

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παραμετρική ανάλυση της  
ευστάθειας των πρανών  
εκμετάλλευσης του ορυχείου  
Αμυνταίου ως προς τους  
σηματισμούς υποβάθρου

ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΟΥ ΑΥΓΗ

Σεπτέμβριος 2014

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:  
Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, Καθηγητής (Επιβλέπων)  
Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ, Καθηγητής  
ΕΜ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Το φαινόμενο της αστοχίας είναι πολύ συχνό τόσο σε υπαίθριες όσο και υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Το υπαίθριο λιγνιτωρυχείο του Αμυνταίου εμφανίζει ένα πλήθος αστοχιών καθ' όλη τη διάρκεια εκμετάλλευσής του.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ευστάθειας των πρανών στο ορυχείο του Αμυνταίου με σκοπό να βρεθούν τα πιθανά αίτια των κατολισθήσεων. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν και μελετήθηκαν πιθανά σενάρια βάσει των σχηματισμών που βρίσκονται κάτω από το τεχνικό πέρας της εκμετάλλευσής. Τα δεδομένα και οι πληροφορίες που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την ΔΕΗ και από βιβλιογραφικές αναφορές.

Η μοντελοποίηση των παραπάνω σεναρίων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού Geostudio2004 και το πρόγραμμα SLOPE/W.

Επιπρόσθετα πραγματοποιείται σύγκριση και ανάλυση των αποτελεσμάτων και προτείνονται λύσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

## **ABSTRACT**

---

Failures are a common occurrence in both surface and underground mining. A number of slope failures have occurred in the open pit lignite mine in Amyntaion during the life-time of its exploitation.

The aim of this thesis is to evaluate the slope stability along a worst case scenario section in the open pit lignite mine at Amyntaion in an attempt to determine the role of the presence of weak layers underneath the final exploitation level. Two main scenarios are examined using a commercial software package: The first scenario assumes the presence of weak clay layer and the second assumes the presence of a saturated sand layer.

Results are presented and critically evaluated.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους εκείνους που συνέβαλαν ώστε να πραγματοποιηθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Τον κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία, επιβλέποντα καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την επιλογή του θέματος, την άψογη συνεργασία και την συνεχή του βοήθεια καθ όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τον κ. Στειακάκη Εμμανουήλ, επίκουρο καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης και υπεύθυνο του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας για την παροχή του απαραίτητου προγράμματος και την χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Τον κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο, καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και αξιολόγηση της εργασίας.

Τον κ. Βαβαδάκη Διονύσιο, επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης για την εκμάθηση του λογισμικού SLOPE/W και την συνεχή βοήθεια του σε κάθε πρόβλημα.

Τον κ. Τσελεπίδη Παναγιώτη, τομέαρχη μελετών στο ορυχείο Αμυνταίου της ΔΕΗ για την αποστολή των απαραίτητων πληροφοριών και την ξενάγηση στο λιγνιτωρυχείο του Αμυνταίου.

Την κ. Σταθογιάννη Φωτεινή, επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Μηχ. Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης για τις απαραίτητες διορθώσεις επί του κειμένου της εργασίας.

Την οικογένεια μου για την υπομονή και συμπαράσταση καθ όλα τα χρόνια φοίτησης μου και τους φίλους μου για την ψυχολογική τους υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |    |
|---|----|
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....   | 3  |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | 4  |
| <b>Πρόλογος</b> .....   | 5  |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....                                       | 9  |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....  | 10 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                     | 11 |
| 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΛΙΓΝΙΤΟΡΥΧΕΙΩΝ ΔΕΗ .....                | 11 |
| 1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....                         | 11 |
| 1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....                 | 12 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΡΥΧΕΙΟ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ .....                           | 13 |
| 2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΡΥΧΕΙΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ.....                  | 13 |
| 2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ .....                         | 15 |
| 2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ .....                          | 17 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΘΕΩΡΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ .....                     | 18 |
| 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....  | 18 |
| 3.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ .....                                 | 18 |
| 3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ .....                                  | 21 |
| 3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ.....                           | 22 |
| 3.4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ FELLENIUS Ή SWEDISH.....                        | 24 |
| 3.4.2 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ BISHOP .....                       | 25 |
| 3.4.3 ΜΕΘΟΔΟΣ SPENCER .....                                   | 25 |
| 3.4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ MORGENSTERN-PRICE .....                         | 25 |
| 3.4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ JANBU.....                                      | 26 |
| 3.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ $R_u$ .....                      | 28 |
| 3.6 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑ .....                       | 29 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΟΡΥΧΕΙΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ..... | 31 |
| 4.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....  | 31 |
| 4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....                       | 31 |
| 4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....                  | 32 |
| 4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....                                 | 33 |
| 4.5 ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....            | 40 |
| 4.6 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....              | 44 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....                      | 46 |
| 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....  | 46 |
| 5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....   | 46 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....  | 47 |

|                   |    |
|-------------------|----|
| ΕΛΛΗΝΙΚΗ .....    | 47 |
| ΔΙΕΘΝΗΣ.....      | 47 |
| ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ ..... | 48 |



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 2.1: Χάρτης Ορυχείου Αμυνταίου (ΔΕΗ, 2014).....   | 14 |
| Εικόνα 2.2: Γεωτεκτονικές Ζώνες Ελλάδος (www.Geo.auth.gr).....   | 16 |
| Εικόνα 3.1: Κυκλική και Επίπεδη Ολίσθηση (Novotny,2013).....   | 19 |
| Εικόνα 3.2: Ροή (Novotny,2013).....  | 20 |
| Εικόνα 3.3: Κατάπτωση (Novotny,2013).....  | 20 |
| Εικόνα 3.4: Ανατροπή (Novotny,2013).....   | 21 |
| Εικόνα 3.5: Πλευρικές εκτάσεις (Novotny,2013).....   | 21 |
| Εικόνα 3.6: Σχεδιασμός λωρίδων και ανάλυση δυνάμεων, (Craig, 2004).....  | 23 |
| Εικόνα 3.7: Επίδραση της πίεσης των πόρων στην εντατική κατάσταση του πετρώματος (Αγιουτάντης, 2002).....          | 28 |
| Εικόνα 3.8: Κατακόρυφες τάσεις σε στοιχειώδες τμήμα (Αγιουτάντης 2002) ...   | 28 |
| Εικόνα 4.1: Κάτοψη επί της οποίας παρουσιάζεται η θέση της τομής.....  | 32 |
| Εικόνα 4.2: Τομή με τις πέντε πλησιέστερες γεωτρήσεις.....   | 32 |
| Εικόνα 4.3: Καρτέλα Method.....  | 34 |
| Εικόνα 4.4: Καρτέλα Slip Surface.....  | 35 |
| Εικόνα 4.5: Καρτέλα PWP.....   | 36 |
| Εικόνα 4.6: Επιλογή Pore Water Pressure για την εισαγωγή τιμών στο Ru.....   | 37 |
| Εικόνα 4.7: Παράθυρο Ru Coefficients για την εισαγωγή τιμής Ru κάθε στρώματος.....                                 | 37 |
| Εικόνα 4.8: Πιεζομετρική Γραμμή.....   | 38 |
| Εικόνα 4.9: Παράθυρο Draw Piezometric Lines-Επιλογή στρώματος αδυναμίας.....                                       | 38 |
| Εικόνα 4.10: Παράθυρο Draw Piezometric Lines-Επιλογή όλων των στρωμάτων.....                                       | 39 |
| Εικόνα 4.11: Παράθυρο SOLVE με τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας για κάθε μέθοδο.....                             | 39 |
| Εικόνα 4.12: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα αργίλου στα 4m βάθος χωρίς νερό.....                                     | 40 |
| Εικόνα 4.13: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα αργίλου στα 4m βάθος και νερό με $Ru=0.2$ .....                          | 40 |
| Εικόνα 4.14: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος χωρίς νερό.....                                       | 41 |
| Εικόνα 4.15: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με $Ru=0.2$ για όλα τα στρώματα.....          | 41 |
| Εικόνα 4.16: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με $Ru=0.2$ μόνο για το στρώμα αδυναμίας..... | 42 |
| Εικόνα 4.17: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με $Ru=0.3$ για όλα τα στρώματα.....          | 42 |
| Εικόνα 4.18: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με $Ru=0.3$ μόνο για το στρώμα αδυναμίας..... | 43 |
| Εικόνα 4.19: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με $Ru=0.4$ για όλα τα στρώματα.....          | 43 |
| Εικόνα 4.20: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με $Ru=0.4$ μόνο για το στρώμα αδυναμίας..... | 44 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

|   |    |
|---|----|
| Πίνακας 3.1: Συνοπτική παρουσίαση μεθόδων.....  | 27 |
| Πίνακας 3.2: Παραδείγματα αστοχιών σε παγκόσμια κλίμακα.....  | 30 |
| Πίνακας 4.1: Εύρος γεωτεχνικών ιδιοτήτων υλικών ορυχείου της Μαυροπηγής (Kanvadas et al, 2013)..... | 31 |
| Πίνακας 4.2: Γεωτρήσεις που προβάλλονται στην τομή μελέτης.....                                     | 33 |
| Πίνακας 4.3: Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων στρωμάτων.....  | 33 |
| Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα όταν η ζώνη αδυναμίας θεωρείται άργιλος.....                | 44 |
| Πίνακας 4.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα όταν η ζώνη αδυναμίας θεωρείται άμμος.....                  | 44 |
| Πίνακας 4.6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα όταν η ζώνη αδυναμίας θεωρείται άμμος(2).....               | 44 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΛΙΓΝΙΤΟΥΡΥΧΕΙΩΝ ΔΕΗ

---

Στην Ελλάδα εμφανίζονται σημαντικά κοιτάσματα φτωχών στερεών καυσίμων όπως ο λιγνίτης. Οι θερμές και υγρές κλιματολογικές συνθήκες ευνόησαν τον σχηματισμό του με την πάροδο του χρόνου και κάτω από την επίδραση διαφόρων μικροοργανισμών. Βάσει της περιεκτικότητας του σε στοιχειακό άνθρακα ταξινομείται στην δεύτερη θέση των γαιανθράκων κατά αύξουσα σειρά.

Το μεγαλύτερο λιγνιτικό δυναμικό είναι συγκεντρωμένο σε τρεις περιοχές - λεκάνες κατά μήκος του άξονα Φλώρινα - Αμύνταιο - Πτολεμαΐδα - Κοζάνη - Σέρβια. Η εκμετάλλευση γίνεται σχεδόν αποκλειστικά από τη ΔΕΗ. Τα λιγνιτωρυχεία της εξασφαλίζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του Ελλαδικού χώρου. Η εκμετάλλευση άρχισε από το υπόγειο λιγνιτωρυχείο Αλιβερίου το 1951. Στη συνέχεια το 1955 πραγματοποιήθηκε εκμετάλλευση στο επιφανειακό λιγνιτωρυχείο της ΛΙΠΤΟΛ στη λεκάνη της Πτολεμαΐδας (Καβουρίδης και Παυλουδάκης, 2004).

Στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Πτολεμαΐδας (Λ.Κ.Δ.Μ) λειτουργούν σήμερα τέσσερα λιγνιτωρυχεία: Το Ορυχείο Νοτίου Πεδίου, το Ορυχείο Καρδιάς, το ορυχείο Κυρίου Πεδίου (Μαυροπηγή) και το Ορυχείο Αμυνταίου. Η θερμογόνο δύναμη κυμαίνεται από 1100-1900 kcal/kg για την περιοχή της Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου. Το ειδικό βάρος του λιγνίτη υπολογίζεται γύρω στο 1,30 g/cm<sup>3</sup>.

### 1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

---

Το ορυχείο του Αμυνταίου αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα μετακινήσεων και εσωτερικών κατολισθήσεων εδώ και αρκετά χρόνια. Τα προβλήματα συνεχίζονται καθώς το ορυχείο κινείται προς τα νότια-νοτιοδυτικά ενώ περιοδικά εμφανίζονται έντονες μετακινήσεις μαζών.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παραμετρική διερεύνηση της ευστάθειας των πρανών εκμετάλλευσης με βάση τους σχηματισμούς κάτω από το τεχνικό πέρας της εκμετάλλευσης. Προσομοιώθηκε το υπέδαφος και εξετάστηκαν δυο σενάρια ύπαρξης ζώνης αδυναμίας. Πιο συγκεκριμένα:

1. Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει στρώμα αργίλου πάχους 0.5m κάτω από το στρώμα λιγνίτη κορεσμένο με νερό. Το σενάριο αυτό εξετάστηκε για τα ακόλουθα βάθη, 4m, 8m, 12m, 16m, 20m κάτω από τον λιγνίτη.
2. Το δεύτερο σενάριο εξετάζει στρώμα από άμμο κορεσμένο σε νερό, πάχους 0.5m κάτω από το στρώμα λιγνίτη. Το σενάριο αυτό εξετάστηκε για τα ακόλουθα βάθη, 4m, 8m, 12m, 16m, 20m.

Το μοντέλο σχεδιάστηκε βάσει γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί από την ΔΕΗ. Αρχικά σχεδιάστηκε μοντέλο με τη χρήση του προγράμματος Autocad. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μικρότερος συντελεστής ασφαλείας με τη χρήση του προγράμματος GEOSLOPE – SLOPE/W. Η μελέτη βασίστηκε στη μέθοδο Οριακής Ισορροπίας.

### 1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

---

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή για την εξέλιξη των λιγνιτωρυχείων της ΔΕΗ. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας και το πρόβλημα που αντιμετωπίζει το ορυχείο του Αμυνταίου.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύσσεται εκτενέστερα το ορυχείο του Αμυνταίου ως προς την γεωλογία του και τις αστοχίες που εμφανίζει.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύεται η θεωρία ευστάθειας πρανών. Αρχικά αναφέρονται οι τρόποι αστοχίας κατά Varnes καθώς και οι μέθοδοι προσδιορισμού του συντελεστή ασφαλείας Στη συνέχεια αναλύονται οι επιμέρους μέθοδοι οριακής ισορροπίας με την μέθοδο των λωρίδων που είναι και αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του παρόντος προβλήματος. Στο τέλος γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για παρόμοια προβλήματα αστοχίας παγκοσμίως σε υπαίθρια ορυχεία.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύσσεται η διαδικασία της παραμετρικής ανάλυσης για το παρόν πρόβλημα και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο βρίσκονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος αστοχίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΡΥΧΕΙΟ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

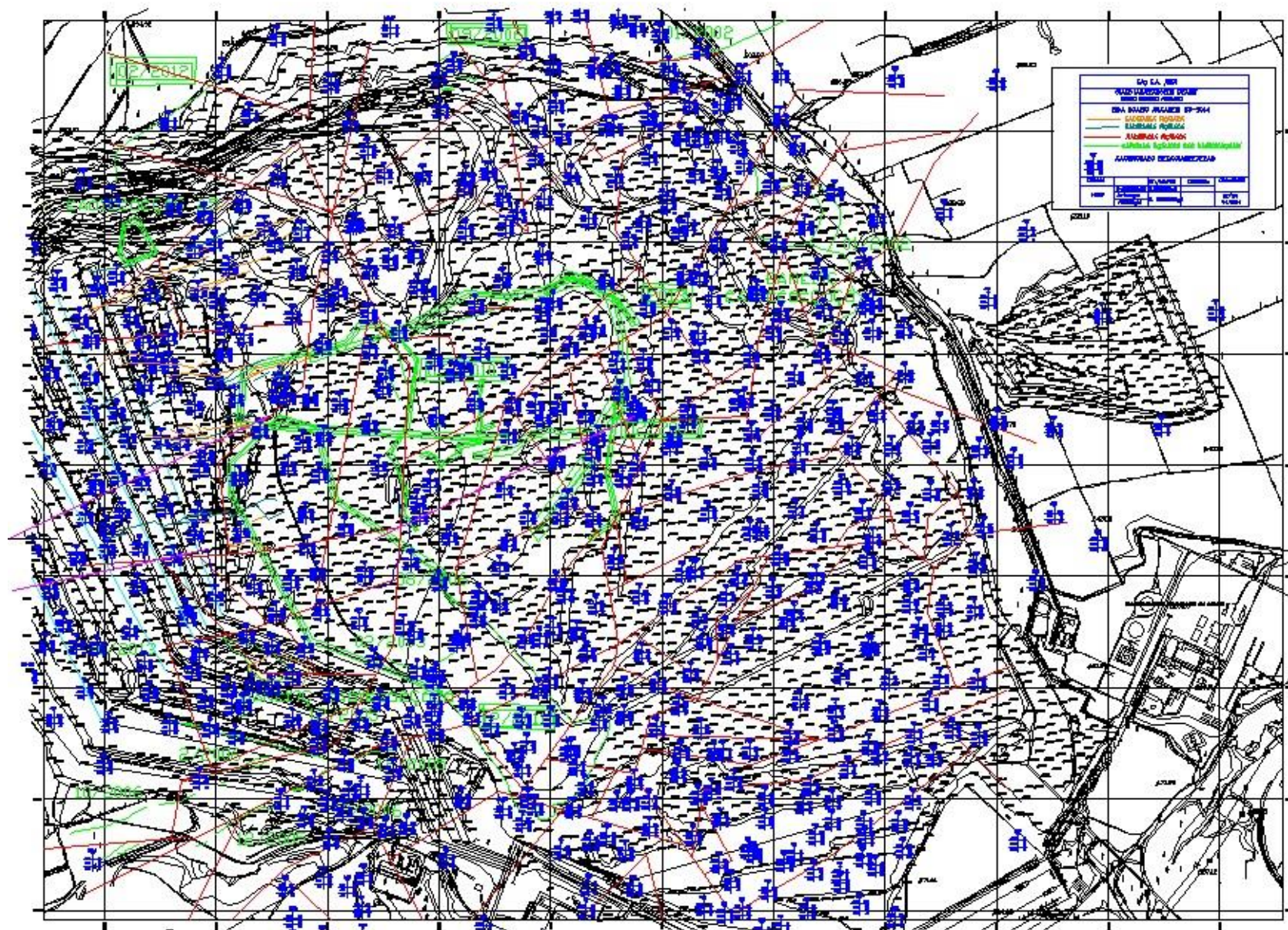
---

### 2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΡΥΧΕΙΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

---

Η λιγνιτοφόρα λεκάνη εκτείνεται από το Μοναστήρι (πρώην Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία Μακεδονίας) μέχρι την Ελασσόνα. Ο άξονας της λεκάνης έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Η λειτουργία του ορυχείου (βλέπε χάρτη στην εικόνα 2.1) ξεκίνησε το 1987 και περιλαμβάνει την περιοχή Αμυνταίου και Λακκιάς. Η ετήσια παραγωγή λιγνίτη είναι 6-8 Mt που τροφοδοτούν τον ΑΗΣ Αμυνταίου Φιλώτα και τον ΑΗΣ Μελίτης. Επειδή ο λιγνίτης είναι μαλακό πέτρωμα και η εμφάνισή του είναι σε στρώματα οριζόντια ή μικρής κλίσης, για την εκμετάλλευση εφαρμόζεται η μέθοδος συνεχούς λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα η εξόρυξη γίνεται με καδοτροχό. Ακολουθεί μεταφορά σε ταινιοδρόμους και τέλος η απόθεση γίνεται με τους αποθέτες (Νικολαΐδου, 2014).





Εικόνα 2.1: Χάρτης Ορυχείου Αμυνταίου (ΔΕΗ, 2014)



## 2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

---

Πριν από εκατομμύρια χρόνια η λεκάνη ήταν καλυμμένη από λίμνες και έλη. Η βλάστηση ήταν ευνοημένη από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Με την πάροδο του χρόνου τα φυτά συσσωρεύτηκαν στον πυθμένα των λιμνών και καλύφθηκαν από ιζηματογενή πετρώματα. Έτσι υπό την επίδραση της πίεσης αλλά και μικροοργανισμών σχηματίστηκε ο λιγνίτης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε αρκετές φορές πράγμα που εξηγεί την εναλλαγή των στρωμάτων του λιγνίτη που υπάρχει σήμερα. Αυτή η εμφάνιση ονομάστηκε «zebra» ([www.dei.gr](http://www.dei.gr)).

Ο λιγνίτης είναι μια από τις μορφές γαιανθράκων που σχηματίζεται στη φύση. Λόγω του ότι ο σχηματισμός του γίνεται κατά τα πρώτα στάδια ενανθράκωσης θεωρείται χαμηλής τάξεως γαιάνθρακας. Στην πραγματικότητα πραγματοποιείται μια σειρά μεταβολών οι οποίες διακρίνουν τους γαιάνθρακες ανάλογα με τον βαθμό ενανθράκωσης του σε (Βάμβουκα,2002):

- Τύρφη
- Λιγνίτη
- Υπασφαλτούχος Λιγνίτη
- Ασφαλτούχος Λιγνίτη
- Άνθρακίτη

Εκτιμάται ότι η θερμαντική ικανότητα για τον λιγνίτη του Αμυνταίου είναι περίπου η 1300kcal/kg (Pavlidis et al, 2011)

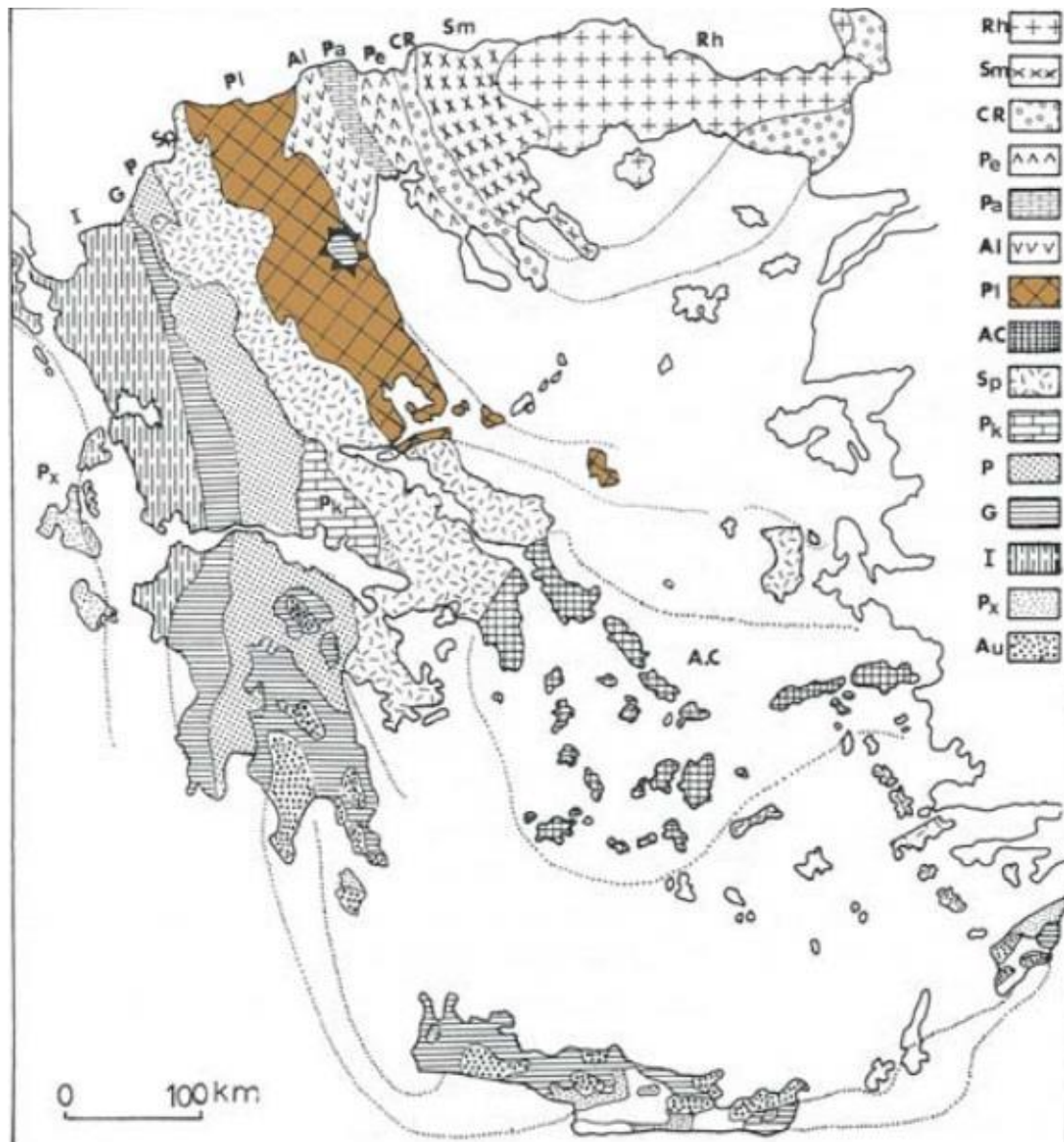
Γεωτεκτονικά η λεκάνη ανήκει στην Πελαγονική Ζώνη (βλέπε εικόνα 2.2). Η δημιουργία της ανήκει στην Νεογενή Περίοδο. Εφελκυστικές τάσεις δημιούργησαν το κύριο βύθισμα που είχε διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ κατά το άνω Μειόκαινο. Έπειτα κατά το κάτω Πλειόκαινο οι εφελκυστικές τάσεις χώρισαν το αρχικό βύθισμα σε επιμέρους με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ κάθετα στο κύριο. Έτσι σχηματίστηκαν οι λεκάνες Φλώρινας, Αμυνταίου-Πτολεμαΐδας, Κοζάνης - Σερβίων και Ελασσόνας (Μεταξάς κ.ά, 2007)

Η λεκάνη του Αμυνταίου χωρίζεται σε τρεις ζώνες απόθεσης (Pavlidis and Mountrakis, 1986):

- Κατώτερη Ζώνη
- Μεσαία Ζώνη
- Ανώτερη Ζώνη

Η Κατώτερη Ζώνη αποτελείται από κροκαλοπαγή, μάργες, άμμους, ιλύες, αργίλους και λιγνίτες τύπου ξυλίτη. Η ηλικία τους εντοπίζεται από την άνω μειόκαινη έως την κάτω πλειόκαινη περίοδο.

Η Μεσαία Ζώνη χαρακτηρίζεται από λιγνιτοφόρα στρώματα μεγάλου πάχους τα οποία εναλλάσσονται με στρώματα ιλύων, αργίλων και μαργών. Ηλικιακά ανήκουν στην Πλειοκαινική περίοδο. Το πάχος του απολήψιμου λιγνίτη είναι περίπου 2m.



Εικόνα 2.2: Γεωτεκτονικές Ζώνες Ελλάδος (www.Geo.auth.gr)

Η Ανώτερη Ζώνη αποτελείται από επίγειες αποθέσεις. Τα ιζήματα κάθονται ασύμφωνα πάνω στους πλειόκαινους σχηματισμούς. Κυρίως συναντώνται κροκάλες, άργιλοι, μάργες και μικρού πάχους λιγνιτικά στρώματα. Το πάχος του κυμαίνεται από 12 έως 260m.

Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από μια ποικιλία ρηγμάτων που εξηγούν το μέχρι σήμερα υπόβαθρο. Συνοπτικά τα ρήγματα είναι (Τόλη, 2011):

- Ρήγμα Πετρών-Ξινού Νερού-Αετού-Σκλήθρου (μήκος πάνω από 30km και διαχωρίζει τη λεκάνη Φλώρινας από αυτήν της Πτολ/δας-Αμυνταίου)
- Ρήγμα Βεγορίτιδας (μήκος πάνω από 12km και διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΔ)
- Ρήγμα Χειμαδίτιδας-Αναργύρων (έχει μήκος πάνω από 10km και διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ με κλίση προς τα ΒΔ)



- Κρασπεδικά Ρήγματα (έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ)
- Ρήγμα Αχλάδας-Σκόπου-Παπαδίας (διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ με μήκος μεγαλύτερο από 10km)
- Ρήγμα Κέλλης-Αγίου Αθανασίου (διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ)
- Ρηγματογενής ζώνη περιοχής Καρυχωρίου (οριοθετεί το βύθισμα της υπολεκάνης της Πτολ/δας)

Γεωλογικές και κοιτασματολογικές μελέτες έδειξαν την ύπαρξη σημαντικών υδροφόρων που ακόμα και σήμερα δυσκολεύουν την ομαλή πορεία της εκμετάλλευσης.

### 2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

---

Κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του το ορυχείο υπέστη σημαντικές κατολισθήσεις αίτια των οποίων θεωρούνταν η ύπαρξη κάποιου γεωλογικού ρήγματος, ο έντονος τεκτονισμός και τα υπόγεια νερά που εμφανίζονταν κατά την εκμετάλλευση του. Μια από τις μεγαλύτερες κατολισθήσεις θεωρείται αυτή της 6ης Δεκεμβρίου αποτέλεσμα της οποίας ήταν η μετακίνηση 20 εκ. m<sup>3</sup> υλικού εσωτερικής απόθεσης.

Μέχρι σήμερα το ορυχείο έχει υποστεί κατολισθήσεις τις παρακάτω χρονικές περιόδους (Τσελεπίδης,2014):

- Ανατολικά 01/2002
- Βόρεια-Ανατολικά 01/2002
- Βόρεια 09/2006
- Βόρεια-Δυτικά 02/2012
- Νότια-Δυτικά 12/2005,10/2006,02/2006,10/2013
- Νότια 12/2011
- Κεντρικά 05/2013,08/2006,02/2003

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΘΕΩΡΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

---

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Μια αστοχία εκδηλώνεται με μια βίαιη μετακίνηση μάζας αποτέλεσμα της οποίας είναι η κατολίσθηση τμήματος του πρανού. Στην πραγματικότητα πρόκειται για την αναζήτηση μιας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους όταν πλέον οι δυνάμεις αντίστασης ξεπεραστούν από τις δυνάμεις ολίσθησης (Εξαδάκτυλος, 2012)

Οι Leroueil et al.(1996) ανέλυσαν την μετακίνηση ενός πρανού σε τέσσερα στάδια (Εξαδάκτυλος, 2012):

- Τοπικές παραμορφώσεις σχετιζόμενες με μεταβολές τάσεων, μετατοπίσεις και τροπές.
- Έναρξη αστοχίας που χαρακτηρίζεται από μια ασταθής μάζα που διασχίζει την επιφάνεια του πρανού
- Μετακίνηση ασταθής μάζα με μορφή κατολίσθησης
- Επανενεργοποίηση του νέου πρανού το οποίο πλέον βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας

Οι μετακινήσεις πρανών συνήθως οφείλονται σε δυνάμεις βαρύτητας. Παρόλα αυτά υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν μια κατολίσθηση μερικοί από τους οποίους είναι:

- Οι γεωλογικές συνθήκες
- Η τεκτονική της περιοχής και δημιουργία ρηγμάτων
- Οι κλιματικές συνθήκες
- Η πίεση νερού των πόρων
- Ανθρωπογενείς παρεμβάσεις

### 3.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

---

Ο Varnes(1978) ταξινομήσε τις αστοχίες πρανών σε έξι κατηγορίες:

- Ολίσθησης (slides)
- Ροής (flows)
- Κατάπτωσης (falls)
- Ανατροπές (topples)
- Πλευρικές εκτάσεις (lateral spreads)
- Σύνθετες μετακινήσεις (complex)

Πιο αναλυτικά:

Την περίπτωση της ολίσθησης ο Varnes τη διαχώρισε σε δυο επιμέρους κατηγορίες (α) Περιστροφικής ή Κυκλικής ολίσθησης και (β) επίπεδης ή μεταθετικής ολίσθησης

(Εικόνα 3.1). Η μάζα που μετακινείται βρίσκεται σε συνεχή επαφή με την υποκείμενη εδαφομάζα είτε σε μια κοίλη ή επίπεδη επιφάνεια αντίστοιχα.

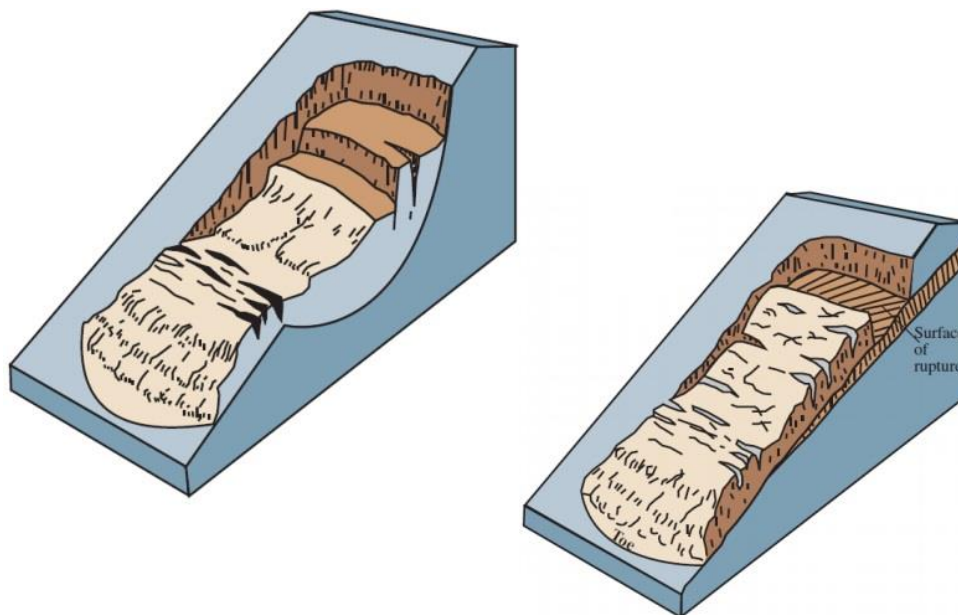
Η περίπτωση της Ροής (Εικόνα 3.2) αφορά συνεχή μετακίνηση μάζας γρήγορη ή αργή.

Η αστοχία κατάπτωσης (Εικόνα 3.3) αφορά πρανή με μεγάλη κλίση όπου τμήμα του εδάφους αποκολλάται, ολισθαίνει όσο ακόμα είναι σε επαφή με το υπόλοιπο έδαφος και στη συνέχεια ακολουθεί πτώση.

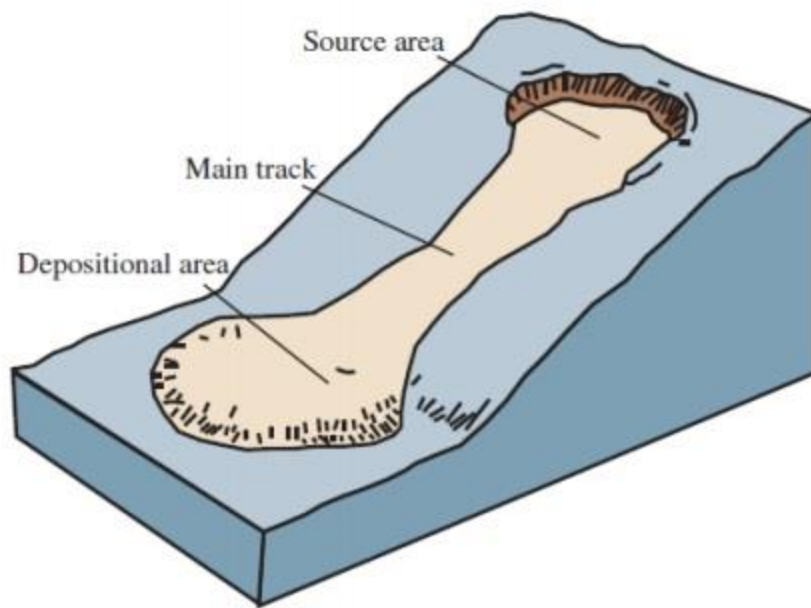
Η αστοχία ανατροπής (Εικόνα 3.4) αφορά περιπτώσεις όπου η μάζα περιστρέφεται λόγω βαρύτητας γύρω από έναν θεωρητικό άξονα που βρίσκεται χαμηλότερο από το κέντρο βάρους της.

Οι πλευρικές εκτάσεις (Εικόνα 3.5) χαρακτηρίζονται από κινήσεις συνεκτικών εδαφών πάνω σε μαλακά εδάφη.

Τέλος πολύ συχνά συναντάται στη φύση μια σύνθεση των παραπάνω κατηγοριών.



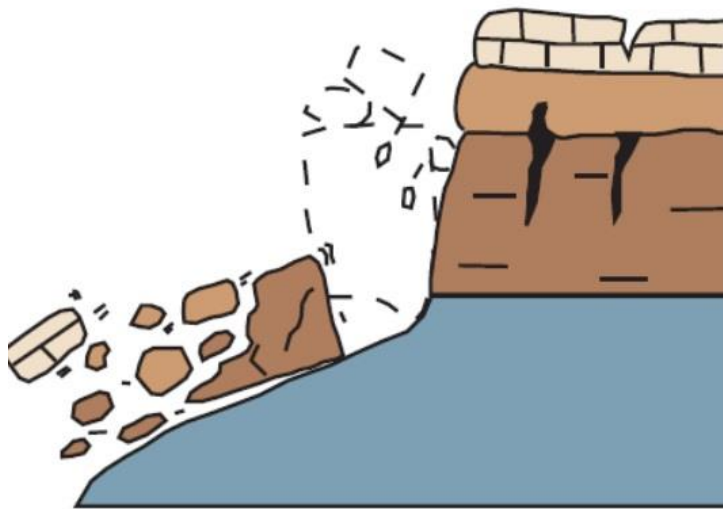
Εικόνα 3.1: Κυκλική και Επίπεδη Ολίσθηση (Novotny, 2013)



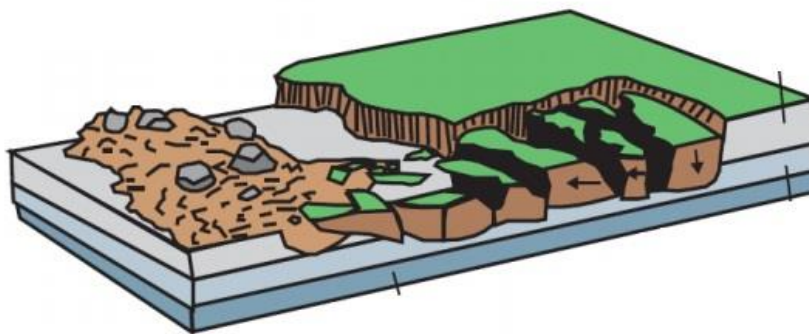
Εικόνα 3.2: Ποή (Novotny, 2013)



Εικόνα 3.3: Κατάπτωση (Novotny, 2013)



Εικόνα 3.4: Ανατροπή (Novotny, 2013)



Εικόνα 3.5: Πλευρικές εκτάσεις (Novotny, 2013)

### 3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Η μελέτη ευστάθειας των πρανών χωρίζεται στην Άμεση Ευστάθεια (short term stability) και την Μακροχρόνια Ευστάθεια (long term stability). Οι υπολογισμοί άμεσης ευστάθειας πραγματοποιούνται με την χρήση παραμέτρων διατμητικής αντοχής υπολογισμένες υπό αστράγγιστες συνθήκες παραβλέποντας τις μεταβολές στην πίεση νερού των πόρων. Αντίθετα η μακροχρόνια ευστάθεια αφορά υπολογισμούς υπό στραγγισμένες συνθήκες ή αστράγγιστες στις οποίες έγινε καταγραφή νερού των πόρων (Λουπασάκης, 2014)

Οι βασικοί μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας είναι (Johari & Javadi, 2012)

- Μέθοδος Οριακής Ανάλυσης (Limit Analysis)
- Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας (Limit Equilibrium Analysis)
- Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite element Analysis)

Γενικά μια έγκυρη λύση πρέπει να ικανοποιεί τόσο την συνθήκη ισορροπίας δυνάμεων όσο και την σχέση τάσης παραμόρφωσης. Επίσης θα πρέπει να εξετάζει την κατάσταση ελέγχοντας τι γίνεται τόσο κατά την αστοχία όσο και μετά από αυτή.

Η μέθοδος οριακής ισορροπίας εξετάζει κάθε πρόβλημα μελετώντας μόνο την κατάσταση ισορροπίας και παραμελώντας την σχέση τάσης-παραμόρφωσης του εδάφους. Μπορεί να δώσει γρήγορα ακριβή αποτελέσματα κυρίως σε απλοποιημένα προβλήματα.

Το κενό της μεθόδου οριακής ισορροπίας καλύπτει η μέθοδος οριακής ανάλυσης που εξετάζει κάθε πρόβλημα από δυο πλευρές (συννοριακές συνθήκες, άνω ορίου και κάτω ορίου). Βασίζεται στην παραδοχή ότι η συμπεριφορά του εδάφους είναι τέλεια πλαστική.

Επειδή οι παραπάνω μέθοδοι είναι χρονοβόρες και πολλές φορές δεν οδηγούν σε ένα ακριβές αποτέλεσμα δημιουργήθηκε και μια τρίτη μέθοδος, αυτή των πεπερασμένων στοιχείων. Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων με μεγάλη ακρίβεια. Επιτρέπει μεγάλη ευελιξία στη γεωμετρία του προς μελέτη σχήματος, στις ιδιότητες-οριακές συνθήκες αλλά και στις εξισώσεις βάσει των οποίων θα γίνει η επίλυση.

### 3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

---

Η μέθοδος χρησιμοποιεί απλοποιημένες εξισώσεις ισορροπίας για τη λύση κάθε προβλήματος. Στην περίπτωση που το προς εξέταση πρόβλημα είναι πολύπλοκο η μέθοδος μπορεί να καταστεί χρονοβόρα, ακόμα και μη επιλύσιμη. Οι τρόποι επίλυσης διακρίνονται ανάλογα με την επιφάνεια ολίσθησης σε:

- Μέθοδο των λωρίδων
- Ανάλυση σφηνοειδούς τεμάχους

Μια επιφάνεια ολίσθησης μπορεί να είναι:

- Κυκλική
- Επίπεδη
- Μεικτή

Στην προκειμένη περίπτωση η επιφάνεια ολίσθησης είναι μεικτή. Αρχικά η μορφή της είναι κυκλική και στη συνέχεια πηγαίνει παράλληλα με το στρώμα αδυναμίας που σχεδιάσθηκε. Σε αυτήν την περίπτωση εφαρμόστηκε η μέθοδος των λωρίδων.

Επιπρόσθετα μια επιφάνεια ολίσθησης μπορεί να είναι:

- Μεγάλου πλάτους
- Μικρού πλάτους

Στην παρούσα εργασία η επιφάνεια ολίσθησης είναι μικρού πλάτους.

Τα τρία βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι (Μπούνου, 2012):

1. Οι παραμορφώσεις στο εσωτερικό του ολισθαίνοντος σώματος παραβλέπονται.
2. Θεωρείται αυθαίρετα επιφάνεια ολίσθησης.
3. Αστοχίες ροής δεν γίνεται να αναλυθούν με μεθόδους οριακής ισορροπίας.

Παρόλα αυτά χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος λόγω απλοποιημένης γεωμετρίας και έλλειψης λεπτομερών δεδομένων για το παρόν πρόβλημα.

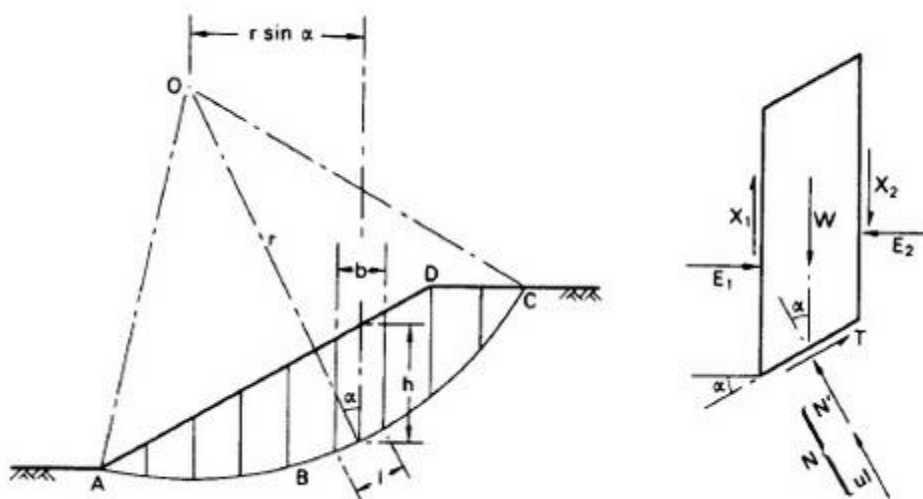
Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι με σκοπό την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας με τη μέθοδο των λωρίδων. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι (Fredlund et al., 1981) :

- Μέθοδος Fellenius ή Σουηδική
- Απλοποιημένη Μέθοδος Bishop
- Μέθοδος Spencer
- Μέθοδος Janbu
- Μέθοδος Morgenstern-Price

Κάθε μέθοδος εξετάζει το πρόβλημα λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές παραμέτρους. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας αρχικά απαιτείται η διαίρεση της προς ανάλυση τομής σε κάθετες λωρίδες ίσου ή μεταβαλλόμενου πλάτους. Για κάθε μια λωρίδα πραγματοποιείται ανάλυση δυνάμεων (Εικόνα 3.6).

Εξετάστηκαν οι ομοιότητες και διαφορές κάθε μεθόδου σε σχέση με την γενική εξίσωση ισορροπίας (General Limit Equilibrium, GLE) ώστε να γίνει η σωστή επιλογή που θα δώσει ο ακριβέστερο αποτέλεσμα. Η Γενική εξίσωση ισορροπίας (GLE) ουσιαστικά είναι ένα γενικό μοντέλο που περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία ισορροπίας των άλλων μεθόδων και βοηθάει στην κατανόηση τους. Βασίζεται στην ισορροπία δυνάμεων και ροπών. Η εξίσωση που δίνει την σχέση μεταξύ των ενδιάμεσων δυνάμεων είναι αυτή που προτείνεται από τους Morgenstern-Price (Krahn, 2004):

$$X = E^* \lambda^* f(x)$$



Εικόνα 3.6: Σχεδιασμός λωρίδων και ανάλυση δυνάμεων, (Craig, 2004)

Οι δυνάμεις που δρουν σε κάθε λωρίδα είναι (Craig, 2004):

- Το ολικό βάρος της λωρίδας  $W = \gamma hb$ , όπου  $\gamma$  είναι το μοναδιαίο βάρος του εδάφους,  $b$  είναι το πάχος κάθε λωρίδας και  $h$  είναι το ύψος κάθε λωρίδας.
- Το βάρος κάθε λωρίδας θα δημιουργήσει μία διατμητική δύναμη παράλληλα στη βάση της,  $S = W \sin \alpha$

- Η ολική κάθετη δύναμη στη βάση,  $N=sl$ , όπου  $l$  το μήκος της βάσης των επιμέρους λωρίδων.
- Η ολική κάθετη δύναμη λαμβάνεται από την ολική κάθετη τάση η οποία έχει δύο συνιστώσες, την ενεργό κάθετη δύναμη  $N'=sl$  και τη δύναμη του νερού,  $U=ul$ , όπου  $u$  είναι η πίεση πόρων στο κέντρο της βάσης της λωρίδας.
- Η διατμητική αντίσταση του εδάφους θα δημιουργήσει μια διατμητική δύναμη,  $T=\tau ml$ .
- Οι πλευρικές δυνάμεις μπορούν να αντιπροσωπευτούν ως ολικές κάθετες δυνάμεις  $E1$  και  $E2$  και ως εφαπτόμενες διατμητικές δυνάμεις  $X1$  και  $X2$ .

Σκοπός είναι η εύρεση του συντελεστή ασφαλείας που ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων που συγκρατούν προς τις δυνάμεις που ωθούν το τμήμα του πρανούς να αστοχήσει.

$FS = \text{Δυνάμεις ή ροπές αντίστασης} / \text{Δυνάμεις ή ροπές καταπόνησης}$

Όταν  $FS=1$  πρόκειται για κατάσταση οριακής ισορροπίας. Όταν η τιμή γίνει μικρότερη της μονάδας παρουσιάζεται η αστοχία.

Οι δυνάμεις διάτμησης βασίζονται στο κριτήριο Mohr-Coulomb (Αγιουτάντης, 2002):

$$T = S_o + \mu \sigma$$

Όπου

- $T$ = η μέγιστη διατμητική τάση
- $S_o$ = η συνοχή του υλικού
- $\mu$ = ο συντελεστής εσωτερικής τριβής του υλικού για τον οποίο ισχύει  $\mu=\tan\phi$  όπου  $\phi$  η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού
- $\sigma$ = η κάθετη τάση στο επίπεδο αστοχίας/ολίσθησης

### 3.4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ FELLENIUS Ή SWEDISH

Η μέθοδος Fellenius γνωστή και ως μέθοδος των λωρίδων είναι η πρώτη και πιο απλή μέθοδος ανάλυσης για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας. Το βασικό σενάριο είναι ο χωρισμός του εδαφικού τμήματος σε κάθετες λωρίδες. Η μέθοδος θεωρεί ότι η συνισταμένη των πλευρικών δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ κάθε λωρίδας είναι μηδέν. Η θέση εφαρμογής των δυνάμεων είναι το σημείο τομής της βάσης της λωρίδας με το κέντρο βάρους της.

Ως εκ τούτου η εξίσωση που προκύπτει ύστερα από ανάλυση δυνάμεων σε κάθε λωρίδα είναι

$$F = \sum \frac{[c'l + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha}$$

Όπου

- $c'$  Η συνοχή (effective cohesion)
- $\Phi$  Η γωνία εσωτερικής τριβής
- $\alpha$  Η γωνία της εφαπτόμενης σε κάθε λωρίδα με την οριζόντιο
- $u$  Η πίεση νερού των πόρων που ισούται
- $l=b/\cos \alpha$
- $b$  Το πάχος κάθε λωρίδας

Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν ενδείκνυται σε περιπτώσεις με βαθείς κύκλους ολίσθησης.



---

### 3.4.2 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ BISHOP

---

Η απλοποιημένη μέθοδος Bishop βασίζεται στη λογική των λωρίδων όμως δεν λαμβάνει υπόψη τις διατμητικές πλευρικές δυνάμεις μεταξύ των τομών. Ο Bishop (1955) υποθέτει μια επιφάνεια κυκλικής ολίσθησης όπου οι δυνάμεις εκατέρωθεν κάθε λωρίδας είναι οριζόντιες. Από ανάλυση δυνάμεων σε κάθε λωρίδα προκύπτει η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας ως:

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} * \sum \frac{[c' + (w - ub) \tan \phi']}{M_i}$$
$$M_i = c \cos \alpha \frac{1 + \tan \alpha * \tan \phi'}{F}$$

Παρατηρείτε ότι και στα δυο μέλη της εξίσωσης υπάρχει ο συντελεστής ασφαλείας ως F. Ο υπολογισμός γίνεται με επαναλήψεις θέτοντας στην αρχή ένας συντελεστή ασφαλείας F μέχρι η τιμή να είναι ίδια και στα δυο μέλη (F1=F2).

---

### 3.4.3 ΜΕΘΟΔΟΣ SPENCER

---

Ο Spencer (1967) θεωρεί ότι η σχέση μεταξύ ορθών και διατμητικών δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων δίνεται από την σχέση:

$$T/E = \tan \alpha$$

- T Η Διατμητική συνιστώσα
- E Η Ορθή συνιστώσα

Βασίστηκε στο γεγονός ότι οι κάθετες δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων σχηματίζουν γωνία θ με τη οριζόντιο. Το σημαντικό εδώ είναι ότι η γωνία αυτή θεωρείται σταθερή για κάθε λωρίδα. Ωστόσο εφαρμόζει τόσο ισορροπία δυνάμεων όσο και ροπών. Επομένως βρίσκονται δυο τιμές συντελεστή ασφαλείας (δυο εξισώσεις ισορροπίας) και με μια επαναληπτική διαδικασία υπολογίζεται ο τελικός συντελεστής FS.

---

### 3.4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ MORGENSTERN-PRICE

---

Η μέθοδος των Morgenstern-Price βασίζεται στην υπόθεση ότι η σχέση μεταξύ ορθών και διατμητικών δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων δίνεται από την σχέση:

$$T/E = \lambda * f(x)$$

Όπου

- T Η Διατμητική συνιστώσα
- E Η Ορθή συνιστώσα
- f(x) Η συνάρτηση των δυνάμεων που δρουν στη λωρίδα
- λ Μια Σταθερά

Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη της τόσο την ισορροπία δυνάμεων όσο και την ισορροπία ροπών. Η κλίση δ των δυνάμεων μεταξύ των τομών δεν είναι η ίδια για κάθε λωρίδα. Τα αποτελέσματα της μεθόδου συμπίπτουν με αυτά της οριακής ισορροπίας πράγμα που καθιστά την μέθοδο πιο ακριβή.

Η μέθοδος Morgenstern-Price μοιάζει αρκετά με την μέθοδο Spencer. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι ο Spencer θεωρεί μια σταθερή τιμή κλίσης για τις δυνάμεις

μεταξύ των λωρίδων ενώ η μέθοδος Morgenstern-Price διαθέτει ένα εύρος τιμών για την κλίση σε κάθε λωρίδα.

---

### 3.4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ JANBU

---

Η μέθοδος έχει αναλυθεί ως Απλοποιημένη μέθοδος Janbu και Γενικευμένη Μέθοδος Janbu.

- Η Απλοποιημένη Μέθοδος Janbu (1954) αναφέρεται σε μη-κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης. Θεωρεί ότι οι διατμητικές δυνάμεις μεταξύ των τομών είναι μηδέν και οι ορθές είναι κάθετες στις επιφάνειες των λωρίδων. Οι παραπάνω υποθέσεις οδηγούν σε συντελεστές ασφαλείας μικρότερους των πραγματικών και γι' αυτό κάθε αποτέλεσμα υφίσταται διόρθωση βάσει ενός συντελεστή  $f_o$  ως εξής:

$$FS = f_o * F_o$$

Όπου  $F_o$  είναι ο αρχικά υπολογιζόμενος συντελεστής ασφαλείας. Ο συντελεστής διόρθωσης  $f_o$  εξαρτάται από το βάθος της μάζας που ολισθαίνει και το είδος του εδάφους. Αυξάνει τον υπολογιζόμενο συντελεστή ασφαλείας κατά 5-10%.

- Η Γενικευμένη Μέθοδος Janbu (1968) λαμβάνει υπόψη της την επίδραση δυνάμεων μεταξύ των τομών (Ορθές και Διατμητικές).

Όλες οι μέθοδοι παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.1. Είναι φανερό ότι ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να γραφτεί με την ίδια μορφή για κάθε μέθοδο ανάλογα με το αν ικανοποιείται η ισορροπία ροπών και/ ή δυνάμεων. Οι μέθοδοι Morgenstern-Price, Spencer και Janbu Generalized ικανοποιούν τόσο την ισορροπία δυνάμεων όσο και ροπών. Παρόλα αυτά επειδή οι Morgenstern-Price διαθέτουν μεγαλύτερη ευελιξία ως προς την κλίση των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων για το λόγο αυτό θεωρείται πιο αποτελεσματική μέθοδος για το συγκεκριμένο πρόβλημα και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 3.1: Συνοπτική παρουσίαση μεθόδων

| ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ/ΜΕΘΟΔΟΙ                 | GLE                | Fellenius | Simplified Bishop | Spencer           | Morgestern-Price   | Janbu Simplified     | Janbu Generalized                            |
|------------------------------------|--------------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|--|
| Κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης      | Ναι                | Ναι       | Ναι               | Ναι               | Ναι                | Ναι                  | Ναι  |
| Μη-κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης   | Ναι                | Όχι       | Ναι               | Ναι               | Ναι                | Ναι                  | Ναι  |
| Ισορροπία δυνάμεων                 | Ναι                | Όχι       | Όχι               | Ναι               | Ναι                | Ναι                  | Ναι  |
| Ισορροπία ροπών                    | Ναι                | Ναι       | Ναι               | Ναι               | Ναι                | Όχι                  | Ναι  |
| Ενδιάμεσες διατμητικές δυνάμεις, τ | Ναι                | Όχι       | Όχι               | Ναι               | Ναι                | Όχι                  | Ναι  |
| Ενδιάμεσες ορθές δυνάμεις, ε       | Ναι                | Όχι       | Ναι               | Ναι               | Ναι                | Ναι                  | Ναι  |
| Κατανομή πλευρικών δυνάμεων        |                    | -         |                   |                   |                    | Ίδια για κάθε λωρίδα | Αλλάζει το ύψος ως προς την βάση της λωρίδας |
| Κλίση δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων  | Ευέλικτη Κλίση     | -         | Οριζόντια         | Σταθερή Κλίση     | Ευέλικτη Κλίση     | Οριζόντια            | Οριζόντια                                    |
| Σχέση δυνάμεων μεταξύ λωρίδων      | $T=E*\lambda*f(x)$ |           |                   | $T=E*\tan\varphi$ | $T=E*\lambda*f(x)$ |                      |  |

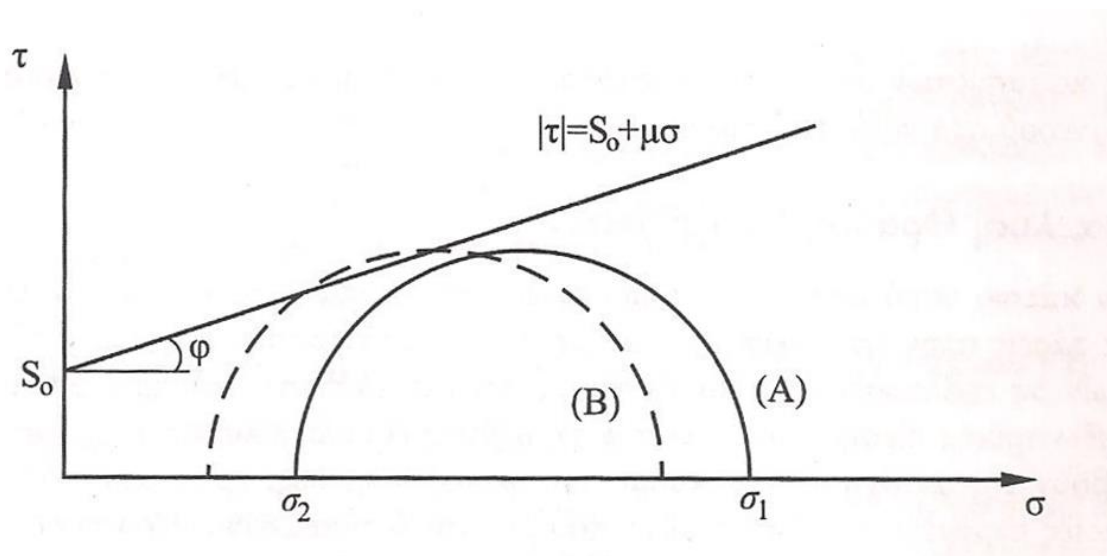
### 3.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ $R_u$

Η ύπαρξη ύδατος έχει σημαντική επίδραση στην ευστάθεια του πρανούς. Η συμπεριφορά των πρανών επηρεάζεται από τις ενεργές τάσεις  $\sigma' = \sigma - p$  σύμφωνα με την θεωρία του Terzaghi (1936) όπου  $\sigma'$  η ενεργή τάση μεταξύ των κόκκων του γεωυλικού,  $\sigma$  η συνολική τάση και  $p$  η πίεση των πόρων (Εξαδάκτυλος, 2012).

Όταν οι πόροι ενός υλικού πληρούνται με νερό το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb μετατρέπεται ως

$$\tau - p = S_0 + \mu(\sigma - p)$$

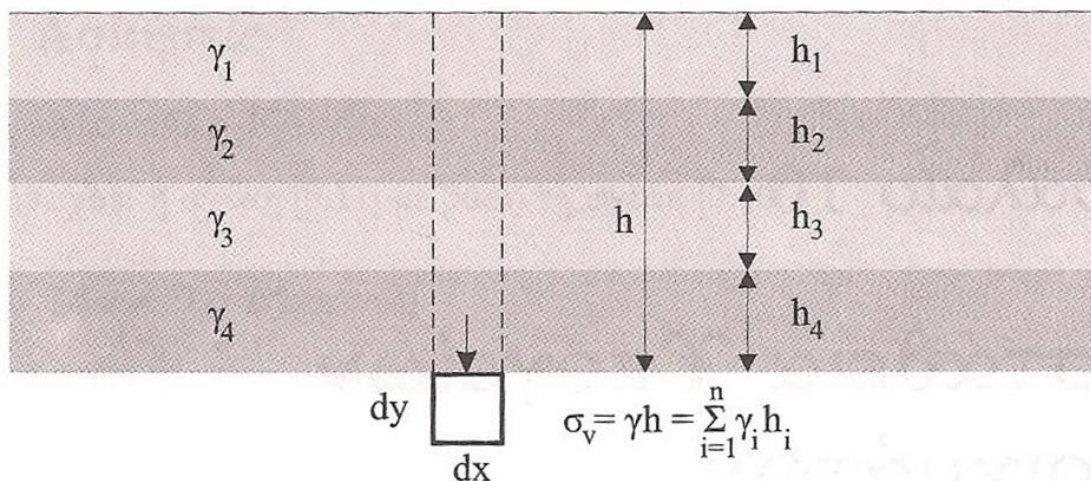
και ο κύκλος μετατοπίζεται αριστερά όπως φαίνεται στην εικόνα 3.7 (Αγιουτάντης, 2002)



Εικόνα 3.7: Επίδραση της πίεσης των πόρων στην εντατική κατάσταση του πετρώματος (Αγιουτάντης, 2002)

Οι κατακόρυφες τάσεις κάθε στρώματος υπολογίζονται από την σχέση  $\sigma = \gamma \cdot h$  όπου  $\gamma$  το μοναδιαίο βάρος και  $h$  το πάχος κάθε στρώματος. Η συνολική τιμή τάσης υπολογίζεται από τη σχέση

$$\sigma_v = \sum \gamma_i \cdot h_i.$$



Εικόνα 3.8: Κατακόρυφες τάσεις σε στοιχειώδες τμήμα (Αγιουτάντης 2002)

Η πίεση νερού των πόρων  $u$  δίνεται από την σχέση

$$U = u_0 + \Delta u$$

Όπου  $u_0$  η αρχική πίεση και  $\Delta u$  η αλλαγή της πίεσης πόρων μετά την εφαρμογή τάσης.

Ο συντελεστής πίεσης  $R_u$  εκφράζει το λόγο της πίεσης των πόρων προς την κατακόρυφη ολική τάση του βάρους των υπερκείμενων στρωμάτων και δίνεται από τη σχέση

$$R_u = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} = \frac{u}{\rho g h}$$

και παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1.

---

### 3.6 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑ

---

Η διαχείριση των καταστροφών τόσο από φυσικούς όσο και από ανθρωπογενούς παράγοντες αποτελεί τα τελευταία χρόνια αντικείμενο αυξημένου ενδιαφέροντος. Το φαινόμενο της αστοχίας είναι μη αντιστρεπτό και τα αποτελέσματα του έχουν κοστίσει ακόμη και ανθρώπινες ζωές. Πολλές φορές όμως μπορεί να είναι προβλέψιμο. Παρόλα αυτά οι συνέπειες του είναι εξίσου σημαντικές. Μια αστοχία εμποδίζει την καλή λειτουργία του ορυχείου καθυστερώντας τις διαδικασίες παραγωγής. Επιφέρει επιπλέον έξοδα και χρόνο εργασίας και απαιτεί τον επαναπροσδιορισμό του σχεδιασμού της εκμετάλλευσης. Γι' αυτό και ο σωστός σχεδιασμός εκμετάλλευσης ενός ορυχείου προϋποθέτει τόσο την σωστή πρόβλεψη ώστε να μην πραγματοποιηθεί μια αστοχία όσο και την ακριβή ανάλυση για την αποφυγή μελλοντικών αστοχιών. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η μεγάλη κατολίσθηση στο Gyama Mine στην Κίνα τον Μάρτιο του 2013 που κόστισε τις ζωές 83 ανθρώπων. Παρόμοιες περιπτώσεις αστοχιών που προκάλεσαν σημαντικά προβλήματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Παραδείγματα αστοχιών σε παγκόσμια κλίμακα.

| Όνομα             | Πόλη-Χώρα                           | Μετάλλευμα  | Μέγεθος                   | Αποτελέσματα προβλημάτων  | Βιβλιογραφία               |
|-------------------|-------------------------------------|---|---------------------------|---|----------------------------|
| Bingham Canyon    | Utah-ΗΠΑ                            | Χαλκός  | 970m βάθος<br>4km πλάτος  | Μετακίνηση<br>65Mm <sup>3</sup> ,Κανέννας<br>τραυματισμός           | Pankow,et al., (2013)      |
| Gyama Mine        | Medrogungkar<br>Θιβέτ-Κίνα          | Πολυμεταλλικό<br>(χρυσός, χαλκός,<br>Ψευδάργυρος<br>κλπ.) | 824m ύψος,<br>1980m μήκος | Μετακίνηση 2M m <sup>3</sup> ,<br>83 θανάσιμοι<br>τραυματισμοί      | EDD, (2013)                |
| Kumtor Mine       | Issyk Kul<br>Province-<br>Κιργιστάν | Χρυσός  | 3.900-4.000m<br>υψόμετρο  | Μετακίνηση 1Mt<br>άγονου πετρώματος<br>και 100M m <sup>3</sup> πάγο | Torgoev and Omoron, (2014) |
| Chuquicamata Mine | Χιλή,<br>Ανατολική<br>Αμερική       | Χαλκός  | 850m βάθος                | Μετακίνηση 1.5M t   | Henriquez V, (2010)        |
| Çöllolar Mine     | Τουρκία                             | Λιγνίτης  | 690m μήκος<br>870m πλάτος | Καταστροφή<br>δρόμων<br>10 θανάσιμοι<br>τραυματισμοί                | Unitar, (2011)             |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΟΡΥΧΕΙΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

### 4.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αναλύθηκε η ευστάθεια των δυτικών πρανών εκμετάλλευσης με βάση μια χαρακτηριστική τομή η οποία λήφθηκε παράλληλα με άξονα ο οποίος θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την πλέον διαταραγμένη περιοχή των πρανών αυτών.

Η μελέτη ευστάθειας της τομής αυτής έγινε με την χρήση του προγράμματος GEOSLOPE, SLOPE/W. Το πρόγραμμα αυτό εξετάζει για κάθε περίπτωση γεωμετρίας ενός πρανού τις πιθανές επιφάνειες ολίσθησης προσδιορίζοντας την δυσμενέστερη, δηλαδή αυτήν που αντιστοιχεί στον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης της ανάλυσης δυνάμεων για κάθε λωρίδα της επιφάνειας ολίσθησης (Γαμβρούδης,2006).

Στην ανάλυση που παρουσιάζεται παρακάτω (α) χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές παράμετροι για τις ιδιότητες των υλικών και (β) θεωρήθηκε ότι ο κρίσιμος σχηματισμός ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία είναι μια ασθενής ζώνη αργίλου ή άμμου η οποία βρίσκεται κάτω από το τεχνικό δάπεδο του ορυχείου.

Σκοπός επομένως της παρούσας διπλωματικής ανάλυσης είναι η εξέταση της συμπεριφοράς της δυσμενέστερης τομής δημιουργώντας σενάρια σχετικά με την κατώτερη ζώνη υπεδάφους. Τα δυο κύρια σενάρια αναφέρονται στον τύπο του σχηματισμού της ζώνης αδυναμίας όπου διερευνάται τόσο η επίδραση της θέσης της ζώνης αυτής σχετικά με το τεχνικό δάπεδο όσο και η ύπαρξη ή μη της πίεσης πόρων.

### 4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Οι βασικές γεωτεχνικές παράμετροι που ορίστηκαν στο λογισμικό είναι το μοναδιαίο βάρος (unit weight), η συνοχή (cohesion) και η γωνία εσωτερικής τριβής(effective friction). Τα στοιχεία αυτά ελήφθησαν από πρόσφατη δημοσίευση των Kanvadas et al, 2013 στην οποία γίνεται μια ανάλυση ευστάθειας του ορυχείου Μαυροπηγής. Στην παρούσα διπλωματική θεωρείται ότι οι σχηματισμοί των δυο ορυχείων έχουν παρόμοιες γεωτεχνικές παραμέτρους καθώς βρίσκονται στην ίδια λεκάνη απόθεσης και απέχουν μεταξύ τους μόνο μερικές δεκάδες χιλιόμετρα. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

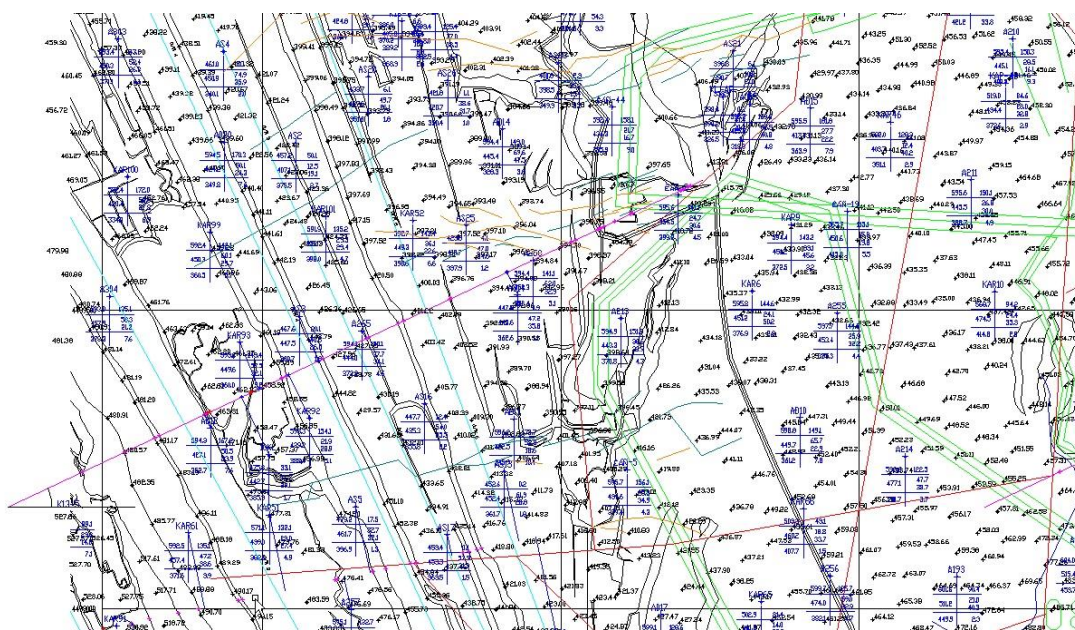
Πίνακας 4.1. Εύρος γεωτεχνικών ιδιοτήτων υλικών ορυχείου της Μαυροπηγής (Kanvadas et al,2013)

| Parameters/Materials                      | Marl   | Lignite | Clay  |
|---|--------|---------|-------|
| Unit weight $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 16-18  | 11-13   | 16-18 |
| Effective Cohesion c(kPa)                 | 50-150 | 150-200 | 5-50  |
| Effective Friction $\phi$ (deg)           | 28-35  | 34-36   | 26-30 |
| Residual Friction $\phi_r$ (deg)          | -      | -       | 5-10  |

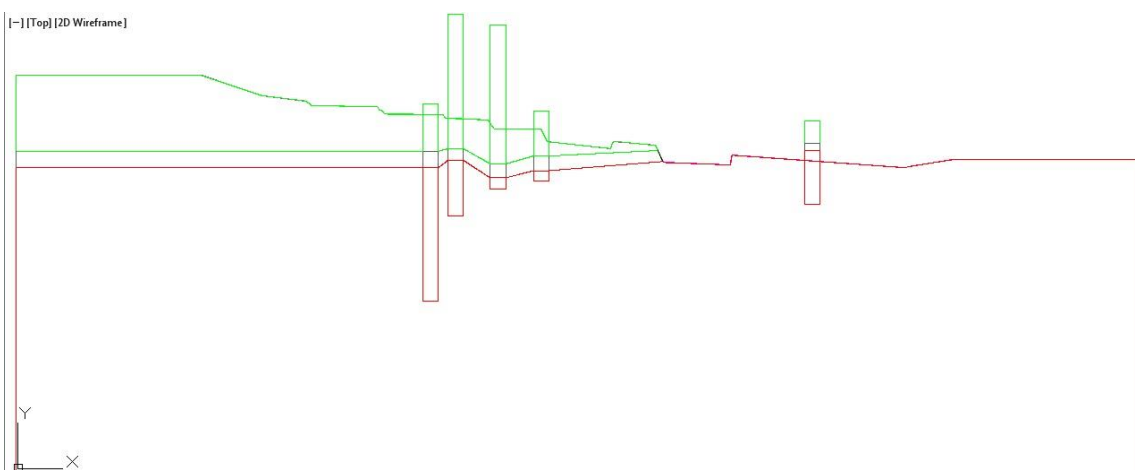


### 4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Όπως προαναφέρθηκε η ανάλυση αναφέρεται σε μια τομή η οποία θεωρείται η δυσμενέστερη. Ο άξονάς της τομής καθώς και τμήμα του ορυχείου φαίνεται στην εικόνα 4.1. Η τομή απεικονίζεται στην εικόνα 4.2, όπου φαίνονται τα τρία στρώματα (υπερκείμενα, λιγνίτης, υποκείμενα) καθώς και οι πλησιέστερες γεωτρήσεις που απείχαν περίπου μέχρι 100 μέτρα και οι οποίες προβάλλονται στον άξονα της τομής. Στον πίνακα 4.2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των πέντε πλησιέστερων γεωτρήσεων που προβλήθηκαν στην τομή μελέτης.



Εικόνα 4.1:Κάτοψη επί της οποίας παρουσιάζεται η θέση της τομής



Εικόνα 4.2: Τομή με τις πέντε πλησιέστερες γεωτρήσεις



Πίνακας 4.2 Γεωτρήσεις που προβάλλονται στην τομή μελέτης

| Όνομα | X       | Y         | Z<br>Επιφάνειας | Z<br>Πέρατος | Βάθος | Περάτωση |
|-------|---------|-----------|-----------------|--------------|-------|----------|
| 10KL  | 299,010 | 4,499,258 | 475.84          | 222.84       | 253   | 250313   |
| AS14  | 299,427 | 4,499,525 | 447.49          | 339.49       | 108   | 241110   |
| AS3   | 299,061 | 4,499,490 | 467.62          | 377.62       | 90    | 150812   |
| KAR92 | 299,078 | 4,499,319 | 593.33          | 388.33       | 205   | 170605   |
| KAR93 | 298,961 | 4,499,446 | 593.02          | 334.02       | 259   | 140405   |

#### 4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η βασική τομή αποτελείται από τρία στρώματα (υπερκείμενα, ενδιάμεσα, δάπεδο). Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ελάχιστες τιμές γιατί αντιπροσωπεύουν την χειρότερη κατάσταση. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Με την εντολή KeyIn→Material Properties γίνεται η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα.

Πίνακας 4.3 Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων στρωμάτων

| Στρώματα/Παράμετροι            | Συνοχή (kPa) | Γωνία εσωτερικής<br>Τριβής (deg) | Μοναδιαίο<br>Βάρος (kN/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|--------------|----------------------------------|---|
| 1ο στρώμα-Υπερκείμενη<br>Μάργα | 50           | 28                               | 16                                      |
| 2ο στρώμα- Λιγνίτης            | 150          | 34                               | 11                                      |
| 3ο στρώμα-Υποκείμενη<br>Μάργα  | 50           | 28                               | 16                                      |

Από επί τόπου μετρήσεις (κλισιόμετρα) προέκυψε ότι υπάρχουν ολισθήσεις κάτω από το τεχνικό πέρας της εκμετάλλευσης. Βάσει αυτού επιλέχθηκε να γίνει η παραμετρική ανάλυση στρώματος αδυναμίας κάτω από το τεχνικό πέρας.

Επομένως στο 3<sup>ο</sup> στρώμα σχεδιάστηκε ζώνη αδυναμίας πάχους 0.5m. Λόγω έλλειψης εκτενέστερων πληροφοριών για την κατάσταση του δαπέδου εξετάστηκαν τα δυο χειρότερα σενάρια:

- Ζώνη αργίλου κορεσμένη με υπολειπόμενες (residual) τιμές  $\gamma=18\text{kN/m}^3$ ,  $\varphi=6\text{deg}$  και  $c=1\text{kPa}$ .
- Ζώνη από άμμο κορεσμένη με τιμές  $\gamma=18\text{kN/m}^3$ ,  $\varphi=34\text{deg}$  και  $c=0\text{kPa}$ .

Για το μοναδιαίο βάρος και την γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου έγινε μια παραδοχή γιατί δεν υπάρχουν αναλυτικές πληροφορίες για την ακριβή τιμή του. Η τιμή της συνοχής θεωρείται μηδενική αφού αντιπροσωπεύουν ένα στρώμα αδυναμίας. Στην προκειμένη περίπτωση όμως για την άργιλο θεωρήθηκε η τιμή ίση με την μονάδα μιας και συνήθως οι άργιλοι δεν έχουν μηδενική συνοχή.

Παρόλο που από την επί τόπου παρατήρηση είναι εμφανής η ύπαρξη υδάτων σε πολλά σημεία του ορυχείου, ακόμα και σε βαθμίδες που βρίσκονται πολύ ψηλά σε σχέση με το

τεχνικό δάπεδο, εξετάσθηκε και το σενάριο κατά το οποίο δεν υπάρχει ύπαρξη πόρων στη ζώνη αδυναμίας.

Επιπλέον η παραμετρική ανάλυση ως προς τη θέση του στρώματος αδυναμίας κάτω από το τεχνικό δάπεδο περιελάμβανε τα βάθη, 4m, 8m, 12m, 16m, 20m.

Με την εντολή KeyIn→ Analysis Settings→Method ορίζονται οι μέθοδοι βάσει των οποίων θα υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας (Εικόνα 4.3). Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας έγινε με τις μεθόδους Bishop, Ordinary, Janbu που χρησιμοποιεί αυτόματα το πρόγραμμα ενώ επιλέχθηκε η μέθοδος των Morgenstern-Price. Η επιλογή έγινε με κριτήριο ότι οι Morgenstern-Price χρησιμοποιούν τις περισσότερες αναλύσεις ώστε να υπολογίσουν τον συντελεστή ασφαλείας πράγμα που οδηγεί σε ένα πιο ακριβές αποτέλεσμα. (Βλέπε κεφάλαιο 3)

The image shows a software window titled "Analysis Settings" with a tabbed interface. The "Method" tab is active. Under the "Limit Equilibrium" section, the "Bishop, Ordinary, Janbu and:" group has three radio buttons: "Morgenstern-Price" (selected), "Spencer", and "GLE". Each has a "Side Function" dropdown menu set to "Half-sine function" and a "Fn Values" button. Below these are "Corps of Engineers #1", "Corps of Engineers #2", "Lowe-Karafiath", "Janbu Generalized", "Sarma (Vertical Slice Only)", and "only Bishop, Ordinary and Janbu". The "Sarma" option has "Cohesion: 0" and "Phi: 0" input fields. The "Finite Element" section has three radio buttons: "SIGMA/W Static" (selected), "QUAKE/W Static", and "QUAKE/W Dynamic". Each has a "Filename:" input field and a "Clear" button. At the bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

Εικόνα 4.3: Καρτέλα Method

Με την εντολή KeyIn→Analysis Settings→Slip Surface ορίζεται προς πια διεύθυνση θα γίνει η αστοχία και με ποιόν τρόπο θα υπολογιστεί η επιφάνεια ολίσθησης (Εικόνα 4.4). Στην παρούσα εργασία η επιφάνεια ολίσθησης θεωρείται ότι ακολουθεί τη διεύθυνση του στρώματος αδυναμίας και σχεδιάζεται ακολουθώντας την γεωμετρία του σχήματος με την εντολή Fully Specified. Αρχικά το κέντρο ολίσθησης τοποθετείται εμπειρικά σε ύψος 1,5 φορές του ύψους του πρανούς, πάνω από τον πόδα του πρανούς. Στη συνέχεια

το κέντρο ολίσθησης μετακινείται χειροκίνητα σε διάφορες θέσεις περιμετρικά του αρχικού σημείου με στόχο να βρεθεί ο μικρότερος συντελεστής ασφαλείας. Τα κέντρα ολίσθησης για τα οποία το πρόγραμμα υπολογίζει συντελεστή ασφαλείας είναι περιορισμένα. Το κέντρο ολίσθησης που επιλέχθηκε από αυτήν την παραμετρική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε για όλες τις παραμετρικές αναλύσεις. Επιλέγοντας την επιλογή Optimize critical slip surface location δίνεται η δυνατότητα να προσαρμόσει το πρόγραμμα την σχεδιαζόμενη επιφάνεια αστοχίας με τα δεδομένα γεωμετρίας και ιδιοτήτων.

The image shows a software window titled "Analysis Settings" with a tabbed interface. The "Slip Surface" tab is active. It contains three main sections: "Direction of movement", "Slip Surface Option", and "Tension Crack Option".

- Direction of movement:** Two radio buttons are present: "Left to right" (selected) and "Right to left".
- Slip Surface Option:** Five radio buttons are listed: "Entry and Exit", "Grid and Radius", "Block Specified", "Fully Specified" (selected), and "Auto Locate". Under "Block Specified", there is a checkbox "Do not cross block slip surface lines" which is unchecked. To the right, there is a text input field "No. of critical slip surfaces to store:" with the value "1", and a checked checkbox "Optimize critical slip surface location".
- Tension Crack Option:** Four radio buttons are listed: "No tension crack" (selected), "Tension crack angle:", "Tension crack line", and "Search for tension crack". The "Tension crack angle:" option has a text input field with the value "0".

On the right side, there is a sub-section titled "Water in Tension Crack" containing two text input fields: "% Filled with water (0 to 1):" with the value "0" and "Unit weight of water:" with the value "9.807". At the bottom right of the window are "OK" and "Cancel" buttons.

Εικόνα 4.4 : Καρτέλα Slip Surface

Η εντολή KeyIn→Analysis Settings→PWP εισάγει την πίεση νερού των πόρων (Εικόνα 4.5).

Το Slope/W παρέχει τρεις επιλογές εισαγωγής της πίεσης νερού των πόρων:

- Ru
- Bbar
- Piezometric Line με Ru/Bbar

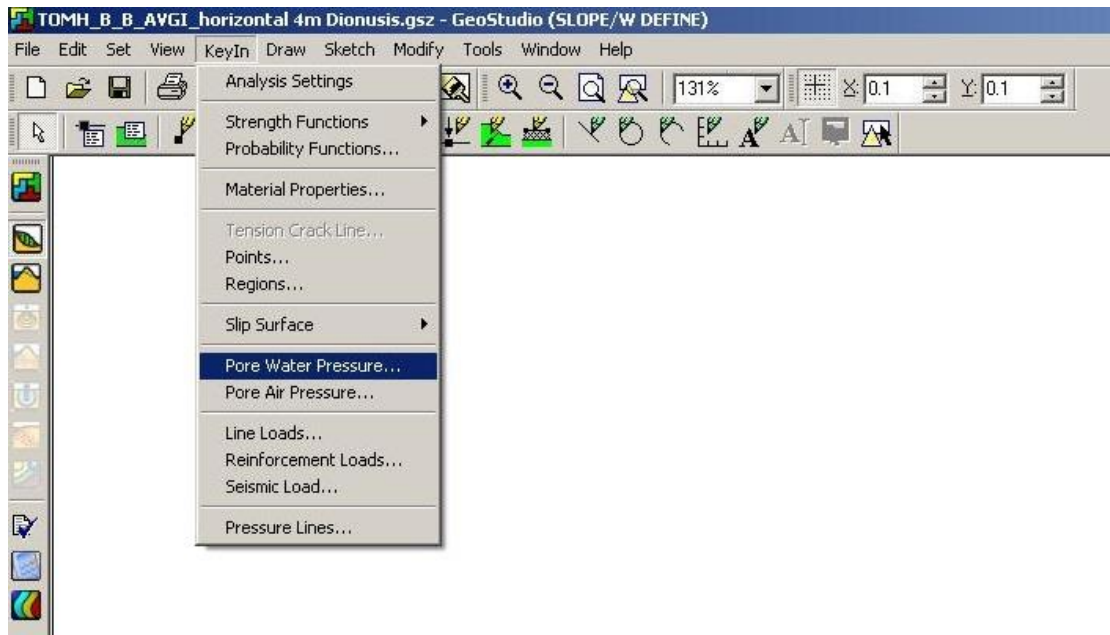
Με την εντολή Ru θεωρείται μια συνολική τιμή για όλα τα στρώματα. Εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις που οι πληροφορίες για το υπέδαφος είναι ελλιπής.

Το Bbar θεωρεί μηδενική την τιμή του υπερκείμενου στρώματος και μονάδα των ενδιάμεσων και υποκείμενων στρωμάτων. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου το υπόγειο νερό περιορίζεται μέσα σε ένα μόνο στρώμα.

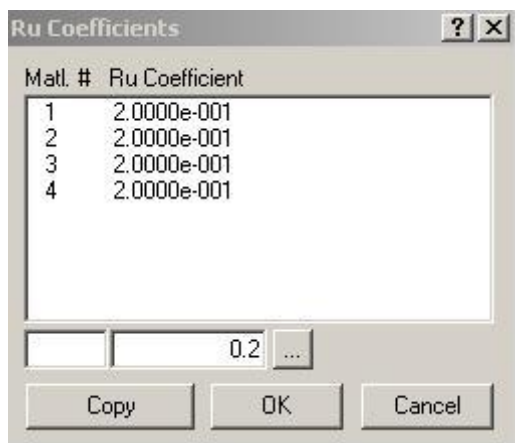
Η πιεζομετρική γραμμή (piezometric line) εφαρμόζεται σε περιπτώσεις με ακριβείς τιμές για το ύψος της υδροστατικής στήλης. Όταν συνδυάζεται με το Ru γίνεται ξεχωριστός υπολογισμός της πίεσης των πόρων με πιεζομετρική γραμμή και Ru και στην συνέχεια τα αποτελέσματα αθροίζονται. Ομοίως και με το Bbar.

Εικόνα 4.5:Καρτέλα PWP

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το Ru έχοντας μια εκτιμώμενη τιμή 0.2 για όλα τα στρώματα. Οι τιμές εισήχθησαν στο πρόγραμμα όπως φαίνεται στην εικόνα 4.6 και 4.7:



Εικόνα 4.6: Επιλογή Pore Water Pressure για την εισαγωγή τιμών στο Ru.



Εικόνα 4.7: Παράθυρο Ru Coefficients για την εισαγωγή τιμής Ru κάθε στρώματος

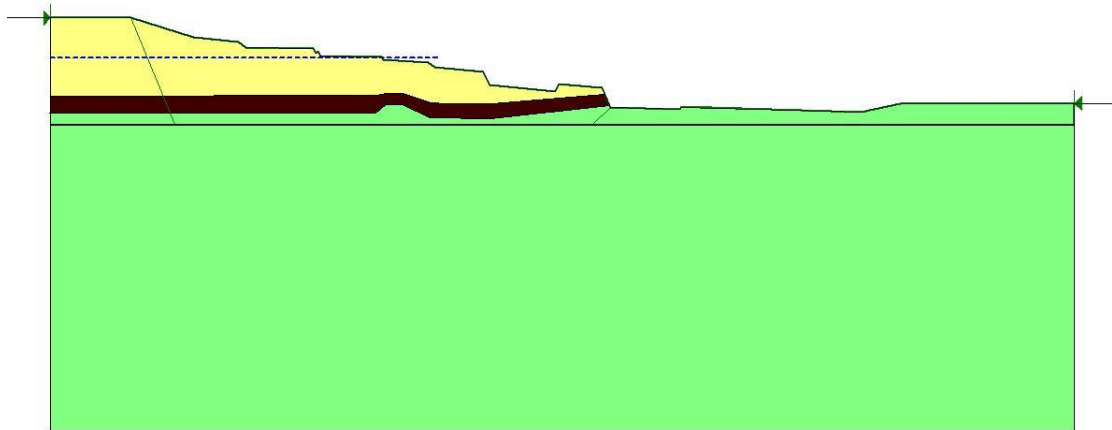
Για την περίπτωση της άμμου εξετάσθηκαν περισσότερα σενάρια όσον αφορά την τιμή του Ru. Επιπλέον μηδενίζοντας το Ru στα στρώματα εκατέρωθεν του στρώματος αδυναμίας μελετήθηκε η συμπεριφορά του πρανούς όταν το νερό βρίσκεται μόνο μέσα στο στρώμα της άμμου.

Ως ένας εναλλακτικός τρόπος προσέγγισης της πίεσης νερού των πόρων είναι και η περίπτωση της πιεζομετρικής γραμμής η οποία δίνει την δυνατότητα μελέτης της για δυο υποπεριπτώσεις:

- Ως προς το στρώμα αδυναμίας
- Ως προς όλα τα στρώματα

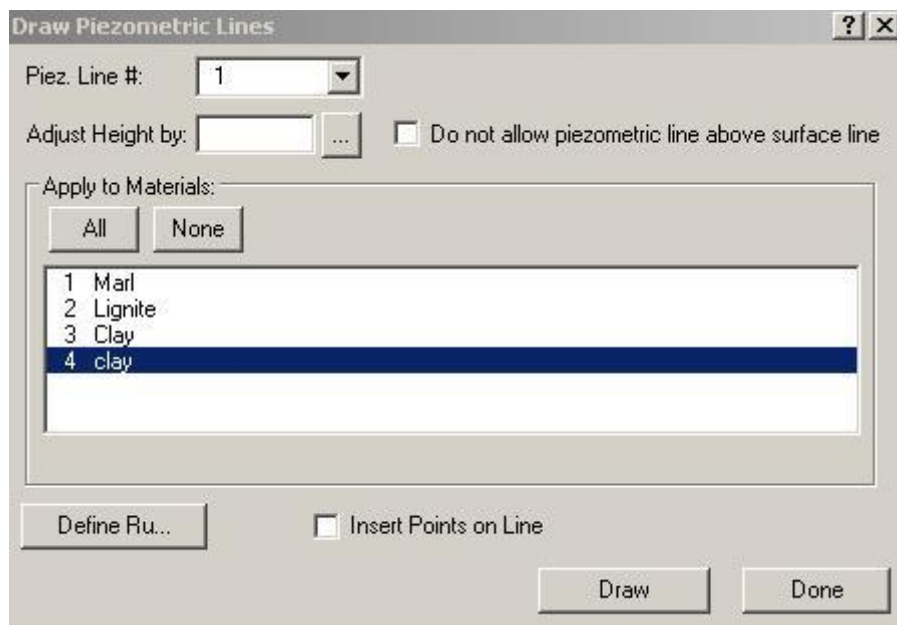
Βάσει επί τόπου παρατηρήσεων η πιεζομετρική γραμμή σχεδιάσθηκε 50m από την επιφάνεια.

Στην καρτέλα PWP επιλέγεται το Piezometric Lines with Ru/Bbar. Με την εντολή Draw→Pore Water Pressure εμφανίζεται το παράθυρο Draw Piezometric Lines. Έπειτα σχεδιάζεται η μπλε διακεκομμένη γραμμή όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8.

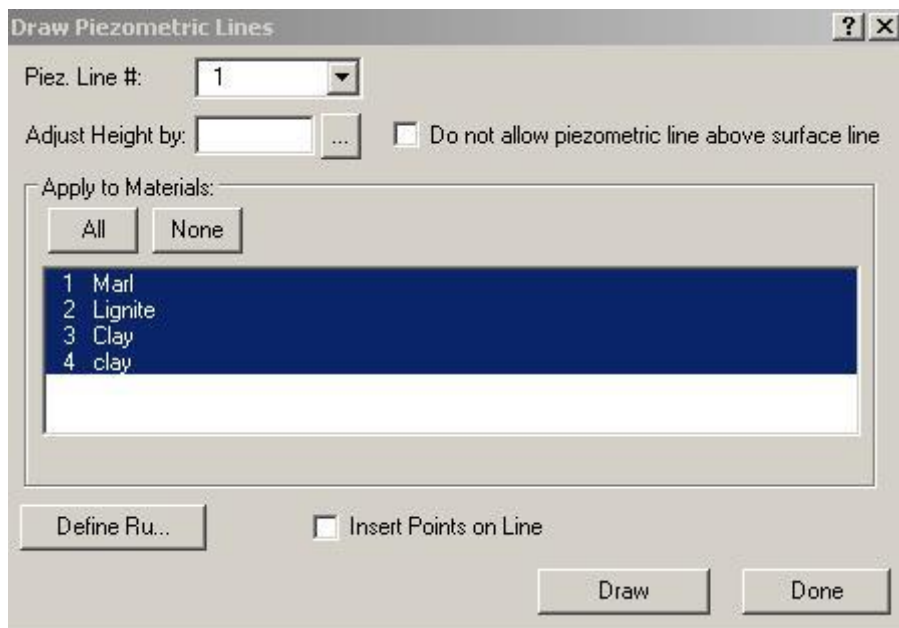


Εικόνα 4.8 : Πιεζομετρική Γραμμή

Για την πρώτη περίπτωση επιλέγεται μόνο το στρώμα αδυναμίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.9 ενώ για την δεύτερη επιλέγονται όλα τα στρώματα (Εικόνα 4.10).



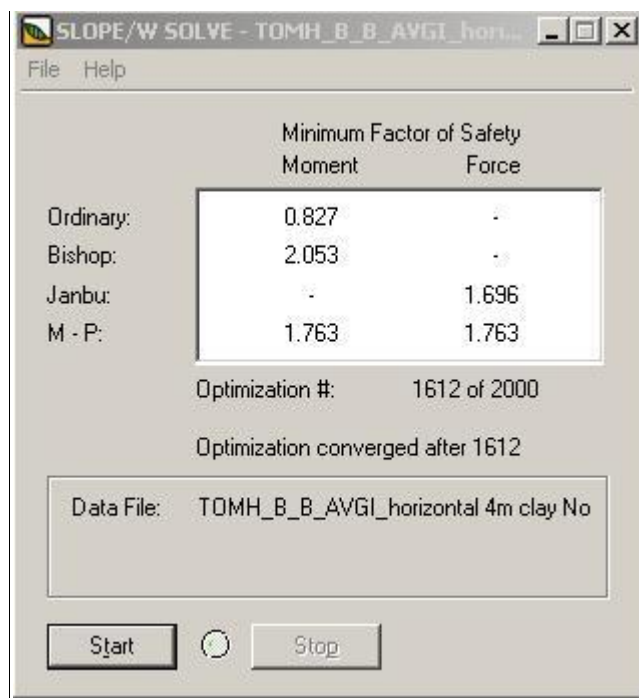
Εικόνα 4.9: Παράθυρο Draw Piezometric Lines-Επιλογή στρώματος αδυναμίας



Εικόνα 4.10: Παράθυρο Draw Piezometric Lines-Επιλογή όλων των στρωμάτων

Από την επιλογή Define Ru→Include in PWP επιλέγεται το «No» για όλα τα στρώματα ώστε να μην υπολογίζεται και η τιμή του Ru στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας.

Τέλος όταν ορισθούν τα δεδομένα του προβλήματος με την εντολή Solve το πρόγραμμα υπολογίζει τους συντελεστές ασφαλείας από κάθε μέθοδο όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11



Εικόνα 4.11: Παράθυρο SOLVE με τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας για κάθε μέθοδο.

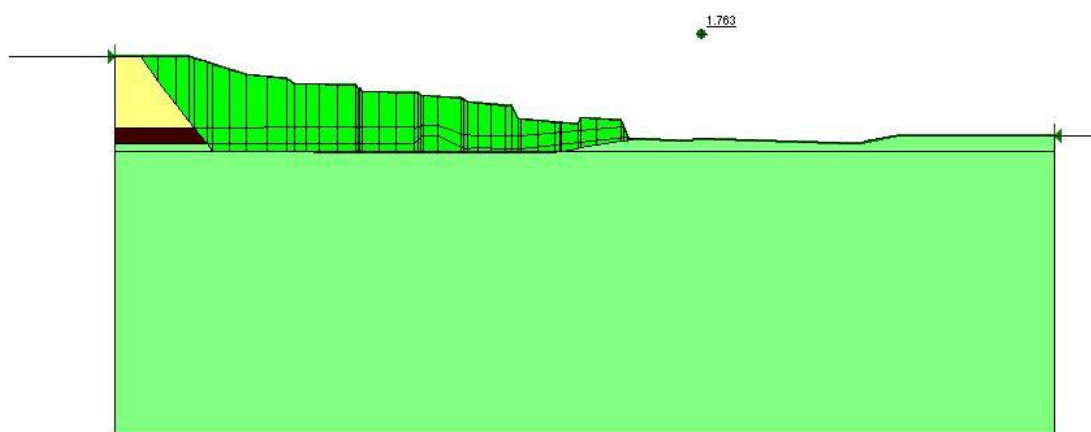


#### 4.5 ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η επίλυση της περίπτωσης των 4m βάθους για κάθε επιμέρους σενάριο.

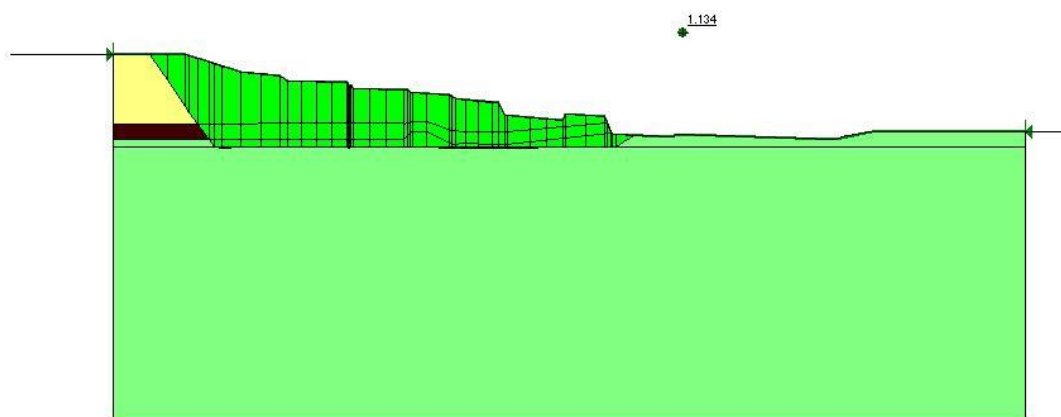
##### 1<sup>ο</sup> Σενάριο: Άργιλος

Για το βάθος των 4m και χωρίς την παρουσία νερού το πρόγραμμα έδωσε τιμή συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1.763 (βλέπε εικόνα 4.12). Παρατηρείται ότι η καμπύλη της αστοχίας αρχικά είναι κυκλική και στην συνέχεια ακολουθεί σχεδόν παράλληλα το στρώμα αδυναμίας. Το πρόγραμμα χωρίζει τον σχηματισμό σε επιμέρους λωρίδες ανάλογα με τη γεωμετρία του πρανούς και εξετάζει αυτές μια προς μια δίνοντας τον τελικό συντελεστή ασφαλείας. Αφού η τιμή του είναι μεγαλύτερη της μονάδας δεν υπάρχει κίνδυνος ολίσθησης του πρανούς.



Εικόνα 4.12: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα αργίλου στα 4m βάθος χωρίς νερό.

Όταν εμφανίζεται η παρουσία νερού με  $R_u=0.2$  για όλα τα στρώματα ο συντελεστής ασφαλείας παίρνει την τιμή 1.134 όπως φαίνεται στην εικόνα 4.13.



Εικόνα 4.13: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα αργίλου στα 4m βάθος και νερό με  $R_u=0.2$ .



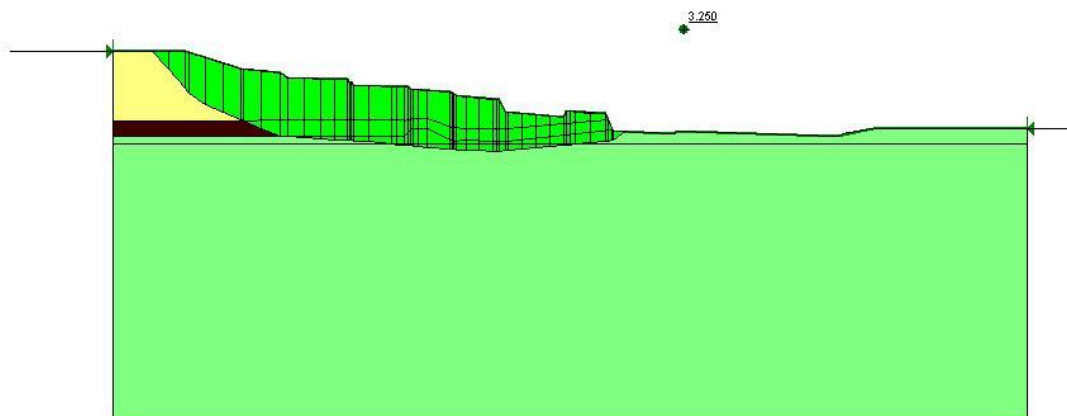
## 2ο Σενάριο: Άμμος

Για το βάθος των 4m και χωρίς την παρουσία νερού το πρόγραμμα έδωσε τιμή συντελεστή ασφαλείας ίσο με 4. Η καμπύλη αστοχίας αρχικά είναι κυκλική και στην συνέχεια ακολουθεί περίπου τη διεύθυνση του στρώματος αδυναμίας. Στην εικόνα 4.14 φαίνεται η διαίρεση του πρανούς σε λωρίδες και η τιμή του συντελεστή ασφαλείας.

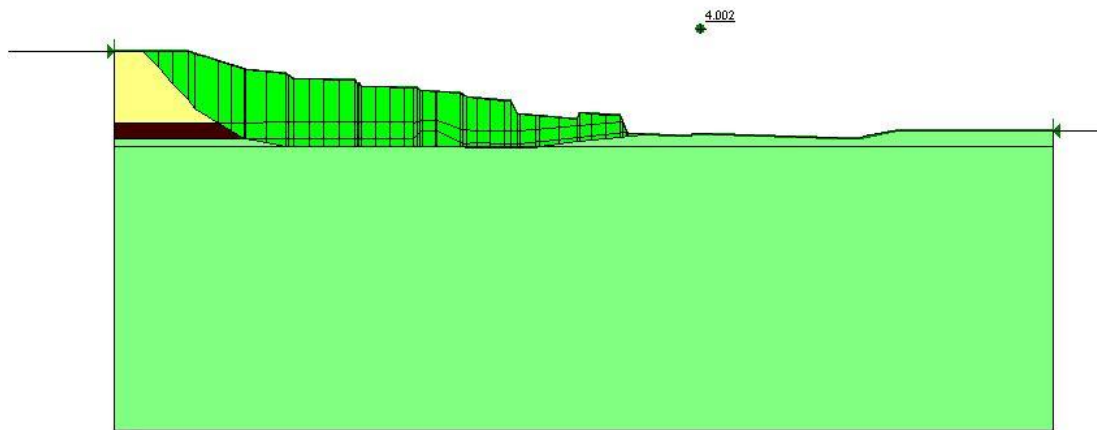


Εικόνα 4.14: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος χωρίς νερό.

Στις εικόνες 4.15 και 4.16 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σχηματισμού όταν εμφανίζεται νερό με τιμή  $Ru=0.2$  σε όλα τα στρώματα και μόνο στο στρώμα της άμμου αντίστοιχα. Για την πρώτη περίπτωση η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι 3.250 ενώ για την δεύτερη 4.002.



Εικόνα 4.15: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με  $Ru=0.2$  για όλα τα στρώματα.

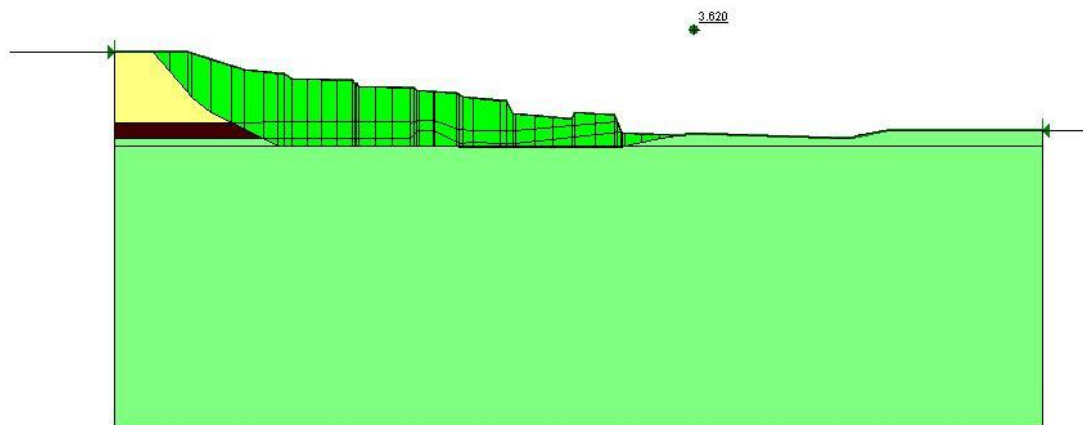


Εικόνα 4.16: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με  $Ru=0.2$  μόνο για το στρώμα αδυναμίας.

Ομοίως στις εικόνες 4.18 και 4.19 παρουσιάζεται η περίπτωση της άμμου με νερό για  $Ru=0.3$  τόσο για όλα τα στρώματα όσο και για το στρώμα άμμου μόνο. Οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι 2.876 και 3.620 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.17: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με  $Ru=0.3$  για όλα τα στρώματα.

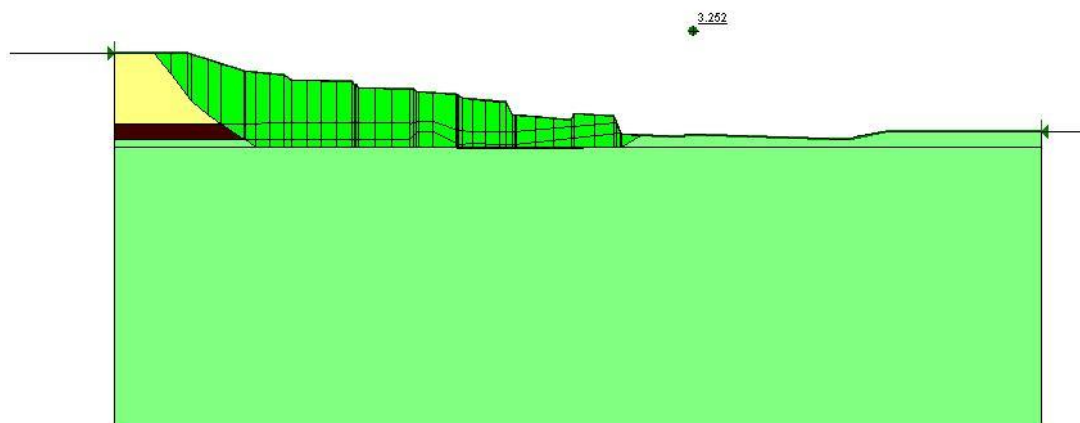


Εικόνα 4.18: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με  $Ru=0.3$  μόνο για το στρώμα αδυναμίας.

Στις εικόνες 4.19 και 4.20 παρουσιάζονται οι περιπτώσεις της άμμου με νερό για  $Ru=0.4$  τόσο για όλα τα στρώματα όσο και για το στρώμα άμμου μόνο. Οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι 2.505 και 3.252 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.19: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με  $Ru=0.4$  για όλα τα στρώματα.



Εικόνα 4.20: Καμπύλη αστοχίας όταν στρώμα άμμου στα 4m βάθος με νερό με  $Ru=0.4$  μόνο για το στρώμα αδυναμίας.

#### 4.6 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα για το κάθε σενάριο παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.4, 4.5 και 4.6:

Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα όταν η ζώνη αδυναμίας θεωρείται άργιλος

| Clay | C1          | C2             |
|------|-------------|----------------|
| m/SF | No water    | Water $Ru=0.2$ |
| 4    | 1.763       | 1.134          |
| 8    | 1.507       | No solution    |
| 12   | 1.389       | 1.056          |
| 16   | 1.580       | No solution    |
| 20   | No solution | No solution    |

Πίνακας 4.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα όταν η ζώνη αδυναμίας θεωρείται άμμος(1).

| Sand | S1       | S2<br>Ru για όλα τα στρώματα |           |          |           |          |          |          |
|------|----------|------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| m/SF | No water | $Ru=0.2$                     | $Ru=0.25$ | $Ru=0.3$ | $Ru=0.35$ | $Ru=0.4$ | $Ru=0.5$ | $Ru=0.6$ |
| 4    | 4.000    | 3.250                        | 3.072     | 2.876    | 2.690     | 2.505    | 2.131    | 1.749    |
| 8    | 4.035    | 3.288                        | 3.099     | 2.907    | 2.720     | 2.531    | 2.151    | 1.773    |
| 12   | 3.994    | 3.254                        | 3.072     | 2.887    | 2.696     | 2.508    | 2.132    | 1.760    |
| 16   | 4.028    | 3.281                        | 3.097     | 2.903    | 2.711     | 2.521    | 2.144    | 1.764    |
| 20   | 3.978    | 3.329                        | 3.138     | 2.909    | 2.716     | 2.525    | 2.161    | 1.775    |

Πίνακας 4.6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα όταν η ζώνη αδυναμίας θεωρείται άμμος(2).

| Sand | S3<br>Ru μόνο στο στρώμα της άμμου |           |          |           |          |          |          |
|------|------------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| m/SF | $Ru=0.2$                           | $Ru=0.25$ | $Ru=0.3$ | $Ru=0.35$ | $Ru=0.4$ | $Ru=0.5$ | $Ru=0.6$ |
| 4    | 4.002                              | 3.738     | 3.620    | 3.425     | 3.252    | 2.883    | 2.505    |
| 8    | 3.879                              | 3.905     | 3.789    | 3.441     | 3.282    | 2.925    | 2.534    |
| 12   | 3.872                              | 3.939     | 3.794    | 3.622     | 3.295    | 2.925    | 2.551    |

|    |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 16 | 3.896 | 3.783 | 3.795 | 3.658 | 3.349 | 2.964 | 2.811 |
| 20 | 4.014 | 3.816 | 3.676 | 3.517 | 3.357 | 3.019 | 2.619 |

Η στήλη C1 και S1 δίνει αποτελέσματα όταν οι σχηματισμοί δεν πληρούνται με νερό. Σε αυτήν την περίπτωση η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι υψηλή. Αυτό είναι λογικό μιας και το κριτήριο Mohr-Coulomb λέγει ότι η εμφάνιση νερού μετατοπίζει τον κύκλο του Mohr πιο αριστερά, πλησιάζοντας στην κατάσταση αστοχίας. Επομένως αφού δεν υπάρχει νερό οι τιμές θα είναι μεγαλύτερες από αυτές όταν εμφανίζεται πίεση πόρων. Παρόλα αυτά στην περίπτωση των 4m και 20m φαίνεται ότι η τιμή του συντελεστή είναι πιο μικρή από την τιμή όταν εμφανίζεται νερό με  $R_u=0.2$  για το στρώμα της άμμου. Αυτό δεν αναιρεί το παραπάνω συμπέρασμα μιας και η διαφορά μεταξύ των τιμών είναι πολύ μικρή.

Η στήλη C2 δίνει τιμές όταν πλέον υπάρχει νερό με τιμή  $R_u=0.2$ . Η υπόθεση για το  $R_u$  έγινε αφού δοκιμάστηκαν επιμέρους σενάρια τα οποία όμως έδιναν πολύ υψηλές τιμές για την πίεση των πόρων και επομένως η ενεργή τάση λάμβανε αρνητικές τιμές που δεν ήταν αντιπροσωπευτικές σύμφωνα με τα δεδομένα του προβλήματος. Για το λόγο αυτό για μερικά βάθη το πρόγραμμα εμφάνιζε αδυναμία επίλυσης ( No solution).

Λόγο του ότι η άμμος είναι διαπερατός σχηματισμός ενώ η μάργα αδιαπέρατος εξετάστηκαν δυο σενάρια έτσι ώστε η τιμή του  $R_u$  να συμπεριλαμβάνεται.

(α) σε όλα τα στρώματα του σχηματισμού (S2) και

(β) μόνο στο στρώμα της άμμου (S3).

Για κάθε ένα σενάριο εξετάστηκε η συμπεριφορά του συντελεστή ασφαλείας ανάλογα με τι τιμή θα έχει το  $R_u$ . Παρατηρήθηκε ότι όσο η τιμή του  $R_u$  αυξάνεται, τόσο ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται πράγμα λογικό αφού αύξηση του  $R_u$  σημαίνει αύξηση της πίεσης των πόρων άρα ομοίως από το κριτήριο Mohr-Coulomb ο κύκλος μετατοπίζεται πιο αριστερά πλησιάζοντας περισσότερο την κατάσταση της αστοχίας.

Από τις τιμές φαίνεται ότι ο συντελεστής ασφαλείας αυξομειώνεται σε σχέση με το βάθος πράγμα που πιθανόν να οφείλεται στις κατανομές των δυνάμεων σε κάθε περίπτωση.

Οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την περίπτωση της άμμου είναι μεγαλύτερες από αυτές όταν το στρώμα αδυναμίας είναι η άργιλος. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην γωνία εσωτερικής τριβής που για την άμμο είναι  $\varphi=34\text{deg}$  ενώ για την άργιλο είναι  $\varphi=6\text{deg}$ .

Τέλος παρατηρείται ότι οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας όταν το  $R_u$  αφορά μόνο το στρώμα της άμμου είναι μεγαλύτερες από αυτές που έχουν  $R_u$  για όλα τα στρώματα κάτι που είναι πολύ λογικό αφού το νερό βρίσκεται μόνο σε έναν σχηματισμό άρα η πίεση πόρων είναι αυξημένη μόνο σε ένα στρώμα και όχι σε ολόκληρο τον σχηματισμό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

---

Η διπλωματική εργασία πραγματεύεται την παραμετρική ανάλυση της ευστάθειας πρανών για το ορυχείο Αμυνταίου. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα και οι προτάσεις της ανάλυσης.

### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Βάσει των παραδοχών και των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Η ανάλυση της ευστάθειας απαιτεί την γνώση των ιδιοτήτων  $c, \gamma$  και  $\phi$  για κάθε στρώμα οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας.
2. Η ύπαρξη νερού επηρεάζει άμεσα την τιμή του συντελεστή ασφαλείας όπως φαίνεται και στην ενότητα 4.6 γι' αυτό και είναι απαραίτητο να υπάρχουν ακριβής πληροφορίες σχετικά με αυτό.
3. Η επιλογή της μεθόδου ανάλυσης είναι εξίσου σημαντική. Όταν οι πληροφορίες για ένα πρόβλημα είναι ελλιπείς χρησιμοποιούνται απλούστερες μέθοδοι που απαιτούν λιγότερες παραδοχές.
4. Η επιλογή του τρόπου ολίσθησης σχετίζεται με την γεωμετρία και τις ιδιότητες των στρωμάτων.
5. Η επιλογή της μεθόδου που θα υπολογίσει ον συντελεστή ασφαλείας θα πρέπει να είναι η κατάλληλη ανάλογα με την γεωμετρία και τα δεδομένα του προβλήματος.
6. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση μόνο μιας τομής για ένα ορυχείο δίνει μια πολύ γενική εικόνα για το πρόβλημα.

### 5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

---

Προκειμένου να βρεθούν ακριβέστερα αποτελέσματα στο πρόβλημα αστοχίας που αντιμετωπίζει το ορυχείο Αμυνταίου προτείνονται τα εξής:

1. Να γίνουν οι απαραίτητες διαδικασίες ώστε να υπολογισθούν οι τιμές των παραμέτρων κάθε στρώματος.
2. Να γίνει αναλυτική μελέτη για την υψομετρική στάθμη και πίεση πόρων για το νερό σε κάθε σημείο της εκμετάλλευσης.
3. Να γίνει μελέτη ώστε να υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του δαπέδου.
4. Να γίνει διερεύνηση εναλλακτικών θέσεων ολίσθησης, έχοντας πλήρη εικόνα της γεωμετρίας των στρωμάτων, κάτω από το τεχνικό πέρας της εκμετάλλευσης.
5. Να γίνει παραμετρική ανάλυση και σε άλλες περιοχές του ορυχείου ώστε να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη και ακριβής εικόνα της κατάστασης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

### ΕΛΛΗΝΙΚΗ

---

- Αγιουτάντης Ζ. (2002), Στοιχεία γεωμηχανικής-Μηχανική πετρωμάτων, Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα.
- Βάμβουκα Δ. (2002), Αντιρυπογόνος Χρήσις Γαιανθράκων- Τεχνολογίες Αξιοποίησης Γαιανθράκων Χαμηλής Τάξης, Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα.
- Γαμβρούδης Χ. (2006), Διερεύνηση υδραυλικής συμπεριφοράς και ευστάθειας πρανών φράγματος Γαδούρα Ρόδου, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Εξαδάκτυλος Γ. (2011), Ευστάθεια Υπαίθριων και υπόγειων Έργων, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Καβουρίδης Κ. και Παυλουδάκης Φ. (2004). Ο ρόλος των στερεών καυσίμων στην Ευρωπαϊκή και Παγκόσμια αγορά ενέργειας τον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Τεχνικά Χρονικά Διμηνιαία Έκδοση ΤΕΕ Ιαν.- Φεβρ. 2004 τεύχ.1 28σ.
- Μεταξάς Α, Καραγεωργίου Μ-Μ, Καρύμπαλης Ε και Καραγεωργίου Δ. (2007), Η παλαιογραφία της ευρύτερης περιοχής των Κομνηνών στη λεκάνη Πτολεμαΐδας κατά το νεογενές και τεταρτογενές, 8<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, Αθήνα, 4-7 Οκτωβρίου 2007, Τόμος Ι. Γεωμορφολογία, Παράκτια Γεωμορφολογία - Ωκεανογραφία, Κλιματολογία, Περιβάλλον, Γεώτοποι, Γεωγραφική εκπαίδευση.
- Μπούνου Αι. (2012). Συγκριτική αξιολόγηση αριθμητικών επιλύσεων του προβλήματος της ευστάθειας πρανών με τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων, πεπερασμένων διαφορών και οριακής ισορροπίας, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Νικολαΐδου Γ. (2014). Ανάλυση διαθεσιμότητας και απόδοσης του εξοπλισμού συνεχούς λειτουργίας στο ορυχείο Μαυροπηγής του Λιγνιτικού κέντρου Δυτικής Μακεδονίας, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Τόλη Δ. (2011). Υδρογεωλογική μελέτη της λεκάνης Αμυνταίου-Αναργύρων, Δ. Μακεδονία. Πτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα
- Τσελεπίδης Π. (2014), Προσωπική Επικοινωνία

### ΔΙΕΘΝΗΣ

---

- Craig R.F, (2004) Soil Mechanics, Seventh Edition, Spon Press
- EED (Environment & Development Desk) (2013), Assessment report of the recent landslide event in the Gyama valley, Department of Information and international relation central Tibetan Administration
- Fredlund D.G, Krahn J., Pufahl D.E., (1981), The Relationship between Limit Equilibrium Slope Stability Methods, In Proceedings of the 10<sup>th</sup> International



Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 3: 409-416. 1981.

- Johari A., Javadi A.A. (2012), Reliability assessment of infinite slope stability using the jointly distributed random variables method, Volume 19. Issue 3, June 2012, pp.423-429
- Kavvadas M., Agioutantis Z., Schilizzi P., Steiakakis C. (2013), Stability and movements of open-pit lignite mines in Northern Greece, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2-6 September 2013
- Krahn J., (2004), Stability Modeling with SLOPE/W-An engineering methodology, First Edition, Revision 1, August 2004
- Novotny J. (2013) Varnes Landslide Classification(1978), Addis Ababa University, Ethiopia.
- Pankow K.L., Moore J.R., Hale M., Koper K.D., Kubacki T., Whidden K. M., McCarer M.K., (2013), Massive landslide at Utah copper mine generates wealth of geophysical data. Geoscience Article, January 2014, Volume 24, No 1
- Pavlides A., Hristopoulos D.T., Agioutantis Z., Roumbos C. (2011), Evaluation of multilayer deposit layers using a profitability index, Proceedings, Sustainable Development in the Minerals Industry (SDIMI 2011), 14-17 June 2011, pp.19-24
- Pavlides S., Mountrakis D. (1986) Extensional tectonics of northwestern Macedonia, Greece, since the late Miocene, Journal of Structural Geology, 9(4): 385-392.
- Smith, (2006) Elements of Soil Mechanics, Blackwell Publishing
- Torgoev I., Omorov B. (2014), Mass Movement in the Waste Dump of High Altitude Kumtor Goldmine (Kyrgyzstan), Landslide Science for a safer geoenvironment, 2014, Volume 3, Part VII, pp 517-521
- Unitar (2011), Post-Landslide Assessment for Çöllolar Coalfield Kahramanmaraş, report number LS-2011-000170-TUR

#### ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ

- 
- [www.bnamericas.com/news/mining/Wall\\_collapses\\_at\\_Chucamata\\_output\\_affected](http://www.bnamericas.com/news/mining/Wall_collapses_at_Chucamata_output_affected)
  - [www.dei.gr](http://www.dei.gr)
  - [www.geo.auth.gr](http://www.geo.auth.gr)
  - [www.legah.metal.ntua.gr](http://www.legah.metal.ntua.gr), Διαφάνειες Διαλέξεων Λουπασάκης Κ., 2014