphi=30^\circ$.

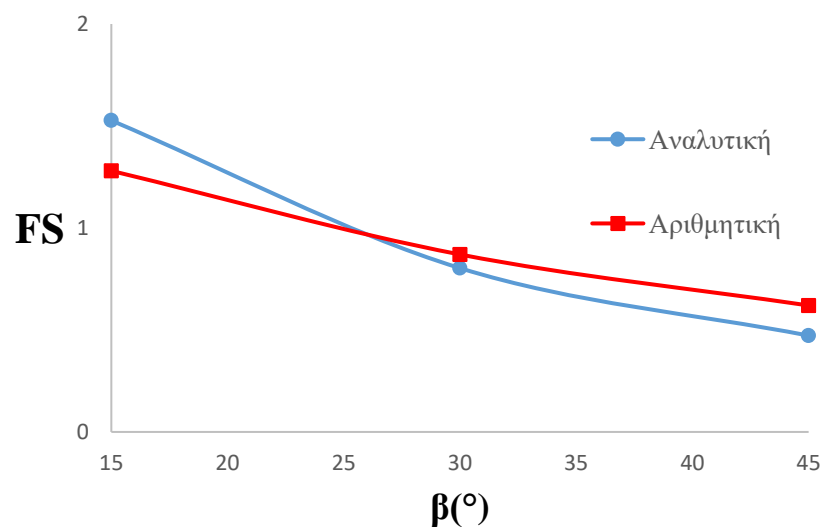


Εικόνα 4.29 Σύγκριση Μεθόδων για ξηρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=20\text{kPa}$, $\varphi=30^\circ$.

Στις δύο παρακάτω εικόνες 4.35 και 4.36 συγκρίνονται οι δύο μέθοδοι για στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες με τη μόνη διαφορά ότι το πρανές είναι κορεσμένο από νερό, σε συνεκτικό αλλά και μη συνεκτικό υλικό. Τα αποτελέσματα είναι εξαιρετικά ικανοποιητικά, με τις δύο μεθόδους να ταυτίζονται για ψευδοστατικές συνθήκες, ενώ για στατικές συνθήκες να έχουν μία μικρή απόκλιση.



Εικόνα 4.30: Σύγκριση Μεθόδων για υγρό πρανές υπό στατικές συνθήκες με $c=0kPa$, $\varphi=30^{\circ}$.



Εικόνα 4.31: Σύγκριση Μεθόδων για υγρό πρανές υπό ψευδοστατικές συνθήκες με $c=20kPa$, $\varphi=30^{\circ}$.

Πίνακας 4.8: Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης μεθόδων:

| | H=10m, β=45, Χωρίς Σεισμό | | H=10m, β=45, Με Σεισμό | | H=10m, β=45, Με νερό + Με Σεισμό | |
|----------------|------------------------------------|------|------------------------------|------|---|------|
| | Μέθοδος | | Μέθοδος | | Μέθοδος | |
| | LEM | FEM | LEM | FEM | LEM | FEM |
| c=0kPa, φ=15° | 0.50 | 0.29 | 0.40 | 0.27 | 0.40 | 0.23 |
| c=0kPa, φ=30° | 0.58 | 0.70 | 0.47 | 0.68 | 0.47 | 0.62 |
| c=20kPa, φ=15° | 1.41 | 1.20 | 1.25 | 1.03 | 2.55 | 1.37 |
| c=20kPa, φ=30° | 2.20 | 1.69 | 1.83 | 1.46 | 3.10 | 1.66 |

Συμπεράσματα-Προτάσεις

Λόγω κλιματικής κρίσης παρουσιάζεται μία σειρά από γεγονότα τα οποία μπορούν να δράσουν αρνητικά σε φυσικά και τεχνητά πρανή. Από την αύξηση των αέριων του θερμοκηπίου και την αλλαγή των καιρικών συνθηκών, μεγαλύτερες θερμοκρασίες αυξάνουν την εξάτμιση προκαλώντας καταιγίδες και έντονες βροχοπτώσεις. που μπορούν να επιδράσουν αρνητικά ή - ανάλογα με τις επικρατούσε συνθήκες- ακόμα και ευεργετικά σε φυσικά και τεχνητά πρανή. Το νερό από τις συχνότερες και εντονότερες βροχοπτώσεις χωρίς παρουσία βλάστησης, δεν προλαβαίνει να απορροφηθεί από το έδαφος, προκαλώντας έντονες επιφανειακές απορροές και διάβρωση των εδαφών. Η επιφανειακή απορροή απομειώνει τα εδαφικά χαρακτηριστικά λόγω διάβρωσης. Αυτός ο μηχανισμός ενισχύεται από έντονες και συχνές βροχοπτώσεις, δυσκολεύοντας τη διήθηση του νερού στο έδαφος. Προφανώς, ο εν λόγω μηχανισμός διάβρωσης είναι αντικείμενο της υδρογεωλογίας και αποτελεί δύσκολο αντικείμενο μελέτης με πολλές αβεβαιότητες.

Γενικά, η αστοχία πρανών οφείλεται στις αλλαγές στην κλίση του πρανούς, στις αλλαγές του υδροφόρου ορίζοντα, στην ύπαρξη σεισμικών και δυναμικών φορτίων. Για μεγάλη γωνία εσωτερικής τριβής το εδαφικό υλικό χαρακτηρίζεται πιο σταθερό. Η αύξηση της κλίσης του εδαφικού πρανούς σε συνδυασμό με παρουσία νερού μειώνει την ευστάθεια της μάζας καθώς και τον συντελεστή ασφάλειας. Τα ετερογενή εδάφη είναι πιο δύσκολο να μελετηθούν, καθώς οι μηχανισμοί κινήσεων αλλάζουν σε κάθε εδαφική στρώση. Το είδος του εδάφους αλλάζει τις συμπεριφορές των κτιρίων, την στρωματογραφία, το βάθος εδάφους, ενώ το νερό αυξάνει το φορτίο και μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες των χερσαίων εδαφικών υλικών. Τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται δραματικές αλλαγές στα καιρικά φαινόμενα, τα οποία γίνονται εντονότερα και συχνότερα. Ως αποτέλεσμα τους είναι η αποδυνάμωση του εδάφους και της αντοχής του, από την αλλαγή του κλίματος λόγω βροχοπτώσεων, πλημμυρών και κατολισθήσεων που συν επιδρούν με την σεισμική δραστηριότητα της εκάστοτε περιοχής.

Όπως μελετήθηκε και εκτενέστερα παραπάνω κύριος παράγοντας στην ευστάθεια των εδαφικών πρανών, είναι το νερό και οι διάφοροι μηχανισμοί του. Η επιφανειακή απορροή θέτει το έδαφος σε μηχανισμούς διάβρωσης, αποδυναμώνοντας τα εδαφικά χαρακτηριστικά και την γεωμετρία του πρανούς. Αυτός ο μηχανισμός ενισχύεται από έντονες και συχνές βροχοπτώσεις, δυσκολεύοντας την διήθηση του νερού στο έδαφος. Με το φαινόμενο της βροχόπτωσης, οι πόροι του εδάφους γεμίζουν με νερό, με αποτέλεσμα το βάρος της εδαφικής μάζας να αυξάνεται καθώς αυξάνεται η πίεση των πόρων, προκαλώντας αστοχίες στο έδαφος και μετακινήσεις. Κατά τη μελέτη της επιρροής του υδροφόρου ορίζοντα στην ευστάθεια εδαφικών πρανών, προστέθηκε και η επίδραση των σεισμικών δονήσεων για μία ολοκληρωμένη μελέτη της επίδρασης των φυσικών φαινομένων σε χερσαία και υποθαλάσσια εδαφικά πρανή.

Ένα εδαφικό πρανές θεωρείται ευσταθές όταν ο συντελεστής ασφαλείας του είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Όταν η κλίση τη εδαφικής μάζας αλλά και το ύψος της αυξάνονται ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται ενώ αν αυξηθούν οι μηχανικές του ιδιότητες δηλαδή η συνοχή του και η γωνία εσωτερικής τριβής του, τότε θα αυξηθεί και ο συντελεστής ασφαλείας του. Περίπλοκη είναι η συνιστώσα του νερού έχοντας και θετικά και αρνητικά αποτελέσματα, καθώς σε μη συνεκτικά εδάφη, δηλαδή αμμώδη εδάφη, ο συντελεστής ασφαλείας, με την αύξηση του υδροφόρου ορίζοντα μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας, ενώ σε συνεκτικά εδάφη, όπως τα αργιλικά, με την αύξηση της στάθμης του υδροφόρου έχουμε αύξηση της ευστάθειας του πρανούς, ιδιαίτερα όταν δεν έχουμε ροή αλλά το πρανές είναι βυθισμένο σε νερό.

Όσον αφορά τον σεισμικό συντελεστή, στη μελέτη που έγινε θεωρήθηκε ψευδοστατική συμπεριφορά και με βάση αυτήν τη θεώρηση, ο συντελεστής ασφαλείας είτε με την αριθμητική είτε με την αναλυτική μέθοδο μειωνόταν σημαντικά. Έτσι είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψιν όλοι οι παράμετροι ξεχωριστά αλλά και σε συνδυασμό για την καλύτερη επίλυση τέτοιων προβλημάτων ευστάθειας. Για την αποκατάσταση και πρόληψη επανάληψης αστοχιών πρανών που έχουν υποστεί κατολισθήσεις είναι ζωτικής σημασίας να εντοπιστούν και να κατανοηθούν οι συνθήκες που το έφεραν σε αστοχία. Η διατμητική αντοχή του εδάφους θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτήν της οριακής ισορροπίας.

Γενικά, το πρόβλημα είναι πολύ σύνθετο και δεν μπορεί να καλυφτεί στο πλαίσιο μιας διπλωματικής εργασίας. Πιθανές προεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση πρανών σε τρεις διαστάσεις, καθώς θα οδηγήσει σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Η διεξαγωγή δυναμικών αναλύσεων με χρήση πραγματικών καταγραφών θα συντελέσει στη ρεαλιστικότερη μελέτη του φαινομένου. Επίσης, είναι επιθυμητό να γίνει η διερεύνηση της επίδρασης της μη-γραμμικότητας των υλικών για υψηλά επίπεδα σεισμικής επιτάχυνσης, σε ποικιλία περιπτώσεων και προσομοιωμάτων. Τέλος, ο έλεγχος ευστάθειας των πρανών θα πρέπει να γίνεται όχι μόνο μέσω του συντελεστή ασφαλείας, αλλά και μέσω του υπολογισμού και των μόνιμων μετακινήσεων μέσα στο σώμα του πρανούς.

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Abramson L. W., (1996), "Slope stability and stabilization methods". 2nd edn. Wiley.
- Barnes, G. E. (2016), "Soil mechanics: principles and practice". 4thedn. Bloomsbury Academic.
- Brinkgreve, R.B.J., Swolfs, W.M., Engin, E., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P.G., Galavi, V., (2010) PLAXIS 2D. User manual, Plaxis BV, The Netherlands.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1988) Applied Hydrology. International Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Crosta, B. G. and Frattini, P., (2008), "Rainfall-Induced landslides and debris flows", Milano Hydrological Processes, 22, 473–477. Wiley InterScience DOI: 10.1002/hyp.6885
- Gaetano, E., Cotecchia, F., Pedone, G., Vaunat, J., Vardon, P.J., Pereira, C., Springman, M.S., Rouainia, M., Koda, E., Josifovski, J., Nocilla, A., Stirling, R., Helm, P., Lollino, P., Osinski, P., (2017), " Numerical modelling of slope-vegetation-atmosphere interaction: an overview". Transportation and Road research board, National Academy of Science, Washington D.C, pp.249 –270. Vol. 50. <https://doi.org/10.1144/qjegh2016-079>
- Green, T., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Hiscock, K.M., Treidel, H., Aureli, A., (2011), " Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater", pp. 534-540.
- IPCC (2014), "Climate Change 2014: Synthesis Report". Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by R. K. Pachauri and L. A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC, 151.
- IPCC (2018), "Climate Change 2013: The Physical Change Basis". Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by T. F. Stocker et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kramer, L. S. (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Lambe, T. W., Whitman, R. (1969), " Soil Mechanics", Massachusetts Institute of Technology.
- Liu, Y.; Deng, Z.; Wang, X. (2021) "The Effects of Rainfall, Soil Type and Slope on the Processes and Mechanisms of Rainfall-Induced Shallow Landslides". Appl. Sci., 11, 11652. <https://doi.org/10.3390/>
- Nasr, A. (2021), "A review of the potential impacts of climate change on the safety and performance of bridges". Sustainable and Resilient Infrastructure, 6(3–4), pp. 192–212.
- Popescu, M. E. (2002), "Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options". in 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infrastructures, Singapore, pp. 61–81.
- 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.

- Shao, W., Bogaard, T.A., Bakker, M., Greco, R., (2014), "Quantification of the influence of preferential flow on slope stability using a numerical modelling approach", 2197–2212. www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/2197/2015/ doi:10.5194/hess-19-2197-2015
- Soil Conservation Service (SCS) (1972), National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Department of Agriculture, Washington DC.
- Tsaparas, 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.
- USGS, (2004), Landslide types and processes, Fact Sheet 2004-3072, Lynn Highland (compiler) <https://doi.org/10.3133/fs20043072>
- Varnes, D. J. (1978), "Slope movement types and processes". In Special Report 176: Landslides: Analysis and control (Eds: Schuster, R.L and Krizek, R.J), Transportation and Road research board, National Academy of Science, Washington D.C, pp. 11–33.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Paulay T., Priestley M.J.N., (1999) "Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα και Τοιχοποιία".
- Αγγελή Ι. (2019). «Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής της ευρύτερης περιοχής της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλίωτη- Επιπτώσεις Κλιματικής αλλαγής». Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Βότσιος Ν. (2022). «Αναλυτική και Αριθμητική εκτίμηση κινδύνου αστάθειας πρανών υπό την επίδραση υπόγειων υδάτων». Πτυχιακή Εργασία. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών- Μηχανικών Γεωπληροφορικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Δασκαλάκη Δ. (2023) «Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στον συντελεστή ασφαλείας φυσικών και τεχνητών πρανών». Πτυχιακή Εργασία. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών- Μηχανικών Γεωπληροφορικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Θεοδωράκη Μ. Α. (2018). «Αριθμητική προσομοίωση της ευστάθειας πρανών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες και της συνεπακόλουθης καταπόνησης διερχόμενων αγωγών». Πτυχιακή εργασία. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών- Μηχανικών Γεωπληροφορικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- 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.
- Μαυριδόντης Α. (2020). «Αριθμητική προσομοίωση ευστάθειας εδαφικών πρανών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες». Πτυχιακή εργασία. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών- Μηχανικών Γεωπληροφορικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μπίρος Δ. (2014). «Τεχνικογεωλογική Αξιολόγηση γνευσιακών βραχομαζών στην ευστάθεια τεχνητών πρανών οδοποιίας. Τύποι βραχομάζας- Μηχανισμοί αστοχίας-Αναλύσεις ευστάθειας». Μεταπτυχιακή Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

- Μπουκοβάλας Γ. Καθηγητής (2006), Διδακτικές Σημειώσεις «Υπολογιστικές Μέθοδοι στην Γεωτεχνική». Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Πανταζής Ε. (2011). «Στατική και δυναμική επίλυση πρανών με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων». Πτυχιακή εργασία. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών- Μηχανικών Γεωπληροφορικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παπακωνσταντίνου Δ. (2006). «Ανάλυση ευστάθειας πρανούς στην περιοχή του Αγίου Φωκά της Κω με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων». Πτυχιακή εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Ροντογιάννη-Τσιαμπάου, Θ. , (2015) “Γεωλογία, Θεμελιώδης Έννοιες για Μηχανικούς”.
- Ρούμπος Α. (2022). «Μελέτη ευστάθειας οδικών και σιδηροδρομικών επιχωμάτων με την χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες». Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών- Μηχανικών Γεωπληροφορικής. Πτυχιακή εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σακελλαρίου Μ. (2009). Σημειώσεις Ευστάθειας Πρανών. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τζαρούχη Σ. (2013). «Επίδραση του νερού στην ευστάθεια των πρανών και διερεύνηση νέων τεχνικών αποστράγγισης – Εφαρμογή σε τμήματα της Εγνατίας οδού». Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Τσαίμου Α. (2006). «Παραμετρική Διερεύνηση ευστάθειας και παραμορφωσιμότητας πρανών σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις λιγνίτη με την χρήση ελαστοπλαστικών μοντέλων». Πτυχιακή εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης.

