

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διερεύνηση ευστάθειας πρανών της  
ανοικτής εκσκαφής του λιγνιτωρυχείου  
Αμυνταίου

ΜΑΡΙΑ ΜΠΟΛΓΚΟΡΑΝΟΥ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2015

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΕΜΜ.ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Ζ.ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, Καθηγητής

Μ.ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο λιγνιτωρυχείο Αμυνταίου εκδηλώνεται κινητικότητα στην περιοχή των αποθέσεων (ανατολικά πρανή) και στα τελικά δάπεδα εκσκαφής. Το γεγονός αυτό κινεί το ενδιαφέρον για την αξιολόγηση του φαινομένου ενόψει της σχεδιαζόμενης συνέχισης της λειτουργίας στα βάθη αυτά και την προχώρηση της εκμετάλλευσης προς τα δυτικά.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αξιολογήθηκαν επιλεγμένοι μηχανισμοί κινητικότητας και πραγματοποιήθηκε ανάλυση της ευστάθειας των δυτικών πρανών του Ορυχείου χρησιμοποιώντας μεθόδους οριακής ισορροπίας. Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό SLOPE/W και χρησιμοποιώντας τις μεθόδους Bishop και Janbu.

Λόγω της σχετικής αβεβαιότητας, αναφορικά με τις τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων (γωνία εσωτερικής τριβής, συνοχή, μοναδιαίο βάρος), κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί πιθανοτική ανάλυση του προβλήματος για την πιο αξιόπιστη προσέγγιση του θέματος.

Εκτιμώντας την αναμενόμενη πιεζομετρία, τα δυτικά πρανή με την υφιστάμενη γεωμετρία θεωρούνται ευσταθή. Η ανάλυση του προβλήματος οδήγησε σε συμπεράσματα σχετικά με τις γεωτεχνικές παραμέτρους των υποκείμενων και ενδιάμεσων σχηματισμών.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας:

Τον κ. Στειακάκη, επιβλέποντα επίκουρο καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την συνεχή καθοδήγηση και άριστη συνεργασία καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας.

Τον κ. Αγιουτάντη, καθηγητή του Πανεπιστημίου Κεντάκι, για την επιλογή του θέματος, την υποστήριξη και την συνεχή βοήθεια κατά την διάρκεια της εργασίας.

Τον κ. Γαλετάκη, αναπληρωτή καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την βοήθειά στο σχεδιασμό της τομής κατά την πρόοδο της εκμετάλλευσης.

Επίσης τους κυρίους Βαβαδάκη και Λαζαρόπουλο, επιστημονικούς συνεργάτες του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας για την συνεχή βοήθειά τους, καθώς και την κ. Σταθογιάννη.

Την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

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

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	iii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ.....	1
1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ .....	3
1.3 ΤΟ ΛΙΓΝΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ .....	7
1.4 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ.....	14
1.5 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ.....	16
1.6 ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ.....	16
1.7 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ .....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	20
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ .....	20
2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	20
2.2 ΑΙΤΙΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ .....	21
2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ.....	23
2.3.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	23
2.3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ .....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	35
3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΟΡΙΑΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ .....	35
3.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΤΟΥ ΟΡΥΧΕΙΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> .....	39
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	39
4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ (ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ).....	42
4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ.....	43
4.1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΝΕΡΟΥ.....	44
4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΡΟΟΔΟ ΤΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ .....	46
4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ.....	46
4.2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ.....	47
4.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> .....	49
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	49
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	50

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	51
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	52

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

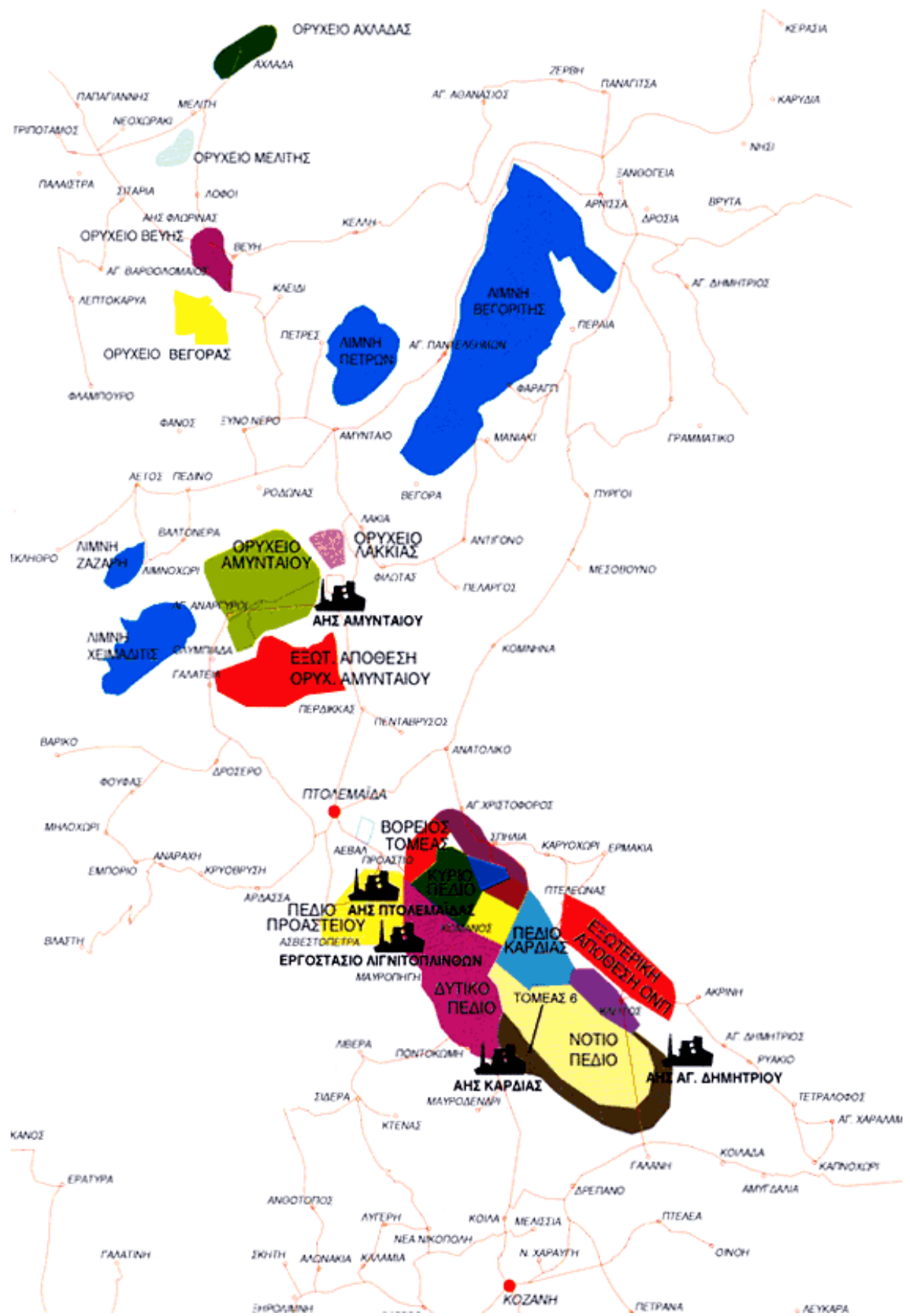
### 1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Το Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (ΛΚΔΜ), το οποίο περιλαμβάνει τα Ορυχεία της Πτολεμαΐδας και του Αμυνταίου, βρίσκεται 110 km δυτικά της Θεσσαλονίκης και καλύπτει μία έκταση 120 km<sup>2</sup>. Η λιγνιτοφορία της λεκάνης εκτείνεται από το Μοναστήρι (ΠΓΔΜ) μέχρι την Ελασσόνα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (Νικολαΐδου, 2014).

Τον Μάρτιο του 1973, στα πλαίσια του προγράμματος «Μελέτη λιγνιτοφόρων λεκανών ΒΔ Μακεδονίας», που εκτελέστηκε με πρωτοβουλία και δαπάνες της ΔΕΗ, το ΙΓΜΕ ξεκίνησε γεωλογική και κοιτασματολογική μελέτη σε ολόκληρη την περιοχή βόρεια της Πτολεμαΐδας έως και το Αμύνταιο.

Η έρευνα ολοκληρώθηκε το 1978 με την περιχάραξη του εκμεταλλεύσιμου κοιτάσματος, το οποίο προσδιορίστηκε σε έκταση 14,5 km<sup>2</sup> και υπολογισμένα λιγνιτικά αποθέματα  $254 \times 10^6$  tn, ενώ τα βέβαια γεωλογικά αποθέματα εκτιμήθηκαν σε  $438 \times 10^6$  tn (Δημητρακόπουλος, 2001 από Κούκουζας, 1978).

Στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Πτολεμαΐδας (Λ.Κ.Δ.Μ) λειτουργούν σήμερα τέσσερα λιγνιτωρυχεία: Το Ορυχείο Νοτίου Πεδίου, το Ορυχείο Καρδιάς, το Ορυχείο Κύριου Πεδίου (Μαυροπηγή) και το Ορυχείο Αμυνταίου (Γρηγοριάδου, 2014).



Σχήμα 1.1: Ορυχεία και ΑΗΣ της ευρύτερης περιοχής (ΔΕΗ)



## 1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ

Οι παράμετροι του πετρώματος που καθορίζουν την εξόρυξή του με μηχανικά μέσα, σχετίζονται με τις διακλάσεις, τις μηχανικές ιδιότητες του αδιατάρακτου υλικού και τα συστήματα ασυνεχειών-διακλάσεων που διέπουν την κύρια μάζα του πετρώματος.

Οι μηχανικές ιδιότητες που επηρεάζουν την εξορυσιμότητα του πετρώματος είναι (Γαλετάκης, 2013):

1. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη
2. Αντοχή σε εφελκυσμό
3. Αντοχή σε διάτμηση
4. Σκληρότητα
5. Αντίσταση κατά την κοπή
6. Συντελεστής τριβής ανάμεσα στο υλικό και στα μεταλλικά κοπτικά άκρα του εξοπλισμού εξόρυξης

Όταν ένα πέτρωμα είναι αρκετά χαλαρό (λιγνίτης), ώστε να μπορεί να εξορυχθεί απευθείας από έναν μηχανικό ή υδραυλικό εκσκαφέα, τότε δεν είναι απαραίτητη η χρήση εκρηκτικών υλών. Η μηχανική αποσύνθεση περιλαμβάνει τις απλές φάσεις της απόξεσης, κοπής και θραύσης (Αγιουτάντης, 2009).

Για την εξόρυξη με την μέθοδο συνεχούς λειτουργίας μαλακών πετρωμάτων, όπως είναι ο λιγνίτης, έχουν σχεδιαστεί εκσκαφείς με καδοτροχό, σε μεγέθη που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δυναμικότητας.

Μετά την εξόρυξη το υλικό πρέπει να φορτωθεί στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την μεταφορά του. Το ιδανικό είναι και η φόρτωση του μεταλλεύματος να πραγματοποιείται με εξοπλισμό συνεχούς λειτουργίας. Ο κατάλληλος, πλέον, εξοπλισμός για την μεταφορά του μεταλλεύματος είναι οι μεταφορικές ταινίες (Γαλετάκης, 2013).

Από κοιτασματολογικά στοιχεία ερευνητικών γεωτρήσεων, φαίνεται πως άγονα υλικά υπέρκεινται της λιγνιτικής στιβάδας, ενώ την συνέχεια του λιγνίτη διακόπτουν ενστρώσεις στείρου υλικού. Ο λόγος

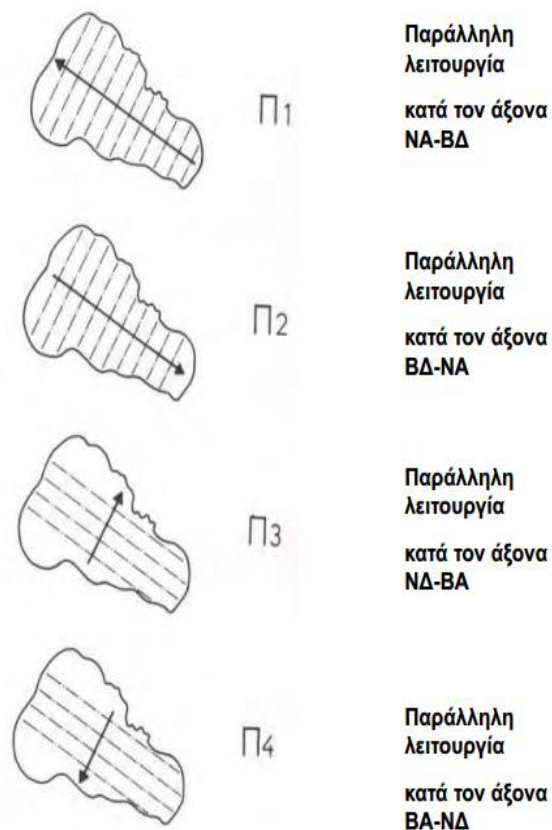
$$\frac{\text{Υπερκείμενα}(Υ) + \text{Ενδιάμεσα}(Ε)}{\text{Λιγνίτης}(Λ)} \left( \text{m}^3_{\text{αγ.}} / \text{tn}_{\text{λιγν.}} \right)$$

καθορίζει, το κόστος του εξορυσσόμενου λιγνίτη, επομένως την εκμεταλλευσιμότητα του κοιτάσματος (Λεονάρδος, 2004).

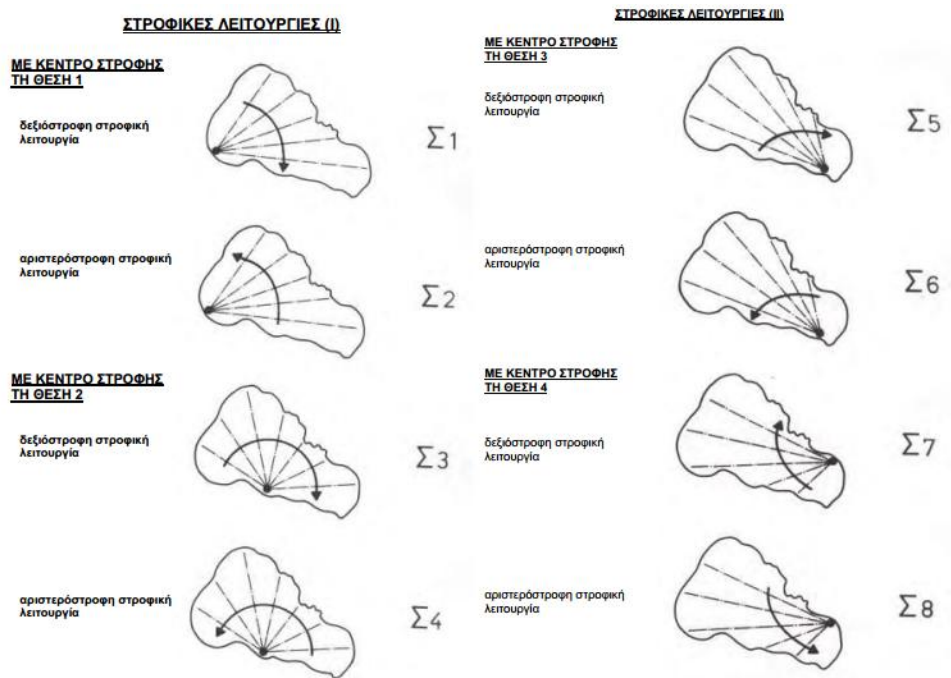
Γενικώς με την γεωμετρία του κοιτάσματος ακολουθείται μια από τις παρακάτω λειτουργίες (Λεονάρδος, 2004):

- *Παράλληλη*. Τα μέτωπα εκσκαφής είναι παράλληλα μεταξύ τους και προωθούνται επίσης παράλληλα. Ομοίως και οι εσωτερικές αποθέσεις. Στην περίπτωση αυτή το πραινές των μετώπων της εκσκαφής και της απόθεσης έχει μεγάλη κλίση (Βλέπε Σχήμα 1.2).
- *Στροφική*. Κατ' αυτήν η προώθηση των μετώπων εκσκαφής γίνεται στροφικά δηλαδή κεφαλή της τομοταινίας αποτελεί ακίνητο κέντρο κύκλου, ενώ η ουρά μετατίθεται επί της περιφέρειας (Βλέπε Σχήμα 1.3).

Παραδείγματα εναλλακτικών λύσεων παράλληλης και στροφικής λειτουργίας:



Σχήμα 1.2: Παράλληλη λειτουργία (Γαλετάκης, 2013)



Σχήμα 1.3: Στροφική λειτουργία (Γαλετάκης, 2013)

Η μέθοδος εκμετάλλευσης που αναπτύχθηκε στο Ορυχείο Αμυνταίου είναι «Επιφανειακή με ορθές βαθμίδες». Επειδή (Λεονάρδος, 2004):

- Απαιτούνται μεγάλες διακινήσεις υλικών.
- Απαιτείται εκλεκτική εξόρυξη των υλικών.
- Τα στρώματα έχουν μικρή κλίση (σχεδόν οριζόντια).
- Η αντοχή των εξορυσσόμενων υλικών είναι χαμηλή (δεν απαιτείται η χρήση εκρηκτικών υλών).
- Οι χώροι απόθεσης μπορεί να είναι σε ικανή απόσταση από τα μέτωπα εκσκαφής, επελέγη η «Γερμανική Μέθοδος», η οποία είναι μέθοδος συνεχούς εκσκαφής-μεταφοράς-απόθεσης που αναπτύχθηκε και εφαρμόζεται στα αντίστοιχα λιγνιτωρυχεία της Γερμανίας. Στην μέθοδο αυτή τον κύριο εξοπλισμό αποτελούν καδοφόροι εκσκαφείς, ταινιόδρομοι μεταφοράς και αποθέτες.

Κατά την εκσκαφή τα υπερκείμενα του λιγνίτη στείρα υλικά καθώς και το λιγνιτικό κοίτασμα χωρίζονται σε βαθμίδες ύψους περίπου μέχρι 20 m ανάλογα με το ύψος του καδοφόρου εκσκαφέα. Το μέτωπο εκσκάπτεται κατά στρώσεις και τα μεν στείρα υλικά μεταφέρονται στους αποθέτες ενώ ο λιγνίτης κατευθύνεται στους παρακείμενους ΑΗΣ. Η απόθεση των στείων γίνεται σε ειδικά επιλεγμένες περιοχές, στις οποίες μεταφέρεται και η τέφρα.

Οι αποθέσεις διακρίνονται σε εξωτερικές και εσωτερικές. Οι εξωτερικές γίνονται σε περιοχές που δεν περικλείουν εκμεταλλεύσιμα πεδία και δημιουργούνται στην αρχική φάση της εκμετάλλευσης.



Σχήμα 1.4: Καδοφόρος εκσκαφέας (Γαλετάκης, 2013)



Σχήμα 1.5: Αποθέτης (Γαλετάκης, 2013)



Σχήμα 1.6: Σχηματική διάταξη ορυχείου (Γαλετάκης, 2013)

### 1.3 ΤΟ ΛΙΓΝΙΤΙΚΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑ ΤΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΔΕΗ η λιγνιτοφορία της περιοχής Αμυνταίου περιλαμβάνει τρία κοιτάσματα με χαρακτηριστικά τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1:

Πίνακας 1.1: Λιγνιτοφορία περιοχής (Δημητρακόπουλος, 2001)

ΠΕΔΙΟ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ (tn)×10 <sup>6</sup>	Σχέση εκμετάλλευσης (m <sup>3</sup> <sub>αγ.</sub> /tn <sub>λιγν.</sub> )
Κεντρικό	202	10,8:1
Αναργύρων	49,1	3,4:1
Λακιάς	48,1	4,5:1

Τα κύρια ποιοτικά χαρακτηριστικά του λιγνιτικού κοιτάσματος είναι τα ακόλουθα (Δημητρακόπουλος, 2001):

- Μέση υγρασία 55,6%
- Μέση τέφρα επί ξηρού 28,8%
- Μέση Α.Θ.Ι. (Ανώτερη Θερμογόνος Ιδιότητα): 1850 kcal/kg
- Μέση Κ.Θ.Ι. (Κατώτερη Θερμογόνος Ιδιότητα): 1430 kcal/kg
- Το ειδικό βάρος του λιγνίτη υπολογίζεται γύρω στο 1,30 tn/m<sup>3</sup>.



- *Κρυσταλλικά πετρώματα*

- Η λιθοστρωματογραφική τους διάρθρωση στην Λεκάνη Αναργύρων-Αμυνταίου αρχίζει με μια σειρά μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, τόσο ποικίλης πετρογραφικής σύστασης (γνεύσιοι, κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι, χαλαζίτες, φυλλίτες), όσο και ποικίλου βαθμού μεταμόρφωσης (μαρμαρυγιακοί, αμφιβολιτικοί, σερικιτικοί, γλωριτικοί).

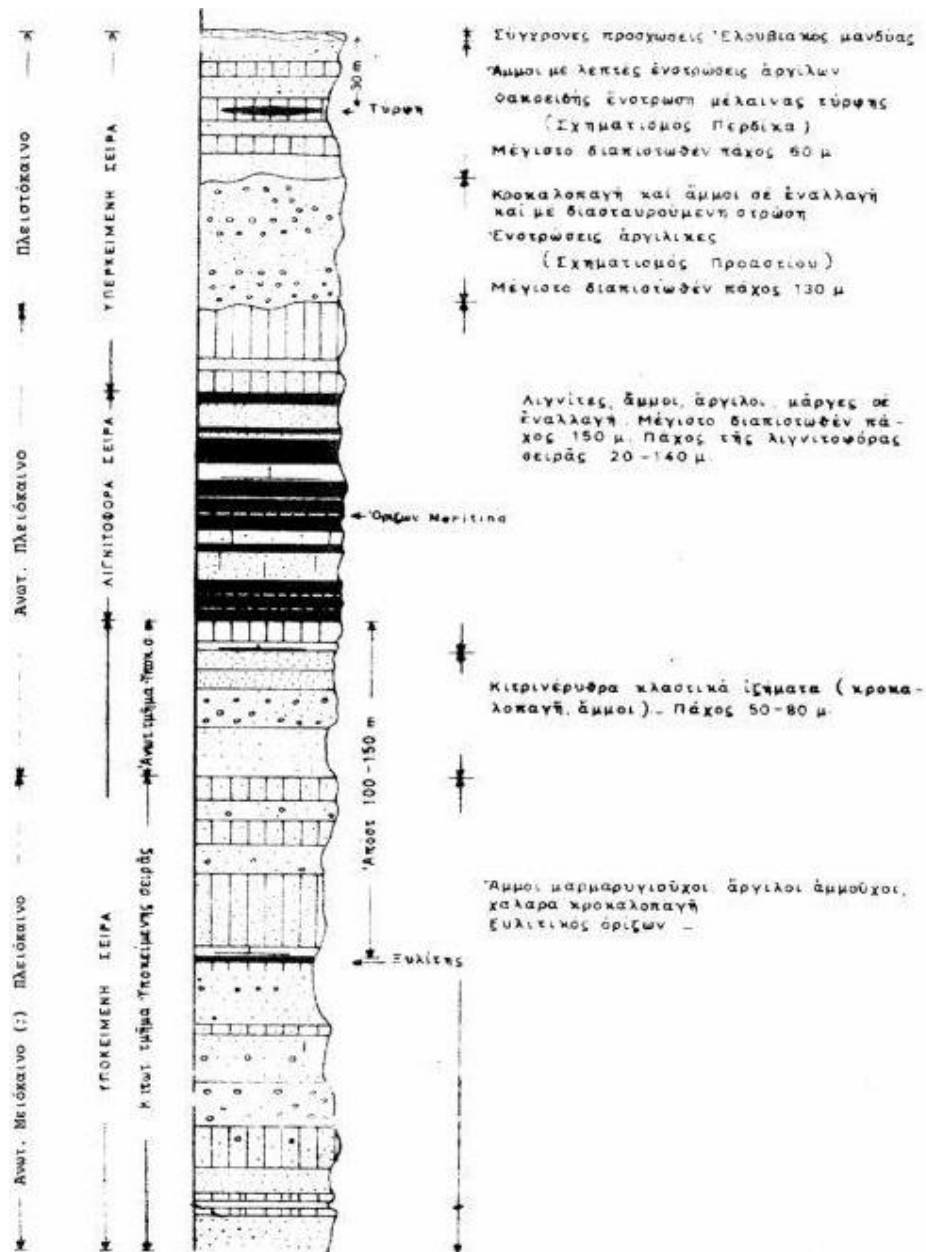
- Γνευσιακός πλουτωνίτης

Πρόκειται για εμφανίσεις γρανιτικού όγκου που παρατηρούνται βόρεια της λίμνης Ζάζαρη, ΒΑ του Σκλήθρου και στις κορυφές του Βέρνου.

Οι εμφανίσεις αυτές αποτελούν τα ανατολικότερα τμήματα του ευρύτερου πλουτωνικού όγκου ης Καστοριάς, που έχει γρανιτική σύσταση και λόγω της μεταμόρφωσης που έχει υποστεί θεωρείται σχιστοποιημένος γνευσιακός γρανίτης (Μουντράκης, 1983).

- *Ανθρακική σειρά*

Στην συνέχεια συναντώνται ασβεστόλιθοι. Αποτελούνται από λευκά-λευκότεφρα, λεπτοκρυσταλλικά έως μεσσκοπλακώδη μάρμαρα και δολομιτικά μάρμαρα. Στα βόρεια περιθώρια της λεκάνης εμφανίζονται στην περιοχή Αετού-Ξυνού Νερού-Πετρών και στις όχθες της Βεγορίτιδας.



Σχήμα 1.8: Λιθοστρωματογραφική στήλη κοιτάσματος Αμυνταίου (Δημητρακόπουλος, 2001 από Κούκουζα, 1978)

Στους ανώτερους ορίζοντες απαντώνται τα νεογενή ιζήματα και οι τεταρτογενείς αποθέσεις (Δημητρακόπουλος, 2001):

- **Νεογενή Ιζήματα**

Με τον όρο νεογενή ιζήματα αναφερόμαστε σε λιγνιτικά ή μη ιζήματα που πλήρωσαν την ευρύτερη λεκάνη.

Τα ιζήματα χωρίστηκαν σε δύο διακριτούς ορίζοντες που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ηλικία, την σύσταση και τον τύπο λιγνιτοφορίας που φιλοξενούν. Έτσι έχουμε τα παλαιότερα προς νεότερα ιζήματα του Κατώτερου και Ανώτερου Νεογενούς. Στα



ιζήματα τύπου Κατώτερου εμφανίζεται λιγνιτοφορία τύπου **ξυλίτη**, ενώ στα ιζήματα του Ανώτερου εμφανίζεται λιγνιτοφορία τύπου **γαιώδους λιγνίτη**.

- **Τεταρτογενείς αποθέσεις**

Καλύπτουν μεγάλο μέρος της υπό μελέτη λεκάνης. Μετά την πλήρωση της λεκάνης από λιγνιτοφόρα και μη ιζήματα εκδηλώθηκε έντονος τεκτονισμός που είχε σαν αποτέλεσμα αλλού την ανύψωση και αλλού την καταβύθιση των τμημάτων της. Το διαβρωμένο υλικό μεταφέρθηκε μέσω υδατορευμάτων και χειμάρρων και μεταφέρθηκε στα χαμηλότερα σημεία της λεκάνης, αφού υπέστη μια φυσική επεξεργασία. Το χονδρόκοκκο υλικό αποτέθηκε στην κοίτη της λεκάνης ενώ το λεπτομερές (άργιλοι κλπ) στο εσωτερικό της λεκάνης.

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες (Αναστόπουλος-Κούκουζας, 1972):

1. Σχηματισμός Προαστίου

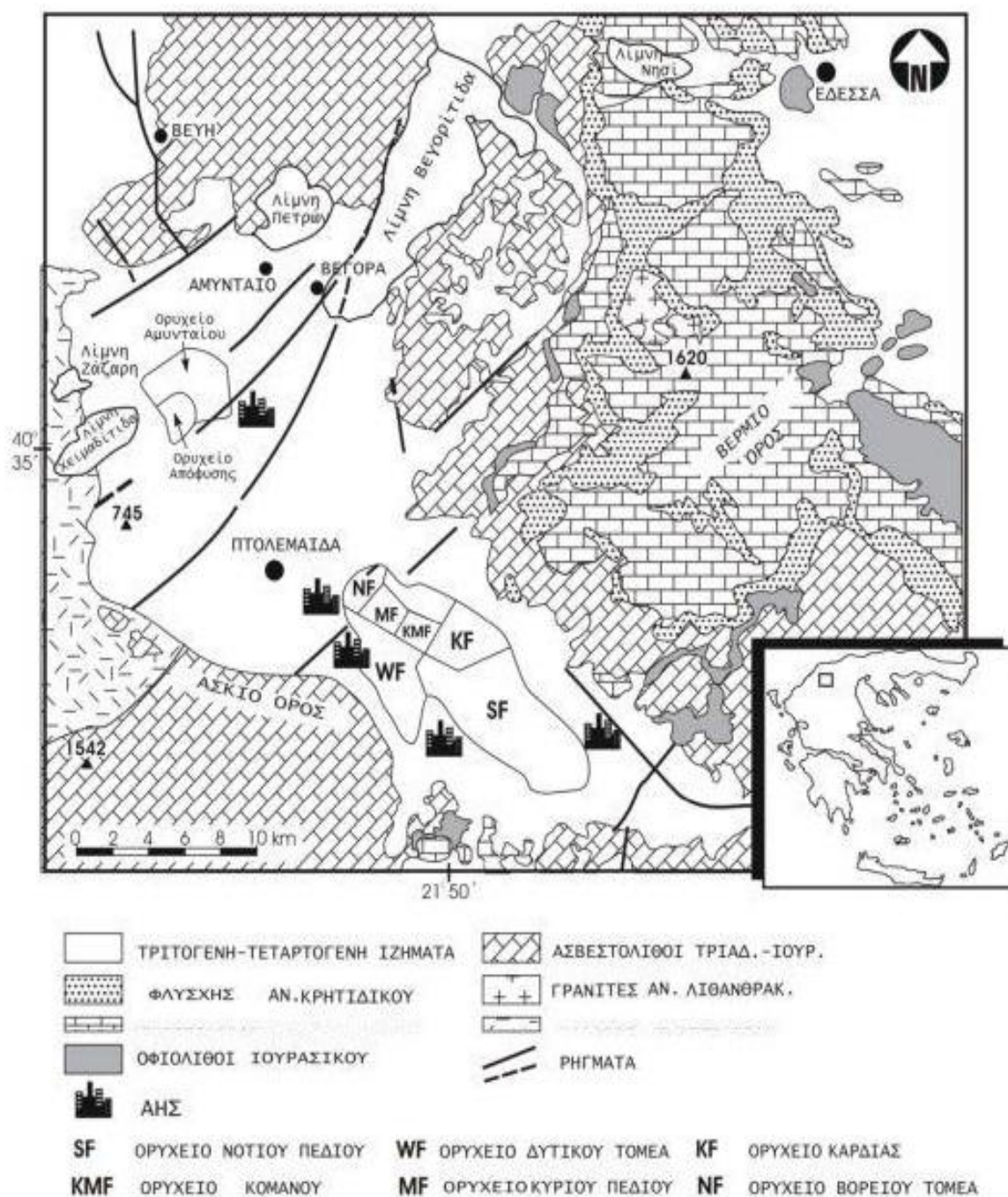
Συνίσταται από ένα σύστημα ποταμοχειμαρρίων αποθέσεων που αποτελείται από εναλλαγές χαλαρών κροκαλοπαγών και άμμων με κόκκινη άργιλο.

2. Σχηματισμοί Περδίκια

Αποτελούνται από ενστρώσεις λεπτόκοκκης άμμου με εναλλαγές ενστρώσεων αμμούχου αργίλου και μάργας, ως και από φακοειδείς ενστρώσεις ψαμμιτών και χαλαρών κροκαλοπαγών.

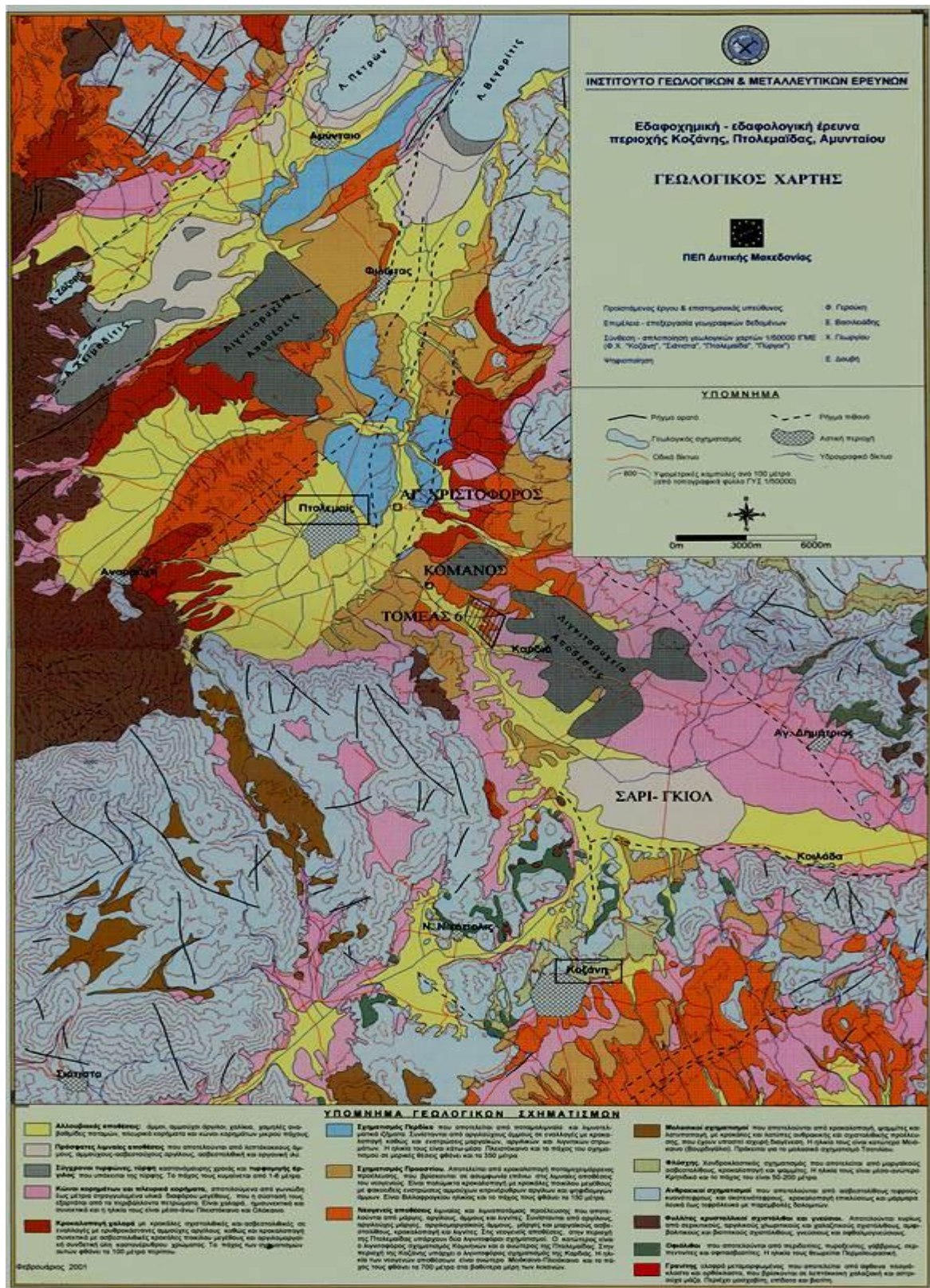
3. Σύγχρονες Αποθέσεις

Σ' αυτές ανήκουν ο ελουβιακός μανδύας, οι σύγχρονες ποτάμιες προσχώσεις και οι κώνοι κορημάτων.



Σχήμα 1.9: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Αμυνταίου (Δημητρακόπουλος, 2001)





Σχήμα 1.10: Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής λιγνιτωρυχείου Αμυνταίου (Στειακάκης, 2003 από ΙΓΜΕ)



Σχήμα 1.11: Νεογενή ιζήματα στην περιοχή μελέτης (Δημητρακόπουλος, 2001)

#### 1.4 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

Μετά την απόθεση των τεταρτογενών σχηματισμών ακολούθησαν έντονες τεκτονικές αναταράξεις που οδήγησαν στην ισχυρή διάρρηξη της περιοχής. Όλες αυτές οι μεταπτώσεις σε συνδυασμό με την διάβρωση οδήγησαν στην δημιουργία τεκτονικών βυθισμάτων (Δημητρακόπουλος, 2001 από Παυλίδη, 1985)

Για την κατανόηση της γεωλογίας, της τεκτονικής και των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής κρίνεται απαραίτητο να μελετηθούν τα κύρια ρήγματα που αναπτύσσονται στην λεκάνη και τα περιθωριά της (Βλέπε Σχήμα 1.12).

Από βιβλιογραφική μελέτη, προκύπτουν οι παρακάτω κύριες τεκτονικές γραμμές (Δημητρακόπουλος, 2001):

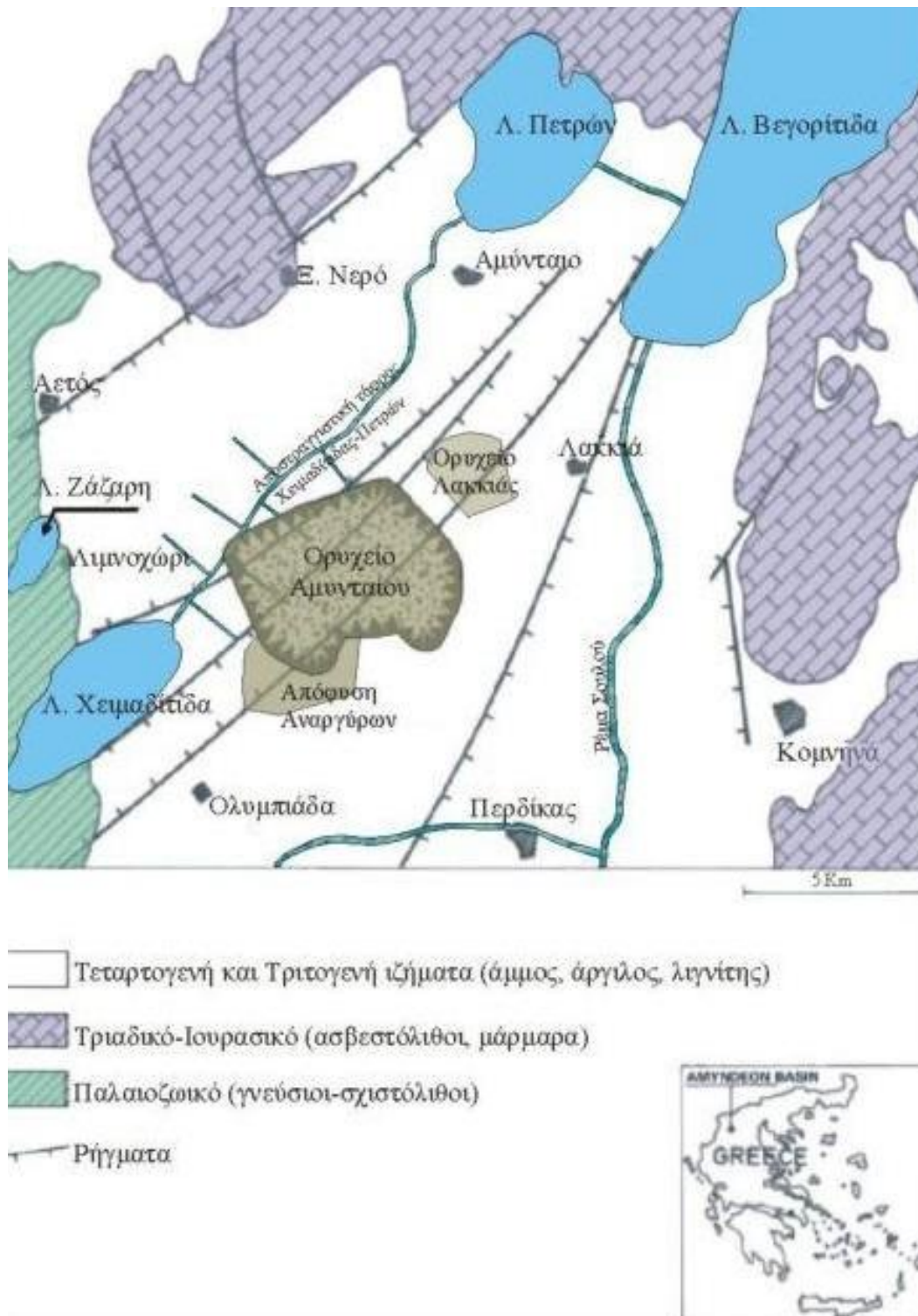
1. Ρήγμα Πετρών-Ξυνού Νερού-Αετού-Σκλήθρου

Ξεπερνά σε μήκος τα 30 Km, αποτελεί το ΒΔ όριο της υπολεκάνης Χειμαδίτιδας-Πετρών και οριοθετεί προς τα ΝΑ το έξαρμα Κλειδιού-Ξυνού Νερού. Έχει ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση και βυθισμένο το ΝΔ τμήμα.

2. Μεγάλο ρήγμα Βεγορίτιδας

Ξεκινά από την βόρεια πλευρά της λίμνης, την δυτική ακτής της, περνά από τον Άγιο Παντελεήμονα και συνεχίζει προς την Βεγόρα και τα χαμηλά τμήματα της λεκάνης. Έχει διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ και το μήκος του μόνο στην ΒΔ πλευρά της λίμνης είναι 12 km.





Σχήμα 1.12: Γεωλογικοί χαρακτήρες και εμφάνιση ρηγμάτων περιοχής (Δημητρακόπουλος, 2001)

## 1.5 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ

Το λιγνιτικό κοίτασμα του Ορυχείου πεδίου Αμυνταίου βρίσκεται εντός της Νεογενούς λεκάνης Αμυνταίου, στα δυτικά είναι τα όρη Βέρνο και Άσκιο, τα οποία αποτελούνται κυρίως από κρυσταλλικά αδιαπέρατα πετρώματα (γρανίτες, γνευσίους), στα βόρεια υπάρχει ένας ορεινός όγκος πάνω από την γραμμή Ξινό Νερό - Πέτρες που αποτελεί περιοχή τροφοδοσίας και αποτελείται από μάρμαρα και ασβεστόλιθους. Το πεδίο Αμυνταίου είναι καλυμμένο με Νεογενείς και Τεταρτογενείς χαλαρούς σχηματισμούς, εντός των οποίων αναπτύσσονται τα υδροφόρα στρώματα.

Η υδρολογική λεκάνη της ευρύτερης περιοχής, έκτασης 360 km<sup>2</sup>, τροφοδοτεί και συμπίπτει με την υδρογεωλογική (στο μεγαλύτερο μέρος), στην οποία αναπτύσσονται δύο κύριοι υδροφόροι (Δημητρακόπουλος, 2001).

Ο πρώτος υδροφόρος βρίσκεται στα υπερκείμενα του λιγνίτη υλικά και αποτελείται από αλληπάλληλα υδροφόρα στρώματα τα οποία διαχωρίζονται από διάφορα στρώματα, αργίλων-λιγνιτών και στρώματα από μάργες. Επειδή έρχονται πλευρικά σε επαφή μεταξύ τους αποτελούν μια μεγάλη υδρογεωλογική ενότητα. Τα στρώματα που υδροφορούν αποτελούνται από λεπτόκοκκες και μεσόκοκκες άμμους, μέχρι και κροκαλοπαγή.

Η δεύτερη υδρογεωλογική ενότητα αποτελείται από τον ευρύτερο καρστικό υδροφόρο και αναπτύσσεται στα Τριαδικοϊουρασικά μάρμαρα και ασβεστόλιθους του υποβάθρου και των βορειοανατολικών παρυφών, ενώ από τις μετρήσεις που έχουν γίνει φαίνεται να υπάρχει σύνδεση με την Βεγορίτιδα (Τόλη, 2011).

## 1.6 ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

Σύμφωνα με τις γεωτρήσεις καρστικής στάθμης που έχουν πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιβάλλουσα περιοχή της λεκάνης Αναργύρων-Αμυνταίου και με την αξιολόγηση υδρογραφημάτων και πιεζομετρικών χαρτών, που παρατίθενται στην συνέχεια, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα (Δημητρακόπουλος, 2001):

- Η Βεγορίτιδα αποτελεί έναν ενδιάμεσο σταθμό στην γενική εικόνα της υπόγειας ροής του νερού από τα δυτικά προς τα ανατολικά.

Στην περιοχή δυτικά του Περδίκια πραγματοποιείται τροφοδοσία του καρστικού υδροφόρου από ποσότητες νερού που διοχετεύονται μέσω των καταβοθρών της τεχνητής λίμνης. Παρόλα αυτά υπάρχουν περιπτώσεις όπου εμφανίζεται μια αντίστροφη ροή, στα ΝΔ της λίμνης, που αποδίδεται στην εισροή σημαντικών επιφανειακών νερών στη Βεγορίτιδα και στην βραδεία ανταπόκριση του υδροφόρου που εκφράζεται με την αύξηση της στάθμης.

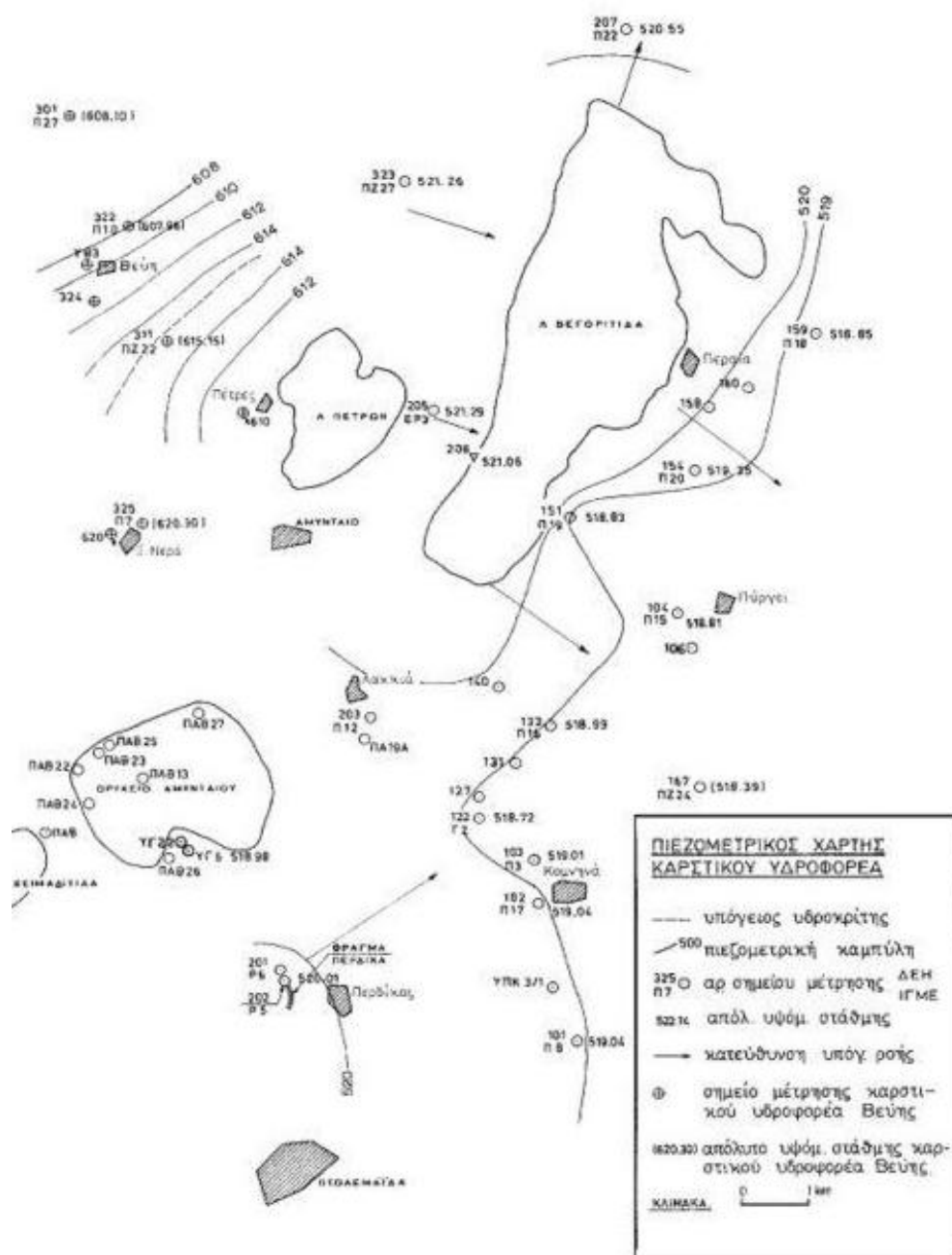
- Παρουσιάζεται σχετική ομοιογένεια στην ανάπτυξη του καρστ, που επιβεβαιώνεται από την φαινομενικά τουλάχιστον ομαλή μορφολογία των πιεζομετρικών καμπυλών (Βλέπε Σχήμα 1.13).

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΤΟ ΟΡΥΧΕΙΟ

Από τον σχεδιασμό του ορυχείου προκύπτει ότι το δάπεδο της εκμετάλλευσης θα φθάνει στα +370 m, δηλαδή περίπου +140 m κάτω από την επιφάνεια της καρστικής στάθμης του συστήματος Βεγορίτιδας (+510 m). Η πιθανότητα εισροής, απευθείας, νερού από το καρστικό σύστημα της Βεγορίτιδας προς το ανοιχτό ορυχείο είναι πολύ μικρή (Δημητρακόπουλος, 2001).

Η πιθανότητα διάρρηξης του δαπέδου ή ανύψωσής του, λόγω υδροστατικής πίεσης του καρστικού υδροφορέα πρέπει να αποκλεισθεί, αφού μόνο το βάρος των υπερκείμενων μαζών είναι αρκετό ώστε να αντισταθμίσει την πίεση αυτή που ανέρχεται σε 33 atm στο βαθύτερο σημείο του Ορυχείου, χωρίς να ληφθεί υπόψη η συνοχή των στρωμάτων. Παράλληλα θα πρέπει να αποκλεισθεί η πιθανότητα διάνοιξης διόδων μέσω των ρηγμάτων και η άνοδος του νερού μέχρι το δάπεδο του Ορυχείου δεδομένου ότι τα πιθανά ανοίγματα των ρηγμάτων έχουν καλυφθεί από λεπτόκοκκο υλικό, το οποίο με την πίεση των υπερκείμενων στρωμάτων έχει συμπυκνωθεί-στερεοποιηθεί και δεν επιτρέπει την δίοδο του νερού (Δημητρακόπουλος, 2001 από ΔΕΠ-ΕΚΥ, 1996 και Ζαφειρόπουλος κ.α., 1998).

Η δυνατότητα πλευρικής διήθησης νερού από τους ασβεστόλιθους του υποβάθρου προς το ανοιχτό Ορυχείο είναι υπαρκτή, ιδιαίτερα στο νότιο τμήμα του Ορυχείου, όπου το υπόβαθρο αναθολώνεται, πιθανώς λόγω ρηγμάτων. Σ' αυτήν την περίπτωση η κίνηση του νερού ρυθμίζεται από την μικρή περατότητα των χαλαρών σχηματισμών και όχι του καρστ (Δημητρακόπουλος, 2001).



Σχήμα 1.13: Πιεζομετρικός χάρτης καρστικού υδροφορέα περιοχής Αμυνταίου, 1988 (Δημητρακόπουλος, 2001)



## 1.7 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

Η ύπαρξη κάποιου γεωλογικού ρήγματος, ο έντονος τεκτονισμός και τα υπόγεια νερά που εμφανίζονταν κατά την εκμετάλλευση είναι πιθανά αίτια που οδήγησαν σε πολλές κατολισθήσεις κατά την διάρκεια ανάπτυξης του Ορυχείου.

Το Ορυχείο έχει υποστεί κατολισθήσεις τις παρακάτω χρονικές περιόδους (Γρηγοριάδου, 2014 από Τσελεπίδης, 2014):

- Ανατολικά 1/2002
- Βόρεια-Ανατολικά 1/2002
- Βόρεια 9/2006
- Βόρεια-Δυτικά 2/2012
- Νότια-Δυτικά 12/2005, 10/2006, 2/2006, 10/2013
- Νότια 12/2011
- Κεντρικά 5/2013, 8/2006, 2/2003



Σχήμα 1.14: Παλιότερες κατολισθήσεις του Ορυχείου Αμυνταίου (Προυντζόπουλος, 2014)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

### ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

#### 2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η κινητική συμπεριφορά της εκσκαφής πριν την εκδήλωση της αστοχίας, αφορά κυρίως την ανάκτηση και την κάμψη (κύρτωση) του δαπέδου της εκσκαφής, όπως επίσης και τις κινήσεις των πρανών λόγω σύνθλιψης και καθίζησης των γεωλογικών σχηματισμών γύρω από την εκσκαφή.

Η ανάκτηση του εδάφους αναφέρεται στη διόγκωση του κατά την κατακόρυφη διεύθυνση λόγω της συνεχούς μείωσης του ασκούμενου φορτίου από την διαδικασία της εκμετάλλευσης. Επίσης, στην ανάκτηση θα πρέπει να συμπεριληφθούν και οι παραμορφώσεις που παρουσιάζουν τα πρανή, λόγω της εκτόνωσής τους από την εκσκαφή. Διακρίνονται δύο φάσεις ανάκτησης (Στειακάκης και Αγιουτάντης, 2007 από Peterson, 1958):

- Άμεση ανάκτηση που εκδηλώνεται κατά το στάδιο εκσκαφής και αποδίδεται στην ελαστική συμπεριφορά των σχηματισμών και είναι εύκολο να γίνει αντιληπτή
- Μακροχρόνια ανάκτηση που εξελίσσεται με πολύ αργούς ρυθμούς και συνεχίζει να εκδηλώνεται για πολλά χρόνια μετά την εκσκαφή

Οι παραμορφώσεις λόγω ανάκτησης μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν σε σχέση με άλλες, εφόσον παρακολουθείται η κινητικότητα του πρανούς με κλισίμετρα.

Η σύνθλιψη των μαλακών σχηματισμών που απαντώνται σε στρώση με άλλους πιο συνεκτικούς και αποκαλύπτονται στο πυθμένα του ορυχείου, προκαλεί μικρού εύρους κάμψεις (κυρτώσεις) του δαπέδου τους. Τα πλευρικά φορτία δεν αντισταθμίζονται δεδομένου ότι από την πλευρά της ελεύθερης βαθμίδας απουσιάζουν πλευρικές τάσεις, με αποτέλεσμα τα μαλακά στρώματα να συμπιέζονται πλευρικά, σχηματίζοντας υπο-επιφανειακές πτυχώσεις στο δάπεδο της εκσκαφής.

Οι παραμορφώσεις των πρανών και η ανύψωση του εδάφους συνήθως συνοδεύονται από μία κατακόρυφη υποχώρηση (καθίζηση) των γεωλογικών σχηματισμών στα περιφερειακά της εκσκαφής. Οι Terzaghi και Peck (1969), αναφέρουν ότι κατά την εκσκαφή ανοικτού ορύγματος σε μαλακό σχηματισμό (άργιλος), το έδαφος πλευρικά της εκσκαφής λειτουργεί σαν επιφόρτιση. Το μέγεθος της κατακόρυφης υποχώρησης περιμετρικά των ανοικτών εκσκαφών μπορεί να θεωρηθεί ανάλογο με αυτό των ορυγμάτων με πλευρική υποστήριξη, για τα οποία ο Peck (1969) εκτιμά καθίζηση της τάξης του 0.5-2% του βάθους τους.

Ο ερπυσμός αναφέρεται στην παραμόρφωση που υφίσταται ένας εδαφικός σχηματισμός σαν ενιαίο (συνεχές) σώμα και εμφανίζεται σε εδάφη με μεγάλες δυνάμεις επαφής μεταξύ των κόκκων (Ter-Stepanian, 1980). Αφορά την αργή αύξηση της παραμόρφωσης κάτω από σταθερή εντατική κατάσταση.

Στην περίπτωση των γαιανθράκων, οι γεωτεχνικές τους ιδιότητες όπως, το μικρό μοναδιαίο βάρος, η αντοχή των διεπιφανειών στρώσης τους με άλλους εδαφικούς σχηματισμούς και η μικρή διαπερατότητά τους σε σχέση με τους σχηματισμούς αυτούς, είναι δυνατόν να συμβάλλουν στην ανάπτυξη ιδιαίτερων μηχανισμών κινητικότητας και αστοχίας.

Επίσης σημαντικό ρόλο στην δημιουργία κατολισθητικών φαινομένων διαδραματίζουν οι αρμοί στρώσης υδροπερατών στρωμάτων που υπέρκεινται μη υδροπερατών σχηματισμών και χαρακτηρίζονται ως επιφάνειες χαμηλής διατμητικής αντοχής. Τέτοιου είδους φαινόμενα αναπτύχθηκαν στην λιγνιτοφόρα περιοχή του Κάτου Ρήνου, Δυτικά της Κολωνίας (Dolezalek and Doro, 1962).

Πειράματα άμεσης διάτμησης (με άργιλο στο κατώτερο και άμμο ή λιγνίτη στο ανώτερο κιτίο της συσκευής), κατέδειξαν ότι η διατμητική αντοχή στις επιφάνειες αυτές μειώνεται έντονα με τον υδατο-εμποτισμό των αργίλων.

Η χαμηλή διατμητική αντοχή του αρμού στρώσης ήταν η αιτία που δημιούργησε προβλήματα και σε ορυχεία της Βουλγαρίας και επέτρεψε σε στρώμα λιγνίτη στο Ορυχείο Marica-Iztok να κινηθεί ανοδικά.

Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι εκτός από την χαμηλή διατμητική αντοχή του αρμού στρώσης, η αποφόρτιση και η κατ' όγκο ανάκτηση των γεωλογικών σχηματισμών αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα της διαμόρφωσης του τασικού πεδίου, της διατμητικής αντοχής και της εξέλιξης της σχετικής κίνησης μεταξύ των στρωμάτων.

## 2.2 ΑΙΤΙΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Η εκδήλωση μιας κατολίσθησης εξαρτάται από την γεωλογική σύσταση και δομή των σχηματισμών, την κλίση και τα μηχανικά χαρακτηριστικά (συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής και τασική κατάσταση) των γεωυλικών που δομούν το πρανές. Σημαντικό επίσης ρόλο παίζει το νερό με την μορφή υγρασίας, κατείσδυσης, επιφανειακής και υπόγειας ροής (Στειακάκης, 2010).

Τα αίτια της εκδήλωσης μίας κατολίσθησης συνοψίζονται στις βασικές κατηγορίες και αναλύονται παρακάτω (Στειακάκης, 2010):

- Μείωση της συνοχής. Προκύπτει με την απόπλυση διαλυτών ορυκτολογικών στοιχείων ή και της ορυκτής κόλλας από το υπόγειο νερό, με συνέπεια την **μείωση της συνοχής του εδάφους**.

Σε περιπτώσεις πολύ ευαίσθητων αργίλων, το νερό που κατεισδύει μπορεί να μειώσει το ποσοστό των αλάτων που βρίσκονται διαλυμένα στο νερό των πόρων και να ελαττώσει την συνοχή των εδαφών αυτών.

Αξίζει να σημειωθεί πως μείωση της συνοχής επέρχεται και με την ανάπτυξη παγετού, όπως και από κραδασμούς υψηλής συχνότητας οι οποίοι προέρχονται από σεισμούς ή εκρήξεις.

- Μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής. Η απομάκρυνση του λεπτόκοκκου υλικού του εδάφους από το νερό (λόγω της εσωτερικής διάβρωσης), έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής.

Το νερό παίζει και τον ρόλο του λιπαντικού, κυρίως όταν διαποτίζει αργιλικά κλάσματα του εδάφους που αποκτούν πλαστική/υδαρή συμπεριφορά.

- Μείωση της ενεργής τάσης. Η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ενεργής τάσης και κατά συνέπεια την **μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους**. Αυτό μπορεί να προκληθεί σε μια εδαφική μάζα με την άνοδο της πιεζομετρικής στάθμης.

- Αύξηση του μοναδιαίου βάρους. Μπορεί να προκύψει με την προσθήκη νερού στον εδαφικό σχηματισμό από την επιφάνεια, ή με τριχοειδή ανύψωση από ένα χαμηλότερο επίπεδο.

*Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η αύξηση του βάρους λόγω κορεσμού αφορά την περίπτωση γεωυλικού που βρίσκεται πάνω από την στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή το γεωυλικό βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, υφίσταται άνωση και το βάρος του μειώνεται.*

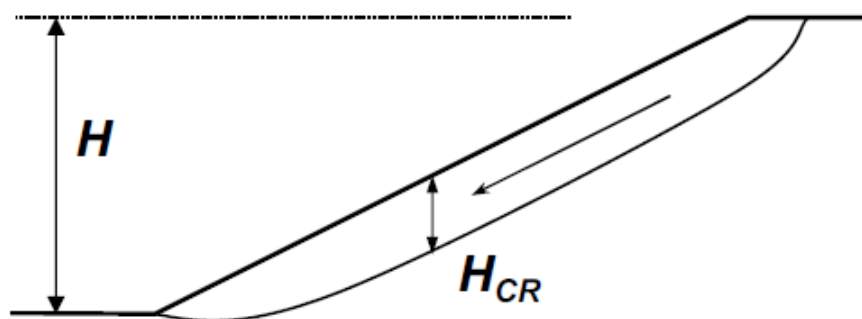
- Φόρτιση με πρόσθετο βάρος. Μπορεί να συμβεί ή με φυσική διεργασία ή με ανθρώπινη παρέμβαση. Η πρώτη περίπτωση αφορά την συσσώρευση φερτών υλικών από προσχώσεις, ενώ η δεύτερη αναφέρεται στην φόρτιση με τις κατασκευές επιχωμάτων ή άλλων έργων στα πρανή.

- Διαφοροποίηση της γεωμετρίας. Προκύπτει με αλλαγή της κλίσης του πρανού ή με διαφοροποίηση του ύψους του. Ο κυριότερος βασικός παράγοντας που προκαλεί αύξηση της κλίσης των πρανών είναι η διάβρωση τους. Η ανθρώπινη παρέμβαση αφορά τις εκχωματώσεις που γίνονται στις κάθε είδους ανοικτές εκσκαφές όπως στην προκειμένη περίπτωση για μεταλλευτικό σκοπό.

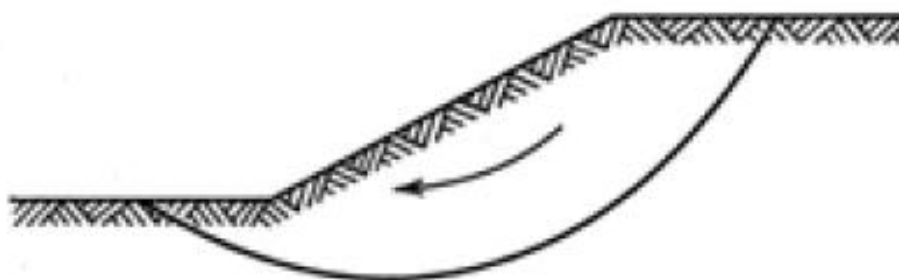
## 2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Τις μορφές αστοχίας των εδαφικών πρανών μπορούμε να τις χωρίσουμε σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Μπουκοβάλας, 2006):

- Τις ρηχές στις οποίες η επιφάνεια αστοχίας είναι επίπεδη και παράλληλη προς την επιφάνεια του πρανού, το δε βάθος αστοχίας είναι μικρό σε σχέση με το μήκος της (Βλέπε Σχήμα 2.1).
- Τις βαθείς, στις οποίες το μεγαλύτερο μέρος της αστοχίας είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος. Σε ομοιογενή εδάφη, ή σχεδόν ομοιογενή, χωρίς έντονες αντιθέσεις μεταξύ των παραμέτρων αντοχής των διαφόρων στρώσεων, η μορφή της επιφάνειας αστοχίας είναι κυκλική ή σχεδόν κυκλική και η αστοχία περιστροφική (Βλέπε Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.1: Πρανές μεγάλου μήκους και ύψους (Μπουκοβάλας, 2006)



Σχήμα 2.2: Πρανές περιορισμένου μήκους και ύψους (Μπουκοβάλας, 2006)

### 2.3.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Ακολουθεί η διάκριση της ανάλυσης ευστάθειας σε σχέση με τον χρόνο (Λουπασάκης, 2014):

- Υπολογισμός βραχυχρόνιας ευστάθειας (short term stability) με τη χρήση παραμέτρων διατμητικής αντοχής υπολογισμένων υπό αστράγγιστες συνθήκες

(δοκιμές άμεσης διάτμησης, δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης). Παραβλέποντας τις μεταβολές στην πίεση του νερού των πόρων.

- Υπολογισμός μακροχρόνιας ευστάθειας (long term stability) με τη χρήση παραμέτρων διατμητικής αντοχής υπολογισμένων υπό στραγγιζόμενων συνθηκών ή υπό συνθηκών αστράγγιστων στις οποίες όμως γίνεται καταγραφή των πιέσεων του νερού των πόρων (βραδείες δοκιμές διάτμησης, τριαξονικές-CUPP).

Τα βραχυχρόνια πρηνή, τα οποία αποτελούνται από τα μέτωπα εκμετάλλευσης ή βαθμίδες, καθώς και τα πρηνή των εσωτερικών αποθέσεων σε στραγγιζόμενες συνθήκες πλήρους κορεσμού υπό συνεχή βροχόπτωση, σχεδιάζονται με συντελεστή ασφαλείας FS=1.3. Ενώ για τις συνθήκες υδροφορίας που έχουν διαπιστωθεί, τα πρηνή λειτουργίας τα οποία συνεχώς αναπτύσσονται και επ' αυτών κινούνται εκσκαφείς και άλλα μηχανήματα σχεδιάζονται με συντελεστή ασφαλείας, FS=2 (Καρράς, 1988).

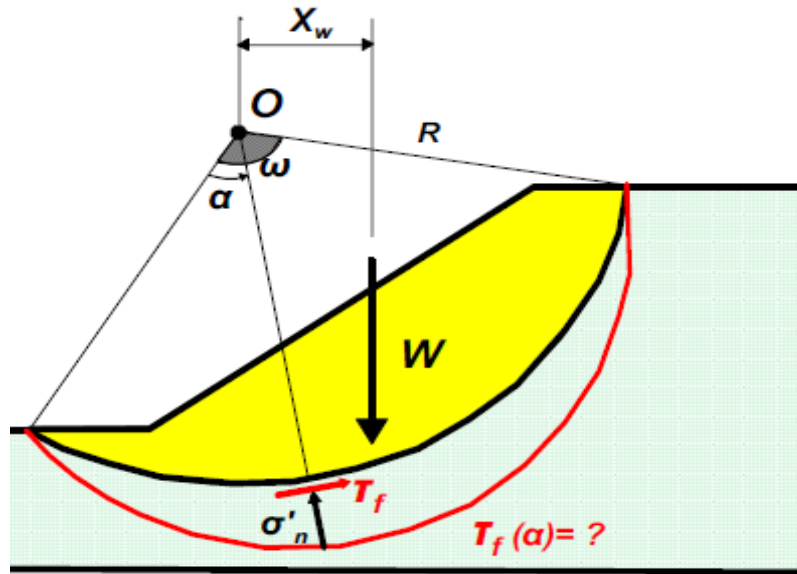
### 2.3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Οι περισσότερες μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας βασίζονται στη μέθοδο της οριακής ισορροπίας. Συνήθως θεωρείται ότι το κριτήριο Mohr-Coulomb ( $\tau=c+\sigma_n \tan \phi$ ) ικανοποιείται κατά μήκος της θεωρούμενης επιφάνειας αστοχίας και η εκτίμηση της ευστάθειας διερευνάται με τον υπολογισμό: α) των δυνάμεων που επενεργούν στην επισφαλή μάζα και β) της αντίστασης στη διάτμηση που αυτή επιδεικνύει (Στειακάκης, 2010).

- ✓ Πρώτα ορίζεται μια πιθανή επιφάνεια αστοχίας του εδάφους.
- ✓ Ακολούθως θεωρείται η οριακή ισορροπία του εδαφικού πρίσματος.
- ✓ Τέλος ορίζεται τον συντελεστή ασφάλειας (FS), ως τον λόγο μεταξύ των δυνάμεων/ροπών προς τι υφιστάμενες δράσεις.

Για παράδειγμα, για την εικονιζόμενη κυκλική επιφάνεια αστοχίας, μπορεί να θεωρηθεί η οριακή ισορροπία ροπών γύρω από το κέντρο περιστροφής O (Μπουκοβάλας, 2006):

$$FS = \frac{R \cdot \int_0^{\omega} \tau_f(a) da}{W \cdot X_w} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.3:Κυκλική επιφάνεια αστοχίας (Μπουκοβάλας, 2006)

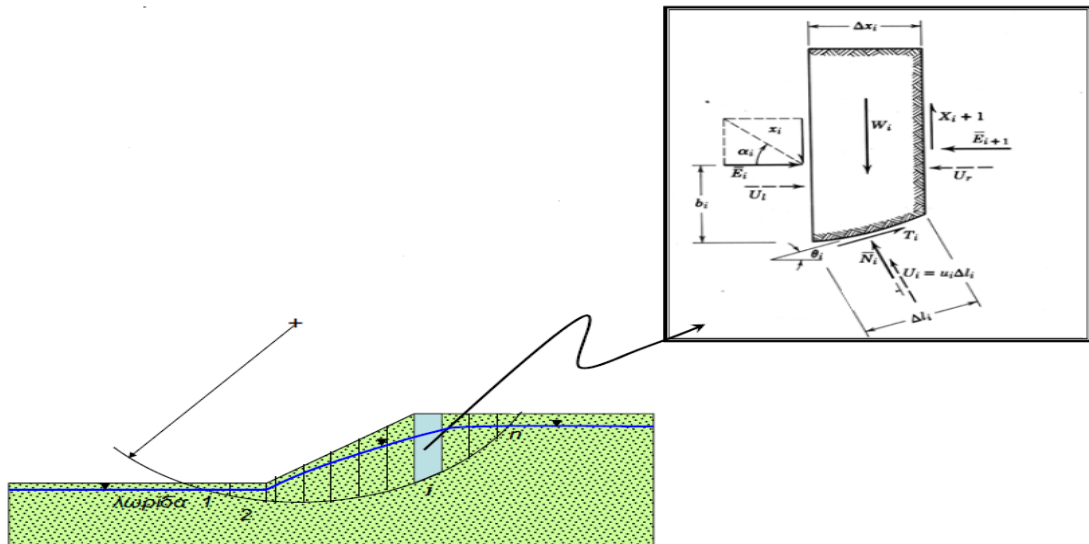
Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όταν η κατανομή της οριακής διατμητικής τάσης αστοχίας  $\tau_f(\alpha)$  επάνω στην επιφάνεια αστοχίας είναι γνωστή, όπως στην περίπτωση της **βραχυχρόνιας** αστοχίας όπου η ανάλυση γίνεται με βάση την αστράγγιστη διατμητική αντοχή των εδαφικών στρώσεων.

Στην περίπτωση **μακροχρόνιας** αστοχίας όμως, η  $\tau_f(\alpha)$  είναι συνάρτηση των ορθών ενεργών τάσεων που ασκούνται στην επιφάνεια αστοχίας που δεν είναι άμεσα γνωστές. Έτσι οι υπολογισμοί γίνονται προσεγγιστικά με την **μέθοδο των λωρίδων** η οποία προτάθηκε αρχικά από τον Σουηδό W. Fellenius το 1927, σε μια προσπάθεια υπολογισμού των ορθών και διατμητικών τάσεων που ασκούνται στην επιφάνεια αστοχίας συναρτήσει του βάρους των υπερκείμενων στρωμάτων.

Για μια δεδομένη επιφάνεια αστοχίας το ολισθαίνον τμήμα υποδιαιρείται σε λεπτές κατακόρυφες λωρίδες και οι δυνάμεις που ασκούνται στη βάση κάθε λωρίδας υπολογίζονται από τις εξισώσεις ισορροπίας της κάθε λωρίδας ξεχωριστά.

Επισημαίνεται πως η επίλυση είναι προσεγγιστική γιατί στους αγνώστους προστίθενται οι τάσεις που ασκούνται στην κατακόρυφη παρειά των λωρίδων καθώς και τα σημεία εφαρμογής της συνισταμένης τους (Σχήμα 2.4).





Σχήμα 2.4: Διάκριση του ολισθαίνοντος τμήματος σε λωρίδες και πλήρες σύστημα δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε λωρίδα (Μπουκοβάλας, 2006)

Επεξήγηση δυνάμεων που ασκούνται στην κάθε λωρίδα, (Σχήμα 2.4):

$W_i$ =Συνολικό βάρος λωρίδας

$U$ =Δυνάμεις λόγω πίεσης πόρων

$\bar{N}_i$ =Ενεργός ορθή δύναμη στη βάση της λωρίδας

$T_i$ =Αντίσταση τριβής στη βάση της λωρίδας

$\bar{E}_i, \bar{E}_{i+1}$ =Ορθές ενεργές δυνάμεις στο αριστερό και δεξί όριο της λωρίδας

$X_i, X_{i+1}$ =Αντίσταση τριβής στο αριστερό και δεξί όριο της λωρίδας

Επισημαίνεται πως σε όλες τις διαφορετικές εκδοχές της μεθόδου των λωρίδων, η ισορροπία του πρανούς εξετάζεται κατά την κατάσταση λειτουργίας και όχι κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας. Γι' αυτό το λόγο η αντίσταση τριβής  $T_i$ , που ασκείται στην βάση της κάθε λωρίδας, δεν είναι η οριακή αντίσταση τριβής  $T_{i,ULT}$ , αλλά μικρότερη και ισχύει:

$$T_i = \frac{T_{i,ULT}}{FS} \quad (2.2)$$

Όπου FS είναι ο υφιστάμενος συντελεστής ασφαλείας έναντι της αστοχίας του πρανούς.

Για αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης, οι οποίες θα πρέπει να θεωρούνται κατά την ανάλυση της βραχυχρόνιας ευστάθειας πρανών σε κορεσμένα συνεκτικά εδάφη, η διατμητική αντοχή του εδάφους, εκφράζεται από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή



$S_u$ , ενώ παράλληλα θεωρείται ότι η γωνία εσωτερικής τριβής είναι μηδενική και οι υπολογισμοί βασίζονται στις ολικές ορθές τάσεις. Επομένως ισχύει:

$$T_{i,ULT} = S_{u,i} \cdot \Delta l_i \quad (2.3)$$

Όπου  $\Delta l_i$  είναι το μήκος της βάσης της κάθε λωρίδας.

Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση των **στραγγισμένων συνθηκών φόρτισης**, η διατμητική αντοχή του εδάφους εκφράζεται από την συνοχή ( $c'$ ) και την γωνία εσωτερικής τριβής ( $\phi'$ ) του εδάφους, ενώ οι υπολογισμοί βασίζονται στις ενεργές ορθές τάσεις. Επομένως η οριακή αντίσταση τριβής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

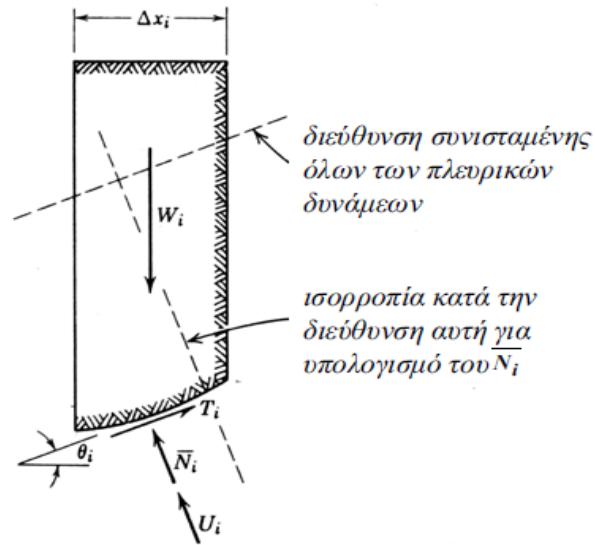
$$T_{i,ULT} = c'_i \cdot \Delta l_i + \bar{N}_i \cdot \tan \phi'_i = c'_i \cdot \Delta l_i + (N_i - U_i) \cdot \tan \phi'_i \quad (2.4)$$

Όπου  $N_i$  και  $U_i$ , αποτελούν τις συνισταμένες των ολικών ορθών τάσεων και των υδροστατικών πιέσεων που ασκούνται στην βάση της κάθε λωρίδας.

### 2.3.2.1 ΣΟΥΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ Η' ΜΕΘΟΔΟΣ FELLENIUS

Η μέθοδος αυτή είναι η παλιότερη. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι πως δεν λαμβάνει υπόψη της όλες τις δυνάμεις που επενεργούν σε κάθε λωρίδα. Παραλείπει τις διατμητικές και τις ορθές τάσεις που ασκούνται στις πλευρές της λωρίδας. Η παραδοχή αυτή οδηγεί σε μια υποεκτίμηση του συντελεστή ασφάλειας κατά 10-15% ενώ στην περίπτωση των απότομων πρανών με μεγάλη γωνία εσωτερικής τριβής, η υποεκτίμηση αυτή μπορεί να πλησιάζει το 60% (Στειακάκης, 2010 από Hunt, 1986).

Η συνισταμένη των πλευρικών δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε λωρίδα έχει διεύθυνση παράλληλη προς την βάση της λωρίδας. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται εύκολα η ορθή δύναμη στη βάση της λωρίδας  $N_i$ , από ισορροπία δυνάμεων που ασκούνται κάθετα προς την βάση της λωρίδας και ακολούθως η διατμητική δύναμη  $T_i$ , από τις σχέσεις που ακολουθούν. Ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται από την ισορροπία ροπών του ολισθαίνοντος τμήματος. Η ισορροπία των ροπών λαμβάνεται ως προς το κέντρο της περιστροφής.



Σχήμα 2.5: Παραδοχές υπολογισμού των δυνάμεων με την μέθοδο των λωρίδων (Μπουκοβάλας, 2006)

Πιο συγκεκριμένα για μια τυχούσα λωρίδα  $i$ , η ισορροπία των δυνάμεων ως προς την κάθετη προς την βάση διεύθυνση δίνει:

$$\bar{N}_i = W_i \cdot \cos\theta_i - U_i \quad (2.5)$$

Και επομένως σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.2) και (2.4) η αντίστοιχη διατμητική δύναμη :

$$T_i = \frac{T_{i,ULT}}{FS} = \frac{c'_i \cdot \Delta l_i + \bar{N}_i \cdot \tan\phi'_i}{FS} \quad (2.6)$$

Επομένως η εξίσωση του συντελεστή ασφάλειας παίρνει την μορφή:

$$FS = \frac{\sum_1^n [c'_i \cdot \Delta l_i + \tan\phi'_i \cdot (W_i \cdot \cos\theta_i - u_i \cdot \Delta l_i)]}{\sum_1^n W_i \cdot \sin\theta_i} \quad (2.7)$$

### 2.3.2.2 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ BISHOP

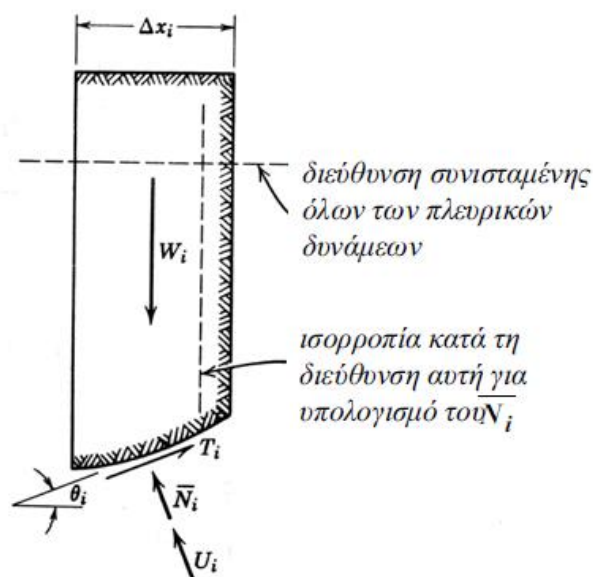
Αποτελεί την απλούστευση της αρχικής πρότασης του Bishop. Είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος και θεωρεί ότι **οι εφαπτομενικές δυνάμεις στις πλευρές των λωρίδων είναι αρκετά μικρές και μπορούν να παραληφθούν** (Στειακάκης, 2010).

Η συνισταμένη των πλευρικών δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε λωρίδα έχει οριζόντια διεύθυνση. Στην περίπτωση αυτή η ορθή δύναμη στη βάση της λωρίδας  $N_i$  υπολογίζεται από ισορροπία των κατακόρυφων δυνάμεων που ασκούνται στην λωρίδα, και ακολούθως η διατμητική δύναμη  $T_i$  υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις.

Τέλος, ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται από την ισορροπία ροπών του ολισθαίνοντος πρίσματος, λαμβανομένου ως ενιαίου στερεού (Μπουκοβάλας, 2006).

Η μέθοδος Bishop παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με την Σουηδική μέθοδο που παρουσιάστηκε προηγουμένως αλλά έχει και δύο βασικές διαφορές:

- Η παραδοχή που γίνεται για τις πλευρικές δυνάμεις είναι πλησιέστερα στην πραγματικότητα, γιατί οδηγεί σε λύσεις που οδηγούν σε κάποιες θεμελιώδεις γεωτεχνικές συνθήκες.
- Η εξίσωση που δίνει τον συντελεστή ασφάλειας είναι μη-γραμμική, γιατί ο συντελεστής βρίσκεται και στα δύο μέλη. Έτσι η επίλυση γίνεται επαναληπτικά και απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο.



Σχήμα 2.6: Παραδοχές υπολογισμού δυνάμεων στην μέθοδο Bishop (Μπουκοβάλας, 2006)

Ο αλγόριθμος επίλυσης για την απλοποιημένη μέθοδο Bishop, διαμορφώνεται ως ακολούθως. Για μια τυχαία λωρίδα  $i$ , η ισορροπία δυνάμεων ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση δίνει:

$$\bar{N}_i = \frac{W_i}{\cos \theta_i} - U_i - \frac{T_{i,ULT}}{FS} \cdot \tan \theta_i \quad (2.8)$$

Και επομένως η αντίστοιχη διατμητική δύναμη, από τις σχέσεις (2.2) και (2.4) διαμορφώνεται ως εξής :

$$T_i = \frac{T_{i,ULT}}{FS} = \frac{c'_i \cdot \Delta l_i + \bar{N}_i \cdot \tan \phi'_i}{FS} \quad (2.9)$$

Και ο συντελεστής ασφάλειας διαμορφώνεται ακολούθως:

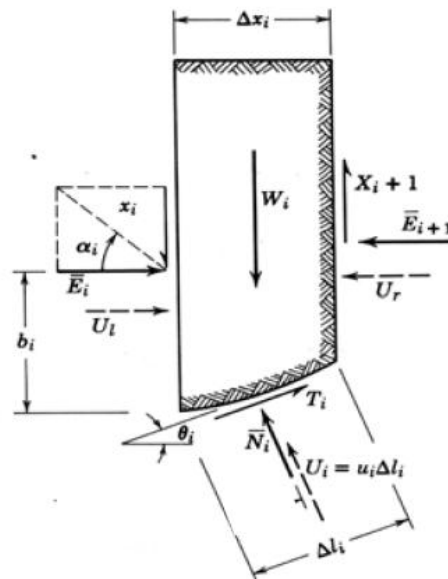
$$FS = \frac{1}{\sum_1^n W_i \cdot \sin \theta_i} \cdot \frac{\sum_1^n [c'_i \cdot \Delta x_i + \tan \phi'_i \cdot (W_i - u_i \cdot \Delta x_i)] \cdot \sec \theta_i}{1 + \frac{\tan \theta_i \cdot \tan \phi'_i}{FS}} \quad (2.10)$$

### 2.3.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ JANBU

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε πολύ αργότερα από τις δύο προηγούμενες, το 1973 περίπου, από τον καθηγητή του πανεπιστημίου του Trondheim της Νορβηγίας, Nilmar Janbu. Τότε διαπιστώθηκε ότι οι μέθοδοι για κυκλικές επιφάνειες δεν επαρκούν στην περίπτωση κατολισθήσεων μεγάλου μήκους (Μπουκοβάλας, 2006).

Οι δύο βασικές παραδοχές της μεθόδου αυτής είναι :

- Οι πλευρικές οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα είναι ίσες.
- Κατά την υφιστάμενη κατάσταση του πρανούς ικανοποιείται η ισορροπία των οριζόντιων δυνάμεων που ασκούνται στο εξεταζόμενο πρίσμα αστοχίας.



Σχήμα 2.7: Παραδοχές υπολογισμού δυνάμεων στην μέθοδο Janbu (Μπουκοβάλας, 2006)

Η ανάλυση των δυνάμεων διαμορφώνεται ακολούθως:

- ✓ Η ισορροπία των οριζόντιων δυνάμεων που ασκούνται στην εκάστοτε λωρίδα:

$$T_i \cdot \cos \theta_i = (\bar{N}_i + U_i) \cdot \sin \theta_i \quad \text{ή} \quad (\bar{N}_i + U_i) = \frac{T_i}{\tan \theta_i} \quad (2.11)$$

- ✓ Η ισορροπία της λωρίδας στην κατακόρυφη διεύθυνση:

$$W_i + (X_i - X_{i+1}) = T_i \cdot \sin\theta_i + (\bar{N}_i + U_i) \cdot \cos\theta_i \quad (2.12)$$

- ✓ Συνολική ισορροπία δυνάμεων στην οριζόντια διεύθυνση:

$$\sum_1^n T_i \cdot \cos\theta_i = \sum_1^n (\bar{N}_i + U_i) \cdot \sin\theta_i \quad (2.13)$$

Και δεδομένης της σχέσης (2.2) προκύπτει:

$$FS = \frac{\sum_1^n T_{i,ULT} \cdot \cos\theta_i}{\sum_1^n (W_i + (X_i - X_{i+1})) \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\theta_i} \quad (2.14)$$

Αντικαθιστώντας στην ανωτέρω σχέση για τον FS την τιμή του  $T_{i,ULT}$  από την σχέση (2.4) και την τιμή του  $\bar{N}_i$  από την σχέση (2.5), λαμβάνουμε:

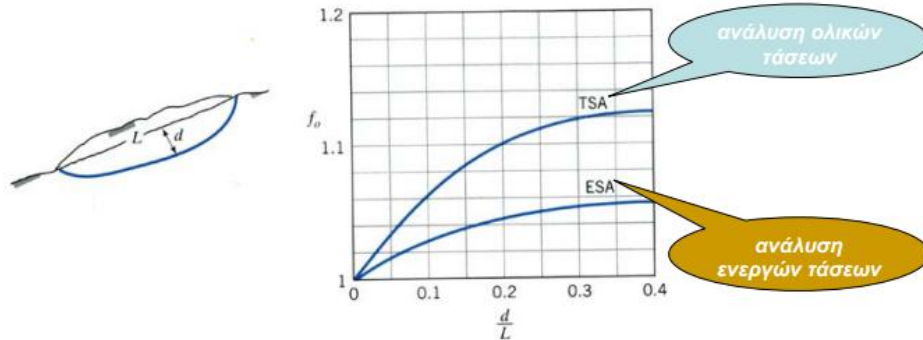
$$FS = \frac{\sum_1^n c'_i \cdot \Delta x_i + \sum_1^n [W_i + (X_i - X_{i+1})] \cdot \cos\theta_i - \sum_1^n u_i \cdot \Delta x_i \cdot \tan\phi'_i}{\sum_1^n [W_i + (X_i - X_{i+1})] \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\theta_i} \quad (2.15)$$

Στο σημείο αυτό γίνεται η τρίτη και τελευταία παραδοχή της μεθόδου Janbu, σύμφωνα με την οποία:

- c) Ο άγνωστος όρος  $(X_i - X_{i+1})$  απαλείφεται από την παραπάνω σχέση (2.15) και αντικαθίσταται από ένα διορθωτικό συντελεστή  $f_0$ :

$$FS = f_0 \cdot \frac{\sum_1^n c'_i \cdot \Delta x_i + \sum_1^n W_i \cdot \cos\theta_i - \sum_1^n u_i \cdot \Delta x_i \cdot \tan\phi'_i}{\sum_1^n W_i \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\theta_i} \quad (2.16)$$

Ο διορθωτικός συντελεστής  $f_o$  υπολογίζεται από το σχήμα 2.8 συναρτήσει της γεωμετρίας της επιφάνειας αστοχίας και ανάλογα προς την μεθοδολογία ανάλυσης (ολικών ή ενεργών τάσεων).



Σχήμα 2.8: Διορθωτικός συντελεστής για τον υπολογισμό του FS με την μέθοδο Janbu (Μπουκοβάλας, 2006)

#### 2.3.2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ MORGENSTERN-PRICE

Η σχέση που συνδέει τις διατμητικές με τις ορθές συνιστώσες στην μέθοδο Morgenstern-Price είναι η ακόλουθη:

$$\frac{T}{E} = \lambda \cdot f(x) \quad (2.17)$$

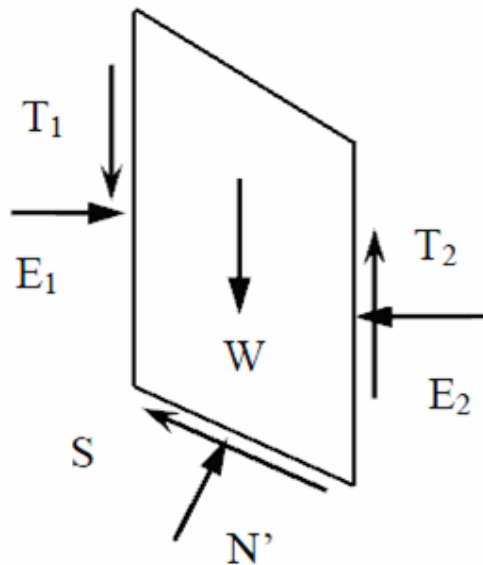
Όπου:

T: διατμητική συνιστώσα

E: ορθή συνιστώσα

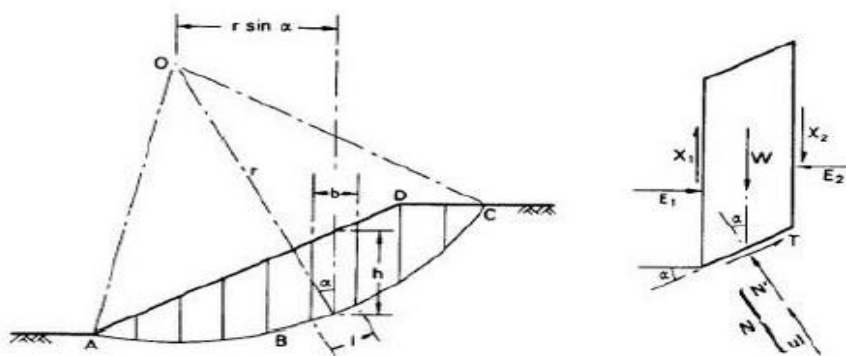
$\lambda$ : σταθερά

$f(x)$ : συνάρτηση δυνάμεων που δρουν σε κάθε λωρίδα



Σχήμα 2.9: Παραδοχές υπολογισμού δυνάμεων στην μέθοδο Morgenstern-Price

Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη την ισορροπία δυνάμεων και ροπών. Η κλίση ( $\delta$ ) των δυνάμεων μεταξύ των τομών μεταβάλλεται.



Σχήμα 2.10: Δυνάμεις που δρουν σε κάθε λωρίδα

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 της κάθε λωρίδας και  $h$  είναι το ύψος κάθε λωρίδας.
- Η διατμητική δύναμη, παράλληλη στην βάση κάθε λωρίδας,  $S = W \sin \alpha$ .
- Η ολική κάθετη δύναμη στην βάση,  $N = \sigma l$ , 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  $N'=\sigma l$ , και την δύναμη του νερού  $U=ul$ , όπου  $u$  είναι η πίεση πόρων στο κέντρο της βάσης της λαορίδας.
- Η αντίσταση του εδάφους που δημιουργεί διατμητική δύναμη,  $T=\tau ml$ .
- Οι πλευρικές δυνάμεις ως ολικές κάθετες  $E1$  και  $E2$  και ως εφαπτόμενες διατμητικές  $X1$  και  $X2$ .



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### 3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΟΡΙΑΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

Η ανάλυση της ευστάθειας με οριακή ισορροπία χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες στον σχεδιασμό ευστάθειας έργων στην γεωτεχνική μηχανική. Η ιδέα του διαχωρισμού σε λωρίδες του τμήματος του πρανούς οριζόμενο από ένα κυκλικό τόξο (μία υποτιθέμενη επιφάνεια ολίσθησης) ξεκίνησε στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Το 1916 ο Petterson παρουσίασε την ευστάθεια πρανών του ορυχείου του Stigberg στο Gothenberg της Σουηδίας, όπου η επιφάνεια ολίσθησης θεωρήθηκε κυκλική και η ολισθαίνουσα μάζα διαιρέθηκε σε λωρίδες. Μέσα στις επόμενες δεκαετίες ο Fellenius εισήγαγε την Σουηδική Μέθοδο (1936) και ακολούθησαν οι Janbu (1954) και Bishop (1955). Η ανάπτυξη της τεχνολογίας, με την έλευση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, στα τέλη της δεκαετίας του 1960, κατέστησε ευκολότερη την ανάλυση ευστάθειας πρανών με πιο ακριβείς και αυστηρούς μαθηματικούς υπολογισμούς (Krahn, 2003 από Morgenstern and Price, 1965).

Το λογισμικό SLOPE/W είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί την ανάλυση οριακής ισορροπίας για να υπολογίσει τον συντελεστή ασφάλειας εδαφικών και βραχωδών πρανών.

### 3.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΤΟΥ ΟΡΥΧΕΙΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

Αρχικά δόθηκε χάρτης σε ψηφιακή μορφή (AutoCAD) της περιοχής ενδιαφέροντος. Στην συνέχεια επιλέχθηκε η περιοχή που θα μελετηθεί, ειδικότερα, μέσα στο Ορυχείο. Σχεδιάστηκε μια ευθεία εγκάρσια στα δυτικά πρανή με συντεταγμένες αρχής (298.684 m, 4.499.383 m) και πέρατος (299.684 m, 4.499.619 m). Από τα σημεία τομής της ευθείας με τα ανάντη και κατάντη των βαθμίδων προέκυψε το ανάγλυφο της τομής. Εισήχθησαν οι συντεταγμένες των γεωτρήσεων στην κάτοψη του χάρτη και προβλήθηκαν στην ευθεία που διέρχεται εγκάρσια στα δυτικά πρανή. Με βάση την λιθοστρωματογραφία κάθε γεώτρησης προέκυψε η λιθοστρωματογραφία της τομής. Η τομή έχει διεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ.

Οι συντεταγμένες των γεωτρήσεων που απεικονίζονται στην τομή παρατίθενται στον Πίνακα 3.1:

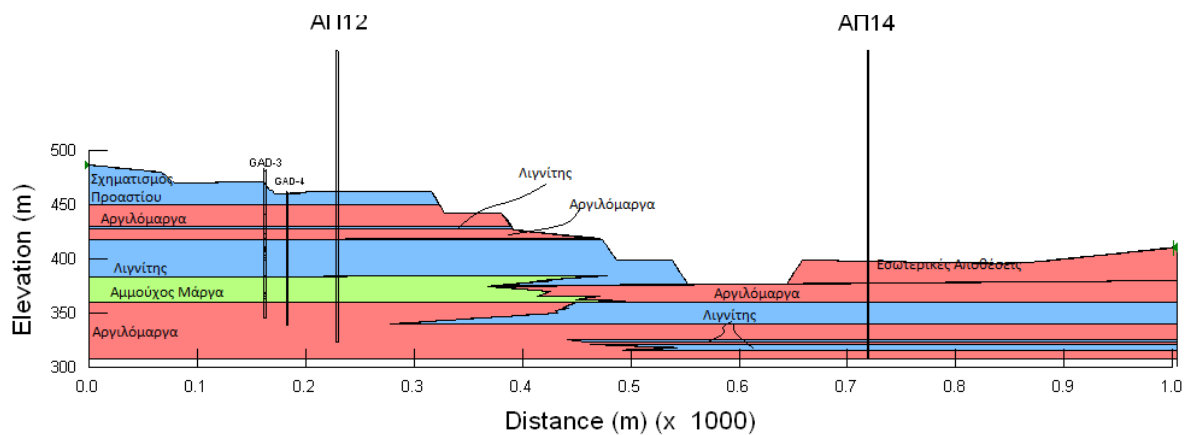
*Πίνακας 3.1: Συντεταγμένες γεωτρήσεων*

Συντεταγμένες	X (m)	Y (m)
GAD-3	298.846,83	4.499.668,61
GAD-4	298.866,01	4.499.671,41
ΑΠ 12	298.912,00	4.499.303,00
ΑΠ 14	299.402,00	4.499.803,00



*Σχήμα 3.1: Προβολή της υπό εξέταση τομής-εγκάρσια στα πρηνή (Google Maps)*

Με βάση την ήδη σχεδιασμένη τομή στο AutoCAD έγινε σχεδιασμός και ψηφιοποίηση της αντίστοιχης τομής στο SLOPE/W (βλέπε Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Τελική μορφή τομής, SLOPE/W

Στην συνέχεια ορίστηκαν, με βάση εκτενή βιβλιογραφική αναζήτηση που πραγματοποιήθηκε, οι γεωτεχνικές παράμετροι που θα ήταν απαραίτητες για την εφαρμογή του προγράμματος. Αυτές είναι το μοναδιαίο βάρος, η γωνία εσωτερικής τριβής αλλά και η συνοχή του κάθε σχηματισμού της τομής. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή τους:

- υγρό φαινόμενο βάρος,  $\gamma_b$ : χρησιμοποιείται στην περίπτωση που το έδαφος έχει ένα ποσοστό υγρασίας.
- κορεσμένο φαινόμενο βάρος,  $\gamma_{sat}$ : αναφέρεται σε συνθήκες πλήρους κορεσμού του γεωλογικού σχηματισμού (τα κενά μεταξύ των εδαφικών κόκκων είναι γεμάτα με νερό).
- Συνοχή ( $c$ ): Είναι συνιστώσα της διατμητικής αντοχής που οφείλεται στις ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των επιφανειών των εδαφικών κόκκων.
- Γωνία εσωτερικής τριβής ( $\phi$ ): Αποτελεί συνιστώσα της διατμητικής αντοχής που οφείλεται στην τριβή που αναπτύσσεται στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων και στην αλληλο-εμπλοκή τους, που οφείλεται στο σχήμα τους.

Στην περίπτωση κορεσμένου εδάφους του οποίου επιτρέπεται η στράγγιση, κατά την επιβολή ενός φορτίου στην επιφάνειά του, η τάση που αναπτύσσεται φέρεται αρχικά, κατά ένα ποσοστό από το νερό των πόρων και καθώς η στράγγιση εξελίσσεται, το όλο φορτίο μεταφέρεται σταδιακά στους εδαφικούς κόκκους με αποτέλεσμα την αύξηση

των ενεργών τάσεων. Το μέγεθος της ενεργής αναπτυσσόμενης τάσης είναι ίσο με την ολική ορθή τάση μείον την πίεση του νερού των πόρων.

Η διατμητική αντοχή του εδάφους σε συνθήκες ενεργών τάσεων, δίδεται με βάση το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb:

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

όπου:

$c'$  και  $\varphi'$  = οι παράμετροι του εδάφους που αναφέρονται στις ενεργές τάσεις

$\sigma'$  = η ενεργή τάση που ασκείται κάθετα στο θεωρούμενο επίπεδο διάτμησης

$\sigma$  = η ολική ορθή τάση

$u$  = η πίεση του νερού των πόρων

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2:

*Πίνακας 3.2: Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν*

Γεωλογικός Σχηματισμός	$\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\varphi'$ (deg)	$c'$ (kPa)
Προαστίου (Κροκάλες-Άμμοι)	17.5	19	32	50
Αργιλόμαργα	18	20	24-34	100-150
Λιγνίτης	12	14	24-35	50-100
Αμμούχος Μάργα	19	21	27-37	75-125
Εσωτερικές Αποθέσεις	18	20	29	100

Σ' αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως εξαιτίας αβεβαιότητας που υπήρχε για τις τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων της αργιλόμαργας, του λιγνίτη και της αμμούχου μάργας ελήφθησαν εύρη τιμών και πραγματοποιήθηκε πιθανοτική ανάλυση για την πιο αξιόπιστη επίλυση. Χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες, οι ελάχιστες και οι μέσες τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

### ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

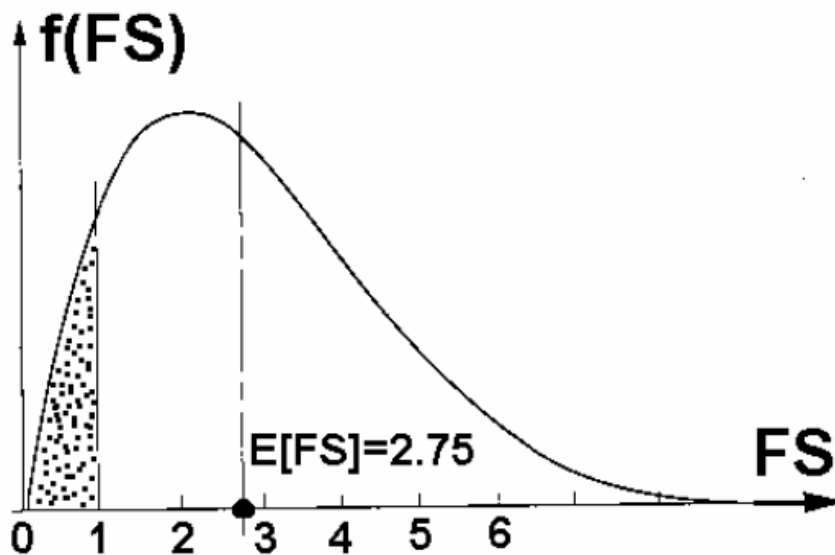
Κατά τον σχεδιασμό ενός γεωτεχνικού έργου υπολογίζεται ένας συντελεστής ασφάλειας σύμφωνα με τον οποίο το έργο κρίνεται ασφαλές ή μη ασφαλές. Στην πραγματικότητα όμως ο υπολογιζόμενος συντελεστής ασφάλειας δεν αποδίδει τον πραγματικό κίνδυνο αστοχίας του έργου, λόγω της αβεβαιότητας για την πραγματική τιμή παραμέτρων όπως η συνοχή ή η γωνία εσωτερικής τριβής (Krahn, 2004).

Επομένως, για την καλύτερη γνώση του κινδύνου αστοχίας χρησιμοποιείται η πιθανοτική ανάλυση, όπως έγινε και στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Στην γεωτεχνική έρευνα για να υπολογιστεί η πιθανότητα αστοχίας χρησιμοποιούνται στοχαστικές μέθοδοι προσομοίωσης. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Monte Carlo. Συγκεκριμένα η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιείται για τις εξής ενέργειες (Προύντζος, 2013 από Καββαδά, 2010):

Αν είναι γνωστές οι κατανομές των παραμέτρων που επηρεάζουν το πρόβλημα (π.χ. γωνία εσωτερικής τριβής, συνοχή, μοναδιαίο βάρος κλπ) τότε

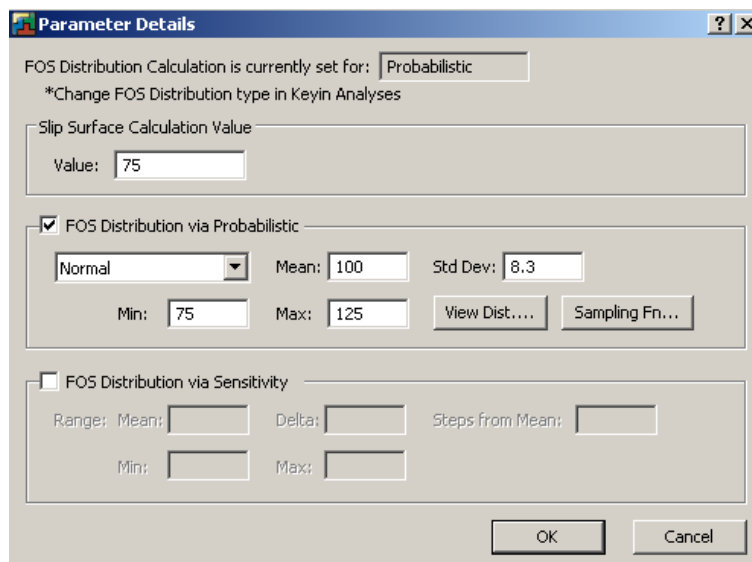
- Επιλέγονται τυχαίες τιμές των παραμέτρων με βάση τη στατιστική κατανομή τους.
- Υπολογίζεται η αντοχή και η καταπόνηση που αντιστοιχεί στις τιμές αυτές και υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας FS.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές, με διαφορετικές τιμές των παραμέτρων.
- Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η κατανομή του FS (ιστόγραμμα).
- Η πιθανότητα αστοχίας  $p_f$  υπολογίζεται από το εμβαδόν της κατανομής του FS.



Σχήμα 4.1: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του συντελεστή ασφάλειας και εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας PF (Καθβαδάς, 2010)

#### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η πιθανοτική ανάλυση γίνεται με την εντολή key in → Analysis settings → FDS distribution → probabilistic και επιλέγεται ο αριθμός των δοκιμών Monte Carlo (trials). Με αυτό τον τρόπο έχουν επιλεγεί η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής ως τυχαίες μεταβλητές.



Σχήμα 4.2: Επιλογή συνοχής της αμμούχου μάργας ως τυχαία μεταβλητή

Στην συνέχεια γίνεται εισαγωγή δεδομένων. Εισάγεται ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο τιμών συνοχής καθώς και γωνίας εσωτερικής τριβής (Min), (Max) καθώς και η μέση τιμή (Mean), και η τυπική απόκλιση (SD), των ορίων αυτών (Σχήμα 4.2).

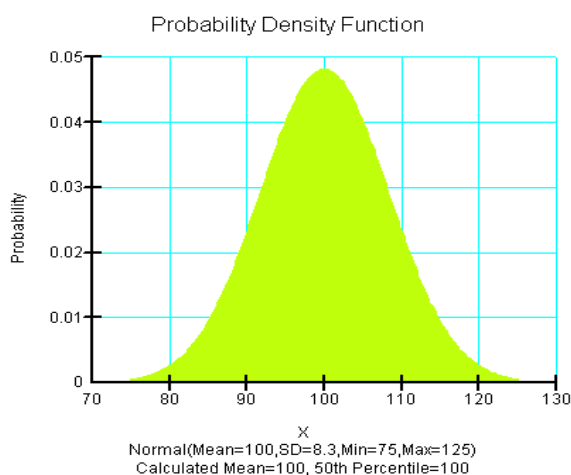
Λόγω έλλειψης βιβλιογραφικών αναφορών έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

- Θεωρείται ότι η μεταβολή των τιμών της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής ακολουθούν την κανονική κατανομή.
- Θεωρείται ότι το μοναδιαίο βάρος παραμένει σταθερό.

Για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα διαστήματα μεταβολής της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής, έγινε εισαγωγή δεδομένων «input», (Σχήμα 4.3) που οδήγησαν σε εξαγωγή αποτελεσμάτων «output», (Σχήμα 4.4)

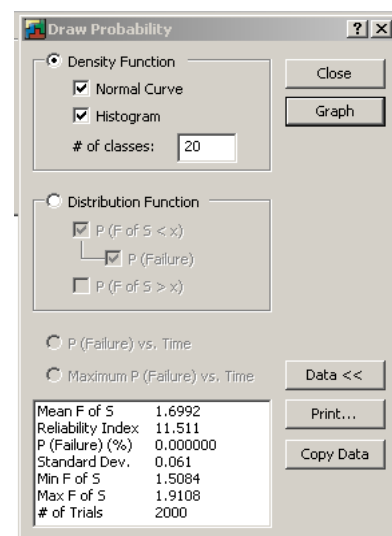
Για παράδειγμα:

Εισαγωγή δεδομένων για διάστημα μεταβολής της συνοχής (75-125 kPa):



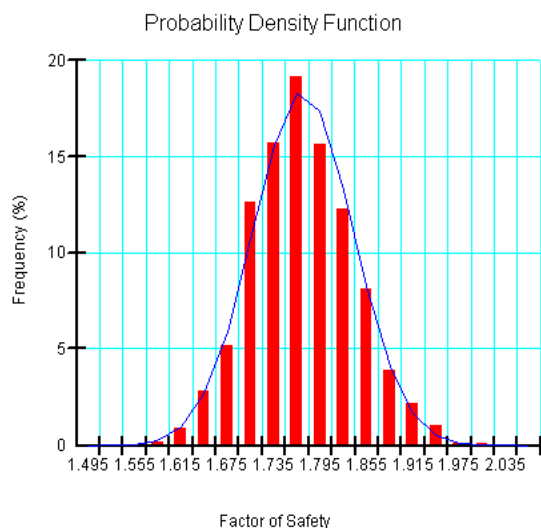
Σχήμα 4.3: Κατανομή των τιμών της συνοχής με βάση την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής

Εξαγωγή αποτελεσμάτων για διάστημα μεταβολής της συνοχής (75-125 kPa) και γραφική απεικόνιση:



Σχήμα 4.4: Εξαγωγή αποτελεσμάτων





Σχήμα 4.5: Ιστόγραμμα κατανομής τιμών των FS που υπολογίστηκαν

Στο Σχήμα 4.5 ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τους συντελεστές ασφάλειας που έχουν υπολογιστεί με την μέθοδο Monte Carlo. Η πιθανότητα αστοχίας  $p_f$  υπολογίζεται από το εμβαδό της κανονικής κατανομής που καταλαμβάνουν οι συντελεστές ασφάλειας που είναι μικρότεροι της μονάδας.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε για κάθε ένα από τα διαστήματα συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3.2.

#### 4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ (ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ)

Οι αναλύσεις οριακής ισορροπίας πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα SLOPE/W. Για την πραγματοποίηση των ελέγχων ευστάθειας χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι Bishop και Janbu.

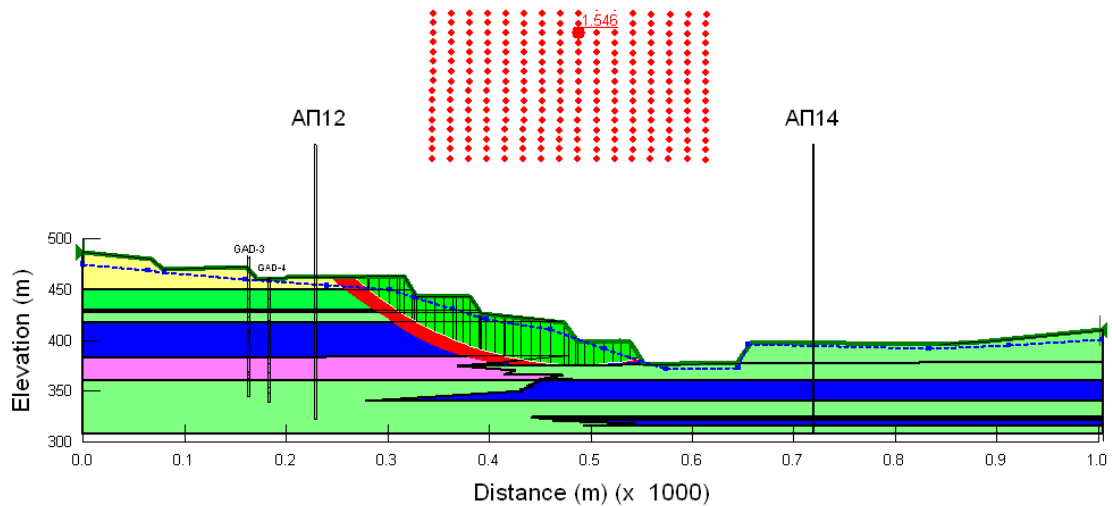
Στην διαδικασία αυτή ελήφθησαν υπόψη οι γεωτεχνικές παράμετροι που υπήρχαν βιβλιογραφικά, ο μηχανισμός ολίσθησης και τα γεωμετρικά δεδομένα των πρανών.

Εξαιτίας αβεβαιοτήτων για την στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα εντός των σχηματισμών, καθώς δεν υπήρχαν αντίστοιχες μετρήσεις πιεζομέτρων, έγιναν κάποιες παραδοχές.

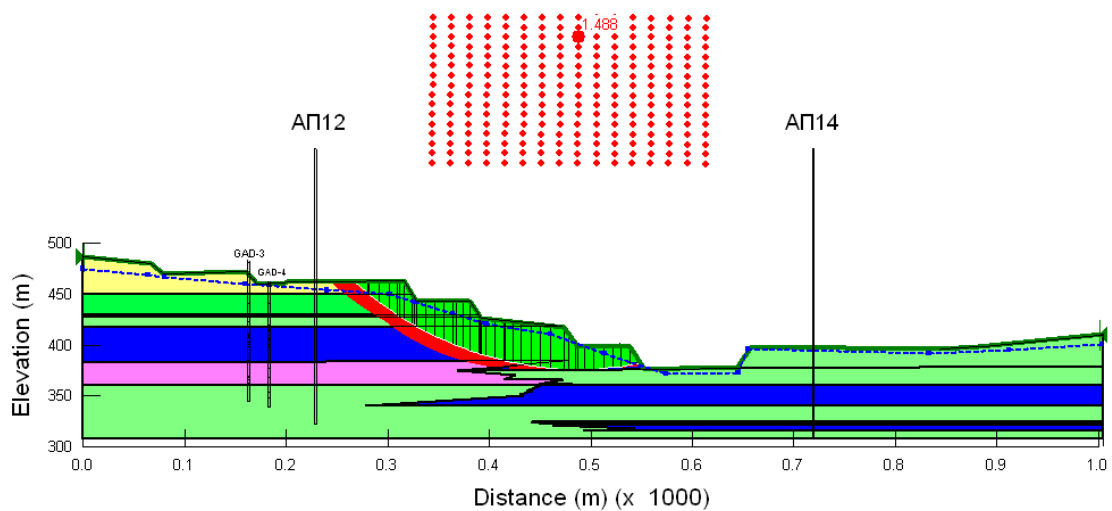
#### 4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ

Αρχικά έγινε εισαγωγή πιεζομετρικής καμπύλης που ακολουθούσε σχεδόν εφραπτομενικά το ανάγλυφο της τομής.

Η πιθανή κυκλική επιφάνεια αστοχίας στην περίπτωση εξέτασης της ευστάθειας του πρανούς με εισαγωγή πιεζομετρικής καμπύλης διαμορφώνεται με τις μεθόδους Bishop και Janbu ως ακολούθως:



Σχήμα 4.6: Αποτελέσματα κυκλικής αστοχίας και συντελεστή ασφάλειας με εισαγωγή πιεζομετρικής καμπύλης, μέθοδος Bishop



Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα κυκλικής αστοχίας και συντελεστή ασφάλειας με εισαγωγή πιεζομετρικής καμπύλης, μέθοδος Janbu

#### 4.1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΝΕΡΟΥ

Στην δεύτερη περίπτωση έγινε ανάλυση της ευστάθειας του πρανούς λαμβάνοντας υπόψη την πίεση πόρων του κάθε γεωλογικού σχηματισμού ξεχωριστά. Θεωρώντας γνωστά το μοναδιαίο βάρος του νερού και του κάθε γεωλογικού στρώματος, το βάθος στο οποίο εκτείνεται το κάθε γεωλογικό στρώμα και το ύψος νερού του κάθε σχηματισμού από την πιεζομετρική επιφάνεια υπολογίστηκαν οι ολικές τάσεις, στην συνέχεια η πίεση νερού των πόρων και τέλος ο συντελεστής πίεσης πόρων.

✓ Ολικές τάσεις:  $\sigma = \sum_{i=1}^n = \gamma_i \cdot h_i$

✓ Πίεση νερού πόρων (υπολογίζεται από εκεί που ξεκινά ο υδροφόρος):

$$u = \gamma_w \cdot z_w$$

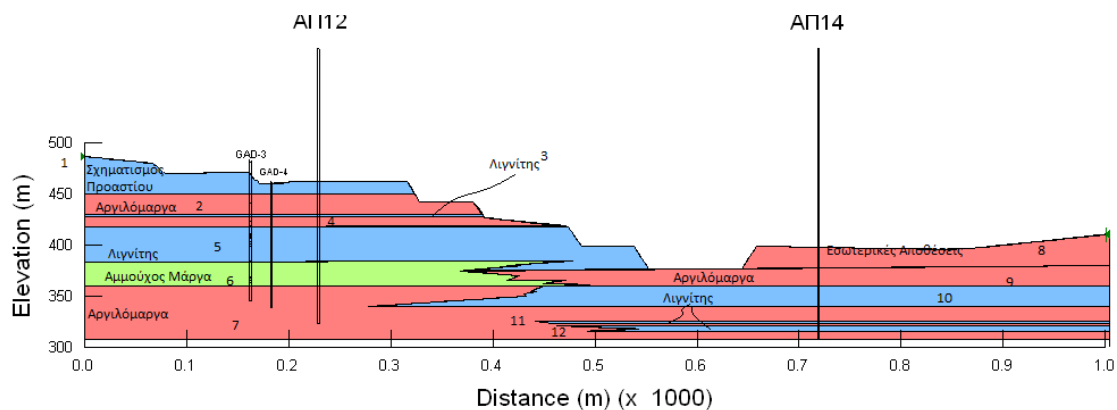
Ο συντελεστής πίεσης  $R_u$  εκφράζει τον λόγο της πίεσης του νερού των πόρων προς την κατακόρυφη ολική τάση του βάρους των υπερκείμενων στρωμάτων και δίνεται από την σχέση (Μαραγκός, 2009):

$$R_u = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma}$$

Επειδή μεταβάλλεται το ύψος νερού σε κάθε στρώμα ( $h_w$ ) υπολογίστηκαν διαφορετικοί συντελεστές πίεσης πόρων νερού. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1:

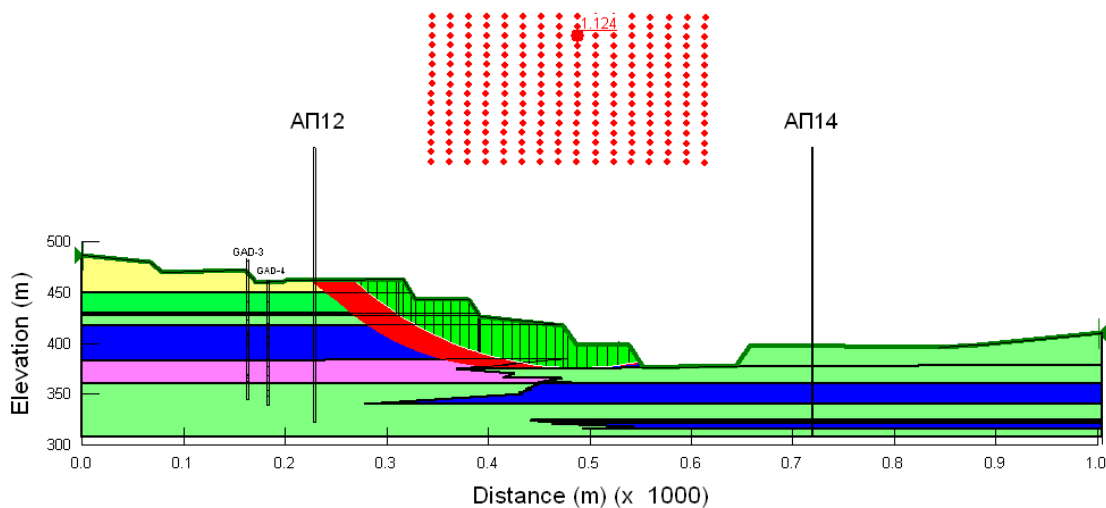
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα συντελεστών πίεσης πόρων νερού

A/A	Σχηματισμός	$R_u$
1	Προαστίου (Κροκάλες/Άμμοι)	0.1
2	Αργιλόμαργα	0.4
3	Λιγνίτης	0.6
4	Αργιλόμαργα	0.6
5	Λιγνίτης	0.7
6	Αμμούχος Μάργα	0.7
7	Αργιλόμαργα	0.7
8	Εσωτερικές Αποθέσεις (δεξιά)	0.4
9	Αργιλόμαργα (δεξιά)	0.4
10	Λιγνίτης 1 (δεξιά)	0.7
11	Λιγνίτης 2 (δεξιά)	0.8
12	Λιγνίτης 3 (δεξιά)	0.8

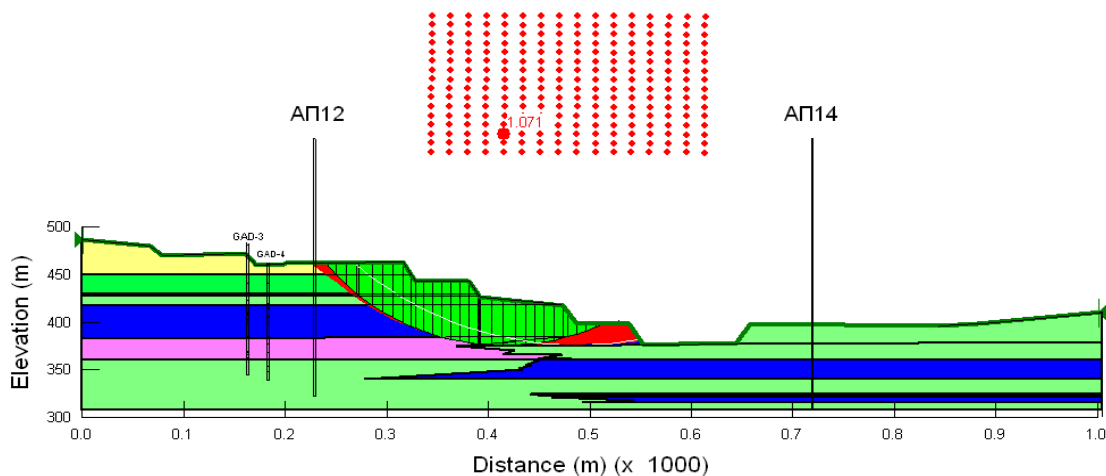


Σχήμα 4.8: Αντιστοιχία του συντελεστή πίεσης πόρων σε κάθε γεωλογικό στρώμα (Βλέπε Πίνακα 4.1)

Ο συντελεστής ασφάλειας στην περίπτωση εισαγωγής συντελεστή πίεσης πόρων σε κάθε στρώμα, καθώς και η επιφάνεια αστοχίας διαμορφώνεται ως εξής:



Σχήμα 4.9: Αποτέλεσμα του συντελεστή ασφάλειας και της κυκλικής επιφάνειας αστοχίας με την μέθοδο Bishop



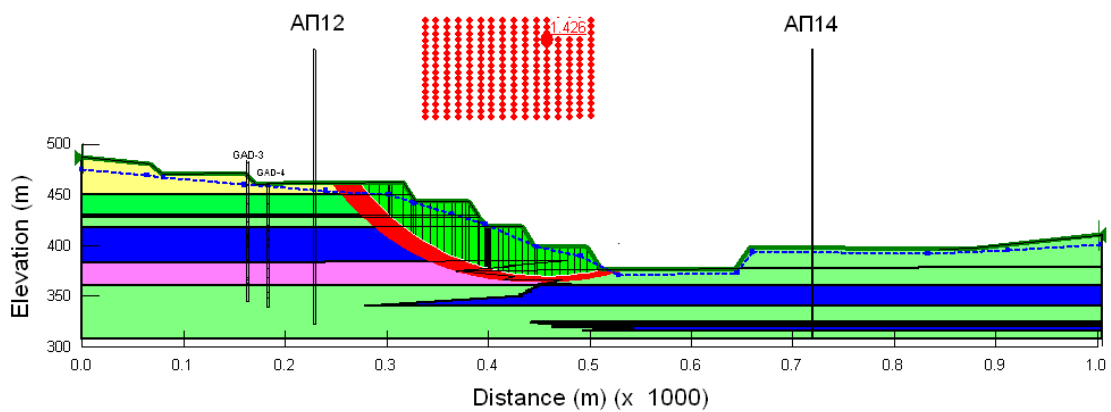
Σχήμα 4.10: Αποτελέσματα του συντελεστή ασφάλειας και της επιφάνειας αστοχίας με την μέθοδο Janbu

## 4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΡΟΟΔΟ ΤΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ

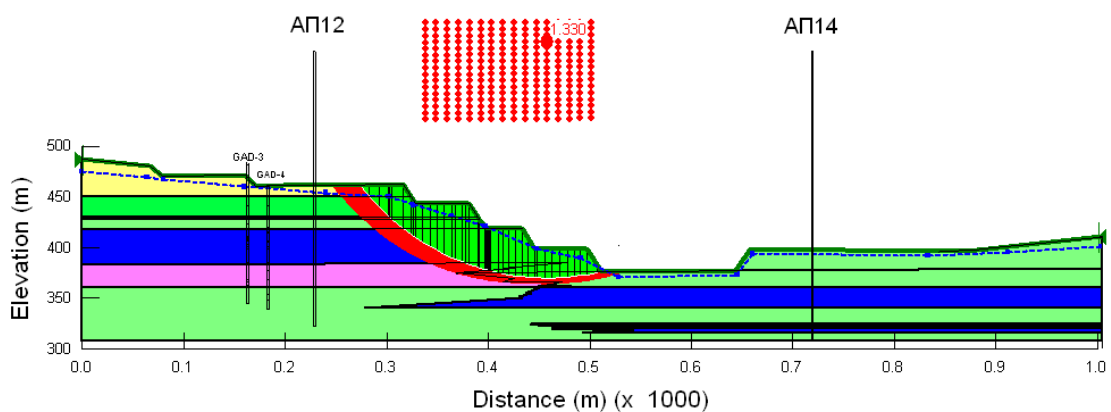
Στην συνέχεια εξετάστηκε το δεύτερο δυνητικό σενάριο στο οποίο μελετήθηκε πρανές που προκύπτει από την πρόοδο των εκσκαφών προς τα δυτικά. Η γεωμετρία αυτού του πρανούς είναι κατ' εκτίμηση και δεν βασίζεται σε στοιχεία εκμετάλλευσης. Στη συνέχεια εξετάζεται ο συντελεστής ασφάλειας για το πρανές αυτό.

### 4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ

Έγινε εισαγωγή πιεζομετρικής καμπύλης που ακολουθούσε το διαμορφωμένο ανάγλυφο. Τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφάλειας, έπειτα από επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 4.11: Αποτελέσματα του συντελεστή ασφάλειας με εισαγωγή πιεζομετρικής καμπύλης, μέθοδος Bishop

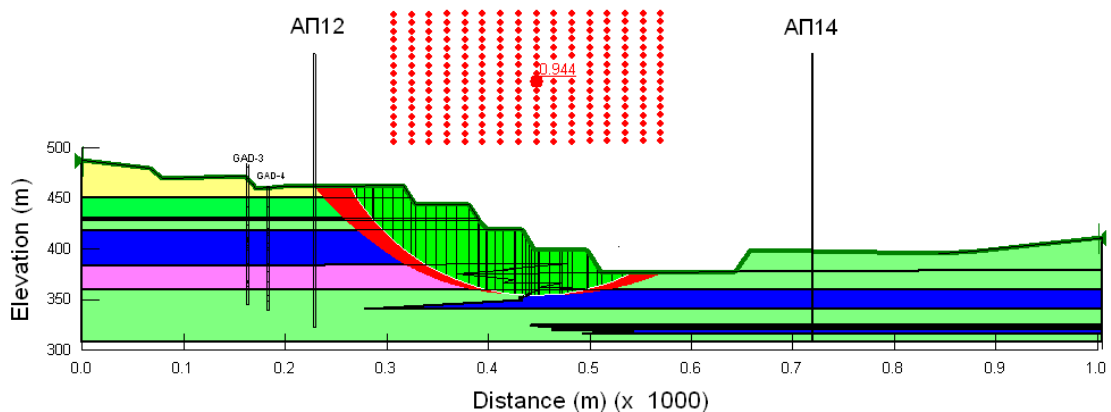


Σχήμα 4.12: Αποτελέσματα του συντελεστή ασφάλειας με εισαγωγή πιεζομετρικής καμπύλης, μέθοδος Janbu

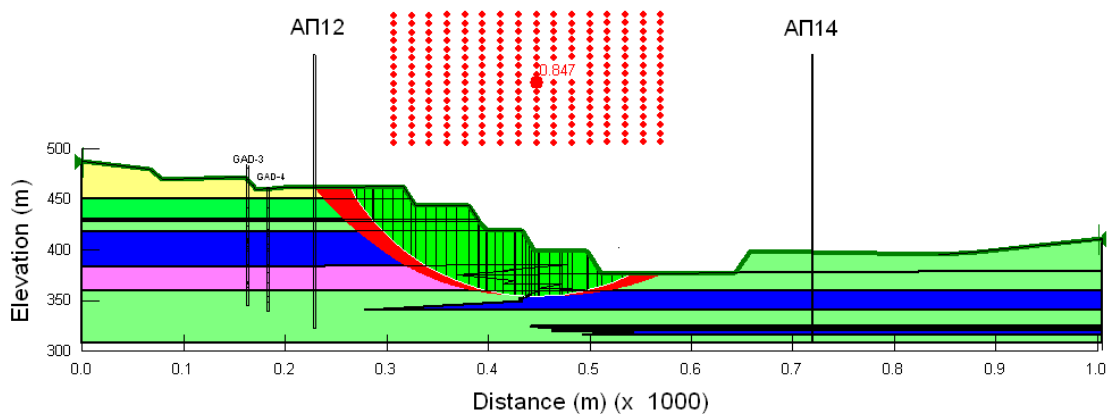
#### 4.2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΠΟΡΩΝ

Έπειτα έγινε εισαγωγή του συντελεστή πίεσης πόρων, όπως προαναφέρθηκε και στην προηγούμενη περίπτωση (Βλέπε Πίνακα 4.1).

Τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφάλειας για την μέθοδο Bishop και Janbu είναι αντίστοιχα:



Σχήμα 4.13: Αποτελέσματα συντελεστή ασφάλειας με εισαγωγή συντελεστή πίεσης πόρων, μέθοδος Bishop



Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα συντελεστή ασφάλειας με εισαγωγή συντελεστή πίεσης πόρων, μέθοδος Janbu

#### 4.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ακολουθούν οι Πίνακες 4.2 και 4.3 που παρουσιάζουν τους υπολογισμένους συντελεστές ασφάλειας για δύο σενάρια διαμόρφωσης βαθμίδων σε τυπική στρωματογραφία του ορυχείου. Οι πιέσεις πόρων διαμορφώθηκαν κατ' εκτίμηση.

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα πιθανοτικής ανάλυσης (Σενάριο 1)

a/a	Μέθοδοι Ανάλυσης	Mean FS	Min FS	Max FS	P (Failure) (%)
Piezometric Line	Bishop	1.77	1.57	2.00	0.00
	Janbu	1.70	1.51	1.91	0.00
Ru	Bishop	1.34	1.20	1.52	0.00
	Janbu	1.29	1.16	1.45	0.00

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα πιθανοτικής ανάλυσης (Σενάριο 2)

b/b	Μέθοδοι Ανάλυσης	Mean FS	Min FS	Max FS	P (Failure) (%)
Piezometric Line	Bishop	1.45	1.38	1.53	0.00
	Janbu	1.36	1.28	1.43	0.00
Ru	Bishop	0.97	0.93	1.01	σημαντική
	Janbu	0.87	0.84	0.91	σημαντική

Μετά από τις επιλύσεις ευστάθειας που αναπτύσσονται στις προηγούμενες ενότητες, οι συντελεστές ασφάλειας που υπολογίζονται από το πρόγραμμα Slope/W κατά την μέθοδο Bishop και την μέθοδο Janbu είναι μεγαλύτεροι της μονάδας και επομένως το πρανές θεωρείται ευσταθές. Επίσης η πιθανοτική ανάλυση με την μέθοδο Monte Carlo και για το εύρος τιμών παραμέτρων που αναφέρεται παραπάνω δίνει πολύ μικρή πιθανότητα αστοχίας (Πίνακας 4.2).

Κατά την πρόοδο των εκσκαφών και εξετάζοντας μια περίπτωση δυσμενούς ολικής κλίσης πρανούς φαίνεται ότι υπάρχει κάποια πιθανότητα αστοχίας σε συνθήκες που δημιουργούν πίεση πόρων μέσω εισαγωγής συντελεστή πίεσης του νερού των πόρων (Πίνακας 4.3).

Γενικώς, παρατηρείται διαφορά μεταξύ των τιμών του συντελεστή ασφάλειας, κατά την εισαγωγή της πίεσης πόρων με πιεζομετρική καμπύλη και με συντελεστή πίεσης πόρων νερού (Ru). Κατά την εισαγωγή πιεζομετρικής καμπύλης, θεωρείται πως η πίεση του νερού των πόρων αυξάνεται γραμμικά με το βάθος του γεωλογικού σχηματισμού και ακολουθείται η υδροστατική πίεση. Ο συντελεστής πίεσης του νερού των πόρων (Ru) υπολογίζει την πίεση πόρων ξεχωριστά για κάθε γεωλογικό στρώμα και η εκτίμηση της τιμής του που χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα έγινε κατ' εκτίμηση.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εξέταση της ευστάθειας των δυτικών πρανών της ανοικτής εκσκαφής του λιγνιτωρυχείου Αμυνταίου συνοψίζονται ως εξής:

- Εξετάζοντας την ευστάθεια των δυτικών πρανών του λιγνιτωρυχείου Αμυνταίου, με μεθόδους οριακής ισορροπίας (Bishop και Janbu) και βάσει των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψε συντελεστής ασφάλειας  $FS=1.3$  (ανάλυση Bishop), επιβεβαιώνοντας την ευστάθεια του πρανού με την υφιστάμενη γεωμετρία (μέσης κλίσης 1:2.5).
- Η ανάλυση ευαισθησίας του προβλήματος σε σχέση με την πίεση των πόρων του νερού έδειξε ότι η ευστάθεια επηρεάζεται από τις παραμέτρους υδροφορίας που χρησιμοποιούνται και επομένως είναι πολύ σημαντικό να υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα πίεσης πόρων.
- Η επίλυση της επιλεγμένης γεωτεχνικής τομής είναι επίσης ευαίσθητη στην στρωματογραφία καθώς και στις γεωτεχνικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για κάθε ορίζοντα.

Επιπλέον, καθώς αναπτύσσεται πίεση πόρων στους διάφορους στρωματογραφικούς ορίζοντες (π.χ. ένστρωση αργίλων, κλπ), διάφορη της υδροστατικής, κρίνεται σκόπιμο να γίνουν μετρήσεις πίεσης νερού των πόρων σε κάθε περατό σχηματισμό στην περιοχή μελέτης, γεγονός που θα βελτίωνε τον βαθμό αξιοπιστίας της ανάλυσης.

Επίσης προτείνεται να γίνουν επιλύσεις και σε άλλες γεωτεχνικές τομές ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά και άλλων περιοχών της ανοικτής εκσκαφής από πλευράς ευστάθειας.

## ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αγιουτάντης Ζ. (2002), Στοιχεία Γεωμηχανικής-Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα.
- Γαλετάκης Μ. (2013), Περιγραφή, επιλογή και υπολογισμός απόδοσης εξοπλισμού επιφανειακών εκμεταλλεύσεων, Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Γρηγοριάδου Α. (2014), Παραμετρική ανάλυση της ευστάθειας των πρανών εκμετάλλευσης του ορυχείου Αμυνταίου ως προς τους σχηματισμούς υποβάθρου, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Δημητρακόπουλος Δ. (2001), «Υδρογεωλογικές συνθήκες ορυχείου Αμυνταίου: προβλήματα κατά την εκμετάλλευση και αντιμετώπισή τους», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Καββαδάς Μ. (2010), Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα
- Καρράς Β. (1988), Ευστάθεια Πρανών στα Υπαίθρια Λιγνιτωρυχεία, Πρακτικά Πρώτου Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα 3-5 Φεβρουαρίου, 1988.
- Κούκης Γ., Σαμπατάκης Ν. (2002), Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Λεονάρδος Μ. (2004), «Μέθοδοι και διαδικασίες παρακολούθησης, εκτίμησης και βελτίωσης της ευστάθειας των πρανών των εκσκαφών των βαθέων ελληνικών λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μπουκοβάλας Γ. (2006), «Υπολογιστικές μέθοδοι γεωτεχνικής μηχανικής», Σημειώσεις Μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Νικολαΐδου Γ. (2014). Ανάλυση διαθεσιμότητας και απόδοσης του εξοπλισμού συνεχούς λειτουργίας στο Ορυχείο Μαυροπηγής του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Προυντζόπουλος Γ., Φορτσάκης Π., Μαρίνος Β., Μαρίνος Π. (2014), «Αξιολόγηση, ανάλυση και αποκατάσταση κατολίσθησης μεγάλου εύρους σε πρανή εξόρυξης λιγνιτωρυχείου εντός μαργαϊκών σχηματισμών», 7<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα, 5-7 Νοεμβρίου.
- Προύντζος Ν. (2013). Παραμετρική διερεύνηση επιχώματος οδοποιίας σε μαργαϊκούς σχηματισμούς Ν. Ηρακλείου, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης

- Ρούμπος Χρ., Παυλουδάκης Φρ. (2010), Μελέτη-Σχεδιασμός Εκμετάλλευσης και ανάπτυξης λιγνιτωρυχείων, Σημειώσεις Μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Στειακάκης Εμμ. (2003), «Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους. Έρευνα γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδφών στο λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου», Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Στειακάκης Εμμ. (2010), Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας-Εδαφομηχανικής, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Στειακάκης Εμμ., Αγιουτάντης Ζ. (2007), «Εκσκαφές μεγάλου βάθους με έμφαση στις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις γαιανθράκων: Κινητική συμπεριφορά και Γεωτεχνική διερεύνηση», Ορυκτός Πλούτος, Τόμος 142, Σελ.47-62.
- Τόλη Δ. (2011), «Υδρογεωλογική Μελέτη της Λεκάνης Αμυνταίου-Αναργύρων», Δ. Μακεδονία, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.

## ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barnes GE. (2000), Soil Mechanics: Principles and Practise, Palgrave MacMilan Ltd.
- Bromhead E. (1986), The stability of Slopes, Chapman & Hall, Glasgow.
- Craig R. (1992), Soil Mechanics, Chapman & Hall, London.
- Craig R., (2004) Soil Mechanics, Seventh Edition, Spon Press
- Krahn J. (2003), The 2001 R.M. Hardy Lecture: The Limits of limit equilibrium analyses. Published on the NRC Research Press Web site at <http://cgj.nrc.ca> on 21 May 2003.
- Krahn J., (2004), Stability Modeling with SLOPE/W-An engineering methodology, First Edition, Revision 1, August 2004
- Peck R.B., (1969), Deep excavations and tunneling in soft ground, Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. And Found.Engrg. Mexico, State of the Art, pp. 225-290.
- Peterson R. (1958), Rebound in the Bearpaw Shale, West-Em Canada.Bull. Geol. Soc. Amer. 69, pp. 1113-1123.
- Terzaghi K., Peck R. (1969), Soil Mechanics in Engineering Practise, New York.

## ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [www.dei.gr](http://www.dei.gr)
- [www.geo.auth.gr](http://www.geo.auth.gr)
- <https://www.google.gr/maps>
- <http://gis.ktimanet.gr/wms/ktbasemap/default.aspx>
- Λουπασάκης Κ., (2014), [www.legah.metal.ntua.gr](http://www.legah.metal.ntua.gr), Διαφάνειες Διαλέξεων.
- Μαραγκός Ν. (2009), Σημειώσεις Εδαφομηχανικής (Ηλεκτρονική μορφή).