



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ-
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σιδηροδρομικά Επιχώματα και οι Ενδεχόμενες Επιπτώσεις
της Κλιματικής Αλλαγής στην Ακεραιότητά τους**



Νικόλαος Κουκουλίτσιος

Επιβλέπων: Πρόδρομος Ψαρρόπουλος, Ε.Δι.Π. / Ε.Μ.Π.

Αθήνα

Μάρτιος 2023

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται το «πέραςμα» μου από τη Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής Ε.Μ.Π. Δε θα μπορούσα να παραλείψω την αναφορά στους ανθρώπους που με βοήθησαν στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, αλλά και καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο που μου εμπιστεύτηκε να μελετήσω και να υλοποιήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Παράλληλα οι συμβουλές και η στήριξη του ήταν πολύτιμες, τόσο στο κομμάτι της διπλωματικής, όσο και σε μετέπειτα θέμα της επαγγελματικής ζωής.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους (και ιδιαίτερα τους Αντώνη, Ιάσονα, Σωτήρη, Κώστα, Δημήτρη, Νίκο, Γιάννη) με τους οποίους περάσαμε μαζί τα φοιτητικά μας χρόνια και μοιραστήκαμε τόσο ωραίες στιγμές.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογενείας μου τα οποία αποτελούν πρότυπο για μένα και χάρις τη στήριξη που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια κατάφερα να αποφοιτήσω από μία τόσο δύσκολη και απαιτητική σχολή.

Περίληψη

Η αστοχία των σιδηροδρομικών επιχωμάτων κατά τη διάρκεια ενός έντονου φυσικού φαινομένου, όπως ένας ισχυρός σεισμός ή μία ισχυρή βροχοπτώση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους για τα σιδηροδρομικά δίκτυα, καθώς σε κάποιες περιπτώσεις ενδέχεται να οδηγήσει σε σοβαρότατες βλάβες του δικτύου, αλλά και σε απώλειες ζωής.

Τα σιδηροδρομικά επιχώματα αποτελούν τεχνητά εδαφικά επιχώματα, των οποίων η ευστάθεια καθορίζεται από πολλές διαφορετικές παραμέτρους, καθεμία από τις οποίες επιδρά με διαφορετικό τρόπο σε αυτό. Η μελέτη της ισορροπίας ενός εδαφικού πρανούς είναι επιβεβλημένο να πραγματοποιείται, τόσο υπό στατικές, όσο και υπό σεισμικές συνθήκες. Συχνά, η επίδραση της βαρύτητας αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα για την αστοχία ενός πρανούς, αλλά ο συνδυασμός της με ένα ισχυρό σεισμικό γεγονός μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες. Παράλληλα, εξίσου σημαντική για την ευστάθεια, ή μη, ενός πρανούς κρίνεται η παρουσία του νερού, είτε ως υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας στην περίπτωση των χερσαίων πρανών, είτε ως επιφάνεια ή στάθμη υδάτων στην περίπτωση των υποθαλάσσιων πρανών ή χερσαίων πρανών στην περίπτωση πλυμμυρικών φαινομένων. Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια, έχουν παρατηρηθεί σημαντικές αστοχίες σε σιδηροδρομικά δίκτυα, οι οποίες έχουν αποδοθεί στην υποτιθέμενη κλιματική αλλαγή, και πιο συγκεκριμένα στην αύξηση της στάθμης των επιφανειακών υδάτων λόγω των έντονων βροχοπτώσεων που αυτή υποτίθεται ότι συνεπάγεται.

Εδώ και δεκαετίες, ως αντικειμενικό μέτρο εκτίμησης της ευστάθειας ενός εδαφικού πρανούς έχει τεθεί ο συντελεστής ασφαλείας, η τιμή του οποίου υπολογίζεται από την πλειοψηφία των μεθόδων προσομοίωσης. Αν εξαιρέσουμε τις διάφορες πειραματικές μεθόδους που απαιτούν τον κατάλληλο εξοπλισμό και εμπειρία, οι σημαντικότερες από τις μεθόδους προσομοίωσης εδαφικών πρανών είναι διάφορες αναλυτικές μέθοδοι κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται αναλυτικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας και διάφορες αριθμητικές μέθοδοι, με επικρατέστερη τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, κατά τις οποίες εκτιμώνται ρεαλιστικά οι μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις και εκτιμάται προσεγγιστικά ο συντελεστής ασφαλείας.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η επίδραση της σεισμικής διέγερσης και της παρουσίας νερού στην ευστάθεια σιδηροδρομικών επιχωμάτων, μέσω της εξέτασης αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας χρησιμοποιήθηκε μια σειρά αναλυτικών εξισώσεων με βάση τις οποίες εξήχθησαν αντίστοιχα διαγράμματα. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS για την προσομοίωση κάθε περίπτωσης, ενώ τελικά πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων, με στόχο τόσο την εξέταση της ικανότητας των αναλυτικών εξισώσεων να περιγράψουν με σωστό τρόπο την ευστάθεια των πρανών, όσο και τη μελέτη της επιρροής των διαφορετικών παραγόντων σε αυτή.

Όπως αναμενόταν, διαπιστώθηκε ότι η σεισμική καταπόνηση οδηγεί σε σημαντική μείωση του συντελεστή ασφαλείας των σιδηροδρομικών επιχωμάτων ανάλογα με τα επίπεδα της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Απεναντίας, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της στάθμης των επιφανειακών υδάτων λόγω πλημμύρας έχει ουδέτερη ή/και ευεργετική επίπτωση στην ευστάθεια των επιχωμάτων, γεγονός που δεν συνάδει με τις παρατηρηθείσες βλάβες σε διάφορα σιδηροδρομικά δίκτυα μετά από έντονες βροχοπτώσεις, πριν ή μετά την κλιματική αλλαγή. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο έμμεσο συμπέρασμα ότι οι βλάβες στα σιδηροδρομικά επιχώματα, οφείλονται πιθανότατα στην ανεξέλεγκτη ροή των ομβρίων υδάτων και στη συνεπακόλουθη υδραυλική διάβρωση – υποσκαφή των επιχωμάτων, και όχι στην απότομη άνοδο της στάθμης των επιφανειακών υδάτων. Κατά συνέπεια, η προστασία των πρανών των σιδηροδρομικών πρανών έναντι υδραυλικής διάβρωσης και υποσκαφής κρίνεται ως απολύτως απαραίτητη για την προστασία τους, ανεξάρτητα με την εξέλιξη της κλιματικής αλλαγής στο μέλλον.

Abstract

The failure of railway embankments during an intense physical phenomenon such as a strong earthquake or a strong rainfall is considered to be one of the most dangerous risks for the railway network, due to the fact that it may cost millions of people's lives as well as a considerable amount of money wasted on it.

Railway embankments form technical soil embankments the stability of which is defined by many different parameters each one of which affects the soil slope in a different way. The study of slope's stability can be essentially carried out in both static and seismic conditions. Often the forces of gravity play the most significant role for the slope's failure, while the combination of these forces with a seismic event could create devastating consequences. At the same time the presence of water, is of vital importance in order to determine or not the slope's stability either as an underground aquifer in case of dry slopes, or as a surface or water level in case of underwater slopes or dry slopes in case of flood phenomena. In particular, during the past years, important failures in the railway network have been mentioned, these have been attributed to the supposed climate change and more specifically the rise of surface water level due to the intense rainfall which presupposes and entails.

For decades, the safety factor of a slope's stability has been set as an objective measure of estimation, the rate of which is calculated by a variety of simulation methods. If we exempt the different experimental methods which demand proper equipment and experience, the most important of the simulation methods regarding soil slopes are different analytical methods where analytical equations for the calculation of the safety factor and different numerical methods with the most prevailing method of Finite Elements are used where the permanent soil movements are realistically estimated as well as the safety factor is approximately estimated.

According to this thesis the impact of seismic phenomena and the presence of water on the slope's stability have been studied throughout the examination of representative cases. In order to calculate the safety factor a series of analytical equations was used, with the help of which corresponding diagrams were drawn. Furthermore, the programme of Element Method called PLAXIS was used for the simulation of every case,

while a comparison of the results of the two methods was carried out with the view to examining not only the capability of analytical equations but also the slope's stability as well as how different factors influence it in a proper way.

As could be expected, it was ascertained that seismic strain can lead to an important reduction of safety factor of railway embankments according to the levels of the imposed acceleration. On the contrary, it was claimed that the increase of surface water level due to flood has neutral or even beneficial impact on the embankments' stability, a fact that is not consistent with the observed damages in different railway networks after intense rainfalls, before or after the climate change. This fact leads to an indirect conclusion that damages on railway embankments are due to uncontrollable flow of rainwater and to the accompanying hydraulic erosion-undercut of embankments and not to the steep rise of surface water. Consequently, the protection of the slopes of railway embankments against hydraulic erosion and undercut is considered to be absolutely essential for the protection regardless the climate change evolution in the future.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	10
Κεφάλαιο 2: Σιδηροδρομικά Επιχώματα.....	16
2.1 Μελέτη και κατασκευή επιχωμάτων	16
2.2 Αστοχίες	17
2.3 Μερη ενός τυπικού σιδηροδρομικού επιχώματος	18
2.3.1 Επιδομή της γραμμής.....	19
2.3.2 Χαρακτηριστικά του έρματος	20
2.3.3 Χαρακτηριστικά υποστρώματος του έρματος.....	22
2.3.4 Υποδομή της γραμμής.....	23
Κεφάλαιο 3: Κλιματική Αλλαγή και Σιδηροδρομικά Επιχώματα	28
3.1 Ορισμός της κλιματικής αλλαγής;	28
3.2 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο σιδηρόδρομο	31
3.2.1 Αστοχίες οφειλούμενες στην παρουσία του νερού	32
3.2.2 Προϋποθέσεις εξόδου του νερού από τη γραμμή	33
3.2.3 Λάσπωμα του έρματος – Αναπηδώντες στρωτήρες – Αποσταθεροποίηση γραμμής.....	34
3.2.4 Δημιουργία θυλάκων στην υποδομή	36
3.2.5 Επιπτώσεις λόγω παγετού.....	37
3.3 Αστοχίες οφειλούμενες σε άλλα αίτια	38
3.3.1 Στροβιλισμός έρματος	38
3.3.2 Καθίζηση της υποδομής	38
3.3.3 Ολική και σταδιακή θραύση της υποδομής	39
Κεφάλαιο 4: Εκτίμηση Ευστάθειας πρανών με αναλυτικές μεθόδους	41
4.1 Απειρομήκες πρανές με επίπεδη επιφάνεια αστοχίας.....	42
4.1.1 Περίπτωση 1: Χωρίς Νερό, Χωρίς Σεισμό	43
4.1.2 Περίπτωση 2: Χωρίς Νερό ,Με Σεισμό	45
4.1.3 Περίπτωση 3: Με Νερό, Χωρίς Σεισμό	48
4.2 Πρανές πεπερασμένου ύψους	50
4.2.1 Περίπτωση 1: Χωρίς Νερό, Χωρίς Σεισμό.....	51

4.2.2	Περίπτωση 2: Χωρίς Νερό,Με Σεισμό	54
4.2.3	Περίπτωση 3: Με Νερό,Χωρίς Σεισμό	56
4.2.4	Υπολογισμός κρίσιμης γωνίας $\theta_{critical}$	59
4.2.5	Αποτελέσματα Ανάλυσης	64
Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση πρανών με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων		75
5.1	Εισαγωγή στο λογισμικό PLAXIS	75
5.1.1	Input.....	75
5.1.2	Calculations.....	78
5.1.3	Output – Curves	80
5.2	Δημιουργία προσομοιωμάτων στο PLAXIS	81
5.3	Πρανές πεπερασμένου ύψους – προσομοίωση.....	82
5.3.1	Γεωμετρία – Οριακές συνθήκες.....	82
5.3.2	Εδαφικά υλικά	82
5.3.3	Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων (mesh generation).....	83
5.3.4	Αρχικές συνθήκες	83
5.3.5	Διαδικασία υπολογισμών	83
5.4	Πρανές πεπερασμένου ύψους – Αποτελέσματα – Σύγκριση με αναλυτικές σχέσεις	84
5.4.1	Χερσαία πρανή – Στατικά και ψευδοστατικά μοντέλα	84
Κεφάλαιο 6: Γενικά Συμπεράσματα και Προτάσεις		94
6.1	Γενικά Συμπεράσματα	94
6.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	96

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Με τον όρο «πρανές» νοείται ο κεκλιμένος, φυσικός ή τεχνητός, σχηματισμός εδάφους. Ως «φυσικά» χαρακτηρίζονται τα πρανή τα οποία έχουν προκύψει σταδιακά ως αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών που εκτυλίσσονται στην πάροδο του χρόνου. Αντίστοιχα, ως «τεχνητά» χαρακτηρίζονται εκείνα τα πρανή που έχουν σχηματιστεί λόγω ανθρώπινης παρέμβασης στο φυσικό περιβάλλον. Οι πιο συνήθεις μορφές τεχνητών πρανών που συναντώνται είναι τα ορύγματα, τα επιχώματα, τα χωμάτινα φράγματα και τα πρανή εκσκαφών.

Τα πρανή, είτε φυσικά, είτε τεχνητά, ανάλογα με το μέγεθος τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα απειρομήκη και τα πεπερασμένα. Ως απειρομήκη χαρακτηρίζονται εκείνα τα οποία εκτείνονται σε σχετικά μεγάλο μήκος και τα όρια του δεν είναι ξεκάθαρα, ενώ πεπερασμένα θεωρούνται τα πρανή των οποίων το ύψος είναι συγκεκριμένο και συγκρίσιμο με το μήκος τους.

Επίχωμα νοείται γενικά η υπερυψωμένη κατασκευή που δημιουργείται με διάστρωση και συμπύκνωση κατάλληλων εδαφικών υλικών, προϊόντων εκσκαφών ή δανείων, σε στρώσεις πάχους τέτοιου ώστε με τα μέσα συμπύκνωσης που διατίθενται να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη συμπύκνωση. Η κατασκευή υλοποιείται σε τμήματα κατάλληλων διαστάσεων ώστε να μπορεί να γίνει χρήση μηχανικού εξοπλισμού υψηλής απόδοσης.

Τα επιχώματα στο σιδηρόδρομο αποτελούν τεχνικά χωματουργικά έργα στα οποία εδράζεται η επιδομή της γραμμής. Κατασκευάζονται προκειμένου να εξασφαλισθεί η ήπια χάραξη (ευθύγραμμο κατά το δυνατόν τμήματα και μικρές κατά μήκος κλίσεις) σε περιοχές με δύσκολο ανάγλυφο εδάφους. Χρησιμοποιούνται ως εναλλακτική λύση αντί των γεφυρών για την προσπέλαση περιοχών με υψομετρική διαφορά από τη στιγμή που το ύψος των επιχωμάτων δεν είναι απαγορευτικό. Επιπλέον χρησιμοποιούνται σε μικρά ύψη για την προστασία της επιδομής της γραμμής από πλημμύρα.

Προκειμένου να επιλυθούν όλα αυτά τα ζητήματα, χρειάζεται σωστή μελέτη και κατασκευή της υποδομής της γραμμής προκειμένου να αποτραπούν τυχόν αστοχίες στο σιδηροδρομικό σύστημα. Έτσι για να

επιλυθούν τα προαναφερθέντα προβλήματα ενός σιδηροδρομικού συστήματος εμπλέκονται αναγκαστικά πολλές ειδικότητες επιστημόνων με αποτέλεσμα να μπορεί κανείς να υποστηρίξει ότι η σιδηροδρομική επιστήμη, για να είναι ικανή να ανταπεξέλθει στο μεγάλο εύρος της, πρέπει να ανατρέξει σε πολλές επιστήμες. Η ανάγκη αυτή ήταν ιδιαίτερα αναγκαία μέχρι τα τελευταία χρόνια καθώς οι σιδηροδρομικοί οργανισμοί είχαν οι ίδιοι τον έλεγχο και τη διαχείριση και των τριών συνιστωσών του συστήματος. Η σιδηροδρομική υποδομή, το τροχαίο υλικό και η εκμετάλλευση του συστήματος αποτελούσαν συνήθως τρεις διαφορετικές μονάδες μέσα στο ίδιο τον οργανισμό οι οποίες έπρεπε να συνεργάζονται αρμονικά. Τα τελευταία χρόνια όμως, σε όλο τον κόσμο, αλλά και στην Ελλάδα, δραστηριοποιούνται στον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών, αλλά και της σιδηροδρομικής υποδομής όλο και περισσότεροι.

Όσον αφορά τα εδαφικά πρηνή, αυτά συναντώνται στο χερσαίο περιβάλλον και η μελέτη της ευστάθειας τους είναι ιδιαίτερα σημαντική και στις δύο περιπτώσεις, καθώς μία ενδεχόμενη αστοχία μπορεί να έχει πολλές καταστροφικές συνέπειες, από απώλειες περιουσίας μέχρι και ανθρώπινων ζωών.

Η κλίση του εδάφους σε συνδυασμό με τις δυνάμεις βαρύτητας που δρουν σε κάθε μάζα, δύνανται να μειώσουν την ευστάθεια ενός επιχώματος ή ακόμη να οδηγήσουν σε αστοχία του στην περίπτωση υπέρβασης της διατμητικής αντοχής της εδαφικής μάζας. Παράλληλα, οι σεισμικές δονήσεις προκαλούν αύξηση της διατμητικής τάσης που εφαρμόζεται σε αυτό ή μείωση της διατμητικής αντοχής του, οδηγώντας σε αστοχία. Συγχρόνως, η παρουσία του νερού επιδρά θετικά στην ευστάθεια των επιχωμάτων, καθώς προκαλεί αύξηση της πίεσης στους πόρους και συνεπώς της διατμητικής αντοχής. Όσον αφορά την ύπαρξη του νερού, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η κλιματική αλλαγή που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, αφού έχει προκαλέσει μεταβολές στα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων και συνεπώς στις επιπτώσεις που έχουν στην ευστάθεια των επιχωμάτων. Όπως παρατηρήθηκε από την αστοχία των σιδηροδρομικών επιχωμάτων από την κακκοκαιρία «Daniel» στη Θεσσαλία, θα μπορούσε κανείς να αντικρούσει την παραπάνω άποψη ότι το νερό επιδρά θετικά στα επιχώματα καθώς όλα τα σιδηροδρομικά επιχώματα της περιοχής καταστράφηκαν. Αυτό συνέβει διότι είχαμε φαινόμενα πλημμύρας μαζί με την ταυτόχρονη ανεξέλεγκτη

ροή του νερού κατά την οποία όντως αστοχούν τα σιδηροδρομικά επιχώματα. Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται η περίπτωση της πλημμύρας, δηλαδή της απότομης σταδιακής αύξησης του υδροφόρου ορίζοντα.

Η ανάγκη εκτίμησης της ευστάθειας των επιχωμάτων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών μεθόδων ανάλυσης, το αποτέλεσμα των οποίων αναδεικνύει την ανάγκη, ή μη, για λήψη των απαραίτητων μέτρων βελτίωσης. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ανάλυσης είναι οι αριθμητικές και οι αναλυτικές, καθεμία από τις οποίες προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ακρίβεια και το είδος των αποτελεσμάτων.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η μελέτη της επίδρασης των προαναφερόμενων παραγόντων στην ευστάθεια των επιχωμάτων, χρησιμοποιώντας αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την καθεμία. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της επίπεδης μεταφορικής ολίσθησης για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας του επιχώματος και την εξαγωγή αντίστοιχων συγκριτικών διαγραμμάτων, ώστε να καταστεί ευκολότερη η μελέτη της επίδρασης κάθε παράγοντα στην ευστάθεια αυτού. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του λογισμικού Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αριθμητικές προσομοιώσεις, από την οποία προέκυψαν συντελεστές ασφαλείας για κάθε περίπτωση που συγκρίθηκαν με τους αντίστοιχους της αναλυτικής μεθόδου, ενώ παράλληλα δόθηκε η δυνατότητα της γραφικής παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Πέρα από το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο, η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των σιδηροδρομικών επιχωμάτων.

Αντίστοιχα, το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται το τι είναι κλιματική αλλαγή, η ταξινόμηση των ειδών της αστοχίας των σιδηροδρομικών επιχωμάτων, καθώς και οι παράγοντες που δύναται να επηρεάσουν την ευστάθεια τους, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται μερικές πραγματικές περιπτώσεις αστοχίας.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της ευστάθειας των πρανών, καθώς και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις αναλυτικές λύσεις, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τις αριθμητικές μεθόδους αντίστοιχα και γίνεται σύγκριση αυτών με τις αναλυτικές.

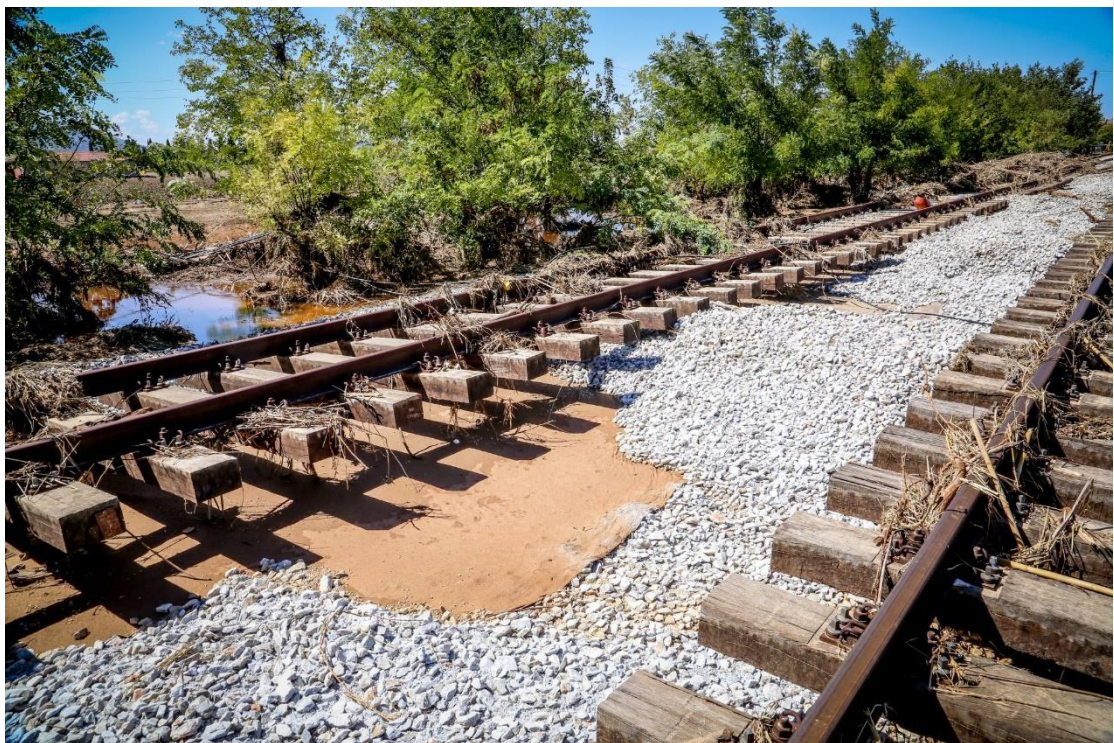
Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν από τη εφαρμογή των δύο διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης και στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται τα γενικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παραπάνω σύγκριση.



Εικόνα 1.1: Καταστροφή σιδηροδρομικού επιχώματος από την κακοκαιρία Daniel στη Θεσσαλία το 2023



Εικόνα 1.2:Υποχώρηση της υποδομής του σιδηροδρομικού επιχώματος λόγω ροής νερού εξαιτίας της κακοκαιρίας Daniel το 2023



Εικόνα 1.3:Εισχώρηση νερού στην υποδομή του σιδηροδρομικού επιχώματος λόγω ροής εξαιτίας της κακοκαιρίας Daniel το 2023

Κεφάλαιο 2: Σιδηροδρομικά Επιχώματα

2.1 Μελέτη και κατασκευή επιχωμάτων

Στα σιδηροδρομικά έργα (Πυργίδης 2015), στην κατασκευή των επιχωμάτων είναι αναγκαίο να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στο ύψος τους (μικρό ύψος σε σχέση με τα οδικά) και στη συμπύκνωσή τους (μεγαλύτερος βαθμός συμπύκνωσης σε σχέση με τα οδικά) έτσι ώστε να αποφεύγονται οι καθιζήσεις και κατ' επέκταση τα γεωμετρικά σφάλματα της εσχάρας γραμμής (που είναι επικίνδυνα για τη λειτουργία του σιδηροδρόμου).

Βασικές παράμετροι για την μελέτη και κατασκευή των επιχωμάτων είναι:

- **Η φόρτιση**

Τα είδη και τα μεγέθη των δυνάμεων που ασκούνται επί των σιδηροδρομικών επιχωμάτων διαφέρουν σημαντικά από αυτά του οδικού δικτύου. Συγκεκριμένα, τα κατακόρυφα στατικά φορτία είναι συγκριτικά μεγαλύτερα ενώ μεγαλύτερα είναι επίσης, λόγω των υψηλότερων ταχυτήτων και τα δυναμικά κατακόρυφα φορτία.

- **Οι κλίσεις των πρανών**

Η κλίση των πρανών προκύπτει συνήθως από εδαφοτεχνική μελέτη

- **Το ύψος του επιχώματος**

Η ευστάθεια ενός σιδηροδρομικού οχήματος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα γεωμετρικά σφάλματα της γραμμής. Σε περίπτωση καθίζησης του επιχώματος η υψομετρική διαφορά που μπορεί να προκληθεί στις δύο σιδηροτροχιές της γραμμής και κατ' επέκταση στην επιφάνεια κύλισης θα είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη για την κυκλοφορία των συρμών και οπωσδήποτε επιζήμια στη λειτουργία του συστήματος.

Με τα παραπάνω δεδομένα το ύψος των επιχωμάτων στο σιδηρόδρομο πρέπει να είναι σχετικά μικρό, ενώ παράλληλα θα πρέπει το έδαφος να έχει υποστεί πολύ καλή συμπύκνωση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ύψη επιχωμάτων μεγαλύτερα των 20 m πρέπει να αποφεύγονται. Επίσης, τα μεγάλα ύψη πρέπει να αποφεύγονται και για περιβαλλοντικούς λόγους.

2.2 Αστοχίες

Τα κυριότερα προβλήματα – αστοχίες (Πυργίδης 2015), που παρουσιάζονται συνήθως στα υψηλά επιχώματα κατά το στάδιο λειτουργίας μιάς σιδηροδρομικής γραμμής είναι:

- **Καθίζηση που μπορεί να προέρχεται:**

α) από κακό υπολογισμό του επιπλήσματος του επιχώματος κατά την φάση κατασκευής του, από ανεπαρκή συμπίεση του και από την ακαταλληλότητα των υλικών κατασκευής

Σε αυτήν την περίπτωση πραγματοποιείται προσεκτική συμπλήρωση των επιχωμάτων -έξω από το έρμα- με υδατοπερατά υλικά έτσι ώστε να μην εγκλωβίζεται νερό. Αντιθέτως, για τη συμπλήρωση του επιχώματος κάτω από το έρμα, χρησιμοποιούνται υλικά μικρής διαπερατότητας για να αποφευχθεί η δημιουργία θυλάκων στην υποδομή. Ιδανική περίπτωση αποκατάστασης του προβλήματος θα αποτελούσε η πλήρης αποξήλωση της γραμμής και η συμπλήρωση και κυλίνδρωση της διατομής του επιχώματος εξ αρχής.

β) από την παρουσία νερού στο εσωτερικό του επιχώματος λόγω κατασκευής τους από ακατάλληλα υλικά (αργιλώδη εδάφη).

Η συμπλήρωση των επιχωμάτων πραγματοποιείται όπως ακριβώς και στη περίπτωση (α). Ουσιαστική λύση για τη συγκεκριμένη αιτία καθίζησης αποτελούν τα τεχνικά έργα αποστράγγισης.

γ) από τις ανεπαρκείς εγκάρσιες κλίσεις, ειδικά στα υψηλά επιχώματα. Τα χώματα τείνουν να λάβουν τη φυσιολογική τους κλίση με αποτέλεσμα να αποκολούνται τμήματα και να καταπίπτουν προς τα πρηνή.

Και σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται συμπλήρωση του επιχώματος εκατέρωθεν. Εάν ο όγκος χωμάτων είναι μεγάλος για καλύτερο εγκιβωτισμό τους στην επιφάνεια των πρηνών κατασκευάζονται αναβαθμοί κάθε 2-4m με ελαφρά κλίση προς τα μέσα. Αν η μεταφορά χωματισμών είναι δύσκολη κατασκευάζεται στον πόδα του επιχώματος τοίχος αντιστήριξης. Αλλά η λύση αποτελεί και η τεχνική του οπλισμένου εδάφους. Τέλος, για την καλύτερη σταθεροποίηση των πρηνών των επιχωμάτων – εφόσον κάτι τέτοιο δεν έχει

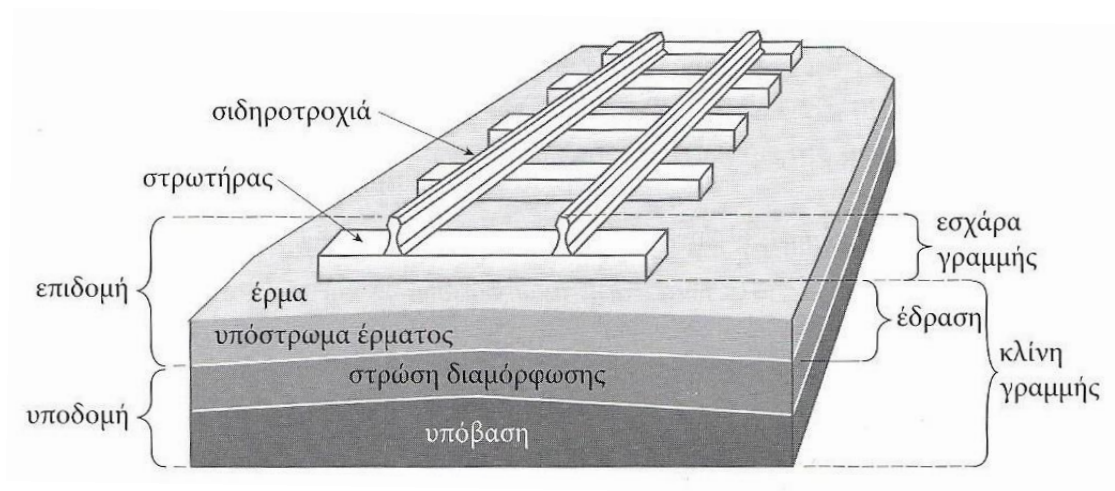
εφαρμοστεί κατά το στάδιο κατασκευής – πραγματοποιείται φύτευση με κατάλληλη βλάστηση.

- **Η μη αποτελεσματική λειτουργία του φυσικού πρανούς του επιχώματος ως σύστημα πλευρικής αποστράγγισης της γραμμής και απορροής των ομβρίων.**

Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται όταν δεν υπάρχουν οι κατάλληλες εγκάρσιες κλίσεις ή η κατάλληλη διαμόρφωση στο φρύδι του επιχώματος.

2.3 Μέρη ενός τυπικού σιδηροδρομικού επιχώματος

Το τυπικό σιδηροδρομικό επίχωμα αποτελείται από τρία μέρη: την εποδομή, την υποδομή και την στρώση έδρασης.



Εικόνα 2.1:Τυπικό Σιδηροδρομικό Επίχωμα (Πηγή:Πυργίδης, 2015)



Εικόνα 2.2:Τυπικό Σιδηροδρομικό Επίχωμα στη Γερμανία (Πηγή: Wikipedia)

2.3.1 Επιδομή της γραμμής

Επιδομή (Πυργίδης, 2015), είναι η κύρια φέρουσα στρώση που δέχεται και κατανέμει στις υποκείμενες στρώσεις τα φορτία των συρμών και υπόκειται σε επιδιορθώσεις κατά ορισμένα χρονικά διαστήματα. Η επιδομή περιλαμβάνει, εκτός από τους στρωτήρες και τις σιδηροτροχίες, το έρμα και το υπόστρωμα (με τις πρόσθετες τυχόν αναγκαίες στρώσεις θεμελίωσης και διαχωρισμού).

Οι στρωτήρες δεν εδράζονται απ' ευθείας στην υποδομή της γραμμής. Μεταξύ της υποδομής και των στρωτήρων παρεμβάλλεται ένα στρώμα ικανού πάχους από τα υλικά κατάλληλων γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών που έχουν σαν κύριες αποστολές τη μεταφορά των φορτίων κυκλοφορίας στο φυσικό έδαφος, τη διατήρηση της γεωμετρίας της γραμμής και την αποστράγγισή της.

Το στρώμα αυτό που αποτελεί το κατώτερο τμήμα της επιδομής, καλείται έδραση και περιλαμβάνει συνήθως δύο στρώσεις:

- Το έρμα σαν ανώτερη στρώση, που αποτελείται συνήθως από θραυστά υλικά (σκύρα),
- Το υπόστρωμα έρματος, σαν κατώτερη στρώση, που αποτελείται συνήθως από αμμοχάλικο.

Η έδραση που υλοποιείται με τον τρόπο αυτό καλείται «εύκαμπτη ή συμβατική έδραση» ή απλά «σκυρόγραμμη», σε αντιδιαστολή με τη «δύσκαμπτη έδραση» που υλοποιείται με πλάκα σκυροδέματος. Η «δύσκαμπτη έδραση», πιο γνωστή και ως «σταθερή επιδομή», χρησιμοποιείται στα υπόγεια αστικά σιδηροδρομικά συστήματα (μετρό) ενώ έχει προς το παρόν πολύ μικρή συγκριτικά εφαρμογή στον υπεραστικό σιδηρόδρομο. Τέλος ένα τρίτο σύστημα έδρασης που συναντάται σπάνια (κυρίως σε Ιταλία και Ιαπωνία) είναι η «έδραση με ασφαλτικό σκυρόδεμα ή ημι-εύκαμπτη έδραση».

2.3.2 Χαρακτηριστικά του έρματος

2.3.2.1 Ιδιότητες και γενικά χαρακτηριστικά

Τα σκύρα τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως σαν έρμα πρέπει να χαρακτηρίζονται από τις παρακάτω ιδιότητες:

- Σκληρότητα (μεγάλη αντοχή σε θλίψη, κρούση και θραύση).
- Καθαρότητα (όχι ανάμιξη με άργιλο, χώμα ή χημικές προσμίξεις).
- Ευστάθεια των κόκκων (υλικά κυβικής μορφής, πολυεδρικά και γωνιώδη παραγόμενα σε σπαστήρα και όχι σε τριβείο. Απουσία στρογγυλεμένων κόκκων).
- Υψηλή υδατοπερατότητα.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Ανθεκτικότητα στον παγετό.

2.3.2.2 Υλικά – Διαστάσεις

Σαν υλικά έρματος χρησιμοποιούνται συνήθως:

- Θραυστά σκύρα λατομείου
Πρόκειται για σκληρά πετρώματα όπως γρανίτης, βασάλτης, διορίτης, πορφυρίτης, χαλαζίας, πυρίτιο, ασβεστόλιθος. Δεν συνιστώνται μαλακά (σχιστόλιθοι) ή πλακοειδή πετρώματα.
- Άμμος ή χάλικες ορυχείων ή ποταμών.
- Φερτοί χάλικες (όχι στρογγυλοί).
- Σκωρίες υψικαμίνων

Το μέγεθος των σκύρων δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλο έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανασήκωση και η εναπόθεση των στρωτήρων, αν χρειαστεί, χειρωνακτικά. Παράλληλα, πρέπει οι διαστάσεις τους να είναι όσο το δυνατόν ομοιόμορφες έτσι ώστε:

- Να μην απαιτείται διαχωρισμός των τεμαχίων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς και της τοποθέτησης
- Να μην μειώνονται τα κενά μεταξύ των κόκκων και να εξασφαλίζεται έτσι η αποστράγγιση του νερού
- Τα σκύρα να επιτυγχάνουν γρήγορα το μέγιστο συντελεστή εσωτερικής τριβής και τον ελάχιστο όγκο όταν συμπυκνώνονται στη μέγιστη πυκνότητα.

Τα θραυστά υλικά πρέπει κανονικά να διέρχονται όλα από το κόσκινο των 60 mm και να μην διέρχονται από το κόσκινο το 20 mm. Το έρμα πρέπει επίσης να είναι «ανοικτής διαβάθμισης» δηλαδή να μην έχει λεπτούς κόκκους. Τα περισσότερα δίκτυα δέχονται διαβαθμίσεις (min/max κόκκων) 20/50 έως 40/60. Μια τυπική διαβάθμιση δίδεται στον Πίνακα 1.1.

Γενικά τα σκύρα πρέπει να έχουν διαστάσεις από 30-65 mm με τις εξής αναλογίες:

- 25-40 % κόκκους διαμέτρου 30 – 45 mm
- 75-60 % κόκκους διαμετρου 45 – 60 mm.

Πίνακας 1.1:Τυπική διαβάθμιση υλικών έρματος

Διάμετρος κόκκων (mm)	Ποσοστό (%)
0 - 11,3	1
11,3 – 32	4
32 – 45	30
45 – 60	55
≈ 64	10

Σκύρα διαμέτρου μικρότερης των 30 mm ως και μεγαλύτερης των 65 mm επιτρέπονται με την προϋπόθεση ότι κάθε μία από τις κατηγορίες αυτές δεν υπερβαίνει σε ποσοστό επί του συνόλου το 5%.

2.3.3 Χαρακτηριστικά υποστρώματος του έρματος

2.3.3.1 Ιδιότητες και γενικά χαρακτηριστικά

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως σαν υπόστρωμα του έρματος (Πυργίδης, 2015), πρέπει να χαρακτηρίζονται από τις παρακάτω ιδιότητες:

- Αρκετά υψηλό μέτρο ελαστικότητας.
- Επαρκή σκληρότητα.
- Ανθεκτικότητα στον παγετό.
- Υδατοπερατότητα μικρότερη από αυτή του έρματος.
- Υδατοπερατότητα μεγαλύτερη από αυτή των άνω στρώσεων της υποδομής (εκτός εάν δεν παρατηρείται κίνδυνος ανόδου υπόγειου νερού από την υποδομή στις υπερκείμενες στρώσεις).

2.3.3.2 Υλικά – Διαστάσεις

Σαν υλικά υποστρώματος έρματος χρησιμοποιούνται συνήθως:

- Άμμος και χαλίκια ευρείας κοκκομετρικής διαβάθμισης (5/40 mm) που συνοδεύονται συνήθως απο στεγανά φύλλα πλαστικά.
- Σκωρίες

Τα υλικά πρέπει να περιέχουν σκληρά στοιχεία και να ικανοποιούν τις απαιτήσεις διαχωρισμού / προστασίας των στρώσεων έδρασης/υποδομής. Ειδικά για τις περιοχές που υπάρχει πρόβλημα παγετού η περιεκτικότητα σε άργιλο και ιλύ των στοιχείων που συνθέτουν το υπόστρωμα του έρματος πρέπει να είναι <5%.

Μερικές από τις λειτουργίες του υποστρώματος του έρματος μπορούν να εξασφαλισθούν επίσης με τα παρακάτω υλικά:

- Τσιμέντο, άσβεστος, φυσικό έδαφος σταθεροποιημένο με άσφαλτο.
- Ασφαλτικό σκυρόδεμα
- Γεωσυνθετικά υλικά(γεωμεμβράνες,γεωυφάσματα).

Σε γενικές γραμμές η επιλογή των υλικών και το πάχος του υποστρώματος του έρματος εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της υποδομής, τις κλιματολογικές συνθήκες και τα υδρολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

2.3.4 Υποδομή της γραμμής

Ως υποδομή (Πυργίδης, 2015), ορίζεται το αμέσως κάτω από την επιδομή, έδαφος ή στρώση διαμορφωμένη με υλικό επίχωσης, που διαμορφώθηκε και συμπυκνώθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις της παρούσας και τους λοιπούς συμβατικούς όρους.

Κύρια αποστολή της υποδομής είναι να παρέχει μια σταθερή θεμελίωση στη γραμμή.

Η επιρροή των τάσεων που οφείλονται στα φορτία κυκλοφορίας εκτείνεται μέχρι και τα 5m κάτω από την κατώτερη επιφάνεια των στρωτήρων δηλαδή πολύ πιο κάτω από το βάθος των στρώσεων της έδρασης. Σύμφωνα με μελέτες που έγιναν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το βάθος μέχρι το οποίο γίνονται αισθητά τα φαινόμενα από τη διέλευση των συρμών εκτείνεται μέχρι 2m περίπου κάτω από την άνω επιφάνεια της υποδομής.

Η υποδομή περιλαμβάνει συνήθως δύο στρώσεις:

- Τη στρώση διαμόρφωσης, ως ανώτερη στρώση, που τοποθετείται εφόσον το εδαφικό υλικό δεν είναι καλής ποιότητας.
- Την υπόβαση, ή πλατφόρμα, ή έδαφος θεμελίωσης, ως κατώτερη στρώση.

Η υποδομή, συγκριτικά με τα διάφορα στοιχεία της επιδομής, χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας με αποτέλεσμα να καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την όλη ελαστική συμπεριφορά και την ακαμψία της γραμμής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα της γεωμετρίας της γραμμής και τις ανάγκες συντήρησής της.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο κύριος ρόλος που επιτελεί η υποδομή είναι να εξασφαλίζει μια σταθερή θεμελίωση των στρώσεων της έδρασης και γενικότερα της επιδομής της γραμμής. Για το λόγο αυτό πρέπει να πληρεί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Να έχει ανθεκτικότητα στο παγετό.
- Να μην υπόκειται σε σημαντικές μεταβολές όγκου (διόγκωση, συρρίκνωση) σε περίπτωση αλλαγών της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό.
- Να εξασφαλίζει τη γραμμή από τον κίνδυνο γενικής ή σταδιακής θραύσης λόγω διάτμησης.

Ως στρώση έδρασης ορίζεται ως η ανώτερη στρώση της υποδομής που συμπυκνώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό συμπύκνωσης και ενίοτε κατασκευάζεται με υλικό ανώτερης κατηγορίας από το υπόλοιπο υλικό της υποδομής. Ο σκοπός της στρώσης διαμόρφωσης είναι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της υποδομής στην ανώτερη της στρώση και να επιτρέπει την απορροή των υπόγειων νερών που ενδεχόμενα να ανέλθουν από την υπόβαση (προς αυτού διαμορφώνεται εγκάρσια με κατάλληλη κλίση).

2.3.4.1 Ταξινόμηση της υποδομής ως προς την φέρουσα ικανότητα της

Για την ταξινόμηση της σιδηροδρομικής υποδομής (Πυργίδης,2015), ως προς τη φέρουσα ικανότητα της πρέπει:

- Πρώτα να εκτιμηθεί η ποιότητα του κάθε επί μέρους εδαφικού υλικού που αποτελεί.
- Στη συνέχεια να εκτιμηθεί η φέρουσα ικανότητα του συνόλου των εδαφικών στρώσεων που τη συνθέτουν (στρώση διαμόρφωσης και υπόβαση)

Η ταξινόμηση σε κατηγορίες των εδαφικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της σιδηροδρομικής υποδομής είναι μεταξύ άλλων απαραίτητη για τη διαστασιολόγηση του πάχους των στρώσεων του συστήματος «έδραση – υποδομή».

Κατηγορίες «ποιότητας» εδαφικών υλικών

Σύμφωνα με την κατάταξη που προτείνει η International Union of Railways (U.I.C) τα εδαφικά υλικά ως προς την ποιότητα τους διακρίνονται σε:

- Ακατάλληλα (QS0). Χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλες καθιζήσεις, ανομοιογένεια,ενδεχόμενη αλλοίωση των χαρακτηριστικών τους με το χρόνο και τέλος επιτρέπουν τη διείσδυση των σκύρων σε μεγάλο βάθος μέσα στην υποδομή. Σε περίπτωση εμφάνισης τέτοιων υλικών απαιτούνται σημαντικές βελτιωτικές επεμβάσεις.
- Κακά (QS1). Τα εδάφη αυτά παρουσιάζουν επίσης μεγάλες καθιζήσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή σιδηροδρομικής υποδομής ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στο πρόβλημα της αποστράγγισής τους.
- Μέτρια (QS2). Χαρακτηρίζονται από μέτρια συμπεριφορά στις καθιζήσεις και στην ανάληψη των φορτίων.
- Καλά (QS3). Χαρακτηρίζονται από μικρές καθιζήσεις και πολύ καλή συμπεριφορά στην ανάληψη φορτίων.

Στις παραπάνω κατηγορίες πρέπει να προστεθεί και η περίπτωση που η υποδομή αποτελείται από βραχώδη πετρώματα ικανοποιητικής αντοχής. Μια τέτοια υποδομή χαρακτηρίζεται σαν ποιότητας R.

Κατηγορίες υποδομής ως προς τη φέρουσα ικανότητα

Διακρίνονται τρεις κατηγορίες υποδομής.

P_1 κακή υποδομή

P_2 μέτρια υποδομή

P_3 καλή υποδομή

2.3.4.2 Στρώσεις της υποδομής και τοποθέτηση

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η υποδομή περιλαμβάνει συνήθως δύο στρώσεις:

- Τη στρώση διαμόρφωσης, σαν ανώτερη στρώση.
- Την υπόβαση, σαν κατώτερη στρώση.

Η στρώση διαμόρφωσης τοποθετείται όταν το έδαφος της υπόβασης δεν είναι καλής ποιότητας (QS1 ή QS2). Πρέπει να έχει βαθμό συμύκνωσης μεγαλύτερο από ότι η υπόβαση, ενώ θα πρέπει να αποτελείται από το έδαφος ομοιογενές και απηλλαγμένο από συγκεντρώσεις τοπικά λεπτόκοκκων στοιχείων.

Το πάχος της στρώσης διαμόρφωσης e_f καθορίζεται σε συνάρτηση με την ποιότητα της υποδομής και την επιθυμητή φέρουσα ικανότητά της (Πίνακας 1.2). Μπορεί να εκτείνεται και μέχρι 60 cm κάτω από τη βάση έδρασης.

Πίνακας 1.2: Φέρουσα Ικανότητα της υποδομής

Ποιότητα εδάφους υποδομής	Κατηγορία φέρουσας ικανότητας υποδομής	Χαρακτηριστικά στρώσης	
		Ποιότητα εδαφικών υλικών	Έλαχιστο πάχος στρώσης διαμόρφωσης e_f (m)
QS1	P1	QS1	-
	P2	QS2	0,50
	P2	QS3	0,35
	P3	QS3	0,50
QS2	P2	QS2	-
	P3	QS3	0,35
QS3	P3	QS3	-

Κεφάλαιο 3: Κλιματική Αλλαγή και Σιδηροδρομικά Επιχώματα

3.1 Ορισμός της «Κλιματικής Αλλαγής»

«Κλιματική Αλλαγή» ορίζεται ως η αλλαγή του κλίματος η οποία αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινη δραστηριότητα και διαμορφώνει την σύνθεση της παγκόσμιας ατμόσφαιρας και η οποία παρατηρείται και παρακολουθείται, επιπρόσθετα με την κλιματική βιοποικιλότητα, σε τακτά και συγκρίσιμα μεταξύ τους χρονικά διαστήματα. Θα μπορούσε κανείς να πει πως είναι το φαινόμενο που βιώνουμε όλοι μας όταν οι κλιματικές συνθήκες μεταβάλλονται μόνιμα, είτε ανοδικά είτε καθοδικά.

Όμως, είναι σημαντικό να τονίσουμε πως η κλιματική αλλαγή δεν περιλαμβάνει μόνο τις αλλαγές των κλιματικών συνθηκών. Λόγω αυτής ευθύνονται αλλαγές τόσο στην συχνότητα όσο και στην ένταση ακραίων κλιματικών φαινομένων όπως ξηρασίες, πλημμύρες, καταιγίδες αλλά και δυνατοί άνεμοι. Σημαντική είναι και η διάρκεια αυτών των ακραίων φαινομένων καθώς διαρκούν για εκτεταμένες χρονικές περιόδους, συνήθως δεκαετίες ή και περισσότερο.

Θα μπορούσε κανείς να πει πως ο πιο σημαντικός δείκτης, σχετικά με την κλιματική αλλαγή, στον οποίο στηρίζεται η πλειονότητα του επιστημονικού κόσμου είναι η μέση επιφανειακή θερμοκρασία της Γης. Οι αλλαγές που έχουν ήδη γίνει όσον αφορά την θερμοκρασία και τις κατακρημνίσεις (βροχοπτώσεις) έχουν σαν αποτέλεσμα την αυξημένη καταστροφικότητα και έκταση καταιγίδων, αυξημένες περιόδους ξηρασίας, άνοδο της στάθμης της θάλασσας και αντίστοιχες διαβρώσεις των ακτών αλλά και πλημμύρες περιοχών που βρίσκονται σε χαμηλό υψομετρικό επίπεδο σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας συμπεριλαμβανομένων και άλλων βιοφυσικών επιπτώσεων. Είναι ευνόητο πως η άνοδος της θερμοκρασίας και άλλες σχετικές αλλαγές πραγματοποιούνται σε διαφορετικό βαθμό και ρυθμό ανά περιοχή.

Το σημαντικό όμως είναι πως οι αλλαγές και τα φαινόμενα που αναφέρονται παραπάνω έχουν, και θα έχουν στο μέλλον σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό, μεγάλη επιρροή σε χώρες και κυρίως στο οικιστικό δυναμικό τους. Ιδίως χώρες με χαμηλό και μεσαίο οικονομικό δυναμικό,

όπου η δυνατότητα αντιμετώπισης ακραίων φαινομένων και κλιματικών αλλαγών είναι πολύ μικρή και ο αριθμός των ευπαθών πληθυσμών είναι αρκετά μεγάλος. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να τονίσουμε πως τόσο ανθρωπίνοι όσο και φυσικοί παράγοντες επηρεάζουν και συνεισφέρουν στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής (Mahmoud & Mahmoud, 2016).

Σχεδόν σε όλη την διάρκεια της ιστορίας, ο πλανήτης έχει υποστεί συχνά αλλαγές σχετικές με το κλίμα. Μόνο κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία αυξήθηκε κατά 0,6°C. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2001) στην τρίτη της Αξιολογική Έκθεση αναφέρει πως “Το κλιματικό σύστημα της Γης έχει αλλάξει δραματικά τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε περιφερειακό επίπεδο από την προ-βιομηχανική εποχή και μετά, με τις ανθρώπινες δραστηριότητες να ευθύνονται σε σημαντικό βαθμό γι’ αυτές τις αλλαγές” (IPCC, 2001). Οι ίδιες ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν οδηγήσει σε αύξηση της συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα καθώς και σε αλλαγές των χρήσεων γης, προκαλώντας έτσι περαιτέρω αύξηση στην μέση παγκόσμια θερμοκρασία της ατμόσφαιρας.

Επιπρόσθετα, στην επιστημονική βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται πληθώρα από άλλους δείκτες υψηλής σημαντικότητας, οι οποίοι μπορούν να περιγράψουν σε ικανοποιητικό βαθμό το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Κάποιοι από αυτούς είναι η σύνθεση των αερίων του θερμοκηπίου και πιο συγκεκριμένα η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), η επιφανειακή θερμοκρασία, οι κατακρημνίσεις οποιασδήποτε μορφής όπως βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις και χαλαζοπτώσεις, η στάθμη της θάλασσας, η μεταβλητότητα του κλίματος και η συχνότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων.

Σύμφωνα με την IPCC, οι κύριες πιθανές επιπτώσεις από τις ολοένα και αυξανόμενες ανόδους της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας θα είναι οι ακόλουθες (IPCC, 2001):

- Αλλαγή των προτύπων καθίζησης.
- Αλλαγή της συχνότητας, της έντασης και της εποχικότητας των ακραίων φαινομένων, όπως ξηρασίες, πυρκαγιές, πλημμύρες, καταιγίδες, τροπικούς κυκλώνες.
- Αύξηση της παγκόσμιας στάθμης της θάλασσας από 0,09 έως 0,88 m μέχρι και το 2100, με σοβαρές επιπτώσεις για τις παράκτιες περιοχές με χαμηλό υψόμετρο και τα νησιά.

- Αύξηση των επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και διάλυσή του στους ωκεανούς με αποτέλεσμα την αυξημένη θαλάσσια όξινηση.

Μιλώντας γενικά για το κλίμα και την κλιματική αλλαγή είναι ανάγκη να εξετάσουμε την επιστήμη της Μετεωρολογίας, σύμφωνα με την οποία η περιστροφή της Γης αλλά και η ηλιακή ακτινοβολία ευθύνονται για την δημιουργία των καιρικών συνθηκών. Λόγω των διαφορετικών εκπομπών θερμότητας από τη Γη μεταξύ των περιοχών της, δημιουργείται και διαφορά θερμοκρασίας με αποτέλεσμα να εμφανίζονται υψηλές και χαμηλές ζώνες πίεσης που με τη σειρά τους δημιουργούν την ατμοσφαιρική κυκλοφορία.

Επίσης, σημαντική επιρροή στο κλίμα της Γης προκαλεί ο καιρός. Αυτό είναι φυσιολογικό αν σκεφτεί κανείς πως το κλίμα αποτελεί την μέση τιμή των παραμέτρων που αποτελούν τον καιρό όπως είναι η υγρασία, η θερμοκρασία του αέρα, η χιονόπτωση, η βροχόπτωση, οι ταχύτητες των ανέμων αλλά και τα έντονα φαινόμενα (πλημμύρες, καταιγίδες).

Επιπροσθέτως, παράγοντες όπως το ηλιακό φως, η απόσταση από την θάλασσα καθώς και το ύψος πάνω από την επιφάνειά της επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό το κλίμα μιας περιοχής. Όσον αφορά το ηλιακό φως, σχετίζεται άμεσα με τον ισημερινό. Περιοχές κοντά στον ισημερινό δέχονται μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακού φωτός απ' ότι περιοχές κοντά στους πόλους γεγονός που επηρεάζει επίσης το κλίμα των περιοχών αυτών.

Είναι σημαντικό να τονίσει κάποιος πως ο προσδιορισμός του κλίματος της Γης γίνεται μέσω των φυσικών αλλά και των ανθρωπογενών παραγόντων και πως σε καμία χρονική στιγμή δεν παρατηρούμε σταθερότητα σε αυτό. Στην ουσία, η απορρόφηση και η αναδιανομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του συστήματος ατμόσφαιρα-υδρόσφαιρα-γη είναι η αιτία ύπαρξης του κλίματος. Πηγή της ενέργειας μέσω της οποίας διαμορφώνονται και επηρεάζονται τα καιρικά φαινόμενα είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Ένα ποσοστό περίπου στο 30% ανακλάται πίσω στο διάστημα και το υπόλοιπο απορροφάται από το πλανητικό σύστημα της Γης δηλαδή την ατμόσφαιρα, το ωκεάνιο σύστημα την χλωρίδα και την πανίδα.

Αυτού του είδους η ισορροπία μεταξύ εισερχόμενης και εξερχόμενης ακτινοβολίας είναι και αυτή που καθορίζει και προσδιορίζει το παγκόσμιο κλίμα. Έστω και μικρές αλλαγές σε παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για την εξερχόμενη ή εισερχόμενη ακτινοβολία προκαλούν και αλλαγή του κλίματος (IPCC, 2001).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής θα ασχοληθούμε με τις επιπτώσεις που προκαλεί αυτή στα σιδηροδρομικά επιχώματα και τις μεταφορές.

3.2 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο σιδηρόδρομο

Οι σιδηροδρομικές μεταφορές χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα ευάλωτες στις αλλαγές του κλίματος λόγω της σχετικής πολυπλοκότητας των διαφόρων υποσυστημάτων που τις απαρτίζουν (υποδομές, χρήσεις ενέργειας, επικοινωνία των δικτύων και σηματοδότηση) και της έκθεσής τους σε καιρικές συνθήκες. Οι κυριότερες απειλές στις σιδηροδρομικές μεταφορές είναι οι υψηλότερες θερμοκρασίες και τα ακραία καιρικά φαινόμενα όπως οι πλημμύρες και οι καταιγίδες. Οι επιπτώσεις αυτών των φαινομένων είναι ο αυξημένος κίνδυνος λυγισμού των σιδηροδρόμων, αστάθειας των επιχωμάτων και ζημιών στις γέφυρες.

Αρκετές μελέτες επισημαίνουν το εύρος των επιπτώσεων που έχουν ήδη αλλά και θα έχουν προβλεπόμενες αλλαγές του κλίματος στις σιδηροδρομικές μεταφορές. Αρχικά ο αυξημένος αριθμός ζεστών ημερών έχει ως επίπτωση των λυγισμό των σιδηροτροχιών, αποδυναμώνονται τα υλικά κατασκευής και παρατηρούνται δασικές πυρκαγιές οι οποίες προκαλούν ζημία στην υποδομή. Παρόλα αυτά όμως παρατηρείται και μία θετική επίπτωση καθώς αυξάνεται η ευστάθεια των επιχωμάτων της επιδομής. Έπειτα με την κλιματική αλλαγή παρατηρείται μείωση των κρύων ημερών η οποία έχει θετική επίπτωση στον σιδηρόδρομο διότι μειώνει τα κόστη συντήρησης των σιδηροδρομικών μεταφορών για τον χειμώνα. Επιπλέον, η έντονη βροχόπτωση έχει ως αρνητικές επιπτώσεις, πλημμύρες και κατολισθήσεις οι οποίες προκαλούν καταστροφές στις υποδομές αλλά έχει και μία θετική επίπτωση η οποία είναι η αύξηση της ευστάθειας των επιχωμάτων η απόδειξη της οποίας θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια.

3.2.1 Αστοχίες οφειλούμενες στην παρουσία του νερού

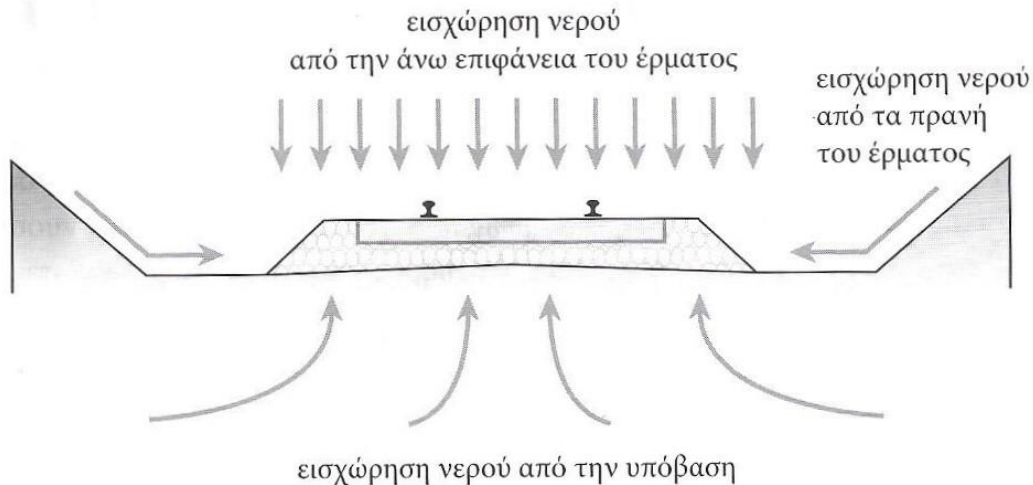
3.2.1.1 Τρόποι εισόδου του νερού στη γραμμή

Το νερό μπορεί να εισχωρήσει στο σύστημα έδραση – υποδομή με τρεις τρόπους (Πυργίδης, 2015):

- Κατακόρυφα, από την άνω επιφάνεια του έρματος. Πρόκειται για νερό της βροχής (ή χιόνι) που καταπίπτει απ' ευθείας επί της γραμμής και μέσω του έρματος εισχωρεί στα υποκείμενα στρώματα. Ο τρόπος αυτός εισόδου αφορά όλες τις περιπτώσεις κατασκευής της γραμμής (σε επίχωμα, σε όρυγμα, επί του επιπέδου του φυσικού εδάφους).
- Εγκάρσια, από τα πρηνή του έρματος και του υποστρώματος του έρματος. Πρόκειται για νερά που ρέουν επιφανειακά από τις παρακείμενες πλαγιές και καταλήγουν στη γραμμή χωρίς να εκτραπούν.

Σε περίπτωση που η φυσική στάθμη του νερού είναι, πριν την εκσκαφή του ορύγματος, υπεράνω του επιπέδου εκσκαφής τότε μέρος (ή ολόκληρο) του νερού εισέρχεται εγκάρσια στη γραμμή μπορεί να προέρχεται από υπόγεια νερά που διηθούνται εξέρχονται και εκρέουν από οποιοδήποτε σημείο της παρακείμενης πλαγιάς.

- Εκ των κάτω προς τα άνω, από την υπόβαση της υποδομής (Εικόνα 3.1). Πρόκειται για υπόγεια νερά που διηθούνται προς τα άνω και μπορεί να εισχωρήσουν σε υπερκείμενα στρώματα. Ο τρόπος αυτός εισόδου αφορά κυρίως τη γραμμή σε όρυγμα ωστόσο μπορεί να παρατηρηθεί και σε γραμμή κατασκευασμένη και σε επίχωμα. Στην τελευταία αυτή περίπτωση ο διαποτισμός της υπόβασης και των ανώτερων στρωμάτων οφείλεται σε ανύψωση του υπόγειου νερού λόγω τριχοειδών φαινομένων.



Εικόνα 3.1: Τρόποι εισόδου του νερού στη γραμμή (Πηγή: Πυργίδης, 2015)

Από τους τρεις παραπάνω τρόπους εισόδου του νερού που αναφέρθηκαν, μόνο ο πρώτος δεν μπορεί να αποφευχθεί. Οι άλλοι δύο μπορούν να αποτραπούν αν προβλεφθούν τα κατάλληλα συστήματα αποστράγγισης (ανοικτές τάφροι, στραγγιστήρια) και αν ακολουθηθούν και γίνουν σωστά όλες οι διαδικασίες που προβλέπονται στα στάδια της μελέτης και της κατασκευής.

Παρόλο που μέρος του έρματος μπορεί μερικές φορές να είναι στεγνό, γενικά το έρμα και σχεδόν πάντοτε το υπόστρωμα του έρματος και οι στρώσεις της υποδομής (υπόβαση, στρώση διαμόρφωσης) περιέχουν ένα ποσοστό υγρασίας.

3.2.2 Προϋποθέσεις εξόδου του νερού από τη γραμμή

Το νερό της βροχής που καταπίπτει απ' ευθείας επί της γραμμής και εισέρχεται στο έρμα πρέπει να εξέλθει χωρίς να διαποτίσει, αν είναι δυνατόν, την υποδομή (Πυργίδης, 2015). Αυτό σημαίνει εγκάρσια ροή προς τα έξω μέσω του έρματος και σε κάποιο βαθμό μέσω του υποστρώματος του έρματος (κανονικά το 80% του νερού της βροχής που εισέρχεται πρέπει να εξέρχεται στο επίπεδο έρματος – υποστρώματος

έρματος ενώ το 20% να απομακρύνεται στο επίπεδο υποστρώματος έρματος – υποδομής).

Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Μειωμένη υδατοπερατότητα των στρώσεων όσο προχωρούμε από το έρμα προς την υπόβαση.
- Διατήρηση της καθαρότητας του έρματος έτσι ώστε το εισερχόμενο σ' αυτό νερό να αποστραγγίζεται άμεσα και γρήγορα.
- Κατάλληλη εγκάρσια διαμόρφωση της άνω επιφάνειας του υποστρώματος του έρματος και της υποδομής (κλίση 3-5%).
- Εξασφάλιση «οδού» εξόδου του νερού από την υποδομή.

Το νερό κατά την έξοδο του από το σύστημα «έδραση - υποδομή» πρέπει να μην κινδυνεύει να παγιδευτεί. Ένα κατάλληλο έρμα και υπόστρωμα έρματος μπορούν να αποδειχθούν ανεπαρκή αν περιορίζονται πλευρικά και από κάτω από εδάφη μικρής υδατοπερατότητας.

Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να προκύψει αν δεν είναι καθαρό το αντέρεισμα του έρματος ή αν έχουν δημιουργηθεί στην υποδομή θύλακες.

Όσον αφορά τα υπόγεια νερά που διηθούνται προς τα άνω και μπορεί να εισχωρήσουν μέσω της υπόβασης στα υπερκείμενα στρώματα η συλλογή τους επιτυγχάνεται με εγκάρσια στραγγιστήρια.

Η παρουσία πλεονάζουσας ποσότητας νερού στη γραμμή, ειδικά στην περίπτωση που δημιουργείται κατάσταση κορεσμού, μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες που θέτουν σε κίνδυνο την κυκλοφορία και γενικότερα επιβαρύνουν σημαντικά το κόστος και τις ανάγκες συντήρησης της γραμμής.

3.2.3 Λάσπωμα του έρματος – Αναπηδώντες στρωτήρες – Αποσταθεροποίηση γραμμής

Το «λάσπωμα» του έρματος και οι επιβλαβείς συνέπειες για τη γραμμή που αυτό συνεπάγεται (Πυργίδης, 2015), μπορεί να προέλθει είτε από

φθορά της άνω στρώσης της υποδομής (α), είτε από θρυμματισμό των σκύρων (β).

(α) η φθορά τοπικά της άνω επιφάνειας της υποδομής από τις υπερκείμενες στρώσεις της έδρασης παρουσία νερού μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία λάσπης στη διαχωριστική επιφάνεια έρματος/υποδομής. Τα φορτία κυκλοφορίας μπορούν να προκαλέσουν την άντληση (ανύψωση) αυτής της λάσπης και την εισχώρηση της στο έρμα. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται συνήθως όταν το έρμα επικάθεται απ'ευθείας σε σκληρά λεπτόκοκκα υλικά (άργιλος) ή μαλακά πετρώματα της υποδομής (κιμωλία). Αν η λάσπη ανέλθει μέχρι τη διαχωριστική επιφάνεια στρωτήρων/έρματος τότε οι επαναλαμβανόμενες βυθίσεις των στρωτήρων εντός του λασπώδους έρματος (λόγω των φορτίων κυκλοφορίας), μπορούν να προκαλέσουν, ύψος των στρωτήρων, την έξοδο της λάσπης στην ελεύθερη επιφάνεια του έρματος (pumping effect).

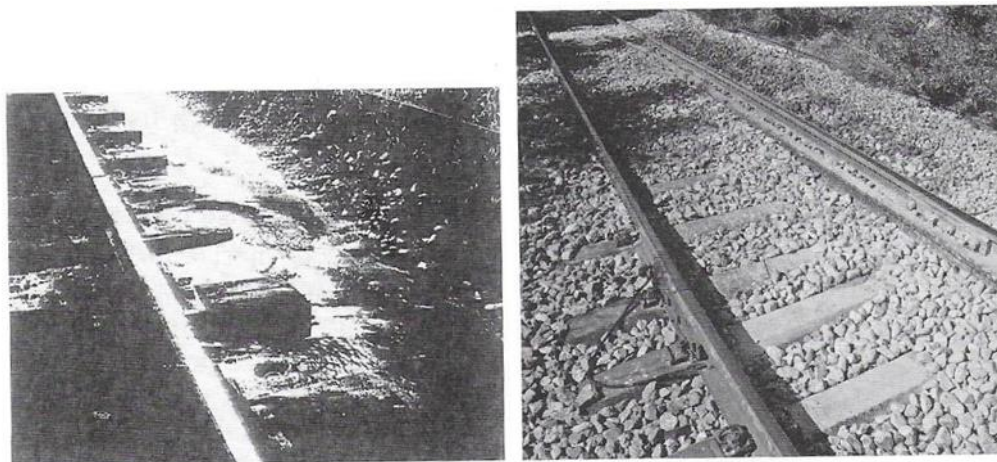
Η κατάσταση αυτή είναι γνωστή σαν «αναπηδώντες στρωτήρες/στρωτήρες που χωρεύουν» ή «αποσταθεροποίηση γραμμής» (pumping or dancing sleeper (track)) (Εικόνα 3.3) και μπορεί να οδηγήσει:

- σε μείωση, έως απώλεια της εγκάρσιας αντίστασης της γραμμής,
- στη δημιουργία οριζοντιογραφικών και υψομετρικών σφαλμάτων γραμμής,
- στην απόφραξη του συστήματος της εγκάρσιας (πλευρικής) αποστράγγισης της γραμμής,
- σε κατακερματισμό του έρματος και σε φθορά των στρωτήρων.

Η αστοχία αυτή μπορεί να αντιμετωπισθεί αν μεταξύ έρματος – υποδομής παρεμβληθεί μια προστατευτική στρώση από αμμοχάλικο (υπόστρωμα έρματος). Παράλληλα πρέπει να εξασφαλίζεται, αν είναι δυνατόν, η διατήρηση της στάθμης του υπόγειου νερού κάτω από τη διαχωριστική επιφάνεια έρματος/υποδομής.

(β) Τα φορτία κυκλοφορίας μπορούν να προκαλέσουν, σε περίπτωση που τα σκύρα του έρματος δεν έχουν την απαιτούμενη σκληρότητα, θρυμματισμό των σκύρων. Η λεπτή σκόνη που δημιουργείται μετατρέπεται, παρουσία του νερού της βροχής, σε λάσπη που διαβιβρώσκει τους στρωτήρες και το έρμα, δημιουργώντας κενά κάτω

από τους στρωτήρες.Υπό την επίδραση την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας η λάσπη εξέρχεται στην ελεύθερη επιφάνεια του έρματος συμπαρασύροντας και μέρος των σκύρων γύρω από τους στρωτήρες (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Έξοδος λάσπης στην ελεύθερη επιφάνεια του έρματος
(Πηγή: Πυργίδης,2015)

3.2.4 Δημιουργία θυλάκων στην υποδομή

Η παρουσία νερού στην υποδομή μειώνει την αντοχή της.Τα ακατάλληλα υλικά της υπόβασης (άργιλος, ιλύς) και το μικρό πάχος του έρματος που αδυνατεί να κατανέμει τα φορτία της κυκλοφορίας, επιβοηθούν την εισχώρηση των σκύρων εντός της υποδομής και το σχηματισμό των λεγόμενων θυλάκων (ballast rockets) (Σχήμα 1.4).

Το μίγμα που δημιουργείται παρουσιάζει αυξημένη υδατοπερατότητα ενώ η ημικυκλική του μορφή συγκρατεί (παγιδεύει) τα νερά της βροχής.Παράλληλα παρατηρείται διόγκωση των πρανών και σε προχωρημένα στάδια,αποκοπή τους.

Οι θύλακες είναι μεγαλύτεροι κάτω απο τους στρωτήρες που παρουσιάζουν αυξομειώσεις ως προς τον όγκο τους ανάλογα με το αξονικό φορτίο,την ταχύτητα των συρμών και την πυκνότητα της κυκλοφορίας.Αναγωρίζονται αρχικά από τη μείωση ή έλλειψη έρματος και στη συνέχεια από τη διόγκωση των πρανών.

Ο καλύτερος τρόπος για την αντιμετώπιση του προβλήματος των θυλάκων, όταν αυτό είναι ιδιαίτερα σοβαρό, είναι η μετακίνηση της επιδομής της γραμμής και η ανακατασκευή της υποδομής. Σε λιγότερο προχωρημένα στάδια μπορεί απλά να μορφοποιεί εκ νέου η άνω επιφάνεια της υποδομής (διαμόρφωση εγκάρσιων κλίσεων) και να αντικατασταθούν το υπόστρωμα του έρματος και το έρμα.

3.2.5 Επιπτώσεις λόγω παγετού

Όταν το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση παγετού τότε το νερό των πόρων μετατρέπεται σε πάγο με αποτέλεσμα να αυξηθεί το μέτρο ελαστικότητας της γραμμής (Πυργίδης, 2015). Όταν το έδαφος δεν είναι κορεσμένο η διόγκωση του νερού λόγω της πήξης προκαλεί συμπίεση των κενών με αποτέλεσμα η μεταβολή του όγκου του εδάφους να είναι μικρή. Αν μάλιστα η διαδικασία της πήξης δεν συνοδεύεται από μετακίνηση νερού τότε μετά από αποπάγωση του εδάφους η περιεκτικότητα σε νερό και οι ιδιότητες του δεν μεταβάλλονται σε σχέση με την αρχική κατάσταση.

Εν τούτοις όταν το νερό των κόκκων παγώνει παρατηρείται γύρω από τα λεπτόκοκα στοιχεία του εδάφους μια ελάττωση του νερού επιρρόφησης που συγκρατείται μεταξύ των κόκκων. Εάν ο ρυθμός πήξης και ο ρυθμός μετακίνησης του νερού είναι σε κάποια σχετική αναλογία τότε οι κρύσταλλοι του πάγου στο μέτωπο του παγετού μετατρέπονται σε «φακούς» πάγου που πιέζουν τα εδαφικά στοιχεία και προκαλούν μια περαιτέρω διόγκωση του εδάφους από αυτήν που προκαλείται από την πήξη του νερού. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται «διόγκωση κατά την πήξη» (frost heave) έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του εδάφους τοπικά που με τη σειρά της μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαφορετικές καθιζήσεις της γραμμής.

Όταν λειώνει ο πάγος παραμένει μια ποσότητα πλεονάζοντος νερού που μειώνει την αντοχή του εδάφους. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποπάγωσης (thaw softening) παρατηρούνται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις που οδηγούν συνήθως σε γρήγορη απώλεια της γεωμετρίας της γραμμής.

Προκειμένου να εμφανισθούν τα παραπάνω προβλήματα τρεις προϋποθέσεις πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα:

- θερμοκρασία παγετού στο έδαφος
- παρουσία νερού
- έδαφος ευαίσθητο στο παγετό

Η μη παρουσία πλεονάζοντος νερού αντιμετωπίζεται με ένα καλό σύστημα αποστράγγισης

Η αποτροπή της ανάπτυξης θερμοκρασίας παγετού στο έδαφος εξασφαλίζεται με την προστασία του ευαίσθητου στον παγετό εδάφους από ένα υπερκείμενο, ικανού πάχους, στρώμα από μη ευαίσθητο στον παγετό υλικό.

Από τη μέχρι τώρα αποκτηθείσα εμπειρία τα πλέον ευαίσθητα εδάφη σε παγετό είναι αυτά που περιέχουν σε υψηλό ποσοστό ιλύ, λιγότερο ευαίσθητα αυτά που περιέχουν άργιλο, ενώ συμπεριφέρονται γενικά καλά τα αμμώδη και χαλικώδη εδάφη χωρίς λεπτόκκοκα στοιχεία.

3.3 Αστοχίες οφειλούμενες σε άλλα αίτια

3.3.1 Στροβιλισμός έρματος

Ειδικά στις γραμμές όπου οι συρμοί κινούνται με υψηλές ταχύτητες η πτώση από τα οχήματα διαφόρων στερεών αντικειμένων (π.χ. κομμάτια πάγου) πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια του έρματος μπορεί να προκαλέσει ανατάραξη (περιδίνηση) των σκύρων με κίνδυνο να προκληθούν φθορές τόσο στη γραμμή όσο και στο τροχαίο υλικό. Για το λόγο αυτό το έρμα μεταξύ των στρωτήρων (στην περιοχή πλήρωσης) πρέπει να αφαιρείται σε ύψους 3-6cm κάτω από την ανώτατη επιφάνεια των στρωτήρων.

3.3.2 Καθίζηση της υποδομής

Η καθίζηση της υποδομής μπορεί να προκληθεί από διάφορες αιτίες:

- Στερεοποίηση λόγω του ίδιου βάρους του εδάφους ή λόγω πτώσης της στάθμης των υπόγειων νερών.

- Συρρίκνωση/διόγκωση λόγω μεταβολής της περιεκτικότητας σε νερό.
- Σταδιακή παραμόρφωση λόγω των επαναλαμβανόμενων φορτίων κυκλοφορίας.

Η καθίζηση είναι συνήθως διαφορετική κατά μήκος και εγκάρσια της γραμμής και μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση της γεωμετρίας της γραμμής.

3.3.3 Ολική και σταδιακή θραύση της υποδομής

Δύο αστοχίες που μπορούν να συμβούν στη γραμμή είναι η ολική και η σταδιακή θραύση της υποδομής. Οι αστοχίες αυτές ενεργοποιούνται από τα φορτία της κυκλοφορίας, το βάρος της επιδομής και το μη εξισορροπημένο βάρος της υποδομής, ενώ εμποδίζονται από την αντίσταση σε διάτμηση που παρουσιάζουν οι στρώσεις της υποδομής. Επειδή η ζώνη θραύσης βρίσκεται ουσιαστικά στο επίπεδο της υποδομής, η μηχανική αντοχή της υποδομής παίζει καθοριστικό ρόλο.

Η ολική θραύση μπορεί να συμβεί ανεξάρτητα από τα φορτία κυκλοφορίας λόγω απώλειας της μηχανικής αντοχής της υποδομής όταν η περιεκτικότητα σε νερό είναι ιδιαίτερα μεγάλη (περίοδος έντονων βροχοπτώσεων, πλημμυρών).

Η σταδιακή θραύση συνήθως λαμβάνει χώρα για αναπτυσσόμενες τάσεις μικρότερες από αυτές που προκαλούν την ολική θραύση και παρατηρείται στα ανώτερα στρώματα της υποδομής. Το έδαφος διαρρέει πλευρικά προς τα επάνω και κάτω από τη γραμμή.

Η σταδιακή θραύση συνήθως συμβαίνει όταν τα υλικά υποδομής είναι λεπτόκοκκα, μικρής τιμής εσωτερικής τριβής (άργυλος) και μπορεί να αντιμετωπισθεί με:

- την τοποθέτηση μιας ικανού πάχους στρώσης κοκκώδους υλικού μεταξύ των στρωτήρων και της υποδομής,
- ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου ύδατος

Κεφάλαιο 4: Εκτίμηση ευστάθειας πρανών με αναλυτικές μεθόδους

Το κεκλιμένο έδαφος μπορεί να γίνει ασταθές αν τα φορτία βαρύτητας που δρουν σε μια εδαφική μάζα υπερβαίνουν τη διατμητική αντοχή η οποία είναι διαθέσιμη στη βάση της μάζας και μέσα σε αυτή. Στην περίπτωση αυτή θα συμβεί καθοδική κίνηση της μάζας του εδάφους του πρανού.

Το έδαφος έχει χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο για πολλούς κατασκευαστικούς σκοπούς σε χιλιάδες χρόνια. Οι κυριότερες γεωκατασκευές μπορούν να ταξινομηθούν ως:

- Εκσκαφές
- Ορύγματα
- Επιχώματα
- Χωμάτινα φράγματα
- Σωροί απορριμάτων και φράγματα από άχρηστα μεταλλείων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει εκτενέστατη περιγραφή για τα επιχώματα και συγκεκριμένα για τα σιδηροδρομικά επιχώματα.

Τα επιχώματα σχηματίζονται με τη συσσώρευση υλικού επίχωσης επάνω από την επιφάνεια του εδάφους, με κεκλιμένες πλευρές, συνήθως για να υποστηρίξουν έναν αυτοκινητόδρομο ή σιδηροδρομικές γραμμές όπως στην περιπτωσή μας.

Οι συνθήκες αντοχής και τα υπόγεια νερά σε ένα επίχωμα μπορούν να ελεγχθούν σε κάποιο βαθμό με τη χρήση υλικού καλής ποιότητας και μέτρα αποστράγγισης, οπότε η ευστάθεια των πρανών του επιχώματος θα είναι πιο εξασφαλισμένη. Όμως, οι συνθήκες του εδάφους και του νερού κάτω από το επίχωμα καθορίζονται από τη φυσική γεωλογία της τοποθεσίας, και έτσι πρέπει να εξετάζεται η πιθανότητα αστοχίας της θεμελίωσης.

Οι τρόποι αστοχίας είναι συνήθως περιστροφική ή σύνθετη ολίσθηση, συχνά με κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης, αλλά μερικές φορές και με μη κυκλικές, ανάλογα με τη στρωματογραφία της θέσης. Οι αστοχίες των θεμελίων κάτω από το επίχωμα είναι πιο πιθανές κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Οι δυο βασικές μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτή του απειρομήκης πρανούς με επίπεδη επιφάνεια αστοχίας και αυτή του πρανούς πεπερασμένου ύψους με επίπεδη επιφάνεια αστοχίας η οποία είναι η πιο ρεαλιστική και συμβατική με την πραγματικότητα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μελέτη της ευστάθειας με την αναλυτική μέθοδο, καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα που εξήχθησαν μέσω της χρήσης του υπολογιστικού εργαλείου Excel.

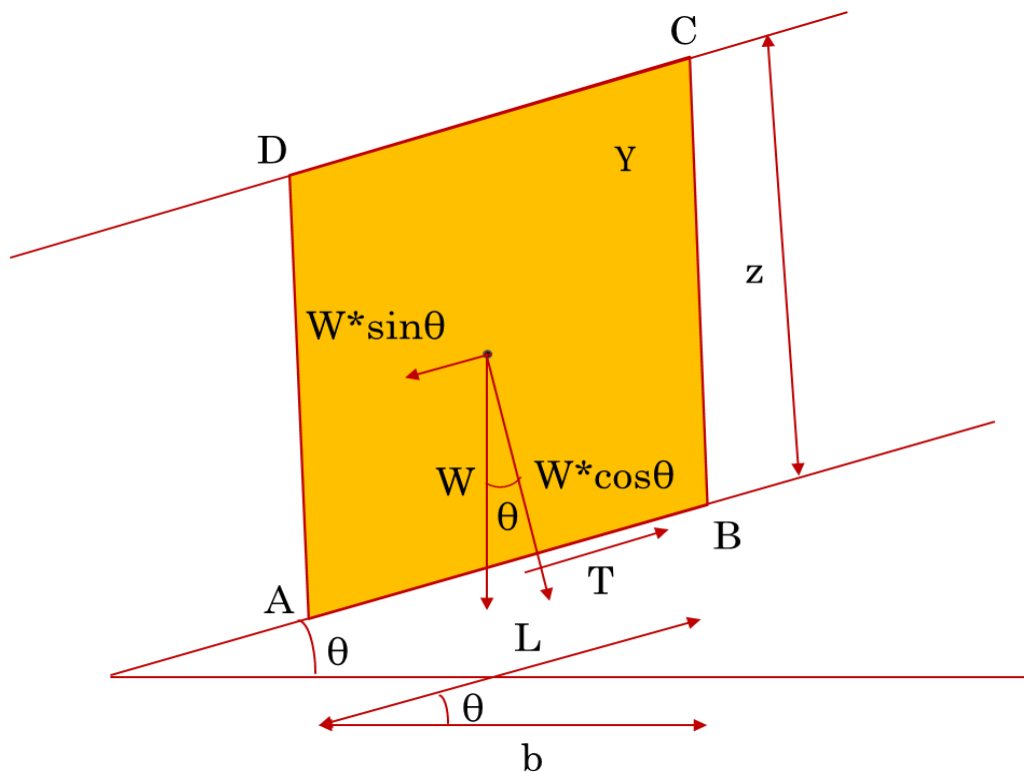
4.1 Απειρομήκης πρανές με επίπεδη επιφάνεια αστοχίας

Ως απειρομήκη χαρακτηρίζονται τα πρανή των οποίων το μήκος είναι πολύ μεγάλο και τα όρια τους δεν είναι ευκρινή. Συνήθως, ο όρος αναφέρεται σε πλαγιές βουνών με μικρού βάθους επιφάνειες αστοχίας, οι οποίες είναι παράλληλες της επιφάνειας του πρανούς. Αποτελεί την απλούστερη μορφή πρανούς που μπορεί να αναλυθεί, ενώ πρακτικά δεν χρησιμοποιείται συχνά, καθώς τα περισσότερα πρανή που συναντώνται στη φύση θεωρούνται πεπερασμένα λόγω του μεγέθους τους. Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε αφορά απειρομήκη πρανή, υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες. Για τα χερσαία πρανή πραγματοποιήθηκε επιπλέον ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, υπό στατικές συνθήκες.

Αυτή η μέθοδος υποθέτει μετακίνηση μιας μάζας εδάφους επάνω από μία μόνον επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης παράλληλη στην επιφάνεια του εδάφους, και αγνοεί τα φαινόμενα στα άκρα και τις πλευρές. Η ανάλυση αυτού του είδους εφαρμόζεται περισσότερο σε κοκκώδη εδάφη, μη συνεκτικά εδάφη ($c'=0$), εδάφη με διατρωμάτωση ή στρωσιγενή με κλίση παράλληλα στο πρανές, εδάφη με διαβρωμένες διατομές οι οποίες δημιουργούν ανώτερους ασθενέστερους ορίζοντες, και πρανή που έχουν ήδη μια αβαθή “πλάκα” ολίσθησης τέτοια ώστε η διατμητική αντοχή στην επιφάνεια ολίσθησης να έχει μειωθεί στην παραμένουσα τιμή της.

4.1.1 Περίπτωση 1: Χωρίς Νερό, Χωρίς Σεισμό

Θεωρούμε ένα κατακόρυφο τμήμα εδάφους με πλάτος b και μοναδιαίο πάχος, σε ένα πρανές με κλίση β (Σχήμα 4.1)



Σχήμα 4.1: Απειρομήκης πρανές χωρίς νερό και χωρίς σεισμό

Στη διεπιφάνεια AB ισχύει από ισορροπία δυνάμεων:

$$b = L * \cos\theta \quad (4.1)$$

$$W = (ABCD) * \gamma = (b * z * 1) * \gamma \quad (4.2)$$

Η ορθή τάση στη επιφάνεια υπολογίζεται απο τον τύπο:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{W * \cos\theta}{L * 1} = \frac{b * z * 1 * \gamma * \cos\theta}{\frac{b}{\cos\theta}} = z * \gamma * \cos^2 \theta \quad (4.3)$$

$$N = W * \cos\theta \quad (4.4)$$

Η διατμητική τάση στην επιφάνεια υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\tau = \frac{T}{L*1} = \frac{b*z*\gamma*1*\sin\theta}{\frac{b}{\cos\theta}} = b * z * \gamma * \sin\theta * \cos\theta \quad (4.5)$$

$$T = W * \sin\theta = b * z * \gamma * \sin\theta \quad (4.6)$$

Το «αίτιο» που ωθεί την επιφάνεια ABCD να αστοχήσει από το υπόλοιπο πρανές είναι η διατμητική αντοχή :

$$\tau = z * \gamma * \sin\theta * \cos\theta \quad (4.7)$$

$$FSst = \frac{\text{"αντίσταση"}}{\text{"αίτιο"}} = \frac{c' + \sigma * \tan\phi}{\tau} = \frac{c' + z * \gamma * \cos\theta * \tan\phi}{z * \gamma * \sin\theta * \cos\theta} \quad (4.8)$$

$$FSst = \frac{\frac{c'}{\cos\theta} + \gamma * \tan\phi}{z * \gamma * \tan\theta} = \frac{\tan\phi}{\tan\theta} + \frac{c'}{z * \gamma * \tan\theta * \cos^2\theta} \quad (4.9)$$

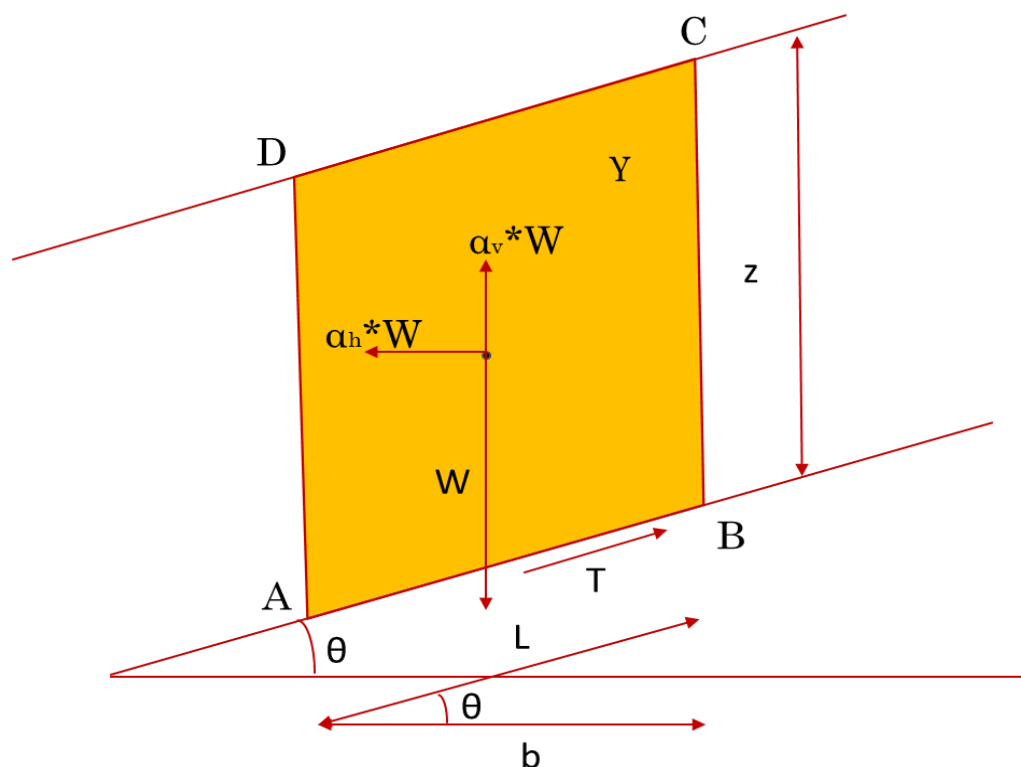
Ειδικές περιπτώσεις:

$$\alpha) c'=0, \phi \neq 0 \Rightarrow FSst = \frac{\tan\phi}{\tan\theta} \quad (4.10)$$

$$\alpha) c'=c_u, \phi=0 \Rightarrow FSst = \frac{c_u}{z*\gamma*\sin\theta*\cos\theta} \quad (4.11)$$

4.1.2 Περίπτωση 2: Χωρίς Νερό, Με Σεισμό

Στην περίπτωση του σεισμού έχουμε δυο επιπλέον δυνάμεις οφειλούμενες στο σεισμό την οριζόντια δύναμη α_h και την κάθετη δύναμη α_v .



Σχήμα 4.2: Απειρομήκες πρανές χωρίς νερό, με σεισμό

Το πρώτο βήμα της ανάλυσης ήταν η κατάστρωση των αναλυτικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Για την δημιουργία των εξισώσεων, θεωρήθηκε μια λωρίδα απειρομήκους πρανούς, πλάτους b , μήκους l και ύψους h . Το βάρος της λωρίδας υπολογίστηκε ως:

$$W = \gamma * b * z \quad (4.12)$$

Στη διεπιφάνεια AB ισχύει ότι η ορθή τάση είναι ίση με:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{N}{L * 1} = \frac{b * z * \gamma * [(1 - a_v) * \cos\theta - a_h * \sin\theta]}{\frac{b}{\cos\theta}} \\ &= z * \gamma * [(1 - a_v) * \cos^2\theta - a_h * \sin\theta]\end{aligned}\quad (4.13)$$

$$\begin{aligned}N &= W * \cos\theta - a_v * W * \cos\theta - a_h * W * \sin\theta \\ &= W * [(1 - a_v) * \cos\theta - a_h * \sin\theta]\end{aligned}\quad (4.14)$$

$$N = b * z * \gamma * [(1 - a_v) * \cos\theta - a_h * \sin\theta]\quad (4.15)$$

Η διατμητική τάση στην επιφάνεια ορίζεται ως:

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{T}{L * 1} = \frac{b * z * \gamma * [(1 - a_v) * \sin\theta + a_h * \cos\theta]}{\frac{b}{\cos\theta}} \\ &= z * \gamma * [(1 - a_v) * \sin\theta * \cos\theta + a_h * \cos^2\theta]\end{aligned}\quad (4.16)$$

$$\begin{aligned}T &= W * \sin\theta + a_h * W * \cos\theta - a_v * W * \sin\theta \\ &= W * [(1 - a_v) * \sin\theta + a_h * \cos\theta]\end{aligned}\quad (4.17)$$

$$T = b * z * \gamma * [(1 - a_v) * \sin\theta + a_h * \cos\theta]\quad (4.18)$$

Το «αίτιο» που ωθεί το ABCD να αστοχήσει από το υπόλοιπο πρανές είναι η διατμητική τάση:

$$\tau = z * \gamma * [(1 - a_v) * \sin\theta * \cos\theta + a_h * \cos^2\theta]\quad (4.19)$$

$$\begin{aligned}
FSps &= \frac{\text{"αντίσταση"}}{\text{"αίτιο"}} = \frac{c' + \sigma * \tan\varphi}{\gamma * z * (\sin\theta * \cos\theta + a_h * \cos^2 \theta)} \\
&= \frac{c' + \gamma * z * [(1 - a_v) * \cos^2 \theta - a_h * \sin\theta * \cos\theta] * \tan\varphi}{\gamma * z * [(1 - a_v) * \sin\theta * \cos\theta + a_h * \cos^2 \theta]} \quad (4.20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
FSps &= \frac{c' + \gamma * z * \cos^2 \theta [(1 - a_v) - a_h * \tan\theta] * \tan\varphi}{\gamma * z * \cos^2 \theta * [(1 - a_v) * \tan\theta + a_h]} \\
&= \frac{[(1 - a_v) - a_h * \tan\theta] * \tan\varphi}{(1 - a_v) * \tan\theta + a_h} \\
&\quad + \frac{c'}{\gamma * z * \cos^2 \theta * [(1 - a_v) * \tan\theta + a_h]} \quad (4.21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
FS &= \frac{[(1 - a_v) - a_h * \tan\theta] * \tan\varphi}{(1 - a_v) * \tan\theta + a_h} \\
&\quad + \frac{c'}{\gamma * z * [(1 - a_v) * \sin\theta * \cos\theta + a_h * \cos^2 \theta]} \quad (4.22)
\end{aligned}$$

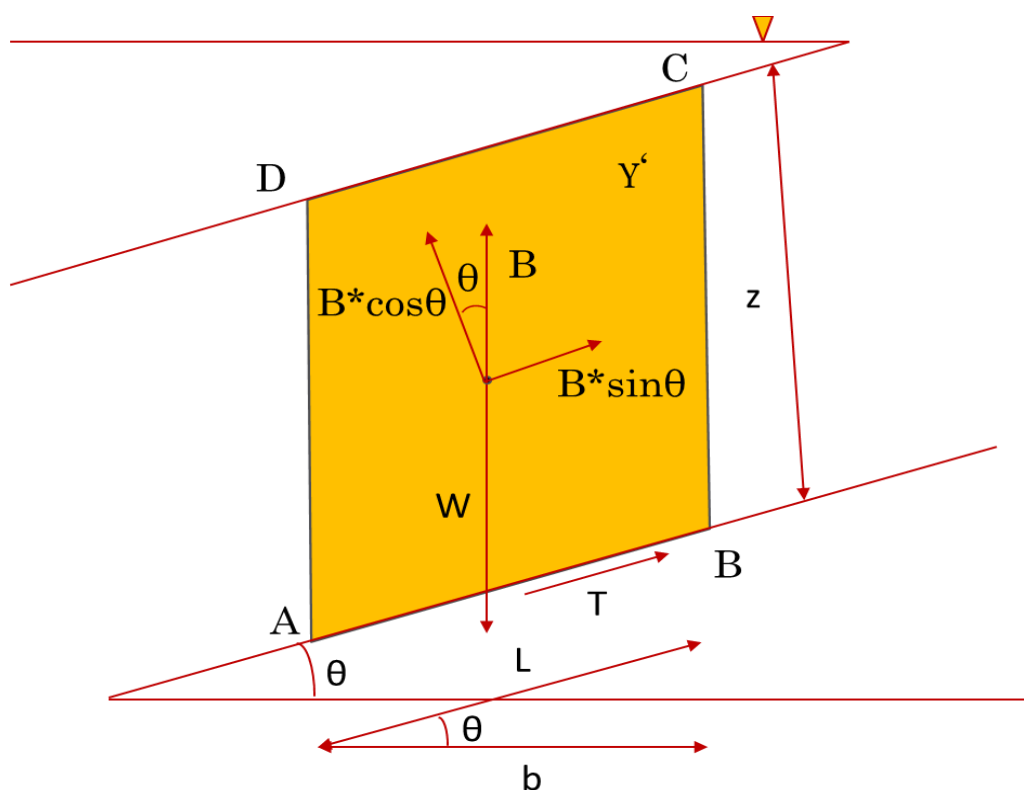
Ειδικές Περιπτώσεις:

$$\alpha) c' = 0, \phi \neq 0 \Rightarrow FSps = \frac{[(1 - a_v) - a_h * \tan\theta] * \tan\varphi}{(1 - a_v) * \tan\theta + a_h} \quad (4.23)$$

$$\alpha) c' = c_u, \phi = 0 \Rightarrow FSps = \frac{c_u}{\gamma * z * [(1 - a_v) * \sin\theta * \cos\theta + a_h * \cos^2 \theta]} \quad (4.24)$$

4.1.3 Περίπτωση 3: Με Νερό, Χωρίς Σεισμό

Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα εξετάσουμε την κατάσταση στην οποία το πρανές είναι όλο βυθισμένο στο νερό, δηλαδή ο υδροφόρος ορίζοντας είναι σε οριζόντια θέση (Σχήμα 4.3) και όχι την περίπτωση της ροής κατά την οποία ο υδροφόρος ορίζοντας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.3: Απειρομήκης πρανές με νερό, χωρίς σεισμό

Σύμφωνα με την αρχή του Αρχιμήδη για την δύναμη της άνωσης B ισχύει:
 $B = \rho_v * g * V$

Όμως $\rho = \frac{m}{V}$ και $\gamma = \frac{W}{V}$ τότε έχουμε $\gamma = \frac{m * g}{V} = \frac{\rho * g * V}{V} = \rho * g$

$$\gamma_w = \rho_v * g$$

Άρα

Τελικά ισχύει: $B = \gamma_w * V = \gamma_w * (ABCD) * 1 = \gamma_w * b * z$

Επιπλέον ισχύει $\gamma' = \gamma - \gamma_w = \gamma - 10$

Στην διεπιφάνεια AB ισχυεί:

Η ορθή τάση δίνεται απο την σχέση:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{N}{A} = \frac{(\gamma - \gamma_w) * b * z * \cos\theta}{L * 1} = \frac{(\gamma - \gamma_w) * b * z * \cos\theta}{\frac{b}{\cos\theta}} \\ &= \gamma' * z * \cos^2 \theta\end{aligned}\quad (4.25)$$

$$\begin{aligned}N &= W * \cos\theta - B * \cos\theta = (W - B) * \cos\theta \\ &= (\gamma * z * b * 1 - \gamma_w * b * z * 1) \\ &= (\gamma - \gamma_w) * b * z * \cos\theta\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{T}{L * 1} = \frac{(\gamma - \gamma_w) * b * z * \sin\theta}{\frac{b}{\cos\theta}} \\ &= \gamma' * z * \sin\theta * \cos\theta\end{aligned}\quad (4.27)$$

$$T = W * \sin\theta - B * \sin\theta = (W - B) * \sin\theta = \gamma' * b * z * \sin\theta\quad (4.28)$$

Το “αίτιο” που ωθεί το ABCD να αστοχήσει από το υπόλοιπο πρανές είναι η διατμητική τάση:

$$\tau = \gamma' * z * \sin\theta * \cos\theta\quad (4.29)$$

$$FS'_{st} = \frac{\text{"αντίσταση"}}{\text{"αίτιο"}} = \frac{c' + \sigma * \tan\phi'}{\tau} = \frac{c' + \gamma' * z * \cos^2 \theta * \tan\phi'}{\gamma' * z * \sin\theta * \cos\theta}\quad (4.30)$$

$$\begin{aligned}
 FS'st &= \frac{\frac{c'}{\cos^2 \theta} + \gamma' * z * \tan \varphi}{\gamma' * z * \tan \theta} \\
 &= \frac{\tan \varphi'}{\tan \theta} + \frac{c'}{\gamma' * z * \tan \theta * \cos^2 \theta}
 \end{aligned}
 \tag{4.31}$$

$$FS'st = \frac{\tan \varphi'}{\tan \theta} + \frac{c'}{\gamma' * z * \sin \theta * \cos \theta}
 \tag{4.32}$$

Ειδικές Περιπτώσεις

$$\alpha) c'=0, \varphi \neq 0 \Rightarrow FS'st = \frac{\tan \varphi'}{\tan \theta}
 \tag{4.33}$$

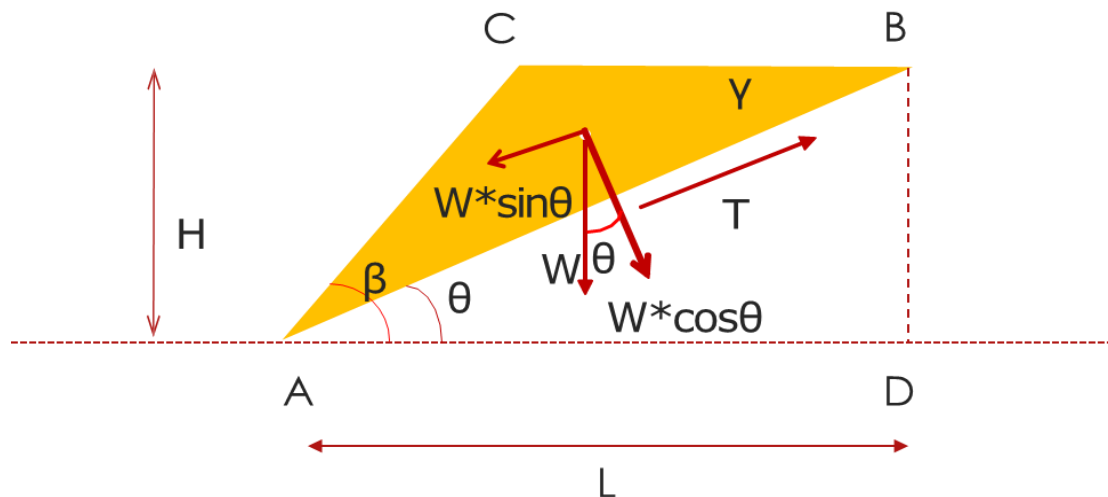
$$\beta) c'=c_u, \varphi = 0 \Rightarrow FS'st = \frac{c_u}{\gamma' * z * \sin \theta * \cos \theta}
 \tag{4.34}$$

4.2 Πρανές πεπερασμένου ύψους

Ως πρανή πεπερασμένου ύψους χαρακτηρίζονται εκείνα των οποίων το ύψος είναι συγκρίσιμο του μήκους τους, και συνεπώς επηρεάζει την ευστάθειά τους. Με στόχο την μελέτη της ευστάθειας των πεπερασμένων πρανών κάτω από διαφορετικές συνθήκες πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για χερσαία πρανή υπό την επίδραση στατικών και σεισμικών φορτίσεων. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι αναλυτικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν.

4.2.1 Περίπτωση 1: Χωρίς Νερό, Χωρίς Σεισμό

Στο Σχήμα 4.4 παρατηρείται η ανάλυση των δυνάμεων στο απειρομήκες πρανές υπό στατικές συνθήκες.



Σχήμα 4.4: Πρανές πεπερασμένου ύψους χωρίς νερό, χωρίς σεισμό

Όπως και στην ανάλυση των απειρομήκων πρανών, το πρώτο βήμα για τη μελέτη των πεπερασμένων ήταν η κατάστρωση των αναλυτικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Για την δημιουργία των εξισώσεων θεωρήθηκε πως η αστοχία που επέρχεται στο πρανές είναι επίπεδη και έχει τη μορφή σφήνας. Η κάθε επιφάνεια θεωρείται πως έχει ύψος H και γωνία κλίσης β , ενώ η κρίσιμη γωνία για την οποία επέρχεται η αστοχία είναι θ . Έτσι, το βάρος της επιφάνειας υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω γεωμετρική μέθοδο:

$$AB = \frac{H}{\sin\theta}$$

$$\gamma = \frac{W}{V} \Rightarrow W = \gamma * V = \gamma * (ABC)$$

$$\cos\theta = \frac{AD}{AB} \Rightarrow AD = \cos\theta * AB \Rightarrow AD = \frac{H}{\sin\theta} * \cos\theta = H * \cot\theta$$

$$AC = \frac{H}{\sin\beta} \quad AE = \cos\beta * AC = H * \cot\beta$$

$$\begin{aligned} E(ABC) &= (ADBC) - (ABD) = \frac{(AD - CB) * H}{2} - \frac{AD * H}{2} \\ &= \frac{AD * H + CB * H - AD * H}{2} = \frac{CB * H}{2} = \frac{(AD - AE)}{2} * H \\ &= \frac{H^2 \frac{\cos\theta}{\sin\theta} - H^2 \frac{\cos\beta}{\sin\beta}}{2} = \frac{H^2 * \cos\theta * \sin\beta - H^2 * \cos\beta * \sin\theta}{2 * \sin\theta * \sin\beta} \\ &= \frac{H(\cos\theta * \sin\beta - \cos\beta * \sin\theta)}{2 * \sin\theta * \sin\beta} = \frac{1}{2} * H^2 * \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\theta * \sin\beta} \end{aligned}$$

$$\text{Άρα } W = \frac{1}{2} * H^2 * \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\theta * \sin\beta}$$

Στη διεπιφάνεια AB από ισορροπία δυνάμεων ισχύει:

$$N = W * \cos\theta \tag{4.35}$$

$$\begin{aligned} T &= N * \tan\varphi = W * \sin\theta * \tan\varphi \\ &= \frac{1}{2} * \gamma * H * \frac{\sin(\beta - \theta) * \sin\theta}{\sin\beta * \sin\theta} * \tan\varphi \end{aligned} \tag{4.36}$$

$$FSst = \frac{\text{"αντίσταση"}}{\text{"αίτιο"}} = \frac{W * \cos\theta * \tan\varphi + c' * \frac{H}{\sin\theta}}{W * \tan\theta} \tag{4.37}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\frac{1}{2} * \gamma * H * \frac{\sin(\beta - \theta) * \cos\theta * \tan\varphi}{\sin\beta * \sin\theta} + \frac{c' * H}{\sin\theta}}{\frac{1}{2} * \gamma * H * \frac{\sin(\beta - \theta) * \sin\theta}{\sin\beta * \sin\theta}} \end{aligned} \tag{4.38}$$

$$= \frac{\frac{\gamma * H * \sin(\beta - \theta) * \cos\theta * \tan\varphi}{2 * \sin\beta * \sin\theta} + \frac{c' * H}{\sin\theta}}{\frac{1}{2} * \gamma * H * \frac{\sin(\beta - \theta) * \sin\theta}{\sin\beta * \sin\theta}} \quad (4.39)$$

$$= \frac{\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta) * \cos\theta * \tan\varphi}{2 * \sin\beta * \sin\theta} + \frac{c' * H}{\sin\theta}}{\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta) * \sin\theta}{2 * \sin\beta * \sin\theta}} \quad (4.40)$$

$$= \frac{\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta) * \cos\theta * \tan\varphi + 2 * c' * H * \sin\beta}{2 * \sin\beta * \sin\theta}}{\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta) * \sin\theta}{2 * \sin\beta * \sin\theta}} \quad (4.41)$$

$$= \frac{\gamma * H * \cos\theta * \tan\varphi * \sin(\beta - \theta) + 2 * c' * \sin\beta}{\gamma * H * \sin(\beta - \theta) * \sin\theta} \quad (4.42)$$

$$= \frac{\tan\varphi}{\tan\theta} + \frac{2 * c' * \sin\beta}{\gamma * H * \sin\theta * \sin(\beta - \theta)} \quad (4.43)$$

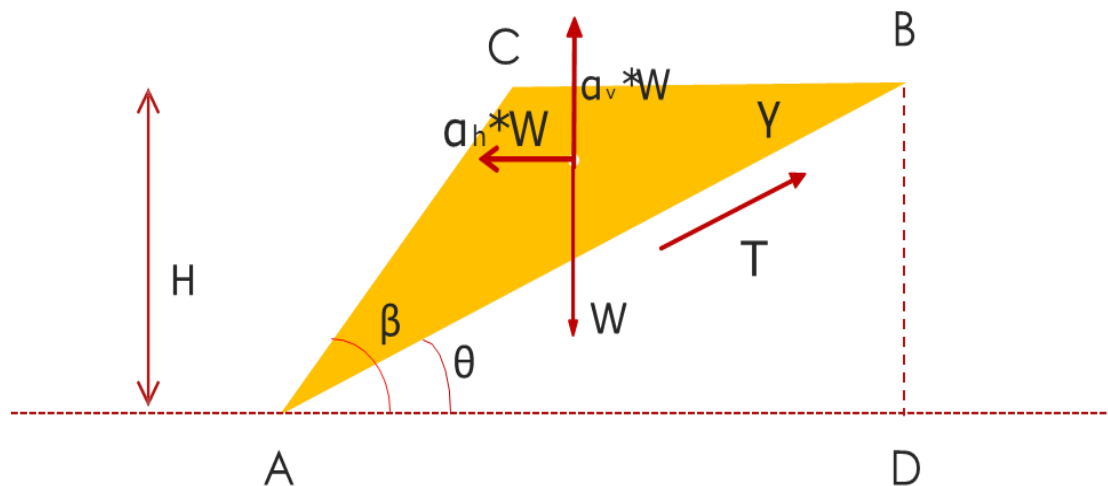
Ειδικές Περιπτώσεις:

$$\alpha) c' = 0, \phi \neq 0 \Rightarrow FSst = \frac{\tan\varphi}{\tan\theta} \quad (4.44)$$

$$\beta) c' = c_u, \phi \neq 0 \Rightarrow FSst = \frac{2 * c_u * \sin\beta}{\gamma * H * \sin\theta * \sin(\beta - \theta)} \quad (4.45)$$

4.2.2 Περίπτωση 2: Χωρίς Νερό, Με Σεισμό

Στην περίπτωση του σεισμού έχουμε δύο επιπλέον δυνάμεις που οφείλονται στο σεισμό: την οριζόντια αδρανειακή δύναμη $a_h W$ και την κάθετη αδρανειακή δύναμη $a_v W$.



Σχήμα 4.5: Πρανές πεπερασμένου ύψους χωρίς νερό, με σεισμό

Στη διεπιφάνεια AB από ισορροπία δυνάμεων ισχύει:

$$N - W * \cos\theta + a_v * W * \cos\theta + a_h * W * \sin\theta = 0 \quad (4.46)$$

$$N = W * \cos\theta - a_v * W * \cos\theta - a_h * W * \sin\theta \quad (4.47)$$

$$N = W * \cos\theta - a_v * W * \cos\theta - a_h * W * \sin\theta \quad (4.48)$$

$$N = W * [(1 - a_v) * \cos\theta - a_h * \sin\theta] \quad (4.49)$$

$$N = \frac{1}{2} * \gamma * H^2 * \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta * \sin\theta} * [(1 - a_v) * \cos\theta - a_h * \sin\theta] \quad (4.50)$$

$$T - W * \sin\theta + a_v * W * \sin\theta - a_h * W * \cos\theta = 0 \quad (4.51)$$

$$T = W * \sin\theta - a_v * W * \sin\theta + a_h * W * \cos\theta \quad (4.52)$$

$$T = W * [(1 - a_v) * \sin\theta + a_h * \cos\theta] \quad (4.53)$$

$$T = \frac{1}{2} * \gamma * H^2 * \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta * \sin\theta} * [(1 - a_v) * \sin\theta + a_h * \cos\theta] \quad (4.54)$$

Οι δυνάμεις που ωθούν το ABC να αστοχήσει από το υπόλοιπο πρανές είναι: $W * \sin\theta + a_h * W - a_v * w$

$$\begin{aligned} FSps &= \frac{\text{"αντίσταση"}}{\text{"άιτιο"}} \\ &= \frac{W * [(1 - a_v) * \cos\theta - a_h * \sin\theta] * \tan\varphi + c' * \frac{H}{\sin\theta}}{W * [(1 - a_v) * \sin\theta + a_h * \cos\theta]} \end{aligned} \quad (4.55)$$

$$= \frac{\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta) * [(1 - a_v) * \cos\theta - a_h * \sin\theta] * \tan\varphi}{2 * \sin\beta * \sin\theta} + c' * \frac{H}{\sin\theta}}{\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta) * [(1 - a_v) * \sin\theta + a_h * \cos\theta]}{2 * \sin\beta * \sin\theta}} \quad (4.56)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta) * [(1 - a_v) * \cos\theta - a_h * \sin\theta] * \tan\varphi}{2 * \sin\beta * \sin\theta}}{\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta) * [(1 - a_v) * \sin\theta + a_h * \cos\theta]}{2 * \sin\beta * \sin\theta}} \\ &+ \frac{c' * \frac{H}{\sin\theta}}{\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta) * [(1 - a_v) * \sin\theta + a_h * \cos\theta]}{2 * \sin\beta * \sin\theta}} \end{aligned} \quad (4.57)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{[(1 - a_v) * \cos\theta - a_h * \sin\theta] * \tan\varphi}{[(1 - a_v) * \sin\theta + a_h * \cos\theta]} \\ &+ \frac{2 * c' * \sin\theta}{\gamma * H * \sin(\beta - \theta) * [(1 - a_v) * \sin\theta - a_h * \cos\theta]} \end{aligned} \quad (4.58)$$

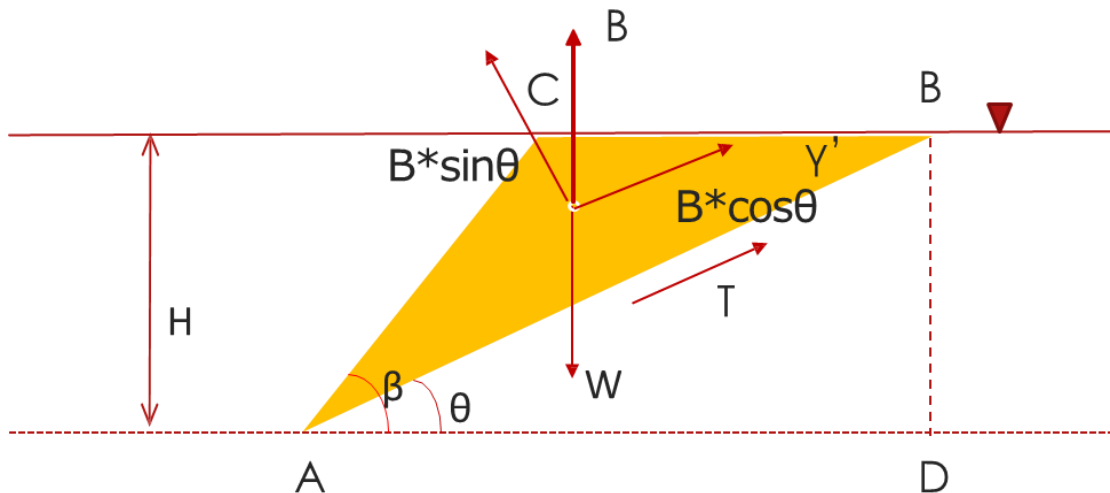
Ειδικές Περιπτώσεις:

$$\alpha) c' = 0, \phi \neq 0 \Rightarrow FSst = \frac{[(1-a_v) \cdot \cos\theta - a_h \cdot \sin\theta] \cdot \tan\phi}{[(1-a_v) \cdot \sin\theta + a_h \cdot \cos\theta]} \quad (4.59)$$

$$\beta) c' = c_u, \phi \neq 0 \Rightarrow FSst = \frac{2 \cdot c_u \cdot \sin\theta}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\beta - \theta) \cdot [(1-a_v) \cdot \sin\theta - a_h \cdot \cos\theta]} \quad (4.60)$$

4.2.3 Περίπτωση 3: Με Νερό, Χωρίς Σεισμό

Και εδώ, όπως και στην περίπτωση του απεριομήκους πρανούς, θα εξετάσουμε την κατάσταση στην οποία το πρανές είναι όλο βυθισμένο στο νερό, δηλαδή ο υδροφόρος ορίζοντας είναι σε οριζόντια θέση (Σχήμα 4.6) και όχι την περίπτωση της ροής κατά την οποία ο υδροφόρος ορίζοντας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια του κεκλιμένου εδάφους.



Σχήμα 4.6: Πρανές πεπερασμένου ύψους με νερό, χωρίς σεισμό

Σύμφωνα με την αρχή του Αρχιμήδη για την δύναμη της άνωσης B ισχύει:
 $B = \rho_v \cdot g \cdot V$

Όμως $\rho = \frac{m}{V}$ και $\gamma = \frac{W}{V}$ τότε έχουμε $\gamma = \frac{m \cdot g}{V} = \frac{\rho \cdot g \cdot V}{V} = \rho \cdot g$

$$\gamma_w = \rho_v \cdot g$$

Άρα:

$$\text{Τελικά ισχύει : } B = \gamma_w * (ABC) = \gamma_w * \frac{1}{2} * H^2 * \frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin\beta * \sin\theta}$$

Στη διεπιφάνεια AB:

$$N - W * \cos\theta + B * \cos\theta = 0 \quad (4.61)$$

$$N = W * \cos\theta - B * \cos\theta = (W - B) * \cos\theta \quad (4.62)$$

$$N = \left(\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta)}{2 * \sin\beta * \sin\theta} - \frac{\gamma_w * H^2 * \sin(\beta - \theta)}{2 * \sin\beta * \sin\theta} \right) * \cos\theta \quad (4.63)$$

$$N = \frac{\gamma' * H^2 * \sin(\beta - \theta)}{2 * \sin\beta * \sin\theta} * \cos\theta \quad (4.64)$$

$$T - W * \sin\theta + B * \sin\theta = 0 \quad (4.65)$$

$$T = W * \sin\theta - B * \sin\theta = (W - B) * \sin\theta \quad (4.66)$$

$$T = \left(\frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta)}{2 * \sin\beta * \sin\theta} - \frac{\gamma_w * H^2 * \sin(\beta - \theta)}{2 * \sin\beta * \sin\theta} \right) * \sin\theta \quad (4.67)$$

$$T = \frac{\gamma' * H^2 * \sin(\beta - \theta)}{2 * \sin\beta * \sin\theta} * \sin\theta \quad (4.68)$$

Οι δυνάμεις που ωθούν το ABC να αστοχήσει από το υπόλοιπο πρανές είναι:

$$W * \sin\theta - B * \sin\theta = (W - B) * \sin\theta \quad (4.69)$$

$$FSps = \frac{\text{"αντίσταση"}}{\text{"αίτιο"}} = \frac{(W - B) * \cos\theta * \tan\varphi + c' * \frac{H}{\sin\theta}}{(W - B) * \sin\theta} \quad (4.70)$$

$$= \frac{\frac{\gamma' * H^2 * \sin(\beta - \theta) * \cos\theta * \tan\varphi}{2 * \sin\beta * \sin\theta} + c' * \frac{H}{\sin\theta}}{\frac{\gamma' * H^2 * \sin(\beta - \theta) * \sin\theta}{2 * \sin\beta * \sin\theta}} \quad (4.71)$$

$$= \frac{\frac{\gamma' * H^2 * \sin(\beta - \theta) * \cos\theta * \tan\varphi}{2 * \sin\beta * \sin\theta}}{\frac{\gamma' * H^2 * \sin(\beta - \theta) * \sin\theta}{2 * \sin\beta * \sin\theta}} + \frac{c' * \frac{H}{\sin\theta}}{\frac{\gamma' * H^2 * \sin(\beta - \theta) * \sin\theta}{2 * \sin\beta * \sin\theta}} \quad (4.72)$$

$$= \frac{\tan\varphi * \cos\theta}{\sin\theta} + \frac{2 * c' * \sin\beta}{\gamma' * H * \sin(\beta - \theta) * \sin\theta} = \frac{\tan\varphi}{\tan\theta} + \frac{2 * c' * \sin\beta}{\gamma' * H * \sin(\beta - \theta) * \sin\theta} \quad (4.73)$$

Ειδικές Περιπτώσεις:

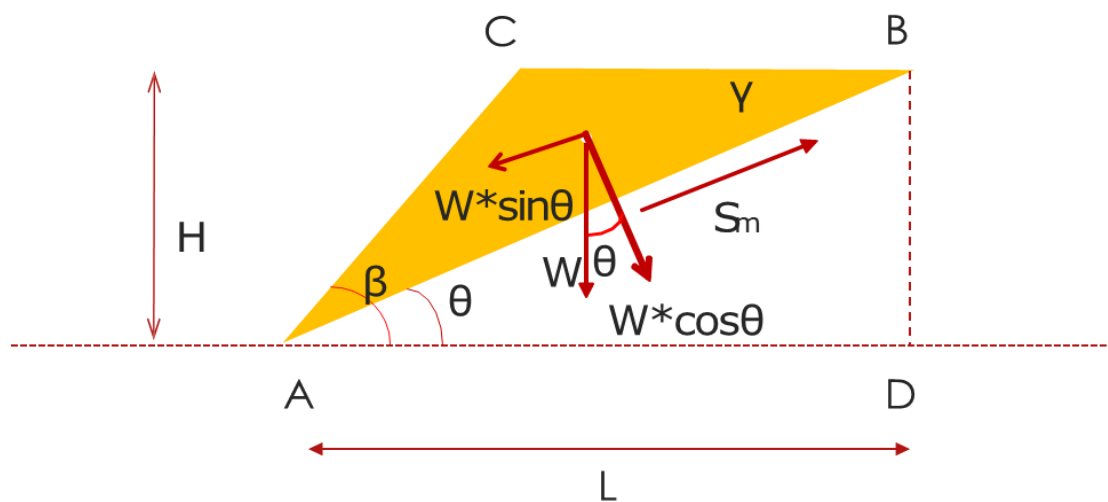
$$\alpha) c' = 0, \phi \neq 0 \Rightarrow FSst = \frac{\tan\phi}{\tan\theta} \quad (4.74)$$

$$\beta) c' = c_u, \phi \neq 0 \Rightarrow FSst = \frac{2 * c_u * \sin\beta}{\gamma * H * \sin\theta * \sin(\beta - \theta)} \quad (4.75)$$

4.2.4 Υπολογισμός κρίσιμης γωνίας $\theta_{critical}$

1) Χωρίς Νερό, Χωρίς Σεισμό

Σύμφωνα με τους παραπάνω αναλυτικούς τύπους που χρησιμοποιήθηκαν στην μέθοδο του πλανού πεπερασμένου ύψους και (Lee W. Abramson, 2002) ισχύει ότι:



Σχήμα 4.7

$$N = W * \cos\theta$$

$$S_m = T = W * \sin\theta$$

$$L = \sin\beta * H$$

$$c_m = \frac{c}{F_c}$$

$$\tan\phi_m = \frac{\tan\phi}{F_\phi}$$

$$S_m = c_m * L + N * \tan\varphi \quad (4.76)$$

$$W * \sin\theta = c_m * L + W * \cos\theta * \tan\varphi \quad (4.77)$$

$$W * \sin\theta = c_m * L + W * \cos\theta * \tan\varphi \quad (4.78)$$

$$W * (\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi) = c * L \quad (4.79)$$

$$c = \frac{W}{L} * [\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi] \quad (4.80)$$

$$c = \frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta)}{L} * [\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi] \quad (4.81)$$

$$c = \frac{\gamma * H^2 * \sin(\beta - \theta)}{2 * L * \sin\beta * \sin\theta} * [\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi] \quad (4.82)$$

$$c = \frac{1}{2} * \gamma * H * \left[\frac{\sin(\beta - \theta) [\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi]}{\sin\beta} \right] \quad (4.83)$$

$$c = \frac{1}{2} * \gamma * H * \left[\frac{\sin(\beta - \theta) [\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi]}{\sin\beta} \right] \quad (4.84)$$

Για να καθορίσουμε την κρίσιμη γωνία αστοχίας του πρσανούς θα παραγωγίσουμε την εξίσωση:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \theta} [\sin(\beta - \theta) (\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi)] \\ &= -\cos(\beta - \theta) * [\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi] + \sin(\beta - \theta) * [\cos\theta + \sin\theta * \tan\varphi] \\ &= -\sin\theta * \cos(\beta - \theta) + \cos\theta * \cos(\beta - \theta) * \tan\varphi + \cos\theta \\ & \quad * \sin(\beta - \theta) + \sin\theta * \sin(\beta - \theta) * \tan\varphi \\ &= -[\sin\theta * \cos(\beta - \theta) - \cos\theta * \sin(\beta - \theta)] + \tan\varphi * [\sin\theta \\ & \quad * \sin(\beta - \theta) + \cos\theta * \cos(\beta - \theta)] \\ &= -\sin(\theta - \beta + \theta) + \tan\varphi * \cos(\theta - \beta + \theta) = 0 \\ &\sin(2\theta - \beta) = \tan\varphi * \cos(2\theta - \beta) \Rightarrow \theta_{critical} = \frac{\beta + \varphi}{2} \end{aligned}$$

II) Χωρίς Νερό, Με Σεισμό

$$N = W \cdot \cos\theta - \alpha_h \cdot W \cdot \sin\theta - \alpha_v \cdot W \cdot \cos\theta$$

$$S_m = T = W \cdot \sin\theta - \alpha_v \cdot W \cdot \sin\theta + \alpha_h \cdot W \cdot \cos\theta$$

$$N = W \cdot [\cos\theta - \alpha_h \cdot \sin\theta - \alpha_v \cdot \cos\theta]$$

$$S_m = W [\sin\theta - \alpha_v \cdot \sin\theta + \alpha_h \cdot \cos\theta]$$

$$N = W \cdot [(1 - \alpha_v) \cdot \cos\theta - \alpha_h \cdot \sin\theta]$$

$$S_m = W [(1 - \alpha_v) \cdot \sin\theta + \alpha_h \cdot \cos\theta]$$

$$c_m = \frac{c}{F_c}$$

$$\tan\phi_m = \frac{\tan\phi}{F_\phi}$$

$$L = \sin\beta \cdot H$$

$$S_m = c \cdot L + N \cdot \tan\phi$$

$$W \cdot [(1 - a_v) \cdot \cos\theta - a_h \cdot \sin\theta]$$

$$= c_m \cdot L + W \cdot [(1 - a_v) \cdot \sin\theta + a_h \cdot \cos\theta] \tan\phi$$

$$c \cdot L = W [(1 - a_v) \cdot \sin\theta + a_h \cdot \cos\theta] - W [(1 - a_v) \cdot \cos\theta - a_h \cdot \sin\theta] \cdot \tan\phi$$

$$c = \frac{W}{L} [(1 - a_v) \cdot \sin\theta + a_h \cdot \cos\theta] - W [(1 - a_v) \cdot \cos\theta - a_h \cdot \sin\theta] \cdot \tan\phi$$

$$c = \frac{\gamma \cdot H^2 \cdot \sin(\beta - \theta)}{2 \cdot L \cdot \sin\beta \cdot \sin\theta} \cdot [(1 - a_v) \cdot \sin\theta + a_h \cdot \cos\theta - (1 - a_v) \cdot \tan\phi \cdot \cos\theta - a_h \cdot \sin\theta \cdot \tan\phi]$$

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

Για να καθορίσουμε την κρίσιμη γωνία αστοχίας του πρανούς θα παραγωγίσουμε την εξίσωση :

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial \theta} ((1 - a_v)[\sin\theta - \tan\varphi * \cos\theta] + a_h[\cos\theta + \tan\varphi * \sin\theta]) \\
& \quad * \sin(\beta - \theta)) = \\
& = -\cos(\beta - \theta) * [(1 - \alpha_v) * [\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi] + a_h \\
& \quad * [\cos\theta + \sin\theta * \tan\varphi]] + \sin(\beta - \theta)[(1 - \alpha_v) * (\cos\theta \\
& \quad + \sin\theta * \tan\varphi + a_h(-\sin\theta + \cos\theta * \tan\varphi))] \\
& = -\cos(\beta - \theta) * [(1 - \alpha_v) * \sin\theta - (1 - \alpha_v) * \tan\varphi * \cos\theta + a_h \\
& \quad * \cos\theta + \alpha_h * \tan\varphi * \sin\theta + \sin(\beta - \theta)[(1 - \alpha_v) * \cos\theta \\
& \quad + (1 - \alpha_v) * \sin\theta * \tan\varphi - a_h * \sin\theta + \alpha_h * \tan\varphi \\
& \quad * \cos\theta] \\
& = (1 - \alpha_v) * \sin\theta * \cos(\beta - \theta) + (1 - \alpha_v) * \tan\varphi * \cos\theta * \cos(\beta - \theta) \\
& \quad - a_h * \cos\theta * \cos(\beta - \theta) - \alpha_h * \tan\varphi * \sin\theta * \cos(\beta - \theta) \\
& \quad + (1 - \alpha_v) * \sin(\beta - \theta) * \cos\theta + (1 - \alpha_v) * \tan\varphi * \sin\theta \\
& \quad * \sin(\beta - \theta) + a_h * \tan\varphi * \sin(\beta - \theta) * \cos\theta - a_h * \sin\theta \\
& \quad * \sin(\beta - \theta) \\
& = (1 - \alpha_v)[- \sin\theta * \cos(\beta - \theta) + \sin(\beta - \theta) * \cos\theta] + (1 - \alpha_v) \\
& \quad * \tan\varphi * [\sin\theta * \sin(\beta - \theta) + \cos\theta * \cos(\beta - \theta)] + \alpha_h \\
& \quad * \tan\varphi * [\sin(\beta - \theta) * \cos\theta - \cos(\beta - \theta) * \sin\theta] \\
& = -(1 - \alpha_v) * \sin(2\theta - \beta) + (1 - \alpha_v) * \tan\varphi * \cos(2\theta - \beta) - \alpha_h \\
& \quad * \tan\varphi * \sin(2\theta - \beta) - \alpha_h * \cos(2\theta - \beta) - \sin(2\theta - \beta) \\
& \quad * [1 - a_v + a_h * \tan\varphi] \\
& \quad + \cos(2\theta - \beta) [(1 - \alpha_v) * \tan\varphi - \alpha_h] \\
& = \sin(2\theta - \beta) * [1 - a_v + a_h * \tan\varphi] + \cos(2\theta - \beta)[(1 - \alpha_v) * \tan\varphi \\
& \quad - \alpha_h] = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\sin(2\theta - \beta)}{\cos(2\theta - \beta)} &= \frac{(1 - \alpha_v) * \tan\varphi - a_h}{1 - a_v + a_h * \tan\varphi} \Rightarrow \tan(2\theta - \beta) \\
&= \frac{(1 - \alpha_v) * \tan\varphi - a_h}{1 - a_v + a_h * \tan\varphi}
\end{aligned}$$

$$2\theta - \beta = \tan^{-1}\left[\frac{(1 - \alpha_v) * \tan\varphi - a_h}{1 - a_v + a_h * \tan\varphi}\right]$$

$$\theta_{critical} = \frac{1}{2}[\beta + \tan^{-1}\left[\frac{(1 - \alpha_v) * \tan\varphi - a_h}{1 - a_v + a_h * \tan\varphi}\right]]$$

III)Με Νερό, Χωρίς Σεισμό

$$N=W*\cos\theta$$

$$S_m=T=W*\sin\theta$$

$$L=\sin\beta*H$$

$$S_m = c_m * L + N * \tan\varphi$$

$$W * \sin\theta = c_m * L + W * \cos\theta * \tan\varphi$$

$$W * \sin\theta = c_m * L + W * \cos\theta * \tan\varphi$$

$$W * (\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi) = c * L$$

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

$$c = \frac{\gamma' * H^2 * \sin(\beta - \theta)}{L} * [\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi]$$

$$c = \frac{\gamma' * H^2 * \sin(\beta - \theta)}{2 * L * \sin\beta * \sin\theta} * [\sin\theta - \cos\theta * \tan\varphi]$$

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

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

Για να καθορίσουμε την κρίσιμη γωνία αστοχίας του πρανούς, θα παραγωγίσουμε την εξίσωση :

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

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

$$= -\sin\theta * \cos(\beta - \theta) + \cos\theta * \cos(\beta - \theta) * \tan\varphi + \cos\theta * \sin(\beta - \theta) + \sin\theta * \sin(\beta - \theta) * \tan\varphi$$

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

$$= -\sin(\theta - \beta + \theta) + \tan\varphi * \cos(\theta - \beta + \theta) = 0$$

$$\sin(2\theta - \beta) = \tan\varphi * \cos(2\theta - \beta) \Rightarrow \theta_{critical} = \frac{\beta + \varphi}{2}$$

4.2.5 Αποτελέσματα Ανάλυσης

Η μελέτη της ευστάθειας των απειρομήκων πρανών πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση που έχουν ορισμένοι παράγοντες σε αυτή, όπως η κλίση του πρανού, το πάχος της εδαφικής στρώσης, η συνοχή του εδαφικού υλικού, καθώς και η γωνία εσωτερικής τριβής. Οι τιμές που δόθηκαν στις παραμέτρους αυτές, επιλέχθηκαν με τον σκοπό να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων

Γωνία κλίσης θ (deg)

Η τιμή της γωνίας κλίσης του πρανού που επιλέχθηκε να μελετηθεί, είναι 22°

Ύψος εδαφικής στρώσης z (m)

Το ύψος της εδαφικής στρώσης, αφορά την γεωμετρία του πρανού και οι τιμές που επιλέχθηκαν γι' αυτό είναι από 1m έως 10m.

Συνοχή c (kPa)

Αναφέρεται στις ιδιότητες του εδαφικού υλικού, και οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι 0 kPa, 12 kPa και 15 kPa.

Συντελεστές σεισμικής επιτάχυνσης α_h και α_v

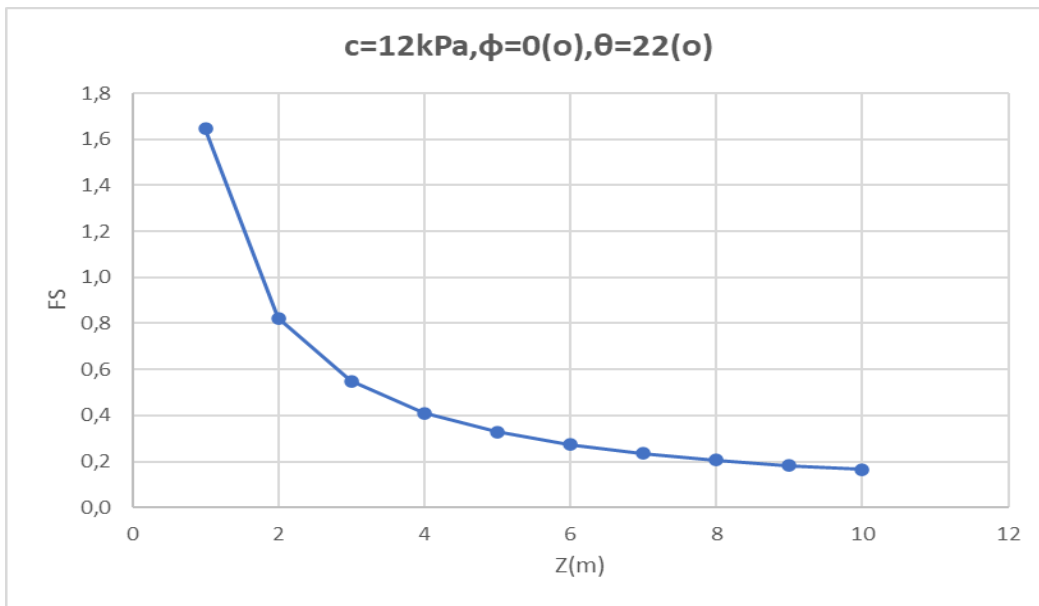
Οι τιμές των συντελεστών σεισμικής επιτάχυνσης προκύπτουν με βάση τις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν οι τιμές 0,2 για την οριζόντια διεύθυνση και 0,1 για την κατακόρυφη αντίστοιχα.

Όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν θεωρώντας πως το ειδικό βάρος του εδαφικού υλικού είναι $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ και του νερού $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε συνοχή εδαφικού υλικού 12kPa.

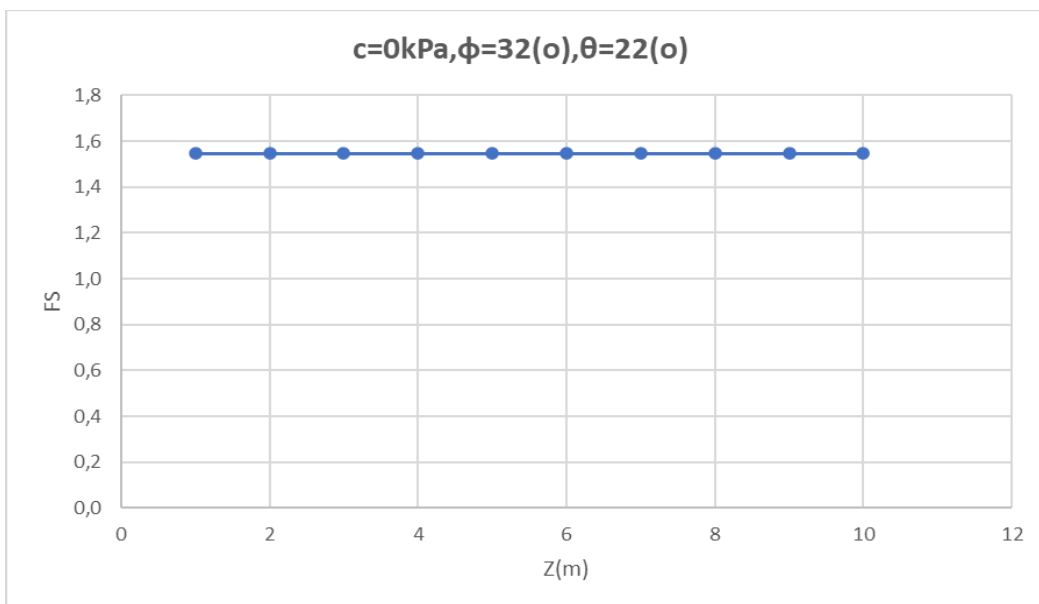
Ο συνδυασμός μηδενικής συνοχής και μηδενικής γωνίας εσωτερικής τριβής παραλήφθηκε από τις αναλύσεις, καθώς πρόκειται για μη ρεαλιστική περίπτωση εδαφικού υλικού.

Έτσι, ύστερα από την κατάστρωση των εξισώσεων που θα οδηγήσουν στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, πραγματοποιήθηκε σύνταξη των εξισώσεων στο υπολογιστικό περιβάλλον του excel, με στόχο την εξαγωγή συγκριτικών διαγραμμάτων που αφορούν την μελέτη της επίδρασης που έχουν οι διαφορετικές παράμετροι, που ήδη αναφέρθηκαν, στην ευστάθεια των απειρομήκων πρανών.

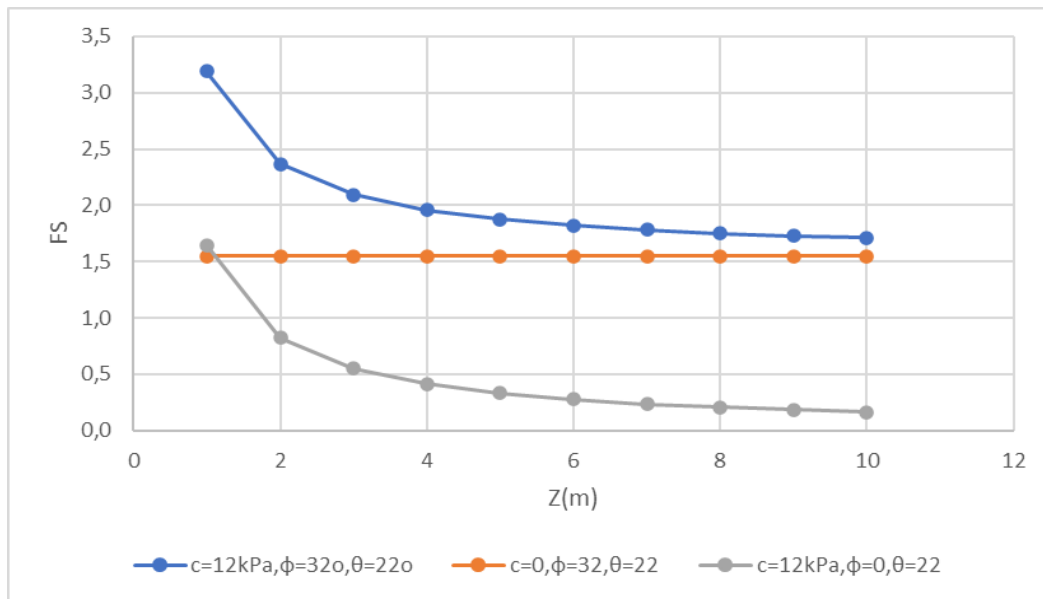
Αρχικά, ελήφθησαν υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανούς που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός πρανούς. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας σε πρανή με διαφορετικά ύψη εδαφικής στρώσης(από 1m έως 10m). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση έδειξαν πως αύξηση του ύψους συνεπάγεται μείωση του συντελεστή ασφαλείας του πρανούς. Παράλληλα, αποδείχτηκε πως όσο αυξάνεται το ύψος του πρανούς, οι διαφορές μεταξύ των συντελεστών ασφαλείας τείνουν να μειωθούν. Επιπρόσθετα, για μη συνεκτικά υλικά προέκυψε πως ο συντελεστής ασφαλείας είναι ανεξάρτητος του ύψους της στρώσης. Ύστερα, μελετήθηκε η επίδραση της κλίσης στην ευστάθεια του πρανούς. Όπως είναι αναμενόμενο, όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι περιπτώσεις χερσαίου ξηρού πρανούς, όπου $c = 0 \text{ kPa}$, $\phi = 32^\circ$ και $c = 12 \text{ kPa}$, $\phi = 0^\circ$, στις οποίες διαπιστώνονται τα παραπάνω συμπεράσματα για τη σχέση του συντελεστή ασφαλείας με το ύψος και την κλίση του πρανούς η οποία στην περίπτωση που εξετάζεται είναι σταθερή $\theta=22^\circ$. Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση που έχουν οι μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού στην ευστάθεια του πρανούς. Όσον αφορά την συνοχή παρατηρήθηκε πως για δεδομένο ύψος εδαφικής στρώσης και σταθερή γωνία εσωτερικής τριβής, αύξηση της συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση του συντελεστή ασφαλείας. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξήχθησαν και για την γωνία εσωτερικής τριβής, όπου για δεδομένο πάχος εδαφικής στρώσης και σταθερή τιμή συνοχής, αύξηση αυτής συνεπάγεται αύξηση του συντελεστή ασφαλείας.



Εικόνα 4.1: Ξηρό πρανές με $c=12\text{kPa}$, $\phi=0^\circ$ και $\theta=22^\circ$ υπό στατικές συνθήκες

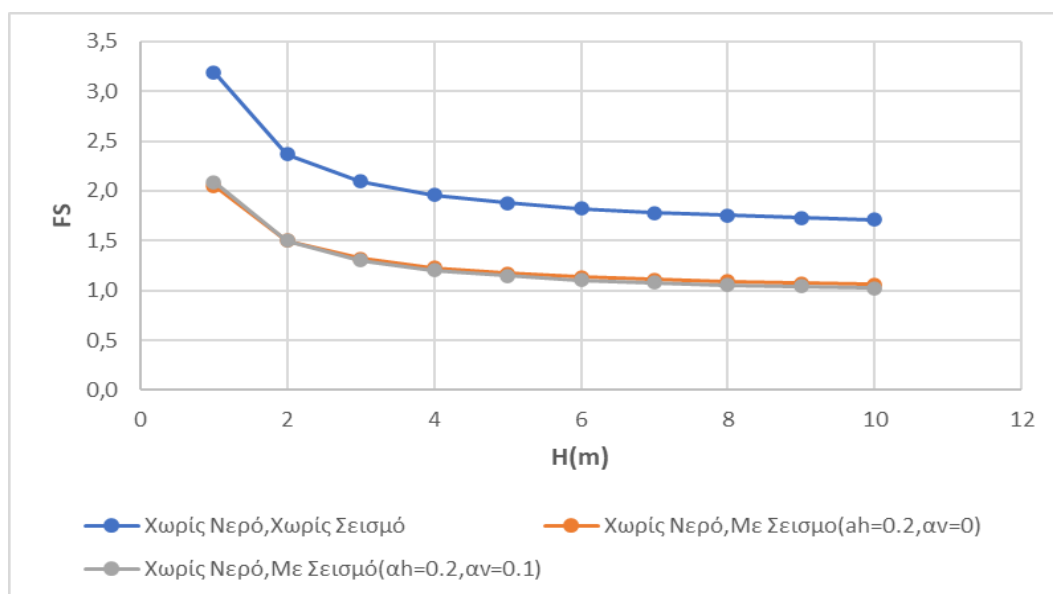


Εικόνα 4.2: Ξηρό πρανές με $c=0\text{kPa}$, $\phi=32^\circ$ και $\theta=22^\circ$ υπο στατικές συνθήκες



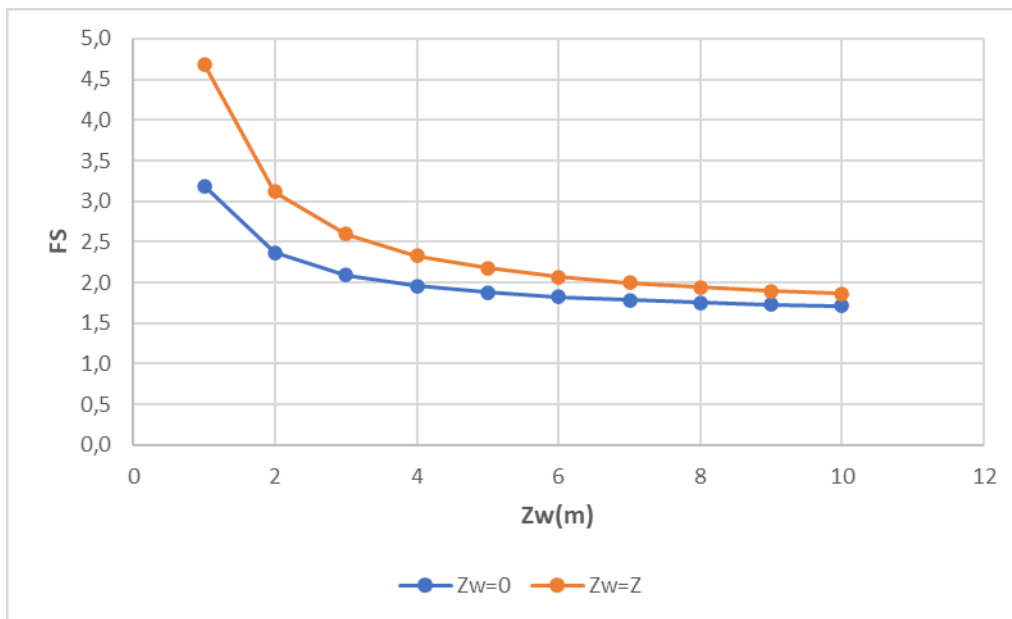
Εικόνα 4.3: Οι τρεις περιπτώσεις υπό στατικές συνθήκες

Τέλος, όσον αφορά την επίδραση του σεισμού στη ευστάθεια των χερσαίων πρανών παρατηρήθηκε πως, όσο μεγαλύτερη η σεισμική επιτάχυνση σε οποιαδήποτε διεύθυνση που προκαλείται από τη δόνηση, τόσο μικρότερος ο συντελεστής ασφαλείας. Επιπλέον παρατηρήθηκε πως αν δεν υπάρχει σεισμική δόνηση σε μία από τις δύο διευθύνσεις τα αποτελέσματα για δεδομένο συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης και για μεταβλητό ύψος είναι σχεδόν παραπλήσια.

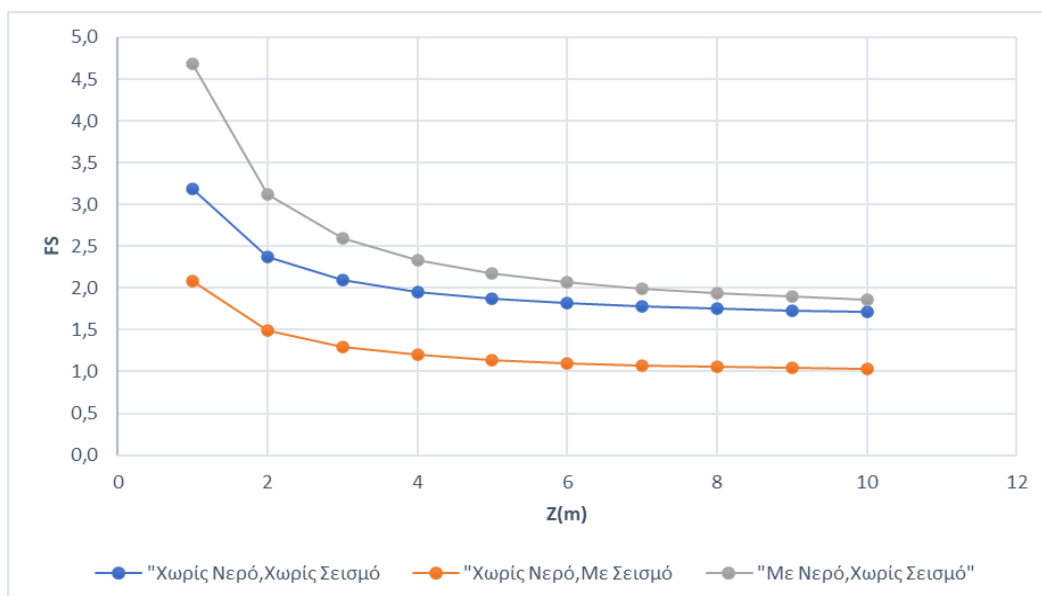


Εικόνα 4.4: Ξηρό πρανές υπο στατικές και σεισμικές συνθήκες

Όσον αφορά την περίπτωση του πλήρως βυθισμένου πρανούς, είναι φανερό πως οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι ίδιες με αυτές του ξηρού πρανούς για μη συνεκτικά υλικά, ενώ για τα συνεκτικά είναι σχεδόν διπλάσιες. Παράλληλα, προκύπτει πως ένα πλήρως βυθισμένο πρανές είναι πιο ευσταθές από κάποιο στο οποίο παρουσιάζεται στάθμη επιφανειακών υδάτων. Συγγρόνως, στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχει καμία σημασία η στάθμη των επιφανειακών υδάτων.



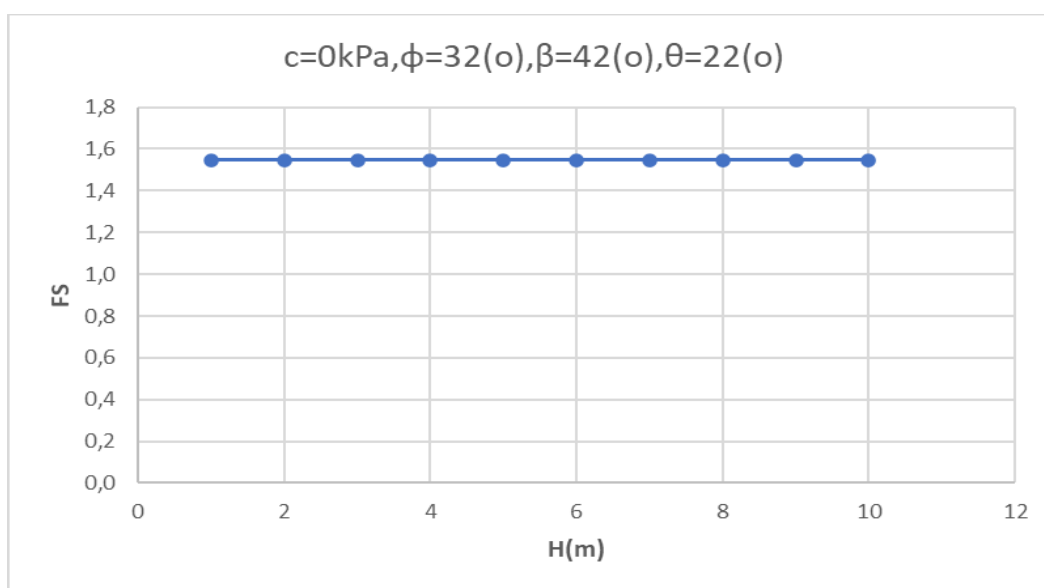
Εικόνα 4.5: Επίδραση του ύψους στάθμης επιφανειακών υδάτων



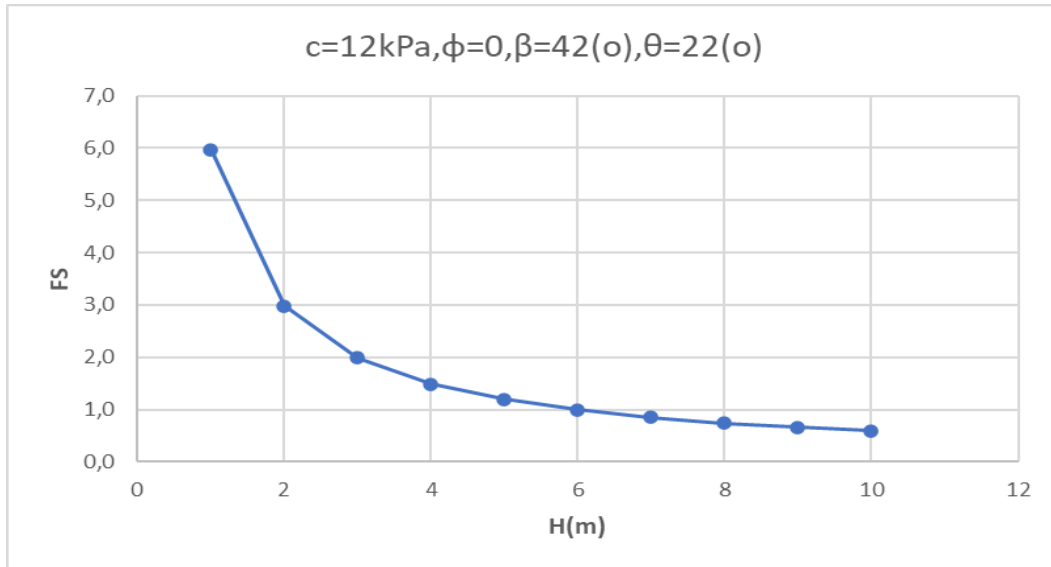
Εικόνα 4.6: Οι τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν

Για την μελέτη της ευστάθειας των πρανών πεπερασμένου ύψους πραγματοποιήθηκε μια σειρά αναλύσεων, στην οποία δόθηκαν ίδιες τιμές στις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

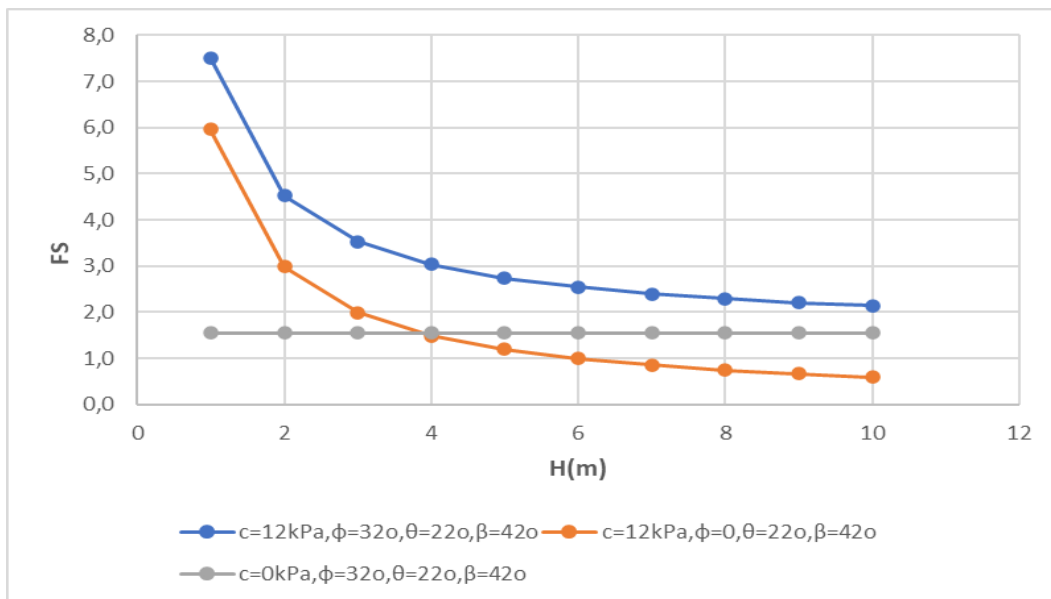
Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού, δηλαδή την συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής, επιλέχθηκαν οι ίδιες τιμές με το απειρομήκες πρανές, ενώ για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιλέχθηκε να εξετασθούν πρανή με κλίσεις ίδιες με αυτές που επιλέχθηκαν στο απειρομήκες, αλλά και με ύψη ίδια με αυτά που επιλέχθηκαν στο απειρομήκες. Τέλος, επιλέχθηκαν οι σεισμικοί συντελεστές επιτάχυνσης 0,2 για την οριζόντια διεύθυνση και 0,1 για την κατακόρυφη αντίστοιχα , ενώ το ειδικό βάρος του υλικού ορίσθηκε ίσο με 20 kN/m^3 και του νερού 10 kN/m^3 .



Εικόνα 4.7: Ξηρό πρανές με $c=0\text{kPa}$, $\phi=32^\circ$, $\theta=22^\circ$ και $\beta=42^\circ$ υπό στατικές συνθήκες



Εικόνα 4.8: Ξηρό πρανές με $c=12\text{kPa}$, $\phi=0^\circ$, $\theta=22^\circ$ και $\beta=42^\circ$ υπό στατικές συνθήκες

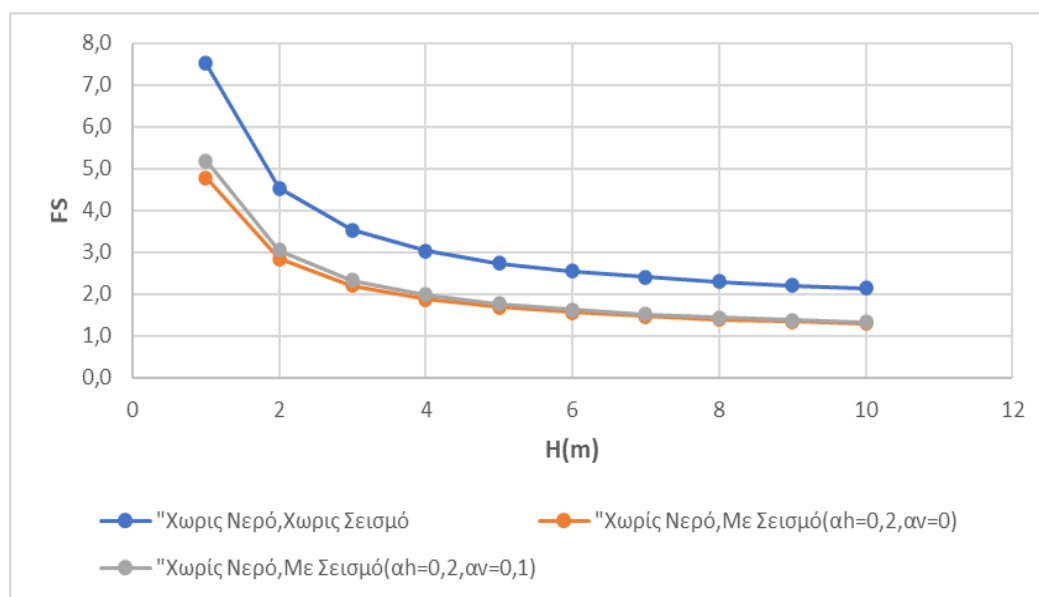


Εικόνα 4.9: Και οι τρεις περιπτώσεις υπό στατικές συνθήκες

Αρχικά, μελετήθηκε η επίδραση του ύψους του πρανούς και της γωνίας κλίσης στην ευστάθειά του. Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα που ακολουθούν, υπό στατικές ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται σε συνάρτηση με την γωνία κλίσης. Σε παρόμοιο συμπέρασμα, καταλήγει και η μελέτη της επιρροής του ύψους στην ευστάθεια, με

εξαίρεση την περίπτωση των μη συνεκτικών υλικών, όπου παρατηρείται πως η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι ανεξάρτητη αυτού.

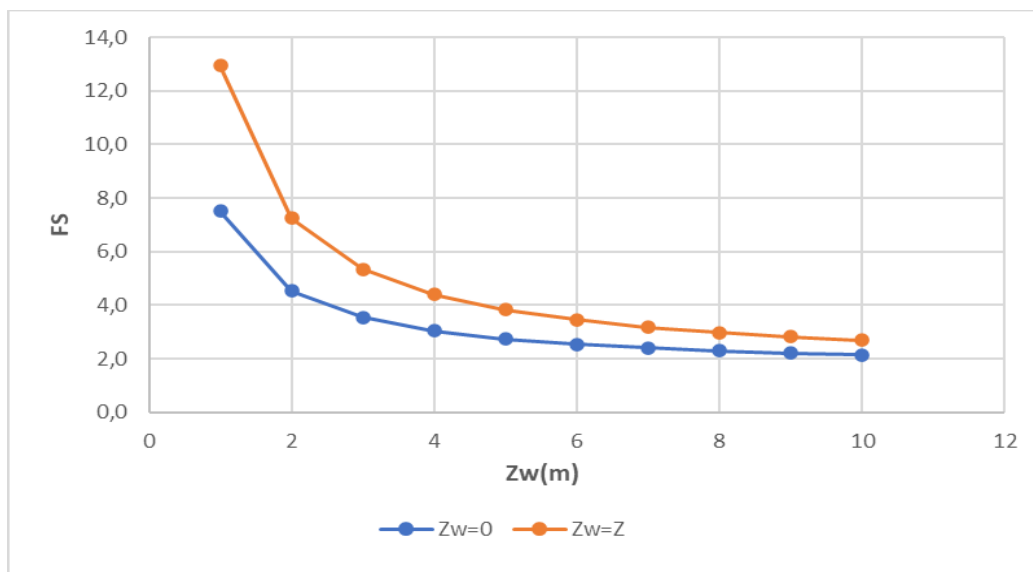
Επιπλέον, όσον αφορά την επίδραση του σεισμού στη ευστάθεια των χερσαίων πρανών παρατηρήθηκε πως όσο μεγαλύτερη η σεισμική επιτάχυνση σε οποιαδήποτε διεύθυνση που προκαλείται από τη δόνηση, τόσο μικρότερος ο συντελεστής ασφαλείας. Επιπροσθέτως παρατηρήθηκε πως αν δεν υπάρχει σεισμική δόνηση σε μία από τις δύο διευθύνσεις τα αποτελέσματα για δεδομένο συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης και για μεταβλητό ύψος είναι σχεδόν παραπλήσια. Συγχρόνως, παρατηρείται πως η σεισμική επιτάχυνση δρα κατά της ευστάθειας του πρανού, αφού παρουσιάζεται μείωση του συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με τις στατικές συνθήκες. Παράλληλα, είναι εμφανές πως όσο αυξάνεται ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης η ευστάθεια μειώνεται.



Εικόνα 4.11: Ξηρό πρανές υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες

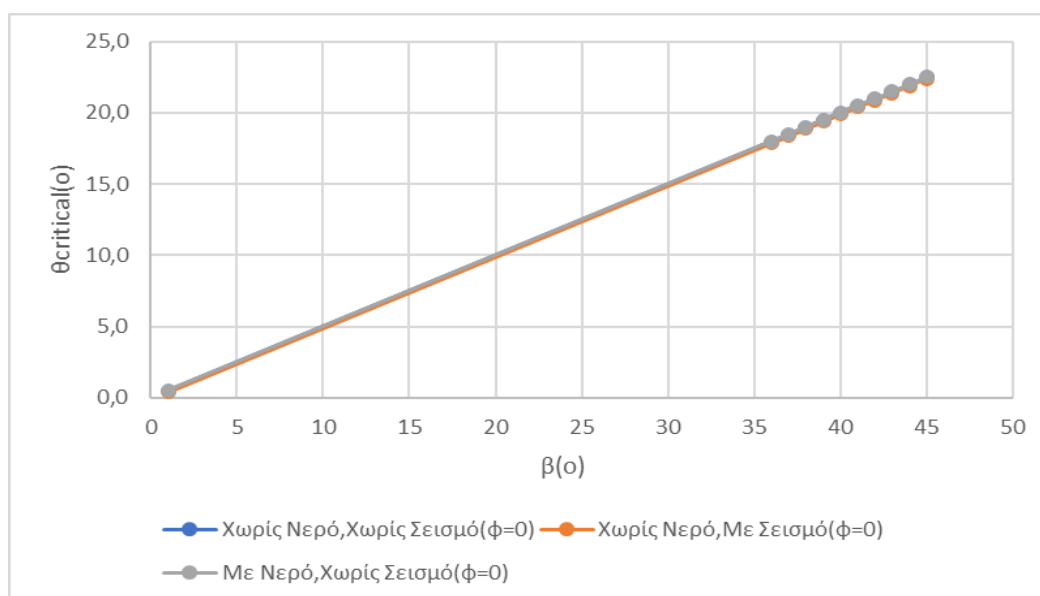
Επιπροθέτως, όσον αφορά την περίπτωση του πλήρως βυθισμένου πρανού, είναι φανερό πως οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι ίδιες με αυτές του ξηρού πρανού για μη συνεκτικά υλικά, ενώ για τα συνεκτικά είναι σχεδόν διπλάσιες όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Παράλληλα, προκύπτει πως ένα πλήρως βυθισμένο πρανές είναι πιο ευσταθές από κάποιο στο οποίο παρουσιάζεται στάθμη επιφανειακών υδάτων. Συγχρόνως στην συγκεκριμένη περίπτωση όπως

και στην περίπτωση του απειρομήκουσ πρानούς δεν έχει καμία σημασία το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα.

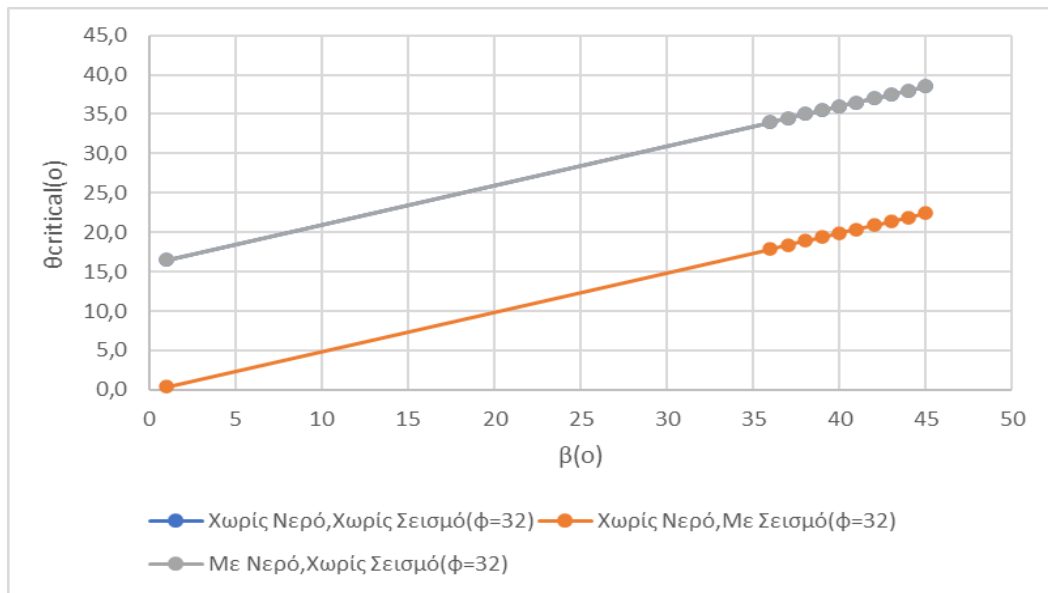


Εικόνα 4.12: Επίδραση του ύψους στάθμης επιφανειακών υδάτων

Τέλος, εξετάστηκε η επιρροή της γωνίας β στην κρίσιμη γωνία αστοχίας $\theta_{critical}$. Πάρθηκαν τιμές για την γωνία β απο 1° και απο 36° εως 45° και εξετάσαμε τις περιπτώσεις με γωνία εσωτερικής τριβής ϕ για 0° και 32° με σταθερή συνοχή $c=12kPa$ και σταθερές σεισμικές επιταχύνσεις $\alpha_h=0,2$ και $\alpha_v=0,1$ τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 4.13



Εικόνα 4.14

Όπως παρατηρούμε για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=0^\circ$ και στις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις οι τιμές του $\theta_{critical}$ ταυτίζονται.

Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση πρανών με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων

5.1 Εισαγωγή στο λογισμικό PLAXIS

Το λογισμικό PLAXIS αποτελεί ένα πακέτο πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για αναλύσεις παραμόρφωσης και ευστάθειας δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων στην γεωτεχνική μηχανική.

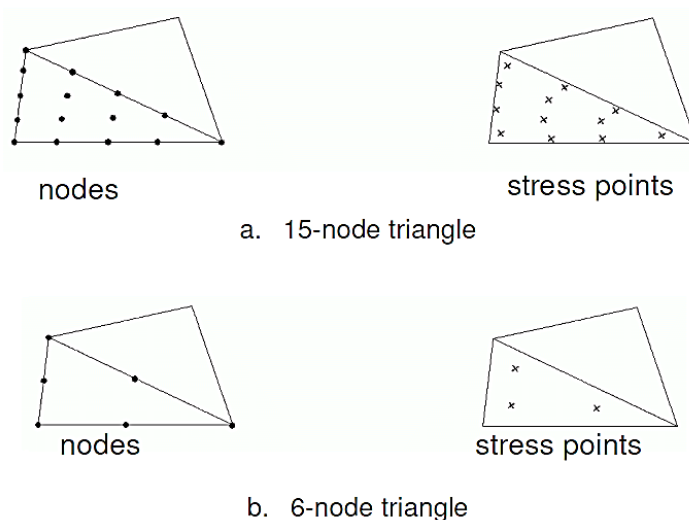
Το λογισμικό απαρτίζεται από τέσσερα υπό – προγράμματα, καθένα από τα οποία εμπίπτει σε μια από τις τρεις βασικές διαδικασίες της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Το υπό – πρόγραμμα Input αποτελεί την προ – επεξεργασία του υπό μελέτη μοντέλου, στα πλαίσια του οποίου ορίζεται η γεωμετρία αυτού, οι συνοριακές συνθήκες, το εδαφικό υλικό, το πλέγμα και οι αρχικές συνθήκες. Το δεύτερο υπό – πρόγραμμα, ονομάζεται Calculations και αφορά την διαδικασία της ανάλυσης, κατά την οποία καθορίζονται οι υπολογισμοί που πρέπει να πραγματοποιηθούν, ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα δύο τελευταία υπό – προγράμματα του λογισμικού, ονομάζονται Output και Curves αντίστοιχα. Στο πρώτο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με γραφικό τρόπο, ενώ το δεύτερο δίνει τη δυνατότητα διεξαγωγής διαγραμμάτων που αφορούν τις υπολογισμένες ποσότητες.

5.1.1 Input

Αποτελεί το στάδιο της προ – επεξεργασίας της ανάλυσης, κατά το οποίο κατασκευάζεται το υπό μελέτη προσομοίωμα. Ο σωστός ορισμός του προσομοιώματος, αποτελεί το σημαντικότερο βήμα της διαδικασίας της ανάλυσης, καθώς είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων.

Το πρώτο βήμα, το οποίο προηγείται του σχεδιασμού, είναι ο ορισμός των μονάδων μέτρησης που θα χρησιμοποιηθούν, τόσο κατά τον σχεδιασμό, όσο και για τους υπολογισμούς και τα αποτελέσματα, των τιμών των βασικών ποσοτήτων, όπως η επιτάχυνση της βαρύτητας, η

ψευδοστατική επιτάχυνση, στην περίπτωση ψευδοστατικής ανάλυσης και το ειδικό βάρος του νερού, και παράλληλα, το είδος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση. Οι προεπιλεγμένες τιμές της επιτάχυνσης της βαρύτητας και του ειδικού βάρους του νερού είναι 9.81 m/s^2 και 10 kN/m^3 αντίστοιχα. Όσον αφορά το είδος των πεπερασμένων στοιχείων, το λογισμικό προσφέρει την επιλογή να χρησιμοποιηθούν μόνο τριγωνικά στοιχεία, 6 κόμβων (6 – node elements) ή 15 κόμβων (15 – node elements). Η επιλογή των στοιχείων γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων, την ταχύτητα των υπολογισμών και την μνήμη που θα χρησιμοποιηθεί. Τα στοιχεία 15 κόμβων, προσφέρουν υψηλότερη ακρίβεια αποτελεσμάτων συγκριτικά με τα στοιχεία 6 κόμβων, ακόμη και στα πιο περίπλοκα προβλήματα, όμως η ταχύτητα των υπολογισμών είναι αισθητά μικρότερη και η μνήμη που απαιτείται περισσότερη.



Εικόνα 5.1: Στοιχεία 15 κόμβων (a) και στοιχεία 6 κόμβων (b)

Έπειτα, αφού έχει γίνει η σωστή επιλογή μονάδων, σχεδιάζεται η γεωμετρία του μοντέλου, η οποία καθορίζεται με βάση το υπό μελέτη πρόβλημα. Το PLAXIS, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελεί ένα λογισμικό, δισδιάστατων αναλύσεων, τα οποία μπορεί να είναι επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) ή αξονοσυμμετρικά (axisymmetric).

Το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός του υλικού από το οποίο αποτελείται το υπό μελέτη προσομοίωμα. Ο ορισμός του υλικού μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω επιλογής από τη βάση δεδομένων που

προϋπάρχει στο λογισμικό, είτε καθορίζοντας τις ιδιότητες και το είδος του υλικού εξ' αρχής.

Το έδαφος και τα βραχώδη υλικά τείνουν να συμπεριφέρονται με μη γραμμικό τρόπο, υπό την άσκηση ενός εξωτερικού φορτίου. Το πιο διαδεδομένο μοντέλο περιγραφής αυτών των υλικών είναι το Mohr – Coulomb, σύμφωνα με το οποίο λαμβάνονται υπόψη πέντε βασικές ιδιότητες των υλικών, το μέτρο ελαστικότητας E (Young's modulus), ο λόγος Poisson ν (Poisson's ratio), η συνοχή c (cohesion), η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (friction angle) και η γωνία διασταλτικότητας ψ (dilatancy angle), οι τιμές των οποίων λαμβάνονται ύστερα από την εφαρμογή τριαξονικών δοκιμών θλίψης (triaxial compression test) στο υπό μελέτη εδαφικό υλικό. Παράλληλα, καθορίζεται η συμπεριφορά του εδαφικού υλικού ως προς την παρουσία του νερού. Το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής τριών τύπων συμπεριφοράς, της στραγγιζόμενης (drained), της αστράγγιστης (undrained) και τη μη πορώδη (non – porous).

Όσον αφορά την συμπεριφορά των υλικών υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου δεν δημιουργείται υπερπίεση των πόρων. Πρόκειται ουσιαστικά για την περίπτωση ξηρών εδαφικών υλικών ή υλικών με υψηλή διαπερατότητα, όπως η άμμος. Αντιθέτως, όταν παρατηρείται υπερπίεση στους πόρους, επιλέγεται η αστράγγιστη συμπεριφορά του υλικού. Οι αστράγγιστες συνθήκες, αναφέρονται σε υλικά με μικρή διαπερατότητα, όπως η άργιλος, όπου η ροή του νερού μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Τέλος, η μη πορώδης συμπεριφορά, αναφέρεται σε υλικά όπως το τσιμέντο, όπου παρατηρείται γραμμική, ελαστική συμπεριφορά.

Ύστερα από τον καθορισμό της γεωμετρίας και του εδαφικού υλικού, καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες και τα εξωτερικά φορτία που ασκούνται στο προσομοίωμα. Οι μετατοπίσεις των ακμών του προσομοιώματος μπορούν να θεωρηθούν είτε μηδενικές στην οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση (πάκτωση: $u_x = u_y = 0$), είτε μηδενικές ως προς τη μία από τις δύο διευθύνσεις (κύλιση: $u_x = 0$ ή $u_y = 0$), είτε να λάβουν καθορισμένες, μη μηδενικές, τιμές από τον χρήστη. Όσον αφορά τα εξωτερικά φορτία που ασκούνται στο προσομοίωμα, αυτά που είναι διανεμημένα ή σημειακά.

Το επόμενο βήμα της προ – επεξεργασίας είναι ο καθορισμός του πλέγματος (mesh). Το λογισμικό επιτρέπει την αυτόματη παραγωγή του πλέγματος, δίνοντας την δυνατότητα 45 επιλογής της πυκνότητας του μέσα από πέντε επίπεδα, πολύ αραιό (very coarse), αραιό (coarse), μέτριας πυκνότητας (medium), πυκνό (fine) και πολύ πυκνό (very fine). Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα πύκνωσης του δικτύου σε περιοχές συγκέντρωσης υψηλών τάσεων, με στόχο την μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Το τελευταίο βήμα πριν την έναρξη των υπολογισμών, είναι ο προσδιορισμός των αρχικών συνθηκών που επικρατούν στο μοντέλο. Οι αρχικές συνθήκες που καθορίζονται, διακρίνονται σε δυο είδη, τις αρχικές πιέσεις πόρων λόγω της παρουσίας νερού και τις αρχικές τάσεις που ασκούνται λόγω της βαρύτητας. Οι αρχικές τάσεις που ασκούνται στο σώμα λόγω της επίδρασης της βαρύτητας, υπολογίζονται με την διαδικασία K_0 . Σύμφωνα με αυτή, οι κατακόρυφες που ασκούνται σε ένα σώμα, το οποίο αποτελείται από ομοιογενές υλικό, υπολογίζονται με βάση την σχέση $\sigma_v = \gamma \times h$, όπου σ_v οι κατακόρυφες τάσεις, γ το ειδικό βάρος του εδαφικού υλικού και h το βάθος, όπως αυτό υπολογίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του σώματος.

Αντίστοιχα, οι οριζόντιες τάσεις υπολογίζονται με βάση την τιμή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων k_0 και τις κατακόρυφες τάσεις, χρησιμοποιώντας την σχέση $\sigma_h = k_0 \times \sigma_v$. Σύμφωνα, με τον τύπο του Jaky, ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων υπολογίζεται ως $k_0 = 1 - \sin \phi$, όπου ϕ η γωνία εσωτερικής τριβής του εδαφικού υλικού.

5.1.2 Calculations

Το συγκεκριμένο υπό – πρόγραμμα, αποτελεί το στάδιο της ανάλυσης. Αφού έχουν καθοριστεί πλήρως η γεωμετρία του προσομοιώματος, το υλικό από το οποίο αποτελείται, το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων και οι αρχικές συνθήκες που επικρατούν, γίνεται η ανάλυση αυτών με σκοπό την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Το πρόγραμμα των υπολογισμών, δίνει τη δυνατότητα για αναλύσεις που σχετίζονται με την παραμόρφωση του προσομοιώματος, ενώ

διακρίνονται 4 τύποι υπολογισμών, Plastic, Consolidation, Phi/c reduction και Dynamic.

Ο πρώτος τύπος υπολογισμών χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που είναι επιθυμητή η ανάλυση ελαστο – πλαστικών παραμορφώσεων του προσομοιώματος. Η πλαστική ανάλυση εφαρμόζεται συνήθως σε πρακτικά γεωτεχνικά προβλήματα και δεν λαμβάνει υπόψη τις χρονικές επιδράσεις.

Η ανάλυση στερεοποίησης αφορά τις περιπτώσεις εκείνες όπου απαιτείται η λεπτομερής ανάλυση της εκτόνωσης ή της εξέλιξης της υπερπίεσης των πόρων σε πλήρως κορεσμένα αργιλικά εδάφη σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Η ανάλυση με τη μέθοδο μείωσης των παραμέτρων της συνοχής (c , kPa) και της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ , deg), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας του προσομοιώματος υπό την επίδραση των συνθηκών που έχουν ορισθεί και των διαδικασιών που έχουν πραγματοποιηθεί σε προηγούμενα βήματα. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο ανάλυσης, η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής μειώνονται συνεχώς έως ότου προκληθεί αστοχία της κατασκευής.

Κατά τη διάρκεια μιας ανάλυσης παραμόρφωσης οι τιμές των φορτίων που ασκούνται στο προσομοίωμα υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές που έχουν ορισθεί στο στάδιο εισαγωγής των δεδομένων, αλλά και τους πολλαπλασιαστές που ορίζονται στο στάδιο των υπολογισμών.

Ο δεύτερος πολλαπλασιαστής ελέγχει την τιμή των ψευδοστατικών δυνάμεων που ασκούνται στο προσομοίωμα, όπως αυτές προκύπτουν από τον συντελεστή ψευδοστατικής επιτάχυνσης που έχει ορισθεί στις γενικές ρυθμίσεις, στο στάδιο εισαγωγής των δεδομένων. Όταν ορισθούν ίσοι με τη μονάδα και οι δύο προαναφερόμενοι πολλαπλασιαστές, τότε θεωρείται πως ασκείται στο προσομοίωμα όλο το βάρος του και οι πιέσεις του νερού, καθώς και όλη η διαθέσιμη ψευδοστατική δύναμη.

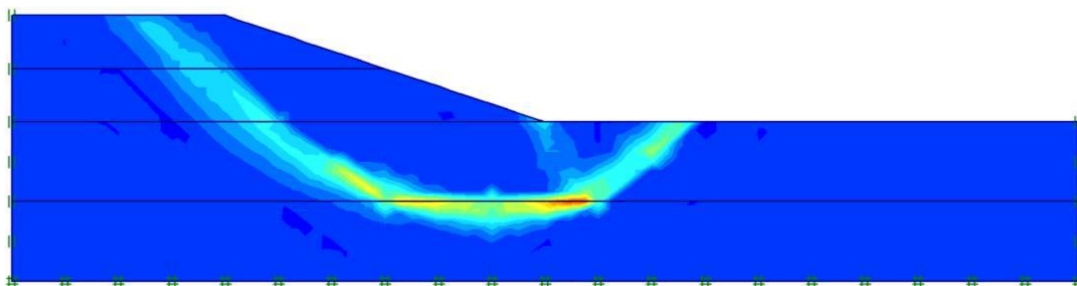
Ο πολλαπλασιαστής M_{sf} αναφέρεται στη ανάλυση ασφάλειας και απαιτείται ο ορισμός του για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας. Χρησιμοποιείται για τον ορισμό του βήματος σύμφωνα με το οποίο θα μειώνεται η αντοχή του εδαφικού υλικού έως ότου φτάσει στην αστοχία. Η προεπιλεγμένη αρχική τιμή του πολλαπλασιαστή είναι 0.1.

Αφού έχουν ορισθεί οι φάσεις υπολογισμού, η μέθοδος ανάλυσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε καθεμία από αυτές και οι πολλαπλασιαστές, ορίζονται κάποια σημεία του προσομοιώματος για τα οποία θα μπορεί να γίνει εξαγωγή διαγραμμάτων στο πρόγραμμα Curves.

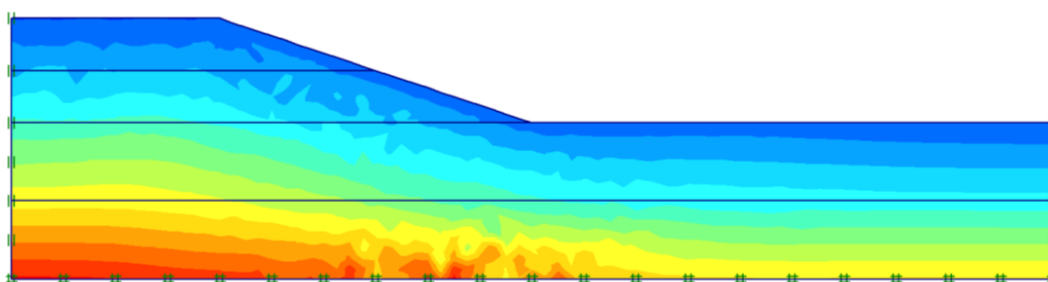
5.1.3 Output – Curves

Τα υπό – προγράμματα Output και Curves εντάσσονται στο στάδιο της μέτα – επεξεργασίας και αποτελούν αντίστοιχα την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη διαδικασία των υπολογισμών και την εξαγωγή συγκριτικών διαγραμμάτων.

Μέσω του Output δίνεται η δυνατότητα παρουσιασθούν γραφικά το αποτέλεσμα μετά από κάθε φάση υπολογισμού. Είναι εφικτό να δοθεί η γραφική απεικόνιση των παραμορφώσεων που υφίσταται το προσομοίωμα, των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτό λόγω των δυνάμεων που ασκούνται, καθώς και των μετατοπίσεων που υφίσταται λόγω της παραμόρφωσης. Παράλληλα, δίνεται η επιλογή του τρόπου απεικόνισης των αποτελεσμάτων ο οποίος μπορεί να είναι είτε μέσω των κύριων κατευθύνσεων (principal directions), είτε μέσω ισοϋψών καμπύλων (contours) ή σκιάσεων (shadings).



Εικόνα 5.2: Συνολικές παραμορφώσεις (total strains – shadings)



Εικόνα 5.3: Συνολικές τάσεις (total stresses – shadings)

Αντίστοιχα, μέσω του Curves παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής διαγραμμάτων με βάση τις τιμές των παραμέτρων που έχουν υπολογισθεί στο στάδιο των υπολογισμών.

5.2 Δημιουργία προσομοιωμάτων στο PLAXIS

Για τον σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας που εξήχθησαν από την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων και αυτών που υπολογίσθηκαν μέσω της προσομοίωσης στο περιβάλλον του PLAXIS. Συνεπώς, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων έχουν αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες και γεωμετρία με αυτή που συστήθηκε στο Κεφάλαιο 5, μέσω των αναλυτικών εξισώσεων.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι περιπτώσεις πεπερασμένων πρηνών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες, για ύψη από 2m έως 5m με σταθερή γωνία κλίσης $\beta=35^\circ$ (πεπερασμένο πρηνές). Παράλληλα, όσον αφορά τις ιδιότητες του εδαφικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε θεωρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή ελαστικότητας E , του λόγου Poisson ν καθώς και του ειδικού βάρους γ . Για τις τιμές της συνοχής c και της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ χρησιμοποιήθηκαν οι συνδυασμοί του Πίνακα 5.4.

Όσον αφορά τα απειρομήκη πρηνή, η μελέτη της ευστάθειας τους μέσω της χρήσης του λογισμικού PLAXIS δεν είναι εφικτή, καθώς πρόκειται για μια ειδική περίπτωση που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και απαιτεί πολλές παραδοχές, η εφαρμογή των οποίων δεν καλύπτεται ικανοποιητικά από το δεδομένο λογισμικό.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας θα παρουσιασθούν ενδεικτικά κάποιες από τις παραπάνω περιπτώσεις με στόχο να συγκριθούν με τις αντίστοιχες των αναλυτικών σχέσεων. Οι υπόλοιπες αναλύσεις θα παρουσιασθούν στο παράρτημα.

5.3 Πρανές πεπερασμένου ύψους – προσομοίωση

5.3.1 Γεωμετρία – Συνοριακές συνθήκες

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες του υπό μελέτη εδαφικού υλικού(άμμος)

Ειδικό βάρος γ (kN/m ³)	21
Μέτρο Ελαστικότητας E (kN/m ²)	1000
Λόγος Poisson ν	0,35

Η προσομοίωση των πρανών πεπερασμένου ύψους, πραγματοποιήθηκε, για σταθερή γωνία κλίσης $\beta=35^\circ$, καθώς και για ύψη πρανών 2m έως 5m. Το προσομοίωμα κάθε περίπτωσης είναι διαφορετικό προκειμένου οι οριακές συνθήκες να μην επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Για την εφαρμογή των οριακών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία total fixities σύμφωνα με την οποία τα κατακόρυφα όρια είναι περιορισμένα μόνο σε κατακόρυφη κίνηση (roller), ενώ οι κινήσεις του κάτω ορίου έχουν περιοριστεί και ως προς τον οριζόντιο και ως προς τον κατακόρυφο άξονα.

5.3.2 Εδαφικά υλικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τιμές των παραμέτρων E, ν και γ θεωρήθηκαν σταθερές σε όλα τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν και αναφέρονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.2: Ιδιότητες του υπό μελέτη εδαφικού υλικού(βράχος)

Ειδικό βάρος γ (kN/m ³)	26
Μέτρο ελαστικότητας E (kN/m ²)	0,943
Λόγος Poisson ν	0,2

Πίνακας 5.3: Ιδιότητες του υπό μελέτη εδαφικού υλικού(άργιλος)

Ειδικό βάρος γ (kN/m ³)	15
Μέτρο ελαστικότητας E (kN/m ²)	500
Λόγος Poisson ν	0,3

Όσον αφορά τους συνδυασμούς συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής που μελετήθηκαν, αυτοί αναφέρονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Συνδιασμοί παραμέτρων c και ϕ

Συνοχή c (kPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (deg)
0	32
15	32

5.3.3 Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων (mesh generation)

Με στόχο την υψηλότερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων το πλέγμα που επιλέχθηκε αποτελείται από τριγωνικά στοιχεία 15 κόμβων, ενώ παράλληλα ορίσθηκε πολύ μεγάλη πυκνότητα (very fine).

5.3.4 Αρχικές συνθήκες

Όσον αφορά την περίπτωση του ξηρού πρανούς, οι αρχικές πιέσεις των πόρων θεωρήθηκαν μηδενικές, δηλαδή ο φρεάτιος ορίζοντας τέθηκε στο κάτω όριο του προσομοιώματος. Αντιθέτως, για την περίπτωση του πλήρως βυθισμένου πρανούς ο φρεάτιος ορίζοντας ορίσθηκε στο ίδιο ύψος πάνω από τη στέψη του πρανούς.

5.3.5 Διαδικασία υπολογισμών

Για την μελέτη της ευστάθειας το πρόβλημα χωρίστηκε σε δύο φάσεις υπολογισμού. Στην περίπτωση μελέτης υπό στατικές συνθήκες, η πρώτη αποτελεί τον υπολογισμό των αρχικών τάσεων που ασκούνται λόγω της επίδρασης της βαρύτητας, ο οποίος πραγματοποιήθηκε θεωρώντας πως $\Sigma MWeight = 1$. Αντιθέτως, στην περίπτωση της ανάλυσης υπό την επίδραση σεισμικών συνθηκών, στην πρώτη φάση υπολογισμού, συμπεριλήφθη και ο υπολογισμός των τάσεων που εφαρμόζονται στο πρανές, λόγω της άσκησης της ψευδοστατικής επιτάχυνσης. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε, θεωρώντας πως $\Sigma Maccel = 1$. Και στις

δύο περιπτώσεις, η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της πλαστικής παραμόρφωσης.

Στην δεύτερη φάση υπολογισμού, πραγματοποιήθηκε η μελέτη ασφάλειας, όπου υπολογίσθηκε ο συντελεστής ασφαλείας, μέσω της μεθόδου phi/c reduction.

Και από τις δύο φάσεις υπολογισμού, αγνοήθηκε η αστράγγιστη συμπεριφορά των υλικών.

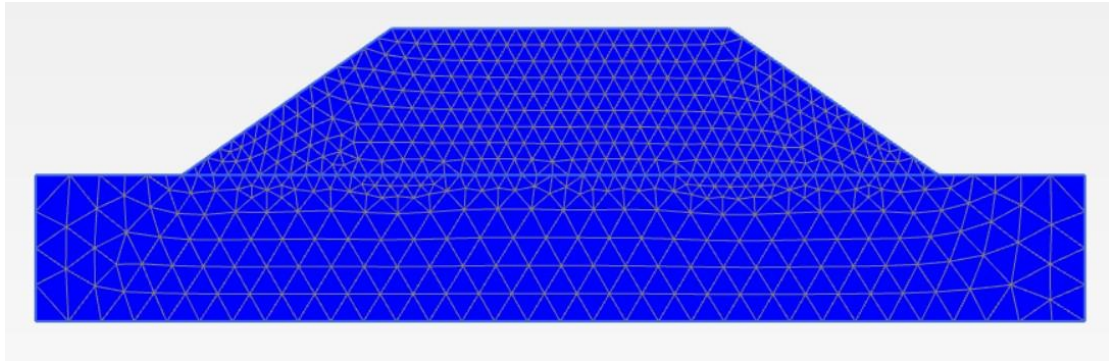
5.4 Πρανές πεπερασμένου ύψους – Αποτελέσματα – Σύγκριση με αναλυτικές σχέσεις

5.4.1 Χερσαία πρανή – Στατικά και ψευδοστατικά προσομοιώματα

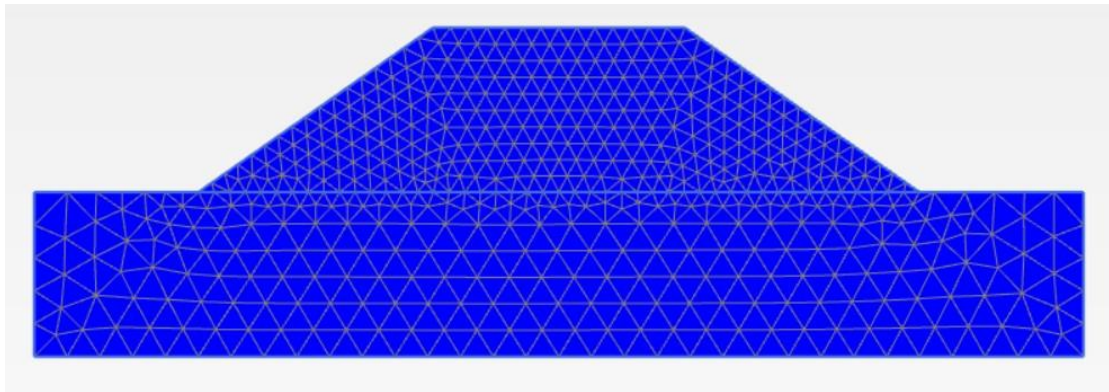
Τα πρώτα προσομοιώματα, των οποίων εξετάστηκε η ευστάθεια υπό στατικές συνθήκες, είναι χερσαία πρανή ύψους 2m έως 5m και αποτελούνται από μη συνεκτικά υλικά με γωνία εσωτερική τριβής 32°. Οι ιδιότητες του πρώτου εδαφικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5.5: Ιδιότητες πρώτου εδαφικού υλικού

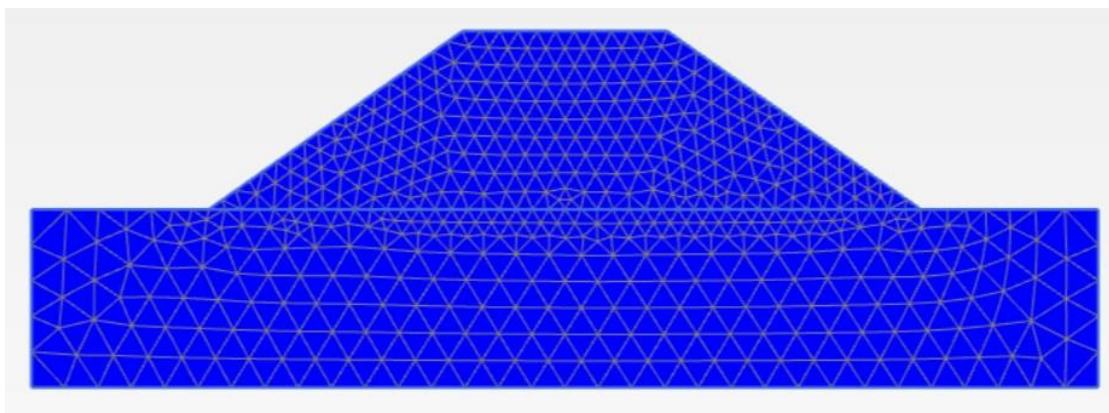
Ειδικό βάρος γ (kN/m ³)	21
Μέτρο ελαστικότητας E (kPa)	1000
Λόγος Poisson ν	0,35
Συνοχή c (kPa)	0
Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (deg)	32
Γωνία διασταλτικότητας ψ (deg)	0



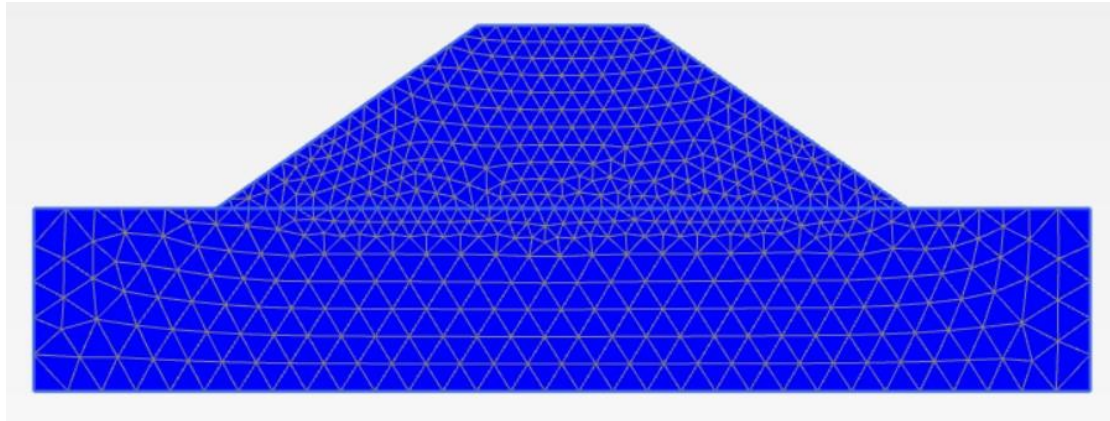
Εικόνα 5.4:Επιφάνεια αστοχίας πρηνούς 2m με γωνία κλίσης 35°



Εικόνα 5.5:Επιφάνεια αστοχίας πρηνούς 3m με γωνία κλίσης 35°



Εικόνα 5.6:Επιφάνεια αστοχίας πρηνούς 4m με γωνία κλίσης 35°



Εικόνα 5.7:Επιφάνεια αστοχίας πρανούς 5m με γωνία κλίσης 35°

Όπως παρατηρείται, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται με την αύξηση του ύψους του πρανούς, συμπέρασμα που συμπίπτει με εκείνα που εξήχθησαν από την μελέτη της ευστάθειας με τη χρήση των αναλυτικών σχέσεων.

Πίνακες 5.6 και 5.7: Συγκριτικοί πίνακες συντελεστών ασφαλείας για τα πρανά ύψους 2m έως 5

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΑΝΟΥΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟΥ ΥΨΟΥΣ

	Χωρίς Νερό,Χωρίς Σεισμο	Χωρίς Νερό,Με Σεισμο	Με Νερό,Χωρίς Σεισμο
H ₁ =2m FS	1,5	0,8	1,5
H ₂ =3m FS	1,5	0,8	1,5
H ₃ =4m FS	1,5	0,8	1,5
H ₄ =5m FS	1,5	0,8	1,5

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

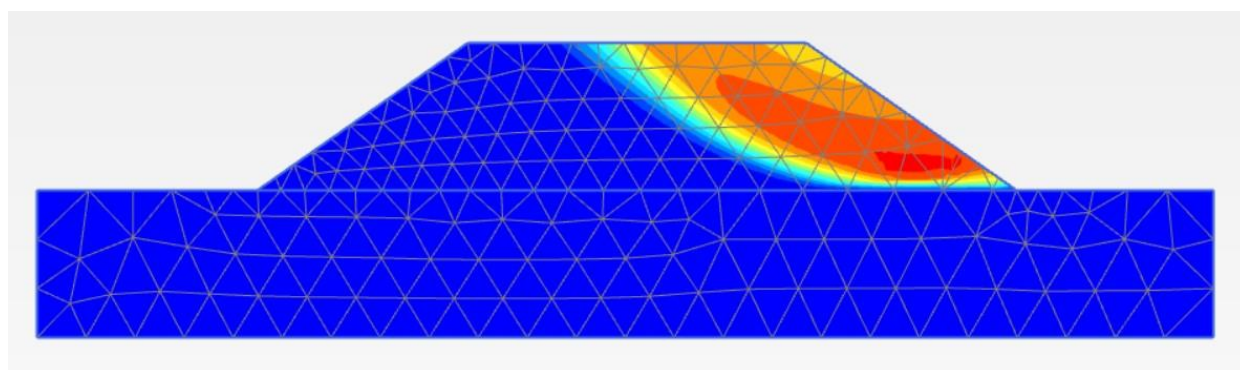
	Χωρίς Νερό,Χωρίς Σεισμο	Χωρίς Νερό,Με Σεισμο	Με Νερό,Χωρίς Σεισμο
H ₁ =2m FS	1,8	1,1	2,1
H ₂ =3m FS	1,5	Αστοχία	1,6
H ₃ =4m FS	1,2	Αστοχία	1,4
H ₄ =5m FS	1,1	Αστοχία	1,2

Από τους συγκριτικούς πίνακες, παρατηρείται πως οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων διαφέρουν ελάχιστα από εκείνους που έχουν προκύψει από τις αναλυτικές σχέσεις, γεγονός που σημαίνει πως οι αναλυτικές εξισώσεις περιγράφουν σωστά τα παραπάνω μοντέλα.

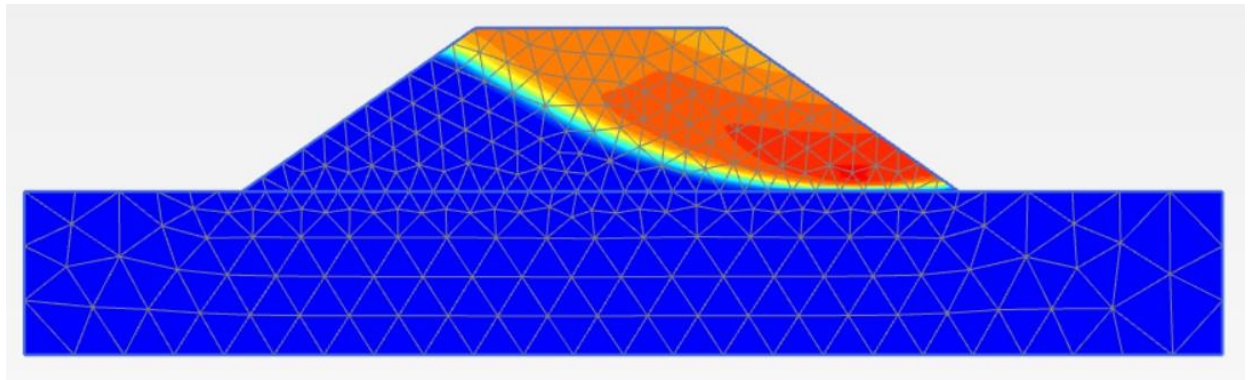
Η δεύτερη σειρά προσομοιωμάτων αποτελείται από τρία χερσαία πρανή, πάλι ύψους 2m έως 5m αλλά με διαφορετικά εδαφικά υλικά και διαφορετική γεωμετρία σιδηροδρομικού επιχώματος (επίχωμα διπλής σιδηροδρομικής γραμμής). Ως βάση για το επίχωμα μας έχουμε συμπαγή βράχο και το πρανές μας αποτελείται από άργιλο υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Πίνακας 5.8: Ιδιότητες δεύτερου εδαφικού υλικού

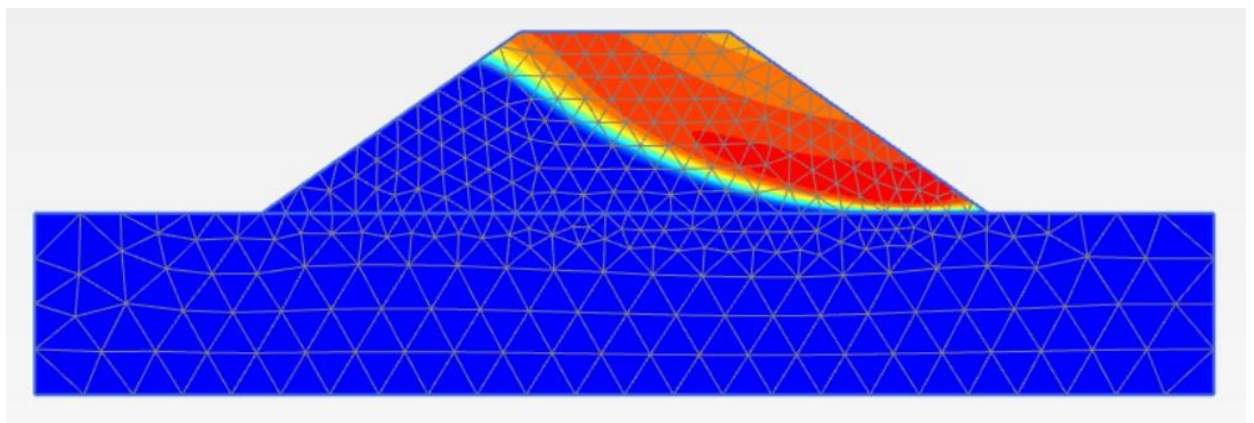
Ειδικό βάρος γ (kN/m ³)	15
Μέτρο ελαστικότητας E (kPa)	500
Λόγος Poisson ν	0,3
Συνοχή c (kPa)	15
Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (deg)	32
Γωνία διασταλτικότητας ψ (deg)	0



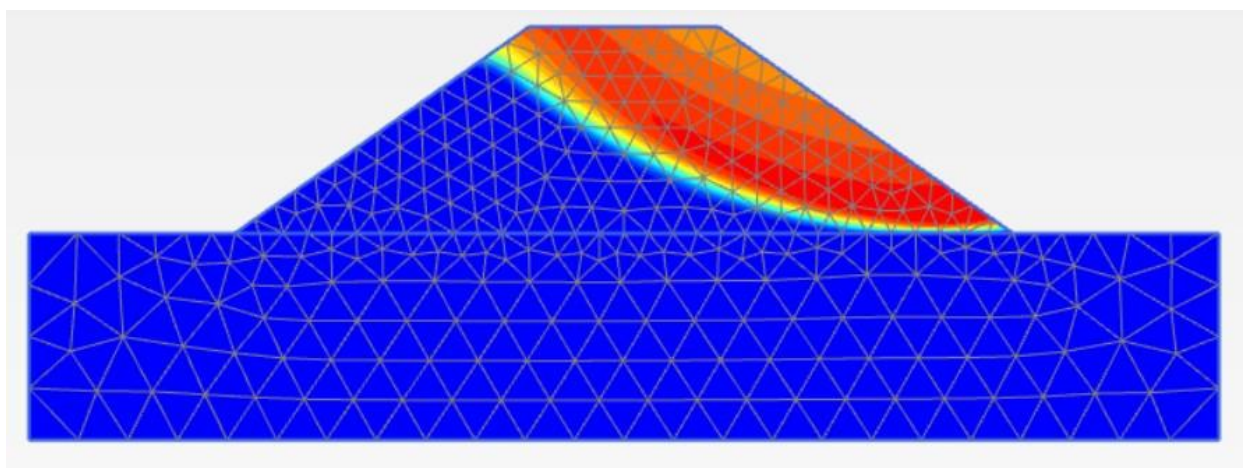
Εικόνα 5.8: Επιφάνεια αστοχίας πρανούς 2m με γωνία κλίσης 35°



Εικόνα 5.9:Επιφάνεια αστοχίας πρηνούς 3m με γωνία κλίσης 35°



Εικόνα 5.10:Επιφάνεια αστοχίας πρηνούς 4m με γωνία κλίσης 35°



Εικόνα 5.11:Επιφάνεια αστοχίας πρηνούς 5m με γωνία κλίσης 35°

Και στη συγκεκριμένη περίπτωση επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι με την αύξηση του ύψους μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας. Παρακάτω παρουσιάζεται συγκριτικός πίνακας των συντελεστών ασφαλείας με εκείνους που προέκυψαν από τις αναλυτικές εξισώσεις.

Πίνακες 5.9 και 5.10: Συγκριτικοί πίνακες συντελεστών ασφαλείας για τα πρανή ύψους 2m έως 5m

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΑΝΟΥΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟΥ ΥΨΟΥΣ

		Χωρίς Νερο,Χωρίς Σεισμο	Χωρίς Νερο,Με Σεισμο	Με Νερο,Χωρίς Σεισμο
H ₁ =2m	FS	6,4	5,7	10,8
H ₂ =3m	FS	4,8	4,1	7,7
H ₃ =4m	FS	4,0	3,3	6,2
H ₄ =5m	FS	3,5	2,8	5,3

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

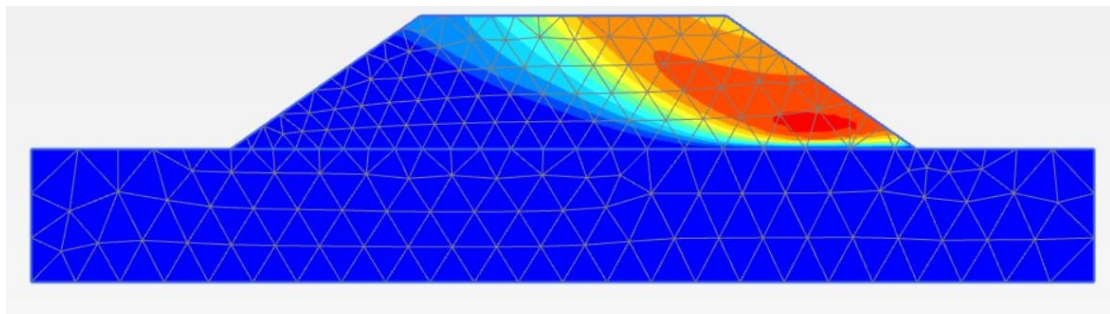
		Χωρίς Νερο,Χωρίς Σεισμο	Χωρίς Νερο,Με Σεισμο	Με Νερο,Χωρίς Σεισμο
H ₁ =2m	FS	4,9	3,4	6,4
H ₂ =3m	FS	3,7	2,6	4,6
H ₃ =4m	FS	3,1	2,2	3,8
H ₄ =5m	FS	2,7	1,9	3,2

Παρατηρείται, πως για την περίπτωση πρανών που αποτελούνται από συνεκτικό εδαφικό υλικό σε αστράγγιστες συνθήκες, οι διαφορές των συντελεστών ασφαλείας που προκύπτουν από τις αναλυτικές σχέσεις και αυτών που προκύπτουν από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι μεγάλες. Δεδομένου ότι η κατάστρωση των αναλυτικών εξισώσεων πραγματοποιήθηκε θεωρώντας πως η επιφάνεια αστοχίας είναι επίπεδη, οι μεγάλες διαφορές είναι αναμενόμενες, καθώς σε αυτή την περίπτωση εδαφικού υλικού δημιουργείται κυκλική επιφάνεια.

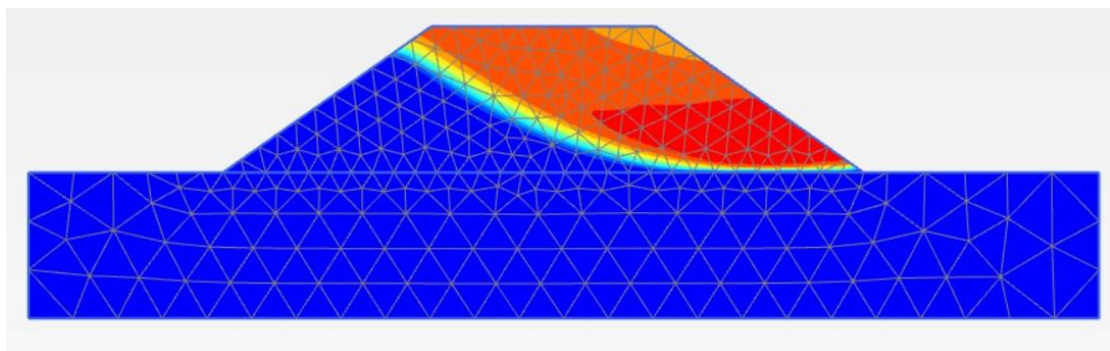
Προκειμένου να έχουμε πιο αλληθοφανή αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκε ως βάση για τα επιχώματα μία δεύτερη άργιλο διαφορετικής συνοχής όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.11: Ιδιότητες τρίτου εδαφικού υλικού

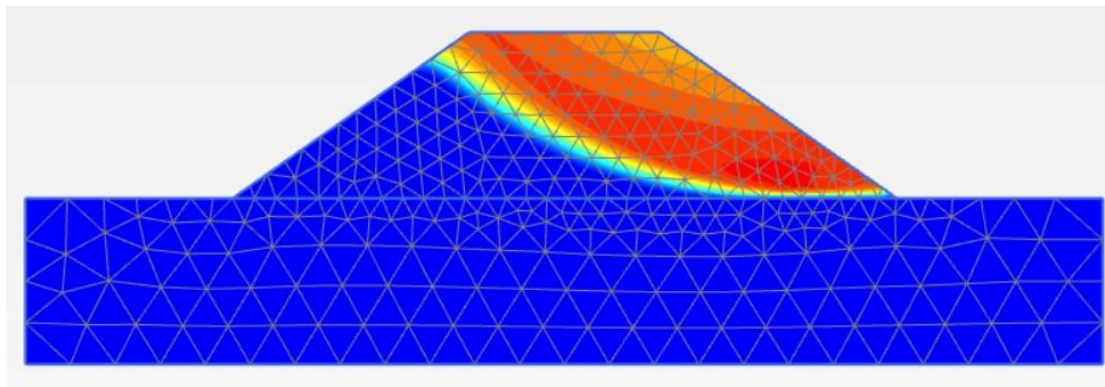
Ειδικό βάρος γ (kN/m ³)	17
Μέτρο ελαστικότητας E (kPa)	500
Λόγος Poisson ν	0,3
Συνοχή c (kPa)	35
Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (deg)	32
Γωνία διασταλτικότητας ψ (deg)	0



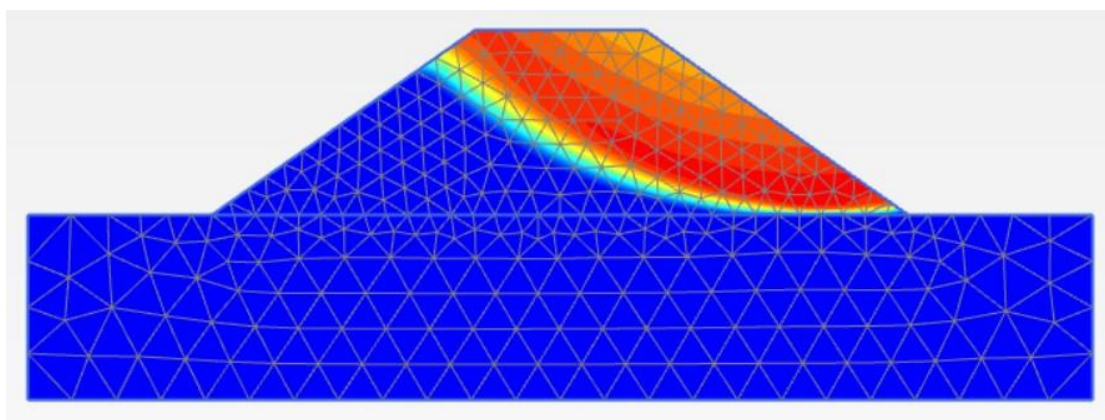
Εικόνα 5.12: Επιφάνεια αστοχίας πρανούς 2m με γωνία κλίσης 35°



Εικόνα 5.13: Επιφάνεια αστοχίας πρανούς 3m με γωνία κλίσης 35°



Εικόνα 5.14:Επιφάνεια αστοχίας πρανούς 4m με γωνία κλίσης 35°



Εικόνα 5.15:Επιφάνεια αστοχίας πρανούς 5m με γωνία κλίσης 35°

Και στη συγκεκριμένη περίπτωση πάλι επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι με την αύξηση του ύψους μειώνεται ο συντελεστής ασφαλείας. Παρακάτω παρουσιάζεται συγκριτικός πίνακας των συντελεστών ασφαλείας με εκείνους που προέκυψαν από τις αναλυτικές εξισώσεις.

Πίνακες 5.12 και 5.13: Συγκριτικοί πίνακες συντελεστών ασφαλείας για τα πρανή ύψους 2m έως 5m

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΑΝΟΥΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟΥ ΥΨΟΥΣ

		Χωρίς Νερο,Χωρίς Σεισμο	Χωρίς Νερο,Με Σεισμο	Με Νερο,Χωρίς Σεισμο
H ₁ =2m	FS	6,4	5,7	10,8
H ₂ =3m	FS	4,8	4,1	7,7
H ₃ =4m	FS	4,0	3,3	6,2
H ₄ =5m	FS	3,5	2,8	5,3

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

		Χωρίς Νερο,Χωρίς Σεισμο	Χωρίς Νερο,Με Σεισμο	Με Νερο,Χωρίς Σεισμο
H1=2m	FS	4,8	3,4	6,3
H2=3m	FS	3,6	2,6	4,5
H3=4m	FS	2,9	2,1	3,6
H4=5m	FS	2,6	1,9	3,1

Παρατηρείται, πως και σε αυτήν περίπτωση πρανών που αποτελούνται από συνεκτικό εδαφικό υλικό σε αστράγγιστες συνθήκες, οι διαφορές των συντελεστών ασφαλείας που προκύπτουν από τις αναλυτικές σχέσεις και αυτών που προκύπτουν από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι μεγάλες. Άρα εξάγεται πάλι το ίδιο συμπέρασμα με την περίπτωση που στη βάση του επιχώματος είχαμε βράχο.

Κεφάλαιο 6: Γενικά Συμπεράσματα και Προτάσεις

6.1 Γενικά Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπήρξε η ανάλυση της ευστάθειας των πρανών των σιδηροδρομικών επιχωμάτων μέσω του υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας με τη χρήση απλών αναλυτικών μεθόδων και της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την επιρροή της κλιματικής αλλαγής και πιο συγκεκριμένα των πλυμμηρών στα σιδηροδρομικά επιχώματα.

Ως προς τις αναλυτικές μεθόδους, αναπτύχθηκαν ορισμένες εξισώσεις με βάση τις οποίες υπολογίσθηκε ο συντελεστής ασφαλείας δύο ειδών πρανών, των απειρομήκων και των πρανών πεπερασμένου ύψους. Οι κατηγορίες αυτές μελετήθηκαν για την περίπτωση σιδηροδρομικών επιχωμάτων, όπου εντοπίζονται επιφανειακά ύδατα, ενώ παράλληλα εισήχθησαν διαφορετικές τιμές ύψους και συνοχής προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση όλων αυτών των παραγόντων στην ευστάθεια. Ύστερα από την κατάστρωση των εξισώσεων, δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα για όλες τις προαναφερόμενες περιπτώσεις, από τα οποία εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Αρχικά, παρατηρήθηκε πως για μη συνεκτικά υλικά η ευστάθεια των πρανών είναι ανεξάρτητη του πάχους της εδαφικής στρώσης και του ύψους για τα απειρομήκη και τα πεπερασμένα πρανά αντίστοιχα, ενώ αντιθέτως, για συνεκτικά υλικά παρατηρείται πως, όσο οι παράμετροι αυτοί αυξάνονται, τόσο η ευστάθεια μειώνεται. Παράλληλα, όπως ήταν αναμενόμενο, αύξηση της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής συνεπάγονται ανάλογη αύξηση του συντελεστή ασφαλείας. Ύστερα, όσον αφορά τη γωνία κλίσης των πρανών, όσο πιο απότομο είναι το πρανές, τόσο μικρότερη είναι η ευστάθεια του. Συγχρόνως, παρατηρήθηκε πως υπό σεισμική φόρτιση τα πρανά, ανεξάρτητα του εδαφικού υλικού από το οποίο αποτελούνται, είναι πιο επιρρεπή σε αστοχία συγκριτικά με την περίπτωση όπου επικρατούν στατικές συνθήκες και επισπροσθέτως είτε έχουμε σεισμικό συντελεστή στην οριζόντια διεύθυνση διάφορο του μηδενός και στην κατακόρυφη διεύθυνση ίσον με μηδέν και αντίστροφα παρατηρήθηκε πως οι συντελεστες ασφαλείας του πρανούς είναι σχεδόν ίδιοι. Τέλος, όσον

αφορά την παρουσία επιφανειακών υδάτων στα χερσαία ξηρά πρηνή παρατηρήθηκε πως σε αυτά όπου το ύψος της στάθμης αυτών που είναι κόντα ή ίσο με το ύψος του πρανούς είναι πιο ευσταθή από εκείνα όπου η στάθμη των επιφανειακών υδάτων είναι σχεδόν μηδενική. Συγκεκριμένα, οι συντελεστές ασφαλείας των πρανών που είναι πλήρως κάτω από το νερό είναι ακριβώς διπλάσιοι από εκείνους των χερσαίων ξηρών πρανών για συνεκτικά υλικά, ενώ στην περίπτωση μηδενικής συνοχής είναι όμοιοι.

Ύστερα από την μελέτη των αναλυτικών εξισώσεων, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των πρανών πεπερασμένου ύψους με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS. Σε αυτό το στάδιο επιλέχθηκε να μελετηθούν ενδεικτικά κάποιες από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν με την αναλυτική μέθοδο. Δημιουργήθηκαν προσομοιώματα με τέσσερα διαφορετικά ύψη, με σταθερή γωνία κλίσης και δύο περιπτώσεις εδαφικού υλικού. Για τα χερσαία πρηνή πραγματοποιήθηκε στατική και ψευδοστατική ανάλυση. Από την μελέτη της ευστάθειας με τη χρήση της αριθμητικής μεθόδου, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι όμοια με εκείνα που προέκυψαν από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της αναλυτικής μεθόδου.

Από τη σύγκριση των δύο μεθόδων προέκυψε πως για μη συνεκτικά υλικά οι αναλυτικές εξισώσεις παρέχουν πολύ υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων, γεγονός που σημαίνει πως περιγράφουν ικανοποιητικά τις περιπτώσεις των πρανών που μελετήθηκαν. Αντιθέτως, παρατηρήθηκε πως για συνεκτικά εδαφικά υλικά η αναλυτική μέθοδος παρέχει πολύ συντηρητικά αποτελέσματα. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός πως οι αναλυτικές εξισώσεις υποθέτουν πως η επιφάνεια αστοχίας των υπό μελέτη πρανών είναι επίπεδη. Η υπόθεση αυτή ωστόσο, δεν ισχύει στην περίπτωση όπου το εδαφικό υλικό έχει μη μηδενική συνοχή, καθώς η επιφάνεια αστοχίας που δημιουργείται είναι ελλειπτική.

Συνοπτικά, παρατηρείται πως η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια των πρανών αφού καθορίζουν τη διατμητική αντοχή τους. Αντίστοιχα, σημαντική είναι και η επίδραση της γωνίας κλίσης, αλλά και του ύψους για τα συνεκτικά υλικά. Όπως αναμενόταν, διαπιστώθηκε ότι η σεισμική καταπόνηση οδηγεί σε σημαντική μείωση του συντελεστή ασφάλειας των σιδηροδρομικών επιχωμάτων ανάλογα με τα επίπεδα της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Απεναντίας, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της στάθμης των

επιφανειακών υδάτων λόγω πλημμύρας έχει ουδέτερη ή/και ευεργετική επίπτωση στην ευστάθεια των επιχωμάτων, γεγονός που δεν συνάδει με τις παρατηρηθείσες βλάβες σε διάφορα σιδηροδρομικά δίκτυα μετά από έντονες βροχοπτώσεις, πριν ή μετά την κλιματική αλλαγή. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο έμμεσο συμπέρασμα ότι οι βλάβες στα σιδηροδρομικά επιχώματα, οφείλονται πιθανότατα στην ανεξέλεγκτη ροή των ομβρίων υδάτων και στη συνεπακόλουθη υδραυλική διάβρωση – υποσκαφή των επιχωμάτων, και όχι στην απότομη άνοδο της στάθμης των επιφανειακών υδάτων. Κατά συνέπεια, η προστασία των πρανών των σιδηροδρομικών πρανών έναντι υδραυλικής διάβρωσης και υποσκαφής κρίνεται ως απολύτως απαραίτητη για την προστασίας τους, ανεξάρτητα με την εξέλιξη της κλιματικής αλλαγής στο μέλλον.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αντιμετώπισε ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα γεωτεχνικής μηχανικής, και συγκεκριμένα την ευστάθεια εδαφικών πρανών παρουσία νερού, με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους. Παρόλα αυτά, είναι δεδομένο ότι υπάρχουν δυνατότητες βελτίωσης των προσομοιώσεων. Δεδομένου ότι το PLAXIS είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων με περιορισμένες δυνατότητες καθώς προορίζεται για την μελέτη απλών γεωτεχνικών προβλημάτων, θα ήταν χρήσιμο να πραγματοποιηθεί η παραπάνω μελέτη ευστάθειας με κάποιο λογισμικό μεγαλύτερης αξιοπιστίας, σε συνδυασμό με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων που υποθέτουν ελλειπτική ή κυκλική επιφάνεια αστοχίας για την προσομοίωση των πρανών από συνεκτικά υλικά. Παράλληλα, με τη χρήση ενός λογισμικού με περισσότερες δυνατότητες θα ήταν ενδιαφέρουσα η παραμετρική διερεύνηση της συμπεριφοράς των χερσαίων πρανών υπό την επίδραση βροχοπτώσεων διαφορετικής έντασης και διάρκειας, με στόχο την μελέτη της επιρροής που έχει η κλιματική αλλαγή στην ευστάθεια των πρανών. Επιπροσθέτως, η δημιουργία προσομοιωμάτων τριών διαστάσεων και η δυναμική ανάλυση θα προσέφεραν μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση του προβλήματος της αστάθειας εδαφικών πρανών. Τέλος, απαιτείται μια εκτενέστερη έρευνα σχετικά με την αντιμετώπιση της ανεξέλεγκτης ροής του νερού στα επιχώματα προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή

αυτών, με στόχο την εύρεση υλικών ή μεθόδων προκειμένου να αντιμετωπιστεί το προαναφερθέν φαινόμενο.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Λυμπέρης Κώστας (2011), Σιδηροδρομική Θεωρία και Εφαρμογές, Εκδόσεις Συμμετρία
- Πυργίδης Χρίστος (2015), Συστήματα Σιδηροδρομικών Μεταφορών Εκδόσεις Ζήτη
- Τσακίρης Γιωργος (2013), Υδατικοί Πόροι:Ι. Τεχνική Υδρολογία Εκδόσεις Ζήτη
- Κούκης Γεωργιος, Σαμπατακάκης Νικόλαος (2019), Τεχνική Γεωλογία Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- Τριανταφύλλου Αθανάσιος (2017), Δομικά Υλικά, Εκδόσεις GOTSIS
- Κωμοδρόμος Αιμ. (2011), Συντολονιστική Γεωτεχνική Μηχανική-Γραμμική-Μη Γραμμική Ανάλυση, Εκδόσεις Ζήτη
- Προφυλλιδης Β. (1993), Σιδηροδρομική, Τόμος 1, Εκδόσεις Προτοπορία
- Σιδηροτροχιά (2009), Περιοδική Έκδοση Σ.Φ.Σ.-Τεύχος 35
- Lee W. Abramson (2002), Slope stability and stabilization methods
- Graham Barnes (2010), Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- Steven L. Kramer (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Εκδόσεις Wiley, 2nd edition
- David R. Maidment (1988), APPLIED HYDROLOGY, Εκδόσεις Publication Services
- W. Schoch (2001), Rail maintenance as contribution to railway track optimization, Rail Engineering International, Εκδόσεις CRC Press
- Koemer R.M. (1998), Designing with Geosynthetics. Prentice Hall (4th edition)
- Leshchinsky D. (1997) Design Procedure for Geosynthetic Reinforced Steep Slopes, Εκδόσεις LESHCHINSKY INC NEWARK DE
- [https://el.wikipedia.org/wiki/Κακοκαιρία Daniel](https://el.wikipedia.org/wiki/Κακοκαιρία_Daniel)

