



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Αριθμητική προσομοίωση των γεωτεχνικών συνθηκών ευστάθειας
των μεταλλευτικών τελμάτων των μεταλλείων της Κίρκης,
Αλεξανδρούπολη.

Γεώργιος – Αριστείδης Σκαρβέλας

Επιβλέπων καθηγητής: Κ. Λουπασάκης, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Αριθμητική προσομοίωση των γεωτεχνικών συνθηκών ευστάθειας
των μεταλλευτικών τελμάτων των μεταλλείων της Κίρκης,
Αλεξανδρούπολη.

Γεώργιος – Αριστείδης Σκαρβέλας

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Λουπασάκης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 18/03/2019

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής(Υπογραφή)

Τριανταφυλλίδης Σταύρος, Επίκουρος Καθηγητής(Υπογραφή)

Νομικός Πάυλος, Αναπληρωτής Καθηγητής(Υπογραφή)

Copyright © Γεώργιος Αριστείδης Σκαρβέλας, 2019.

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου αλλά και σε όλους εκείνους που με στηρίζουν εντός και εκτός σχολής...

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον κύριο Κωνσταντίνο Λουπασάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών για την συνεχή βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος στο οποίο ασχολήθηκα για να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Η βοήθειά του αποτέλεσε σημαντικό στοιχείο, για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στηρίζει με όλη της την αγάπη, καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου όπως επίσης και τους φίλους μου που εκτός από την υποστήριξή τους, με βοήθησαν και σε θέματα διόρθωσης των κειμένων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ΠΙΝΑΚΕΣ	9
ΕΙΚΟΝΕΣ.....	10
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	14
ABSTRACT.....	15
1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	16
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΚΙΡΚΗΣ	16
1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ	20
2 ΤΕΛΜΑΤΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ	28
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	28
2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	29
2.3 ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ.....	29
2.4 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΔΟΠΟΙΗΣΗ.....	32
2.5 ΕΠΙΠΛΕΥΣΗ.....	33
2.6 ΠΥΚΝΩΣΗ - ΔΙΗΘΗΣΗ	34
2.7 ΔΙΑΘΕΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	36
2.7.1 ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΚΟΙΛΑΔΑΣ (CROSS VALLEY IMPOUNDMENTS)	38
2.7.2 ΧΩΡΟΙ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕ “ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗ» ΑΝΑΧΩΜΑΤΑ (RING –DYKE IMPOUNDMENTS)	39
2.7.3 ΧΩΡΟΙ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΕΝΤΟΣ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ (IN-PIT IMPOUNDMENTS).....	40
2.8 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΛΜΑΤΩΝ.....	41
2.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	43
2.10 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	45
2.10.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΝΑΝΤΗ (UPSTREAM METHOD). 45	
2.10.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΑΝΤΗ (DOWNSTREAM METHOD)	46
2.10.3 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (CENTERLINE METHOD)	47
2.11 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΛΛΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	48
2.12 ΟΞΙΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ.....	48
2.12.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΞΙΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟ ΤΟΥ ΑΓΙΟΥ ΦΙΛΙΠΠΟΥ	50

2.12.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΕΙΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ	51
3	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	56
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	56
3.2	ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	56
3.3	ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ	57
3.4	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΩΝ – ΤΕΛΜΑΤΩΝ.....	58
3.4.1	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 1	58
3.4.2	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 2.....	58
3.4.3	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 3.....	59
3.4.4	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 4.....	61
3.4.5	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 5.....	62
3.4.6	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 6.....	64
3.4.7	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 7.....	66
3.4.8	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 8.....	66
3.5	ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ, ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	67
3.6	ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΤΕΛΜΑΤΩΝ	68
4	ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PLAXIS	70
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	70
4.2	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ–ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	70
4.3	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ PLAXIS.....	72
4.3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	72
4.3.2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ INPUT	74
4.3.3	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	76
4.3.4	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	80
4.3.5	ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	81
4.4	ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CALCULATIONS	82
4.5	ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑ OUTPUT	83
4.6	ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CURVES	84
5	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	85
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	85
5.2	ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	85
5.3	ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	87
5.4	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΟΜΑΔΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	93

5.5	ΦΑΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	95
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	98
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	98
6.2	1 ^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΟΜΑΔΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	98
6.3	2 ^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΟΜΑΔΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	103
6.4	3 ^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΟΜΑΔΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	110
6.5	4 ^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΟΜΑΔΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	112
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	115
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	122
	ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ	123
	ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ	123
	ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ	123

ΠΙΝΑΚΕΣ

2.1	Τύποι μηχανών κατάτμησης βάσει των διαφόρων σταδίων και φάσεων.....	30
2.2	Μηχανήματα Ταξινόμησης.....	30
5.1	Πίνακας υλικών αναχώματος (1).....	89
5.2	Πίνακας υλικών αναχώματος (2).....	89
5.3	Πίνακας υλικών αναχώματος (3).....	89
5.4	Πίνακας υλικών υποβάθρου (1).....	90
5.5	Πίνακας υλικών υποβάθρου (2).....	90
5.6	Πίνακας υλικών υποβάθρου (3).....	90
5.7	Πίνακας υλικών υποβάθρου (4).....	90
5.8	Πίνακας υλικών τελμάτων.....	91
5.9	Τελικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών των τελμάτων.....	92
6.1	Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων 1 ^{ης} παραμετρικής ομάδας αναλύσεων.....	96
6.2	Συγκεντρωτικός πίνακας ελαχίστων τιμών του συντελεστή ασφαλείας για κάθε τέλμα.....	103
6.3	Συντελεστής ασφαλείας των τελμάτων με την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.....	107
6.4	Συντελεστής ασφαλείας των τελμάτων με την μέγιστη δυνατή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.....	110
6.5	Συνολικές μετακινήσεις σε χιλιοστά, με την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.....	113
6.6	Συνολικές μετακινήσεις χωρίς την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.....	113
6.7	Μέγιστες μετακινήσεις εδάφους κατά την κατασκευή των τελμάτων.....	113

EΙΚΟΝΕΣ

1.1	Το μικρό χωριό της Κίρκης.....	17
1.2	Το ανακαινισμένο δημοτικό σχολείο.....	18
1.3	Η νέα εκκλησία του χωριού.....	19
1.4	Εικόνες του Κύριλλου που διακοσμούν την εκκλησία της Κίρκης σήμερα.....	19
1.5	Εικόνες του Κύριλλου που διακοσμούν την εκκλησία της Κίρκης σήμερα.....	19
1.6	Άποψη της Γερμανικής βίλας.....	21
1.7	Άποψη της Εγγλέζικης βίλας.....	21
1.8	Η είσοδος της κεντρικής στοάς της παλαιάς υπόγειας εξόρυξης.....	21
1.9	Το εσωτερικό της κεντρικής στοάς εκμετάλλευσης.....	22
1.10	Οι εγκαταστάσεις του εναέριου συστήματος μεταφοράς στο σημείο φόρτωσης.....	22
1.11	Οι εγκαταστάσεις του εναέριου συστήματος μεταφοράς στο σημείο φόρτωσης.....	22
1.12	Βαγονέτα του εναέριου σιδηρόδρομου, εν μέρει γκρεμισμένα στο έδαφος και τμήμα της διαδρομής.....	23
1.13	Βαγονέτα του εναέριου σιδηρόδρομου, εν μέρει γκρεμισμένα στο έδαφος και τμήμα της διαδρομής.....	23
1.14	Πανοραμική άποψη των αποθέσεων απορριμμάτων εξόρυξης, γύρω από την ανοικτή εκσκαφή του μεταλλείου Αγίου Φιλίππου.....	24
1.15	Διαβρωμένες αποθέσεις απορριμμάτων στην κεντρική πλατεία του μεταλλείου Αγίου Φιλίππου σε μορφή αυλάκων.....	24
1.16	Πανοραμική Άποψη της ανοιχτής εκσκαφής του μεταλλείου Αγίου φιλίππου.....	25
1.17	Απόψεις του ετοιμόρροπου εργοστασίου εμπλουτισμού και της γύρω περιοχής τη σημερινή εποχή.....	26
1.18	Απόψεις του ετοιμόρροπου εργοστασίου εμπλουτισμού και της γύρω περιοχής τη σημερινή εποχή.....	26
1.19	Απόψεις του ετοιμόρροπου εργοστασίου εμπλουτισμού και της γύρω περιοχής τη σημερινή εποχή.....	26
1.20	Απόψεις του ετοιμόρροπου εργοστασίου εμπλουτισμού και της γύρω περιοχής τη σημερινή εποχή.....	26
1.21	Απόψεις του ετοιμόρροπου εργοστασίου εμπλουτισμού και της γύρω περιοχής τη σημερινή εποχή.....	27
2.1	Θραυστήρας Σιαγόνων.....	30
2.2	Κωνικός Θραυστήρας.....	30
2.3	Σφαιρόμυλος.....	31
2.4	Θραυστήρας Κυλίνδρων (Οδοντωτός).....	31
2.5	Αρχή Λειτουργίας Υδροκυκλώνα.....	31

2.6	Ταινιόδρομος μεταφοράς.....	32
2.7	Σύστημα τροφοδοσίας του θραυστήρα.....	32
2.8	Σύστημα 20 κυβελών επίπλευσης στο ισόγειο/ 1 ^ο όροφο του εργοστασίου.....	33
2.9	Σύστημα 20 κυβελών επίπλευσης στο ισόγειο/ 1 ^ο όροφο του εργοστασίου.....	33
2.10	Κυψέλες εμπλουτισμού στις οποίες διακρίνεται υλικό επεξεργασίας.....	34
2.11	Κυψέλες εμπλουτισμού στις οποίες διακρίνεται υλικό επεξεργασίας.....	34
2.12	Σύγχρονες Κυψέλες Επίπλευσης.....	34
2.13	Κυλινδρικός Πυκνωτής.....	35
2.14	Διηθητήρας Συμπίεσης Νερού LAROX.....	35
2.15	Διάγραμμα Ροής Εμπλουτισμού.....	36
2.16	Σωρός από αμμώδη στείρα.....	37
2.17	Χωματοουργικά Αυτοκίνητα.....	37
2.18	Απόθεση κατά μήκος κοιλάδας.....	39
2.19	Αποθέσεις κατά μήκος κοιλάδας – σχέδιο.....	39
2.20	Χώρος απόθεσης με περιμετρικό ανάχωμα «δακτυλιοειδούς τύπου» με τρία κελιά απόθεσης.....	40
2.21	Απόθεση αποβλήτων επεξεργασίας μεταλλεύματος Χρυσού εντός χώρου ανοικτής εκσκαφής.....	41
2.22	Παραδείγματα εγκαταλειμμένων χημικών αντιδραστηρίων στο εσωτερικό του εργοστασίου.....	42
2.23	Παραδείγματα εγκαταλειμμένων χημικών αντιδραστηρίων στο εσωτερικό του εργοστασίου.....	42
2.24	Παραδείγματα εγκαταλειμμένων χημικών αντιδραστηρίων στο εσωτερικό του εργοστασίου.....	42
2.25	Παραδείγματα εγκαταλειμμένων χημικών αντιδραστηρίων στο εσωτερικό του εργοστασίου.....	42
2.26	Παραδείγματα εγκαταλειμμένων χημικών αντιδραστηρίων στο εσωτερικό του εργοστασίου.....	42
2.27	Η μέθοδος κατασκευής προς τα ανάντη (upstream method).....	46
2.28	Μέθοδος κατασκευής προς τα κατόντη (downstream method).....	47
2.29	Κεντρική μέθοδος κατασκευής φράγματος.....	48
2.30	Όξινη Απορροή στην πλατεία του υπαίθριου μεταλλείου Αγίου Φιλίππου.....	50
2.31	Λεκάνη απόθεσης 3, ύστερα από βροχόπτωση.....	52
2.32	Έντονη διάβρωση της λεκάνης απόθεσης 5.....	52
2.33	Όξινη Απορροή από τα μεταλλεία της Tulsequah, Canada.....	53
2.34	Όξινη Απορροή από μεταλλείο χρυσού στην νότια Αφρική.....	53

2.35	Όξινη Απορροή Μεταλλείων στο ποταμό του RioTinto.....	54
2.36	Όξινη Απορροή στην έξοδο της Υπόγειας Στοάς.....	54
2.37	Όξινη Απορροή απορριμμάτων μεταλλείου Αγίου Φιλίππου.....	55
3.1	Δορυφορική εικόνα της περιοχής ενδιαφέροντος.....	56
3.2	Δορυφορική εικόνα της ευρύτερης περιοχής εξορυκτικών και μεταλλουργικών διεργασιών.....	57
3.3	Τοπογραφική και γεωλογική αποτύπωση της περιοχής των λεκανών 1 και 2.....	59
3.4	Άποψη της λεκάνης του τέλματος 2.....	59
3.5	Τοπογραφική και γεωλογική αποτύπωση της περιοχής των λεκανών 3 και 4.....	60
3.6	Αυλακώσεις του εξωτερικού πρσανούς της λεκάνης 3 λόγω των επιφανειακών απορροών και της υπερχειλίσης του τέλματος.....	61
3.7	Ροή υλικού από το τέλμα 4 στο τέλμα 5.....	61
3.8	Τοπογραφική και γεωλογική αποτύπωση της περιοχής της λεκάνης 5.....	63
3.9	Διαβρώσεις στο ανάχωμα της λεκάνης 5 από τις επιφανειακές απορροές.....	63
3.10	Αυλακώσεις επί του αναχώματος στη λεκάνη 5.....	64
3.11	Τοπογραφική και γεωλογική αποτύπωση της περιοχής των λεκανών 6, 7 και 8.....	65
3.12	Τμήμα της λεκάνης 6 πληρωμένη με νερό.....	65
3.13	Άποψη της λεκάνης 7 και της παράπλευρης κοίτης του ρέματος Ειρήνη.....	66
3.14	Γεωλογικός χάρτης περιοχής εργοστασίου εμπλουτισμού Κίρκης.....	69
4.1	Κατανομή κόμβων στα τριγωνικά στοιχεία.....	72
4.2	Κατανομή σημείων τάσης στα τριγωνικά στοιχεία.....	72
4.3	Επιλογή Project.....	74
4.4	Επιλογές που αφορούν την εργασία.....	75
4.5	Επιλογές που αφορούν τις διαστάσεις.....	75
4.6	Το κύριο παράθυρο του προγράμματος εισαγωγής (Input).....	76
4.7	Εργαλεία γενικού περιεχομένου.....	77
4.8	Εργαλεία γεωμετρίας.....	77
4.9	Αρχικό παράθυρο του εργαλείου “Material sets”.....	79
4.10	Παράδειγμα γεωμετρικού μοντέλου.....	80
4.11	Επιλογή κατανομής στοιχείων.....	81
4.12	Παράδειγμα γεωμετρικού μοντέλου υπό τη παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.....	82
4.13	Παράθυρο υποπρογράμματος “Calculations”.....	83
4.14	Παράδειγμα αποτελεσμάτων στο υποπρόγραμμα “Output”.....	84
4.15	Σύγκριση διαγραμμάτων στο υποπρόγραμμα “Curves”.....	84
5.1	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 2.....	86
5.2	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 3.....	86

5.3	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 4.....	86
5.4	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 5.....	87
5.5	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 6.....	87
5.6	Παράδειγμα Φάσεως κατασκευής ενός από τα αναχώματα.....	96
5.7	Παράδειγμα Φάσεως κατασκευής ενός από τα αναχώματα.....	96
5.8	Παράδειγμα Φάσεως κατασκευής ενός από τα αναχώματα.....	96
5.9	Οι διαδοχικές φάσεις επιλύσεως των αναχωμάτων στο υποπρόγραμμα “Calculations”.....	97
6.1	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας τέλματος 2.....	99
6.2	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας τέλματος 3.....	100
6.3	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας τέλματος 4.....	100
6.4	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας τέλματος 5.....	101
6.5	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας τέλματος 6.....	101
6.6	Γεωμετρικό μοντέλο του τέλματος 6 με αφαίρεση του υψώματος που περιλαμβάνει το υπόβαθρο.....	102
6.7	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας τέλματος 6 ύστερα από αφαίρεση του πρηνούς τους εδάφους.....	102
6.8	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 2 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.....	104
6.9	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 3 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.....	104
6.10	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 4 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.....	105
6.11	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 5 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.....	105
6.12	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 6 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.....	106
6.13	Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 6 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.....	106
6.14	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 2.....	107
6.15	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 3.....	108
6.16	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 4.....	108
6.17	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 5.....	108
6.18	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 6.....	109
6.19	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 6 ύστερα από αφαίρεση του πρηνούς τους εδάφους.....	109
6.20	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας με μέγιστη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στο τέλμα 3	110
6.21	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας με μέγιστη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στο τέλμα 4	110
6.22	Δυνητική επιφάνεια αστοχίας με μέγιστη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στο τέλμα 6	111
7.1	Παράδειγμα χρήσης γεωφάσματος.....	119
7.2	Παράδειγμα εφαρμογής γεωμεμβράνης.....	120
7.3	Εφαρμογή γεωκυψέλης με πλήρωση από κροκαλοπαγή υλικά.....	120

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο του 2019 υπό την επίβλεψη του κ. Κ. Λουπασάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή του τομέα των Γεωλογικών επιστημών της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών.

Η διπλωματική Εργασία έχει τίτλο:

Αριθμητική προσομοίωση των γεωτεχνικών συνθηκών ευστάθειας των μεταλλευτικών τελμάτων των μεταλλείων της Κίρκης, Αλεξανδρούπολη.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση της ευστάθειας των τελμάτων κάτω από διαφορετικές συνθήκες πραγματοποιώντας παραμετρικές αναλύσεις. Το υπολογιστικό πακέτο το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το Plaxis 2D, ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο έχει εφαρμογές σε γεωτεχνικά έργα όπως ευστάθεια πρανών, σήραγγες, τοίχοι αντιστήριξης κ.α.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής 7 κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1 – Ιστορικά στοιχεία της περιοχής της Κίρκης και των Μεταλλείων της.

Κεφάλαιο 2 – Περιγραφή των τελμάτων σχετικά με τις διεργασίες παραγωγής τους (εμπλουτισμού) και τους τρόπους διάθεσής τους στο περιβάλλον. Επίσης γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά τους και στην όξινη απορροή.

Κεφάλαιο 3 – Περιγραφή της γεωμορφολογίας της ευρύτερης περιοχής αλλά και των 8 λεκανών που συγκρατούν τα τέλματα.

Κεφάλαιο 4 - Αναλυτική περιγραφή του υπολογιστικού πακέτου Plaxis 2D, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των παραμετρικών αναλύσεων.

Κεφάλαιο 5 – Αναλυτική περιγραφή των παραμετρικών αναλύσεων καθώς και της μεθοδολογίας εύρεσης των μηχανικών παραμέτρων.

Κεφάλαιο 6 – Αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 7 – Συμπεράσματα και προτάσεις.

ABSTRACT

The present thesis was conducted as part of the Undergraduate Studies curriculum in the Department of Mining – Metallurgical Engineering of the National Technical University of Athens. It was completed in March 2019 under the supervision of Mr. C Loupasakis, Associate Professor in the field of Geological Sciences of the School of Mining and Metallurgical engineering.

The title of diploma thesis is: Numerical simulation of the geotechnical stability conditions of Processing Tailings in Kirki Mine.

The purpose of this thesis is the research of the tailings stability under diverse conditions, applying parametric analysis. The software used for the analysis is Plaxis 2D, a finite element software which has applications over different geotechnical cases, such as slopes analysis, tunnels, retaining walls e.t.c.

The thesis consists of the seven following chapters:

Chapter 1 – Historical information related to the Kirki town and mines.

Chapter 2 – Description of tailings as regards their production methods (processing) and their deposit methods into the environment. There is also a reference to their characteristics and to the phenomenon of Acid Drainage.

Chapter 3 – Description of Kirki tailings geomorphology as well as the geomorphology of the surrounding area.

Chapter 4 – Detailed description of computational package Plaxis 2D which was used to carry out the parametric analysis.

Chapter 5 – Detailed description of the parametric analysis as well as the methodology for acquiring the values of mechanical parameters.

Chapter 6 – Detailed presentation of the parametric analysis results.

Chapter 7 – Conclusions of this thesis and recommendations.

1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Κίρκη είναι ένα χωριό που βρίσκεται στο νομό Έβρου, 17Km. ΒΒΔ της Αλεξανδρούπολης, κοντά στην κοιλάδα του μικρού ποταμού «Ειρήνη». Πέραν από τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν το χωριό αυτό, υπάρχει και το μεταλλείο του Αγίου Φιλίππου και το εργοστάσιο εμπλουτισμού. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται ιστορικά στοιχεία που αφορούν τόσο το χωριό όσο και μονάδες εξόρυξης και επεξεργασίας των μεταλλευμάτων.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΚΙΡΚΗΣ

Η ονομασία αυτή δεν ήταν η μοναδική, καθώς μέχρι και το 1920 η περιοχή ήταν γνωστή ως Κίρκά(ς) ή Κιρκάκιοϊ, μία ονομασία που προέρχεται από το «Κιρκ – χαν», μια τουρκική λέξη που μεταφράζεται ως ο αριθμός 40. Αναλυτικότερα, η λέξη Κιρκ-κά σημαίνει σαράντα χάνια και η λέξη χάνια χαρακτήριζε τα πανδοχεία τα οποία προορίζονταν για τη φιλοξενία των ταξιδιωτών που κατέβαιναν από την Ήπειρο τη Μακεδονία και την Κωνσταντινούπολη με καραβάνια (Λιακοπουλος, 2009). Στα χάνια συνήθιζαν να σταθμεύουν οι «Κυρατζίδες» είτε για να ξεκουραστούν είτε για να προμηθευτούν τρόφιμα. Αξίζει να σημειωθεί πως σήμερα κατοικούν περίπου 80 - 120 άνθρωποι και ανατρέχοντας σε στοιχεία απογραφής πληθυσμού, το 1951 κατοικούσαν 560 άνθρωποι. Έτσι μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί πως στην περιοχή έχει υπάρξει μείωση πληθυσμού κατά 80,6% και ως αποτέλεσμα, ο κίνδυνος δημιουργίας ενός έρημου χωριού είναι ορατός στο προσεχές μέλλον (Λιακοπουλος, 2009). Το χωριό έχει χτιστεί σε υψόμετρο 205 – 230 m. στους πρόποδες της οροσειράς Ροδόπης ενώ ο ποταμός «Ειρήνη» εκρέει στο Θρακικό Πέλαγος, ανατολικά της Αλεξανδρούπολης. Με το πέρασμα των χρόνων, έχουν βρεθεί ευρήματα στη περιοχή αυτή, που αποδεικνύουν την ύπαρξη κατοίκων από την αρχαιότητα. Παρ' όλα αυτά, συγκεκριμένη χρονολόγηση των πρώτων κατοίκων δεν έχει βρεθεί αλλά σύμφωνα με τα ευρήματα, υπάρχουν ισχυρισμοί αρχαιολόγων πως η Κίρκη υπήρχε από τον 2^ο αιώνα π.Χ.



Εικόνα:1.1: Το μικρό χωριό της Κίρκης. (<https://greece.terrabook.com/evros/page/kirki-2/>)

Η Κίρκη θα μπορούσε να αποτελέσει ενδιαφέροντα τόπο για τους τουρίστες καθώς πέραν από την ενδιαφέρουσα ιστορία που κουβαλά στο πέρασμα των χρόνων, μπορεί να εντυπωσιάσει τον επισκέπτη με το παλαιό σχολείο, την επιβλητική εκκλησία, τον σιδηροδρομικό σταθμό και μερικά παλαιά αρχοντικά που έχουν καταφέρει να διασωθούν (Λιακοπουλος, 2009). Το σχολείο το οποίο και θεωρείται ως το αρχαιότερο στην επαρχία της Αλεξανδρούπολης αποτελεί σημαντικό αντικείμενο για το χωριό και έχει ανακαινισθεί τα τελευταία χρόνια. Σε αυτό το σχολείο φοίτησε για μικρό διάστημα ο σπουδαίος αγιογράφος από την Κίρκη, ο Κύριλλος (1873 – 1944) και σήμερα το σχολείο δε βρίσκεται υπό λειτουργία.



Εικόνα:1.2: Το ανακαινισμένο δημοτικό σχολείο. (Λιακοπουλος, 2009)

Αναφορικά με κάποια ιστορικά στοιχεία, κατά την τουρκική κατοχή, το 1912 έγινε λεηλασία από τους Τούρκους, σκοτώνοντας 12 άτομα και από την φωτιά που ακολούθησε, κάηκαν αρκετά σπίτια και η εκκλησία του χωριού. Πολλοί κάτοικοι γλίτωσαν από την φωτιά επειδή είχαν προειδοποιηθεί από έναν τούρκο αξιωματικό και κρύφτηκαν στο βουνό Ανάθεμα. Η νέα εκκλησία που κατασκευάστηκε, διακοσμήθηκε με αγιογραφίες του Κύριλλου οι οποίες βρίσκονται διαθέσιμες στο ευρύτερο κοινό ακόμη και σήμερα. Οι εικόνες αυτές εντυπωσιάζουν από την φωτεινότητα τα όμορφα πρόσωπα και τα ζωνρά χρώματα. Ωστόσο, μερικές από αυτές βρίσκονται σε κακή κατάσταση λόγω των κακών συνθηκών συντήρησης και της παλαιότητάς τους. Επιπροσθέτως, από το 1928 υπήρξε εργαστήριο αγιογραφίας το οποίο δούλευε εντατικά έως και το 1940. Το 1941 οι Βούλγαροι κατέστρεψαν το εργαστήριο και έσπασαν τις εικόνες που βρίσκονταν μέσα (Λιακοπουλος, 2009). Σε γενικές γραμμές, με την κατάλληλη προβολή η εκκλησία του χωριού θα μπορούσε να αποτελέσει έναν επιπλέον πόλο έλξης για τους επισκέπτες.



Εικόνα:1.3: Η νέα εκκλησία του χωριού. (Λιακοπουλος, 2009)



Εικόνες:1.4,1.5: Εικόνες του Κύριλλου που διακοσμούν την εκκλησία της Κίρκης σήμερα. (Λιακοπουλος, 2009)

1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Η Κίρκη για πολλούς είναι γνωστή για τα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία της και κυρίως για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που έχουν αυτά αφήσει. Στη τοποθεσία αυτή, υπήρχαν κοιτάσματα μεικτών θειούχων μεταλλευμάτων τα οποία και έγιναν αντικείμενο εκμετάλλευσης αρχικά από τους Άγγλους, εν συνεχεία από τους Γερμανούς και εν τέλει από τους Έλληνες. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ των ετών 1932 και 1939, δύο βρετανικές εταιρείες δημιούργησαν το υπόγειο μεταλλείο «Άγιος Φίλιππος» που βρίσκεται 6Km. βορειοανατολικά του χωριού και εκ του οποίου, το δίκτυο των στοών έφτανε περί των 1600m. σε μήκος. Το μετάλλευμα μετά από την εξόρυξή του, πήγαινε ακατέργαστο στην Ευρώπη από το σιδηροδρομικό δίκτυο της Κίρκης. Οι εταιρείες που ανέλαβαν το συγκεκριμένο έργο, ονομάζονταν «Thacian Mineral Products» και «Kirka Mines Ltd» οι οποίες και θεωρούνταν από τις κορυφαίες στην εξόρυξη ορυκτών. Το 1939, οι δύο αυτές εταιρείες πτώχευσαν και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίον σταμάτησε η εξόρυξη μεταλλεύματος. Αξίζει να σημειωθεί, πως ενώ οι Άγγλοι ήταν οι πρώτοι που πραγματοποίησαν την διάνοιξη του μεταλλείου, οι πρώτες προσπάθειες εξόρυξης, έγιναν από την Τουρκία, την περίοδο του 1880.

Στην περίοδο της κατοχής, οι Γερμανοί ανέλαβαν το μεταλλείο και το αναβάθμισαν με νέες εγκαταστάσεις καθώς υπήρχε η ανάγκη για τα συγκεκριμένα μέταλλα και η χρήση τους, περιοριζόνταν μόνο για ανάγκες του γερμανικού στρατού. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε το εργοστάσιο εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων, το οποίο και βρίσκεται 3Km. ανατολικά του χωριού, μονάδες θραύσης και λειοτρίβησης του μεταλλεύματος, αποθήκες, 2 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, διάφορα κτήρια για το εργατικό και υπαλληλικό προσωπικό όπως και συνεργεία, αλλά και πολυτελείς βίλες για τα άτομα των ανώτατων τάξεων, όπως π.χ. του Γερμανού διοικητή (Αρίκας et al., 2007). Οι Γερμανοί, είχαν προσλάβει τους κατοίκους του χωριού ως εργάτες για τη πραγματοποίηση της εξόρυξης. Σημειωτέον δέ, πως τα υπόγεια μεταλλεία που λειτουργούσαν εκείνες τις περιόδους, παρά την επαρκή θεωρητική και τεχνολογική ανάπτυξη που επέτρεπε την διάνοιξη των στοών, ο απαιτούμενος αριθμός εργαζομένων ήταν πολύ μεγαλύτερος από ότι τις πρόσφατες περιόδους, διότι η τεχνολογία εξόρυξης και μεταφοράς δεν ήταν επαρκώς ανεπτυγμένη. Για την μεταφορά του μεταλλεύματος από το σημείο εξόρυξης έως και το εργοστάσιο εμπλουτισμού έπρεπε να καλυφθεί μία απόσταση των 6 χιλιομέτρων, και για

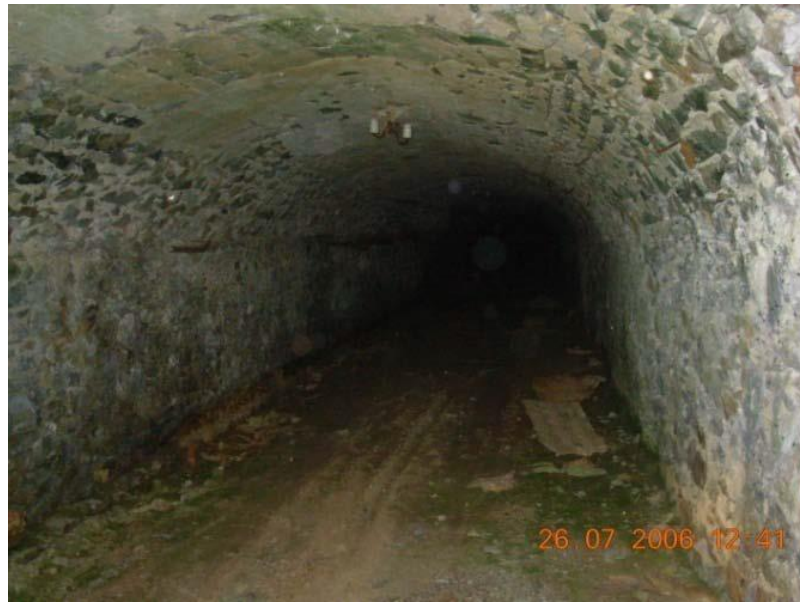
την επιτυχή μετακίνησή τους, δημιουργήθηκε σύστημα εναέριας μεταφοράς. Παράλληλα, η μεταφορά του τελικού συμπυκνώματος για περαιτέρω επεξεργασία, πιθανώς στην Γερμανία, γινόταν με σιδηροδρομικό δίκτυο, το οποίο και είχε σχεδιαστεί να περνάει δίπλα από το εργοστάσιο εμπλουτισμού. Με το τέλος του Β' παγκοσμίου πολέμου και με την ήττα των Γερμανών, το 1945 οι ίδιοι αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν το μεταλλείο στο οποίο είχαν τελειώσει οι εργασίες κατασκευής και το μεταλλείο πλέον ανήκε στο ελληνικό δημόσιο. Εκείνη την περίοδο, έγιναν προσπάθειες από την «Mediterranean Mines» και την «Ελληνική Τράπεζα Βιομηχανικής ανάπτυξης» για τη δημιουργία μεταλλευτικής βιομηχανίας, αλλά η προσπάθεια ήταν ανεπιτυχής (Αρίκας et al., 2007).



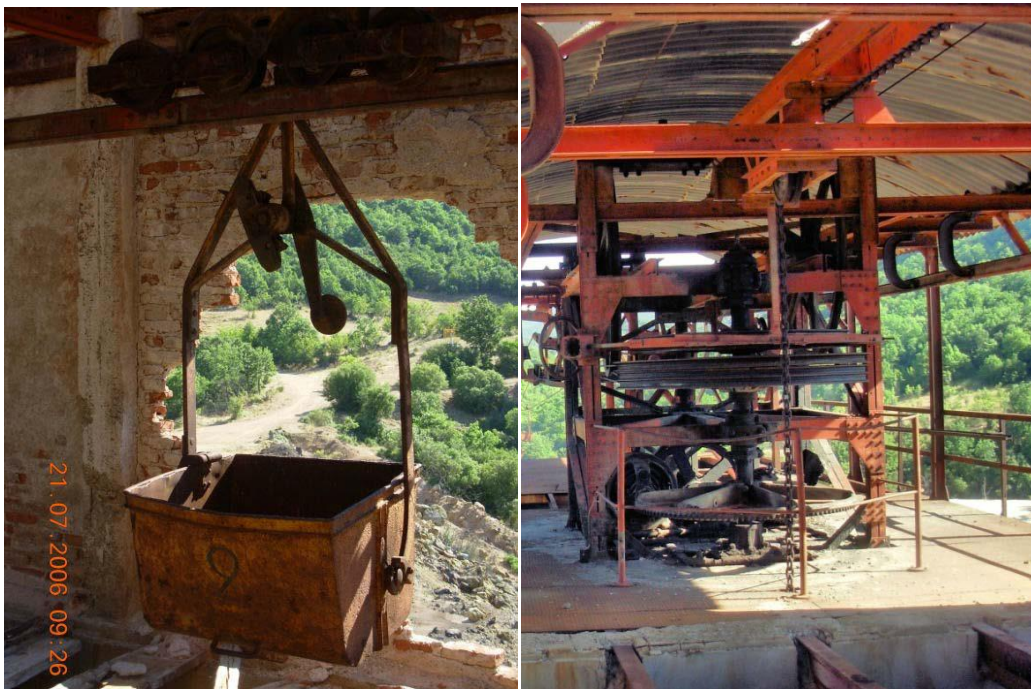
Εικόνες: 1.6, 1.7: Άποψη της Γερμανικής βίλας και της Εγγλέζικης βίλας, αντίστοιχα. (Λιακοπουλος, 2009)



Εικόνα: 1.8: Η είσοδος της κεντρικής στοάς της παλαιάς υπόγειας εξόρυξης. (Αρίκας et al., 2007)



Εικόνα:1.9: Το εσωτερικό της κεντρικής στοάς εκμετάλλευσης. (Λιακοπουλος, 2009)



Εικόνες:1.10,1.11: Οι εγκαταστάσεις του εναέριου συστήματος μεταφοράς στο σημείο φόρτωσης. (Λιακοπουλος, 2009)



Εικόνες:1.12,1.13: Βαγονέτα του εναέριου σιδηρόδρομου, εν μέρει γκρεμισμένα στο έδαφος και τμήμα της διαδρομής. (Αρίκας et al., 2007), (Λιακοπουλος, 2009)

Η «Κίρκη Μεταλλευτική ΕΠΕ» η οποία ανήκε σε έναν ιδιώτη που ονομάζονταν Κυπριάδης, με τη συμβολή κάποιων πολιτικών προσώπων απέκτησε μεταλλευτικές άδειες εξόρυξης για το μεταλλείο «Άγιος Φίλιππος» και πραγματοποιήθηκε εκ νέου, ένας νέος κύκλος εργασιών εξόρυξης και επεξεργασίας των μεικτών θειούχων μεταλλευμάτων σε μορφή επιφανειακής εκμετάλλευσης. Οι ιδιοκτήτες της εταιρείας αυτής, δε μερίμνησαν για την εφαρμογή περιβαλλοντικών και γεωτεχνικών μελετών, όπως και δεν εφαρμόστηκαν όλα τα μέτρα ασφαλείας και ως αποτέλεσμα η επιφανειακή εξόρυξη κατέστρεψε τον μηχανισμό εξόρυξης που είχε δημιουργηθεί. Ύστερα από μία ισχυρή βροχοπτώση το 1977, υπήρξε καθίζηση και το κεντρικό σύστημα των στοών κατέρρευσε πλήρως (Αρίκας et al., 2007). Επιπλέον, εμφανίστηκαν όξινες απορροές και παραμόρφωση του φυσικού τοπίου. Στη συνέχεια, η εταιρεία έκανε εργασίες για εντοπισμό νέων εμφανίσεων και κινήθηκε σε άλλο τμήμα του κοιτάσματος αλλά τα αρνητικά οικονομικά αποτελέσματα, δεν επέτρεψαν την επιπρόσθετη εκμετάλλευση και έτσι, σταμάτησε τις εργασίες το 1980 (Αρίκας et al., 2007). Το 1989 η εταιρεία απόκτησε ξανά άδεια επιφανειακής εκμετάλλευσης και το μεταλλείο λειτούργησε για 8 χρόνια, από το 1990 ως το 1997. Οι εργαζόμενοι ήταν κυρίως κάτοικοι του χωριού και οι συνθήκες εργασίας ήταν επικίνδυνες από την πλευρά της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Γενικά, υπάρχουν πληροφορίες πως εφαρμόστηκαν κυανιούχες ενώσεις κατά την

επεξεργασία του μεταλλεύματος. Επίσης και στην περίοδο 1990-1997 δημιουργήθηκε ένα ορυχείο στο οποίο δεν υπήρχε επαρκής μελέτη. Ένα κομβικό πρόβλημα ήταν το γεγονός πως λίμναζαν επιφανειακά νερά τα οποία κατά την επαφή με το μέταλλευμα, και με τον αέρα, δημιουργούν συνθήκες περιβαλλοντικής ρύπανσης. Αυτό το γεγονός, αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα, για την αντί-οικονομικότητα της εκμετάλλευσης, την περίοδο 1974 – 1980 αλλά και για την οριστική παύση της λειτουργίας το 1997 αφού οι αντλήσεις, δεν μπορούσαν να επιλύσουν το πρόβλημα των επιφανειακών νερών (Αρίκας et al., 2007).



Εικόνα:1.14: Πανοραμική άποψη των αποθέσεων απορριμμάτων εξόρυξης, γύρω από την ανοικτή εκσκαφή του μεταλλείου Αγίου Φιλίππου. Διακρίνεται η ροή του ρέματος Κιρκάλων η οποία συναντά τις υπάρχουσες αποθέσεις. (Λιακοπουλος, 2009)



Εικόνα:1.15: Διαβρωμένες αποθέσεις απορριμμάτων στην κεντρική πλατεία του μεταλλείου Αγίου Φιλίππου σε μορφή αυλάκων. (Λιακοπουλος, 2009)

Το τελικό αποτέλεσμα από την εκμετάλλευση του μεταλλείου «Άγιος Φίλιππος» σύμφωνα με υπολογισμούς, ήταν η εξόρυξη μεικτών θειούχων μεταλλευμάτων περί των

200.000 – 220.000 τόννων εκ των οποίων οι 159.000 τόννοι παράχθηκαν την περίοδο 1974 - 1980 με ανάκτηση 12.000 τόννους συμπυκνώματος και οι 40000 τόννοι την περίοδο 1975 – 1976 με ανάκτηση 3.000 τόννους συμπυκνώματα. Τα κύρια συμπυκνώματα ήταν αυτά του Μολύβδου (Pb) και του Ψευδαργύρου (Zn) με ανάκτηση περίπου 55% και 50% αντίστοιχα. Το 1980 η ετήσια παραγωγή ήταν 3.000 τόννοι μεταλλεύματος, με 270 τόννους μεικτό συμπύκνωμα. Πληροφορίες για την περίοδο 1990 – 1997 δεν υπάρχουν αλλά η παραγωγή, δεν πρέπει να είχε υπερβεί τους 50.000 τόννους μεταλλεύματος (Αρίκας et al., 2007). Το μεταλλευτικό έργο ήταν μικρό, αλλά λόγω της έλλειψης των απαραίτητων μελετών για τα διάφορα θέματα που προέκυψαν κατά την λειτουργία του μεταλλείου αλλά και χωρίς τις απαραίτητες κρατικές άδειες, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ήταν μεγάλο και συνεχίζει να υφίσταται, αποτελώντας κίνδυνο για τη ζωή των ανθρώπων αλλά και για το περιβάλλον ακόμη και σήμερα.



Εικόνα:1.16: Πανοραμική Άποψη της ανοιχτής εκσκαφής του μεταλλείου Αγίου Φιλίππου. (Λιακοπουλος,2009)



Εικόνες 1.17-1.18: Απόψεις του εργοστασίου εμπλουτισμού.



Εικόνες 1.19-1.20: Πανοραμικές λήψεις του εργοστασίου εμπλουτισμού.



Εικόνες:1.17-1.21: Απόψεις του ετοιμόρροπου εργοστασίου εμπλουτισμού και της γύρω περιοχής τη σημερινή εποχή. (<http://www.alterthess.gr/content/kirki-i-istoria-enos-egkatalaileimmenoy-metalleioy-foto-kai-vinteo>), (<https://www.sfirixtra.gr/afierwma-kirkh-evrou-apo-psila/>), (<http://www.e-evros.gr/gr/eidhseis/3/egkatalaileimmena-metalleia-kirkhs-h-ploysia-istorias-toys-video/post32498>)

2 ΤΕΛΜΑΤΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τέλματα (tailings) ή αλλιώς απορρίμματα, ορίζονται ως τα απόβλητα της επεξεργασίας του μεταλλεύματος, από την απομάκρυνση των οικονομικής σημασίας συστατικών (Τριανταφυλλίδης, 2015). Αυτά μπορεί να βρίσκονται σε στερεή ή υγρή μορφή (πολφός). Οι πολφοί προέρχονται από τις εργοστασιακές μονάδες εμπλουτισμού και υδρομεταλλουργίας, κυρίως κατά τις διεργασίες επίπλευσης, και εκχύλισης των μεταλλευμάτων. Γενικότερα όμως τα μεταλλευτικά απόβλητα μπορούν να προκύψουν από διεργασίες όπως:

- Επεξεργασία μεταλλεύματος για την εξαγωγή πολύτιμων μετάλλων ή ενώσεων.
- Διεργασίες εμπλουτισμού μεταλλεύματος .
- Διεργασίες πλύσης άμμου.
- Παραγωγή υπολειμμάτων καύσης γαιανθράκων (τέφρα ή καπνός).
- Παραπροϊόντα χημικών διεργασιών, όπως παραγωγή γύψου. (Χιόνης, 2016)

Ένα σημαντικό ζήτημα που επικρατεί σχετικά με τα απόβλητα, είναι η επιλογή της τεχνικής απόθεσης αυτών. Λανθασμένοι σχεδιασμοί μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία των θεμελιώσεων και σε τοξικές διαρροές με ανεπανόρθωτες βλάβες, τόσο στον άνθρωπο όσο και στο περιβάλλον.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της διαδικασίας του εμπλουτισμού, μέχρις όσου να φτάσει το μέταλλευμα στη μορφή προϊόντος και απορρίμματος. Έπειτα, περιγράφονται οι τεχνικές απόθεσης των αποβλήτων και οι κατασκευαστικές τεχνικές θεμελίωσης των φραγμάτων. Τέλος, περιγράφονται τόσο τα χαρακτηριστικά των τελμάτων και των περιοχών απόθεσής τους, όσο και το φαινόμενο της όξινης απορροής.

2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

Από τη στιγμή που το μέταλλευμα εξορυχθεί, πρέπει να περάσει από διάφορα διαδοχικά στάδια, έτσι ώστε να επιτευχθεί η τελική ανάκτηση των επιθυμητών μετάλλων. Η ανάκτηση αυτή μπορεί να έχει τη μορφή καθαρού μετάλλου ή συμπυκνώματος, δηλαδή το χρήσιμο συστατικό σε μια αυξημένη περιεκτικότητα, αλλά όχι εντελώς «καθαρισμένο» από το στείρο υλικό. Οι διαδικασίες αυτές γίνονται στο εργοστάσιο εμπλουτισμού. Πριν από την είσοδο στα μηχανήματα εμπλουτισμού, το μέταλλευμα υπόκειται σε μηχανική προπαρασκευή, έτσι ώστε να εισέλθει με το κατάλληλο μέγεθος, σε συνδυασμό με τον επιθυμητό βαθμό αποδέσμευσης και το σωστό βάρος επιπλευσιμότητας, για όσα μεταλλεύματα πρόκειται να διαχωριστούν με τη μέθοδο της επίπλευσης (Φραγκίσκος, 1995). Ένας όρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραπάνω διαδικασία, είναι η «Κατάτμηση». Ο όρος αυτός περιλαμβάνει όλα τα στάδια της ελάττωσης του μεγέθους των υλικών, δηλαδή την θραύση και την λειοτρίβηση, ανεξάρτητα από το αρχικό και τελικό μέγεθος των τεμαχιδίων.

2.3 ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ

Το πρώτο στάδιο που είναι κοινό για όλα τα μεταλλεύματα ή βιομηχανικά ορυκτά, είναι η πρωτογενής θραύση, κατά την οποία γίνεται μια πρώτη ελάττωση του μεγέθους των κόκκων της τροφοδοσίας σε τελικό μέγεθος, περίπου 2mm. Πολλές φορές επίσης, το μηχανήμα που επιλέγεται για τη θραύση του μεταλλεύματος, συνδυάζει αυτή τη μείωση μεγέθους, με την παραγωγή ελάχιστου δυνατού ποσοστού ψιλών στο προϊόν της θραύσης. Η θραύση μπορεί να θεωρηθεί «Απλή», «Πολλαπλή» και «Επαναλαμβανόμενη Απλή». Σύμφωνα με τον Gilvary, απλή θραύση ονομάζεται η θραύση ενός τεμαχίου (δοκιμίου) από ένα σύστημα εξωτερικών δυνάμεων που ενεργεί (εφαρμόζεται) μία φορά πάνω στο τεμάχιο και απομακρύνεται αμέσως μόλις αρχίσει η θραύση. Πολλαπλή θραύση έχουμε όταν η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται πάνω στο ίδιο τεμάχιο περισσότερες από μία φορές. Επαναλαμβανόμενη απλή θραύση ονομάζουμε την πολλαπλή θραύση χονδρομερούς υλικού με σχετικά μικρό λόγο κατάτμησης, όταν αυτή παρουσιάζει κατανομή μεγέθους τεμαχίων προϊόντος σε «θραύσματα» και «υπόλλειμα». Η λειοτρίβηση, ακολουθεί της θραύσης προκειμένου το μέγεθος των τεμαχιδίων να μειωθεί στα 10 ως 300 μm. Η λειοτρίβηση εφαρμόζεται κυρίως σε μύλους κυλιόμενου φορτίου αλλά και σε μύλους περιφερόμενων τροχών. Ύστερα από κάθε στάδιο λειοτρίβησης, μεσολαβεί ένα στάδιο ταξινόμησης ως προς

το μέγεθος των τεμαχιδίων, πριν αυτά οδηγηθούν στις μηχανές εμπλουτισμού. Ο διαχωρισμός κατά μέγεθος των τεμαχίων του προϊόντος της κατάτμησης γίνεται με κοσκίνιση ή με χρησιμοποίηση ταξινομητών.

Πίνακας 2.1: Τύποι μηχανών κατάτμησης βάσει των διαφόρων σταδίων και φάσεων. (Τσακαλάκης, 2008)

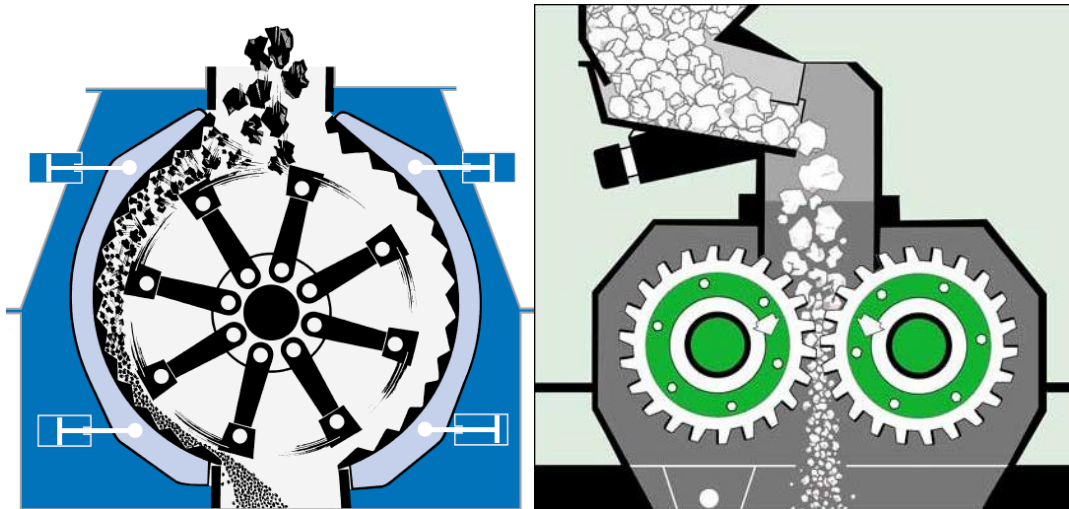
ΣΤΑΔΙΑ	ΦΑΣΕΙΣ	ΤΥΠΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΤΑΤΜΗΣΗΣ
ΘΡΑΥΣΗ	ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ	ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ ΣΙΑΓΟΝΩΝ, ΚΡΟΥΣΤΙΚΟΣ, ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ
	ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ	ΚΩΝΙΚΟΣ, ΚΡΟΥΣΤΙΚΟΣ, ΣΦΥΡΟΜΥΛΟΣ
	ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ	ΚΡΟΥΣΤΙΚΟΣ, ΣΦΥΡΟΜΥΛΟΣ, ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ
ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΣΗ	ΧΟΝΔΡΟΜΕΡΗΣ	ΡΑΒΔΟΜΥΛΟΣ, ΑΥΤΟΓΕΝΗΣ ΛΕΙΟΤΡΙΒΕΑΣ
	ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ	ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟΣ, ΑΥΤΟΓΕΝΗΣ ΛΕΙΟΤΡΙΒΕΑΣ
	ΑΛΕΣΗ	ΜΥΛΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Πίνακας 2.2: Μηχανήματα Ταξινόμησης. (Τσακαλάκης, 2008)

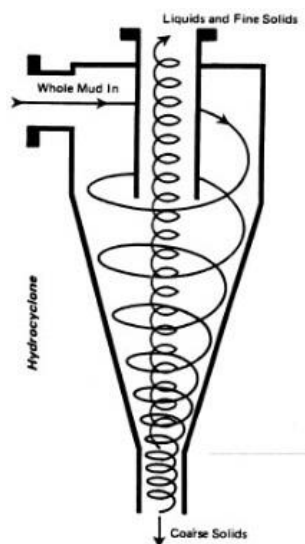
ΚΟΣΚΙΝΑ	ΣΤΑΤΙΚΑ, ΜΗΧΑΝΙΚΑ, ΠΑΛΛΟΜΕΝΑ, ΔΟΝΟΥΜΕΝΑ
ΥΔΡΟΤΑΞΙΝΟΜΗΤΕΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΙ, ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ, ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΙ, ΥΔΡΟΚΥΚΛΩΝΕΣ
ΑΕΡΟΤΑΞΙΝΟΜΗΤΕΣ	ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΟΙ, ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ, ΑΕΡΟΚΥΚΛΩΝΕΣ, ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ



Εικόνες:2.1,2.2: Θραυστήρας Σιαγόνων, Κωνικός Θραυστήρας. (Τσακαλάκης, 2008)



Εικόνες:2.3,2.4: Σφαιρόμυλος, Θραυστήρας Κυλίνδρων (Οδοντωτός). (Τσακαλάκης, 2008)



Εικόνα:2.5: Αρχή Λειτουργίας Υδροκυκλώνα.
<https://www.911metallurgist.com/blog/hydrocyclone-workingprinciple>



Εικόνες:2.6,2.7: Ταινιόδρομος μεταφοράς και σύστημα τροφοδοσίας του θραυστήρα.
(Λιακοπουλος, 2009)

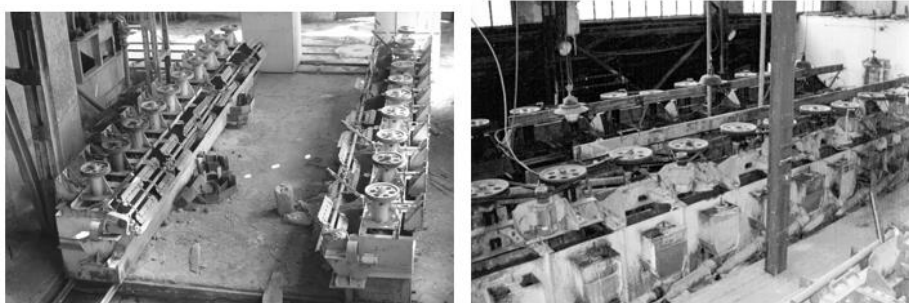
2.4 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΔΟΠΟΙΗΣΗ

Ο εμπλουτισμός του προπαρασκευασμένου υλικού, είναι ο διαχωρισμός του μεταλλεύματος από το στείρο υλικό με φυσικές μεθόδους. Αυτές οι μέθοδοι, εκμεταλλεύονται την φυσική διαφορά των ιδιοτήτων των ορυκτών που βρίσκονται εντός του κόκκου του μεταλλεύματος. Πολλές φορές η διαφοροποίηση αυτή δεν επιτυγχάνεται. Για αυτό το λόγο υπάρχει ακόμη ένα στάδιο που ονομάζεται «Προοδοποίηση του μεταλλεύματος» κατά την οποία πετυχαίνεται αύξηση σε μία ιδιότητα ή προσδίδεται μία δοτή (τεχνητή) ιδιότητα στην επιφάνεια των κόκκων, επάνω στην οποία στη συνέχεια βασίζεται και η μέθοδος εμπλουτισμού που θα επιφέρει τον τελικό διαχωρισμό. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η δοτή ιδιότητα της υδροφοβίας στην επιφάνεια των κόκκων των ορυκτών, με σκοπό την επίπλευση των υδρόφοβων ορυκτών (συμπύκνωμα) και καταβύθιση των υδρόφιλων, δηλαδή το στείρο υλικό (Φραγκίσκος, 1995). Οι διάφορες μέθοδοι εμπλουτισμού περιλαμβάνουν την χειροδιαλογή, τον οπτικό διαχωρισμό, τον βαρυτομετρικό διαχωρισμό, τον ηλεκτροστατικό διαχωρισμό, τον μαγνητικό διαχωρισμό και την επίπλευση. Στο εργοστάσιο εμπλουτισμού της Κίρκης, ο διαχωρισμός γίνεται βάσει

της επίπλευσης, καθώς η μέθοδος αυτή, είναι επαρκώς αποδοτική για θειούχα μεταλλεύματα.

2.5 ΕΠΙΠΛΕΥΣΗ

Η επίπλευση είναι σύγχρονη μέθοδος εμπλουτισμού καθώς έχει ανακαλυφθεί στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Είναι από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους καθώς πετυχαίνει υψηλή ανάκτηση και απόδοση και επιπλέον έχει ευρεία εφαρμογή στα φτωχά μεταλλεύματα. Επίσης είναι μέθοδος ανεξάρτητη από τις αυτόχθονες φυσικές ιδιότητες των ορυκτών καθώς μπορεί να συνδυαστεί με την διεργασία της προοδοποίησης (Φραγκίσκος, 1995). Το ακριβό κόστος της, παρ' όλα αυτά, σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα και την ευαισθησία της, περιορίζουν τη χρήση της κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες επίπλευσης και για αυτό το λόγο, πρέπει να έχουν προηγηθεί κατάλληλοι σχεδιασμοί πριν την υλοποίηση. Ένα παράδειγμα αποτελεί το ΡΗ στο οποίο εφαρμόζεται η επίπλευση. Αν το ΡΗ βρίσκεται εκτός των «αποδοτικών» ορίων, τα αποτελέσματα, είναι αρνητικά. Τα είδη των μηχανών επίπλευσης χωρίζονται σε κυψέλες επίπλευσης και σε στήλες επίπλευσης. Το μέγεθος των τεμαχιδίων πρέπει να είναι μικρότερο από 0,5 mm έτσι ώστε να μπορέσει να ανέλθει στην επιφάνεια το σύστημα φυσαλίδες – τεμάχια και για να μην αποκολλώνται τα τεμαχίδια από τις φυσαλίδες (Φραγκίσκος, 1995). Η επίπλευση χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, στην απλή, αντίστροφη και διαφορική επίπλευση. Όταν το προϊόν της επίπλευσης, είναι το συμπύκνωμα, και στην απορροή το απόρριμμα, η επίπλευση ονομάζεται απλή. Στην αντίθετη περίπτωση, η επίπλευση ονομάζεται αντίστροφη. Όταν υπάρχει δυνατότητα εκλεκτικής και διαδοχικής επίπλευσης καθενός από τα ορυκτά του μεταλλεύματος, αναφερόμαστε στην διαφορική επίπλευση. Τα προϊόντα της επίπλευσης στη συνέχεια οδηγούνται για πύκνωση.



Εικόνες:2.8,2.9.: Σύστημα 20 κυψελών επίπλευσης στο ισόγειο/ 1^ο όροφο του εργοστασίου. (Αρίκας et al., 2007)



Εικόνες:2.10,2.11.: Κυψέλες εμπλουτισμού στις οποίες διακρίνεται υλικό επεξεργασίας.
(Λιακοπουλος, 2009)



Εικόνα 2.12: Σύγχρονες Κυψέλες Επίπλευσης. (<https://www.tenova.com/product/delkor-bqr-flotation-cells/>)

2.6 ΠΥΚΝΩΣΗ - ΔΙΗΘΗΣΗ

Η πύκνωση και η διήθηση είναι και οι δύο διεργασίες που εκτελούνται με στόχο την αύξηση της πυκνότητας του πολφού. Η πύκνωση προηγείται της διήθησης στη σειρά και εφαρμόζεται τόσο για το συμπύκνωμα, όσο και για το στείρο υλικό. Κατά την διεργασία της πύκνωσης, τα στερεά σωματίδια καθιζάνουν σε κώνους ή κυλινδρικές δεξαμενές. Τα τεμαχίδια συγκεντρώνονται στον πυθμένα και απορρέουν είτε απευθείας είτε με τη βοήθεια περιστρεφόμενων πτερυγίων. Με την πύκνωση πετυχαίνεται πυκνότητα πολφού ως και 60% σε στερεά κατά βάρος (Φραγκίσκος, 1995). Η υπερχειλίση στην πύκνωση είναι εξίσου σημαντική επειδή το νερό που υπερχειλίζει είναι απαλλαγμένο από στερεά και μπορεί να επανατροφοδοτηθεί στα κυκλώματα εμπλουτισμού. Κατά την διήθηση, το υλικό φιλτράρεται και πετυχαίνεται η αφυδάτωσή του. Τα μηχανήματα στα οποία επιτελείται η

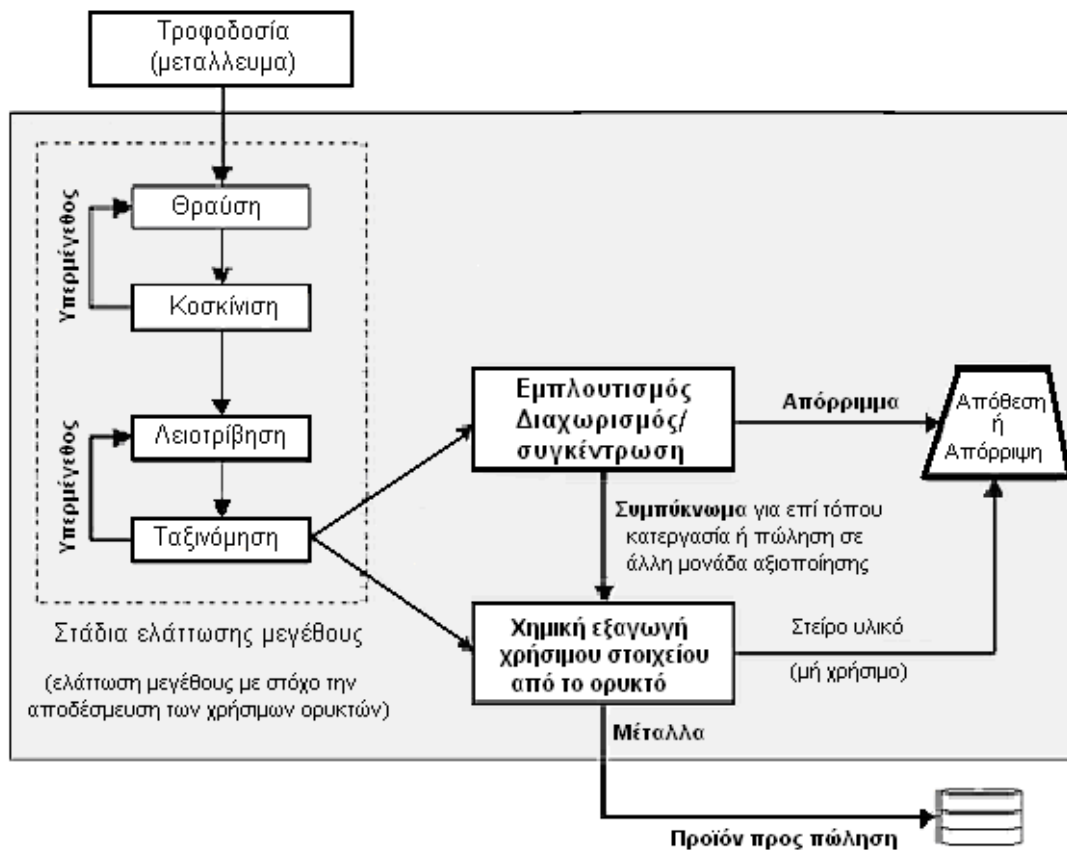
αφυδάτωση είναι ειδικοί διηθητήρες που μπορεί να έχουν τη μορφή κυλίνδρων (κυλινδρικοί), δίσκων (δισκοφόροι) ή πιεστηρίων (φιλτρόπρεσες). Η τελική υγρασία του τελικού προϊόντος είναι περίπου 10% για υδρόφοβα τεμαχίδια και περίπου 20% για υδρόφιλα τεμαχίδια (Φραγκίσκος, 1995).



Εικόνα 2.13: Κυλινδρικός Πυκνωτής. (<http://junyue-tech.com/en/index.php?a=shows&catid=5&id=24>)



Εικόνα 2.14: Διηθητήρας Συμπίεσης Νερού LAROX. (<https://www.outotec.com/explore/>)



Εικόνα 2.15: Διάγραμμα Ροής Εμπλουτισμού. (Τσακαλάκης, 2018)

2.7 ΔΙΑΘΕΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Η διάθεση των μεταλλευτικών αποβλήτων διακρίνεται σε 2 κατηγορίες:

- 1) Τους σωρούς (dumps).
- 2) Τα φράγματα (dams) ή χώρους κατακράτησης (impoundements).

Στους σωρούς συνήθως αποτίθενται διάφορα αποσαρθρώματα ή στείρα υλικά των περιβάλλοντων πετρωμάτων ή πετρώματα τα οποία συμπεριλαμβάνουν το χρήσιμο συστατικό, σε περιεκτικότητα μικρότερη από το “cut off grade”. Η έννοια του cut off grade, υποδηλώνει πως η εκμετάλλευση και επεξεργασία των μεταλλευμάτων με περιεκτικότητα κάτω από το συγκεκριμένο όριο, χαρακτηρίζεται ως αντιοικονομική, είτε γιατί τα έξοδα υπερκαλύπτουν τα έσοδα είτε επειδή το ποσοστό κέρδους δεν είναι ικανοποιητικό. Τα υλικά αυτά, προέρχονται από τις διαδικασίες εξόρυξης οι οποίες μπορεί να πραγματοποιούνται είτε με μεθόδους ανατίναξης είτε με μηχανικές μεθόδους (κοπή). Σε αυτή τη μέθοδο εξόρυξης, ο χώρος απόθεσης επιλέγεται με ειδικά κριτήρια, και η απόθεση του υλικού γίνεται είτε με χωματοουργικά αυτοκίνητα είτε με αντλίες αν αναφερόμαστε σε υλικό με

μορφή πολφού. Ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της μεθόδου απόθεσης είναι το ποσοστό υγρασίας των αποβλήτων επειδή αυτά αποτίθενται μηχανικά χωρίς ή με μικρό βαθμό συμπίκνωσης (Χιόνης, 2016).



Εικόνα 2.16: Σωρός από αμμώδη στείρα. (Χιόνης, 2016)



Εικόνα 2.17: Χωματουργικά Αυτοκίνητα

Με την διαδικασία της απλής απόθεσης σε σωρούς, τα απόβλητα αποτίθενται χωρίς συμπίκνωση σε σωρούς μεγάλου ύψους, σε μικρό διαθέσιμο χώρο. Σαν μέθοδος, έχει

πολλά πλεονεκτήματα όπως την εξοικονόμηση χώρου και χρόνου και γι αυτό εφαρμόζεται πολύ συχνά. Τα μειονεκτήματα όμως που παρουσιάζει είναι και αυτά αξιοσημείωτα και έτσι πρέπει να υπάρχει μέριμνα για την αντιμετώπισή τους.

Η ευστάθεια αποτελεί έναν από τις πιο δυσμενείς δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστούν σε αυτή τη μέθοδο διότι πολλές φορές δεν είναι εύκολο να ελεγχθεί η δημιουργία του επιθυμητού πρανούς και σε συνδυασμό με την χαλαρή κατάσταση στην οποία βρίσκεται το υλικό αλλά και την αυξημένη υδροπερατότητα, μπορεί να προκληθεί εύκολα υπερπίεση στους πόρους και γενικότερα, αστοχία στην θεμελίωση της απόθεσης. Επιπλέον, η ελεύθερη επιφάνεια του σωρού πολλές φορές είναι υδροπερατή, με αποτέλεσμα να διεισδύει ένα σημαντικό ποσοστό του νερού της βροχής στο εσωτερικό. Το νερό αυτό στη συνέχεια μπορεί να αντιδράσει με απόβλητα που περιέχουν οξέα όπως H_2SO_4 ή άλλα βαρέα μέταλλα που με τη σειρά τους μπορούν να ρυπάνουν το έδαφος ή και τα περιβάλλοντα επιφανειακά και υγρά νερά.

Τα μεταλλευτικά τέλματα, μπορεί να έχουν διάφορες μορφές αλλά όλα λειτουργούν κατακρατώντας ή περικλείοντας λεπτομερή τα οποία είναι συνήθως απόβλητα. Τέτοια απόβλητα αποτίθενται υδραυλικά είτε σαν λάσπη χαμηλού ιζώδους είτε σαν περισσότερο ιζώδη τέλματα. Σε κάποιες περιπτώσεις το ιζώδες είναι αρκετά υψηλό και δίνεται η δυνατότητα μεταφοράς αυτών μέσω ταινίας. Οι παρακάτω τύποι των χώρων απόθεσης για τα λεπτομερή απόβλητα είναι οι πιο διαδεδομένοι.

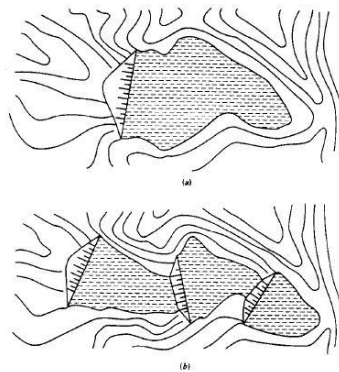
2.7.1 ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΚΟΙΛΑΔΑΣ (CROSS VALLEY IMPOUNDMENTS)

Τέτοιες αποθέσεις επιτυγχάνονται με τη δημιουργία ενός επιχώματος ή φράγματος εγκάρσια σε μια κοιλάδα και ο χώρος πίσω από αυτό, πληρώνεται με τα απόβλητα.



Εικόνα 2.18: Απόθεση κατά μήκος κοιλάδας. (<http://www.tailings.info/storage/containment.htm>)

Cross-Valley Plan View



CROSS VALLEY IMPOUNDMENT - SINGLE AND MULTIPLE

(Extracted from Vick, 1983. *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*)

Εικόνα 2.19: Αποθέσεις κατά μήκος κοιλάδας – σχέδιο. (Χιόνης, 2016)

2.7.2 ΧΩΡΟΙ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕ «ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗ» ΑΝΑΧΩΜΑΤΑ (RING –DYKE IMPOUNDMENTS)

Στην κατηγορία αυτή, κατασκευάζεται ένα επίχωμα το οποίο περικλείει ένα χώρο εντός του οποίου συσσωρεύονται τα απόβλητα. Συνήθως κατασκευάζονται σε επίπεδες περιοχές μπορούν δε να είναι και σε ελαφρά επικλινές έδαφος (ημι - δακτυλιοειδής τύπος)

και στην περίπτωση αυτή η ανάντη πλευρά του αναχώματος συμπίπτει με το υπάρχον επικλινές έδαφος.



Εικόνα 2.20: Χώρος απόθεσης με περιμετρικό ανάχωμα «δακτυλοειδούς τύπου» με τρία κελιά απόθεσης. (<http://www.tailings.info>)

2.7.3 ΧΩΡΟΙ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΕΝΤΟΣ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ (IN-PIT IMPOUNDMENTS)

Αυτός ο τύπος εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου τα απόβλητα χρησιμοποιούνται για την πλήρωση μιας υπάρχουσας εκσκαφής στην οποία έχουν λήξει οι διεργασίες εξόρυξης. Αποτελεί σημαντική μέθοδο απόθεσης επειδή με αυτόν τον τρόπο, απαλλάσσεται η μεταλλευτική εταιρεία από την έκδοση άδειας νέου χώρου απόθεσης υλικών, όπως και φυσικά εξοικονομεί χρήματα. Όταν τα απόβλητα χαρακτηρίζονται ως περισσότερο επιβλαβή, τότε αποτίθενται μέσα σε κατάλληλα επενδυμένες εκσκαφές, στον ίδιο χώρο.

Οι παραπάνω τύποι τελμάτων αναφέρονται σε απόβλητα χαμηλού ιξώδους και χαμηλής πυκνότητας, τα οποία αποτίθενται υδραυλικά. Επίσης ο διαχωρισμός των κοκκομετρικών κλασμάτων γίνεται βαρυτικά κατά την απόθεση της λάσπης. Για απόβλητα υψηλότερης σχετικής πυκνότητας εφαρμόζονται ειδικά συστήματα διαχωρισμού και μεταφοράς των διαφόρων κλασμάτων.



Εικόνα 2.21: Απόθεση αποβλήτων επεξεργασίας μεταλλεύματος Χρυσού εντός χώρου ανοικτής εκσκαφής. (www.srk.com.au)

2.8 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΛΜΑΤΩΝ

Τα τέλματα αποτίθενται είτε σε στερεά τεμαχίδια είτε υπό τη μορφή πολφού χαμηλής υγρασίας. Στην γραμμή επεξεργασίας του μεταλλεύματος βρίσκονται στο τέλος και έτσι εμφανίστηκε η αγγλική ονομασία τους «tailings», βρίσκονται δηλαδή στην «ουρά» - tail. Τα στερεά απορρίμματα, μπορούν να προκύψουν από διάφορες διεργασίες, όπως στην κατάτμηση και στον μαγνητικό διαχωρισμό. Τα στερεά μέρη των τελμάτων συνήθως αποτελούνται από το πρωτογενές μέταλλευμα ή στείρο υλικό και δευτερογενή ορυκτά που σχηματίστηκαν κατά την φάση της αποσάθρωσης. Είναι σύνηθες φαινόμενο, τα απορρίμματα που έχουν υποστεί επεξεργασία με χημικές προσθήκες, όπως δηλαδή συμβαίνει στην υδρομεταλλουργία και στην (διαφορική) επίπλευση, να απορρίπτονται σε μορφή πολφού επειδή το περιβάλλον, είναι υδάτινο. Εξαιτίας αυτών των ιδιοτήτων, το απόβλητο μπορεί να μεταφερθεί ευκολότερα στο περιβάλλον, σε σχέση με το πρωτογενές μέταλλευμα, ιδιαίτερα αν τα φράγματα παρουσιάζουν έλλειψη στεγανότητας στον πυθμένα και αστοχίες στα πρανή τους. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο παίζουν και τα χαρακτηριστικά των περιβαλλόντων σχηματισμών όπως το υλικό του υποβάθρου, η ύπαρξη ποταμών και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Τα τέλματα σε μορφή πολφού, αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς κινδύνους για το περιβάλλον. Εκτός από τη σύσταση του μεταλλεύματος που περιλαμβάνει τοξικά μέταλλα, υπάρχουν υψηλές συγκεντρώσεις χημικών ενώσεων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν, στις παραπάνω διεργασίες. Επίσης, η λεπτόκκοκη υφή τους, τα καθιστά ευάλωτα σε αποσάθρωση και μεταφορά. Το λεπτόκκοκο υλικό των τελμάτων υπό μορφή πολφού, αποτελείται κυρίως από το στείρο υλικό, το οποίο έχει διαχωρισθεί από τα χρήσιμα συστατικά. Παρ' όλα αυτά, επειδή η ανάκτηση των χρήσιμων συστατικών δεν

μπορεί να φτάσει το 100%, τα τέλματα περιέχουν μικρές ποσότητες μεταλλευμάτων, που στην περίπτωση του μεταλλεύματος της Κίρκης, αυτά τα υλικά είναι θειούχα.

Τα απόβλητα που προέρχονται από τη μεταλλευτική βιομηχανία, μπορούν να έχουν τη μορφή αδρομερών εδαφικών υλικών, θραύσματα βράχου ή και τη μορφή λεπτομερών αποβλήτων. Οι διάφορες μορφές των αποβλήτων συνήθως αποτίθενται ξεχωριστά, ανάλογα και με την τελική τους χρήση. Για παράδειγμα, τα λεπτομερή εδαφικά υλικά έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν στην τελική κάλυψη σωρών από αδρομερή υλικά τα θραύσματα. Τα αδρομερή υλικά έχουν την δυνατότητα αν έρθουν σε ανάμιξη με λεπτομερή κλάσματα να αποτεθούν σε σωρούς με ή χωρίς συμπύκνωση ή και να χρησιμοποιηθούν ακόμη και στη λιθογόμωση βημάτων εκσκαφής σε υπόγεια μεταλλεία.



Εικόνες 2.22-2.26: Παραδείγματα εγκαταλειμμένων χημικών αντιδραστηρίων στο εσωτερικό του εργοστασίου. (Αρίκας et al., 2007)

Τα τέλματα γενικά μπορούν να χαρακτηριστούν ως εδαφικοί σχηματισμοί, με μηχανική συμπεριφορά τέτοια που να μοιάζει σε αυτήν των φυσικών εδαφών, εμφανίζοντας παράλληλα και αρκετές διαφοροποιήσεις. Μερικές φυσικές ιδιότητες όπως η κοκκομετρία, το ειδικό βάρος, η σχετική και επί τόπου πυκνότητα, η διαπερατότητα, τα χαρακτηριστικά στερεοποίησης και συμπιεστότητας, η πλαστικότητα τους και οι παράμετροι της

διατμητικής αντοχής παίζουν σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό της απόθεσης, στην ευστάθεια της κατασκευής αλλά και στις μεθόδους αποστράγγισης που θα ληφθούν. Οι παραπάνω ιδιότητες αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους, καθορίζουν την γενικότερη συμπεριφορά του υλικού πάνω στην κατασκευή αλλά και την κατάσταση της ίδιας της κατασκευής.

- Η **πλαστικότητα** ενός υλικού, δείχνει το ποσοστό του αργλικού κλάσματος παρουσιάζοντας μέσω του δείκτη πλαστικότητας PL το εύρος της περιεχόμενης υγρασίας εντός της οποίας το υλικό έχει πλαστική συμπεριφορά. Σε γενικές γραμμές, τα απόβλητα με υψηλό δείκτη PL είναι από εμπειρικό κανόνα λεπτομερή με μικρή υδραυλική αγωγιμότητα και φτωχότερα χαρακτηριστικά αποστράγγισης. Αντίθετα, τα απόβλητα και γενικότερα τα υλικά με μικρή ή μηδενική πλαστικότητα είναι πιο χονδρόκοκα (αδρομερή) και παρουσιάζουν υψηλότερη διαπερατότητα.
- Η **στερεοποίηση και η συμπίεστικότητα** συνδέονται με την πυκνότητα, τον λόγο κενών και το κοκκομετρικό μέγεθος. Μέσω αυτών των χαρακτηριστικών είναι δυνατό να διερευνηθεί η μεταβολή του όγκου των αποθέσεων κατά τη διάρκεια των φορτίσεων και των αποστραγγίσεων, σε συνάρτηση με τον χρόνο.
- Η **σχετική πυκνότητα** επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά του υλικού ενώ η **επί τόπου πυκνότητα** καθορίζει το συνολικό απαιτούμενο χώρο για την επιτυχή απόθεση του υλικού.
- Οι ιδιότητες των αποβλήτων μπορούν να υπολογιστούν μέσω εργαστηριακών μεθόδων και επί τόπου δοκιμών.
- Πέραν των χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τις παραμέτρους ευστάθειας και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του έργου, πρέπει να γίνεται διερεύνηση της **χημικής σύστασης** των υλικών για να υπάρχει επίγνωση των πιθανών κινδύνων αλλά και για να επιτευχθεί ο σωστός σχεδιασμός της απόθεσης.

2.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή στην οποία σχεδιάζεται να πραγματοποιηθεί απόθεση αποβλήτων παίζει σημαντικό ρόλο στην οικονομικότητα του έργου, στην ευκολία υλοποίησης του σχεδιασμού και για την ασφάλεια της κατασκευής, των ανθρώπων και του περιβάλλοντος. Η διαδικασία της κατάλληλης θέσης προκύπτει από την απόρριψη των ακατάλληλων θέσεων αρχικά και

ύστερα των λιγότερων κατάλληλων και οι παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτήν την απόφαση, παρουσιάζονται παρακάτω.

- **Η περιοχή των εγκαταστάσεων στις οποίες γίνεται επεξεργασία του υλικού** αποτελεί έναν από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά για την επιλογή της περιοχής απόθεσης καθώς το κόστος της μεταφοράς των αποβλήτων είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Η μεταφορά των υλικών αυτών πραγματοποιείται με φορτηγά ή με ειδικά συστήματα αντλιών. Συνεπώς, επιθυμητές τοποθεσίες είναι αυτές που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας με απώτερο σκοπό την μείωση του τελικού κόστους.
- Το **υψόμετρο** και η **μορφολογία** των εδαφών της περιοχής είναι εξίσου σημαντικοί παράγοντες καθώς, σε μια ευνοϊκή τοποθεσία είναι δυνατό να σχεδιαστεί φράγμα με μικρό ύψος. Τα επιχώματα ύψους πάνω των 60m. παρουσιάζουν συχνά προβλήματα στον σχεδιασμό αλλά και στην ευστάθεια του έργου.
- Τα **υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής** πρέπει να ευνοούν τον σκοπό του έργου διότι το νερό μπορεί να δημιουργήσει ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες. Συγκεκριμένα, η επιφανειακή απορροή πρέπει να επιτρέπει την απορροή από το χώρο της απόθεσης και αν είναι δυνατόν, να ελαχιστοποιείται η εισροή του νερού εντός του χώρου. Επίσης, η κατασκευή του έργου κοντά στα όρια της υδρολογικής λεκάνης βοηθά στην εξοικονόμηση κόστους συσχετιζόμενου με επιπρόσθετα έργα διευθέτησης της επιφανειακής απορροής.
- Πληροφορίες σχετικά με την **γεωλογία της περιοχής**, μπορούν να αναγνωρίσουν κάποιον γεωλογικό παράγοντα που να δημιουργεί έντονα προβλήματα στην κατασκευή του έργου, ο οποίος να μη μπορεί να ανατραπεί. Επιπλέον, οι **υδρογεωλογικές συνθήκες** επιδρούν άμεσα στις παραμέτρους κατασκευής. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και η υδροπερατότητα των σχηματισμών αλλά και του υλικού απόθεσης, είναι τα πιο σημαντικά στοιχεία στο κομμάτι αυτό. Επίσης, οι **γεωτεχνικές έρευνες** για την πλήρη γνώση των σχηματισμών της περιοχής συμβάλλουν στον ασφαλή σχεδιασμό του έργου. Οι μετρήσεις γίνονται είτε κατά την διάρκεια των γεωτρητικών διεργασιών όπως ακριβώς εφαρμόζονται οι επί τόπου δοκιμές (SPT, MAAG), είτε στο εργαστήριο συλλέγονται τα δείγματα από τα «καρότα» των γεωτρήσεων και αναλύονται στα διαθέσιμα μηχανήματα.
- Ένα στοιχείο που διερευνάται πάντοτε στις γεωτεχνικές μελέτες, είναι η **αντοχή των σχηματισμών**. Αυτό συμβαίνει επειδή η **θεμελίωση του επιχώματος/ αναχώματος**

πρέπει να εφαρμόζεται σε υπόβαθρο με ικανοποιητική αντοχή αλλά και απουσία διαβρωμένων επιφανειών, που δύνανται να προκαλέσουν αστοχία στην θεμελίωση. Επιπλέον, διερευνάται σε συνδυασμό με το υπάρχον υλικό η υδροπερατότητά του επειδή σε περιπτώσεις ταχείας φόρτισης σε περιοχές όπου υπάρχουν στρώματα κορεσμένης αργίλου, μπορεί να προκληθεί υπερπίεση του νερού των πόρων και να προκληθούν φαινόμενα διασωλήνωσης.

- Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι η **σεισμικότητα της ευρύτερης περιοχής**. Κατά γενικό κανόνα, γίνεται διερεύνηση των πλησιέστερων στο έργο ρηγμάτων και ύστερα γίνονται σεισμικές μελέτες πάνω σε αυτά με στόχο την επίδραση των σεισμικών δράσεων που επιδρούν στο έργο κατά την διαδικασία της σεισμική διέγερσης.

2.10 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Πολλές φορές, το υλικό του επιχώματος που χρησιμοποιείται, προέρχεται από τα απόβλητα για τον λόγο πως το συνολικό κόστος της κατασκευής μειώνεται κατά μεγάλο ποσοστό. Ενώ μπορεί να χαρακτηριστεί ως η πιο οικονομική μέθοδος, τα μειονεκτήματα της είναι ορατά και η αποφυγή αυτών πρέπει να είναι επιτυχής. Η επιδεκτικότητα στη διάβρωση, η ευαισθησία του λεπτομερούς κλάσματος στον πάγο και τα φαινόμενα ρευστοποίησης κατά τη σεισμική φόρτιση αποτελούν ένα σημαντικό μέρος των προβλημάτων που δημιουργούνται σε αυτή τη μέθοδο. Δύο κλασσικές λύσεις που εφαρμόζονται συχνά σε τέτοια έργα είναι η χρήση κατάλληλου αδρομερούς υλικού και η συμπίκνωση του επιχώματος στον επιθυμητό βαθμό. Η κατασκευή τέτοιων φραγμάτων, μπορεί να εφαρμοστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

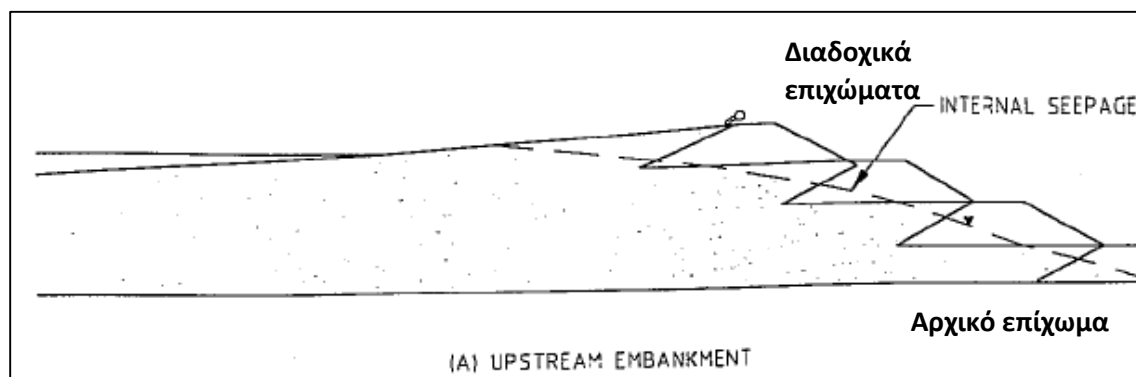
- 1) Προς τα ανάντη.
- 2) Προς τα κατόντη.
- 3) Με κεντρική ανάπτυξη.

2.10.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΝΑΝΤΗ (UPSTREAM METHOD)

Η μέθοδος αυτή είναι η παλαιότερη αλλά και η οικονομικότερη από όλες τις υπόλοιπες και αρχίζει με ένα αρχικό φράγμα – επίχωμα που κατασκευάζεται στο κατόντη άκρο της περιοχής απόθεσης. Σημαντικό στοιχείο που πρέπει να ληφθεί στον σχεδιασμό είναι ο

έλεγχος της κυκλοφορίας του νερού και η ασφαλής απορροή του, χωρίς να τίθεται κίνδυνος εσωτερικής διάβρωσης (Χιόνης, 2016). Τα απόβλητα αποτίθενται από την στέψη προς τα ανάντη περιφερειακά με εκτόξευση ή αγωγούς έτσι ώστε να σχηματίζονται αναχώματα. Σε μικρή απόσταση από το αρχικό επίχωμα αποτίθενται τα πιο αδρομερή υλικά, διότι στη συνέχεια το επόμενο επίχωμα θα θεμελιωθεί πάνω σε αυτά. Πριν την κατασκευή του επόμενου επιχώματος, πραγματοποιείται μηχανική συμπύκνωση του υλικού των αποτιθέμενων αναχωμάτων. Βασική παράμετρος για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι πως η σχηματιζόμενη επιφάνεια στην οποία θα θεμελιωθεί το επόμενο επίχωμα, πρέπει να είναι επαρκείς και γι' αυτό το λόγο, η κοκκομετρία του υλικού πρέπει να είναι σωστά διαβαθμισμένη και να αποκλείονται τα κλάσματα που έχουν μικρό ποσοστό άμμου (Χιόνης, 2016). Άλλοι παράγοντες που δημιουργούν δυσκολίες στην μέθοδο αυτή εκτός από την κατάλληλη κοκκομετρική σύσταση είναι οι παρακάτω (Χιόνης, 2016):

- 1) Ο έλεγχος της φρεάτιας στάθμης.
- 2) Η χωρητικότητα σε νερό και η έκταση της λίμνης.
- 3) Η επιδεκτικότητα σε φαινόμενα ρευστοποίησης.
- 4) Ο ρυθμός ανύψωσης.

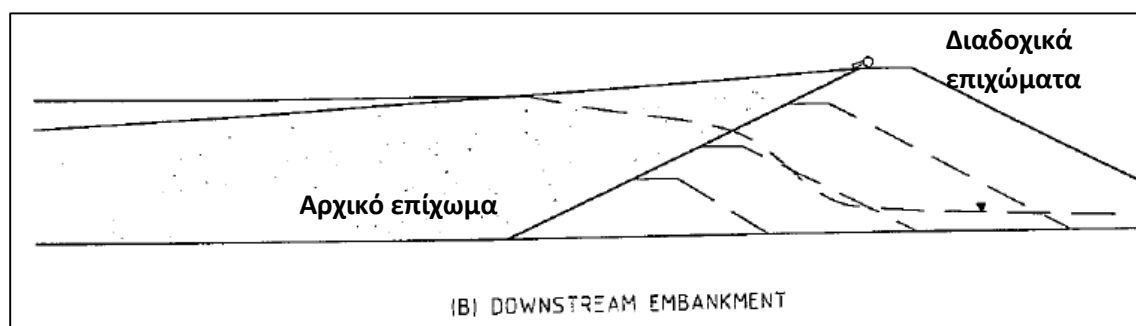


Εικόνα 2.27: Η μέθοδος κατασκευής προς τα ανάντη (upstream method). (Χιόνης, 2016)

2.10.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΑΝΤΗ (DOWNSTREAM METHOD)

Οι απαιτήσεις ενός φράγματος συγκράτησης μεταλλευτικών τελμάτων που κατασκευάζεται με εξέλιξη προς τα κατάντη είναι παρόμοιες με αυτές ενός συμβατικού χωμάτινου φράγματος συγκράτησης νερού. Η μέθοδος ξεκινά και αυτή με τη κατασκευή ενός επιχώματος στη βάση με κατάλληλα συμπυκνωμένα υλικά, τα οποία δεν είναι

απαραίτητα υλικά τελμάτων αλλά υλικά από δανειοθάλαμους και μπορεί να είναι είτε αδρομερή για διευκόλυνση στην αποστράγγιση είτε λεπτομερή για περιορισμό των διαρροών. Αν επιλεγθούν λεπτομερή υλικά για την κατασκευή, τότε στο αρχικό φράγμα ενσωματώνονται και στραγγιστήρια. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται έτσι γιατί τα διαδοχικά στάδια ανύψωσης γίνονται επί του προς τα κατάντη πρανούς του προηγούμενου φράγματος, μετακινώντας έτσι το κέντρο του φράγματος προς τα κατάντη καθώς αυτό προοδευτικά ανυψώνεται. Κατά την κατασκευή, το αδρομερές κλάσμα των αποβλήτων διασκορπίζεται με τη μορφή στρωμάτων ή σωρών και στη συνέχεια συμπυκνώνονται. Γενικά, αν δεν επαρκούν για την κατασκευή του φράγματος, αναμιγνύονται με υλικά από δανειοθάλαμο. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί υλικό βραχέδους σχηματισμού, εξαιτίας του υψηλού πορώδους στο ανάντη τμήμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στεγανωτική μεμβράνη ή φίλτρο για να περιοριστεί η διείσδυση των υγρών φάσεων των αποβλήτων στο εσωτερικό του επιχώματος (Χιόνης, 2016). Η μέθοδος προς τα κατάντη, προσφέρει μεγαλύτερη ευστάθεια στην κατασκευή και γίνεται ευκολότερα η συμπύκνωση. Επίσης μπορούν να ενσωματωθούν μέτρα αποστράγγισης και η θεμελίωση του επόμενου επιχώματος δεν εξαρτάται δομικά, από τις αποθέσεις των αποβλήτων. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το αυξημένο κόστος καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις σε υλικό επιχωμάτωσης και σε διαθέσιμο χώρο.

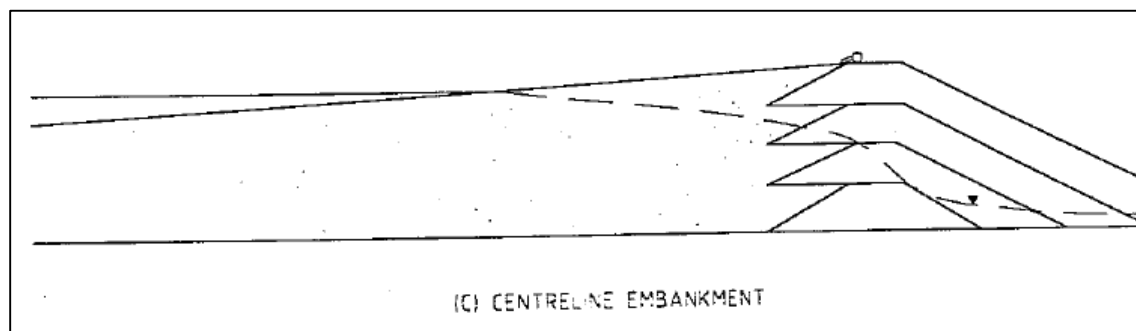


Εικόνα 2.28: Μέθοδος κατασκευής προς τα κατάντη (downstream method). (Χιόνης, 2016)

2.10.3 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (CENTERLINE METHOD)

Η μέθοδος κατασκευής του επιχώματος με κεντρική ανάπτυξη είναι όμοια με τις προηγούμενες μεθόδους διότι και αυτή αρχίζει με την κατασκευή ενός επιχώματος βάσης και επειδή τα απόβλητα διασκορπίζονται από τη στέψη του. Τα τέλματα που αποτίθενται στο κατάντη τμήμα συμπυκνώνονται και βελτιώνουν τις συνθήκες ευστάθειας ενώ αυτά που βρίσκονται προς τα ανάντη, σχηματίζουν «ακτογραμμή». Είναι εύκολο να τοποθετηθούν κατά τη φάση κατασκευής ζώνες αποστράγγισης και επειδή δεν απαιτούνται μεγάλες

επιφάνειες αδρομερών υλικών για το σχηματισμό «ακτής», η μέθοδος κρίνεται κατάλληλη για τέλματα με μικρό ποσοστό σε άμμο. Σε αυτό το επίχωμα δεν μπορούν να αποθηκευτούν μεγάλες ποσότητες νερού αλλά για μικρή διάρκεια παραμονής αυτού, όπως ύστερα από μια έντονη βροχόπτωση, η ευστάθεια του έργου δεν θα επηρεαστεί (Χιόνης, 2016). Επίσης, η μέθοδος προσφέρει αντοχή έναντι σεισμικών φορτίσεων.



Εικόνα 2.29: Κεντρική μέθοδος κατασκευής φράγματος. (Χιόνης, 2016)

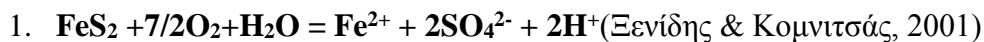
2.11 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΛΛΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι παραπάνω μέθοδοι κατασκευής φραγμάτων, αναφέρονται στην χρήση κατάλληλων υλικών από τα ίδια τα απόβλητα, όμως κάποια τμήματα όπως το αρχικό φράγμα βάσης μπορεί να περιλαμβάνει και άλλα υλικά υπό την προϋπόθεση πως πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές στις παραμέτρους όπως αντοχή, χημική σύσταση, διαπερατότητα. Γενικά, όταν το φράγμα κατασκευάζεται με δανεικά υλικά και τα απόβλητα περιέχουν και σημαντική ποσότητα νερού η κατασκευή γίνεται όπως ακριβώς αυτή ενός τυπικού χωμάτινου φράγματος νερού, εμπεριέχοντας στεγανό πυρήνα, ζώνες στράγγισης και φίλτρα (Χιόνης, 2016). Παράλληλα, αφού τα φράγματα σχεδιάζονται με βασικό στόχο τον περιορισμό της στράγγισης διαμέσου του πυρήνα, προτιμάται συχνά η τοποθέτηση λεπτομερούς λάσπης από απόβλητα επί της ανάντη επιφάνειας του φράγματος ως επιπλέον στεγανωτική επένδυση.

2.12 ΟΞΙΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ

Μία χαρακτηριστική επίπτωση από λανθασμένο σχεδιασμό απόθεσης τελμάτων ή και γενικότερα των απορριμμάτων, είναι η όξινη απορροή μεταλλείων (OAM). Η OAM ορίζεται ως το αποτέλεσμα της οξειδωσης των θειούχων μεταλλευμάτων και αποβλήτων, όταν αυτά εκτίθενται στη συνδυασμένη δράση του νερού και του οξυγόνου (Ξενίδης & Κομνιτσάς, 2001). Θεωρείται το χειρότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα που μπορεί να

προκληθεί από τις μεταλλευτικές δραστηριότητες καθώς χαρακτηρίζεται από έντονα όξινο περιβάλλον με τιμές pH από 1,5 έως 3,5 και υψηλές συγκεντρώσεις τοξικών ιόντων, με αποτέλεσμα να προκαλεί περιβαλλοντικά αποτυπώματα και ρύπανση, αρκετή ώστε να επιβαρύνει την υγεία των ανθρώπων αλλά και των ζώων. Οι κύριες πηγές της OAM, είναι οι επιφανειακές και υπόγειες μεταλλευτικές δραστηριότητες αλλά επίσης και οι σωροί υπερκείμενων και στείρων και τα τέλματα εμπλουτισμού (Ξενίδης & Κομνιτσάς, 2001). Όταν υπάρχει επαφή αυτών των πηγών με επιφανειακά και υπόγεια νερά, τότε μπορεί να επιβαρύνει το περιβάλλον άμεσα και σε μεγάλο βαθμό. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε ορυχεία άνθρακα και λιγνίτη και σε μεταλλεία πολυμεταλλικών θειούχων μεταλλευμάτων. Η δημιουργία της OAM οφείλεται σε μια σειρά από χημικές αντιδράσεις που περιλαμβάνουν την παραγωγή θειϊκού οξέος και την εξουδετέρωση της παραγόμενης οξύτητας από ανθρακικά κυρίως ορυκτά. Το θειϊκό οξύ είναι αποτέλεσμα της οξείδωσης των θειούχων ορυκτών ύστερα από την συνδυασμένη επίδραση του νερού με το οξυγόνο. Η ύπαρξη τυχόν βακτηρίων, αυξάνουν την ταχύτητα των αντιδράσεων αυτών. Το πιο συχνά παρατηρούμενο θειούχο ορυκτό είναι ο σιδηροπυρίτης. Η εξίσωση οξείδωσης από την οποία αντιπροσωπεύεται είναι η ακόλουθη:



Τα ιόντα υδρογόνου που απελευθερώνονται από την παραπάνω εξίσωση, οδηγούν σε αύξηση της οξύτητας του νερού μειώνοντας περαιτέρω το PH. Με τη σειρά του αυτό, αντιδρά εκ νέου με τα απορρίμματα και απελευθερώνει μεγαλύτερες ποσότητες βαρέων μετάλλων τα οποία βρίσκονται στο διάλυμα υπό τη μορφή συμπλόκων ή στοιχειακών ιόντων (Ξενίδης & Κομνιτσάς, 2001). Καθώς το PH αυξάνεται, ο Fe^{3+} υδρολύεται και σχηματίζει $\text{Fe}(\text{OH})_3$ απελευθερώνοντας επίπλέον ιόντα H^+ , σύμφωνα με τις ακόλουθες στοιχειομετρικές εξισώσεις :



Τα ιόντα H^+ , που απελευθερώνονται, από την εξίσωση (3), αυξάνουν επιπρόσθετα την οξύτητα του νερού, χαμηλώνοντας εκ νέου το pH. Τόσο ο Fe^{2+} όσο και ο Fe^{3+} , μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλη απόσταση, από την περιοχή των θειούχων απορριμμάτων, πριν πραγματοποιηθεί η εξίσωση (3). Συνεπώς η ρύπανση των νερών από την όξινη απορροή, μπορεί να εκτείνεται σε απόσταση αρκετών χιλιομέτρων από την πηγή των θειούχων.

2.12.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΞΙΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟ ΤΟΥ ΑΓΙΟΥ ΦΙΛΙΠΠΟΥ

Τα φαινόμενα όξινης απορροής που συναντιούνται στην περιοχή του μεταλλείου Αγίου Φιλίππου, μπορούν να ταξινομηθούν γενικά σε 2 μεγάλες κατηγορίες:

- 1) Τα συνεχή φαινόμενα.
- 2) Τα παροδικά φαινόμενα.

Τα συνεχή φαινόμενα όξινης απορροής, παρατηρούνται στη θέση της ανοικτής εκσκαφής του μεταλλείου, της οποίας ο πυθμένας (πλατεία) καλύπτεται σταθερά από νερό, κατά την υγρή και ξηρή περίοδο δηλαδή δημιουργώντας έτσι μία λίμνη. Η ουσιώδης διαφορά είναι η αυξομείωση της λίμνης, ανάλογα με τις περιόδους, με τη μέγιστη στάθμη να επιτυγχάνεται κατά την χειμερινή περίοδο. Τότε παρατηρούνται επιπλέον και φαινόμενα υπερχειλίσης με το νερό που υπερχειλίζει, να οδεύει προς το ρέμα Κιρκάλων (Λιακοπουλος, 2009). Τα παροδικά φαινόμενα όξινης απορροής είναι ύστερα από βροχοπτώσεις, στις περιοχές αποθέσεις των σφρών των μεταλλευτικών απορριμμάτων γύρω από την ανοιχτή εκσκαφή.



Εικόνα 2.30: Όξινη Απορροή στην πλατεία του υπαίθριου μεταλλείου Αγίου Φιλίππου.(Λιακοπουλος, 2009)

2.12.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΞΙΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Όξινη Απορροή συναντάται επίσης και στην περιοχή του εργοστασίου εμπλουτισμού, στις υπάρχοντες λεκάνες των τελμάτων, οι οποία σχεδιάστηκαν για να συγκρατήσουν τα απορρίμματα της διαδικασίας διαχωρισμού του μεταλλεύματος από το στείρο. Η μέθοδος εμπλουτισμού ήταν η διαφορική επίπλευση, μία συνήθης μέθοδος για τον διαχωρισμό θειούχων μεταλλευμάτων. Το ποσοστό εύρος της ανάκτησης ήταν 50% – 55% και για να αυξηθεί, έγινε χρήση διαφόρων χημικών όπως ξανθογονικά άλατα, έλαια εμπλουτισμού, καυστικό νάτριο, θειικός ψευδάργυρος, πυριτικό δινάτριο και ενώσεις κυανίου όπως κυανιούχο νάτριο (Αρίκας et al., 2007).

Το χαρακτηριστικό πρόβλημα που προκαλεί τα φαινόμενα όξινης απορροής στην περιοχή αυτή είναι το ότι δεν έχουν ληφθεί μέτρα στεγανοποίησης του πυθμένα των λεκανών με αποτέλεσμα να παρατηρούνται αύξηση της στάθμης και υπερχειλήσεις των επικίνδυνων αποβλήτων σε περιόδους βροχοπτώσεων. Επιπλέον, οι λεκάνες αυτές βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τη συμβολή των ρεμάτων Κιρκάλων και Ειρήνη και έτσι, το μεγαλύτερο ποσοστό των νερών που διαφεύγουν, καταλήγουν στο ρέμα. Τέλος, η υπερχειλίση των τοξικών αυτών αποβλήτων διαβρώνει τις επιφάνειες των αναχωμάτων των λεκανών που βρίσκονται είτε σε κοντινή απόσταση είτε σε χαμηλότερο υψόμετρο δημιουργώντας έτσι ευνοϊκές συνθήκες για εκροή του νερού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι αυλακώσεις που υπάρχουν σε πολυάριθμες λεκάνες, επιτρέποντας έτσι το νερό με την παρουσία των τοξικών αποβλήτων να καταλήξει στο ρέμα.



Εικόνα 2.31: Λεκάνη απόθεσης 3, ύστερα από βροχόπτωση. (Λιακοπουλος, 2009)



Εικόνα 2.32: Έντονη διάβρωση της λεκάνης απόθεσης 5. (Λιακοπουλος, 2009)



Εικόνα 2.33: Όξινη Απορροή από τα μεταλλεία της Tulsequah, Canada.

(<https://csmphotos.wordpress.com/2010/11/05/fifty-plus-years-of-pollution-british-columbias-tulsequah-chief-mine/>)



Εικόνα 2.34: Όξινη Απορροή από μεταλλείο χρυσού στην Νότια Αφρική.

(<http://www.mining.com/south-africa-has-failed-to-protect-locals-from-gold-mine-pollution-harvard-report/>)



Εικόνα 2.35: Ώξινη Απορροή Μεταλλείων στο ποταμό του RioTinto.
(<https://yandex.com/collections/card/5a1c36499f759add1437fbd0/>)



Εικόνα 2.36: Ώξινη Απορροή στην έξοδο της Υπόγειας Στοάς. (Λιακοπουλος, 2009)



Εικόνα 2.37: Όξινη Απορροή απορριμμάτων μεταλλείου Αγίου Φιλίππου. (Λιακόπουλος, 2009)

3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή των λεκανών που συγκρατούν τα τέλματα του εργοστασίου εμπλουτισμού. Γίνεται αναφορά στα γεωμορφολογικά και γεωτεχνικά στοιχεία αυτών. Επιπλέον, γίνεται αναφορά και στα στοιχεία της ευρύτερης περιοχής σχετικά με την γεωλογία, την υδρογεωλογία και τα σεισμικά στοιχεία.

3.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

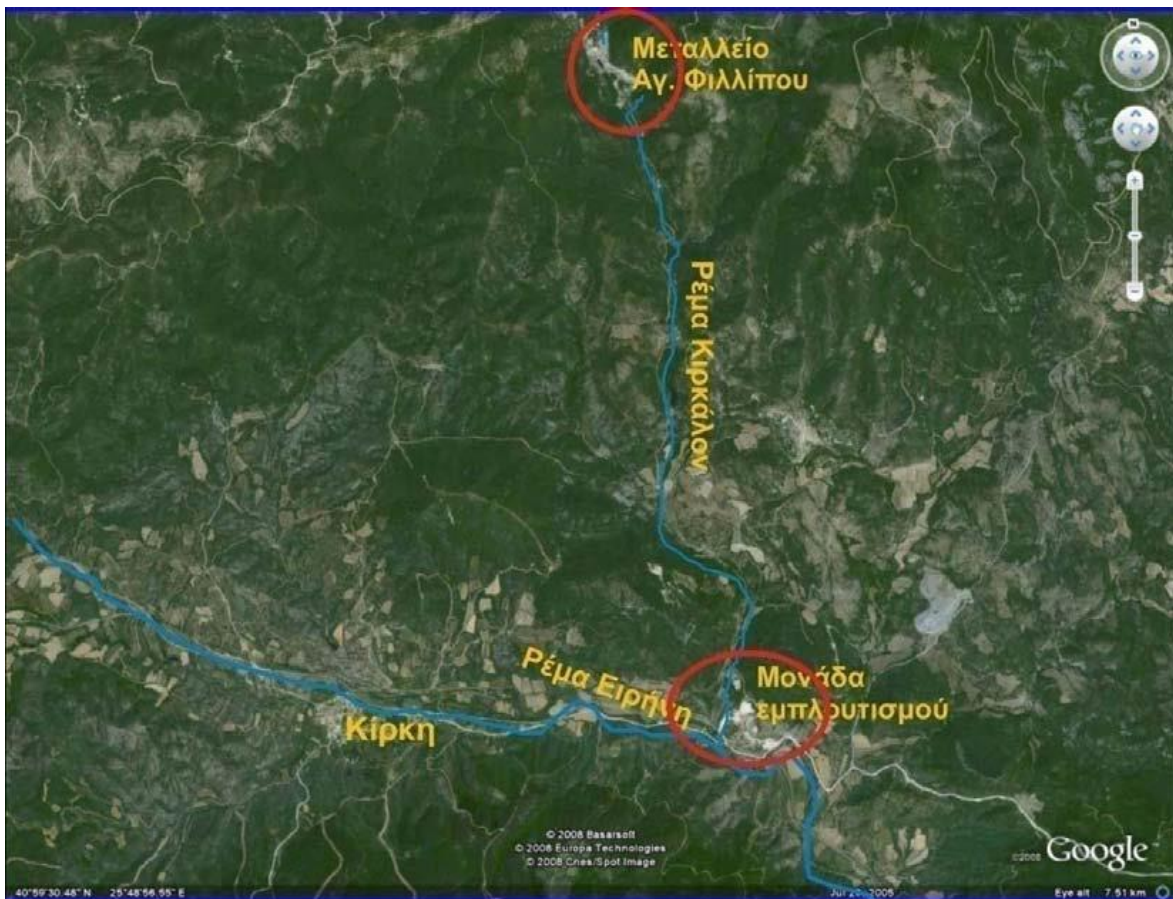
Το πεδίο έρευνας βρίσκεται στις εγκαταστάσεις εμπλουτισμού του μεταλλείου, διότι τα τέλματα έχουν αποθεθεί σε κοντινές αποστάσεις από αυτές. Η περιοχή της Κίρκης, αποτελεί μία ημιορεινή δασώδη περιοχή με απόλυτα υψόμετρα που φτάνουν έως και τα 500m. Το ανάγλυφο μπορεί να χαρακτηριστεί ως έντονο, διότι υπάρχουν φαράγγια και βραχώδεις εξάρσεις. Η Κίρκη, βρίσκεται μέσα στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού «Ειρήνη», ο οποίος ξεκινάει από την περιοχή της Κίρκης και εκβάλλει στο Θρακικό Πέλαγος.



Εικόνα 3.1: Δορυφορική εικόνα της περιοχής ενδιαφέροντος. Διακρίνεται η θέση του μεταλλείου, του εργοστασίου εμπλουτισμού καθώς και των ρεμάτων Κιρκάλον και Ειρήνης. (Λιακόπουλος, 2009)

3.3 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Οι εγκαταστάσεις εμπλουτισμού του μεταλλείου, βρίσκονται σε μία περιοχή όπου συμβάλλει το ρέμα «Κιρκάλων» με το κεντρικό ρέμα «Ειρήνη». Το ρέμα «Κιρκάλων», έχει διεύθυνση Β-Ν και προς τον βορρά, καταλήγει σε περιοχή πολύ κοντά στο μεταλλείο του Αγίου Φιλίππου. Σχετικά με την περιοχή εγκατάστασης του εργοστασίου εμπλουτισμού, βρίσκεται σε μια ομαλή μορφολογική απόληξη σε υψόμετρα μεταξύ 155 – 190 m. Η οριοθέτηση γίνεται ΔΒΔ από το ρέμα Κιρκάλων και ΝΝΑ από το ρέμα Ειρήνη, ενώ σε διεύθυνση ΑΝΑ και ΒΒΑ, παρατηρείται μια αύξηση στις κλίσεις των πρανών. Η συνολική έκταση των εγκαταστάσεων είναι περίπου 300 στρέμματα και μέσα σε αυτά σήμερα βρίσκονται 13 κτιριακές μονάδες και 8 λίμνες απόθεσης τελμάτων.



Εικόνα 3.2: Δορυφορική εικόνα της ευρύτερης περιοχής εξορυκτικών και μεταλλουργικών διεργασιών. Διακρίνονται οι δύο κύριες πηγές ρύπανσης, που δημιουργήθηκαν από τις εξορυκτικές και μεταλλουργικές δραστηριότητες. (Λιακόπουλος, 2009)

3.4 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΩΝ – ΤΕΛΜΑΤΩΝ

Τα μορφολογικά στοιχεία των τελμάτων αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την κατανόηση των συνθηκών που επικρατούν και για αυτό το λόγο παρουσιάζεται παρακάτω η περιγραφή τους. Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν 8 λίμνες απόθεσης αλλά οι 7 από αυτές έχουν πληρωθεί με τέλματα εμπλουτισμού. Ο λόγος είναι πως το μεταλλείο σταμάτησε να λειτουργεί πριν το ξεκίνημα της απόθεσης υλικού προς την λεκάνη αυτή. Συνεπώς, έχει πραγματοποιηθεί μία εκτεταμένη εκσκαφή, πάνω στην οποία και έχουν αποτεθεί υλικά μόνο, από τις επιφανειακές απορροές της ανάντη περιοχής.

3.4.1 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 1

Η λεκάνη 1, βρίσκεται στο ΒΔ άκρο της περιοχής με έκταση περίπου 6 στρεμμάτων. Το 1 στρέμμα ορίζεται ως η έκταση που ισοδυναμεί με 1000 m², δηλαδή (100m. X 10m.). Η λεκάνη αυτή είναι κλειστή και περιέχει ένα αναχωματικό φράγμα από τις 3 πλευρές της με ύψος όχι μεγαλύτερο των τεσσάρων (4)m. Το ύψος αυτό, έχει μετρηθεί με σημείο αναφοράς το επίπεδο βάσης της λεκάνης (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Όπως προαναφέρθηκε, η λεκάνη αυτή δεν περιέχει υλικό τελμάτων εμπλουτισμού, συνεπώς δε τίθεται αναγκαίο να γίνει ανάλυση για την ευστάθεια του αναχώματος.

3.4.2 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 2

Η δεύτερη λεκάνη αποτελεί συνέχεια της πρώτης προς τα νότια και μεταξύ τους χωρίζονται με χωμάτινο ανάχωμα ύψους 1.5 – 4 m. και μήκους 50m. Η έκτασή της είναι περίπου 2.8 στρέμματα και πρόκειται για μία λεκάνη κλειστή που περιέχει αναχωματικό φράγμα το οποίο εκτείνεται στις 3 πλευρές της. Η στέψη του αναχώματος βρίσκεται 1.4m. πάνω από την στάθμη απόθεσης των υλικών πλήρωσης και το ύψος του εξωτερικού πρανούς του αναχώματος προς το ρέμα Κιρκάλων είναι 13m. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Χαρακτηριστικό γεγονός αποτελεί η εποχιακή συγκέντρωση νερού εξαιτίας της στεγανότητας που έχει αποκτήσει η λεκάνη, λόγω των στεγανών υλικών πλήρωσης.



Εικόνα 3.3: Τοπογραφική και γεωλογική αποτύπωση της περιοχής των λεκανών 1 και 2 (Από τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής εργοστασίου εμπλουτισμού Κίρκης). (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)

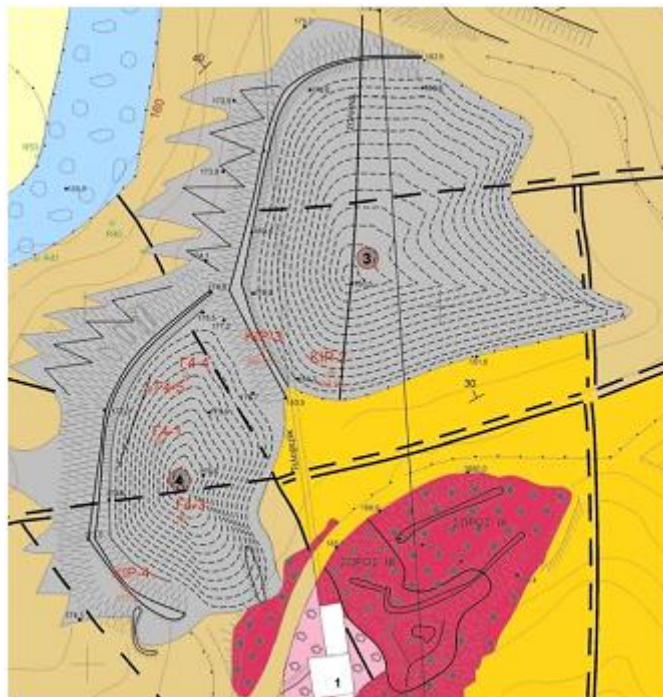


Εικόνα 3.4: Άποψη της λεκάνης του τέλματος 2. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)

3.4.3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 3

Η λεκάνη 3 βρίσκεται 60m. βόρεια από το εργοστάσιο και έχει έκταση περίπου 8 στρεμμάτων. Η λεκάνη αυτή είναι κλειστή με αναχωματικό φράγμα το οποίο στην βορειοδυτική πλευρά έχει συνολικό μήκος 90m. ενώ στην νοτιοδυτική 35m. Το φράγμα

αυτό λειτουργεί επίσης ως διαχωριστικό ανάχωμα μεταξύ των λεκανών 3 και 4. Το υλικό του αναχώματος που είναι κατασκευασμένο στη στέγη του πρανούς, αποτελείται από μολασσικά ιζήματα. Το εσωτερικό πρανές έχει υψομετρική διαφορά από την στάθμη των αποθέσεων 0.8 – 1.5 m. ενώ η κλίση του είναι 45° – 50° . Το εξωτερικό πρανές αποτελείται επίσης από μολασσικά ιζήματα και καταλήγει στην κοίτη του ρέματος Κιρκάλων. Η εποχιακή συγκέντρωση υδάτων κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων εμφανίζεται και σε αυτή τη λεκάνη λόγω της στεγανοποίησης του υποβάθρου από τα υλικά πλήρωσης. Ως επακόλουθο, η στάθμη της λίμνης ανεβαίνει και σε αρκετές περιπτώσεις, παρατηρείται υπερχειλίση (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται ξεκάθαρα οι αυλακώσεις που έχουν δημιουργηθεί, λόγω της έντονης διάβρωσης των υλικών του φράγματος. Η απόσταση μεταξύ της στέγης του αναχώματος και της κοίτης του ρέματος είναι 21m, ωστόσο δεν σημαίνει πως σε φαινόμενα υπερχειλίσης, δεν μπορεί να αποφευχθεί μια τέτοια μετακίνηση υλικού στο ρέμα.



Εικόνα 3.5: Τοπογραφική και γεωλογική αποτύπωση της περιοχής των λεκανών 3 και 4 (Από τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής εργοστασίου εμπλουτισμού Κίρκης). (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)



Εικόνα 3.6: Αυλακώσεις του εξωτερικού πρανούς της λεκάνης 3 λόγω των επιφανειακών απορροών και της υπερχείλησης του τέλματος. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)

3.4.4 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 4

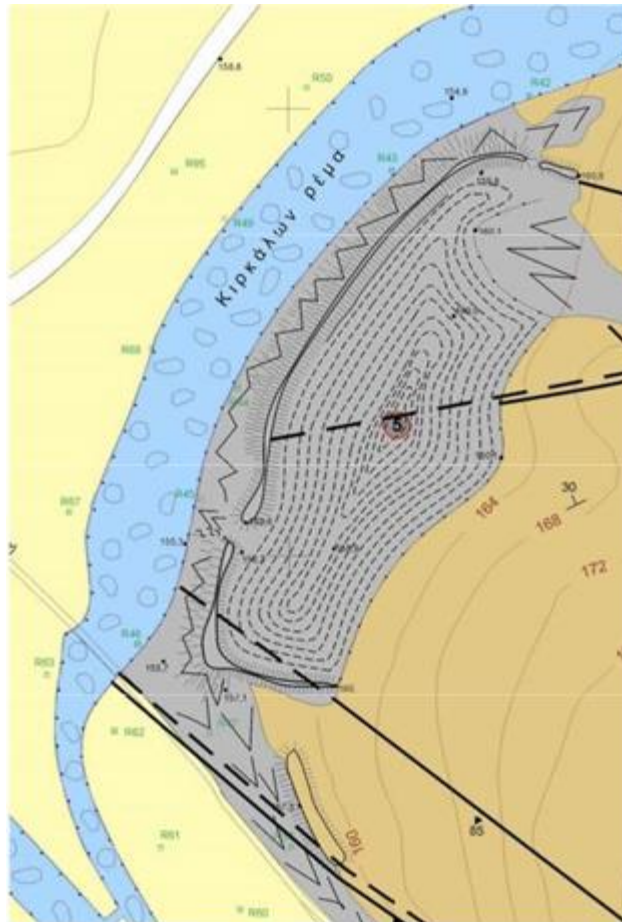
Η λεκάνη 4 όπως προαναφέρθηκε διαχωρίζεται με τη λεκάνη 3 με ανάχωμα μήκους 35m. και βρίσκεται στα νοτιοδυτικά αυτού. Έχει συνολική έκταση περίπου 3.8 στρέμματα και αναπτύσσεται σε υψόμετρο περίπου 5m. χαμηλότερα από τη λεκάνη 3. Το αναχωματικό φράγμα που βρίσκεται στην ΔΝΔ πλευρά του, έχει συνολικό μήκος 110m περίπου. Το εσωτερικό πρανές έχει όμοια κλίση με αυτή της λεκάνης 4, δηλαδή $40^{\circ} - 45^{\circ}$ αλλά η υψομετρική διαφορά μεταξύ αποθέσεων και στέψης είναι στα 2m περίπου. Όσο αναφορά το εξωτερικό πρανές (από τη δυτική πλευρά), η κλίση του είναι 28° με απότομη αύξηση στα ανώτερα τμήματά του ενώ η απόσταση του ρέματος ως και τη στέψη του αναχώματος είναι 19m. Η απόθεση που έχει γίνει στην συγκεκριμένη λεκάνη, έχει καλύψει και το ανώτερο τμήμα της στέψης προς το ρέμα και εμφανίζει ροή υλικών προς την λεκάνη 5, η οποία και βρίσκεται προς τα νότιο-δυτικά και σε χαμηλότερο υψόμετρο. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Τέλος, παρατηρείται ξανά εποχιακή συγκέντρωση νερού με κλίση προς το ανάχωμα και στο εξωτερικό πρανές, καθώς και βαθιές αυλακώσεις λόγω έντονης διάβρωσης των υλικών του φράγματος.



Εικόνα 3.7: Ροή υλικού από το τέλμα 4 στο τέλμα 5. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)

3.4.5 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 5

Τα τέλματα της 5^{ης} λεκάνης έχουν συνολική έκταση 6.5 στρέμματα και βρίσκονται σε υψόμετρο 17m χαμηλότερα από τη λεκάνη 4. Το ανάχωμα της λεκάνης αυτής, εκτείνεται σε μήκος 140m. παράλληλα με το ρέμα Κιρκάλων και παρατηρείται εκχύλιση των υλικών του τέλματος, σε ολόκληρη την επιφάνεια του εξωτερικού πρανούς. Σχετικά με τα ύψη των πρανών, το εσωτερικό είναι μικρότερο από 1m. και το εξωτερικό είναι περίπου 4 – 5 m. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Η λεκάνη χαρακτηρίζεται από έντονη επιφανειακή διάβρωση, όπως και επίσης ένα τμήμα του αναχώματος στο νότιο μέρος της έχει διαρραγεί, διαμορφώνοντας χαράδρωση βάθους 3m. με αποτέλεσμα την ελεύθερη μετακίνηση επιφανειακών νερών και τελμάτων προς το ρέμα, το οποίο και βρίσκεται πολύ κοντά.



Εικόνα 3.8: Τοπογραφική και γεωλογική αποτύπωση της περιοχής της λεκάνης 5 (Από τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής εργοστασίου εμπλουτισμού Κίρκης). (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)



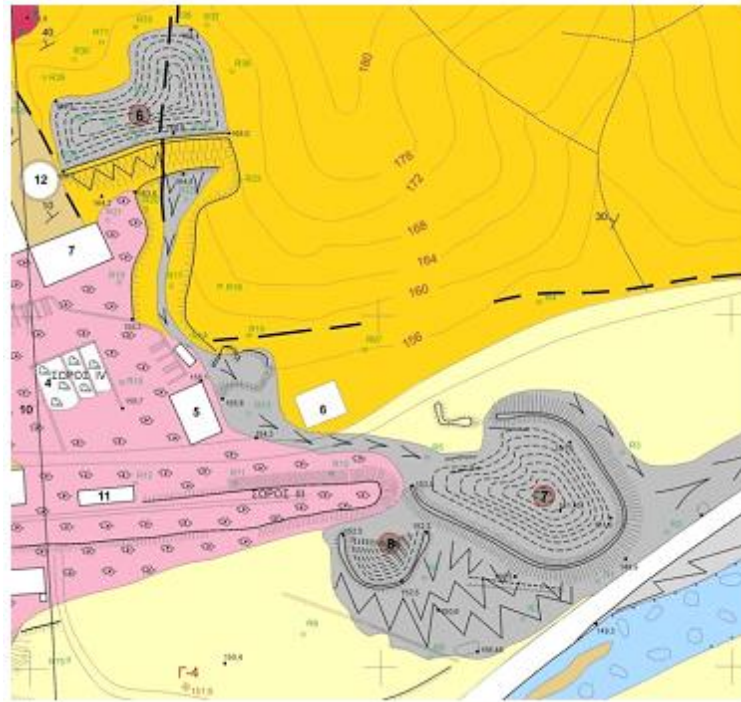
Εικόνα 3.9: Διαβρώσεις στο ανάχωμα της λεκάνης 5 από τις επιφανειακές απορροές. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)



Εικόνα 3.10: Αυλακώσεις επί του αναχώματος στη λεκάνη 5. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)

3.4.6 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 6

Η λεκάνη 6 είναι μικρότερη σε έκταση από τις προαναφερθείσες καθώς καλύπτει μόλις 1.2 στρέμματα και η τοποθεσία της είναι ανατολικά του εργοστασίου εμπλουτισμού. Σχετικά με το ανάχωμα της λεκάνης, εκτείνεται 50m. με εγκάρσια ανάπτυξη ως προς την κοίτη της κοιλάδας και με το εξωτερικό ύψος του πρανούς στα 4 – 5 m. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Εδώ παρατηρείται συστηματική υπερχείλιση υδάτων, εξ' αιτίας των βροχοπτώσεων. Πρακτικά, συγκεντρώνονται οι επιφανειακές απορροές από τα υψηλότερα υψόμετρα και ανεβάζουν την στάθμη της λεκάνης. Ως αποτέλεσμα, έχει δημιουργηθεί κοίτη ρέματος που οδηγεί στις κατάντι λεκάνες, δηλαδή στις λεκάνες 7 και 8 και εν τέλει, στον ποταμό Ειρήνη.



Εικόνα 3.11: Τοπογραφική και γεωλογική αποτύπωση της περιοχής των λεκανών 6, 7 και 8. (Από τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής εργοστασίου εμπλουτισμού Κίρκης). (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)



Εικόνα 3.12: Τμήμα της λεκάνης 6 πληρωμένη με νερό. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)

3.4.7 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 7

Η 7^η λεκάνη έχει έκταση περίπου 2.3 στρέμματα και βρίσκεται πολύ κοντά στην κοίτη του ρέματος Ειρήνη. Το ανάχωμα, είναι ανοιχτό στα βορειοδυτικά και έτσι εισρέουν ελεύθερα οι απορροές της λεκάνης 6. Το ανάχωμα έχει εσωτερικό ύψος περίπου 1m. ενώ το εξωτερικό ύψος είναι περίπου 2 – 3 m. (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Σε αυτή τη λεκάνη παρατηρείται εποχιακή υπερχειλίση και εντέλει, ροή νερού προς το ρέμα Ειρήνη. Επιπλέον, λόγω των έντονων διαβρώσεων κυρίως από το βορειοδυτικό τμήμα έχουν δημιουργηθεί χαραδρώσεις με βάθος ως και 1.5m. και έτσι, τα επιφανειακά νερά διοχετεύονται ελεύθερα παρακάμπτοντας τις 2 λεκάνες, μεταφέροντας υλικά τέλματος απευθείας προς το ρέμα Ειρήνη.



Εικόνα 3.13: Άποψη της λεκάνης 7 και της παράπλευρης κοίτης του ρέματος Ειρήνη.
(Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007)

3.4.8 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ 8

Η 8^η λεκάνη είναι η μικρότερη σε έκταση, με 0.4 στρέμματα και είναι δίπλα στη λεκάνη 7. Το αναχωματικό φράγμα έχει εξωτερικό ύψος 2m. και είναι ανοιχτό στο βόρειο τμήμα του (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Τα φαινόμενα υπερχειλίσης που παρατηρούνται, οδηγούν την απορροή τελμάτων απευθείας προς το ρέμα Ειρήνη.

3.5 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ, ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Με βάση τα στοιχεία που λήφθηκαν από την γεωλογική μελέτη, στο βόρειο τμήμα της περιοχής του εργοστασίου εμπλουτισμού συναντώνται ιζήματα βαθιάς θάλασσας τύπου φλύσχη ενώ στο κεντρικό και νότιο τμήμα παρατηρούνται λατυποκροκαλοπαγή και μολασσικά ιζήματα. Παράλληλα, εντοπίζονται στην περιοχή έρευνας και αλλουβιακοί σχηματισμοί, οι οποίοι αναπτύσσονται στο δυτικό και στο νότιο τμήμα της περιοχής. Σχετικά με την τεκτονική της περιοχής, η καταπόνηση των πετρωμάτων είναι περιορισμένη και εμφανίζονται αραιά συστήματα διακλάσεων όπως και λίγα κατακόρυφα ρήγματα (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007).

Τα υδρογεωλογικά στοιχεία της περιοχής δεν αποτελούν επικίνδυνο παράγοντα επειδή ο φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας, εμφανίζεται στα χαμηλότερα τοπογραφικά τμήματα της περιοχής, εκεί δηλαδή που βρίσκεται το ποτάμι και ως εκ τούτου, η ύπαρξη αλλουβιακών σχηματισμών (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Οι σχηματισμοί που δομούν την περιοχή που μας ενδιαφέρει εμφανίζουν πολύ μικρή υδροπερατότητα στο τμήμα των βασικών λατυποκροκαλοπαγών ενώ στην μολασσική σειρά, παρατηρείται αυξημένη υδροπερατότητα.

Όσον αφορά τα σεισμικά στοιχεία, μπορεί να δοθεί μια ακριβής περιγραφή της υπάρχουσας κατάστασης βάσει της σεισμικής δράσης, η οποία περιγράφει την κατά μέγεθος κατανομή των σεισμών στον χώρο και στον χρόνο. Έχει βρεθεί πως στα τελευταία 100 χρόνια υπήρξε μόνο ένας σεισμός με μέγεθος μεγαλύτερο του 5, συνεπώς μπορεί να επιβεβαιωθεί η χαμηλή σεισμικότητα της περιοχής (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Επιπλέον, ερευνήθηκε η τιμή της μέγιστης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης στη ζώνη ενδιαφέροντος. Η σεισμική ή αλλιώς εδαφική επιτάχυνση μαζί με άλλα μεγέθη όπως την εδαφική μετάθεση, την εδαφική ταχύτητα και τη σεισμική κίνηση, μετράνε την ένταση της σεισμικής κίνησης. Το τελικό κοινωνικό αποτέλεσμα μιας ισχυρής σεισμικής κίνησης σε μία θέση (θάνατοι, βλάβες σε τεχνικές κατασκευές), ονομάζεται σεισμικός κίνδυνος, ο οποίος και εξαρτάται επίσης και από τις ιδιότητες των κατασκευών (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Οι ιδιότητες αυτές όπως η ιδιοπερίοδος και απόσβεση ταλάντωσης, περιγράφονται με την έννοια της τρωτότητας. Στην μελέτη που διεξάγει, βγήκε το συμπέρασμα πως για μέση περίοδο επανάληψης 475 έτη, η εδαφική επιτάχυνση βρέθηκε 0.16g, τιμή η οποία σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό ΕΑΚ 2000 αλλά και με τα

τεχνικογεωλογικά δεδομένα της περιοχής, την κατατάσσει στις κατηγορίες Β και Γ (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Συνεπώς αναφερόμαστε σε μία περιοχή χαμηλής σεισμικότητας .

3.6 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΤΕΛΜΑΤΩΝ

Σε γενικές γραμμές, η παγκόσμια πρακτική που ακολουθείται για τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων, είναι να αποτίθενται σε λεκάνες με χωμάτινα αναχώματα. Συνήθως, το υλικό διαμόρφωσης των αναχωμάτων είναι είτε από επιλεγμένους δανειοθαλάμους, είτε από αδρομερές υλικών των τελμάτων (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Ως γνωστόν, η κατασκευή ενός τέτοιου έργου, αυξάνει το συνολικό κόστος της μονάδας που οφείλει να το κατασκευάσει. Γι' αυτό το λόγο, η απόσταση των λεκανών από το εργοστάσιο παίζει πρωταρχικό ρόλο. Πολλές φορές, οι αποφάσεις που λαμβάνονται περί του σχεδιασμού των αναχωμάτων, αποσκοπεί στην ελάττωση του κόστους και όχι τόσο στην πλήρη προστασία του περιβάλλοντος. Το εργοστάσιο εμπλουτισμού στην Κίρκη, αποτελεί μία περίπτωση κατά την οποία, δε λήφθηκαν υπόψη σοβαρές παράμετροι για τη προστασία του περιβάλλοντος.

Σχετικά με το σχεδιασμό των τελμάτων στην Κίρκη, έχουν κατασκευαστεί σε σχηματισμούς με χαμηλή μέχρι και μέση υδροπερατότητα και δεν έχουν ληφθεί μέτρα για την προστασία των υπόγειων υδροφόρων όπως π.χ. εγκατάσταση γεωμεμβράνης ή αργιλικής στρώσης (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Επίσης, τα απορρέοντα ύδατα από την ανάντη περιοχή καταλήγουν στις λεκάνες απόθεσης και διαβρώνουν τα αναχώματα. Αυτό θα μπορούσε να έχει αποτραπεί, εάν είχε ληφθεί μέριμνα για απομάκρυνση αυτών των υδάτων. Επιπλέον, ορισμένα από τα τέλματα αυτά έχουν κατασκευαστεί πολύ κοντά στην κοίτη των διερχομένων ρευμάτων και ως αποτέλεσμα, παρουσιάζονται έντονες διαβρώσεις και υποσκαφές στις βάσεις των πρανών. Επιπροσθέτως, σε περιπτώσεις εποχικής υπερχειλίσης, λόγω της μικρής αυτής απόστασης, τα νερά που απορρέουν από τα τέλματα φτάνουν αμέσως στα ρέματα και μολύνουν το φυσικό περιβάλλον. Παράλληλα, η κοκκομετρική διαβάθμιση των χρησιμοποιηθέντων υλικών που πάρθηκαν από την γύρω περιοχή, δεν έχει εξεταστεί και αυτό τα καθιστά επιρρεπή σε εκτεταμένες διαρροές ρύπων (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007). Τέλος, μερικά από τα αναχώματα, έχουν κατασκευαστεί στη στέψη των πρανών και αναπτύσσονται ερωτήματα περί αστοχίας ολόκληρου του πρανού, συμπεριλαμβανομένου και του αναχώματος.

4 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PLAXIS

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή του λογισμικού Plaxis 2D, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση των γεωτεχνικών συνθηκών ευστάθειας των μεταλλευτικών τελμάτων. Δίδεται ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα διάφορα εργαλεία που μας προσφέρει το λογισμικό αυτό, στις φυσικές παραμέτρους που εξετάζονται, αλλά και στις διάφορες διαδικασίες οι οποίες μας επιτρέπουν να εξετάσουμε.

Το λογισμικό PLAXIS 2D, είναι ένα πακέτο που χρησιμοποιεί πεπερασμένα στοιχεία και έχει σχεδιαστεί ειδικά για αναλύσεις των παραμορφώσεων και της ευστάθειας σε ποικίλα γεωτεχνικά projects. Είναι ένα λογισμικό φιλικό προς τον χρήστη καθώς οι διαδικασίες εισαγωγής δεδομένων είναι σχετικά απλοϊκές και παράγει με εύκολο τρόπο περίπλοκα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, χωρίς να απαιτούν από τον χρήστη να κατέχει εξειδικευμένες γνώσεις πάνω στα μαθηματικά, που εφαρμόζονται. Οι μαθηματικές αναλύσεις είναι απολύτως αυτοματοποιημένες και βασίζονται σε ένα δυνατό μαθηματικό υπόβαθρο. Επιπλέον, τα αποτελέσματα που παράγει, παρέχουν αναλυτική παρουσίαση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

4.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ–ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

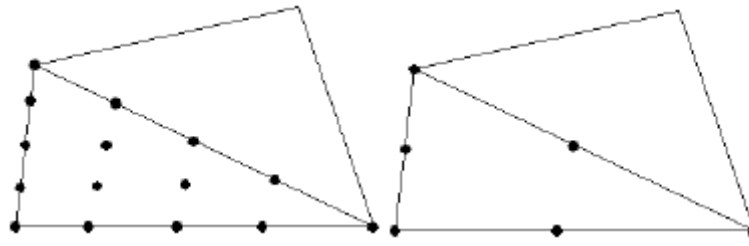
Σημαντικό προαπαιτούμενο ώστε να πραγματοποιηθεί η ανάλυση σε κάθε project, είναι η δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου. Με άλλα λόγια, δημιουργείται σε 2 διαστάσεις η γεωμετρία του προβλήματος η οποία αντιπροσωπεύει το πραγματικό πρόβλημα που επικρατεί σε 3 διαστάσεις. Σε γενικές γραμμές πρέπει να δίνεται προσοχή στον ορθό διαχωρισμό των εδαφικών σχηματισμών του υπεδάφους, στα κατασκευαστικά αντικείμενα, στις φάσεις κατασκευής και στα τυχόν υπάρχοντα φορτία. Υπάρχουν 3 τύποι συνθέσεων σε ένα γεωμετρικό μοντέλο, τα σημεία, οι γραμμές και τα συμπλέγματα.

- Τα **σημεία** (points) σχηματίζουν την αρχή και το τέλος των γραμμών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης και για την τοποθέτηση αγκυριών,

φορτίσεων, σημείων σταθερότητας και για τοπικές βελτιώσεις του πλέγματος των απειροστών στοιχείων

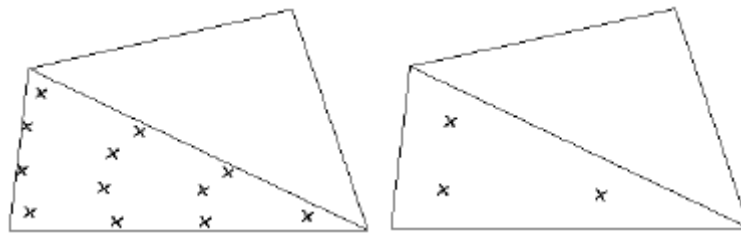
- Οι **γραμμές** (lines) χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν τα φυσικά όρια της γεωμετρίας, τα γεωμετρικά όρια του μοντέλου και τις τυχόν υπάρχουσες ασυνέχειες τις γεωμετρίας, όπως για παράδειγμα από διαφραγματικούς τοίχους. Επίσης οι γραμμές, διαχωρίζουν τα διάφορα στρώματα, έτσι μπορεί ο χρήστης να επιλέξει τα κατάλληλα στρώματα κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου.
- Τα **συμπλέγματα** (clusters) είναι περιοχές οι οποίες περικλείονται από τις γραμμές. Το λογισμικό αναγνωρίζει αυτόματα τα συμπλέγματα βασιζόμενο στην υπάρχουσα γεωμετρία. Οι ιδιότητες των εδαφών σχηματισμών μέσα σε αυτά τα συμπλέγματα παραμένουν ομογενείς και ως εκ τούτου, τα συμπλέγματα θεωρούνται σαν μέρη των εδαφικών στρωμάτων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το λογισμικό αυτό βασίζεται στην παραγωγή γεωμετρικών μοντέλων που βασίζονται αυτόματα σε ένα μαθηματικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό γίνεται μέσω της διαδικασίας παραγωγής των πλεγμάτων, μέσα στα οποία τα συμπλέγματα διαμοιράζονται σε τριγωνικά στοιχεία. Το PLAXIS δίνει την δυνατότητα επιλογής **στοιχείων** (elements) με 6 ή 15 κόμβους. Τα στοιχεία των 15 κόμβων αποδίδουν ορθά τους υπολογισμούς των τάσεων και τα φορτία που οδηγούν σε αστοχίες. Από την άλλη μεριά, τα στοιχεία με των 6 κόμβους, εφαρμόζονται για υπολογισμούς σε οριακές καταστάσεις. Θεωρώντας λοιπόν παρόμοια διάδοση στοιχείων για τη παραγωγή ενός πλέγματος, το πλέγμα που θα αποτελείται από στοιχεία των 15 κόμβων, θα είναι καλύτερης ποιότητας από αυτά των στοιχείων με 6 κόμβους αλλά οι χρόνοι των υπολογισμών θα είναι σαφώς μεγαλύτεροι. Σχετικά με του **κόμβους** (nodes), συνδέουν τα γειτονικά στοιχεία και η κατανομή τους φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Σε αντίθεση με τις μετατοπίσεις, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις υπολογίζονται βάσει των **σημείων τάσης** (stress points). Ένα τριγωνικό στοιχείο με 15 κόμβους περιέχει συνολικά 12 σημεία τάσης ενώ τα τριγωνικά στοιχεία με 6 κόμβους περιέχουν μόνο 3 σημεία τάσης. Η κατανομή τους στα τριγωνικά στοιχεία παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες. Τα σημεία τάσης μπορούν να προεπιλεχθούν για την παραγωγή διαγραμμάτων τάσης – παραμόρφωσης.



Εικόνα 4.1: Κατανομή κόμβων στα τριγωνικά στοιχεία.

(PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)



Εικόνα 4.2: Κατανομή σημείων τάσης στα τριγωνικά στοιχεία.

(PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)

4.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ PLAXIS

4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εισαγωγή δεδομένων της κάθε ζητούμενης παραμέτρου αποτελεί σημαντικό παράγοντα, για την σωστή μοντελοποίηση των προβλημάτων και επίσης την ορθότητα των τελικών αποτελεσμάτων. Για έναν μηχανικό, τόσο η γνώση της υπάρχουσας θεωρίας πίσω από κάθε πρόβλημα, η επαρκής γνώση του λογισμικού, όσο και η σωστή αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων για την ποσοτικοποίηση των διαφόρων παραμέτρων αποτελούν σημαντικά στοιχεία κατά την μελέτη. Ο συνδυασμός αυτών των τριών πτυχών, οδηγούν στην επιτυχής μελέτη οποιουδήποτε προβλήματος. Κατά την περιγραφή της εισαγωγής δεδομένων, παρουσιάζονται και τμήματα του επίλυσης του θέματος της παρούσας διπλωματικής όπως π.χ. οι γεωμετρίες των πρικών των τελμάτων. Σε γενικές γραμμές, το υπολογιστικό πακέτο PLAXIS, χωρίζεται σε 4 υποπρογράμματα τα οποία είναι τα παρακάτω:

1. **Input Program.**
2. **Calculations Program.**
3. **Output Program.**
4. **Curves Program.**

Στο 1^ο περιβάλλον (**Input**), πραγματοποιείται η εισαγωγή του γεωμετρικού μοντέλου του προβλήματος, τα όρια αυτού όπως και οι αρχικές συνθήκες, οι διάφοροι εδαφικοί σχηματισμοί που περικλείουν την γεωμετρία αυτή μαζί με τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους, ο υδροφόρος ορίζοντας αν υπάρχει και τέλος, τυχόν επιπλέον αντικείμενα όπως διαφραγματικοί τοίχοι, αγκύρια, tunnels και άλλα.

Στο 2^ο περιβάλλον (**Calculations**), μέσω των φάσεων (phases), προσδιορίζεται το είδος του υπολογισμού όπως και τα στάδια κατασκευής και ύστερα, εκτελούνται οι υπολογισμοί.

Στο 3^ο περιβάλλον (**Output**), αφού ολοκληρωθεί η εκτέλεση των υπολογισμών εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η γεωμετρία του προβλήματος μαζί με τα τμήματα που έχουν επιλεγεί κατά το στάδιο κατασκευής και εμφανίζονται όλες οι υπολογισμένες μετατοπίσεις. Οτιδήποτε συσχετίζεται με υπολογιστική διαδικασία, όπως π.χ. συντελεστές ασφαλείας, τάσεις, παραμορφώσεις, μετατοπίσεις μπορούν να εμφανιστούν στο συγκεκριμένο πρόγραμμα.

Στο 4^ο περιβάλλον (**Curves**), μπορεί να γίνει περιγραφή των παραπάνω αποτελεσμάτων σε διαγράμματα τα οποία είτε παρουσιάζουν ένα μέγεθος που καλύπτει όλη τη γεωμετρία είτε άλλα μεγέθη που αντιστοιχούν σε προεπιλεγμένα σημεία. Η παρουσίαση αυτή γίνεται σε συνάρτηση με ένα δεύτερο μέγεθος το οποίο επιλέγεται στο συγκεκριμένο πρόγραμμα.

Στο PLAXIS, η εισαγωγή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση ποντικιού είτε με τη χρήση πληκτρολογίου. Γενικώς, η εισαγωγή χωρίζεται σε 4 τύπους:

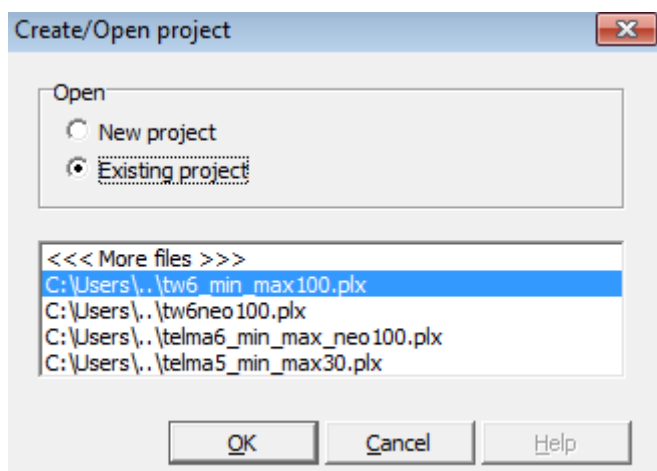
- Input of geometry objects.
- Input of text.
- Input of values.
- Input of selections.

4.3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ INPUT

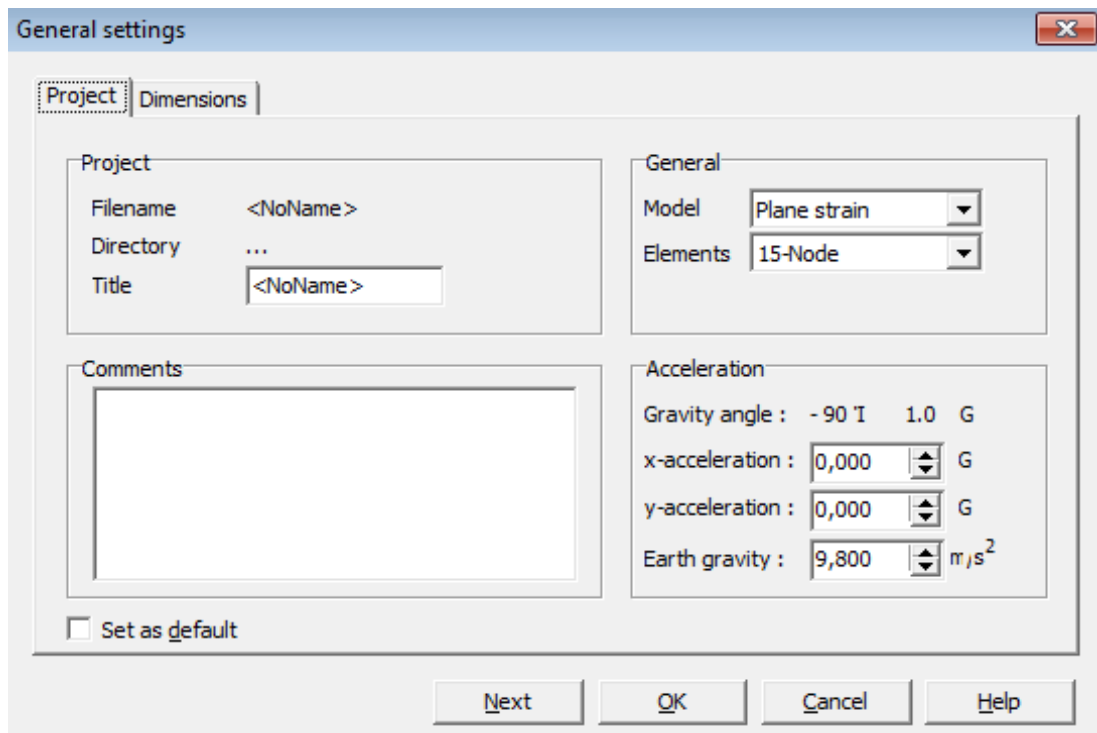
Προτού γίνει η οποιαδήποτε διεργασία στο PLAXIS είναι απαραίτητο να συμπληρωθούν κάποια βασικά στοιχεία παραμέτρων στις επιλογές των «γενικών στοιχείων» (general settings). Από τη στιγμή που γίνει η επιλογή για “New Project”, εμφανίζονται οι επιλογές των γενικών στοιχείων που αφορούν την εργασία και τις διαστάσεις.

Για την εργασία ζητείται να εισαχθεί το όνομα, το είδος του μοντέλου, τα χαρακτηριστικά των στοιχείων και τα χαρακτηριστικά της βαρύτητας. Εδώ αξίζει να τονιστεί πως στο είδος του μοντέλου εισάγεται η επιλογή “axisymmetry” όταν το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς έναν άξονα και “plane strain” όταν το πρόβλημα εκτείνεται σε διαμήκη διεύθυνση για μεγάλο μήκος.

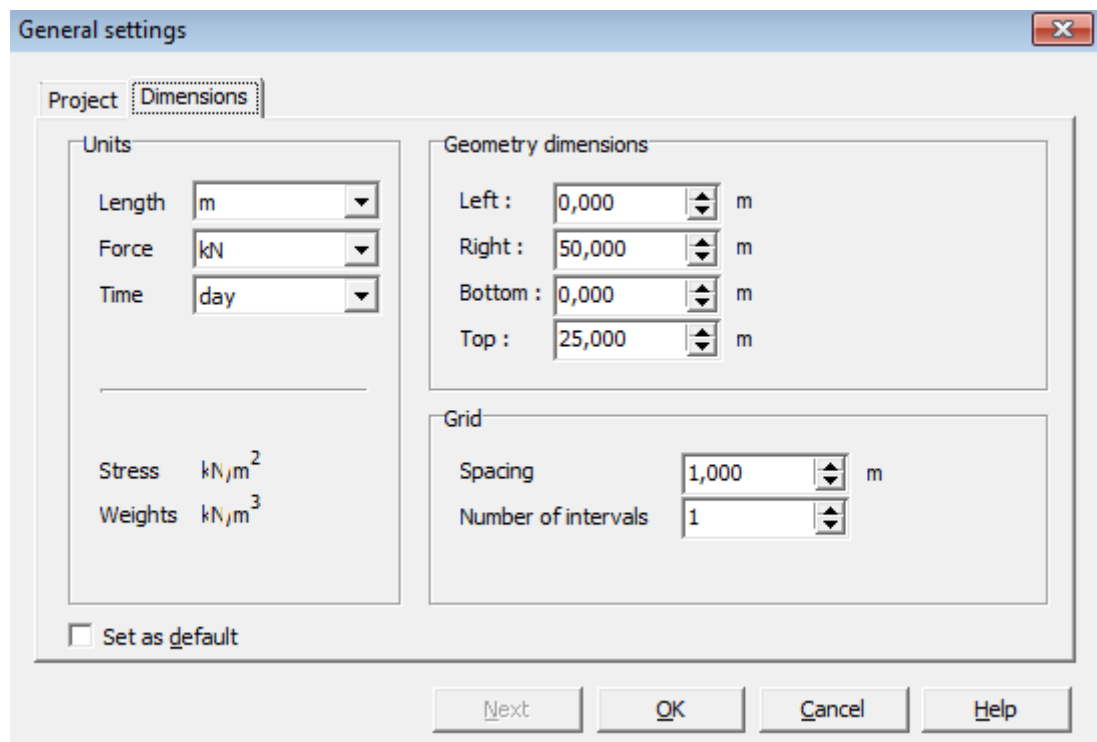
Στις επιλογές των διαστάσεων, καθορίζονται οι μονάδες μέτρησης του μήκους, των δυνάμεων και του χρόνου ενώ παράλληλα ορίζονται οι διαστάσεις της γεωμετρίας. Τέλος, ορίζεται από τον χρήστη στον υπάρχοντα κάρναβο, η απόσταση που θα διανύεται με το ποντίκι του χρήστη και ο αριθμός των μεσοδιαστημάτων.



Εικόνα 4.3: Επιλογή Project. (PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)



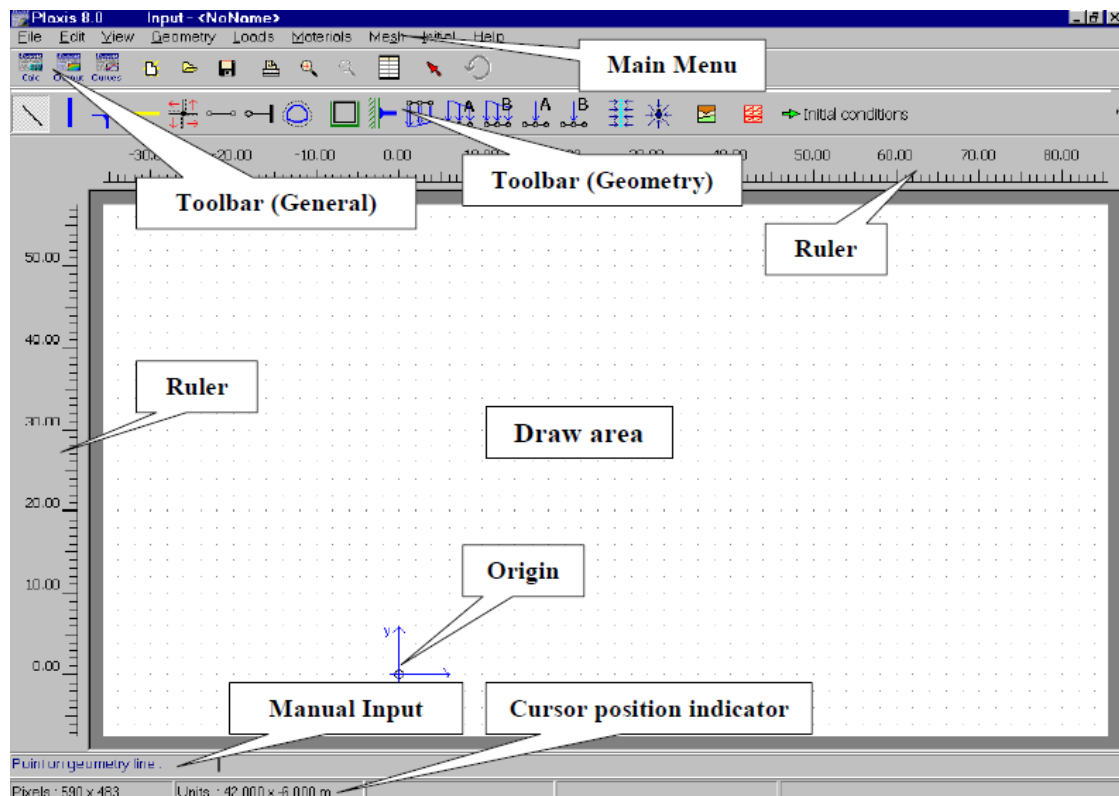
Εικόνα 4.4: Επιλογές που αφορούν την εργασία. (PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)



Εικόνα 4.5: Επιλογές που αφορούν τις διαστάσεις. (PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)

4.3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

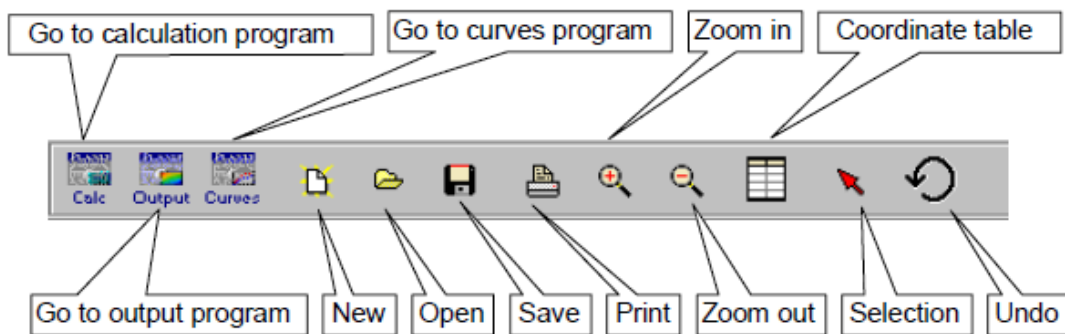
Το επόμενο παράθυρο στο οποίο οδηγείται ο χρήστης είναι το «παράθυρο εισαγωγής», μέσα στο οποίο γίνονται όλες οι διεργασίες παρασκευής του γεωμετρικού μοντέλου. Επίσης, περιέχονται όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την επίτευξη αυτού του στόχου.



Εικόνα 4.6: Το κύριο παράθυρο του προγράμματος εισαγωγής (Input). (PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)

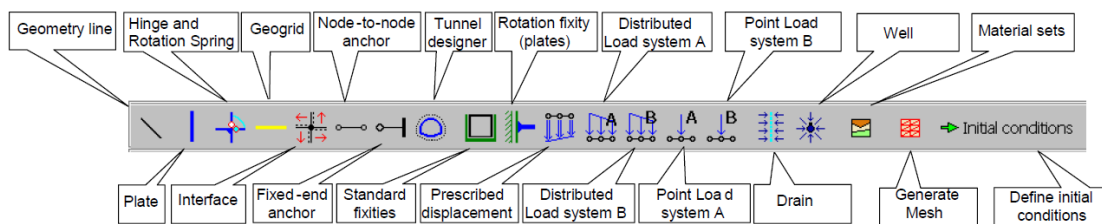
Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα, το παράθυρο στο οποίο γίνεται η μοντελοποίηση του προβλήματος περιέχει **εργαλεία** σχετικά με τον **σχεδιασμό της γεωμετρίας** τα οποία θα αναλυθούν στην συνέχεια. Επίσης, υπάρχουν τα **εργαλεία γενικού περιεχομένου** στα οποία περιλαμβάνονται διάφορες λειτουργίες όπως εκτύπωση, μεγέθυνση, επιλογή αντικειμένων και άλλες. Επιπλέον, είναι σαφής η **περιοχή σχεδιασμού** στην οποία και δημιουργείται το γεωμετρικό μοντέλο και ο **μετρητής του μήκους ή συντεταγμένων** (χάρακας), ο οποίος υποδηλώνει τις συντεταγμένες και εξαρτάται άμεσα από τα όρια που έχουν εισαχθεί από τον χρήστη στο πεδίο των διαστάσεων. Επιπροσθέτως, υπάρχει το **κυρίως μενού**, η **ένδειξη του ποντικιού** ώστε να γνωρίζει ο χρήστης σε ποιες

συντεταγμένες βρίσκεται (σε x,y συντεταγμένες και σε pixel) και η «χειρωνακτική εισαγωγή» η οποία επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει την γεωμετρία του μοντέλου χρησιμοποιώντας το πληκτρολόγιο και όχι το ποντίκι, όπου και αν αυτό είναι απαραίτητο. Αυτό μπορεί να συμβεί πληκτρολογώντας τις συντεταγμένες x και y χωρισμένες από κενό. Για παράδειγμα, αν θέλει κανείς να δημιουργήσει μία γραμμή μεταξύ των σημείων 1,0 και 5,0, θα πρέπει να θέσει υπό εφαρμογή την γεωμετρική γραμμή, να πληκτρολογήσει «(1 0)» και ύστερα enter, και στη συνέχεια ξανά «(5 0)» και enter. Οι παρενθέσεις δεν είναι γενικά απαραίτητες αλλά αν χρησιμοποιηθούν, το πρόγραμμα θα λειτουργήσει με παρόμοιο τρόπο.



Εικόνα 4.7: Εργαλεία γενικού περιεχομένου. (PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)

Σχετικά με τα εργαλεία που είναι απαραίτητα για να σχεδιαστεί η γεωμετρία του μοντέλου, υπάρχουν πολυάριθμα αντικείμενα, μερικά εκ των οποίων πολλές φορές δεν χρειάζεται η εφαρμογή τους. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι ονομασίες όλων των επιλογών.



Εικόνα 4.8: Εργαλεία γεωμετρίας. (PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)

Από τις παραπάνω επιλογές, στην διπλωματική αυτή θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω:

- **Geometry Line.**
- **Standard fixities.**
- **Material Sets.**
- **Generate Mesh.**
- **Define Initial Conditions.**



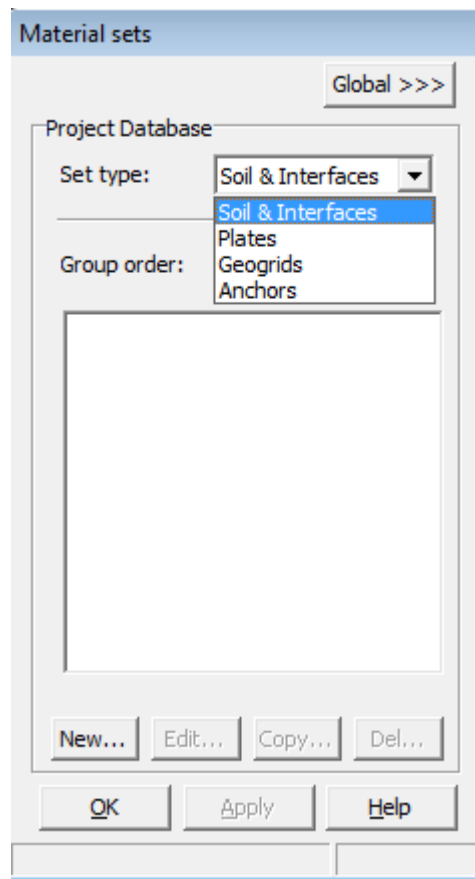
Η επιλογή της «**γεωμετρικής γραμμής**», δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει την γεωμετρία του «πολυγώνου» μέσα στο οποίο θα πραγματοποιηθεί και η μοντελοποίηση. Η εφαρμογή αυτού του εργαλείου μπορεί να γίνει εντός των ορίων των αξόνων, που έχουν εισαχθεί από τον χρήστη σε προηγούμενο στάδιο. Η εισαγωγή των συντεταγμένων δύναται να πραγματοποιηθεί διαμέσου ποντικιού ή και πληκτρολογίου. Επιπροσθέτως, βοηθητικά εργαλεία όπως των “Selection button και Undo option”, συνδράμουν στην διόρθωση τυχόν λαθών κατά τον σχεδιασμό της γεωμετρίας.



Η επιλογή “**Standard fixities**” έχει την δυνατότητα να προσδώσει οριακές συνθήκες, στα όρια της γεωμετρίας . Σε γενικές γραμμές, όλα τα όρια του γεωμετρικού μοντέλου οφείλουν να έχουν μία οριακή συνθήκη προς κάθε διεύθυνση. Πολλές φορές, δεν καθίσταται απαραίτητο να εισαχθεί κάποια συγκεκριμένη συνθήκη (ελεύθερα όρια). Ως εκ τούτου, για να μην υπάρχουν καταστάσεις στις οποίες δεν έχουν καθοριστεί οι αρχικές μετατοπίσεις, το εργαλείο αυτό μπορεί να δώσει μία σταθερή τιμή η οποία ισοδυναμεί με μηδενική μετατόπιση. Παρ’ όλα αυτά αναφέρεται από τον οδηγό πως μπορούν να εισαχθούν και μη μηδενικές μετατοπίσεις. Γενικώς, προτείνεται από την ίδια την εταιρεία να γίνεται εφαρμογή αυτού του εργαλείου σε γεωτεχνικά project, διότι είναι ο πιο απλός τρόπος να εισαχθούν συγκεκριμένες οριακές συνθήκες που δε θα επηρεάσουν τα τελικά αποτελέσματα.



Το εργαλείο “**Material sets**” είναι αυτό στο οποίο και δίδονται όλες οι απαραίτητες παράμετροι των σχηματισμών και των χρησιμοποιούμενων υλικών. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το παράθυρο του εργαλείου “Material sets”:

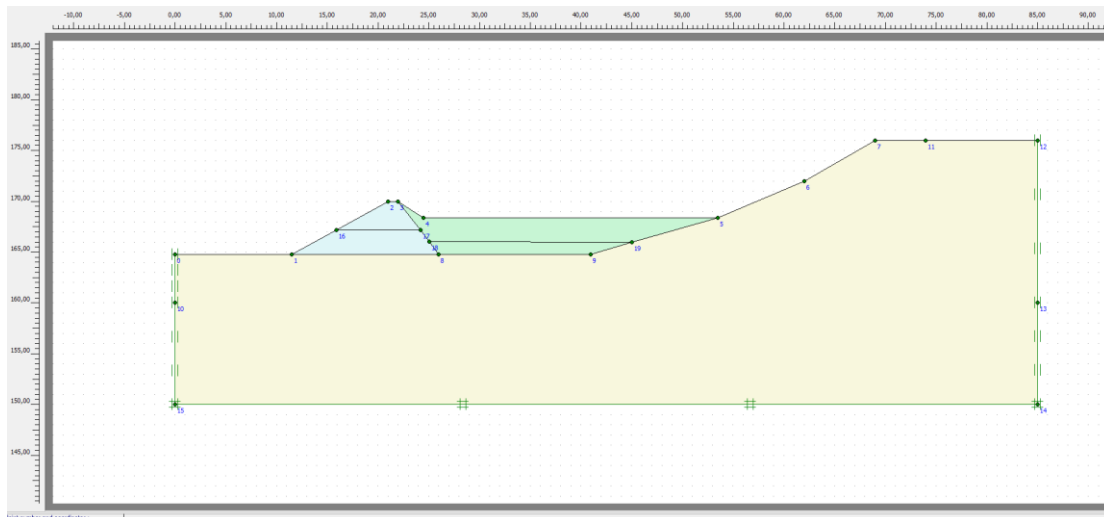


Εικόνα 4.9: Αρχικό παράθυρο του εργαλείου “Material sets”. (PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα, υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι αντικειμένων που μπορούν να εισαχθούν. Αυτοί είναι οι:

- **Soil & Interfaces:** Αυτός ο τύπος που περιέχει όλες τις παραμέτρους των σχηματισμών.
- **Plates:** Ο τύπος αυτός εφαρμόζεται συχνά για την αναπαράσταση των διαφραγματικών τοίχων.
- **Geogrids.**
- **Anchors:** Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται όποτε χρειάζεται η εφαρμογή αγκυρίων στο μοντέλο.

Στην διπλωματική αυτή χρησιμοποιήθηκαν μόνο εδαφικοί σχηματισμοί συνεπώς σε παρακάτω παράγραφο, θα αναλυθεί περαιτέρω ο τύπος “Soil&Interfaces” μαζί με την μεθοδολογία εισαγωγής των δεδομένων για κάθε ζητούμενη παράμετρο.



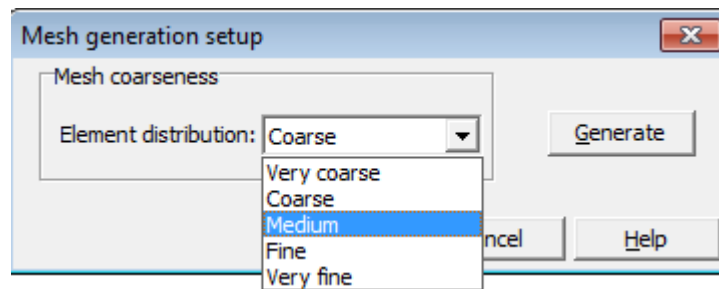
Εικόνα 4.10: Παράδειγμα γεωμετρικού μοντέλου.

4.3.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Όταν το γεωμετρικό μοντέλο έχει ολοκληρωθεί, το πλέγμα ή αλλιώς «μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων», μπορεί να παραχθεί. Το λογισμικό PLAXIS, είναι ικανό να δημιουργήσει τέτοια μοντέλα αυτόματα έχοντας μόνο το γεωμετρικό μοντέλο. Σε αυτή τη διαδικασία, η γεωμετρία του μοντέλου, χωρίζεται σε στοιχεία έχοντας υπόψη όλα τα στοιχεία και τις γραμμές της γεωμετρίας. Αυτό συμβαίνει με απώτερο σκοπό την σταθεροποίηση της ακριβής τοποθεσίας των φορτίων και των δομών που έχουν δημιουργηθεί. Η διαδικασία της παραγωγής βασίζεται σε ένα θεώρημα κατά το οποίο γίνεται έρευνα για τη παραγωγή των βέλτιστων τριγώνων και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ένα μη δομημένο πλέγμα. Έχει παρατηρηθεί γενικά πως η αριθμητική απόδοση αυτών των πλεγμάτων είναι πιο αξιόπιστη από τα δομημένα πλέγματα.



Το εργαλείο “Generate mesh”, είναι υπεύθυνο για τη παραγωγή ενός τέτοιου πλέγματος. Με την επιλογή του εικονιδίου, πραγματοποιείται ένα πλέγμα με χονδρομερή κατανομή των στοιχείων (coarse). Ωστόσο, με την επιλογή “mesh” από το κυρίως menu, μπορεί να γίνει επιλογή στην κατανομή των στοιχείων ανάμεσα σε πέντε κατηγορίες (**Very coarse, Coarse, Medium, Fine, Very fine**). Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα, να παραχθεί πλέγμα που να είναι πιο λεπτομερές μέσα σε **περιοχές συμπλέγματος**, σε περιοχές γύρω από μία **γραμμή** και επίσης, γύρω από ένα **σημείο**. Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε σε όλες τις γεωμετρίες να χρησιμοποιηθεί πλέγμα με λεπτομερή κατανομή στοιχείων (Fine).

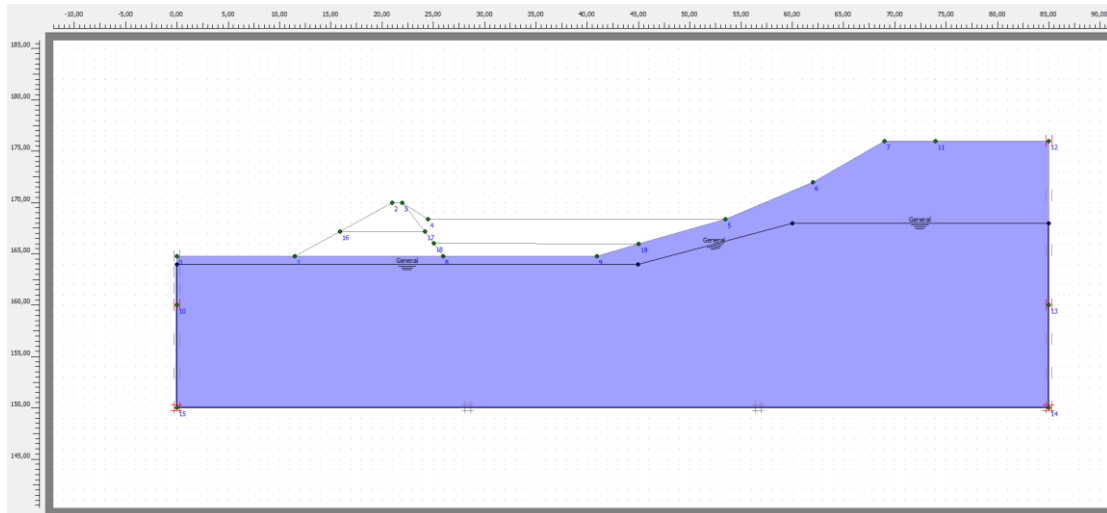


Εικόνα 4.11: Επιλογή κατανομής στοιχείων. (PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)

4.3.5 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το επόμενο στάδιο, ύστερα από την παραγωγή του πλέγματος, είναι δημιουργία των αρχικών συνθηκών (Initial conditions). Γενικά, οι αρχικές συνθήκες, περιέχουν τις αρχικές υδρογεωλογικές συνθήκες, την διαμόρφωση της αρχικής γεωμετρίας και την κατάσταση των αρχικών ενεργών τάσεων. Η πρώτη παράμετρος που πρέπει να καθοριστεί από τον χρήστη είναι το ειδικό βάρος του νερού, εφόσον υπάρχει. Το PLAXIS δίνει ως προκαθορισμένη τιμή ειδικού βάρους για το νερό ίση με $\gamma=10 \text{ kN/m}^3$. Έπειτα, αφού διαμορφωθεί η γεωμετρία βάσει ύπαρξης ή μη του υδροφόρου ορίζοντα, πρέπει να υπολογιστούν οι απαραίτητες τάσεις.

- Σε περίπτωση ύπαρξης υδροφορίας εντός του γεωμετρικού μοντέλου πρέπει πρώτα να σχεδιαστεί ο υδροφόρος ορίζοντας. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή “phreatic level” και ο τρόπος σχεδιασμού είναι ο ίδιος με αυτόν του εργαλείου “Geometry line”. Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστούν βάσει του υδροφόρου ορίζοντα οι πιέσεις του νερού από την εντολή “Generate water pressures”.
- Σε περίπτωση όπου δεν υπάρχει υδροφορία, πρέπει να ληφθεί απόφαση για το αν θα υπολογιστούν από το λογισμικό οι αρχικές τάσεις (Generate initial stresses). Όταν η γεωμετρία περιέχει μη οριζόντιες επιφάνειες εδάφους, η διαδικασία των αρχικών τάσεων συνήθως παραλείπεται ή εφαρμόζεται με την παράμετρο $\Sigma Mweight = 0$.



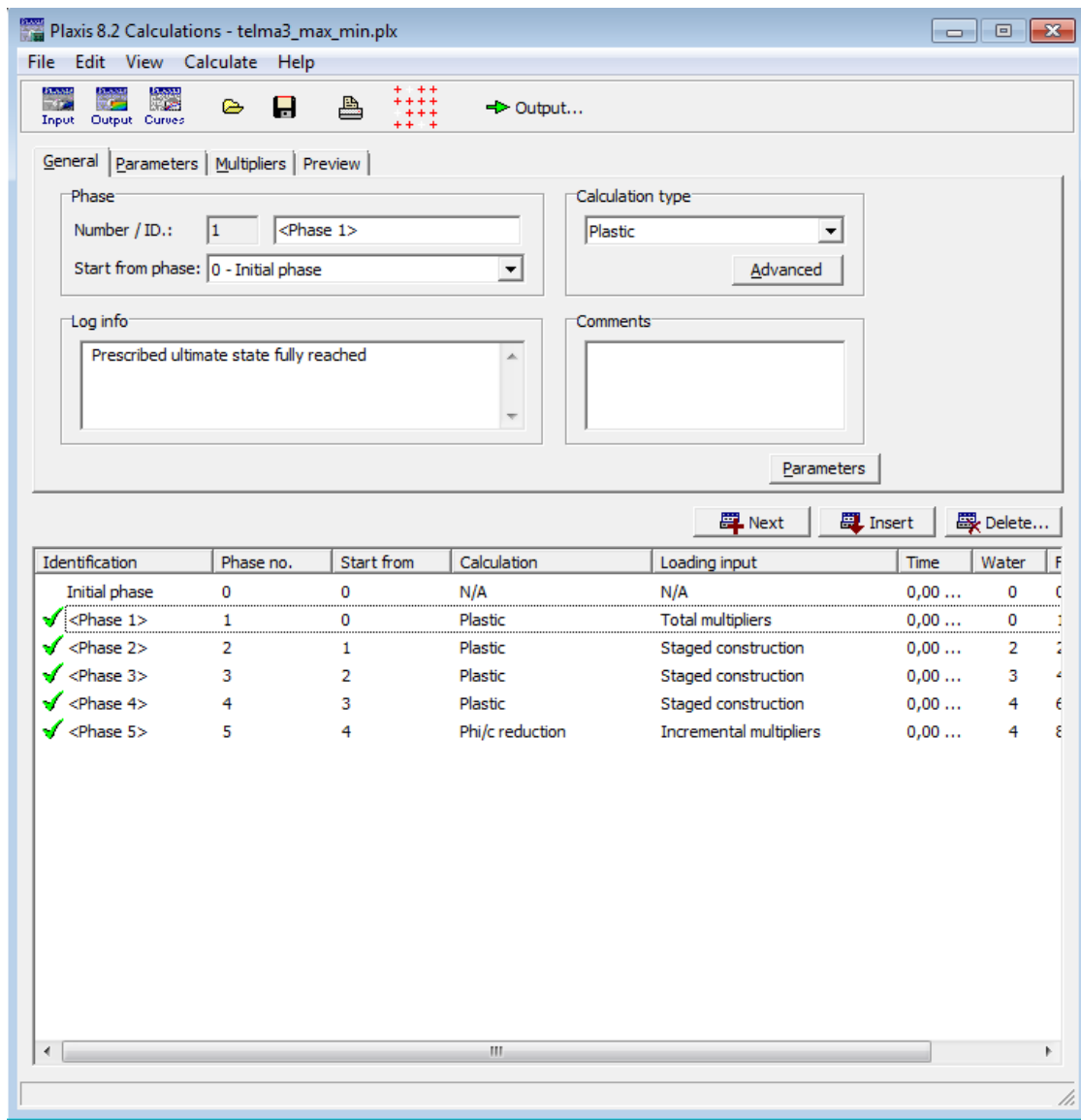
Εικόνα 4.12: Παράδειγμα γεωμετρικού μοντέλου υπό τη παρουσία υδροφόρου ορίζοντα. (PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)

4.4 ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CALCULATIONS

Αφού έχει δημιουργηθεί το γεωμετρικό μοντέλο, το επόμενο περιβάλλον είναι αυτό του PLAXIS CALCULATIONS. Στο περιβάλλον αυτό, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να καθορίσει το είδος του υπολογισμού που θέλει να πραγματοποιηθεί στο μοντέλο. Οι τύποι υπολογισμού είναι 4 και είναι οι παρακάτω:

- Ελαστοπλαστική ανάλυση των παραμορφώσεων (Plastic).
- Ανάλυση στερεοποίησης (Consolidation).
- Προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας μέσω της σταδιακής μείωσης των παραμέτρων ϕ και c (Phi/c reduction).
- Δυναμική ανάλυση των παραμορφώσεων (Dynamic analysis).

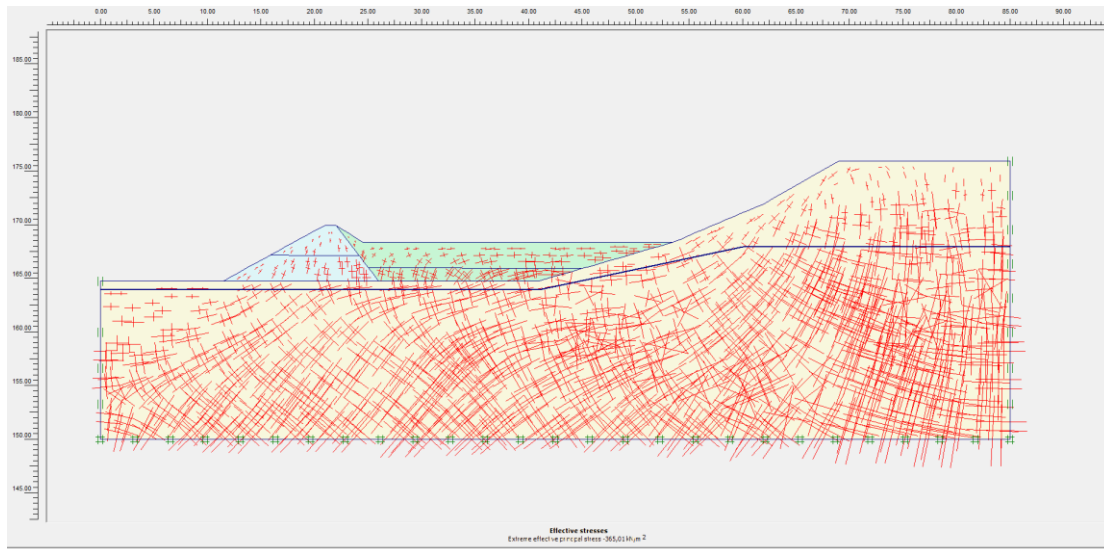
Στο υποπρόγραμμα αυτό, κατά την επιλογή του κατάλληλου τύπου ανά φάση υπολογισμού υπάρχουν παράμετροι που πρέπει να είτε να επιλεχθούν είτε όχι, ώστε να δώσουν ένα πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα. Τέτοιοι παράμετροι είναι η επιλογή των βημάτων υπολογισμών, η ύπαρξη ή μη πολλαπλασιαστών (multipliers), το χρονικό διάστημα (time interval) και η επιλογή συγκεκριμένων τμημάτων του μοντέλου αλλά επίσης και τοποθέτηση σημείων πάνω σε αυτά για περαιτέρω ανάλυση στο υποπρόγραμμα curves. Στην παρούσα διπλωματική, οι τύποι υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκαν ήταν, η ελαστοπλαστική ανάλυση των παραμορφώσεων και ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας.



Εικόνα 4.13: Παράθυρο υποπρογράμματος “Calculations”.

4.5 ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑ OUTPUT

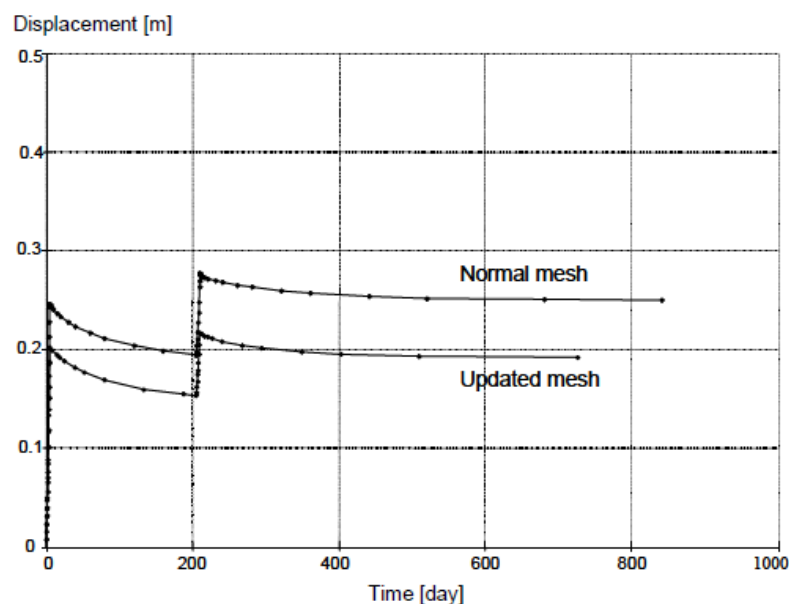
Στο υποπρόγραμμα αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, δηλαδή η συμπεριφορά του γεωμετρικού μοντέλου κάτω από τις συνθήκες που δόθηκαν από τον χρήστη. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα εύρεσης και μελέτης διαφόρων ειδών τάσεων όπως ενεργών (effective) και ολικών (total) stresses και μετατοπίσεων (π.χ. οριζόντιων κάθετων και ολικών).



Εικόνα 4.14: Παράδειγμα αποτελεσμάτων στο υποπρόγραμμα “Output”.

4.6 ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CURVES

Στο τελευταίο υποπρόγραμμα, πραγματοποιείται η παραγωγή διαγραμμάτων διαφόρων παραμέτρων μέσα στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και αυτές των μετατοπίσεων και συντελεστών ασφαλείας. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας διαγραμμάτων από διαφορετικά μοντέλα, με στόχο τη σύγκριση αυτών.



Εικόνα 4.15: Σύγκριση διαγραμμάτων στο υποπρόγραμμα “Curves”. (PLAXIS Version 8, Tutorial Manual)

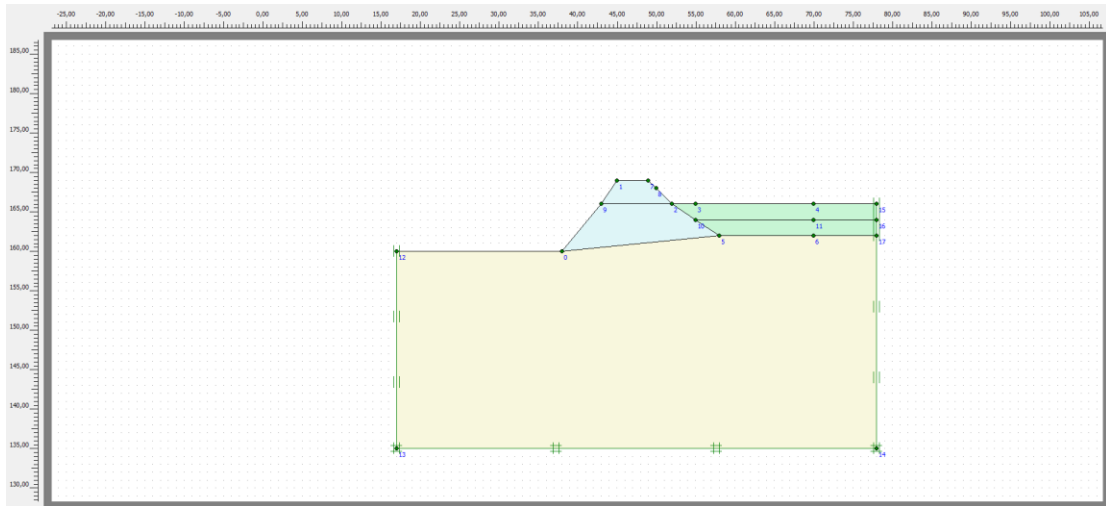
5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

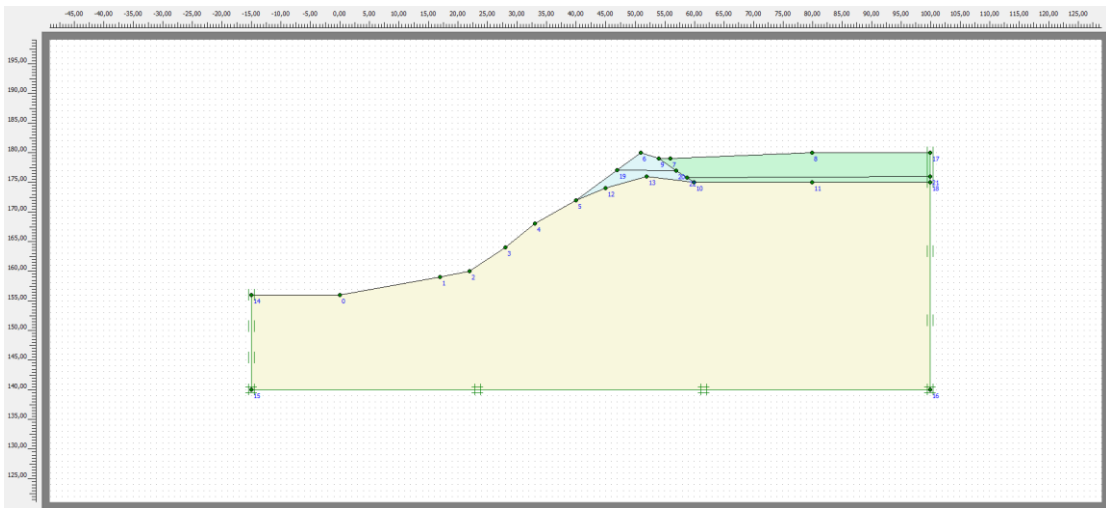
Ο στόχος της διπλωματικής αυτής είναι η ανάλυση των αναχωμάτων που συγκρατούν τα τέλματα στο εργοστάσιο εμπλουτισμού της Κίρκης. Η εξέταση γίνεται τόσο κατά τη διάρκεια κατασκευής αυτών όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους αναλύοντας την πιθανότητα ύπαρξης αστοχίας αυτών, κάτω από διαφορετικές περιπτώσεις. Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται, οι τρόποι με τους οποίους συλλέχθηκαν και επιλέχθηκαν τα κατάλληλα δεδομένα, προκειμένου να γίνει σωστή επίλυση των γεωμετρικών μοντέλων. Επιπλέον, γίνεται περιγραφή των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων.

5.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

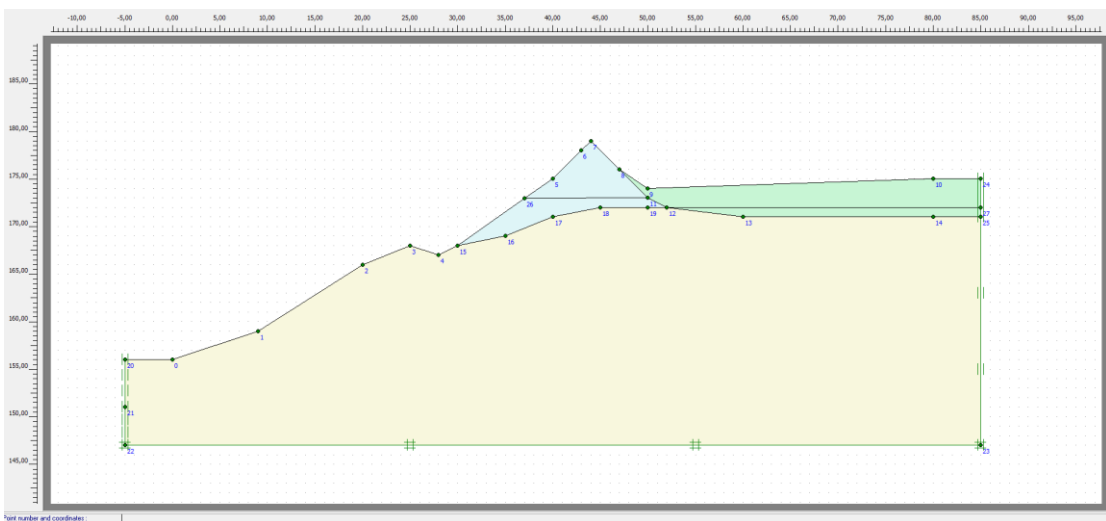
Τα γεωμετρικά μοντέλα στην πραγματικότητα δε σχετίζονται με τις παραμετρικές αναλύσεις. Ο στόχος αυτών είναι η πλήρης αποτύπωση των πραγματικών πρηνών που υπάρχουν στον χώρο με απώτερο σκοπό να τα αναλύσουμε σε επόμενο στάδιο. Έτσι αναφέρονται σε ξεχωριστό υποκεφάλαιο από αυτό των παραμετρικών αναλύσεων. Στην περιοχή έρευνας υπάρχουν 8 λεκάνες εκ των οποίων οι 7 περιέχουν τέλματα εμπλουτισμού. Η λεκάνη 1 είναι αυτή που δεν έχει πληρωθεί με υλικό απορρίμματος συνεπώς δεν εξετάζεται καθόλου. Τα σημαντικότερα προβλήματα διάβρωσης παρατηρήθηκαν στα τέλματα 2, 3, 4, 5 και 6 (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007) και γι' αυτό μελετήθηκε η ευστάθεια τους με το λογισμικό PLAXIS. Τα δεδομένα των συντεταγμένων έχουν ληφθεί από την μελέτη των (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007) και έχουν αποτυπωθεί ακριβώς στο PLAXIS. Τα μοντέλα των λεκανών παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



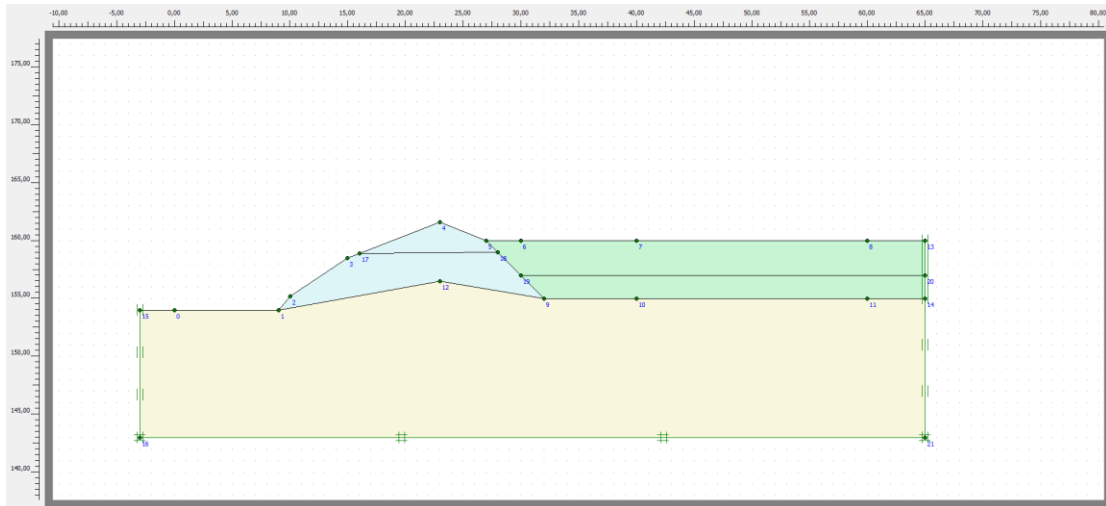
Εικόνα 5.1: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 2



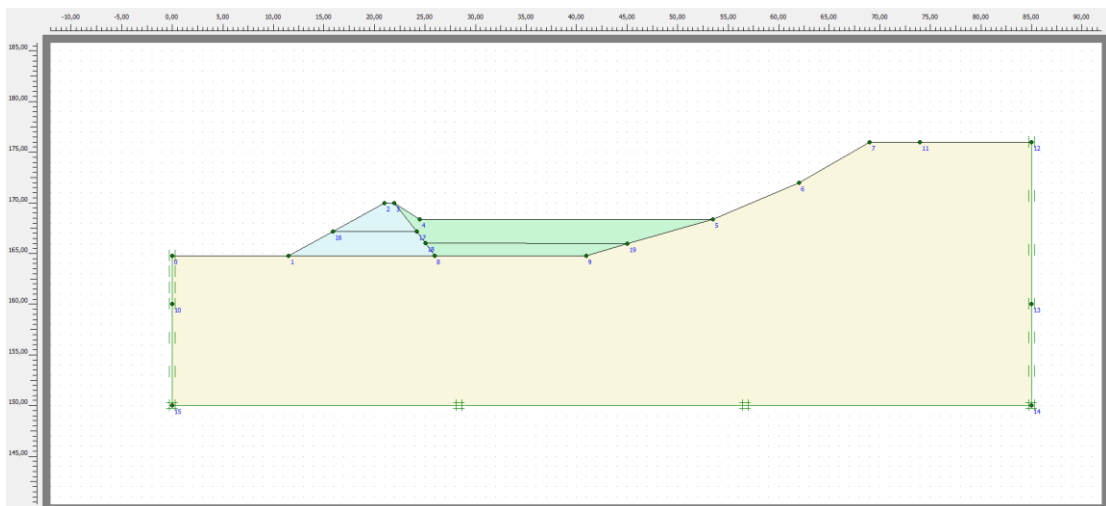
Εικόνα 5.2: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 3



Εικόνα 5.3: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 4



Εικόνα 5.4: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 5



Εικόνα 5.5: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 6

Στα παραπάνω μοντέλα παρατηρείται πως οι διαστάσεις εκτείνονται ως προς τους 2 άξονες. Αυτό εφαρμόζεται επειδή υπάρχουν περιπτώσεις που τα φαινόμενα εκτείνονται αρκετά μέτρα μακριά από το σημείο που εξετάζεται. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διατμητική αστοχία Mohr – Coulomb, της οποίας το πόδι μπορεί να φτάσει αρκετά μέτρα κάτω από το πρανές, ανάλογα και με την γεωμετρία του (Λουπασάκης, 2015).

5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η εύρεση των σωστών τιμών για τις παραμέτρους των εδαφικών σχηματισμών, αποτελεί κλειδί για την σωστή εξέταση

των προβλημάτων. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά εισάγονται στο PLAXISINPUT μέσω της επιλογής “Materials set”. Επειδή στα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν μόνο εδαφικοί σχηματισμοί, η κατηγορία η οποία και εφαρμόστηκε είναι η “Soils and Interfaces”.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά που έπρεπε να εισαχθούν ήταν τα παρακάτω: το μοντέλο του υλικού, ο τύπος αστοχίας του υλικού, τα ειδικά βάρη γ_{sat} και γ_{unsat} , η υδροπερατότητα στους άξονες x και y (k_x και k_y), το μέτρο ελαστικότητας E_{ref} όπως επίσης και ο λόγος poisson, η συνεκτικότητα και η γωνία τριβής του εδαφικού σχηματισμού. Ο τύπος του υλικού συσχετίζεται με τον τρόπο της αστοχίας του. Αφού λοιπόν η αστοχία δε προβλέπεται σε καμία περίπτωση να προκληθεί με ραγδαίο τρόπο, επιλέγεται ο τύπος “Drained”. Το μοντέλο αστοχίας επιλέγεται να είναι αυτό του Mohr – Coulomb.

Στην περιοχή του εργοστασίου εμπλουτισμού πραγματοποιήθηκαν 4 ερευνητικές γεωτρήσεις σε επιλεγμένες θέσεις των αναχωμάτων και των τελμάτων. Από αυτές τις γεωτρήσεις δημιουργήθηκαν τέσσερις γεωλογικές τομές και δύο συγκεντρωτικοί πίνακες. Επιπλέον, εντός των γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πρότυπης διείσδυσης (SPT) και δοκιμές σταθερού φορτίου (MAAG) με στόχο τον προσδιορισμό της υδροπερατότητας στο επιλεγμένο βάθος. Οι γεωλογικές τομές περιείχαν την λιθολογική περιγραφή σε όλα τα βάθη που πραγματοποιήθηκε η κάθε γεώτρηση. Επίσης δίνονταν το ποσοστό απόληψης πυρήνα, τα αποτελέσματα των δοκιμών SPT και MAAG. Οι 2 πίνακες περιείχαν τις εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, με τις τελικές τιμές των δοκιμών ως αποτελέσματα αυτών των δοκιμών.

Ως αποτέλεσμα αυτών των εργασιών, έπρεπε να γίνει μία ταξινόμηση μεταξύ των διαφόρων σχηματισμών που επικρατούσαν και των μηχανικών χαρακτηριστικών τους, για κάθε μία περίπτωση λεκάνης. Στο PLAXIS υπήρχαν τρεις εδαφικοί σχηματισμοί, τα υλικά του αναχώματος, τα υλικά των τελμάτων και το υλικό του υποβάθρου. Για αυτό το λόγο, δημιουργήθηκε πίνακες, οι οποίοι περιέχουν ανά κατηγορία υλικού, τις απαραίτητες πληροφορίες, συσχετιζόμενες με τη αντίστοιχη γεώτρηση και το βάθος στο οποίο βρέθηκαν.

Πίνακας 5.1: Πίνακας υλικών αναχώματος (1).

Υλικά Αναχώματος										
Αργιλοίλος με Άμμο και Χάλικες - Γεώτρηση 1										
Βάθος (m)	SPT	Βάθος (m)	MAAG (m/sec)	Βάθος (m)	USCS	γ_{Sat} (kN/m ³)	γ_{Unsat} (kN/m ³)	MAAG (m/day)	E_s (kPa) N_{spt}	E_s (kPa) N_{60}
1	35/30	1,4	0,847	1,00 – 2,35	SC			73138,1	16000	14480
1,9	42/30			3,20– 3,50	SC	21,7	19,6		18240	16896
				5,87 – 6,20	SC					

Πίνακας 5.2: Πίνακας υλικών αναχώματος (2).

Υλικά Αναχώματος										
Ιλυώδης άμμος με Χάλικες – Γεώτρηση 3										
Βάθος (m)	SPT	Βάθος (m)	MAAG (m/sec)	Βάθος (m)	USCS	γ_{Sat} (kN/m ³)	γ_{Unsat} (kN/m ³)	MAAG (m/day)	E_s (kPa) N_{spt}	E_s (kPa) N_{60}
1,6	41/30	1,6	$3 \cdot 10^{-7}$	0,80 - 1,60	SC	19,9	18,2	0,26	17920	16608
3,4	17/30	3,2	$3 \cdot 10^{-7}$	2,80 – 3,50	SP	20,6	18,3	0,26	10240	9696
				4,60 – 5,10	ML	19,3	13,9			

Πίνακας 5.3: Πίνακας υλικών αναχώματος (3).

Υλικά Αναχώματος										
Αργιλοίλος με Άμμο και Χάλικες – Γεώτρηση 4										
Βάθος (m)	SPT	Βάθος (m)	MAAG (m/sec)	Βάθος (m)	USCS	γ_{Sat} (kN/m ³)	γ_{Unsat} (kN/m ³)	MAAG (m/day)	E_s (kPa) N_{spt}	E_s (kPa) N_{60}
1,6	ΑΡΝΗΣΗ	1,6	10^{-7}	0,8- 1,50	ML	20,1	16	0,0864	-	-

Πίνακας 5.4: Πίνακας υλικών υποβάθρου (1).

Υλικά Υποβάθρου										
Ιζήματα Μολασσικού Τύπου - Ιλυώδης Άμμος με Χάλικες – Γεώτρηση 2										
Βάθος (m)	SPT	Βάθος (m)	MAAG (m/sec)	Βάθος (m)	USCS	γ_{Sat} (kN/m ³)	γ_{Unsat} (kN/m ³)	MAAG (m/day)	E_s (kPa) N _{spt}	E_s (kPa) N ₆₀
4,2	-	4,2	0,69	4,10– 4,60	SC	22	19,8	59991,9	20800	19200

Πίνακας 5.5: Πίνακας υλικών υποβάθρου (2).

Υλικά Υποβάθρου										
Ιζήματα Μολασσικού Τύπου – Αμμοίλος – Γεώτρηση 3										
Βάθος (m)	SPT	Βάθος (m)	MAAG (m/sec)	Βάθος (m)	USCS	γ_{Sat} (kN/m ³)	γ_{Unsat} (kN/m ³)	MAAG (m/day)	E_s (kPa) N _{spt}	E_s (kPa) N ₆₀
6,8	-	6,4	1,47*10 ⁻⁷	4,60- 5,10	ML	19,3	13,9	0,012	-	-

Πίνακας 5.6: Πίνακας υλικών υποβάθρου (3).

Υλικά Υποβάθρου										
Ιζήματα Μολασσικού Τύπου - Ιλυώδης Άμμος με Χάλικες – Γεώτρηση 4										
Βάθος (m)	SPT	Βάθος (m)	MAAG (m/sec)	Βάθος (m)	USCS	γ_{Sat} (kN/m ³)	γ_{Unsat} (kN/m ³)	MAAG (m/day)	E_s (kPa) N _{spt}	E_s (kPa) N ₆₀
2,5	-	2,2	2.2*10 ⁻⁶	2,00 – 2,50	SC	-	-	0,19	-	-

Πίνακας 5.7: Πίνακας υλικών υποβάθρου (4).

Υλικά Υποβάθρου										
Λατυποκροκαλοπαγές Βάσης – Γεώτρηση 4										
Βάθος (m)	SPT	Βάθος (m)	MAAG (m/sec)	Βάθος (m)	USCS	γ_{Sat} (kN/m ³)	γ_{Unsat} (kN/m ³)	MAAG (m/day)	E_s (kPa) N _{spt}	E_s (kPa) N ₆₀
-	-	4,2	1,2*10 ⁻⁶		-	-	-	0,104	-	-

Πίνακας 5.8: Πίνακας υλικών τελμάτων.

Υλικά Τέλματος										
Αμμοίλος – Γεώτρηση 2										
Βάθος (m)	SPT	Βάθος (m)	MAAG (m/sec)	Βάθος (m)	USCS	γ_{Sat} (kN/m³)	γ_{Unsat} (kN/m³)	MAAG (m/day)	E_s (kPa) N_{spt}	E_s (kPa) N₆₀
2	Ιουν- 30	2,1	10⁻⁷	1,95 - 3,00	SM	21,1	17,7	0,009	3600	3420
				3,80- 4,10	SM	19,9	17			

Η ταξινόμηση αυτή ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη για την σωστή διάταξη των δεδομένων. Παρ' όλα αυτά όμως, ακόμη δεν έχει επιτευχθεί το τελικό στάδιο, που είναι να υπάρχουν έτοιμες οι παράμετροι των τιμών για κάθε μία λεκάνη ξεχωριστά. Γι' αυτό το λόγο, έγινε διερεύνηση των παραπάνω πινάκων σε σχέση με την τοποθεσία της κάθε ερευνητικής γεώτρησης. Έτσι, παράχθηκαν επιπλέον πίνακες, οι οποίοι περιέχουν με ακρίβεια τα ερευνητικά δεδομένα, αποτυπωμένα πάνω στη κάθε μία λεκάνη ξεχωριστά.

Πίνακας 5.9: Τελικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών των τελμάτων.

	K (m/day)	γ_{Unsat} (kN/m³)	γ_{Sat} (kN/m³)	ϕ	C (kN/m²)
Τέλμα 2					
Ανάχωμα	0,026	19	21,5	20	45
Τέλματα	0,09	20	22	28	70
Υπόβαθρο	0,013	19,5	22	20	45
	K (m/day)	γ_{Unsat} (kN/m³)	γ_{Sat} (kN/m³)	ϕ	C (kN/m²)
Τέλμα 3					
Ανάχωμα	0,026	18	20,5	20	70
Τέλματα	0,09	20	22	28	70
Υπόβαθρο	0,012	13,5	19	20	70
	K (m/day)	γ_{Unsat} (kN/m³)	γ_{Sat} (kN/m³)	ϕ	C (kN/m²)
Τέλμα 4					
Ανάχωμα	0,009	16	20	20	70
Τέλματα	0,09	20	22	28	70
Υπόβαθρο	0,19	19,5	21	20	70
	K (m/day)	γ_{Unsat} (kN/m³)	γ_{Sat} (kN/m³)	ϕ	C (kN/m²)
Τέλμα 5					
Ανάχωμα	0,009	16	20	20	70
Τέλματα	0,09	20	22	28	70
Υπόβαθρο	0,19	19,5	21	20	70
	K (m/day)	γ_{Unsat} (kN/m³)	γ_{Sat} (kN/m³)	ϕ	C (kN/m²)
Τέλμα 6					
Ανάχωμα	0,009	16	20	20	70
Τέλματα	0,09	20	22	28	70
Υπόβαθρο	0,19	19,5	21	25	70

Οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων ϕ και C, έχουν ληφθεί από την μελέτη (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007) καθώς έχει γίνει η μέτρηση αυτών μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Επίσης, σε όλους τους σχηματισμούς, η τιμή του λόγου Poisson θεωρήθηκε ως 0,3. Επιπλέον, το μέτρο ελαστικότητας E, μετρήθηκε βάσει των δοκιμών SPT με τη χρήση του προγράμματος SPTCorr (<https://geologismiki.gr/products/sptcorr/>). Σχετικά με την υδροπερατότητα των τελμάτων, θεωρήθηκε ίση με 10^{-7} m/sec (Τριανταφυλλίδης et al., 2016). Τέλος, η κατάταξη του εδάφους δίνεται στους παραπάνω πίνακες από την κατάταξη εδαφών σύμφωνα με την USCS από τη μελέτη των (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007).

5.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΟΜΑΔΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Η μελέτη της ευστάθειας των αναχωμάτων των τελμάτων εμπλουτισμού πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου PLAXIS 2D. Συνολικά έγιναν τέσσερις ομάδες παραμετρικών αναλύσεων, οι οποίες και αναλύονται παρακάτω.

Στην **πρώτη** ομάδα παραμετρικών αναλύσεων, εξετάστηκε ο συντελεστής ασφαλείας των αναχωμάτων, σε σχέση με τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, τόσο του αναχώματος όσο και των υλικών των τελμάτων. Το εύρος του μέτρου ελαστικότητας είναι αυτό μεταξύ των τιμών E_s (nspt) και E_s (N60). Η παραμετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες στις οποίες δεν υπήρχε επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στο σύστημα. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας λήφθηκαν μέσω της δοκιμής πρότυπης διείδυσης (S.P.T.). Σε αυτή τη μέθοδο, προσδιορίζεται ο αριθμός των κρούσεων για προχώρηση του ειδικού δειγματολήπτη Terzaghi κατά 45cm με τη πτώση αντίβαρου 63,5 kg, από ύψος 76,2 cm σε τρία διαδοχικά τμήματα των 15cm (Λουπασάκης, 2015). Ο σκοπός της δοκιμής είναι να προσδιοριστεί η αντίσταση του εδάφους στη διείδυση ενός πρότυπου διαιρετού δειγματολήπτη που προωθείται κρουστικά. (Λουπασάκης, 2015). Είναι μία εύχρηστη μέθοδος η οποία μπορεί να προσδιορίσει αρκετές μηχανικές παραμέτρους όπως, την σχετική πυκνότητα, την γωνία εσωτερικής τριβής, το οιδημετρικό μέτρο ελαστικότητας, τον δείκτη συνεκτικότητας, την αστράγγιστη αντοχή, την φέρουσα ικανότητα και την καθίζηση των επιφανειακών και βαθιών θεμελιώσεων. Συνεπώς, από τη μέθοδο αυτή προσδιορίστηκε η πρώτη παράμετρος (nspt). Η δεύτερη παράμετρος (N60) αναφέρεται στο ήδη υπάρχον μέτρο ελαστικότητας και αποτελεί μία μείωση αυτού. Η διόρθωση αυτή οφείλεται βάσει ύπαρξης παραγόντων λάθους, οι οποίοι δημιουργούν και αντίστοιχους συντελεστές διόρθωσης. Τέτοιοι παράγοντες είναι το είδος του δειγματολήπτη, η διάμετρος της γεώτρησης, η πίεση των υπερκειμένων και το μήκος της στήλης διείδυσης (Λουπασάκης, 2015). Στις παραμετρικές αναλύσεις, το μέτρο ελαστικότητας του υποβάθρου θεωρήθηκε σταθερό και ίσο με 60000 kPa.

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την πραγματοποίηση της παραμετρικής ανάλυσης, βασιζόταν επομένως σε 2 μεταβλητές παραμέτρους. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές αυτών ήταν γνωστές συνεπώς δημιουργήθηκε ένα σύστημα διερεύνησης το οποίο αφορούσε 2 μεταβλητές παραμέτρους επί 2 μεταβλητές τιμές. Συνεπώς, στην ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκαν 4 αναλύσεις για κάθε ένα τέλμα ξεχωριστά. Αυτές αφορούσαν τη

σχέση μεταξύ μέγιστης και μέγιστης τιμής, μέγιστης και ελάχιστης, ελάχιστης και μέγιστης όπως επίσης και ελάχιστης και ελάχιστης τιμής. Η πρώτη τιμή έχει επιλεγεί να αναφέρεται στο E του αναχώματος ενώ η δεύτερη τιμή στο E των τελμάτων.

Στην **δεύτερη** ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάστηκε ο βαθμός επιρροής της ύπαρξης υδροφόρου ορίζοντα κάτω από τις λεκάνες των τελμάτων. Σε γενικές γραμμές, ο υδροφόρος ορίζοντας εμφανίζεται αρκετά μέτρα παρακάτω επειδή τα τέλματα βρίσκονται σε ψηλότερα σημεία από τα 2 ποτάμια, σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη. Επίσης, η ύπαρξη σχηματισμών με μικρή υδραυλική διαπερατότητα, δεν επιτρέπει την εύκολη διέλευση ρευστών. Ωστόσο, το τέλμα 5 βρίσκεται πολύ κοντά στο ρέμα Κιρκάλων με μία επίπεδη γεωμετρία πρανούς που όπως θα αποδειχτεί παρακάτω, δεν αποτελεί κίνδυνο για το ίδιο το πρανές. Το φαινόμενο της αύξησης του υδροφόρου ορίζοντα βασίζεται στην ύπαρξη βροχοπτώσεων οι οποίες επιπροσθέτως ανεβάζουν την στάθμη και της λίμνης των τελμάτων. Γι' αυτό άλλωστε στις επιλύσεις η στάθμη των τελμάτων έχει ανεβεί σε ύψος ίσο με αυτό του αναχώματος. Έτσι πραγματοποιείται η ανάλυση της ευστάθειας, στις πιο δυσμενείς συνθήκες.

Στην **τρίτη** ομάδα παραμετρικών αναλύσεων, έγινε περαιτέρω ανάλυση της αύξησης του υδροφόρου ορίζοντα στα τέλματα 3,4 και 6. Τα υπόλοιπα 2 τέλματα, δηλαδή τα τέλματα 2 και 5, έχουν επίπεδη γεωμετρία. Συνεπώς η αύξηση του υδροφόρου ορίζοντα και δεν έχει αρνητική επίδραση στη διατμητική αντοχή του εδάφους αλλά και δε μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, αφού ήδη έχει φτάσει την ανώτατη στάθμη. Στις υπόλοιπες λεκάνες, η γεωμετρία είναι πιο απότομη με αποτέλεσμα να μπορεί να τροποποιηθεί επιπλέον ο υδροφόρος ορίζοντας. Αυτό που διερευνάται στην συγκεκριμένη ανάλυση είναι ο βαθμός επίδρασης του νερού στην αντοχή του αναχώματος. Ο υδροφόρος ορίζοντας πλέον βρίσκεται σε στάθμες πολύ αυξημένες, και το νερό βρίσκεται εντός της καμπύλης διατμητικής αστοχίας. Στόχος είναι η σύγκριση του συντελεστή ασφαλείας με τους υπόλοιπους που έχουν υπολογιστεί. Η παραμετρική ανάλυση των ομάδων 2 και 3 προσαρμόστηκε στα αποτελέσματα της ομάδας 1. Με άλλα λόγια, τα αποτελέσματα των ομάδων 2 και 3 έχουν επιλυθεί στην κατηγορία ελάχιστη- μέγιστη της ομάδας 1 επειδή σε αυτή τη κατηγορία βρέθηκαν οι χαμηλότεροι συντελεστές ασφαλείας.

Η **τέταρτη** ομάδα παραμετρικών αναλύσεων συσχετίζεται με την επίδραση των μετακινήσεων που πραγματοποιούνται από τη διαδικασία κατασκευής ενός τέτοιου

αναχώματος. Οι αναλύσεις αυτής της ομάδας πραγματοποιούνται παράλληλα με τις υπολογιστικές διαδικασίες των υπόλοιπων ομάδων.

5.5 ΦΑΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Οι παραμετρικές ομάδες αναλύσεων αναφέρονται σε διαφορετικές τιμές των διαφόρων παραμέτρων ωστόσο, τα κατασκευαστικά στάδια του αναχώματος και οι φάσεις της επίλυσης του προβλήματος είναι οι ίδιες.

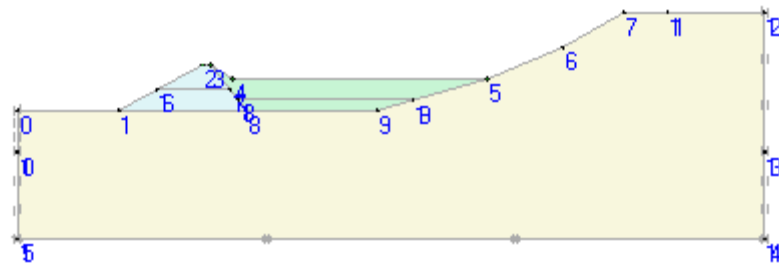
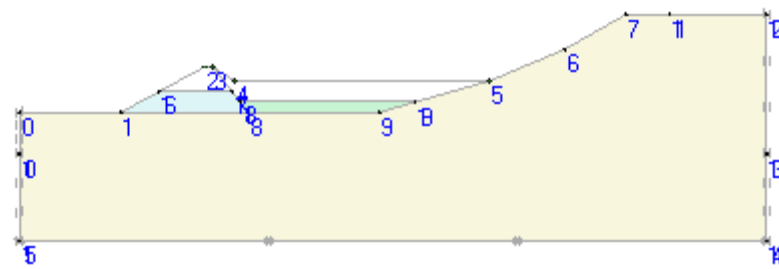
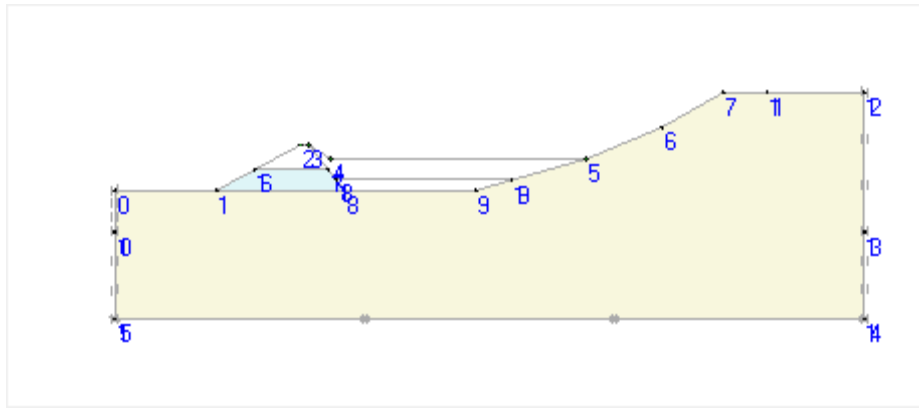
Η **πρώτη** φάση της επίλυσης περιλαμβάνει την διαδικασία “Gravity Loading”. Επειδή η γεωμετρία του αναχώματος δεν είναι οριζόντια, δεν είναι δυνατό να εισαχθούν οι γεωστατικές τάσεις με τη χρήση της σταθεράς K_0 , όπως υποδεικνύει η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στο υποπρόγραμμα INPUT. Έτσι, δημιουργείται μία νέα πλαστική φάση όπου το αβαρές σώμα που έχει σχεδιαστεί στο γεωμετρικό μοντέλο, αρχίζει να αποκτά σταδιακά βάρος με την σταδιακή αύξηση του συντελεστή βάρους.

Στη **δεύτερη** φάση, ξεκινάει η κατασκευή του αναχώματος όπου και ενεργοποιείται το πρώτο τμήμα του. Το ύψος του αναχώματος στο πρώτο κατασκευαστικό στάδιο, πλησιάζει το 50% του συνολικού ύψους του αναχώματος. Στη φάση αυτή ενεργοποιείται η εντολή “Reset Displacement to zero” με στόχο τον μηδενισμό των μετακινήσεων από την προηγούμενη φάση, καθώς αυτές δεν είναι πλέον χρήσιμες στις επόμενες φάσεις.

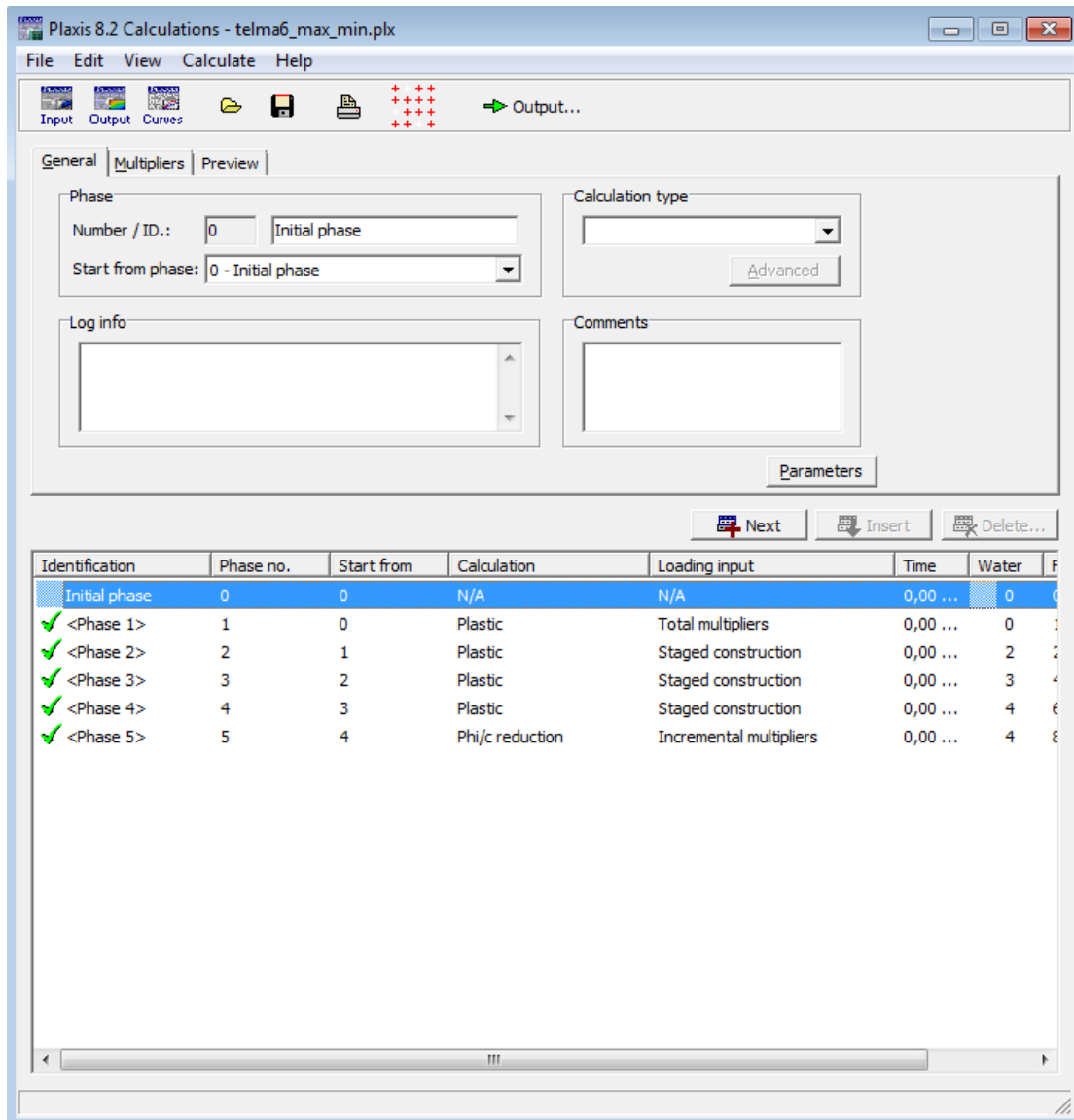
Στην **τρίτη** φάση των επιλύσεων, συνεχίζεται η κατασκευή του φράγματος καθώς εισάγεται το υλικό των τελμάτων σε ύψος περίπου 50% επί του συνολικού ύψους.

Στην **τέταρτη** φάση όπου περιλαμβάνεται το τρίτο και τελευταίο κατασκευαστικό στάδιο, ενεργοποιούνται τα υπόλοιπα τμήματα των υλικών του αναχώματος και των τελμάτων.

Στην **πέμπτη** και τελευταία φάση των επιλύσεων, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας με την διαδικασία “Phi/c reduction” κατά την οποία η γωνία τριβής ϕ και η συνοχή c του μοντέλου, μειώνεται σταδιακά εως ότου το πρανές αστοχήσει πλασματικά.



Εικόνες 5.6-5.8: Παράδειγμα Φάσεως κατασκευής ενός από τα αναχώματα.



Εικόνα 5.9: Οι διαδοχικές φάσεις επίλυσης των αναχωμάτων στο υποπρόγραμμα “Calculations”.

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων των οποίων η ανάπτυξη τους έχει ήδη αναφερθεί. Η εφαρμογή αυτών έχει πραγματοποιηθεί για τα τέλματα 2 έως 6.

6.2 1^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΟΜΑΔΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

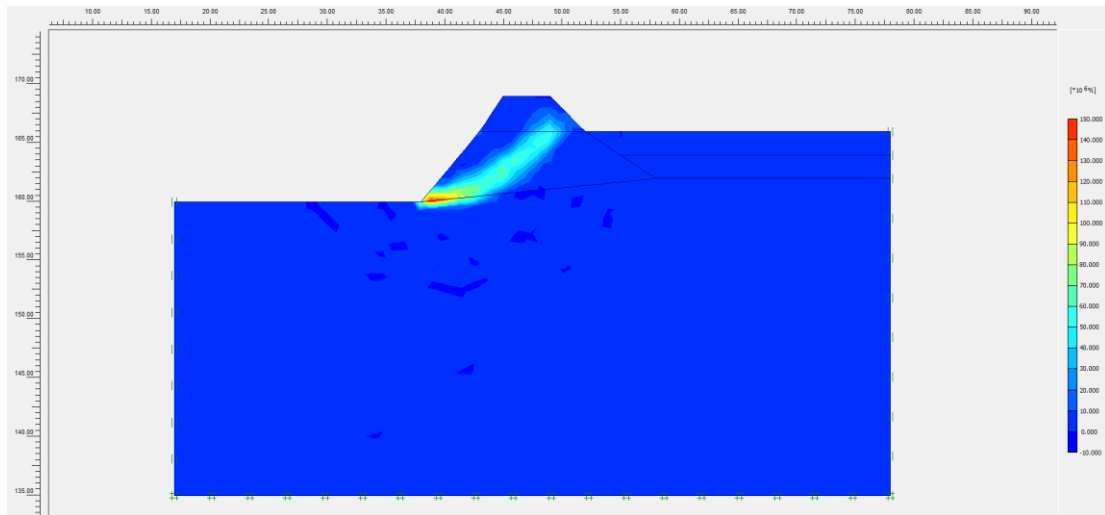
Στην 1^η παραμετρική ομάδα αναλύσεων εξετάστηκε ο συντελεστής ασφαλείας των πρανών που συγκρατούν τα τέλματα, εξαιτίας της διαφοροποίησης του μέτρου ελαστικότητας των υλικών του αναχώματος και των υλικών του τέλματος. Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων.

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων 1^{ης} παραμετρικής ομάδας αναλύσεων.

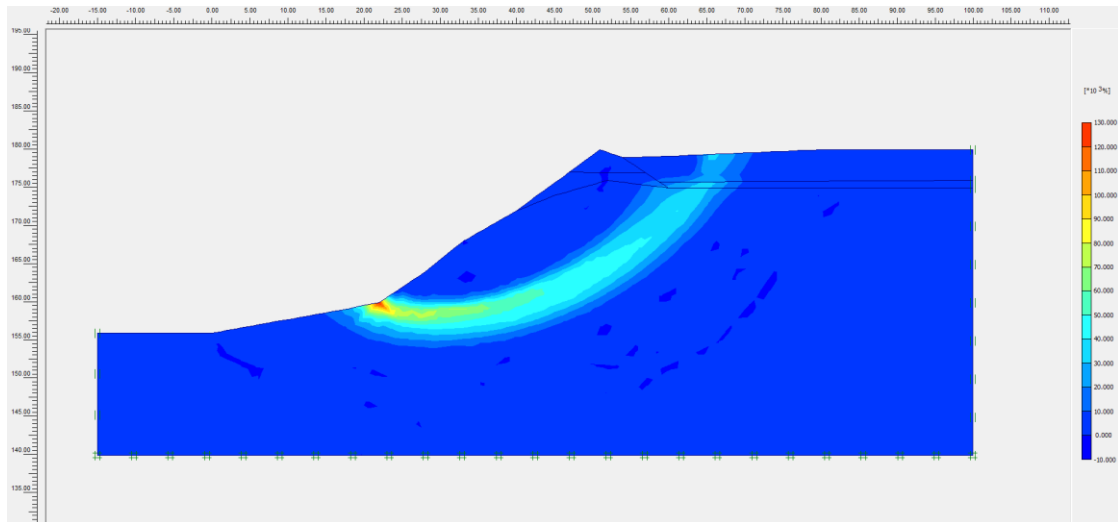
Συντελεστής Ασφαλείας	Ε (αναχώματος – τέλματος)	max-max	max -min	min - max	min -min
Τέλεσμα 2		2,136	2,129	2,114	2,123
Τέλεσμα 3		2,477	2,452	2,406	2,435
Τέλεσμα 4		2,866	2,858	2,853	2,862
Τέλεσμα 5		4,983	4,986	4,962	4,97
Τέλεσμα 6		4,753	4,731	4,726	4,736
Τέλεσμα 6 Νέο		7,152	7,132	7,111	7,131

Από τα παραπάνω είναι εμφανές πως το μεγαλύτερο εύρος που παρατηρείται μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής του συντελεστή ασφαλείας είναι μόλις 0,08. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη μικρή διαφορά μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας του υλικού των τελμάτων. Ωστόσο, οι ελάχιστες τιμές του συντελεστή ασφαλείας εμφανίζονται στην περίπτωση “min – max”. Έτσι, οι επόμενες ομάδες παραμετρικών αναλύσεων έχουν πραγματοποιηθεί στις συγκεκριμένες συνθήκες, δηλαδή στις πιο δυσμενείς.

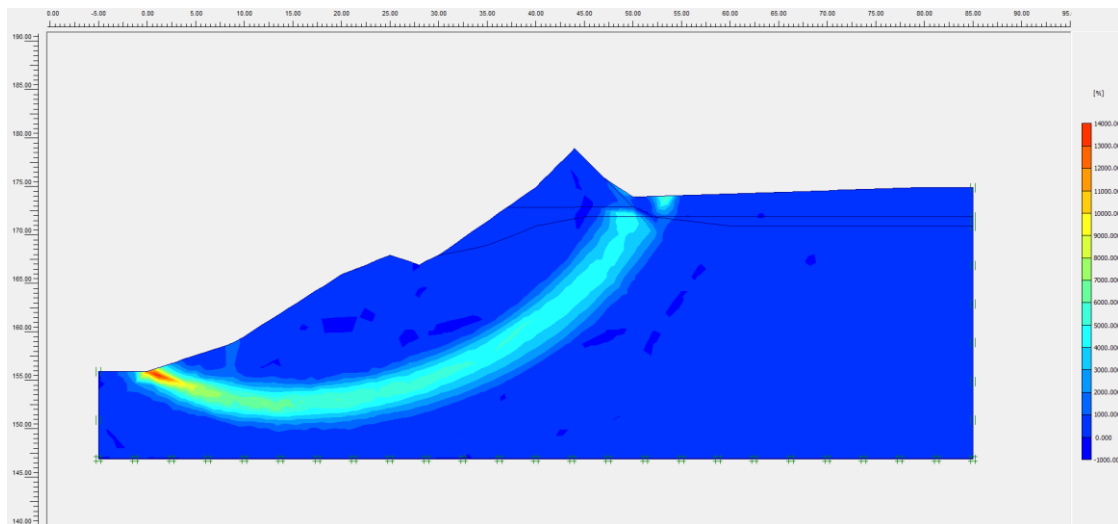
Εκτός από το αριθμητικό αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να βρεθεί και ο τύπος της αστοχίας. Με άλλα λόγια, πρέπει να φαίνεται η δυνητική επιφάνεια αστοχίας έτσι ώστε να είναι εμφανής η ύπαρξη κινδύνου αστοχίας του πρανούς. Γενικά, επειδή το υλικό είναι εδαφικό και λόγω της συγκεκριμένης γεωμετρίας, οι αναμενόμενες αστοχίες που μπορούν να προκληθούν ανήκουν στην κατηγορία των ολισθήσεων. Οι ολισθήσεις συσχετίζονται με την διατμητική παραμόρφωση – μετατόπιση και τέλος διατμητική θραύση του υλικού κατά μήκος μίας ή περισσότερων επιφανειών εντός των ορίων μιας σχετικά στενής ζώνης (λουπασάκης). Αυτές οι επιφάνειες αστοχίας μπορεί να είναι είτε κυκλικές είτε επίπεδες. Το PLAXIS παρέχει τη δυνατότητα εύρεσης της επιφάνειας αστοχίας, μέσω της επιλογής “incremental strains” δηλαδή της σταδιακής διατμητικής παραμόρφωσης στο υποπρόγραμμα output. Στις παρακάτω εικόνες, φαίνονται οι επιφάνειες της δυνητικής αστοχίας των αναχωμάτων 2 έως 6.



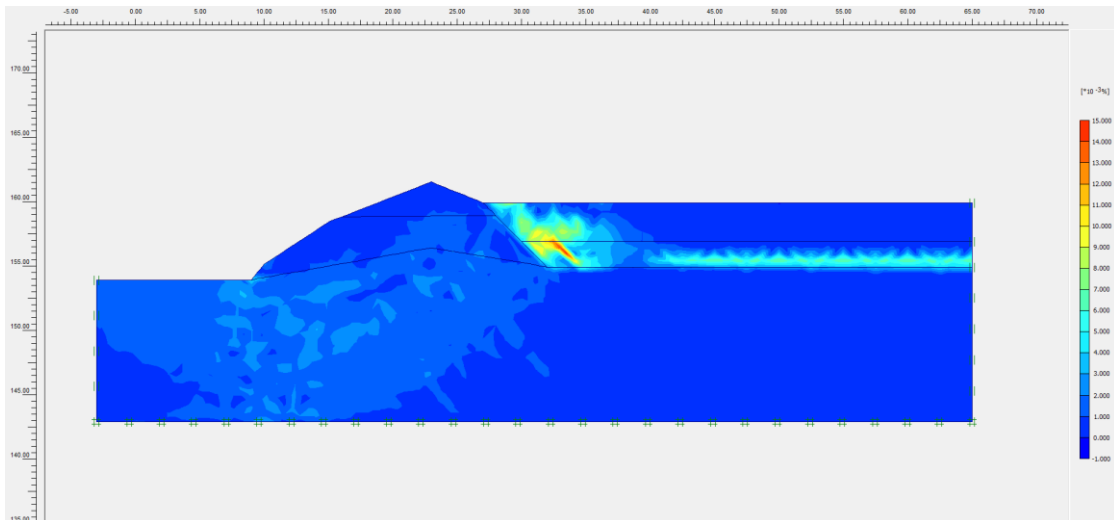
Εικόνα 6.1: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας τέλματος 2.



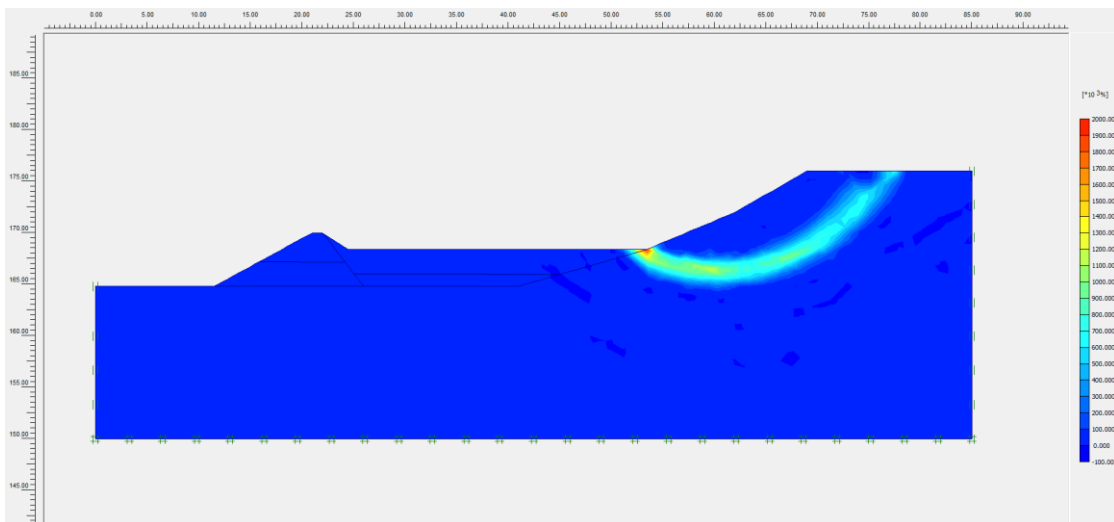
Εικόνα 6.2: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας τέλματος 3.



Εικόνα 6.3: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας τέλματος 4.



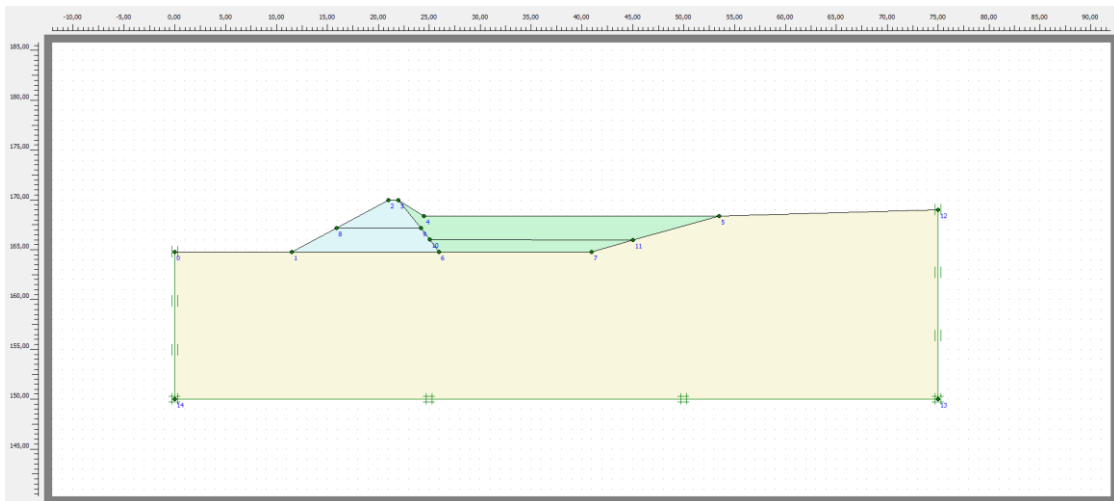
Εικόνα 6.4: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας τέλματος 5.



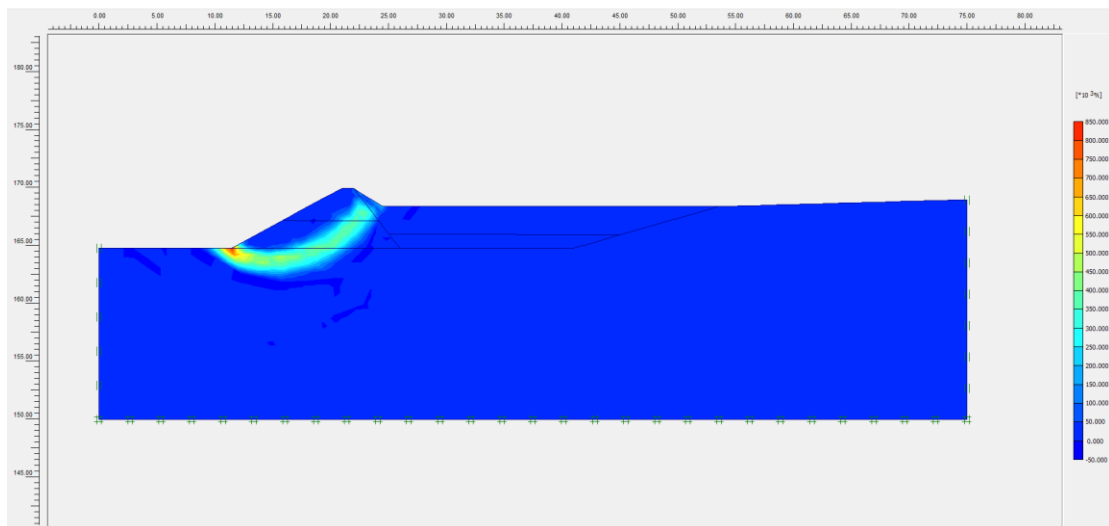
Εικόνα 6.5: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας του τέλματος 6.

Από τις παραπάνω εικόνες, είναι εύκολα αντιληπτό πως ο μεγαλύτερος κίνδυνος αστοχίας έγκειται στο «πόδι» του αναχώματος καθώς οι παραμορφώσεις που οφείλονται σε διάτμηση, είναι μεγαλύτερες. Γενικά στις ολισθήσεις, το πόδι του πρανούς είναι αυτό το οποίο δέχεται τα μεγαλύτερα φορτία με αποτέλεσμα να είναι πιο ευάλωτο σε αστοχία. Επίσης παρατηρείται πως στο τέλμα 5 δεν εμφανίζεται διατμητική επιφάνεια θραύσης με αποτέλεσμα να καθίσταται ασφαλές από αστοχία. Η επίπεδη γεωμετρία του ανάγλυφου σε συνδυασμό με την «ομαλότητα» του αναχώματος παίζουν σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια του εν λόγω πρανούς. Στα υπόλοιπα αναχώματα, η επιφάνεια αστοχίας είναι κυκλική και περνάει από το πόδι του πρανούς. Ένα άλλο στοιχείο που μπορεί να παρατηρηθεί από τις παραπάνω εικόνες είναι η επιφάνεια αστοχίας στο τέλμα 6. Η διατμητική επιφάνεια που

εμφανίζεται δεν αναφέρεται στο πρανές του αναχώματος αλλά στο πρανές του εδάφους, δηλαδή στο υλικό του υποβάθρου. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στους υπολογιστικούς μηχανισμούς του λογισμικού PLAXIS το οποίο έκρινε πως η σημαντικότερη αστοχία στο μοντέλο μπορεί να προκληθεί στο πρανές του εδάφους. Επειδή όμως είναι σημαντικό να βρεθεί η επιφάνεια αστοχίας μαζί με τον συντελεστή ασφαλείας στο ανάχωμα, δημιουργήθηκε μια νέα γεωμετρία στην οποία δεν συνυπήρχε το τμήμα ύστερα από το υλικό των τελμάτων και ύστερα, πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία.



Εικόνα 6.6: Γεωμετρικό μοντέλο του τέλους 6 με αφαίρεση του υψώματος που περιλαμβάνει το υπόβαθρο.



Εικόνα 6.7: Δυναμική επιφάνεια αστοχίας τέλους 6 ύστερα από αφαίρεση του πρανούς τους εδάφους.

Είναι προφανές πως σε αυτήν την περίπτωση, εμφανίζεται η επιθυμητή επιφάνεια αστοχίας με συντελεστή ασφαλείας αρκετά υψηλότερο από αυτόν του πρανούς του εδάφους. Το πόδι του πρανούς είναι αυτό που εμφανίζει το μεγαλύτερο κίνδυνο αστοχίας στο πρανές.

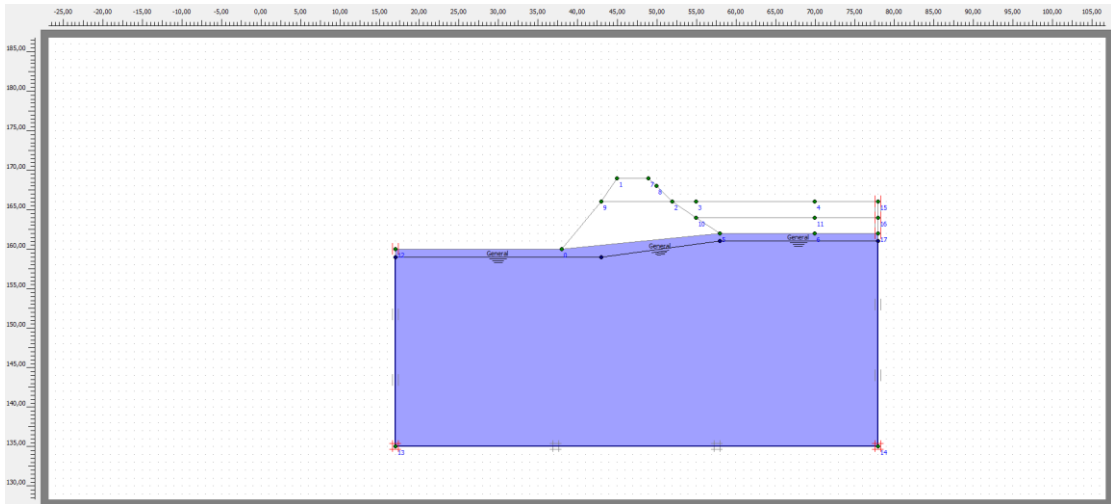
Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει πως τα αναχώματα δεν διατρέχουν κίνδυνο αστοχίας κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες επειδή οι συντελεστές ασφαλείας είναι πολύ μεγαλύτεροι από την μονάδα.

Πίνακας 6.2: Συγκεντρωτικός πίνακας ελαχίστων τιμών του συντελεστή ασφαλείας για κάθε τέλμα.

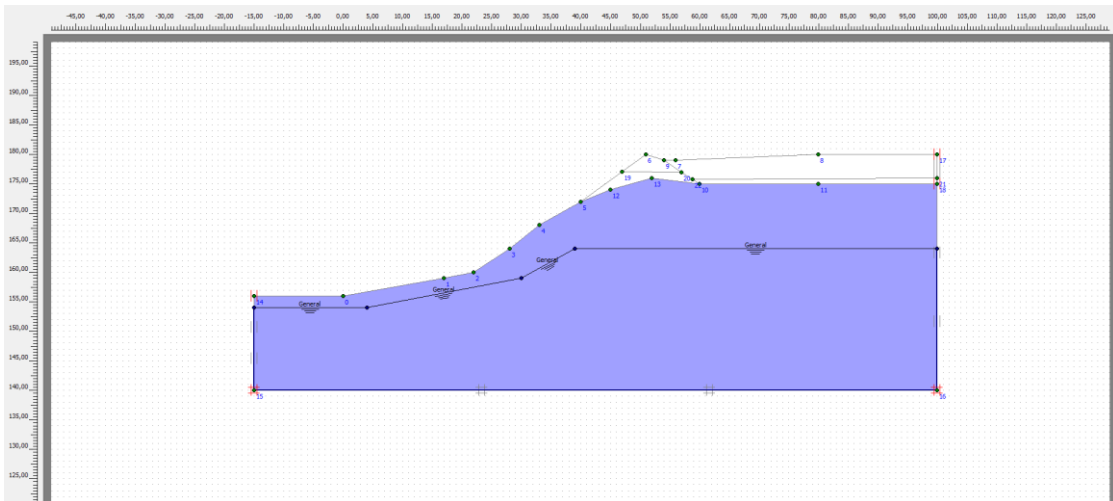
Τέλματα	Συντελεστής Ασφαλείας
Τέλμα 2	2,114
Τέλμα 3	2,406
Τέλμα 4	2,853
Τέλμα 5	4,962
Τέλμα 6	4,726
Τέλμα 6 Νέο	7,111

6.3 2^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΟΜΑΔΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

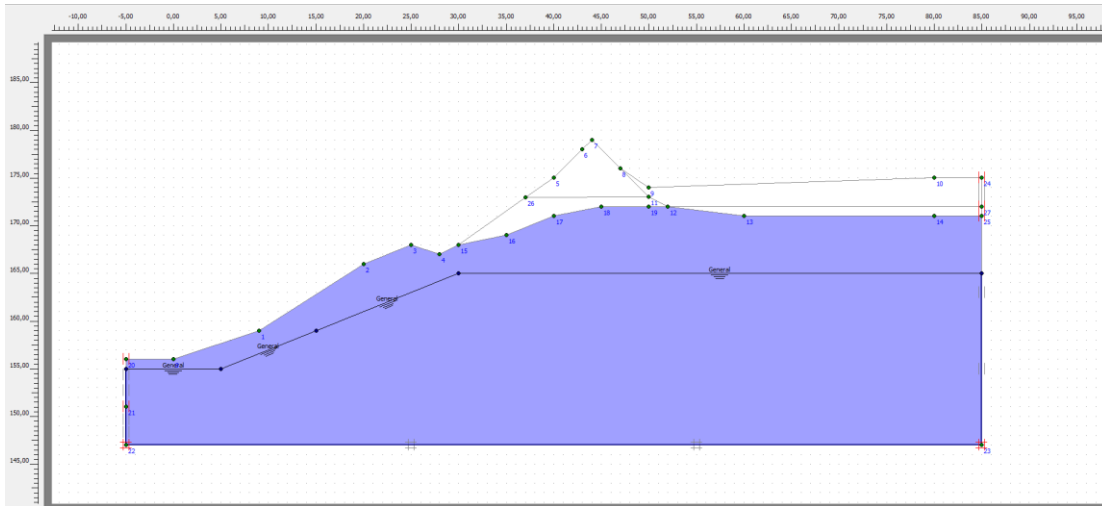
Στην 2^η παραμετρική ομάδα αναλύσεων, ερευνήθηκε εκ νέου ο συντελεστής ασφαλείας των αναχωμάτων με δεδομένο αυτή τη φορά, την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε πάνω στα υπάρχοντα μοντέλα με μηχανικές παραμέτρους «min – max», αυτές δηλαδή που έδωσαν τον χαμηλότερο συντελεστή ασφαλείας. Τα γεωμετρικά μοντέλα που παράχθηκαν για αυτό το σκοπό παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



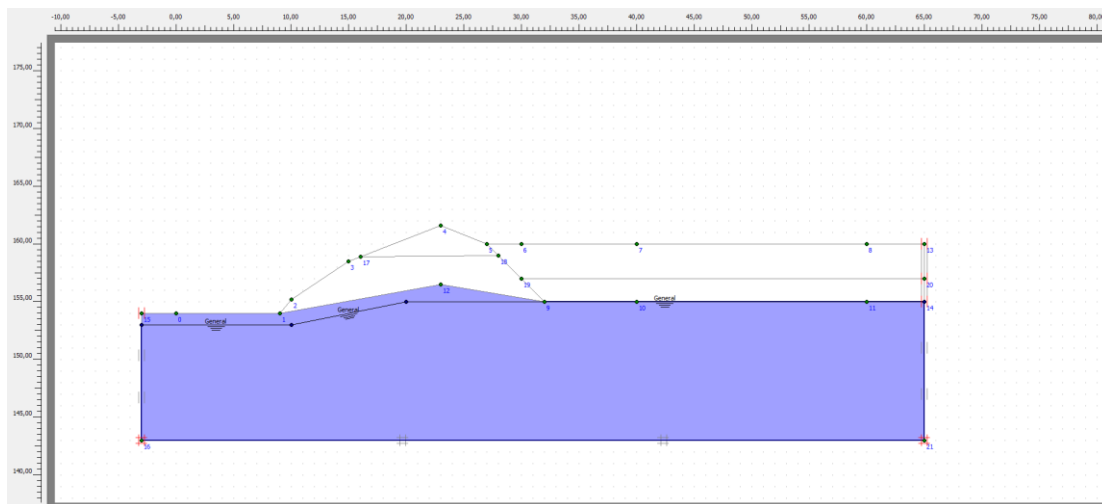
Εικόνα 6.8: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 2 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.



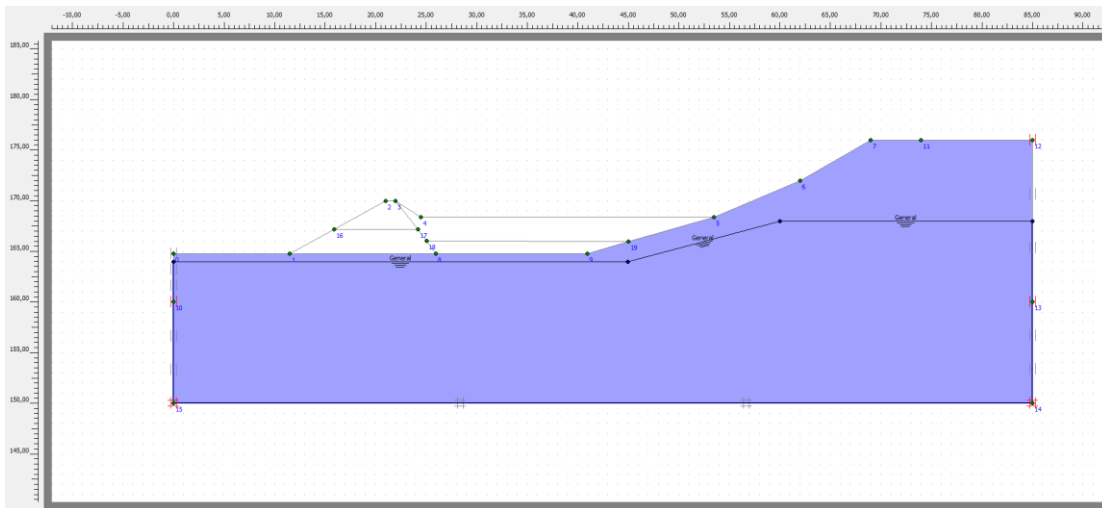
Εικόνα 6.9: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 3 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.



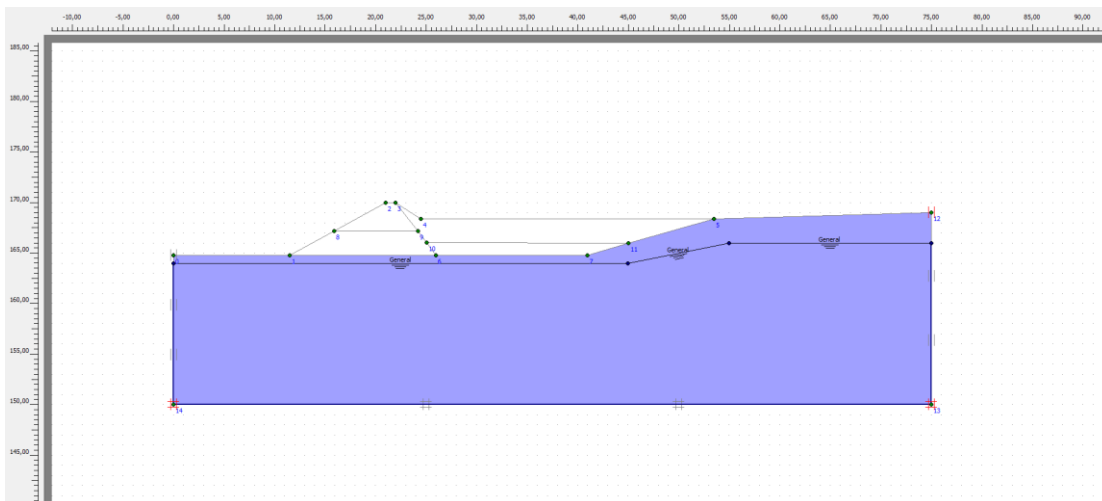
Εικόνα 6.10: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 4 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 6.11: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 5 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 6.12: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 6 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.

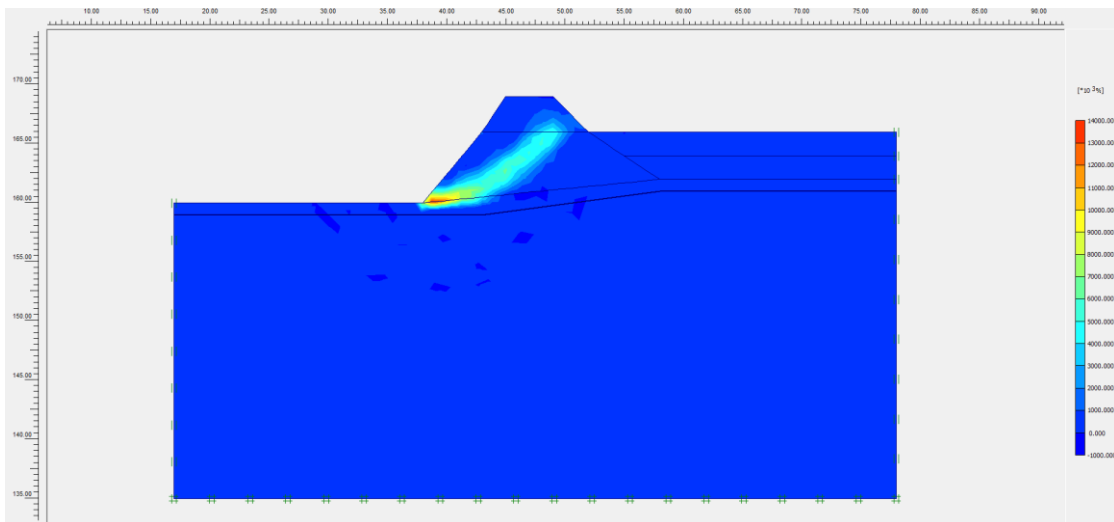


Εικόνα 6.13: Γεωμετρικό μοντέλο λεκάνης 6 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.

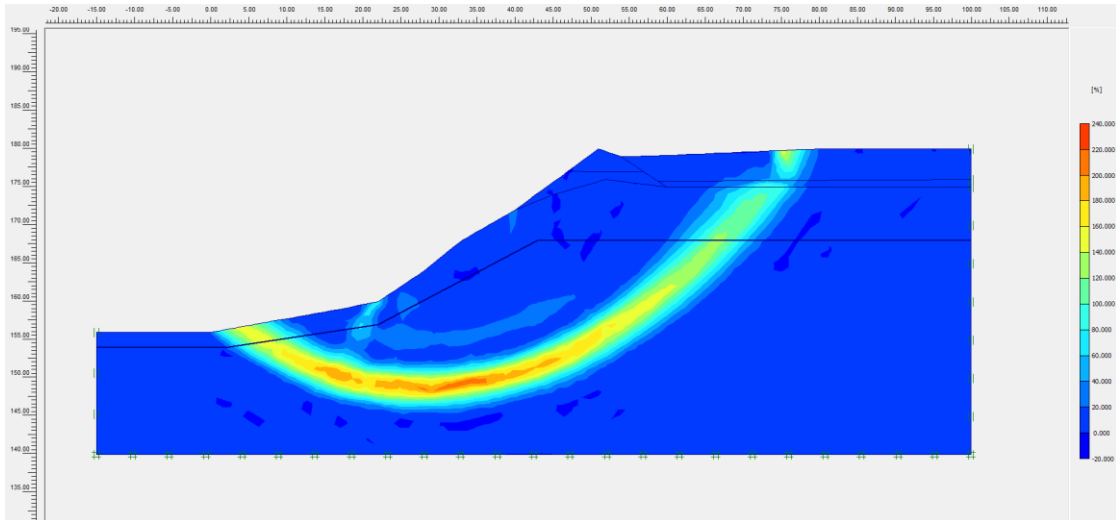
Η διαδικασία επίλυσης που εφαρμόστηκε, ήταν η ίδια και από αυτήν προέκυψαν οι νέοι συντελεστές ασφαλείας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τόσο τα αριθμητικά αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής, όσο και οι επιφάνειες αστοχίας μαζί με τον υδροφόρο ορίζοντα.

Πίνακας 6.3: Συντελεστής ασφαλείας των τελμάτων με την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.

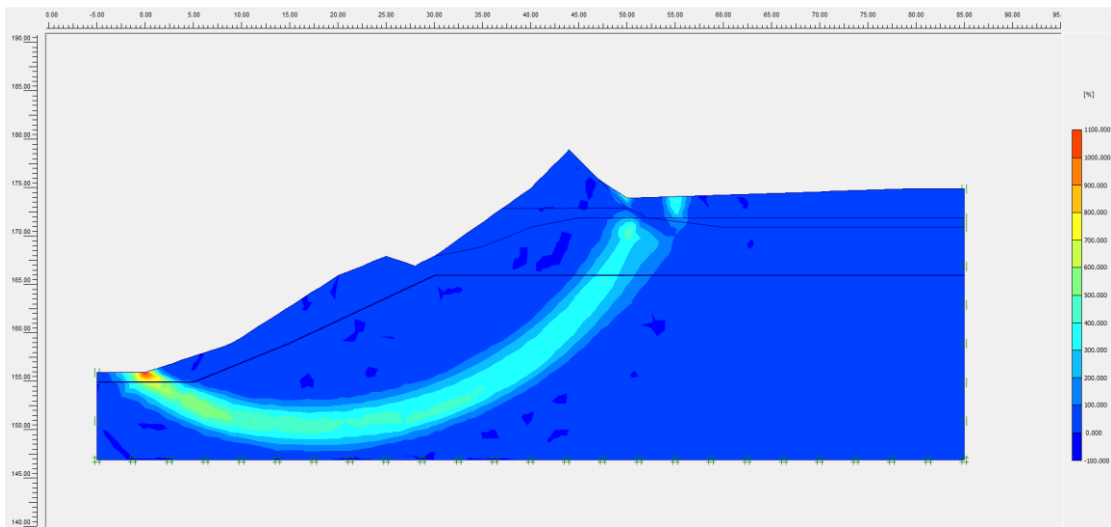
Τέλματα	Συντελεστής Ασφαλείας
Τέλμα 2	1,978
Τέλμα 3	1,917
Τέλμα 4	2,206
Τέλμα 5	4,703
Τέλμα 6	4,613
Τέλμα 6 Νέο	7,046



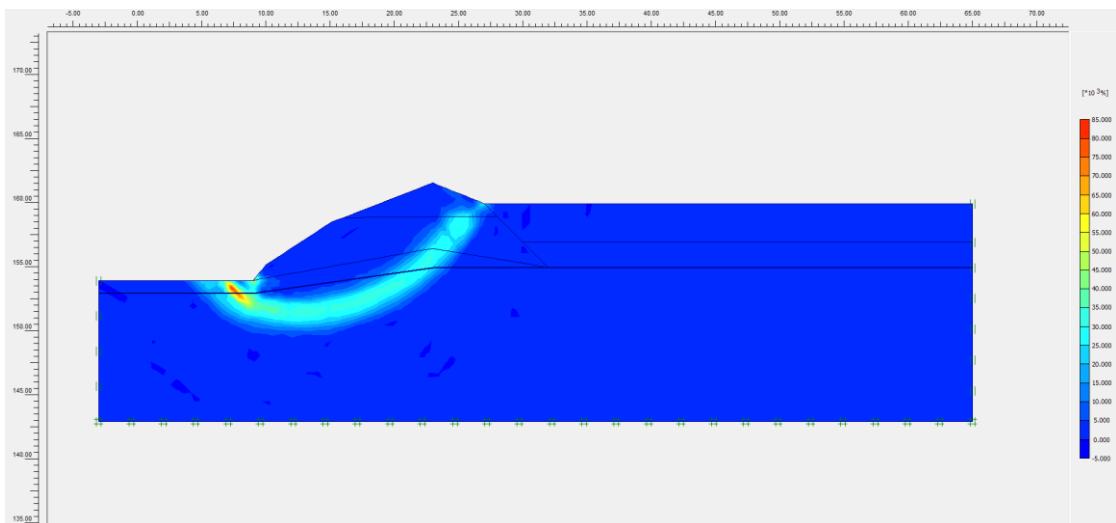
Εικόνα 6.14: Δυναμική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 2.



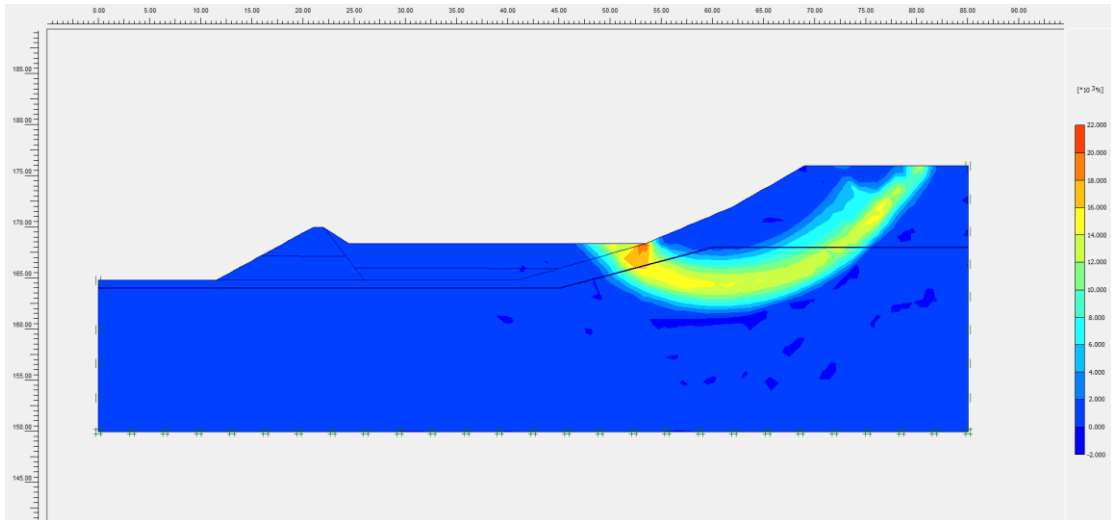
Εικόνα 6.15: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 3.



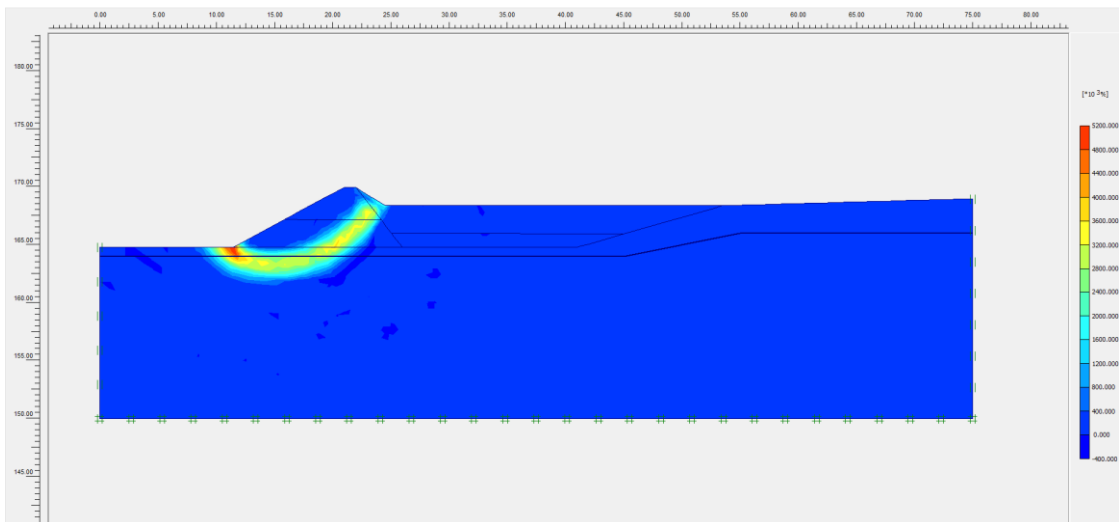
Εικόνα 6.16: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 4.



Εικόνα 6.17: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 5.



Εικόνα 6.18: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 6.



Εικόνα 6.19: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας και υδροφόρος ορίζοντας στο τέλμα 6 ύστερα από αφαίρεση του πρσανούς τους εδάφους.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται μία γενική μείωση των συντελεστών ασφαλείας των αναχωμάτων. Σύμφωνα με τη θεωρία των Mohr – Coulomb, η διατμητική αντοχή του εδάφους μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau = C + \sigma' * \epsilon\phi\phi$$

όπου τ , η διατμητική αντοχή του εδαφικού σχηματισμού, c , η συνοχή του, ϕ , η γωνία τριβής του και σ' η ενεργή ορθή τάση που επικρατεί στον σκελετό. Η παράμετρος σ' υπολογίζεται όταν από τις ολικές τάσεις, αφαιρεθούν οι πιέσεις του νερού των πόρων.

$$\sigma' = \sigma - u$$

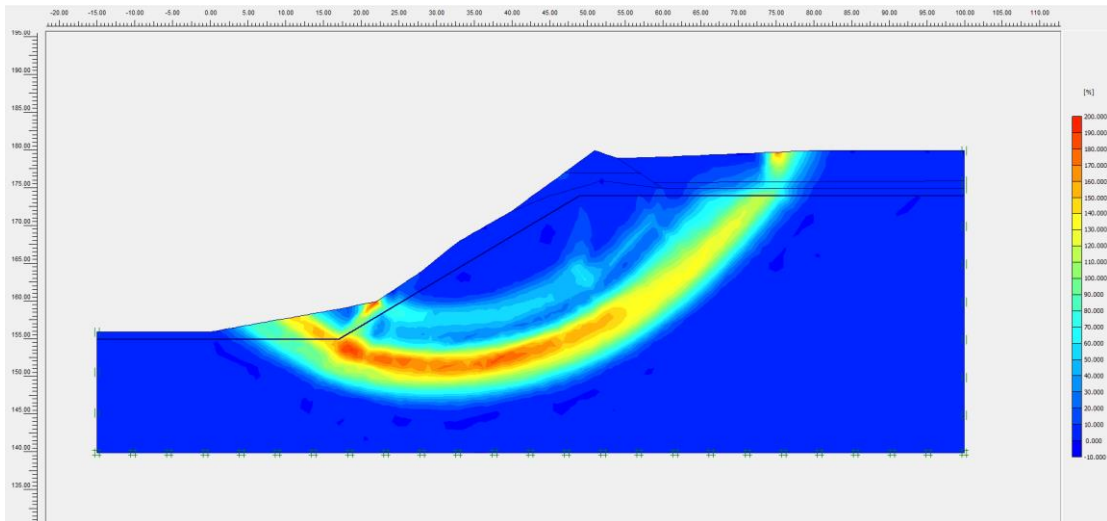
Συνεπώς, όταν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται εντός της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας, η ενεργή ορθή τάση μειώνεται, με αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής του εδαφικού σχηματισμού. (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002). Στο τέλμα 2 ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται εκτός της διατμητικής επιφάνειας αστοχίας με αποτέλεσμα ο συντελεστής ασφαλείας να παραμένει σταθερός. Αντιθέτως, στα τέλματα 3 και 4 ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται αρκετά επειδή η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έχει εισέλθει εντός της επιφάνειας αστοχίας και καλύπτει ένα μεγάλο ποσοστό αυτής. Συγκεκριμένα, στο ανάχωμα 3 πέραν από την μείωση του συντελεστή ασφαλείας, παρατηρείται και εντονότερη διατμητική παραμόρφωση κατά μήκος της κυκλικής επιφάνειας αστοχίας. Επίσης φαίνεται να δημιουργείται και μία δεύτερη κυκλική επιφάνεια αστοχίας παράλληλη στην πρώτη χωρίς όμως να έχει σχηματιστεί πλήρως. Τα υπόλοιπα αναχώματα επιφέρουν μία ανάλογη πτώση του συντελεστή ασφαλείας αλλά μικρότερη σε σχέση με αυτή των τελμάτων 3 και 4.

6.4 3^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΟΜΑΔΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

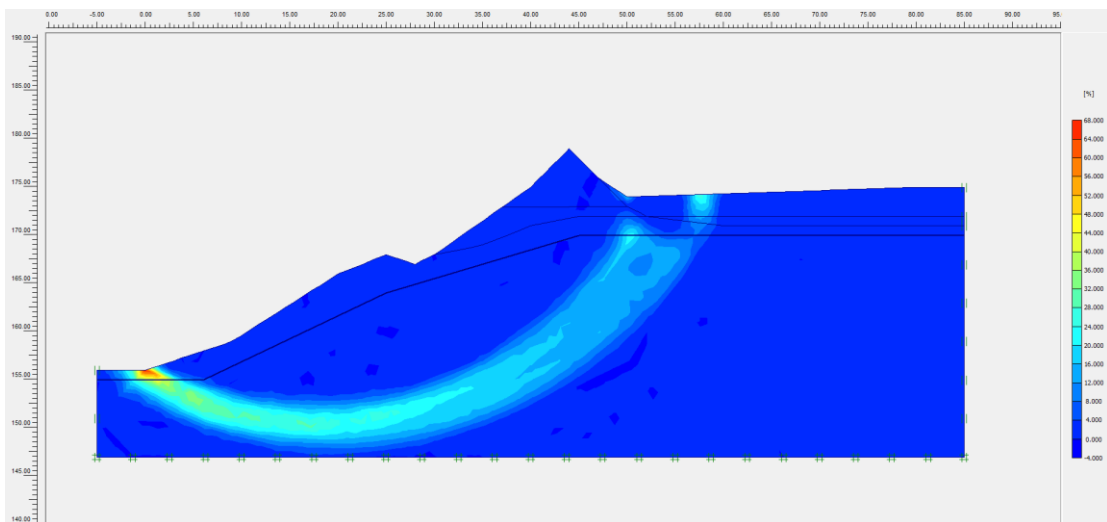
Στην τρίτη παραμετρική ομάδα αναλύσεων πραγματοποιήθηκε περαιτέρω ανάλυση των αναχωμάτων 3,4 και 6. Ο απώτερος σκοπός ήταν να ερευνηθεί η συμπεριφορά τους σε συνθήκες όπου ο υδροφόρος ορίζοντας καταλαμβάνει ολόκληρη την επιφάνεια του υποβάθρου. Στην πραγματικότητα, αυτή η συνθήκη έχει επιτευχθεί για τα αναχώματα 2 και 5 επειδή λόγω της επίπεδης γεωμετρίας τους. Σχετικά με το ανάχωμα 6, η ανάλυση πραγματοποιείται στην αρχική γεωμετρία επειδή στην δεύτερη γεωμετρία έχει ήδη γίνει πλήρης ανάλυση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων της ομάδας αυτής.

Πίνακας 6.4: Συντελεστής ασφαλείας των τελμάτων με την μέγιστη δυνατή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

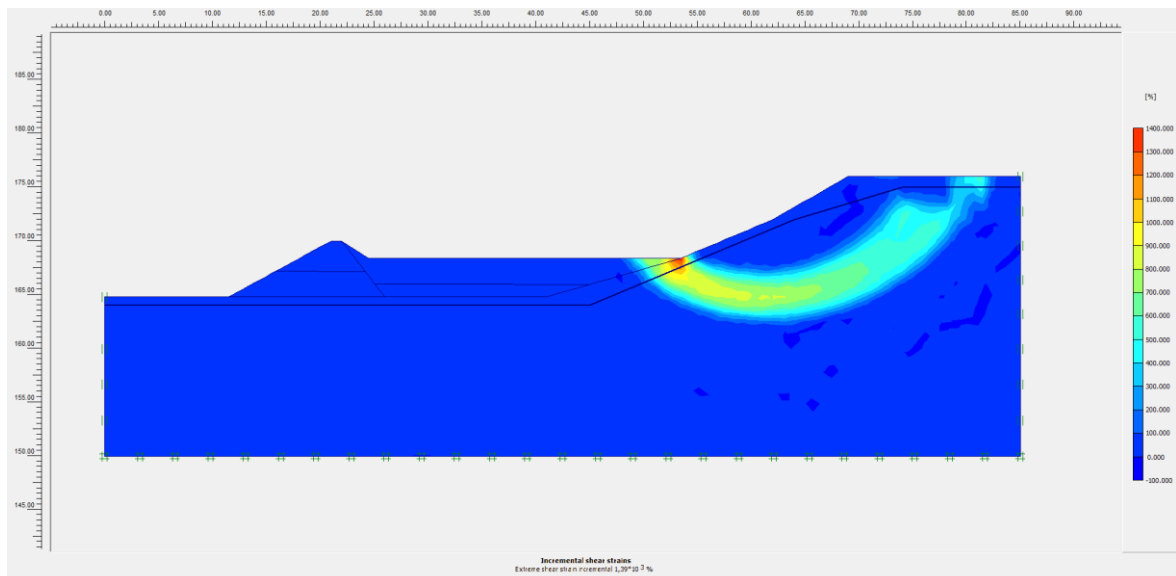
Τέλματα	Συντελεστής Ασφαλείας
Τέλμα 3	1,69
Τέλμα 4	2,066
Τέλμα 6	3,903



Εικόνα 6.20: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας με μέγιστη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στο τέλμα 3.



Εικόνα 6.21: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας με μέγιστη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στο τέλμα 4.



Εικόνα 6.22: Δυνητική επιφάνεια αστοχίας με μέγιστη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στο τέλμα 6.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως ο συντελεστής ασφαλείας των αναχωμάτων, μειώνεται ακόμη περισσότερο, χωρίς όμως να φτάνει σε αριθμούς που να τα καθιστούν επικίνδυνα. Τον χαμηλότερο συντελεστή ασφαλείας έχει το τέλμα 3 με 1,69. Η κυκλική επιφάνεια αστοχίας παρουσιάζει παραμορφώσεις καθ' όλη την έκτασή της και επιπλέον, έχει δημιουργηθεί και δεύτερη επιφάνεια αστοχίας στην οποία φαίνεται και ο κύκλος της αλλά και το πόδι από το οποίο περνάει.

6.5 4^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΟΜΑΔΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στην 4^η παραμετρική ομάδα αναλύσεων, ερευνήθηκαν οι συνολικές μετακινήσεις του εδάφους κατά την διαδικασία κατασκευής των τελμάτων αυτών. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η κατασκευή των τελμάτων αυτών μελετήθηκε σε 3 φάσεις. Τα παρακάτω αποτελέσματα, αφορούν τις συνολικές μετακινήσεις του συστήματος, ύστερα από την ολοκλήρωση της 3^{ης} φάσης κατασκευής. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με και χωρίς την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.

Πίνακας 6.5: Συνολικές μετακινήσεις σε χιλιοστά, με την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα

Τέλματα	Συνολικές Μετακινήσεις (mm)
Τέλμα 2	73,33
Τέλμα 3	96,68
Τέλμα 4	40,27
Τέλμα 5	66,62
Τέλμα 6	40,34

Πίνακας 6.6: Συνολικές μετακινήσεις χωρίς την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα.

Συνολικές Μετακινήσεις (mm)	E (αναχώματος - τέλματος)	max - max	max - min	min - max	min - min
Τέλμα 2		61,81	63,73	72,32	103,18
Τέλμα 3		96,66	99,69	96,55	99,79
Τέλμα 4		57,02	58,96	57,01	58,96
Τέλμα 5		66,61	69,64	66,6	69,65
Τέλμα 6		40,38	41,95	40,37	41,94

Πίνακας 6.7: Μέγιστες μετακινήσεις εδάφους κατά την κατασκευή των τελμάτων.

Τέλματα	Συνολικές Μετακινήσεις (mm)
Τέλμα 2	103,18
Τέλμα 3	99,79
Τέλμα 4	58,96
Τέλμα 5	69,65
Τέλμα 6	41,95

Από τα παραπάνω προκύπτει πως οι συνολικές μετακινήσεις κυμαίνονται περίπου από 40 έως 105 χιλιοστά. Τέτοιες τάξεις μεγέθους δεν κρίνονται επικίνδυνες για περιβάλλοντα στα οποία δεν υπάρχουν κτηριακές κατασκευές. Ακόμη και με την ύπαρξη κτηρίου σε κοντινή απόσταση από αυτά, μετατοπίσεις της τάξης του ενός εκατοστού, δεν θέτει την ασφάλειά του σε κίνδυνο.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε ο συντελεστής ασφαλείας των αναχωμάτων που συγκρατούν τα τέλματα του εργοστασίου εμπλουτισμού της Κίρκης. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με την δημιουργία τεσσάρων ομάδων παραμετρικών αναλύσεων. Η κάθε ομάδα εξέτασε τον συντελεστή ασφαλείας υπό διαφορετικές συνθήκες. Τα δεδομένα λήφθηκαν από τις γεωτρήσεις και τις σχετικές επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές. Σχετικά με την ευστάθεια των πρανών και των αναχωμάτων, ο συντελεστής ασφαλείας κατά την διαδικασία ελέγχου της ευστάθειας των πρανών θα πρέπει να είναι ίσος ή μεγαλύτερος από 1,30, ή 1,40 υπό την παρουσία υδροφορίας. Όταν το πρανές έχει συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1, τότε βρίσκεται σε συνθήκες οριακής ισορροπίας

Στην πρώτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων, μελετήθηκε ο συντελεστής ασφαλείας των αναχωμάτων σε σχέση με τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, του αναχώματος και των υλικών των τελμάτων. Το εύρος του μέτρου ελαστικότητας των αναχωμάτων κυμαίνονταν από 10000 kPa έως 17000 kPa. Αντίστοιχα, το εύρος του μέτρου ελαστικότητας των υλικών των τελμάτων κυμαίνονταν από 3400 kPa έως 3600 kPa. Το μέτρο ελαστικότητας του υποβάθρου παρέμεινε σταθερό και ίσο με 60000 kPa. Παρατηρήθηκε πως η διαφοροποίηση του μέτρου ελαστικότητας των υλικών του αναχώματος και των τελμάτων, δεν επιδρά στο συνολικό σύστημα. Το εύρος μεταξύ των συντελεστών ασφαλείας ήταν μόλις 0,08. Συγκεκριμένα ο συντελεστής ασφαλείας στο τέλμα 2 διακυμάνθηκε από 2,114 έως 2,129. Αντίστοιχα, ο συντελεστής ασφαλείας διακυμάνθηκε στα υπόλοιπα τέλματα ως εξής: 2,406 έως 2,477 στο τέλμα 3, 2,853 έως 2,862 στο τέλμα 4, 4,962 έως 4,97 στο τέλμα 5, 4,726 έως 4,753 στο τέλμα 6 και 7,111 έως 7,152 στο νέο γεωμετρικό μοντέλου του τέλματος 6. Σε αυτή την ομάδα παραμετρικών αναλύσεων, δεν υπήρχε η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα. Η επιφάνεια της αστοχίας ήταν κυκλική και οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις εμφανίστηκαν στη πόδι του πρανούς ή του αναχώματος. Συνοψίζοντας τους ελάχιστους συντελεστές ασφαλείας, είναι αντιληπτό πως τα τέλματα δε διατρέχουν κίνδυνο σε παρόμοιες συνθήκες, αφού οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας είναι της τάξης του 2 – 2,5.

Στις ομάδες παραμετρικών αναλύσεων 2 και 3, πραγματοποιήθηκε μελέτη των τελμάτων υπό την επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα. Στην 2^η ομάδα αναλύθηκαν όλα τα

τέλματα. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρισκόταν 3m κάτω από την θέση των τελμάτων. Στα τέλματα 3, 4, 5 και 6 η στάθμη του υδροφόρου ήταν 11, 8, 1 και 1m πιο κάτω αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε πως οι συντελεστές ασφαλείας μειώθηκαν από ελάχιστα μέχρι αρκετά. Το ποσοστό μείωσης εξαρτάται από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Όσο περισσότερο εισέρχεται ο υδροφόρος ορίζοντας στην επιφάνεια αστοχίας, τόσο μεγαλύτερες μειώσεις του συντελεστή ασφαλείας επέρχονται. Στο τέλμα 2, ο συντελεστής ασφαλείας μειώθηκε από 2,114 σε 1,978. Στο τέλμα 3 η τιμή μειώθηκε από 2,406 σε 1,917. Στο τέλμα 4 παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη μείωση, δηλαδή από 2,853 σε 2,206. Στο τέλμα 5, ο συντελεστής ασφαλείας μειώθηκε από 4,962 σε 4,703 και στο τέλμα 6 από 4,736 σε 4,613 για το πρηνές πίσω από το τέλμα και 7,111 σε 7,046 για το τέλμα. Τα τέλματα 2 και 6 είχαν μικρές μεταβολές στον συντελεστή ασφαλείας (0,14 και 0,12 αντίστοιχα). Τα τέλματα 3, 4 και 5, είχαν μεγαλύτερες μεταβολές, (0,49, 0,65 και 0,26 αντίστοιχα). Οι παραμορφώσεις κατά μήκος της κυκλικής επιφάνειας αστοχίας, έγιναν πιο έντονες στα τέλματα 3 και 6. Στην 3^η ομάδα παραμετρικών αναλύσεων ερευνήθηκαν τα τέλματα που είχαν πιο απότομη μορφολογία πρηνούς, δηλαδή τα τέλματα 3,4 και 6. Σε αυτά τα τέλματα, ήταν επιθυμητό να βρεθεί ο συντελεστής ασφαλείας υπό συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα σε μέγιστη στάθμη. Πιο συγκεκριμένα, στα τέλματα 3 και 4, ο υδροφόρος ορίζοντας βρισκόταν και στις 2 περιπτώσεις 1m κάτω από την επιφάνεια των τελμάτων. Στο τέλμα 6, ο υδροφόρος ορίζοντας βρισκόταν ήδη σε μέγιστη στάθμη, αναφορικά με τη θέση των τελμάτων. Ο έλεγχος αφορούσε το ανάχωμα πίσω από τα τέλματα και έτσι, ο υδροφόρος ανέβηκε εως και 1m κάτω από το ψηλότερο σημείο του πρηνούς. Οι συντελεστές ασφαλείας μειώθηκαν ακόμη περισσότερο αλλά όχι σε βαθμό που να θεωρούνται μη ασφαλή τα αναχώματα και τα πρηνή. Το τέλμα 4 μειώθηκε κατά 0,14 (2,07) ενώ το τέλμα 6 κατά 0,71 (3,90). Το τέλμα 3 παρουσίασε μείωση κατά 0,23 και έχει τον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας (1,69). Επίσης κατά μήκος ολόκληρης της κυκλικής επιφάνειας αστοχίας του, παρατηρούνται έντονες παραμορφώσεις. Αν δεν εφαρμοστούν μέτρα προστασίας έναντι διάβρωσης, είναι πιθανό στο μέλλον το τέλμα 3 και ίσως το τέλμα 4 να παρουσιάσουν κάποιο πρόβλημα.

Στην τέταρτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων, ερευνήθηκαν οι συνολικές μετακινήσεις του εδάφους κατά την διαδικασία κατασκευής των τελμάτων αυτών. Γενικά, το εύρος των συνολικών μετακινήσεων κυμάνθηκε από 40mm εως και 1,04cm. Στο τέλμα 2 οι μετακινήσεις μεταβλήθηκαν από 61,81mm εως 103,18mm. Το τέλμα 3 παρουσίασε μικρότερη διακύμανση μετατοπίσεων, δηλαδή από 96,66mm εως και 99,79 mm. Το τέλμα 4 εμφάνισε μετατοπίσεις από 40,27mm εως 58,96mm. Το τέλμα 5 αντίστοιχα έδωσε

μετατοπίσεις από 66,1 έως 66,5mm. Το τέλμα 6 παρουσίασε τις μικρότερες μετατοπίσεις, από 40,34mm έως και 41,94mm. Το περιβάλλον κατασκευής των τελμάτων δε θεωρείται περιοριστικό. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει κάποια κατασκευή σε απόσταση μερικών εκατοστών ή λίγων μέτρων ώστε να διατρέχεται κάποιος κίνδυνος. Επίσης, μετακινήσεις της τάξης του 1cm δε θεωρούνται επικίνδυνες πέραν από ειδικές περιπτώσεις όπου ζητείται μηδενική μετακίνηση του εδάφους.

Από τις αναλύσεις ευστάθειας των αναχωμάτων και των πρανών πάνω στα οποία έχουν θεμελιωθεί τα αναχώματα που συγκρατούν τα τέλματα, προέκυψε πως σύμφωνα με τις παρούσες μορφολογικές και γεωλογικές συνθήκες, δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας σε κανένα από τα αναχώματα αλλά και σε κανένα πρανές. Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει να εφαρμοστούν μέτρα προστασίας έναντι διάβρωσης. Ο λόγος είναι πως η διαρροή των τελμάτων αλλά και η δράση του νερού, μπορούν να διαβρώσουν και να δημιουργήσουν προβλήματα στη δομή των αναχωμάτων και των πρανών.

Σχετικά με την κατασκευή των τελμάτων και των αναχωμάτων, η τοποθεσία κατασκευής των τελμάτων 2,5,7 και 8, βρίσκονται δίπλα στην κοίτη του διερχόμενου ρέματος με αποτέλεσμα να εμφανίζονται έντονες διαβρώσεις και υποσκαφές στις βάσεις των πρανών. Επίσης, τα τέλματα έχουν θεμελιωθεί σε σχηματισμούς χαμηλής έως μέσης υδροπερατότητας ενώ παράλληλα, δεν έχουν ληφθεί μέτρα προστασίας των υπόγειων υδροφόρων, όπως π.χ. εγκατάσταση αργιλικής στρώσης ή γεωμεμβράνης. Επιπλέον, δεν έχουν ληφθεί μέτρα για την απομάκρυνση των επιφανειακά απορρέοντων υδάτων της ανάντη περιοχής, με αποτέλεσμα αυτά να καταλήγουν στις λεκάνες απόθεσης και να διαβρώνουν την περιοχή αλλά και τα ίδια τα αναχώματα. Άλλο ένα σημαντικό πρόβλημα που εμφανίζεται, είναι η υπερχειλίση των λιμναζόντων υδάτων. Αυτό συμβαίνει ύστερα από βροχοπτώσεις σε συνδυασμό με τη χαμηλή υδροπερατότητα των υλικών των τελμάτων. Τα σημαντικότερα προβλήματα διάβρωσης, παρατηρούνται στα τέλματα 3,4,5 και 6. Στα τέλματα 3 και 4 παρατηρείται πως οι υπερχειλίσεις έχουν συμπαρασύρει υλικά σε όλο το μήκος του αναχώματος δημιουργώντας ριπίδια. Επιπλέον στα τέλματα 5 και 6 οι υπερχειλίσεις έχουν οδηγήσει τα αναχώματα σε διάρρηξη. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα υλικά των τελμάτων δύνανται να διαρρεύσουν και να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις από τα αναχώματα. Τέλος, στο τέλμα 2 και 5 είναι εμφανείς οι διαβρώσεις εξαιτίας ροής του ρέματος Κιρκάλων. Σχετικά με το υλικό των τελμάτων, πέραν από την ύπαρξη θειούχων μεταλλευμάτων τα οποία δεν είχαν εμπλουτιστεί επιτυχώς και αποτέθηκαν ως απορρίμματα,

μαζί τους συνυπάρχουν και χημικά τα οποία είχαν εφαρμοστεί για τον διαχωρισμό των μεταλλευμάτων με την μέθοδο της επίπλευσης. Τέτοια είναι τα ξανθογονικά άλατα, έλαια εμπλουτισμού, καυστικό νάτριο, θειικός ψευδάργυρος, πυριτικό δινάτριο και ενώσεις κυανίου. Συνεπώς, το υλικό των τελμάτων μπορεί να χαρακτηριστεί ως τοξικό με αποτέλεσμα να πρέπει να αποφευχθεί πλήρως η διαρροή αυτών στο περιβάλλον.

Για την επίλυση των παραπάνω γεωτεχνικών προβλημάτων που αφορούν τις διαβρώσεις, μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω τεχνικές με στόχο την βελτίωση των γεωτεχνικών συνθηκών. Οι παρακάτω τεχνικές έχουν προταθεί παλαιότερα σε μελέτη του ΙΓΜΕ από τους (Λουπασάκης & Κωνσταντοπούλου, 2007).

- Για την αποτροπή της εισροής των υδάτων που απορρέουν επιφανειακά εντός του χώρου που ορίζεται από τα αναχώματα, μπορεί να κατασκευαστεί ένα **δίκτυο ανοικτών αγωγών απαγωγής όμβριων υδάτων**, ανάντι των τελμάτων. Η θέση αυτών των αγωγών μπορεί να καθοριστεί ύστερα από την τοπογραφική αποτύπωση της περιοχής ενώ η διατομή τους, μπορεί να υπολογιστεί βάσει των βροχομετρικών δεδομένων της ευρύτερης περιοχής.
- Για την αποφυγή διαρροών ρύπων αλλά και για την προστασία των τελμάτων και των αναχωμάτων από τη διάβρωση, μπορεί να γίνει χρήση **γεωσυνθετικών υλικών**. Τα γεωσυνθετικά υλικά θα πρέπει να επικαλύψουν τα τέλματα και τα αναχώματα σε όλη την έκτασή τους, μέχρι και τη βάση τους. Επίσης, οι στρώσεις τους θα πρέπει να περιέχουν τα σωστά γεωσυνθετικά υλικά από κάτω προς τα πάνω, για την επιτυχή εφαρμογή τους. Τα υλικά αυτά περιγράφονται παρακάτω:
 1. **Στρώση γεωυφάσματος**: Τα γεωυφάσματα παρουσιάζουν μεγάλες αντοχές σε εφελκυσμό και διάτρηση. Επιπλέον χαρακτηρίζονται από ουδέτερη χημική συμπεριφορά και σταθερότητα σε περιβάλλοντα με διαφορετική οξύτητα Παρ' όλα αυτά παρουσιάζουν περατότητα και φθορά όταν εκτίθενται για μεγάλο χρονικό διάστημα στον ήλιο (Λουπασάκης, 2015). Συνεπώς η χρήση τους, μπορεί να συμβάλλει στην μείωση των διαφορικών καθιζήσεων στα χαλαρά και υδαρά υλικά των τελμάτων και να προστατεύσει την υπερκείμενη γεωμεμβράνη από διάτρηση.



Εικόνα 7.1: Παράδειγμα χρήσης γεωφάσματος.

2. Στρώση χοντρής **γεωμεμβράνης**: Οι γεωμεμβράνες γενικά χρησιμοποιούνται ως αδιαπέρατα διαφράγματα. Συνήθως κατασκευάζονται από πολυμερή υλικά και ανάλογα με τη σύστασή τους παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στις ιδιότητές τους (Λουπασάκης, 2015). Στην περίπτωση των τελμάτων της Κίρκης, μπορούν να συμβάλουν ως το βασικό υλικό προστασίας, των τελμάτων και των αναχωμάτων απέναντι στη διάβρωση. Σημαντικό είναι να τονιστεί πως τα γεωφάσματα και οι γεωμεμβράνες, θα πρέπει να αγκυρωθούν στην ανάντι περίμετρο των τελμάτων έτσι ώστε να μην υπάρχουν υποσκαφές από τα νερά που ρέουν επιφανειακά.



Εικόνα 7.2: Παράδειγμα εφαρμογής γεωμεμβράνης.

3. Στρώση από **γεωκυψέλες**: Οι γεωκυψέλες είναι τρισδιάστατα γεωσυνθετικά υλικά τα οποία σχηματίζουν κυψέλες ικανές να πληρωθούν από υλικά εδάφους, αδρανών και σκυροδέματος. Ύστερα από τη στρώση τους στα τέλματα και στα αναχώματα, μπορούν να γεμίσουν με εδαφικά υλικά προκειμένου να εγκατασταθεί χλοοτάπητας (Λουπασάκης, 2015). Το αποτέλεσμα της στρώσης με γεωκυψέλες, θα είναι η αντιδιαβρωτική προστασία του εδαφικού μανδύα



Εικόνα 7.3: Εφαρμογή γεωκυψέλης με πλήρωση από κροκαλοπαγή υλικά.

- Αφού διαστρωθούν τα γεωσυνθετικά υλικά με τη σειρά, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω μπορεί να γίνει φύτευση **χλοοτάπητα** πάνω στα τέλματα με εδαφικό μανδύα, εντός των γεωκυψελών. Με αυτή τη τεχνική, μπορεί να επιτευχθεί περιβαλλοντική αποκατάσταση του τοπίου. Παρ' όλα αυτά, πρέπει να ληφθεί μέριμνα έτσι ώστε τα φυτά που επρόκειτο να φυτευθούν να μη έχουν βαθύτερο ριζικό σύστημα από το πάχος του εδαφικού μανδύα. Αν το ριζικό σύστημα είναι βαθύτερο από το πάχος του εδαφικού μανδύα, τότε μπορεί να προκληθεί αστοχία στο ανάχωμα και φθορές από διάβρωση.
- Προκειμένου να διαστρωθούν τα γεωσυνθετικά υλικά, είναι απαραίτητο να **διαμορφωθεί η κλίση των τελμάτων**. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την συλλογή των υλικών που έχουν ήδη διαρρεύσει από τα τέλματα και επαναχρησιμοποίησή τους για τον σκοπό αυτό. Έτσι λύνεται και το πρόβλημα διάθεσης των υλικών αυτών.
- Για την προστασία των αναχωμάτων 2,5,7 και 8, μπορούν να κατασκευαστούν τοίχοι βαρύτητας από συρματοκιβώτια κατά μήκος των ρεμάτων Κιρκάλων και Ειρήνη. Η τεχνική αυτή διασφαλίζει την προστασία των αναχωμάτων από διάβρωση και υποσκαφή, κυρίως τις περιόδους όπου τα ρέματα πλημμυρίζουν. Τα συρματοκιβώτια είναι συρμάτινα κιβώτια τα οποία πληρώνονται με θραυστό υλικό ή κροκάλες. Επιπλέον, για τον περιορισμό των παραμορφώσεων όπως επίσης και για τη διατήρηση του σχήματος στο εσωτερικό τους υπάρχουν συρμάτινα διαφράγματα. Ανήκουν στην κατηγορία των τοίχων βαρύτητας και είναι μία ιδιαίτερα φτηνή τεχνική, σε σχέση με τα οφέλη που προσφέρει. Εφαρμόζονται σε αντιστηρίξεις πρανών μικρού έως μέσου ύψους και παρουσιάζουν υψηλή ικανότητα αποστράγγισης, μεγάλη πλαστικότητα όπως επίσης και ανοχή σε μετακινήσεις. Τα συρματοκιβώτια, θα πρέπει να έχουν ύψος 1,5 – 2m και για να μην υπάρχουν καθιζήσεις, θα πρέπει να θεμελιωθούν σε μία στρώση από θραυστά υλικά. Επίσης, στην περίπτωση του τέλματος 5, λόγω της ταύτισής του με τα όρια της κοίτης, θα πρέπει να ελεγχθεί η ασφάλεια της επιφάνειας θεμελίωσης του τοίχου έναντι υποσκαφής. Σε μια τέτοια περίπτωση, θα πρέπει η κοίτη του ρέματος (μπροστά από τους τοίχους) να διαστρωθεί και αυτή με συρματοκιβώτια.

Επιπρόσθετο μέτρο το οποίο μπορεί να ενισχύσει την ποιότητα του εδάφους στα τέλματα 2,5 και 7 είναι η χρήση ασβεστοπασσάλων (Τριανταφυλλίδης et al., 2016). Τα 3 αυτά τέλματα βρίσκονται στην κοίτη των ρεμάτων συνεπώς ο υδροφόρος ορίζοντας

βρίσκεται λίγα μέτρα κάτω από αυτά. Με την χρήση των ασβεστοπασσάλων, μπορεί να ελεγχθεί η οξείδωση των μεταλλικών στοιχείων, κάτω από οξειδωτικές συνθήκες, όπως την ύπαρξη νερού και οξυγόνου. Οι ασβεστοπάσσαλοι, πρακτικά αυξάνουν το ΡΗ των τελμάτων και έτσι βελτιώνουν τις συνθήκες και την ποιότητα των υλικών που δύνανται να αντιδράσουν σε οξειδωτικά περιβάλλοντα. Οι ασβεστοπάσσαλοι σαν τεχνική, ανήκει στην κατηγορία των τεχνικών χημικής σταθεροποίησης (Λουπασάκης, 2015). Αποτελεί μία φτηνή αλλά και ασφαλή μέθοδο αλλά πρέπει να γίνει επι τόπου δοκιμή για την εύρεση της πυκνότητας των ασβεστοπασσάλων. Επίσης το μήκος τους πρέπει να ξεπερνάει το βάθος των τελμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γεώργιος Χρ. Κουκης, Νικόλαος Στ. Σαμπατακάκης. (2002). *ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ*. ΑΘΗΝΑ: Παπασωτηρίου.
- Λουπασάκης, Κ. (2015). *ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.
- Λουπασάκης, Κ. (2015). *ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.
- Λουπασάκης, Κ. (2015). *ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ Ι*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.
- Σταμπόλτζης, Γ. Α. (1994). *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ (Υδροαντοκαθαρισμός - Κατάτμηση - Ταξινόμηση)*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.
- Τριανταφυλλίδης, Σ. (2015). *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.
- Τσακαλάκης, Κ. (2008). *ΑΡΧΕΣ - ΘΡΑΥΣΗ - ΝΟΜΟΙ ΚΑΤΑΤΜΗΣΗΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.
- Τσακαλάκης, Κ. (2018). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.
- Φραγκίσκος, Α. Ζ. (1995). *ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ (ΟΡΥΚΤΟΥΡΓΙΑ)*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Γαρυφαλιά Κωνσταντοπούλου. (2007). *ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΩΝ ΤΕΛΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΥ ΚΙΡΚΗΣ, ΝΟΜΟΥ ΕΒΡΟΥ*.

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Σταύρος Τριανταφυλλίδης, Παρασκευάς Τσαγκαράτος. (2016). Geochemical modeling-based rehabilitation proposal for abandoned sulfidic flotation mill tailing, Kirki, Thrace, NE Greece. *Environmental Earth Sciences*.

Λιακόπουλος, Α. (2009). *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΚΙΡΚΗΣ. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΙΓΜΕ.

Κ. Κομνιτσάς, Α. Ξενίδης. (2001). *Όξινη Απορροή Μεταλλείων. Δημιουργία - Επιπτώσεις και Τεχνικές αντιμετώπισης σε Μεταλλεία Μικτών Θειούχων*.

Κυριάκος Αρίκας, Nadia Asfahani, Alexander Nowak, Dietmar Goetz. (2007). *Τα μεταλλεία Κίρκης Νομού Έβρου και εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων*.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ

Γ. Χιόνης, (2016). *Ανάδειξη των περιβαλλοντικών κινδύνων από την αστοχία μεταλλευτικών τελμάτων και διερεύνηση των μεθόδων ανάσχεσής τους. Εξειδίκευση σε παραδείγματα από μεταλλεία της ευρύτερης περιοχής Θράκης*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Ελληνικό Ανοικτό πανεπιστήμιο.

ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

<https://yandex.com/collections/card/5a1c36499f759add1437fbd0/>

<https://www.tenova.com/product/delkor-bqr-flotation-cells/>

<https://www.outotec.com>

<https://csmphotos.wordpress.com/2010/11/05/fifty-plus-years-of-pollution-british-columbias-tulsequah-chief-mine/>

<https://thetyee.ca/News/2012/11/14/Alaska-BC-Mines/>

<http://www.mining.com/south-africa-has-failed-to-protect-locals-from-gold-mine-pollution-harvard-report/>

<http://www.tailings.info/storage/containment.htm>

<https://www.sfirixtra.gr/afierwma-kirrh-evrou-apo-psila/>

<http://www.alterthess.gr/content/kirki-i-istoria-enos-egkatalaileimmenoy-metalleioy-foto-kai-vinteo>

<https://greece.terrabook.com/evros/page/kirki-2/>

https://el.wikipedia.org/wiki/Κίρκη_Έβρου

<http://www.e-evros.gr/gr/eidhseis/3/egkatalaileimmena-metalleia-kirkhs-h-ploysia-istorias-toys-video/post32498>

<https://www.visitthraki.gr/θρακη/ανακαλυψεις/μεταλλεία-οικισμός-κίρκης/>

<http://junyue-tech.com/en/index.php?a=shows&catid=5&id=24>

<https://www.911metallurgist.com/blog/hydrocyclone-workingprinciple>

www.srk.com.au

<https://www.plastikakritis.com/gr/kritiflex-overview>

<http://www.palagkas.gr>

<http://fivatech.gr>

<https://geologismiki.gr/products/sptcorr/>

