

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΕΛΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΑΡΙΑ Ε. ΒΕΛΕΓΡΑΚΗ

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (επιβλέπων καθηγητής)

Καθηγητής Κ. ΚΟΜΝΙΤΣΑΣ

Καθηγητής Δ. ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

Χανιά
Σεπτέμβριος, 2012

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

Περίληψη

Από τον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων σε θέσεις εξόρυξης και επεξεργασίας ορυκτών παράγονται τέλματα (απορρίμματα), και επομένως δημιουργείται η ανάγκη για δημιουργία χώρων αποθήκευσης αυτών των τελμάτων. Ένας οικονομικός τρόπος αποθήκευσης των τελμάτων και ο πλέον χρησιμοποιούμενος στην μεταλλευτική βιομηχανία είναι τα φράγματα τελμάτων. Τα φράγματα τελμάτων πρέπει να κατασκευαστούν με συγκεκριμένο τρόπο καθώς τα τέλματα που οδηγούνται σε αυτά είναι με την μορφή πολφού και πολύ συχνά περιέχουν στοιχεία που έχουν απομείνει από την διαδικασία του εμπλουτισμού και μπορούν να ρυπάνουν το περιβάλλον. Επίσης μία αστοχία ενός φράγματος τελμάτων έχει αρκετές φορές στοιχήσει ανθρώπινες ζωές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μία διερεύνηση των παραγόντων σχεδιασμού ενός φράγματος τελμάτων που μπορούν να επηρεάσουν την δομή του φράγματος και να οδηγήσουν σε αστοχία της κατασκευής. Στα μοντέλα που δημιουργήθηκαν εξετάζονται οι παράμετροι της διαπερατότητας των σχηματισμών, του κορεσμού των τελμάτων, της τροφοδοσίας του φράγματος και του ρυθμού άντλησης νερού από το σώμα των τελμάτων.

Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου Modflow, το οποίο είναι ένα λογισμικό για προσομοίωση σε τρεις διαστάσεις με την χρήση πεπερασμένων διαφορών της ροής των υπογείων υδάτων. Το πακέτο αναπτύχθηκε από το αμερικάνικο γεωλογικό ινστιτούτο (USGS) και διατίθεται δωρεάν. Με την χρήση του υπολογιστικού αυτού πακέτου δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια με τα οποία ελέγχθηκε ο βαθμός που επηρεάζει κάθε παράγοντας την λειτουργία ενός φράγματος τελμάτων.

Abstract

Tailings are the result of the beneficiation of ore in mining and mineral processing sites. An economical way to store tailings which are produced in a slurry form is in tailings ponds. Commonly ponds are set as valley fills through the construction of tailings dams. Failures of tailings dams may pollute the environment as well as cause the loss of human life.

This thesis presents a numerical investigation of some of the factors related to the design of a tailings dam so that lead to the control of pore pressure within the tailing and the dam and also control the waterlevel at the pond to prevent overruns.

Modeling was performed using the software package Modflow, which can simulate groundwater flow in three dimensions using finite differences. The package was developed by the U.S. Geological Survey (USGS) and is free. A number of parameters was investigated through the models developed including the permeability of the formations, the saturation of the tailings, the net recharge of the dam and the pumping rate of water from the mass of the tailings. Four different scenarios were developed through which the degree that each factor affects the operation of a tailings dam was determined.

Πρόλογος

Για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου για την πολύτιμη συμβολή τους:

- Στον κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία, Καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής αυτής εργασίας, για την άριστη συνεργασία, τις πολύτιμες συμβουλές, καθώς και την καθοδήγησή του για την κατανόηση της θεωρίας των πεπερασμένων διαφορών.
- Στον κ. Κομνίτσα Κωνσταντίνο, Καθηγητή για την βοήθεια του στην πραγματοποίηση της παρούσης εργασίας και στην εξέταση της.
- Στον κ. Χριστόπουλο Διονύσιο, Καθηγητή για την εξέταση της παρούσης εργασίας.
- Στον κ. Βαβαδάκη Διονύσιο, Μηχανικό Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την βοήθεια του στην κατανόηση του υπολογιστικού προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε
- Στην κα. Σταθογιάννη Φωτεινή, Μηχανικό Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την πολύτιμη συνεισφορά της στην διαμόρφωση της παρούσης εργασίας.

Αφιερώνεται

Στην οικογένεια μου

M.B.

Περιεχόμενα

Περίληψη	ii
Abstract	iv
Πρόλογος.....	v
1. Εισαγωγή.....	10
1.1 Σκοπός της παρούσας εργασίας.....	10
1.2 Δομή της εργασίας.....	10
2. Θεωρία τελμάτων.....	12
2.1 Χαρακτηριστικά των Τελμάτων	12
2.2 Φράγματα τελμάτων	14
2.3 Διάθεση τελμάτων	14
2.3.1 Μέθοδοι διάθεσης τελμάτων	15
2.3.2 Τύποι φραγμάτων κατακράτησης τελμάτων	16
2.3.2.1 Φράγμα σε κοιλάδα	17
2.3.2.2 Κυκλικό ανάχωμα.....	19
2.3.2.3 Φράγμα μέσα σε λάκκο ορυχείου	21
2.3.2.4 Σχεδιασμός φραγμάτων σε ειδικά εξορυγμένους λάκκους.....	22
2.4 Σχεδιασμός φράγματος τελμάτων.....	22
2.4.1 Βασικές έννοιες σχεδιασμού.....	22
2.4.2 Μεταβλητές σχεδιασμού.....	24
2.4.2.1 Ιδιότητες τελμάτων	24
2.4.2.2 Παράγοντες του χώρου	26
2.5 Κατασκευή αναχώματος, ευστάθεια και αστοχία	29
2.5.1 Κατασκευή αναχώματος.....	29
2.5.2 Μέθοδοι κατασκευής.....	31
2.5.2.1 Κατασκευή αναχώματος χρησιμοποιώντας τα υλικά των τελμάτων	31
2.5.2.2 Ανάντη μέθοδος κατασκευής.....	31
2.5.2.3 Κατάντη μέθοδος κατασκευής.....	33
2.5.2.4 Μέθοδος κατασκευής σε κεντρική γραμμή.....	35
2.5.2.5 Κατασκευή αναχώματος χρησιμοποιώντας εναλλακτικά υλικά.....	36

2.5.3	Απόθεση τελμάτων	37
2.5.3.1	Απόρριψη τελμάτων σε ένα σημείο	37
2.5.3.2	Απόρριψη τελμάτων με την χρήση ακροφυσίων.....	37
2.5.3.3	Απόρριψη τελμάτων μετά τον διαχωρισμό σε κυκλώνα	38
2.5.4	Ανάλυση ευστάθειας.....	40
2.5.5	Μορφές αστοχίας.....	40
2.5.5.1	Αστοχία πρανούς με περιστροφική ολίσθηση	41
2.5.5.2	Αστοχία της θεμελίωσης.....	41
2.5.5.3	Υπερχείλιση.....	41
2.5.5.4	Διάβρωση	41
2.5.5.5	Δημιουργία σωληνώσεων	42
2.5.5.6	Ρευστοποίηση	42
3.	Αριθμητική προσομοίωση του φράγματος τελμάτων.....	44
3.1	Γενικά.....	44
3.2	Αντικειμενικός στόχος της προσομοίωσης	46
3.3	Εννοιολογικό μοντέλο	47
3.4	Επιλογή κατάλληλου υπολογιστικού λογισμικού	47
3.5	Λογισμικό πακέτο Modflow.	48
3.5.1	Περιβάλλον χρήσης PMWin.....	52
4.	Έλεγχος ευαισθησίας μοντέλου.	58
4.1	Σχεδιασμός του μοντέλου	58
4.1.1	Ανάλυση γεωμετρικών χαρακτηριστικών.	59
4.1.2	Ανάλυση χρονικών παραμέτρων και χωρική διακριτοποίηση.	61
4.1.3	Διαμόρφωση του μοντέλου προσομοίωσης με χρήση υπορουτίνων	64
4.2	Παρουσίαση και ανάλυση σεναρίων μεταβολής συνθηκών στο μοντέλο	66
4.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης – σχολιασμός αποτελεσμάτων.	76
4.3.1	Σενάριο 1ο.	76
4.3.2	Σενάριο 2ο.	77
4.3.3	Σενάριο 3ο.	78
4.3.4	Σενάριο 4ο.	80
5.	Μοντέλο ταμιευτήρα αποθήκευσης τελμάτων.....	82

5.1	Σχεδιασμός του μοντέλου	83
5.1.1	Ανάλυση γεωμετρικών χαρακτηριστικών	84
5.1.2	Ανάλυση χρονικών παραμέτρων και χωρική διακριτοποίηση.	87
5.1.3	Διαμόρφωση του μοντέλου προσομοίωσης με χρήση υπορουτίνων	89
5.2	Παρουσίαση και ανάλυση σεναρίων μεταβολής συνθηκών στο μοντέλο	91
5.3	Συζήτηση αποτελεσμάτων.	114
5.3.1	Σενάριο 1ο.	114
5.3.2	Σενάριο 2ο.	115
5.3.3	Σενάριο 3ο.	115
5.3.4	Σενάριο 4ο.	115
6.	Συμπεράσματα – Προτάσεις	116
6.1	Συμπεράσματα	116
6.2	Προτάσεις.....	116
7.	Παράρτημα	117
7.1	Παράρτημα Α – Κατάλογος εικόνων.....	117
7.2	Παράρτημα Β – Κατάλογος πινάκων.....	119
8.	Βιβλιογραφία	120

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της παρούσας εργασίας

Τα φράγματα τελμάτων χρησιμοποιούνται σε πολύ μεγάλο ποσοστό στην μεταλλευτική βιομηχανία, καθώς είναι ένας οικονομικός τρόπος αποθήκευσης των τελμάτων που παράγονται από την επεξεργασία του μεταλλεύματος στα εργοστάσια εμπλουτισμού μετά την εξόρυξη του. Τα τέλματα που οδηγούνται στα φράγματα συνήθως είναι με την μορφή πολφού και περιέχουν στοιχεία που μπορούν να ρυπάνουν το περιβάλλον και ιδιαίτερα τον υδροφόρο ορίζοντα.

Ένα φράγμα τελμάτων μπορεί να είναι μία πολύ ασταθής κατασκευή, αν δεν σχεδιαστεί σωστά, η οποία μπορεί να επηρεαστεί από ένα σεισμικό γεγονός που μπορεί να συμβεί στην περιοχή, από την αυξημένη βροχόπτωση (Rico *et al.*, 2008) ενώ μπορεί να διαρρεύσουν ανεπιθύμητα συστατικά από τα τέλματα στο υπέδαφος λόγω έλλειψης στεγανοποίησης της περιμέτρου του φράγματος.

Για να αποφευχθούν οι παραπάνω περιπτώσεις αστοχίας των φραγμάτων απόθεσης τελμάτων πρέπει να γίνει σωστός αρχικός σχεδιασμός. Ο σχεδιασμός αυτός πρέπει να λαμβάνει υπόψη του όλους αυτούς τους παράγοντες (διαπερατότητα σχηματισμών, βαθμός κορεσμού τελμάτων, ύψος βροχοπτώσεων κ.α.) που μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων (Zandarín *et al.*, 2009) και κατ' επέκταση σε αστοχία του φράγματος.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μία διερεύνηση των παραγόντων σχεδιασμού ενός φράγματος τελμάτων που μπορούν να οδηγήσουν σε κάποια μορφή αστοχίας της κατασκευής. Επίσης εξετάζονται οι παράμετροι σχεδιασμού όπως είναι η διαπερατότητα των σχηματισμών, ο κορεσμός των τελμάτων, η τροφοδοσία του φράγματος και ο ρυθμός άντλησης νερού από το φράγμα.

1.2 Δομή της εργασίας

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά, η δομή της διπλωματικής εργασίας ενώ παράλληλα τονίζονται και τα σημαντικότερα σημεία της. Συγκεκριμένα στο εισαγωγικό κεφάλαιο, αναπτύσσεται ο σκοπός εκπόνησης της εργασίας ενώ παρατίθενται και η αναγκαιότητά της.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται διεξοδικά η έννοια των τελμάτων, τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος διάθεσής τους. Τα φράγματα τελμάτων αναφέρονται στο ίδιο κεφάλαιο, παρουσιάζοντας τους τύπους φραγμάτων, τις μεθόδους κατασκευής και την ευστάθεια τους. Στο τρίτο κατά σειρά κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης του φράγματος και το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται.

Στο προτελευταίο κεφάλαιο πραγματοποιείται ο έλεγχος ευαισθησίας του μοντέλου πριν χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση του προβλήματος. Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται το μοντέλο της

προσομοίωσης και τα σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της παραμετρικής διερεύνησης. Επίσης στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

2. Θεωρία τελμάτων

Η επεξεργασία των σκληρών μεταλλικών ορυκτών (π.χ. Χρυσού, Χαλκού, κλπ.) και των βιομηχανικών ορυκτών (π.χ. βωξίτη και φωσφορίτη) περιλαμβάνουν μείωση του μεγέθους του κόκκου και διαχωρισμό των ορυκτών. Στο πρώτο στάδιο την επεξεργασίας του μεταλλεύματος, τα τεμάχια (blocks) του σκληρού μεταλλεύματος με μέγεθος έως και ένα μέτρο μειώνονται σε κόκκους με διάμετρο μερικών χιλιοστών ή ακόμα και μικρών. Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά με την θραύση των ογκοτεμαχίων και έπειτα με την λειοτρίβηση του υλικού. Η διαδικασία της θραύσης πραγματοποιείται εν ξηρώ, ενώ η διαδικασία της λειοτρίβησης εν υγρώ. Η μείωση του μεγέθους είναι τέτοια ώστε να επιτευχθεί ο διαχωρισμός του μεταλλεύματος από το στείρο υλικό. Το στάδιο του διαχωρισμού του χρήσιμου ορυκτού από το στείρο υλικό μπορεί να περιλαμβάνει πολλές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν τις βαρυτικές, μαγνητικές, ηλεκτρικές ή ιδιότητες της επιφάνειας του μεταλλεύματος και των στείρων. Επομένως, το τελικό προϊόν της επεξεργασίας του εξορυσσόμενου υλικού είναι ένα συμπίκνωμα του χρήσιμου ορυκτού και μία ποσότητα εναπομεινάντων αποβλήτων γνωστά με τον όρο «τέλματα» (Lottermoser, 2003, <http://en.wikipedia.org>).

Τα τέλματα παράγονται συνήθως με την μορφή πολφού χαμηλής υγρασίας. Το λεπτόκοκκο υλικό των τελμάτων αποτελείται κυρίως από το στείρο υλικό από το οποίο έχουν απομακρυνθεί τα περισσότερα από τα μεταλλικά ορυκτά που περιείχε. Το στείρο υλικό περιέχει ανεπιθύμητα συστατικά όπως πυριτικά άλατα, οξείδια, υδροξείδια, ανθρακικά ορυκτά και σουλφίδια. Η ανάκτηση των πολύτιμων ορυκτών δεν είναι ποτέ 100% επομένως τα τέλματα περιέχουν μικρές ποσότητες μεταλλευμάτων (Lottermoser, 2003).

2.1 Χαρακτηριστικά των Τελμάτων

Τα τέλματα αποτελούνται από στερεά και υγρά. Τα στερεά συνήθως απορρίπτονται με το νερό των διεργασιών που καταναλώθηκε σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης τελμάτων, συνήθως ένα φράγμα τελμάτων. Ως εκ τούτου τα υγρά που αποτίθενται με τα τέλματα έχουν νερό με την μορφή του επιφανειακού και του νερού των πόρων. Τα υγρά αυτά των τελμάτων περιέχουν συνήθως υψηλές συγκεντρώσεις χημικών που χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία της επεξεργασίας του εξορυσσόμενου υλικού (Lottermoser, 2003).

Πολλές από τις μονάδες εμπλουτισμού και υδρομεταλλουργίας επεξεργάζονται το θρυμματισμένο μέταλλευμα δημιουργώντας έναν πολφό από το μέταλλευμα και νερό. Το νερό που χρησιμοποιείται στην διαδικασία αυτή ονομάζεται “νερό διεργασιών”. Η σύσταση του νερού αυτού εξαρτάται από την επεξεργασία του μεταλλεύματος που εφαρμόζεται και την υδρομεταλλουργική τεχνική. Η υδρομεταλλουργική επεξεργασία απαιτεί συγκεκριμένες χημικές ουσίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των μεταλλευμάτων και την συμπεριφορά των ορυκτών. Οι χημικές ουσίες μπορούν να ταξινομηθούν ως αντιδραστήρια επίπλευσης, τροποποιητές, κροκιδωτικά, χημικά αντιδραστήρια της υδρομεταλλουργίας και οξειδωτικά. Μεγάλο μέρος του νερού των διεργασιών συσσωρεύεται στις δεξαμενές καθίζησης των φραγμάτων που αποτίθενται τα τέλματα. Το νερό των τελμάτων μπορεί να

συλλεχθεί για επαναχρησιμοποίηση και να διοχετευτεί πάλι στο εργοστάσιο. Η ανακύκλωση του νερού και των χημικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία του μεταλλεύματος έχει οικονομικό όφελος και μπορεί να μειώσει τον όγκο των ρύπων που περιέχονται στα φράγματα τελμάτων. Ωστόσο ένα μέρος του νερού που απορρίπτεται από την επεξεργασία παραμένει στα φράγματα τελμάτων. Διάφορα κλάσματα των χημικών πρόσθετων οδηγούνται στα φράγματα απόθεσης τελμάτων οπότε τα υγρά των τελμάτων περιέχουν συνήθως ένα μέρος των οργανικών χημικών ουσιών, κυάνιο, θειικό οξύ και άλλα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί η ανάκτηση του χρήσιμου ορυκτού (Lottermoser, 2003).

Το νερό εμφανίζεται στα τέλματα με δύο τρόπους, ο πρώτος είναι σαν νερό στην επιφάνεια των φραγμάτων αποθήκευσης τελμάτων και ο δεύτερος είναι με την εμφάνιση του στους πόρους των στερεών υλικών του τέλματος. Το νερό αυτό έχει μεταβλητή σύνθεση ανάλογα με την τεχνική διαδικασία που ακολουθείται και η οποία μπορεί να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου. Η βροχόπτωση οδηγεί στην αραίωση των τελμάτων και η εξάτμιση του νερού προκαλεί δευτερογενή καθίζηση των ορυκτών στην επιφάνεια των τελμάτων και κάτω από αυτή.

Στα ορυχεία το ποσό των ορυκτών που εξάγεται από ένα μέταλλευμα είναι σχετικά μικρό και η πλειονηφία του εξορυσσόμενου και επεξεργασμένου υλικού καταλήγει ως απόρριμμα. Το ξηρό βάρος των απορριμμάτων που παράγονται είναι σχεδόν ίδιο με το βάρος του εξορυσσόμενου υλικού.

Το μέγεθος του κόκκου των απορριμμάτων είναι σχετικά μικρό και κυμαίνεται από μέγεθος άμμου έως ιλύος (1mm έως 1 μ m). Όταν τα απορρίμματα οδηγηθούν στην λεκάνη απόθεσης, η υγρή και η στερεή φάση από την οποία αποτελείται ο πολφός αντιδρούν ώστε να επιτευχθεί η ισορροπία. Τα απορρίμματα υφίστανται μορφές της διαγένεσης. Ακόμα λαμβάνουν χώρα βιολογικές και φυσικές διαδικασίες όπως συμπίεση, συσσωμάτωση, ανακρυστάλλωση των ορυκτών καθώς και διάλυση των ορυκτών και μετασχηματισμός τους λόγω της ύπαρξης μικροοργανισμών (Lottermoser, 2003).

Τα στερεά απορρίμματα μπορεί να είναι το αποτέλεσμα διαφορετικών διαδικασιών. Τα στερεά μέρη των τελμάτων μπορεί να είναι α) το πρωτογενές μέταλλευμα ή στείρο υλικό, β) δευτερογενή ορυκτά που σχηματίστηκαν κατά τη διαδικασία της αποσάθρωσης, γ) χημικά ιζήματα που σχηματίστηκαν κατά την διάρκεια της επεξεργασίας του μεταλλεύματος ή μετά από αυτήν και δ) χημικά ιζήματα που σχηματίστηκαν μετά την απόθεση των τελμάτων στο φράγμα (Lottermoser, 2003).

Ιστορικά, τα τέλματα απορρίπτονται οπουδήποτε, συχνά σε μέρη με τρεχούμενο νερό ή απευθείας σε αποχετεύσεις. Δεδομένου ότι προκαλούνται τοπικές ανησυχίες για καθιζήσεις σε ρέματα, την χρήση νερού και σε άλλα θέματα, οι επιχειρήσεις εξόρυξης άρχισαν την αποθήκευση των τελμάτων πίσω από χωμάτινα φράγματα που κατασκευάζονταν συχνά από τα τέλματα και άλλα υλικά που είναι απόβλητα της εξόρυξης. Τα φράγματα

εξυπηρετούσαν διπλό σκοπό αυτόν της αποθήκευσης των τελμάτων ενώ σε ξηρές περιοχές επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού (U.S. EPA, 1994).

2.2 Φράγματα τελμάτων

Το μεγαλύτερο μέρος των τελμάτων που παράγονται παγκοσμίως διοχετεύονται σε μεγάλες επιφάνειες όπου κατακρατούνται και ονομάζονται «φράγματα τελμάτων». Υπάρχουν τουλάχιστον 3500 φράγματα τελμάτων παγκοσμίως. Τα φράγματα αυτά καταλαμβάνουν έκταση από μερικά εκτάρια έως χιλιάδες εκτάρια (Lottermoser, 2003).

Ένα φράγμα τελμάτων είναι συνήθως ένα χωμάτινο φράγμα το οποίο χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των απορριμμάτων, τα οποία παράγονται κατά την διάρκεια των εργασιών εξόρυξης ενός μεταλλεύματος μετά τον διαχωρισμό του πολύτιμου μεταλλεύματος από το μη οικονομικό κλάσμα του. Ένα φράγμα τελμάτων αυξάνεται καθ' όλη την διάρκεια ζωής ενός ορυχείου σε αντίθεση με ένα υδρομαστευτικό φράγμα. Συνήθως κατασκευάζεται ένα αρχικό φράγμα το οποίο μεγαλώνει καθώς γεμίζει με τον πολφό των τελμάτων (<http://en.wikipedia.org>).

Ο σχεδιασμός εξαρτάται από την ποσότητα και τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά των τελμάτων που παράγονται από την εξόρυξη και επεξεργασία του μεταλλεύματος, καθώς και από τις κλιματικές, τοπογραφικές, γεωλογικές, υδρολογικές συνθήκες, τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του χώρου αποθήκευσης και τις απαιτήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια των φραγμάτων και της περιβαλλοντικής νομοθεσίας. Επομένως κάθε περίπτωση απαιτεί τη δικιά της διαδικασία σχεδιασμού. Η εκτιμώμενη ποσότητα τελμάτων που πρέπει να περιέχει είναι σημαντική αφού καθορίζεται από την εξέλιξη των έργων εξόρυξης. Η εκτίμηση της ποσότητας των τελμάτων με βάση τα εκτιμώμενα αποθέματα αλλάζει συνεχώς καθώς αναπτύσσεται η εξόρυξη του ορυχείου. Κατά συνέπεια το τελικό μέγεθος και ο σχεδιασμός του φράγματος τελμάτων μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τις αρχικές προβλέψεις (U.S. EPA, 1994).

2.3 Διάθεση τελμάτων

Ο απώτερος σκοπός του φράγματος τελμάτων είναι να περιέχει λεπτόκοκκα απορρίμματα, συχνά με έναν δευτερεύον στόχο, την εξοικονόμηση νερού για χρήση στο ορυχείο και στο εργοστάσιο εμπλουτισμού. Αυτό πρέπει να επιτευχθεί με οικονομικά αποδοτικό τρόπο που παρέχει την μακροπρόθεσμη σταθερότητα του αναχώματος και των αποθηκευμένων τελμάτων και την μακροπρόθεσμη προστασία του περιβάλλοντος. Κατά την διαδικασία του σχεδιασμού κάθε φράγματος τελμάτων, οι τρεις αυτοί στόχοι, το κόστος, η σταθερότητα και η περιβαλλοντική προστασία, πρέπει να είναι ισορροπημένοι. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μακροπρόθεσμες δαπάνες της απόρριψης των τελμάτων εξαρτώνται εν μέρει από την μηχανική σταθερότητα και την ακεραιότητα του περιβάλλοντος (U.S. EPA, 1994).

Τα φράγματα υδαρών τελμάτων είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος διάθεσης, λόγω του μικρού κόστους και της απλότητας της κατασκευής τους. Τα φράγματα τελμάτων είναι σχεδιασμένα να εκτελούν μία σειρά από λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένων (U.S. EPA, 1994):

- Απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών με καθίζηση
- Καθίζηση βαρέων μετάλλων ως υδροξείδια
- Μόνιμη συγκράτηση των τελμάτων
- Εξισορρόπηση της ποιότητας των υγρών αποβλήτων
- Σταθεροποίηση κάποιων συστατικών (π.χ. θειικά άλατα, κυανιούχα, αντιδραστήρια επίπλευσης)
- Αποθήκευση και σταθεροποίηση της διαδικασίας ανακύκλωσης του νερού
- Τυχαία εξισορρόπηση της ροής των ρευμάτων όμβριων υδάτων.

2.3.1 Μέθοδοι διάθεσης τελμάτων

Επειδή τα τέλματα που παράγονται από το εργοστάσιο εμπλουτισμού είναι συνήθως σε υδαρή μορφή, η διάθεσή τους σε φράγματα κατασκευασμένα από υλικά της περιοχής είναι η πιο συνηθισμένη και οικονομική μέθοδος απόρριψης. Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι διατάξεων φραγμάτων απόθεσης υδαρών τελμάτων: φράγμα σε κοιλάδα (valley impoundments), κυκλικό ανάχωμα (ring dikes), φράγμα μέσα σε εκσκαφή ορυχείου (in-pit impoundments) και σε ειδικά εξορυγμένους λάκκους (specially-dug pits). Σε κάποιες περιπτώσεις, τα τέλματα αφυδατώνονται (συμπύκνωση έως 60% της πυκνότητας του πολφού ή περισσότερο) ή αποξηραίνονται (με περιεκτικότητα σε υγρασία 25% ή λιγότερο) πριν από τη διάθεσή τους. Η αποτελεσματικότητα και η εφαρμογή της χρήσης παχύρευστων ή ξηρών τελμάτων εξαρτάται από την άλεση του μεταλλεύματος και των συγκεντρώσεων γύψου και αργίλου σε αυτά καθώς και την διαθεσιμότητα εναλλακτικών μεθόδων. Εκτός από ειδικές περιπτώσεις, αυτές οι μέθοδοι μπορεί να είναι απαγορευτικές οικονομικά, λόγω του επιπλέον εξοπλισμού και του κόστους της ενέργειας. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση του όγκου των τελμάτων, της γης που χρειάζεται για την δημιουργία τους και την ταυτόχρονη αποθήκευση τελμάτων και αποκατάσταση (U.S. EPA, 1994).

Σε μερικές περιπτώσεις, τα ίδια τα τέλματα – και ιδίως αυτά σε μέγεθος άμμου – χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των αναχωμάτων. Εάν τα στερεά απορρίμματα κατεργασίας και τα άλλα απόβλητα της κατεργασίας χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά για την κατασκευή του φράγματος, χρειάζεται να γίνει χημικός και φυσικός προσδιορισμός των υλικών αυτών ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν προκαλούν αστοχία του φράγματος τελμάτων ή απελευθέρωση των ρύπων. Οι χώροι αποθήκευσης πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε να έχουν την βέλτιστη χωρητικότητα για τα απόβλητα και να εξαλείφουν τυχόν περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι σύγχρονες κατασκευές αποθήκευσης τελμάτων σχεδιάζονται για να απομονώνουν τα απόβλητα (Lottermoser, 2003).

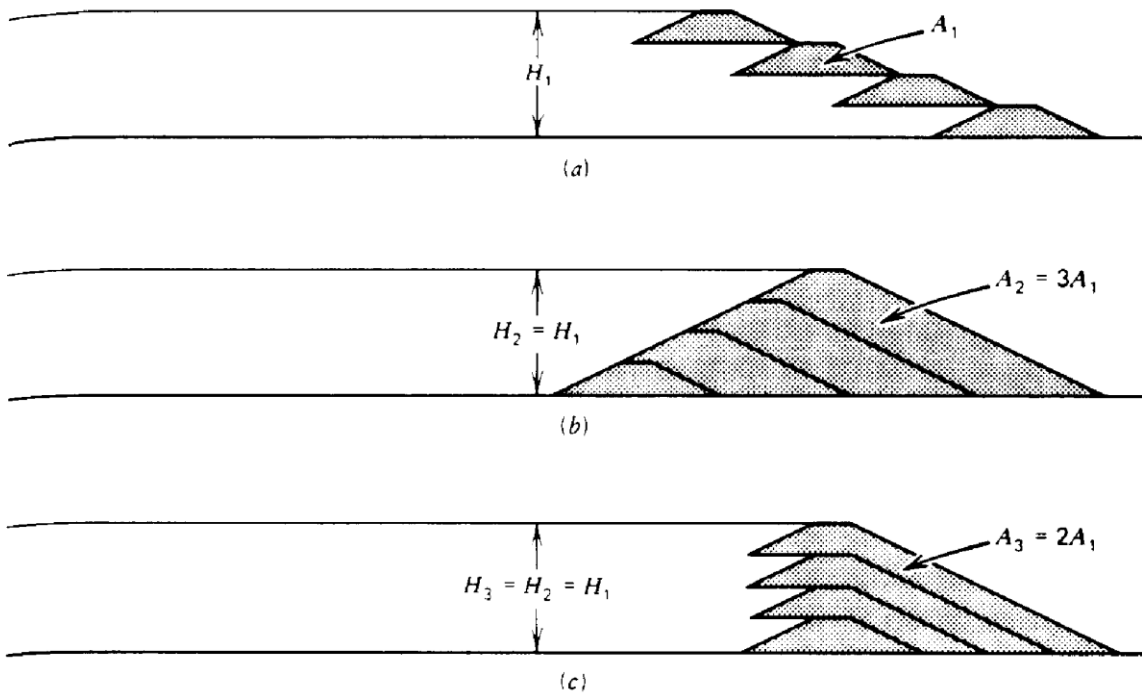
Τα απορρίμματα μερικές φορές διατίθενται σε υπόγεια ορυχεία ως λιθογόμωση ώστε να παρέχεται υποστήριξη εδάφους ή τοίχου. Αυτό μειώνει την διαταραχή του εδάφους στην επιφάνεια και μπορεί να σταθεροποιήσει τις εξορυγμένες περιοχές. Για λόγους σταθερότητας, η υπόγεια λιθογόμωση απαιτεί τέλματα τα οποία έχουν υψηλή διαπερατότητα, χαμηλή συμπίεση και την ικανότητα για ταχεία αποστράγγιση (δηλ. μεγάλο κλάσμα άμμου). Ως αποτέλεσμα, μόνο το κλάσμα της άμμου από το σύνολο των τελμάτων χρησιμοποιείται γενικά ως λιθογόμωση. Τα τέλματα μπορεί να οδηγούνται σε κυκλώνα διαχωρισμού ώστε να διαχωρίζεται το κλάσμα της χονδρής άμμου για την λιθογόμωση, αφήνοντας μόνο τα λεπτόκοκκα υλικά να διατίθενται στα φράγματα τελμάτων. Για να αυξηθεί η ικανότητα της δομής, μπορεί να προστεθεί τσιμέντο στην άμμο πριν την λιθογόμωση (U.S. EPA, 1994).

2.3.2 Τύποι φραγμάτων κατακράτησης τελμάτων

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι δομών που χρησιμοποιούνται για τη κατακράτηση των τελμάτων, η κατασκευή αναχώματος και το φράγμα συγκράτησης τελμάτων. Το ανάχωμα είναι πολύ πιο συνηθισμένο από τα φράγματα. Οποιαδήποτε μορφή αυτής της δομής, κατασκευή αναχώματος ή φράγματος τελμάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σχηματιστούν διαφορετικές μορφές ή συνθέσεις φραγμάτων απόθεσης τελμάτων, όπως αυτές αναφέρονται στην προηγούμενη ενότητα. Η επιλογή του σχεδιασμού εξαρτάται κυρίως από την τοπογραφία της περιοχής, τις συνθήκες στο εργοτάξιο και τους οικονομικούς παράγοντες. Τα περισσότερα φράγματα τελμάτων που λειτουργούν σήμερα είναι με την μορφή του φράγματος σε κοιλάδα. Επειδή το κόστος κατασκευής σχετίζεται με την ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται για την ανέγερση του φράγματος ή του αναχώματος (δηλαδή του μεγέθους του), σημαντικές εξοικονομήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με την ελαχιστοποίηση του μεγέθους του φράγματος και μεγιστοποιώντας τη χρήση των υλικών της περιοχής, ιδιαίτερα τα ίδια τα τέλματα (U.S. EPA, 1994).

Τα φράγματα τελμάτων είναι παρόμοια με τα φράγματα συγκράτησης νερού σε σχέση με τις ιδιότητες του εδάφους, της επιφάνειας υδάτων και ελέγχου των υπόγειων υδάτων και τη σταθερότητα. Είναι κατάλληλα για κάθε τύπο τελμάτων και μέθοδο εναποθήκευσης (U.S. EPA, 1994, Lottermoser, 2003).

Αναχώματα μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας ανάντη μέθοδο (upstream), κατάντη μέθοδο (downstream) και μέθοδο κεντρικής γραμμής (centerline). Κάθε μία από τις δομές, είναι κατασκευασμένη σε τέσσερις διαδοχικές ανυψώσεις και πλήρωση του όγκου του φράγματος μετά από κάθε καινούργια ανύψωση του αναχώματος. Ένα φράγμα τελμάτων απαιτεί μικρότερο αρχικό κεφάλαιο από ότι ένα υδάτινο φράγμα επειδή η κατασκευή του πραγματοποιείται σταδιακά στην διάρκεια ζωής του ορυχείου. Τα φράγματα συγκράτησης τελμάτων γενικά χρησιμοποιούν φυσικό έδαφος, ενώ στην κατασκευή του αναχώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί φυσικό έδαφος, τέλματα και απόβλητα με στείρο πέτρωμα σε οποιοδήποτε συνδυασμό (U.S. EPA, 1994, Lottermoser, 2003).

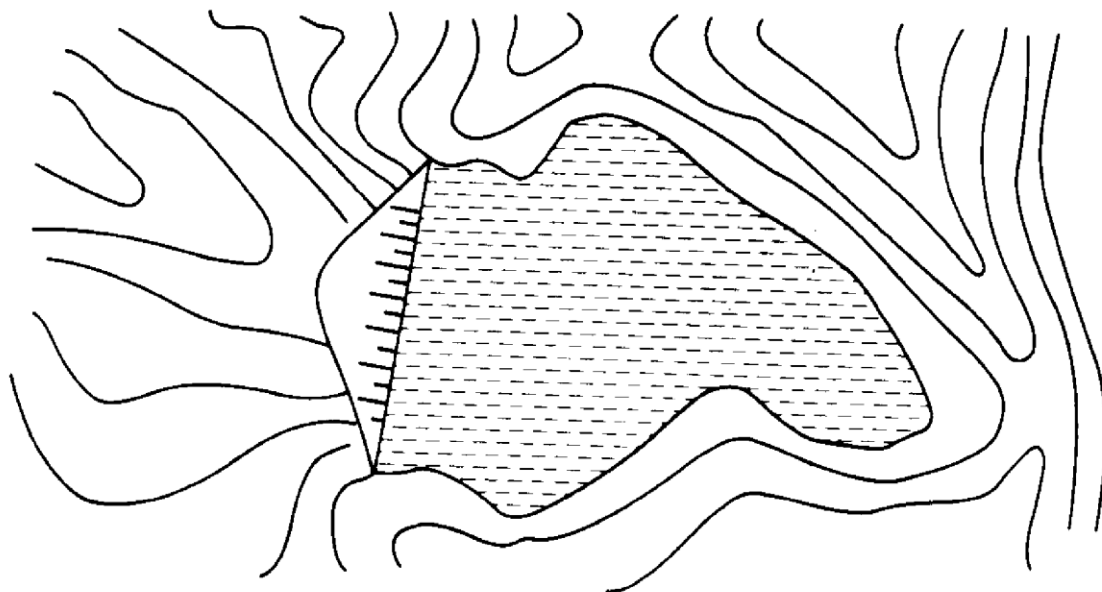


Εικόνα 1: Τύποι αναχώματος: (α) ανάντη, (β)κατάντη, (γ) κεντρικής γραμμής ανάχωμα (πηγή: Vick 1990)

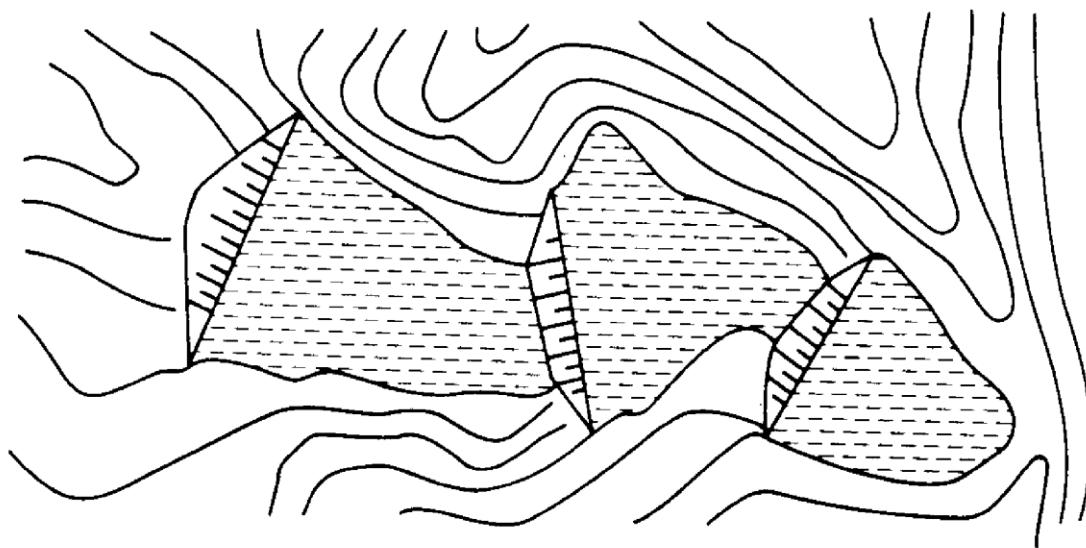
2.3.2.1 Φράγμα σε κοιλάδα

Είναι οικονομικό πλεονέκτημα να χρησιμοποιούνται φυσικά κοιλάματα για την συγκράτηση τελμάτων. Εκτός των άλλων πλεονεκτημάτων μειώνεται το μέγεθος του φράγματος, καθώς και οι πλευρές της κοιλάδας ή άλλων κοιλωμάτων εξυπηρετούν στην συγκράτηση των τελμάτων. Επίσης, λόγω της τοπογραφίας της περιοχής μειώνεται η διασπορά των λεπτομερών υλικών των τελμάτων με τον αέρα. Σαν αποτέλεσμα αυτή η μέθοδος είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη. Τα φράγματα αυτού του τύπου μπορούν να κατασκευαστούν μονά, στα οποία τα τέλματα περιέχονται πίσω από ένα μόνο φράγμα, ή ανάχωμα ή σε πολλαπλή μορφή, όπου μία σειρά από αναχώματα συγκρατούν τα τέλματα σε διαδοχικά φράγματα.

Υπάρχουν πολλές παραλλαγές φραγμάτων του τύπου αυτού. Το σχέδιο cross – valley χρησιμοποιείται συχνά επειδή μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε κάθε τοπογραφική περιοχή είτε σε μονή είτε σε πολλαπλή μορφή. Σχεδιάζεται παρόμοια με ένα κοινό φράγμα νερού, το φράγμα κατασκευάζεται ενώνοντας τα δύο τοιχώματα της κοιλάδας, περιορίζοντας έτσι τα τέλματα σε μία φυσική κοιλάδα. Αυτή η διάταξη απαιτεί μικρότερη ποσότητα υλικών κατασκευής και γι' αυτό επιλέγεται για οικονομικούς λόγους. Το φράγμα τοποθετείται καλύτερα κοντά στο άκρο της λεκάνης απορροής για να μειωθούν οι εισροές των χειμάρρων της περιοχής (U.S. EPA, 1994).



(a)



(b)

Εικόνα 2: Μονό (a) και πολλαπλό (b) φράγμα σε κοιλάδα (πηγή: Vick 1990)

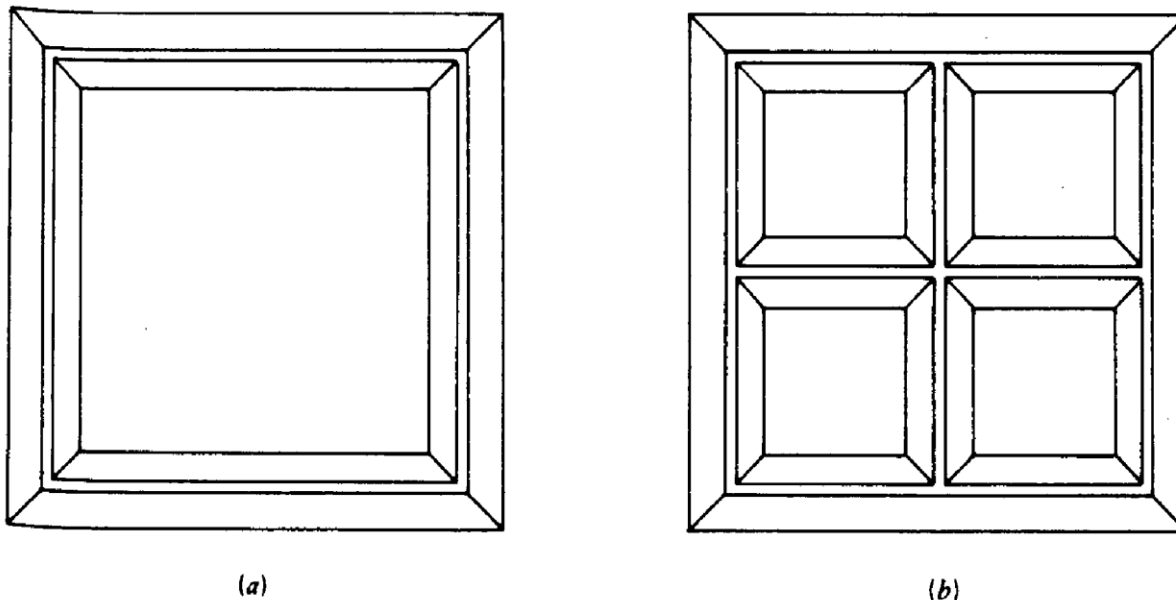
Άλλοι τύποι φραγμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθούν όταν υπάρχει μια υπερβολικά μεγάλη περιοχή απορροής και δεν υπάρχει η τοπογραφία που απαιτείται για την κατασκευή του συγκεκριμένου τύπου φράγματος. Η διάταξη των φραγμάτων σε κοιλάδα είναι συχνά η βέλτιστη επιλογή για οικονομικούς λόγους. Αυτό επειδή τα τοιχώματα της κοιλάδας αποτελούνται από μία ή περισσότερες πλευρές, έτσι μειώνεται το μήκος του φράγματος, ελαχιστοποιώντας τα κόστη κατασκευής.

Το σχέδιο του φράγματος σε κοιλάδα είναι ιδιαίτερος ευαίσθητο στην υπερχειλίση από πλημμύρα, διάβρωση κοντά στην ένωση του φράγματος και της πλευράς της κοιλάδας και ρευστοποίησης λόγω του υψηλότερου όγκου νερού που εισέρχεται από την απορροή μέσα στην φυσική λεκάνη απορροής και από υψηλή βροχόπτωση. Η σταθερότητα ενός φράγματος σε κοιλάδα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της υδροστατικής πίεσης μέσα στα υλικά πλήρωσης και το ανάχωμα. Μία ασυνήθιστη, μοναδική αύξηση στην υδροστατική πίεση πάνω από τα επίπεδα σχεδιασμού μπορεί να είναι επαρκής για ξαφνική αστοχία. Ο έλεγχος των ροών κατά μήκος, τριγύρω ή κάτω από το φράγμα είναι σημαντικός για να διατηρηθεί η σταθερότητα της δομής και να ελεγχθεί η επίδραση στο περιβάλλον. Παρέχοντας επαρκή εσωτερική αποστράγγιση μπορεί να μειωθεί η πιθανότητα υγροποίησης των τελμάτων και να βελτιωθεί η διαπερατότητα και η στερεοποίηση τους, με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται η σταθερότητα της περιοχής (U.S. EPA, 1994).

Η ευστάθεια του φράγματος των τελμάτων εξαρτάται επίσης (ή τουλάχιστον σχετίζεται) από τα χαρακτηριστικά της θεμελίωσης, όπως η αντοχή σε διάτμηση, η συμπίεστικότητα και η διαπερατότητα. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους της περιοχής, η διάταξη αυτή μπορεί να σχεδιαστεί προσαρμόζοντας την διαπερατότητα των στρωμάτων με την χρήση επένδυσης και επαρκή εσωτερική αποστράγγιση. Τα εδαφικά χαρακτηριστικά μπορούν συχνά να βελτιωθούν μέσω της συμπίεσης του εδάφους. Επιπλέον, η μέθοδος της εναπόθεσης των τελμάτων και η κατασκευή έχει αυξημένη επίπτωση στη διάταξη φραγμάτων σε κοιλάδα. Η απόθεση τελμάτων επηρεάζει την σταθεροποίηση, την διαπερατότητα, την αντοχή και εν συνεχεία την σταθερότητα του υλικού του αναχώματος (U.S. EPA, 1994).

2.3.2.2 Κυκλικό ανάχωμα

Σε περίπτωση που μία φυσική τοπογραφική ύψωση δεν είναι διαθέσιμη, το ανάχωμα με μορφή δακτυλιδιού μπορεί να είναι κατάλληλο (εικόνα 3). Αντί ενός μεγάλου αναχώματος (όπως του αναχώματος σε κοιλάδα), απαιτούνται αναχώματα σε όλες τις πλευρές για να συγκρατηθούν τα τέλματα. Η κατασκευή μπορεί να είναι παρόμοια με την κατασκευή των φραγμάτων σε κοιλάδα, χρησιμοποιώντας τέλματα, στείρο πέτρωμα και άλλα υλικά από την περιοχή. Λόγω του μήκους του φράγματος, είναι απαραίτητα περισσότερα υλικά γι' αυτόν τον τύπο φράγματος και τα υλικά για το αρχικό ανάχωμα είναι τα υλικά που εκσκάφτηκαν από την περιοχή του φράγματος.



Εικόνα 3: Μονή (α) και τμηματική (β) σύνθεση κυκλικού αναχώματος (πηγή: Vick 1990)

Σύμφωνα με τον Ritchey (1989), τα πιο πρόσφατα φράγματα από ανάχωμα έχουν κατασκευαστεί με την κατάντη μέθοδο ή την μέθοδο της κεντρικής γραμμής παρά με την ανάντη μέθοδο κατασκευής αφού η μακροπρόθεσμη σταθερότητα ενός ανάντη αναχώματος δεν είναι βέβαιη.

Σε ένα ανάντη ανάχωμα φράγματος τελμάτων μπορεί να υπάρξει αστάθεια λόγω (i) του γρήγορου ρυθμού ανάπτυξης, (ii) υδραυλικής διάρρηξης και εσωτερικής διάβρωσης (iii) στατικής/σεισμικής ρευστοποίησης των τελμάτων και (iv) υπερβολικών καθιζήσεων και οριζόντιων παραμορφώσεων κλπ. (Lottermoser, 2003).

Σε αυτήν την μέθοδο απαιτούνται αναχώματα σε όλες τις πλευρές της κατασκευής, γι' αυτό αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες υλικών για την κατασκευή του αναχώματος σε σχέση με τον όγκο του υλικού που μπορεί να αποθηκευτεί. Αυτή η διάταξη μπορεί να κατασκευαστεί σε ένα μόνο τμήμα ή σε πολλά.

Αν το έδαφος είναι επίπεδο και ως εκ τούτου κατάλληλο για την κατασκευή αυτού του τύπου φράγματος, η διάταξη αυτή επιτρέπει την μέγιστη δυνατή ευελιξία για την επιλογή ενός τόπου. Δεδομένου ότι τα αναχώματα είναι σχετικά χαμηλά σε ύψος, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου φράγματος είναι συχνά απλούστερος από ότι ένα ψηλό φράγμα σε κοιλάδα. Η συγκράτηση των τελμάτων μπορεί να γίνει με την χρήση ενός αδιαπέρατου πυρήνα στο ανάχωμα και την χρήση επένδυσης από συνθετικό υλικό στη βάση (U.S. EPA, 1994). Η χρήση ενός αργιλικού στρώματος ή ενός γεωφάσματος στην βάση του φράγματος αποτελεί μία αποτελεσματική μέθοδο για την μείωση της διαρροής των τελμάτων. Μπορεί να είναι αναγκαία η τοποθέτηση ενός συστήματος συλλογής των διαρροών, αποτελούμενο από αδιαπέραστες μεμβράνες και φίλτρα απομάκρυνσης των υδάτων τοποθετημένα

στην βάση των τελμάτων. Επίσης μπορούν να τοποθετηθούν στην βάση του αναχώματος στραγγιστήρια, τα οποία συλλέγουν το νερό που υπερχειλίζει από το ανάχωμα (Lottermoser, 2003).

Αντίθετα με το φράγμα σε κοιλάδα, το οποίο βρίσκεται σε μία φυσική λεκάνη απορροής, το κυκλικό ανάχωμα επιτρέπει τον καλύτερο έλεγχο του νερού μέσα στο φράγμα. Η ποσότητα του νερού της λίμνης είναι περιορισμένη, αφού εξαρτάται από το νερό που μεταφέρουν τα τέλματα και το ύψος των κατακρημνίσεων. Δεν υπάρχει απορροή εκτός από αυτήν στα εξωτερικά πρανή του φράγματος. Υπάρχουν επίσης και μειονεκτήματα στον σχεδιασμό, συμπεριλαμβανομένου του σχετικά μεγάλου όγκου υλικών που απαιτούνται στην κατασκευή του φράγματος και την επίδρασή τους στο κόστος. Η αύξηση του μήκους του αναχώματος μπορεί να αυξήσει επίσης και την πιθανότητα αστοχίας του φράγματος. Σε αρκετές περιοχές δεν υπάρχει επίπεδο έδαφος κατάλληλο για τον σχεδιασμό αυτής της διάταξης του φράγματος.

Αυτός ο τύπος φράγματος έχει την δυνατότητα για καλύτερο έλεγχο της διαρροής σε σχέση με ένα φράγμα σε κοιλάδα. Αν το φράγμα περιέχει ένα είδος τελμάτων, μπορεί να επιτευχθεί πλήρης απομόνωσή τους και συλλογή αυτών των απορριμμάτων με την χρήση ενός κατάλληλου συνδυασμού πυρήνα χαμηλής διαπερατότητας, επένδυσης από συνθετικά υφάσματα και συστήματος αποστράγγισης. Δεδομένου ότι ο έλεγχος των διαρροών είναι μία σημαντική περιβαλλοντική ανησυχία, η διάταξη του αναχώματος σε μορφή δακτυλιδιού έχει ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τις άλλες διατάξεις (U.S. EPA, 1994).

2.3.2.3 Φράγμα μέσα σε λάκκο ορυχείου

Αυτή η μέθοδος είναι λιγότερο συχνή από ότι οι δύο προηγούμενες. Περιλαμβάνει την απόθεση των τελμάτων μέσα σε μία πρώην εκμετάλλευση ορυχείου και ο σχεδιασμός του εξαλείφει την ανάγκη για την κατασκευή αναχωμάτων.

Δεδομένου ότι τα τέλματα συγκρατούνται από τα τοιχώματα της εκμετάλλευσης, η διασπορά τους από τον άνεμο είναι η μικρότερη δυνατή. Στον σχεδιασμό μπορεί να προστεθεί και μία καλή αποστράγγιση. Επίσης πολλοί από τους κοινούς τρόπους αστοχίας των φραγμάτων τελμάτων δεν ισχύουν γι' αυτή την διάταξη. Η έλλειψη αναχώματος του φράγματος μειώνει την πιθανότητα αστοχίας των πρανών, αλλά η σταθερότητά τους πρέπει να ελεγχθεί.

Εκτός εάν ο σκοπός είναι να απομονώσει τα θειούχα τέλματα κάτω από την επιφάνεια του νερού, ο υδροφόρος ορίζοντας θα πρέπει να είναι κάτω από τα τέλματα που έχουν τοποθετηθεί μέσα στο ορυχείο. Αυτό μπορεί να απαιτεί λιθογόμωση με πέτρωμα από την εξόρυξη ή με υπερκείμενα. Εάν η λιθογόμωση κάτω από τα τέλματα είναι αναγκαία, και το περιβάλλον πέτρωμα δεν είναι επαρκώς αδιαπέρατο, μπορεί να χρειάζεται η τοποθέτηση μίας επένδυσης γύρω από τα τέλματα. Ο Ritchey (1989) επισημαίνει ότι οι υδρογεωλογικές παράμετροι

επηρεάζουν την μετανάστευση των ρύπων, έτσι τα τέλματα με τοξικές προσμίξεις ή τα ενεργά τέλματα μπορεί να μην είναι κατάλληλα να αποθηκευτούν σε αυτού του είδους το φράγμα.

Όταν η εξόρυξη σε ένα ενεργό ορυχείο προχωρά πλευρικά, το εξορυσσόμενο τμήμα του ορυχείου μπορεί να είναι κατάλληλο για την απόθεση των τελμάτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, αναχώματα κατασκευάζονται ώστε να συγκρατούνται τα τέλματα στην εξορυγμένη περιοχή του ορυχείου. Αυτό το ανάχωμα θα μπορούσε στην συνέχεια να κατασκευαστεί σταδιακά (U.S. EPA, 1994).

2.3.2.4 Σχεδιασμός φραγμάτων σε ειδικά εξορυγμένους λάκκους

Αυτό ο τύπος είναι αρκετά ασυνήθιστος και περιλαμβάνει την εκσκαφή ενός λάκκου ειδικά για τον σκοπό της διάθεσης των τελμάτων. Το φράγμα αποτελείται από τέσσερα ή περισσότερα κελιά με μη περατές επενδύσεις και περιβάλλονται από ένα φράγμα στην επιφάνεια. Το υλικό που αφαιρείται για τη κατασκευή του λάκκου, χρησιμοποιείται για την κατασκευή του φράγματος. Αυτός ο τύπος φράγματος έχει μερικά από τα ίδια πλεονεκτήματα με το φράγμα σε σχήμα δακτυλιδιού, συμπεριλαμβανομένης της ανεξαρτησίας της θέσης και του ομοιόμορφου σχήματος.

Η ανεξαρτησία της θέσης ωφελεί τον σχεδιασμό, αφού λιγότερη προσπάθεια και κόπος απαιτούνται για την αντιμετώπιση των προβλημάτων λόγω της τοπογραφίας, τις εδαφικές συνθήκες, τις κλιματικές συνθήκες και τα κατασκευαστικά προβλήματα. Η ενιαία διάταξη, το σχήμα και το επίπεδο έδαφος αποτρέπουν την επιφανειακή απορροή από την είσοδο του φράγματος και μειώνουν τα αναγκαία μέτρα ελέγχου για τις πλημμύρες (U.S. EPA, 1994).

2.4 Σχεδιασμός φράγματος τελμάτων

Ο σχεδιασμός ενός φράγματος τελμάτων πραγματοποιείται αφού επιλεγεί η θέση. Ωστόσο, η επιλογή της θέσης και του σχεδιασμού θεωρείται μία δυναμική διαδικασία. Μια σειρά από σχεδιαστικές αρχές επηρεάζουν τη διαδικασία επιλογής του τόπου, καθώς και τον προσδιορισμό του τύπου του αναχώματος και τη διαμόρφωση του φράγματος. Όπως σημειώθηκε παραπάνω, οι μείζονες παράγοντες σχεδιασμού ενός φράγματος τελμάτων είναι η ευστάθεια, το κόστος και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

2.4.1 Βασικές έννοιες σχεδιασμού

Γενικά τα φράγματα τελμάτων (και τα αναχώματα συγκράτησης τελμάτων) έχουν σχεδιαστεί με βάση πληροφορίες σχετικές με τα χαρακτηριστικά των τελμάτων, τα διαθέσιμα υλικά κατασκευής, τους παράγοντες της θέσης (τοπογραφία, γεωλογία, υδρολογία και σεισμικότητα) και το κόστος, με την δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών να επηρεάζει την τοποθέτηση του φράγματος και τον σχεδιασμό του. Επειδή το νερό είναι βασικό συστατικό στο σύστημα φράγμα – τέλματα, οι αρχές της υδρολογίας (εφαρμόζεται για την ροή του νερού μέσα και γύρω από το ανάχωμα των τελμάτων) υπαγορεύουν πολλές από τις διατάξεις σχεδιασμού του. Επειδή η

ευστάθεια του φράγματος είναι σε μεγάλο βαθμό συνάρτηση της στάθμης του νερού, αυτές οι αρχές αποτελούν πρωταρχικό μέλημα στον σχεδιασμό κάθε φράγματος τελμάτων.

Μία από τις βασικές αρχές που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό των φραγμάτων και των αναχώματων είναι η διατήρηση της επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα εντός του αναχώματος. Ο υδροφόρος ορίζοντας εξασκεί ένα μεγάλο βαθμό ελέγχου στην σταθερότητα του φράγματος, τόσο κάτω από στατικές όσο και σεισμικές συνθήκες φόρτισης. Το μείζον θέμα κατά την διάρκεια του σχεδιασμού είναι ότι δεν πρέπει ο υδροφόρος ορίζοντας να υπερβεί το ανάχωμα και πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερος κοντά στην επιφάνεια του αναχώματος. Αυτό διατηρεί την πίεση των πόρων στην επιφάνεια του αναχώματος χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική πίεση συν το βάρος των τεμαχίων του αναχώματος και διατηρεί την επιφάνεια του φράγματος. Έτσι κάθε παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τον υδροφόρο ορίζοντα στο ανάχωμα μπορεί επίσης να επηρεάσει την σταθερότητα του αναχώματος. Η κύρια μέθοδος διατήρησης ενός χαμηλού υδροφόρου ορίζοντα κοντά στο μέτωπο του αναχώματος είναι να αυξηθεί η σχετική διαπερατότητα (ή υδραυλική διαπερατότητα) του αναχώματος κατά την διεύθυνση της ροής (U.S. EPA, 1994).

Η δημιουργία μίας σχετικής αύξησης στην διαπερατότητα στην κατάντη πλευρά μπορεί να επιτευχθεί με έναν από τους δύο τρόπους, ή έναν συνδυασμό και των δύο: με την ενσωμάτωση ζωνών χαμηλότερης διαπερατότητας στις περιοχές που βρίσκονται ανάντη του αναχώματος (τυπικά με την κατασκευή αναχωμάτων με πυρήνες χαμηλής διαπερατότητας) και χρησιμοποιώντας ζώνες υψηλότερης διαπερατότητας προς τα κάτω (συνήθως χρησιμοποιώντας εσωτερικές ζώνες αποστράγγισης). Η επιλογή της όποιας τεχνικής θα χρησιμοποιηθεί συχνά βασίζεται στη διαθεσιμότητα των υλικών, όπως άργιλος για πυρήνες και άμμο για στραγγιστήρια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μεγάλες αλλαγές στον υδροφόρο ορίζοντα απαιτούνται αν οι διαπερατότητες σε παρακείμενες ζώνες διαφέρουν δύο ή περισσότερες τάξεις μεγέθους (Vick 1990).

Το στρώμα χαμηλής διαπερατότητας γενικά ελέγχει την συνολική ταχύτητα ροής διαμέσου του φράγματος. Αυτό επιτρέπει στα στρώματα υψηλότερης διαπερατότητας που είναι τοποθετημένα κατάντη από το στρώμα χαμηλής διαπερατότητας να αποστραγγίζουν και να αποφεύγεται η αύξηση της πίεσης των πόρων. Ο κανόνας για την αύξηση της διαπερατότητας κατά την διεύθυνση της ροής εφαρμόζεται μόνο σε περιοχές κοντά στην επιφάνεια του αναχώματος, αν χρησιμοποιείται χαμηλής διαπερατότητας πυρήνας στο κέντρο του αναχώματος η διαπερατότητα αυξάνει προς το μέτωπο, η διαπερατότητα των υλικών στην ανάντη πλευρά του αναχώματος μπορεί να έχει μικρό αποτέλεσμα στην επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα κατάντη από τον πυρήνα χαμηλής διαπερατότητας (Vick 1990).

Παράγοντες που επηρεάζουν τον υδροφόρο ορίζοντα στο ανάχωμα επηρεάζουν τη σταθερότητα του. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά απόθεσης των τελμάτων (διαπερατότητα, συμπίεστότητα,

ταξινόμηση, πυκνότητα πολφού κλπ.) και τα χαρακτηριστικά της θέσης όπως τα χαρακτηριστικά της θεμελίωσης και την υδρολογία και υδρογεωλογία της περιοχής του φράγματος και της ανάντη λεκάνης απορροής. Αλλαγές στον υδροφόρο ορίζοντα στο αναχώμα των αποβλήτων θα αλλάξει την πίεση του νερού των πόρων και κατά συνέπεια την αντίσταση των υλικών του φράγματος στην ολίσθηση. Αλλαγές στον υδροφόρο ορίζοντα μπορεί να προκληθούν από δυσλειτουργία των συστημάτων αποστράγγισης, πάγωμα των επιφανειακών στρωμάτων στην κατάντη πλευρά του φράγματος, αλλαγές στην μέθοδο κατασκευής (συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών των υλικών κατασκευής) και αλλαγές στο υψόμετρο της λίμνης. Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί επίσης να μεταβληθεί από αλλαγές στην διαπερατότητα του υποκείμενου υλικού θεμελίωσης, οι οποίες μερικές φορές προκαλούνται από τάσεις που προέρχονται από καθίζηση λόγω της εξόρυξης (Vick 1990).

Εκτός από τη διατήρηση του υδροφόρου ορίζοντα για λόγους σταθερότητας, ο σχεδιασμός του φράγματος περιλαμβάνει παράγοντες που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της διαρροής των τελμάτων. Η διαρροή των οποίων μπορεί να ελεγχθεί με την χρήση γεωφύσματος στην βάση και στραγγιστηρίων.

2.4.2 Μεταβλητές σχεδιασμού

2.4.2.1 Ιδιότητες τελμάτων

Η σύνθεση των τελμάτων, η πυκνότητα του πολφού, η ταξινόμηση και άλλα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό των φραγμάτων τελμάτων με τρεις βασικούς τρόπους: ανάλυση τελμάτων για να αξιολογηθεί η πιθανή χρήση της άμμου των τελμάτων στην κατασκευή του αναχώματος, ανάλυση των τελμάτων για να τοποθετηθούν στο φράγμα, για τον προσδιορισμό των πιθανών επιπτώσεων στη δομική σταθερότητα και τα χαρακτηριστικά των διαρροών και ορυκτολογική ανάλυση για τον προσδιορισμό των πιθανών χημικών επιπτώσεων των διαρροών ή άλλων αποβλήτων του φράγματος. Εκτός από τα φυσικά χαρακτηριστικά, η μέθοδος εναπόθεσης των τελμάτων στο φράγμα παίζει ρόλο στα μηχανικά χαρακτηριστικά του φράγματος (Vick 1990).

Η άμμος των τελμάτων χρησιμοποιείται συχνά ως μία οικονομική πηγή υλικού για την κατασκευή του αναχώματος. Με την αφαίρεση της άμμου για την κατασκευή του αναχώματος ο όγκος των τελμάτων που είναι προς απόθεση μειώνεται. Ανάλογα με την κοκκομετρική διαβάθμιση των τελμάτων, ένας κυκλώνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει επαρκείς ποσότητες χονδρής άμμου από το σύνολο των τελμάτων για την κατασκευή του αναχώματος, αφήνοντας ένα μεγάλο ποσοστό λεπτομερών για να εναποτεθούν στο φράγμα.

Όσο αφορά τις γενικές φυσικές ιδιότητές τους, τα τέλματα θεωρούνται εδάφη και υπόκεινται στα παραδοσιακά πρότυπα εδαφομηχανικής συμπεριφοράς. Οι ιδιότητες (διαβάθμιση, ειδικό βάρος και πλαστικότητα) προσδιορίζονται με σχετικά απλές δοκιμές που μπορεί να πραγματοποιηθούν στα τέλματα που παράγονται στις εργαστηριακές δοκιμές της διαδικασίας του εργοστασίου εμπλουτισμού. Αυτές οι δοκιμές είναι ο οδηγός για τις

ιδιότητες της μηχανικής των τελμάτων. Προσοχή απαιτείται, ωστόσο, αφού τα τέλματα έχουν λεπτές διαφορές από τα εδάφη που έχουν παρόμοιες ιδιότητες (Vick 1990).

Οι ιδιότητες των τελμάτων που έχουν επιπτώσεις στον σχεδιασμό, τη σταθερότητα και την αποστράγγιση του φράγματος περιλαμβάνουν την τοπική και σχετική πυκνότητα, την διαπερατότητα, την πλαστιμότητα, την συμπιεστότητα, την συμπίκνωση, τη διατμητική αντοχή και τις τασικές παραμέτρους (Vick 1990). Η τοπική (in-place) πυκνότητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον καθορισμό του μεγέθους του φράγματος που απαιτείται για μια συγκεκριμένη λειτουργία ενώ η σχετική πυκνότητα επηρεάζει την δυναμική συμπεριφορά του φράγματος. Η τοπική πυκνότητα αναφέρεται στην μάζα ενός αδιατάραχτου δείγματος του υλικού όπου ο όγκος του δείγματος είναι πολύ μεγαλύτερος από το μέσο μέγεθος κόκκου. Η διαβάθμιση είναι ένας παράγοντας της τοπικής πυκνότητας, με καλά διαβαθμισμένα υλικά τα οποία έχουν τυπικά υψηλότερη πυκνότητα. Η διαπερατότητα (ή υδραυλική διαπερατότητα) των τελμάτων επί τόπου στο φράγμα τελμάτων ποικίλει και σε κάθετες και οριζόντιες κατευθύνσεις λόγω του τρόπου διαστρωμάτωσης που έχουν εναποτεθεί τα τέλματα. Η πλαστιμότητα αναφέρεται γενικά στην ποσότητα της υπάρχουσας αργίλου. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης πλαστιμότητας είναι το εύρος της περιεκτικότητας της υγρασίας πάνω από την οποία το έδαφος είναι πλαστικό. Αριθμητικά είναι η διαφορά μεταξύ του ορίου υδαρότητας και του ορίου πλαστικότητας του εδάφους. Τα τέλματα με υψηλό δείκτη πλαστικότητας είναι λεπτόκοκκα και έχουν χαμηλή διαπερατότητα και χαρακτηριστικά αποστράγγισης ενώ τα τέλματα με χαμηλό δείκτη πλαστικότητας είναι πιο χονδρόκοκκα και χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές διαπερατότητας και αποστράγγισης. Η συμπίκνωση και συμπιεστότητα σχετίζονται με το μέγεθος των κόκκων και την πυκνότητα ή λόγο κενών. Αυτό είναι ένα μέτρο της μεταβολής του συνολικού όγκου των τελμάτων που μπορεί να εμφανίσουν με την πάροδο του χρόνου με την αποστράγγιση και την προσθήκη φορτίου. Η διατμητική αντοχή και οι παράμετροι τάσεις είναι λειτουργίες που επηρεάζουν την ευστάθεια και επηρεάζονται από την πίεση των πόρων. Η αλληλεπίδραση όλων αυτών των παραγόντων είναι πολύπλοκη και επηρεάζει την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα στο φράγμα και στο ανάχωμα.

Εκτός από τα χαρακτηριστικά των τελμάτων που επηρεάζουν την ευστάθεια και την ποσότητα του νερού της διήθησης, τα τέλματα μπορούν να αναλυθούν για τον προσδιορισμό της ποσότητας του νερού της διαρροής. Ακόμα, εκτός από τις χημικές διεργασίες που μπορεί να υπάρχουν στην φάση του εμπλουτισμού, τα τέλματα μεταλλικών ορυχείων μπορεί να περιέχουν μία σειρά από μέταλλα που υπάρχουν αρχικά στο μητρικό πέτρωμα και που μπορεί να ρυπάνουν τα τέλματα της διαρροής. Χαρακτηριστικοί ρύποι είναι το αρσενικό, ο μόλυβδος, το μαγγάνιο, το σελήνιο και άλλα μέταλλα. Τα τέλματα επίσης μπορεί να έχουν σημαντικά επίπεδα ραδιενέργειας (Lottermoser, 2003).

2.4.2.2 Παράγοντες του χώρου

Οι ειδικοί παράγοντες του χώρου παίζουν σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό ενός φράγματος. Οι εκτιμήσεις της χωροθέτησης περιλαμβάνουν: (1) φυσικές παραμέτρους όπως ο όγκος των τελμάτων και ο χώρος που απαιτείται για το φράγμα. (2) οικονομικούς παράγοντες όπως η ποσότητα και το κόστος των υλικών πλήρωσης, του ελέγχου του νερού και οι μέθοδοι απόθεσης των τελμάτων. (3) περιβαλλοντικές απαιτήσεις όπως έλεγχος των πλημμυρών, υπόγειων νερών και ρύπανση των επιφανειακών υδάτων και του φυσικού περιβάλλοντος της άγριας ζωής (U.S. EPA, 1994).

Η διαδικασία επιλογής της πιο ευνοϊκής περιοχής είναι μία τυπική διαδικασία επιλογής όπου οι λιγότερο κατάλληλες θέσεις απορρίπτονται διαδοχικά. Τα κριτήρια επιλογής περιλαμβάνουν το κόστος, τους περιορισμούς του σχεδιασμού και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η σημασία του καθενός από τα κριτήρια μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την λειτουργία και το χώρο που ελέγχεται. Κατά την επιλογή ενός κατάλληλου χώρου, οι περιορισμοί επιβάλλονται κυρίως από την θέση του εργοστασίου εμπλουτισμού, την τοπογραφία, την υδρολογία, την γεωλογία και υδρογεωλογία (U.S. EPA, 1994).

Τοποθεσία εργοστασίου εμπλουτισμού

Τα τέλματα γενικά μεταφέρονται από το εργοστάσιο εμπλουτισμού σε μορφή πολφού, με τυπική περιεκτικότητα σε στερεά 15 – 55% κατά βάρος. Αυτό απαιτεί ένα εκτεταμένο σύστημα σωληνώσεων, καθώς και για την άντληση του ανακτημένου νερού πίσω στο εργοστάσιο. Συνήθως προτιμούνται χώροι κοντά στο εργοστάσιο. Στην ιδανική περίπτωση, οι χώροι βρίσκονται σε κατωφέρεια, για να επιτρέπεται η ροή των τελμάτων λόγω βαρύτητας και να ελαχιστοποιείται το κόστος άντλησης. Ωστόσο, οι αγωγοί με απότομες κλίσεις αποφεύγονται όπου είναι δυνατόν. Τοποθεσίες που έχουν μικρές αυξήσεις υψομέτρου από το εργοστάσιο εμπλουτισμού στο φράγμα δεν αποκλείονται (U.S. EPA, 1994).

Τοπογραφία

Εκτός από την απόσταση και το υψόμετρο, η φυσική τοπογραφία είναι ένας από τους κύριους λόγους για τον απαιτούμενο όγκο του φράγματος. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί η μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης με την ελάχιστη ποσότητα υλικών πλήρωσης του αναχώματος. Οι φυσικές κοιλάδες και άλλες τοπογραφικές υφέσεις συνήθως ελέγχονται πρώτα. Ως γενικός κανόνας, το ύψος των αναχωμάτων διατηρείται κάτω από τα 61 μέτρα. Η τοπογραφία είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας για την υδρολογία της περιοχής (U.S. EPA, 1994).

Υδρολογία

Οι παράγοντες υδρολογίας επιφανειακών υδάτων γενικά ευνοούν την εκτροπή του νερού γύρω από το φράγμα και την ελαχιστοποίηση της εισροής των υδάτων στο φράγμα. Εάν είναι δυνατόν αυτό επιτυγχάνεται με την

τοποθέτηση του φράγματος όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην κορυφή της λεκάνης απορροής για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος για την κατασκευή δομών εκτροπής των επιφανειακών υδάτων (U.S. EPA, 1994).

Γεωλογία και υπόγειο νερό

Αφού εφαρμοστούν τα κριτήρια επιλογής του χώρου του εργοστασίου εμπλουτισμού, της τοπογραφίας και της υδρολογίας, στην συνέχεια σημαντικό ρόλο έχει η γεωλογία της περιοχής. Ειδικότερα, η γεωλογία της περιοχής επηρεάζει την θεμελίωση του αναχώματος, το ρυθμό των διαρροών και την διαθεσιμότητα των απαιτούμενων υλικών για την κατασκευή του αναχώματος.

Οι συνθήκες των υπόγειων υδάτων συνήθως σχετίζονται με την γεωλογία και επηρεάζουν τις συνθήκες χωροθέτησης. Ένας υψηλός υδροφόρος ορίζοντας περιορίζει την ποσότητα του ξηρού διαθέσιμου που είναι κατάλληλο για την κατασκευή και μικραίνει την απόσταση που χρειάζεται η διαρροή για να εισέλθει στο σύστημα των υπόγειων υδάτων. Επιπλέον ένας ρηχός υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να διεισδύσει στα τέλματα και να αυξηθεί η ποσότητα του νερού στο φράγμα (U.S. EPA, 1994).

Αρχικά, διάφορες παρατηρήσεις και εκτιμήσεις μπορούν να αξιολογήσουν περαιτέρω τους γεωλογικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της διαθεσιμότητας των υλικών κατασκευής, τα ειδικά προβλήματα της κατασκευής σε σχέση με τις κοντινές κατασκευές, τις συνθήκες αποστράγγισης της περιοχής και την φαινομενική υπόγεια ευστάθεια του χώρου (όπως καταβύθιση, εμφάνιση αδύναμων επιφανειών μέσα στο πέτρωμα, διαρρήξεις κλπ). Ο τύπος της υπάρχουσας βλάστησης μπορεί να δείξει τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Μπορούν να ανορυχθούν δοκιμαστικά ορύγματα ή γεωτρήσεις ώστε να ληφθούν δείγματα εδάφους και πετρώματος. Επιτόπιες δοκιμές διαπερατότητας μπορούν επίσης να εκτελεστούν σε οπές στην προτεινόμενη θέση κατασκευής του φράγματος τελμάτων.

Μία προτεινόμενη θέση θα υποβληθεί σε γεωτεχνική έρευνα. Η έρευνα θα αξιολογήσει την γεωλογία της περιοχής, συμπεριλαμβανομένου του βάθους, του πάχους, της συνοχής και της σύστασης των στρωμάτων. Η υδρογεωλογία της θέσης, οι γεωτεχνικές ιδιότητες του εδάφους και του πετρώματος επηρεάζουν τον σχεδιασμό και την διαθεσιμότητα των υλικών που είναι κατάλληλα για την κατασκευή του φράγματος, των αναχωμάτων, των στραγγιστηριών και των αδιαπέρατων υλικών επένδυσης (U.S. EPA, 1994).

Οι γεωτεχνικές δοκιμές σε εδάφη συμβάλουν γενικά στον προσδιορισμό του περιεχόμενου ύδατος, του μέγεθος του κόκκου διαχωρισμού, τα όρια Atterberg (περιεκτικότητα σε υγρασία των εδαφών όπως μετρείται στις τέσσερις οριακές καταστάσεις του εδάφους: υγρό, πλαστικό, ημι-στερεό και στερεό), την σταθεροποίηση, την διάτμηση, την διαπερατότητα και την ικανότητα ανταλλαγής ιόντων. Για τα πετρώματα είναι συνήθως αναγκαίο

να είναι γνωστή η διατμητική αντοχή κατά μήκος των αδύναμων στρωμάτων και η διαπερατότητα καθώς και η αντοχή των στρωμάτων.

Αυτές οι δοκιμές εκτελούνται συνήθως σε συνδυασμό με δοκιμές in – situ, όπως δοκιμές πρότυπης διείσδυσης (standard penetration), στατικού κώνου (static cone), περυγίου διάτμησης (vane shear) και μετρητή πίεσης (pressure meter) προκειμένου να ληφθούν χρήσιμα δεδομένα σχετικά με τις ιδιότητες του πεδίου. Ενώ οι εκτιμήσεις της διαπερατότητας του εδάφους μπορεί να προσδιοριστούν στο εργαστήριο, αυτές οι τιμές πρέπει να επιβεβαιωθούν μέσω δοκιμών στο πεδίο, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν μεθόδους γεωτρήσεων επιτόπου και μεγάλης κλίμακας αντλητικές μεθόδους. Επιπλέον οι μετρήσεις των υπογείων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων των πιεζομετρικών πιέσεων στο υποκείμενο έδαφος και η δειγματοληψία του νερού συνήθως καθορίζουν τα όρια αναφοράς πριν την κατασκευή του ταμιευτήρα (U.S. EPA, 1994).

Θεμελίωση

Η περιοχή θεμελίωσης κάτω από το ανάχωμα εκτιμάται με την χρήση γεωτεχνικών και άλλων μεθόδων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ασθενές υλικό κάτω από το πρανές, όπως θαμμένες πλαγιές που είχαν εκτεθεί στις καιρικές συνθήκες, το χιόνι που καλύπτει επιφάνειες πάνω από τις οποίες το πρόσθετο υλικό έχει εναποτεθεί, στρώματα από λεπτό υλικό σε ένα ανάχωμα από χονδρομερή υλικά και στρώματα της θεμελίωσης με χαμηλή διατμητική αντοχή, μπορεί να προκαλέσουν περιστροφική ολίσθηση. Εάν μία απόθεση αργίλου είναι εκτενώς ρωγματομένη, το νερό που διεισδύει μέσα στις ρωγμές μπορεί να αποδυναμώσει σοβαρά την απόθεση λόγω εξάρτησης της διατμητικής αντοχής, σχετικά με την αντοχή του μαλακού υλικού που γειτνιάζει με τις ρωγμές. Συμπίεση ή σταθεροποίηση της θεμελίωσης μπορεί να προκαλέσει σημαντική καθίζηση του υπερκείμενου υλικού, κάποιες φορές προκαλώντας ρωγμές στο ανάχωμα των τελμάτων που μπορεί να οδηγήσουν σε διαρροή.

Η διαπερατότητα της θεμελίωσης επηρεάζει σημαντικά την ευστάθεια ενός αναχώματος. Όταν ένα ανάχωμα κατασκευάζεται σε ένα θεμέλιο κορεσμένης αδιαπέρατης αργίλου, για παράδειγμα, το φορτίο του αναχώματος θα δημιουργήσει περίσσεια πίεση του νερού των πόρων στο υλικό της θεμελίωσης. Επειδή η άμεση φόρτιση λαμβάνεται από την υδάτινη φάση στο υλικό της θεμελίωσης, δεν υπάρχει αύξηση της διατμητικής αντοχής και η ταχεία φόρτιση μπορεί να επιταχύνει την αστοχία του αναχώματος που εκτείνεται μέσω της θεμελίωσης. Εάν το υλικό κάτω από την θεμελίωση είναι διαπερατό, η υπερβολική διαρροή μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία αστοχίας των σωληνώσεων (U.S. EPA, 1994).

Σεισμικότητα

Ο σχεδιασμός των φραγμάτων τελμάτων λαμβάνει συνήθως υπόψη την πιθανή σεισμική δραστηριότητα της περιοχής. Αυτό απαιτεί την χρήση ενός σεισμού στον σχεδιασμό για την εν λόγω περιοχή. Μία μέθοδος που

χρησιμοποιείται συνήθως για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων του σεισμού που επιλέχθηκε σε μια συγκεκριμένη θέση είναι να υποτεθεί ότι ο σεισμός συμβαίνει στο πλησιέστερο γνωστό ρήγμα που μπορεί να είναι ενεργό. Το ρήγμα επιλέγεται με βάση την γεωλογική μελέτη που διενεργήθηκε προηγουμένως στην περιοχή. Οι πίνακες εξασθένησης του σεισμικού κύματος χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για να εκτιμηθεί το μέγεθος των σεισμικών δυνάμεων που φτάνουν στην περιοχή λόγω του σεισμού που συμβαίνει στο προεπιλεγμένο ρήγμα (U.S. EPA, 1994).

2.5 Κατασκευή αναχώματος, ευστάθεια και αστοχία

2.5.1 Κατασκευή αναχώματος

Οι έρευνες για τον σχεδιασμό ενός αναχώματος τελμάτων, που περιγράφηκαν παραπάνω, οδηγούν στην επιλογή και τελειοποίηση ενός αρχικού φράγματος, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως σημείο εκκίνησης της κατασκευής ενός αναχώματος. Ο σχεδιασμός του αρχικού φράγματος καθορίζει την εσωτερική και εξωτερική γεωμετρία της κατασκευής και πρέπει να περιλαμβάνει προδιαγραφές για τη αποστράγγιση, τον έλεγχο των διαρροών και σε κάποιες περιπτώσεις τα συστήματα των υλικών επένδυσης που απαιτούνται για την ευστάθεια του αναχώματος και για τον έλεγχο των υλικών που απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο τελικός σχεδιασμός του φράγματος μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τις αρχικές προδιαγραφές. Εάν η κατασκευή του αναχώματος συνεχίζεται καθ' όλη την ενεργό ζωή του φράγματος, η εμπειρία που έχει αποκτηθεί από την συνεχή παρακολούθηση και ανάλυση επιτρέπει αλλαγές και βελτιώσεις στο σχεδιασμό για την καλύτερη κάλυψη των στόχων του έργου (Lottermoser, 2003).

Γενικά, εάν ο αρχικός σχεδιασμός του φράγματος περιλαμβάνει την χρήση υλικών επένδυσης ή συστήματα στραγγιστηριών, τα συστήματα αυτά θα πρέπει να αναπτυχθούν πριν ή ταυτόχρονα με την αρχική κατασκευή του φράγματος, καθώς και με κάθε διαδοχική ανάπτυξη του αναχώματος. Περιβαλλοντικές παράμετροι μπορούν να δημιουργήσουν την ανάγκη για την χρήση επένδυσης δεδομένου ότι τα τέλματα μπορεί να έχουν την ικανότητα έκλυσης τοξικών ή ανεπιθύμητων συστατικών σε υποκείμενα στρώματα, ομοίως είναι επιθυμητό να περιοριστεί η ροή του ρηχού υπόγειου νερού μέσα στα τέλματα. Η επένδυση αυτή του φράγματος μπορεί να αποτελείται από συμπιεσμένα φυσικά υλικά, συμπιεσμένη λάσπη τελμάτων, μεταφερόμενη ή τοπική άργιλο, συνθετικό υλικό, gunite κλπ. Για οικονομικούς λόγους, η συμπύκνωση των υπαρχόντων υλικών της περιοχής ή τα λεπτομερή των τελμάτων είναι οι προτιμώμενες μέθοδοι για την μείωση της διαπερατότητας της βάσης του φράγματος. Επίσης μερικοί τύποι φραγμάτων, όπως το φράγμα σε κοιλάδα, μπορεί να μην είναι δεκτικά σε οποιοδήποτε τύπο επένδυσης. Λόγω της πολύ μεγάλης επιφάνειας και του ανώμαλου εδάφους, η χρήση συνθετικών υλικών για την επένδυση ή άλλων υλικών που προέρχονται από άλλες περιοχές είναι απαγορευτικά ακριβή γι' αυτό τον τύπο φράγματος, ακόμη και αν αυτό είναι τεχνικά εφικτό (U.S. EPA, 1994).

Ένα σύστημα αποστράγγισης μπορεί να απαιτηθεί για κατασκευαστικούς λόγους. Όπως συζητήθηκε παραπάνω, ένα πρωτεύον μέλημα που συνοδεύει την χρήση των τελμάτων για την κατασκευή του αναχώματος είναι ο έλεγχος της πίεσης του νερού των πόρων μέσα και κάτω από το ανάχωμα. Η υπερβολική πίεση των πόρων μέσα στο ανάχωμα μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση της αντοχής σε διάτμηση του υλικού πλήρωσης, με αποτέλεσμα την τοπική ή γενική αστοχία του πρανούς. Επιπλέον, η υψηλή πίεση των πόρων εντός ή κάτω από την επιφάνεια του αναχώματος μπορεί να οδηγήσει σε ανεξέλεγκτη διαρροή στο μέτωπο του φράγματος οδηγώντας σε αστοχία με την μορφή σωληνώσεων. Ομοίως διαρροή διαμέσου αδύναμων διαπερατών στρωμάτων της θεμελίωσης μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία της ίδιας μορφής ή σε υπέρβαση της διατμητικής αντοχής του εδάφους, προκαλώντας καθίζηση της θεμελίωσης και να θέσει σε κίνδυνο την ευστάθεια του υπερκείμενου αναχώματος. Αυτές και άλλες απειλές για την ευστάθεια του αναχώματος μπορούν να μειωθούν μερικώς μέσω του ελέγχου των διαρροών. Γενικά, ο έλεγχος των διαρροών μπορεί να επιτευχθεί μέσω της δημιουργίας ζωνών διαφορετικής διαπερατότητας ανάντη από, κάτω από και μέσα στο ανάχωμα, είτε μέσω των συστημάτων αποστράγγισης ή με στρώματα χαμηλής διαπερατότητας ή πυρήνα ή συνδυασμός αυτών (U.S. EPA, 1994).

Η πρωταρχική λειτουργία των συστημάτων αποστράγγισης είναι η διάχυση της πίεσης των πόρων κατά μήκος του αναχώματος. Τα συστήματα αποστράγγισης επιτρέπουν τον έλεγχο του υδροφόρου ορίζοντα με την παροχή αγωγών χαμηλής πίεσης για διαρροή του νερού. Ένας αριθμός μεθόδων είναι διαθέσιμος για την επίτευξη του στόχου. Ειδικότερα, τέτοια είναι η καμινάδα αποστράγγισης και κουβέρτα αποστράγγισης, καθένα αποτελούμενο από υλικά με διαπερατότητα δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από εκείνη του αναχώματος. Η καμινάδα αποστράγγισης είναι κάθετες κουρτίνες από υλικό υψηλής διαπερατότητας, ενώ η κουβέρτα αποστράγγισης είναι οριζόντια στρώματα από υλικό υψηλής διαπερατότητας. Παραλλαγές τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού. Η θέση τέτοιων ζωνών αποστράγγισης εξαρτάται από τη μέθοδο της κατασκευής του αναχώματος (U.S. EPA, 1994).

Σημαντικό για την απόδοση των συστημάτων αποστράγγισης είναι η πρόληψη της απόφραξης. Αυτή μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, όταν τα λεπτομερή τέλματα διεισδύσουν στην ζώνη αποστράγγισης. Φίλτρα ή ζώνες φίλτρων μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν στην αποτροπή έμφραξης και συνεπώς να διατηρηθούν οι διαφορές στην διαπερατότητα κατά μήκος των ζωνών. Ζώνες φίλτρων μπορούν να κατασκευαστούν από διαβαθμισμένη άμμο ή συνθετικά υφάσματα (Vick 1990).

Δεδομένου ότι ο σκοπός του φράγματος τελμάτων είναι να κατακρατεί τον πολφό των τελμάτων (να επιτρέπει την ανάκτηση του νερού των διεργασιών του εργοστασίου) και θεωρώντας ότι η άμμος των τελμάτων που χρησιμοποιείται στην κατασκευή του αναχώματος δεν είναι ποτέ αδιαπέρατη, το ύψος της στήλης του νερού κατά μήκος του αναχώματος δεν είναι ποτέ μηδέν. Οπότε μία ποσότητα νερού θα μεταναστεύσει διαμέσου και /ή κάτω από το ανάχωμα.

2.5.2 Μέθοδοι κατασκευής

Μία ποικιλία μεθόδων κατασκευής και υλικών χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των φραγμάτων διάθεσης τελμάτων. Γενικά, τα ορυχεία επιλέγουν υλικά και μεθόδους για να δώσουν την απαιτούμενη σταθερότητα με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Αν το φράγμα τελμάτων είναι κοντά στο ορυχείο, η χρήση του στείρου υλικού μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος καθώς επίσης και την ανάγκη εύρεσης περιοχών απόθεσης στείρων υλικών. Τα υλικά επίσης πρέπει να ανταποκρίνονται στην διαπερατότητα, στην συμπιεστότητα και στις απαιτήσεις της διατμητικής αντοχής. Επίσης θα πρέπει να είναι χημικά σταθερά, έτσι στείρο υλικό που μπορεί να δημιουργήσει οξύ δεν είναι κατάλληλο για την κατασκευή του αναχώματος, ιδιαίτερα στα συστήματα αποστράγγισης. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό για την κατασκευή του αναχώματος είναι τα τέλματα.

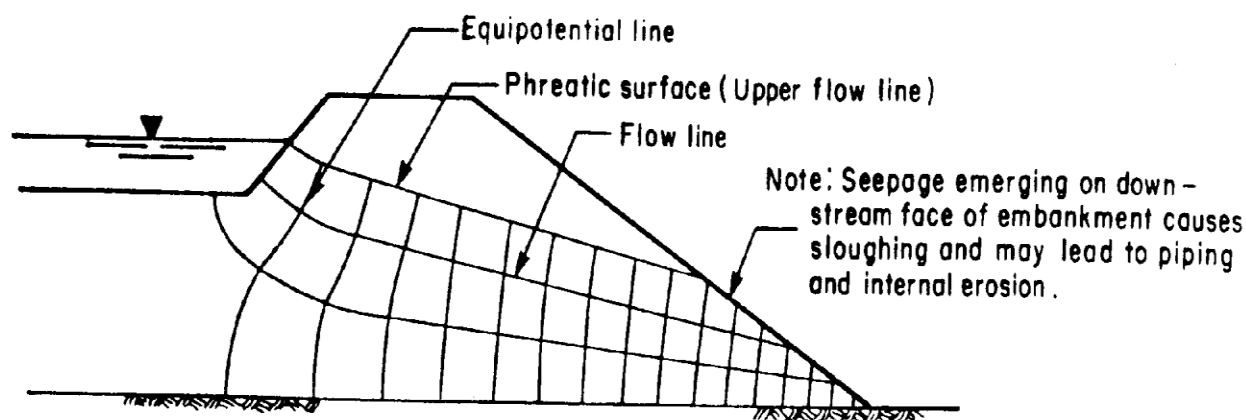
2.5.2.1 Κατασκευή αναχώματος χρησιμοποιώντας τα υλικά των τελμάτων

Η χρήση του υλικού των τελμάτων είναι γενικά η πιο οικονομική μέθοδος κατασκευής. Μερικά από τα μειονεκτήματα της χρήσης τελμάτων ως υλικό κατασκευής των φραγμάτων περιλαμβάνουν: υψηλή ευαισθησία σε εσωτερική σωλήνωση, ιδιαίτερα διαβρώσιμες επιφάνειες και υψηλή ευαισθησία των τελμάτων στην δράση του παγετού. Επίσης, χαλαρά και κορεσμένα τέλματα υπόκεινται σε υγροποίηση κάτω από σεισμικό σοκ. Κατά την κατασκευή του φράγματος τελμάτων, οι δύο κύριοι τρόποι για την βελτίωση αυτών των ιδιοτήτων είναι να χρησιμοποιηθεί χονδρομερές κλάσμα τελμάτων και να συμπυκνωθεί. Το κλάσμα της άμμου αφού διαχωριστεί από τα λεπτομερή των τελμάτων μπορεί εύκολα να συμπυκνωθεί χρησιμοποιώντας δονητικούς συμπίεστες. Με την συμπίκνωση του χονδρομερούς κλάσματος τελμάτων, το τελικό αποτέλεσμα είναι μία πυκνή μάζα ενός ισχυρού υλικού που έχει αυξηθεί σημαντικά η αντίστασή του στην ρευστοποίηση. Ο διαχωρισμός των τελμάτων συμβαίνει συνήθως με την χρήση ακροφυσίων ή με την χρήση κυκλώνα διαχωρισμού. Οι τρεις μέθοδοι κατασκευής με χρήση των τελμάτων είναι η ανάντη μέθοδος, η κατάντη μέθοδος και η μέθοδος απόθεσης σε κεντρική γραμμή (U.S. EPA, 1994).

2.5.2.2 Ανάντη μέθοδος κατασκευής

Η ανάντη μέθοδος κατασκευής, παλαιότερη και πιο οικονομική μέθοδος, ξεκινάει με ένα αρχικό φράγμα κατασκευασμένο στο κατάντη πόδι (Εικόνα 4). Το αρχικό φράγμα πρέπει να είναι ικανό να διατρέχεται από διαρροές νερού και το κατάντη τμήμα να είναι ανθεκτικό στην σωλήνωση. Τα τέλματα απορρίπτονται περιφερειακά από την κορυφή του αρχικού φράγματος χρησιμοποιώντας σημεία εκροής ή κυκλώνες. Αυτή η εναπόθεση αναπτύσσει ένα ανάχωμα και μία μεγάλη παράκτια περιοχή που αποτελείται από χονδρόκοκκο υλικό. Η παράκτια περιοχή γίνεται η θεμελίωση για το επόμενο ανάχωμα. Σε μερικές εφαρμογές, τα αναχώματα τοποθετούνται μηχανικά και η εκροή χρησιμοποιείται μόνο για την κατασκευή της παράκτιας περιοχής (επιπλέον, τα λεπτομερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάλυψη του ανάντη μετώπου του αναχώματος ώστε να μειωθεί η διαπερατότητα). Αυτά τα αναχώματα μπορούν να κατασκευαστούν με το διαθέσιμο υλικό πλήρωσης ή με άμμο από την παράκτια περιοχή που μπορεί να εκσκαφεί και να τοποθετηθεί με την χρήση είτε συρόμενου κάδου είτε

με μπουλντόζα. Κάποιος τύπος μηχανικής συμπίκνωσης του υλικού τυπικά πραγματοποιείται πριν από το επόμενο στάδιο της κατασκευής του φράγματος (Lottermoser, 2003).



Εικόνα 4: Ανάντη μέθοδος κατασκευής αναχώματος (πηγή: Vick 1990)

Τα πιο σημαντικά κριτήρια για την εφαρμογή της ανάντη μεθόδου κατασκευής είναι ότι η παράκτια περιοχή πρέπει να αποτελεί μία ικανοποιητική θεμελίωση για την υποστήριξη του επόμενου αναχώματος. Ο Vick (1990) αναφέρει ότι, κατά γενικό κανόνα, η απόρριψη δεν θα πρέπει να περιέχει λιγότερο από 40 έως 60% άμμο. Αυτό μπορεί να αποκλείει την ανάντη μέθοδο για αυτά τα τέλματα του εργοστασίου εμπλουτισμού που περιέχουν πολύ χαμηλά ποσοστά άμμου.

Εκτός από την διαβάθμιση των τελμάτων, διάφοροι άλλοι παράγοντες μπορούν να περιορίσουν την δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν τον έλεγχο του υδροφόρου ορίζοντα, την ικανότητα αποθήκευσης του νερού, την σεισμική ευαισθησία υγροποίησης και τον ρυθμό αύξησης του φράγματος. Η ανάντη μέθοδος κατασκευής του αναχώματος προσφέρει μερικά διαρθρωτικά μέτρα για τον έλεγχο του υδροφόρου ορίζοντα μέσα στο ανάχωμα. Ο Vick (1990) προσδιόρισε τέσσερις σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την θέση του υδροφόρου ορίζοντα: (α) την διαπερατότητα της θεμελίωσης σε σχέση με τα τέλματα, (β) τον βαθμό του διαχωρισμού του μεγέθους του κόκκου, (γ) την πλευρική μεταβολή της διαπερατότητας εντός του φράγματος και (δ) την θέση του νερού της λίμνης σε σχέση με την στέψη του αναχώματος. Μόνο η θέση της λίμνης μπορεί να ελεγχθεί μέσω των πρακτικών της λειτουργίας. Οι άλλοι παράγοντες πρέπει να έχουν προγραμματιστεί στο στάδιο του σχεδιασμού της κατασκευής.

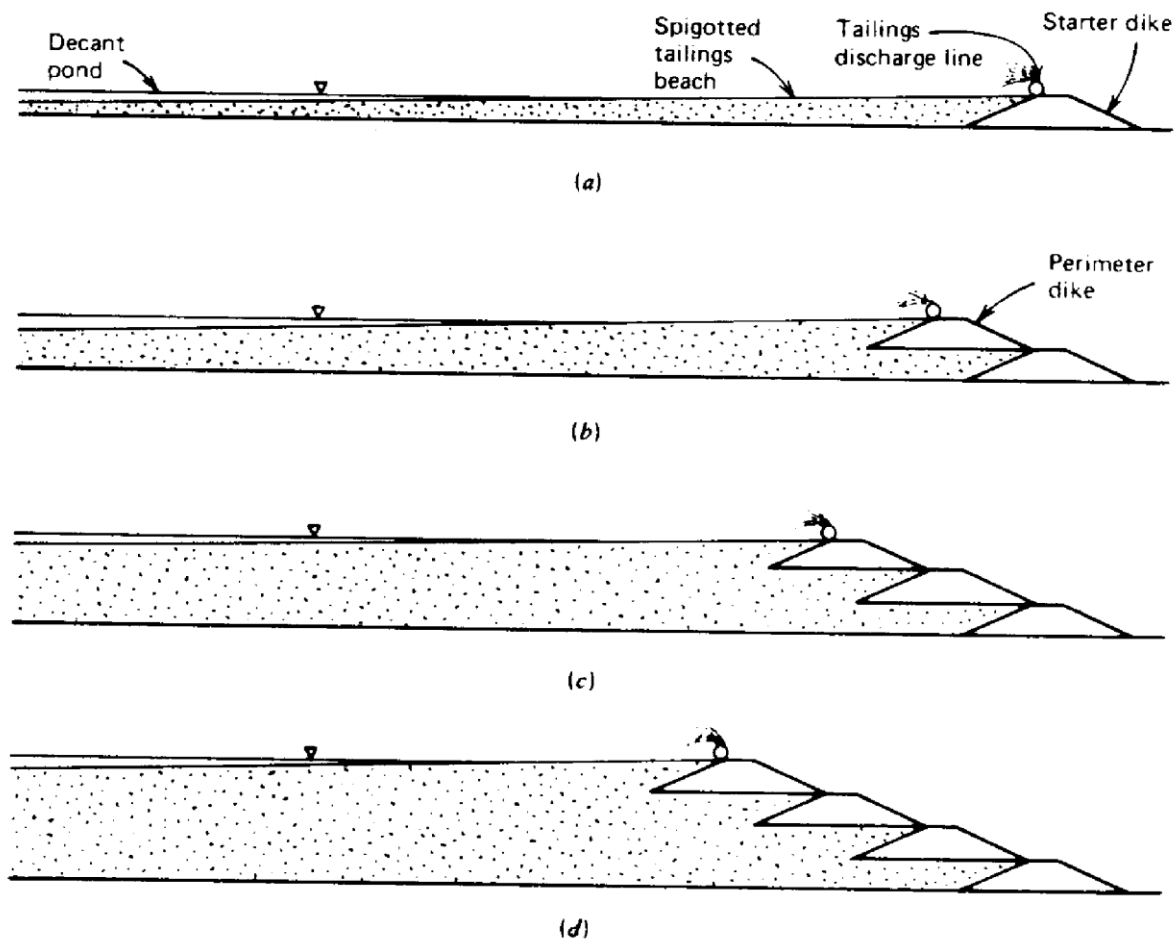
Οποιαδήποτε αλλαγή στις περιβαλλοντικές ή λειτουργικές συνθήκες (έντονες βροχοπτώσεις, απόφραξη των εξόδων των διαρροών, άνοδος της στάθμης των υδάτων στην λίμνη κλπ.) με αποτέλεσμα την ανύψωση της γραμμής του υδροφόρου και πλήρη κορεσμό του εξωτερικού κελύφους της άμμου θα μπορούσε να οδηγήσει γρήγορα σε αστοχία με σωλήνωση ή ολίσθηση. Ένα εξωτερικό λιθόριπτο κέλυφος μπορεί να μετριάσει την πιθανότητα αστοχίας με τους παραπάνω τρόπους (U.S. EPA, 1994).

Τα αναχώματα τελμάτων που κατασκευάζονται με την ανάντη μέθοδο γενικά έχουν χαμηλή σχετική πυκνότητα και υψηλό βαθμό κορεσμού σε νερό. Αυτός ο συνδυασμός μπορεί να οδηγήσει σε ρευστοποίηση του αναχώματος τελμάτων σε ένα γεγονός σεισμικής δραστηριότητας. Επιπροσθέτως, η δόνηση με επαρκή ένταση και μέγεθος που προκαλούν οι ανατινάξεις, τα βαρέα οχήματα κλπ. μπορεί να προκαλέσει ρευστοποίηση. Η αντοχή σε διάτμηση μπορεί να μειωθεί κοντά στο μηδέν, έτσι ώστε το ρευστοποιημένο λεπτόκοκκο υλικό να βγει μέσα από την λεπτή στρώση άμμου του αναχώματος και το φράγμα να καταρρεύσει. Αυτό μπορεί να συμβεί σε πολύ χαμηλά ύψη και γωνίες κλίσης. Ως εκ τούτου η ανάντη μέθοδος κατασκευής δεν είναι κατάλληλη σε περιοχές με πιθανότητα για μεγάλη σεισμική δραστηριότητα (U.S. EPA, 1994).

2.5.2.3 Κατάντη μέθοδος κατασκευής

Οι απαιτήσεις σχεδιασμού στην κατάντη μέθοδο κατασκευής είναι παρόμοιες με εκείνες των συμβατικών φραγμάτων αποθήκευσης νερού. Όπως και στην ανάντη μέθοδο κατασκευής, η κατασκευή ξεκινάει με ένα αρχικό φράγμα κατασκευασμένο από συμπυκνωμένα διαθέσιμα υλικά. Ωστόσο, αυτό το αρχικό φράγμα μπορεί να κατασκευαστεί από διαπερατή άμμο και χαλίκια ή κατά κύριο λόγο με ιλύ και άργιλο για να ελαχιστοποιηθεί η διαρροή μέσω του φράγματος (εικόνα 5). Εάν χρησιμοποιηθούν υλικά με χαμηλή διαπερατότητα στο αρχικό φράγμα, τότε θα πρέπει να ενσωματωθούν στον σχεδιασμό εσωτερικά στραγγιστήρια. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται έτσι επειδή τα μετέπειτα στάδια της κατασκευής του φράγματος υποστηρίζονται στο πάνω μέρος του κατάντη πρανούς του προηγούμενου τμήματος, μετατοπίζοντας την κεντρική γραμμή της κορυφής του φράγματος προς την κατάντη πλευρά, καθώς το ύψος του φράγματος αυξάνεται σταδιακά.

Διάφορες τεχνικές απόθεσης τελμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με την κατάντη μέθοδο κατασκευής, αλλά η περιφερειακή απόθεση των τελμάτων με χρήση ακροφυσίων είναι πολύ συχνή. Χονδρόκοκκα τέλματα μπορούν να απλωθούν σε λεπτά στρώματα χρησιμοποιώντας κυκλώνα διαχωρισμού πάνω στο φράγμα ή μπορούν να τραβηχτούν από ένα λόφο αποθέματος ενός κεντρικού κυκλώνα και στην συνέχεια να απλωθούν και να συμπυκνωθούν. Εάν ο όγκος των χονδρομερών τελμάτων δεν είναι επαρκής για την κατασκευή του φράγματος, τα υλικά της περιοχής μπορούν να ενσωματωθούν ως ένα μέρος στην κατασκευή. Εάν χρησιμοποιείται χονδρόκοκκο πέτρωμα, λόγω του πορώδους του, απαιτείται ένα φίλτρο ή μία αδιαπέρατη μεμβράνη στην ανάντη πλευρά για την πρόληψη της διαρροής των τελμάτων μέσω του πετρώματος. Αν η απόθεση με την χρήση ακροφυσίων ελέγχεται ώστε να δημιουργηθεί μία παράλια περιοχή τελμάτων και το ανάχωμα έχει κατασκευαστεί από διαπερατά τέλματα, ο υδροφόρος ορίζοντας, μπορεί να ελεγχθεί χωρίς την ανάγκη για κατασκευή εσωτερικών αδιαπέρατων ζωνών ή στραγγιστηριών. Ωστόσο, οι Brawner *et al* (1973) συνιστούν ότι αν ένα φράγμα κατασκευαστεί σε μία πιθανή σεισμική ζώνη, οι κατάντη επεκτάσεις θα πρέπει να συμπυκνώνονται σε μία υψηλότερη σχετική πυκνότητα από ότι είναι τυπικά ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος ρευστοποίησης.



Εικόνα 5: Κατάντη μέθοδος κατασκευής (πηγή: Vick 1990)

Η μέθοδος κατάντης κατασκευής επιτρέπει την ενσωμάτωση των στραγγιστηρίων και του αδιαπέρατου πυρήνα για τον έλεγχο του υδροφόρου ορίζοντα. Οι Brawner *et al* (1973) συνέστησαν την τοποθέτηση ενός αδιαπέρατου στρώματος άμμου υπό στράγγιση ή ένα εναλλακτικό σύστημα αποστράγγισης πριν από κάθε επέκταση του κατάντη πρανούς. Αρκετά άλλα σχέδια μπορούν επίσης να ενσωματωθούν στον σχεδιασμό. Για παράδειγμα, μια κεκλιμένη καμινάδα αποστράγγισης τοποθετημένη κοντά στο ανάντη μέτωπο του φράγματος και συνδεδεμένη με μία κουβέρτα αποστράγγισης στη βάση του αναχώματος (Vick 1990). Ο έλεγχος της αποστράγγισης βοηθά στον έλεγχο του υδροφόρου ορίζοντα και ελαχιστοποιεί την πιθανότητα για δημιουργία πίεσης του νερού των πόρων που μειώνει την διατμητική αντοχή. Λόγω της ικανότητας για ενσωμάτωση της αποστράγγισης στον σχεδιασμό, αυτή η μέθοδος κατασκευής προσαρμόζεται καλά σε περιπτώσεις όπου μεγάλες ποσότητες νερού μπορούν να αποθηκευτούν μαζί με τα στερεά τέλματα.

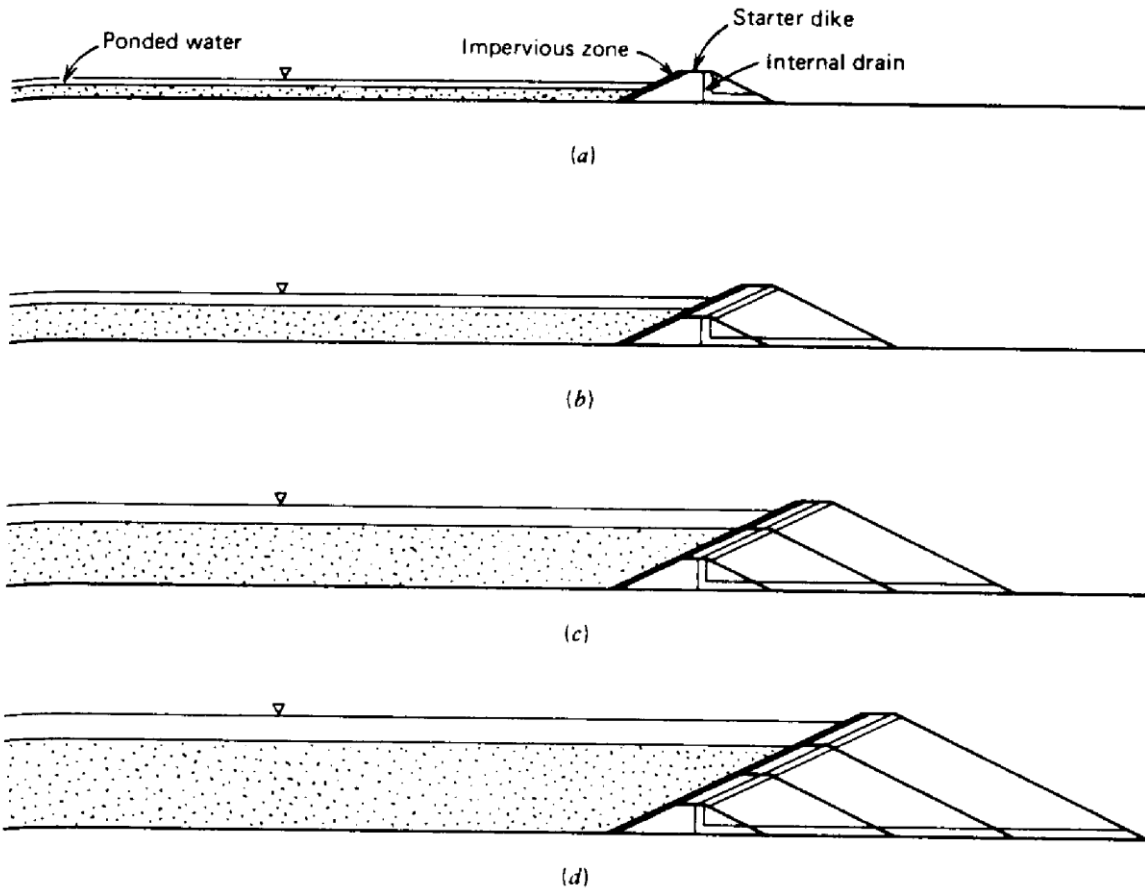
Η κατάντη μέθοδος κατασκευής παρέχει έναν βαθμό σταθερότητας που δεν βρέθηκε στην ανάντη μέθοδο κατασκευής, λόγω της ικανότητας και της ευκολίας συμπύκνωσης, ενσωμάτωση των μέτρων ελέγχου του υδροφόρου ορίζοντα και το γεγονός ότι η ανέγερση του φράγματος δεν εξαρτάται δομικά από τις αποθέσεις των τελμάτων για την αντοχή της θεμελίωσης. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο μεγάλος όγκος του υλικού πλήρωσης που απαιτείται για την κατασκευή του φράγματος. Ο αυξημένος όγκος πλήρωσης που απαιτείται μπορεί να αυξήσει δραματικά το κόστος της μεθόδου αυτής, αν τα τέλματα από το εργοστάσιο εμπλουτισμού δεν μπορούν να παρέχουν επαρκή όγκο άμμου. Αναχώματα κατασκευασμένα με την κατάντη μέθοδο κατασκευής επίσης καλύπτουν μία σχετικά μεγάλη περιοχή, το οποίο μπορεί να είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα εάν ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος (U.S. EPA, 1994).

2.5.2.4 Μέθοδος κατασκευής σε κεντρική γραμμή

Η μέθοδος κατασκευής σε κεντρική γραμμή είναι παρόμοια τόσο με την ανάντη όσο και με την κατάντη μέθοδο κατασκευής αφού το ανάχωμα ξεκινάει με ένα αρχικό φράγμα και τα τέλματα αποτίθενται με την χρήση ακροφυσίων από την στέψη του φράγματος για να σχηματιστεί μια παράλια περιοχή. Η κεντρική γραμμή του αναχώματος διατηρείται σταθερή καθώς πληρώνεται με υλικό και προοδευτικές αυξήσεις τοποθετούνται τόσο στην παράλια περιοχή όσο και στην κατάντη πλευρά (εικόνα 6). Τα τέλματα που τοποθετούνται στην κατάντη πλευρά πρέπει να συμπυκνωθούν για να αποφευχθεί η αστοχία σε διάτμηση. Η μέθοδος κατασκευής σε κεντρική γραμμή παρέχει μερικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους, ενώ μετριάζει μερικά από τα μειονεκτήματα.

Όπως και στην κατάντη μέθοδο, μπορούν να ενσωματωθούν ζώνες αποστράγγισης στην κατασκευή. Στην συγκεκριμένη μέθοδο κατασκευής δεν είναι απαραίτητη η δημιουργία μίας μεγάλης παράκτιας περιοχής, επομένως αυτή η μέθοδος ενδείκνυται για χρήση όταν τα τέλματα περιέχουν μικρό ποσοστό άμμου. Λόγω του μικρότερου ποσοστού άμμου που απαιτείται, το φράγμα που δημιουργείται μπορεί να κατασκευαστεί γρηγορότερα από ότι στην ανάντη ή στην κατάντη μέθοδο κατασκευής. Η χονδρόκοκκη διαβάθμιση των τελμάτων είναι αναγκαία αν η ταχεία αποστράγγιση απαιτείται για να παρέχει υποστήριξη για τον εξοπλισμό κατασκευής (U.S. EPA, 1994).

Παρά το γεγονός ότι αυτός ο τύπος αναχώματος δεν μπορεί να αποτελέσει χώρο αποθήκευσης μεγάλου όγκου νερού, η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση νερού λόγω σφοδρής βροχόπτωσης ή τερματισμού της λειτουργίας του εργοστασίου δεν θα επηρεάσει αρνητικά την ευστάθεια του φράγματος (U.S. EPA, 1994).



Εικόνα 6: Μέθοδος κατασκευής σε κεντρική γραμμή (πηγή: Vick 1990)

Εάν το ανάχωμα έχει συμπυκνωθεί σωστά και παρέχεται καλή εσωτερική αποστράγγιση, αυτός ο τύπος αναχώματος είναι ανθεκτικός σε σεισμική δραστηριότητα. Ακόμη και στην περίπτωση που τα λεπτομερή τοποθετούνται στο ανάντη πρανές ρευστοποίησης, τα κεντρικά και κατάντη τμήματα του φράγματος μπορούν να παραμείνουν σταθερά λόγω της καλής συμπύκνωσης και των χαρακτηριστικών αποστράγγισης.

2.5.2.5 Κατασκευή αναχώματος χρησιμοποιώντας εναλλακτικά υλικά

Παρά το γεγονός ότι οι τρεις μέθοδοι κατασκευής αναχώματος, που συζητήθηκαν προηγουμένως, συνήθως κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μεγάλους όγκους χονδρομερών τελμάτων, τμήματα των φραγμάτων (ιδιαίτερα το αρχικό φράγμα) μπορεί να περιλαμβάνουν μία ποικιλία από υλικά πλήρωσης. Για παράδειγμα, τα στείρα υλικά της εξόρυξης και τα υπερκείμενα που εκσκάφτηκαν κατά την αρχική διάνοιξη του ορυχείου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των αναχωμάτων. Ωστόσο τα απόβλητα που απομακρύνονται από το ορυχείο μπορούν να συμβαδίζουν με την ζήτηση για την ανύψωση της στέψης του φράγματος. Ακόμα, αν το υλικό της εξόρυξης ενδέχεται να δημιουργεί όξινες απορροές τότε δεν είναι κατάλληλο για την κατασκευή του αναχώματος ή των στραγγιστηρίων.

Σε γενικές γραμμές, όπου τα φυσικά υλικά χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την κατασκευή των φραγμάτων, τότε μπορεί να ακολουθηθεί ο σχεδιασμός του πρότυπου χωμάτινου φράγματος (φράγμα κατακράτησης νερού). Ένα φράγμα κατακράτησης νερού κατασκευασμένο με υλικά της περιοχής πρέπει να περιέχει εσωτερικές ζώνες όπως έναν αδιαπέρατο πυρήνα, ζώνες αποστράγγισης και κατάλληλα φίλτρα. Αυτά τα σχέδια ταιριάζουν καλύτερα όταν μεγάλες ποσότητες νερού σχεδιάζεται να αποθηκευτούν μαζί με τα τέλματα. Απαιτούνται όμως αλλαγές στον σχεδιασμό ώστε να αντιπροσωπεύονται η μεγαλύτερη μονάδα βάρους λόγω των κορεσμένων τελμάτων (U.S. EPA, 1994).

2.5.3 Απόθεση τελμάτων

Ο πολφός των τελμάτων μεταφέρεται μέσω ενός συστήματος αγωγών στο φράγμα τελμάτων για την απόθεση. Μόλις τα τέλματα φθάσουν στο φράγμα, μια ποικιλία από επιλογές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόθεση των τελμάτων. Κατά τον προσδιορισμό της μεθόδου που είναι η πλέον κατάλληλη για μια συγκεκριμένη λειτουργία, οι μηχανικοί μελετούν τα χαρακτηριστικά των υλικών των τελμάτων, τον κύκλο απόθεσης και το κλίμα. Θα εξετάσουν επίσης την διάταξη του φράγματος και τον σχεδιασμό του αναχώματος.

Τρεις μέθοδοι εναπόθεσης τελμάτων χρησιμοποιούνται συνήθως, η απόρριψη των τελμάτων σε ένα σημείο, η απόρριψη με την χρήση ακροφυσίων και η απόρριψη τελμάτων μετά από τον διαχωρισμό σε κυκλώνα (cycloning). Υπάρχουν παραλλαγές για όλες αυτές τις μεθόδους και οι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό για να πληρούν τα κριτήρια σχεδιασμού που καθορίζονται από τους μηχανικούς (U.S. EPA, 1994).

2.5.3.1 Απόρριψη τελμάτων σε ένα σημείο

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά στα φράγματα που η απόρριψη του πολφού των τελμάτων γίνεται από την ανάντη πλευρά του φράγματος και της λίμνης (δηλαδή όχι από την στέψη του φράγματος). Αυτή η τεχνική δεν είναι κατάλληλη όταν η λίμνη (και το λεπτομερές κλάσμα των τελμάτων) πρέπει να διατηρείται μακριά από το ανάχωμα. Ένα σημείο απόρριψης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την απόρριψη πολφού στο φράγμα, αλλά προϋποθέτει ότι το σημείο απόρριψης μετακινείται περιοδικά σε άλλο τμήμα του φράγματος για να αποφευχθεί άνιση αύξηση των τμημάτων του φράγματος. Επιπροσθέτως, η μικρή επιφάνεια απόρριψης προς τον όγκο απόρριψης από ένα σημείο καθιστά αυτή την μέθοδο ιδανική για κρύο περιβάλλον, όπου υπάρχει πιθανότητα παγώματος των μικρότερων ρευμάτων απόρριψης (U.S. EPA, 1994).

2.5.3.2 Απόρριψη τελμάτων με την χρήση ακροφυσίων

Είναι η τεχνική απόρριψης τελμάτων μέσω μικρών σωλήνων (ακροφυσίων) που προέρχονται από πολλαπλά σημεία ανά τακτά διαστήματα κατά μήκος μιας κύριας γραμμής τελμάτων. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί μια περισσότερο ή λιγότερο ομοιόμορφη ροή των τελμάτων, η οποία θεωρητικά θα δημιουργήσει ομοιόμορφες παράλιες περιοχές. Με την χρήση ακροφυσίων σχηματίζεται μία ομαλή παράλια περιοχή, όπου το πιο χονδρομερές κλάσμα καθιζάνει κοντά στο σημείο απόρριψης και το πιο λεπτομερές κλάσμα αποτίθεται

σταδιακά πιο μακριά από το σημείο απόρριψης (Lottermoser, 2003). Ως αποτέλεσμα αυτής της μεταβλητής διαβάθμισης, η πυκνότητα, η διατμητική αντοχή και η διαπερατότητα των κατακαθισμένων στερεών μειώνεται με την αυξανόμενη απόσταση από το σημείο απόρριψης. Αυτή η χαρακτηριστική κατανομή μπορεί να είναι πολύ ευνοϊκή για την μείωση του υδροφόρου ορίζοντα πριν και σε όλη την επιφάνεια του αναχώματος (Lottermoser, 2003). Ωστόσο, η παρατήρηση του πραγματικού μεγέθους των τεμαχιδίων, η διαπερατότητα και η διατμητική αντοχή κατανεμημένες με την απόσταση από το σημείο απόρριψης υποδηλώνουν ότι η ομαλή ιδανική διαβάθμιση θεωρητικά μπορεί να επιτευχθεί σπάνια στην πράξη (Vick 1990). Παρόλα αυτά, η εξέταση της ταχύτητας των τελμάτων που προηγούνται, η συγκέντρωση των τελμάτων στην κορυφή και στις γραμμές των ακροφυσίων και το σημείο απόρριψης μπορεί να επιτρέψει την ανάπτυξη παράλιων περιοχών που παρέχουν δομική σταθερότητα στο κυρίως ανάχωμα, δημιουργώντας παράλληλα μια μακριά πορεία διαρροής (παρέχοντας επακόλουθη διάχυση της πίεσης των πόρων) από την λίμνη στο ανάχωμα (Lighthall, 1989).

2.5.3.3 Απόρριψη τελμάτων μετά τον διαχωρισμό σε κυκλώνα

Η άμμος των τελμάτων (χονδρομερές κλάσμα των τελμάτων) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή φραγμάτων αποθήκευσης τελμάτων κατά την διάρκεια της ενεργού εναπόθεσης. Οι εταιρίες εξόρυξης βλέπουν την εξοικονόμηση του κόστους ως το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης του χονδρόκοκκου κλάσματος με τον τρόπο αυτόν. Δεδομένου ότι η άμμος αυτή προέρχεται από το υλικό που πρόκειται να αποθεθεί (τα τέλματα), τυχόν έξοδα που σχετίζονται με την απόκτηση διαθέσιμων υλικών πλήρωσης για την κατασκευή του αναχώματος εξαλείφονται ή μειώνονται σημαντικά. Αυτή η πρακτική μειώνει επίσης τον συνολικό όγκο των τελμάτων που πρόκειται να αποθεθούν στο φράγμα, αφού τουλάχιστον μέρος του χονδρού κλάσματος έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή του. Η μέθοδος αυτή που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό του λεπτομερούς από το χονδρομερές κλάσμα του συνολικού πολφού των τελμάτων είναι ο διαχωρισμός με την χρήση κυκλώνα (U.S. EPA, 1994).

Κυκλώνες είναι απλές μηχανικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό των χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων σωματιδίων από ένα πολφό μέσω φυγοκεντρικής δράσης. Καθώς η λάσπη, που κινείται κάτω από πίεση, εισέρχεται στον κυκλώνα, τα λεπτομερή σωματίδια και η μεγαλύτερη ποσότητα του νερού ανεβαίνουν στην ανώτερη έξοδο. Τα χονδρά σωματίδια κινούνται ελικοειδώς προς τα κάτω μέσω ενός κωνικού τμήματος και εξέρχονται από το κάτω μέρος. Το διαχωρισμένο λεπτομερές κλάσμα αναφέρεται ως υπερχειλίση και το κλάσμα άμμου είναι γνωστό ως απορροή. Τα υλικά της απορροής χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του φράγματος τελμάτων, ενώ τα υλικά της υπερχειλίσης εκκενώνονται μέσω ενός ξεχωριστού αγωγού λεπτομερών υλικών στο ίδιο φράγμα. Η απορροή και η υπερχειλίση θα πρέπει να παρακολουθούνται συχνά για την μέτρηση της πυκνότητας του πολφού, της διαβάθμισης και των πιέσεων εισόδου των υλικών στον κυκλώνα. Η προσαρμογή του κυκλώνα συνήθως απαιτείται για την διατήρηση της πυκνότητας του πολφού στον στόχο για το μέγεθος κόκκου (U.S. EPA, 1994).

Ορισμένα κριτήρια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη αξιολόγηση αν ο διαχωρισμός με κυκλώνα μπορεί να είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την κατασκευή του αναχώματος τελμάτων. Η άμμος που προέρχεται από τον κυκλώνα πρέπει να έχει διαπερατότητα επαρκώς υψηλότερη από αυτή των λεπτομερών που απορρίπτονται στο φράγμα έτσι ώστε ο υδροφόρος ορίζοντας να μπορεί να ελεγχθεί επαρκώς στο φράγμα. Η άμμος θα πρέπει επίσης να επιτρέπει την γρήγορη αποστράγγιση κατά την εκροή για να διευκολύνουν τον χειρισμό και την μεταφορά της άμμου. Ο όγκος της άμμου από τον κυκλώνα που ανακτάται από το σύνολο των τελμάτων θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να επιτρέπει την κατασκευή του φράγματος όπως χρειάζεται ώστε να δημιουργηθεί επαρκής όγκος για την απόθεση των λεπτομερών στο φράγμα. Αν ο όγκος της άμμου από τον κυκλώνα υπολείπεται του όγκου που απαιτείται για την κατασκευή του φράγματος, το κόστος της κατασκευής θα αυξανόταν αφού χρειάζονται υλικά για την κατασκευή του απαιτούμενου όγκου στο φράγμα. Τα τέλματα που περιέχουν λιγότερο από 60% τεμαχίδια διερχόμενα από το κόσκινο No 200 γενικά θεωρούνται ότι περιέχουν αποδεκτή ποσότητα άμμου για να χρησιμοποιηθούν στον κυκλώνα διαχωρισμού. Συχνά χρησιμοποιείται διαχωρισμός με κυκλώνα σε δύο στάδια, δύο κυκλώνες σε σειρά, για την παραγωγή ενός κλάσματος άμμου που περιέχει λιγότερα λεπτομερή υλικά από ότι το κλάσμα από έναν μόνο κυκλώνα (U.S. EPA, 1994).

Δύο βασικοί μέθοδοι διαχωρισμού με κυκλώνα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του φράγματος τελμάτων: ο κεντρικός διαχωρισμός με κυκλώνα (ή σταθερό κυκλώνα) και ο διαχωρισμός με κυκλώνα πάνω στο φράγμα. Η μέθοδος διαχωρισμού με έναν κεντρικό κυκλώνα καθιερώνει μία μόνιμη ή ημι – μόνιμη δομή με έναν κυκλώνα μεγάλης χωρητικότητας σε μία στρατηγική θέση, συχνά σε ένα στήριγμα στο φράγμα σε υψηλότερο υψόμετρο από την προβλεπόμενη στέψη του φράγματος. Η απορροή του κυκλώνα δημιουργεί ένα απόθεμα άμμου για χρήση στην κατασκευή του αναχώματος, ενώ η υπερχειλίση από τον κυκλώνα εκκενώνεται στο κέντρο του φράγματος. Χωματουργικά μηχανήματα μετακινούν την άμμου από τον λόφο απόθεσης στο ανάχωμα όπου τοποθετείται και συμπυκνώνεται. Η μηχανική τοποθέτηση και η συμπύκνωση είναι αποτελεσματική σε άμμο με υψηλή σχετική πυκνότητα, συνεπώς η μέθοδος είναι κατάλληλη για χρήση σε περιοχές με σεισμική δραστηριότητα (U.S. EPA, 1994).

Ένα σύστημα διαχωρισμού με κυκλώνα πάνω στο φράγμα αποτελείται από πολλές μονάδες κυκλώνα τοποθετημένους σε πύργους, δοκούς, φορτηγά, ικριώματα ή αιωρούμενους από γερανούς εγκατεστημένους κατά μήκος της στέψης του φράγματος. Ο αριθμός των κυκλώνων καθορίζεται από το μέγεθος που έχουν και την διακίνηση του εργοστασίου εμπλουτισμού. Η άμμος από την απορροή των κυκλώνων αποτίθεται στο μέτωπο του αναχώματος, ενώ το υλικό της υπερχειλίσης απορρίπτεται στο φράγμα. Η υψηλή πυκνότητα του πολφού της απορροής (τυπικά 70 έως 75% στερεά) έχει σαν αποτέλεσμα την απόθεση των υλικών σε απότομους σωρούς άμμου με κλίση από 3:1 έως 4:1 (οριζόντια προς κάθετα) στο πρανές του αναχώματος που είναι υπό κατασκευή. Οι κυκλώνες μεταφέρονται καθώς οι κώνοι της άμμου αυξάνουν το ύψος του αναχώματος. Κανονικά το μέγεθος

της άμμου που τοποθετείται από τους κυκλώνες δεν ποικίλει ανάλογα με την απόσταση από το σημείο απόρριψης.

Το σύστημα των κυκλώνων πάνω στην στέψη του φράγματος είναι οικονομικά αποδεκτό δεδομένου ότι η άμμος τοποθετείται στην τελική θέση απόθεσης υδραυλικά και η μηχανική δράση δεν είναι απαραίτητη. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η μη μηχανική τοποθέτηση έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερη σχετική πυκνότητα (U.S. EPA, 1994).

2.5.4 Ανάλυση ευστάθειας

Ο πρωταρχικός στόχος της «μηχανικής» του αναχώματος είναι να αναπτύξει μια αξιόπιστη δομή συγκράτησης των τελμάτων με το χαμηλότερο δυνατόν κόστος. Επιλογές όσον αφορά τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, τις γωνίες κλίσης του αναχώματος, τον έλεγχο της αποστράγγισης, την αύξηση των ποσοστών των στερεών κλπ. επηρεάζουν το κόστος καθώς και την ευστάθεια της κατασκευής. Συνεπώς η ανάλυση της ευστάθειας εκτελείται για να βελτιστοποιήσει την κατασκευή σε σχέση με το κόστος και άλλους στόχους της κατασκευής, διατηρώντας ταυτόχρονα την αξιοπιστία (U.S. EPA, 1994).

Η ανάλυση της ευστάθειας των πρανών αρχίζει με μία εκτίμηση της αξιοπιστίας του δοκιμαστικού αναχώματος. Τυπικά, ο μελετητής του αναχώματος προτείνει την εσωτερική και εξωτερική γεωμετρία του δοκιμαστικού αναχώματος και έπειτα υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας του σχεδιασμού. Χρησιμοποιώντας λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες του υλικού πλήρωσης και εκτιμήσεις του όγκου των τελμάτων και του νερού που περιέχονται στο φράγμα, μπορεί να προβλεφτεί το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Ο μελετητής έπειτα εξετάζει ένα ευρύ φάσμα των μορφών αστοχίας για τον υπολογισμό των κατ' εκτίμηση τάσεων που εκφράζονται σε υποθετικές επιφάνειες αστοχίας. Ο συντελεστής αστοχίας για κάθε μία από τις μορφές αστοχίας υπολογίζεται διαιρώντας την εκτιμώμενη αντίσταση του αναχώματος σε τάση που ασκείται κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας προς το φορτίο τάσης που ασκείται στην επιφάνεια αυτή. Με αυτήν την διαδικασία ο μελετητής μπορεί να δει αλλαγές στις παραμέτρους σχεδιασμού και την επιρροή αυτών των αλλαγών στον συντελεστή ασφαλείας ώστε να καταλήξει στο ελάχιστο κόστος που συμβαδίζει με τους στόχους ασφαλείας (U.S. EPA, 1994).

2.5.5 Μορφές αστοχίας

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας για ένα ανάχωμα τελμάτων απαιτεί μία ανάλυση των δυνητικών επιφανειών αστοχίας του αναχώματος. Υπάρχουν μία σειρά από κοινούς τρόπους αστοχίας στους οποίους ενδέχεται τα αναχώματα να είναι ευάλωτα. Αυτοί οι τρόποι αστοχίας περιλαμβάνουν την αστοχία επιφάνειας πρανούς σε περιστροφική ολίσθηση, την υπερχειλίση, την αστοχία της θεμελίωσης, την διάβρωση, την δημιουργία σωληνώσεων και την ρευστοποίηση. Κάθε τρόπος αστοχίας μπορεί να οδηγήσει σε μερική ή πλήρη αστοχία του αναχώματος.

2.5.5.1 Αστοχία πρανούς με περιστροφική ολίσθηση

Περιστροφική ολίσθηση ονομάζεται επειδή η επιφάνεια αστοχίας εμφανίζεται ως ένα τμήμα ενός περιστροφικού κυλίνδρου και μπορεί να οδηγήσει σε μία αστοχία πρανούς που μπορεί να κυμαίνεται από τοπική διάρρηξη των τελμάτων σε τυχαίες θέσεις κατά μήκος του μετώπου ενός αναχώματος έως μαζικές ολισθήσεις με την μορφή κυκλικού τόξου που εκτείνονται σε όλη την κατασκευή. Γενικά, για μία σταθερή κλίση, η διατμητική αντοχή αντιστέκεται στην κίνηση κατά μήκος μιας πιθανής επιφάνειας αστοχίας, υπερβαίνοντας την διατμητική τάση τείνει να προκαλέσει κίνηση. Η αστάθεια εμφανίζεται όταν η διατμητική τάση στην επιφάνεια αστοχίας είναι ίση ή μεγαλύτερη από την διατμητική αντοχή. Συγκεκριμένα, τα αίτια της περιστροφικής αστοχίας μπορεί να περιλαμβάνουν αλλαγές στον υδροφόρο ορίζοντα, αλλαγές στην διαπερατότητα των υλικών της θεμελίωσης, διαταραχές στο ανάχωμα που προκαλούνται από κραδασμούς ή από την φόρτιση, η διευθέτηση των υλικών της θεμελίωσης κλπ (U.S. EPA, 1994).

2.5.5.2 Αστοχία της θεμελίωσης

Η αστοχία της θεμελίωσης δεν είναι ασυνήθιστη μεταξύ των χωμάτινων κατασκευών. Όταν ένα ασθενές στρώμα εδάφους ή πετρώματος υπάρχει σε μικρό βάθος στην θεμελίωση κάτω από την δομή, θα συμβεί κίνηση κατά μήκος ενός επιπέδου αστοχίας εάν η φόρτιση ενός χωμάτινου φράγματος παράγει τάσεις που υπερβαίνουν την αντοχή σε διάτμηση του εδάφους στο ασθενές στρώμα (Lottermoser, 2003, U.S. EPA, 1994).

2.5.5.3 Υπερχείλιση

Μία από τις πιο κοινές αιτίες αστοχίας είναι η υπερχείλιση από νερά των πλημμύρων. Η υπερχείλιση συνήθως είναι αποτέλεσμα της ακατάλληλης εκτροπής των επιφανειακών υδάτων ή από υπερβολική ροή όμβριων υδάτων, όπου ο όγκος των ροών εισόδου σε έναν ταμειυτήρα υπερβαίνουν την χωρητικότητα του. Επειδή τα αναχώματα των τελμάτων κατασκευάζονται από εξαιρετικά διαβρωσιγενή υλικά, η τριβή που προκαλείται από την ταχεία ροή πάνω από την απροστάτευτη στέψη ενός αναχώματος μπορεί να διαβρώσει το υλικό πλήρωσης δημιουργώντας ένα λούκι και επιτρέπει να απελευθερωθεί μία ποσότητα νερού. Επιπροσθέτως, η ταχεία αύξηση της πίεσης των πόρων συνδεδεμένη με μεγάλη εισροή όμβριων υδάτων μπορεί να οδηγήσει στην ρευστοποίηση των μη ενοποιημένων άμμων ή των λεπτομερών υλικών του φράγματος. Η συνεχής υψηλή ροή πάνω από την στέψη του αναχώματος μπορεί να οδηγήσει σε μία σημαντική αστοχία ολόκληρου του φράγματος σε μικρό χρονικό διάστημα (U.S. EPA, 1994).

2.5.5.4 Διάβρωση

Σε περιοχές με έντονη βροχόπτωση, απαιτείται κάποια μορφή προστασίας από την διάβρωση. Τα αναχώματα τελμάτων μπορεί να είναι επιρρεπή σε αστοχία λόγω διάβρωσης σε δύο σημαντικές περιοχές: στα πλευρικά σημεία του αναχώματος και στο μέτωπο του αναχώματος. Η διάβρωση κατά μήκος της γραμμής επαφής μεταξύ του αναχώματος και της στήριξης μπορεί να είναι αποτέλεσμα της ροής του νερού της βροχής που συγκεντρώνεται εκεί. Αυτό το είδος της αστοχίας μπορεί να προληφθεί με την κατάλληλη μέθοδο διοχέτευσης

του νερού της βροχής, οπότε αυτή η αστοχία είναι αποτέλεσμα ενός ελαττωματικού σχεδιασμού ή συντήρησης (U.S. EPA, 1994).

2.5.5.5 Δημιουργία σωληνώσεων

Σωληνώσεις αναφέρονται σε υποεπιφάνεια διάβρωσης κατά μήκος μιας γραμμής διαρροής εντός ή κάτω από το ανάχωμα το οποίο οδηγεί στον σχηματισμό ενός αγωγού χαμηλής πίεσης επιτρέποντας έτσι την ροή. Η σωλήνωση μπορεί να δημιουργήσει διαρροή εξερχόμενη από το μέτωπο του αναχώματος με επαρκή ταχύτητα για να διαβρώσει το μέτωπο του αναχώματος. Ο προκύπτων κενός χώρος προάγει την προοδευτική διάβρωση, εκτεινόμενη ανάντη προς την πηγή της διαρροής. Στην χειρότερη περίπτωση, η διαρροή μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία ενός άμεσου καναλιού από την λίμνη τελμάτων στο μέτωπο του φράγματος. Η υπερβολική εμφάνιση του φαινομένου της σωλήνωσης μπορεί να οδηγήσει σε τοπική ή γενική αστοχία του αναχώματος ή της θεμελίωσης του αναχώματος (U.S. EPA, 1994).

2.5.5.6 Ρευστοποίηση

Η ρευστοποίηση είναι μία από τις πιο κοινές αστοχίες του φράγματος σε κοιλάδα. Επειδή τα φράγματα τελμάτων τυπικά περιλαμβάνουν μη σταθεροποιημένες, κορεσμένες απορρίψεις υλικών με παρόμοιο μέγεθος κόκκου, είναι ευαίσθητα στην προσωρινή ανάκληση νερού (Vick, 1990). Ρευστοποιημένα τέλματα μπορεί να συμπεριφερθούν σαν ένα παχύρευστο υγρό, έτσι ώστε να μπορεί να περάσει μέσα από στενά περάσματα και να ρέει σε μεγάλες αποστάσεις. Ως εκ τούτου, ακόμα και μικρές αστοχίες φράγματος μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική απελευθέρωση υλικών εάν αυτά αιωρούνται σε πολφό (U.S. EPA, 1994).

Παράγοντες που επηρεάζουν την δυνατότητα ρευστοποίησης περιλαμβάνουν (Vick 1990):

- Τύπο εδάφους – ενιαία σε μέγεθος κόκκου υλικά, ως επί το πλείστον σε λεπτομερή άμμο (η τυπική διαβάθμιση του υλικού των τελμάτων) είναι τα πιο επιρρεπή σε ρευστοποίηση
- Σχετική πυκνότητα ή πυκνότητα – για δεδομένο υλικό, όσο περισσότερο συμπυκνωμένο ή πυκνό είναι τόσο πιο ανθεκτικό θα είναι στην ρευστοποίηση
- Η αρχική πίεση περιορισμού κατά τον χρόνο υποβολής σε δυναμική τάση – αυτό προσφέρει την δυνατότητα σε ορισμένες περιοχές να αποτραπεί η ρευστοποίηση με την εφαρμογή υπερφόρτωσης σε χαλαρές αποθέσεις
- Η ένταση και η διάρκεια της ανακίνησης του εδάφους – ρευστοποίηση μπορεί να συμβεί λόγω ενός έντονου σεισμού ή λόγω παρατεταμένης κίνησης της γης
- Θέση του υδροφόρου ορίζοντα – ένα υψηλός υδροφόρος ορίζοντας είναι επιζήμιος. Ως εκ τούτου, μια απόθεση τελμάτων κατασκευασμένη σε μια διαπερατή θεμελίωση ή ένα φράγμα με γραμμή υδροφόρου να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα με την παροχή κατάλληλων εσωτερικών χαρακτηριστικών αποστράγγισης μπορεί να έχει μία μειωμένη πιθανότητα ρευστοποίησης.

Με την ενσωμάτωση εγκαταστάσεων αποστράγγισης, την διατήρηση χαμηλής επιφάνειας στην λίμνη, την συμπύκνωση των υλικών πλήρωσης κατά την κατασκευή, μπορούν να ελεγχθούν η πυκνότητα, ο κορεσμός και οι πιέσεις των πόρων ώστε να μειωθεί η πιθανότητα της ρευστοποίησης (U.S. EPA, 1994).

Εάν το ανάχωμα των τελμάτων είναι κατασκευασμένο από λεπτή άμμο, η συμπύκνωση αυτής της άμμου θα αυξήσει την πυκνότητα της και θα μειώσει την ευαισθησία της στην υγροποίηση. Συνεπώς, αφού τα υλικά του αναχώματος διαθέτουν επαρκή σχετική πυκνότητα ή η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα διατηρείται σε μία θέση αρκετά κάτω από την επιφάνεια του αναχώματος, το ανάχωμα μπορεί να έχει ένα επαρκή συντελεστή ασφαλείας έναντι της αστοχίας σε ρευστοποίηση. Οι υπολογισμοί σχεδιασμού είναι αναγκαίοι για τον έλεγχο αυτό για κάθε φράγμα ξεχωριστά.

Εάν συμβεί αστοχία του φράγματος τελμάτων, τα τέλματα μπορεί να εισέλθουν στα υπόγεια ορυχεία ή πιο συχνά τα απορρίμματα ακολουθούν την διαδρομή των ρεμάτων της περιοχής έχοντας καταστροφικές συνέπειες για την περιοχή. Τα επιφανειακά νερά μπορεί να ρυπανθούν σε μεγάλη απόσταση γύρω από το φράγμα και μεγάλες περιοχές μπορεί να καλυφθούν από ένα στρώμα παχιάς λάσπης. Οι αστοχίες των φραγμάτων αποθήκευσης τελμάτων σε αρκετές χώρες έχουν προκαλέσει την απώλεια ανθρώπινων ζώων, και σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά κόστη.

Η αποφυγή της αστοχίας των φραγμάτων προϋποθέτει (α) αποτελεσματικό γεωτεχνικό χαρακτηρισμό του χώρου των τελμάτων, (β) λεπτομερή κατανόηση των κινδύνων λόγω των τοπικών φυσικών καταστροφών, όπως σεισμοί, κατολισθήσεις και καταστροφικά μετεωρολογικά γεγονότα. Είναι σημαντικό να σχεδιαστεί ένα φράγμα τελμάτων σε τέτοιο βαθμό ώστε να μπορεί να αντιμετωπίσει ακραία γεωλογικά και κλιματολογικά γεγονότα (Lottermoser, 2003).

3. Αριθμητική προσομοίωση του φράγματος τελμάτων.

3.1 Γενικά

Στην περίπτωση προσομοίωσης ενός φράγματος τελμάτων, επιβάλλεται η ορθή επιστημονική κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης το οποίο θα αποδίδει αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς και αντικειμενικά αποδεκτές λύσεις σε υποθετικά σενάρια μεταβολής των βασικών παραμέτρων προσομοίωσης. Με τον όρο μαθηματικό μοντέλο, εννοείται η όσο το δυνατόν πειστικότερη αποτύπωση του συνόλου των λειτουργιών ενός φυσικού συστήματος. Μέσω αυτής της αποτύπωσης, καθίσταται δυνατή η απεικόνιση των βασικών λειτουργιών του φυσικού συστήματος, σε απλοποιημένη μορφή. Επίσης παρέχεται και η δυνατότητα μεταβολής των χαρακτηριστικών παραμέτρων του συστήματος με σκοπό την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων σχετικά με την ευαισθησία του πραγματικού συστήματος στις μεταβαλλόμενες παραμέτρους.

Συγκεκριμένα για τα υπόγεια συστήματα, η ροή ύδατος στο εσωτερικό των υδροφορέων, περιγράφεται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες βασίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας και διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του υδροφορέα (εδαφικό υλικό, υδραυλική αγωγιμότητα) καθώς και κατ' επέκταση τις συνθήκες ροής. Για τα πορώδη μέσα, η θεωρία της υπόγειας ροής ύδατος στηρίζεται στο νόμο του Darcy. Στα μαθηματικά μοντέλα, κατά βάση προσδιορίζεται μία σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής ενδιαφέροντος (Γιαννόπουλος, 2012). Πιο συγκεκριμένα η εξαρτημένη μεταβλητή, αποτελεί συνάρτηση των βασικών παραμέτρων του συστήματος καθώς και των συναρτήσεων ελέγχου. Για παράδειγμα όσον αφορά τα φράγματα τελμάτων, το υδραυλικό φορτίο αποτελεί εξαρτημένη μεταβλητή ενώ ανεξάρτητες θεωρούνται μεταβλητές όπως οι χωρικές διαστάσεις, οι κλιματικές συνθήκες, η άντληση κλπ.

Για προβλήματα ροής αλλά και μεταφοράς συστατικών με ρυπαντικές και διαλυτικές ιδιότητες στον εδαφικό σχηματισμό, τα μαθηματικά μοντέλα, αποτελούν την πλέον κατάλληλη μέθοδο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν φυσικά συστήματα. Αυτά τα μοντέλα κατά την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, εφαρμόζουν την αναλυτική ή την αριθμητική μέθοδο ενώ χρησιμοποιούνται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές, γεγονός το οποίο παρέχει δυνατότητα εξέλιξης και βελτίωσης τους παράλληλα με αυτήν των υπολογιστών. Το ολοκλήρωμα με καθορισμένα όρια, αποτελεί για παράδειγμα την απλούστερη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος αντιστροφής της παραγωγίσιμης μίας συνάρτησης. Η επίλυση αυτή, βασίζεται στο συνδυασμό αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων (Γιαννόπουλος, 2012).

Το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τη σύνταξη ενός μαθηματικού μοντέλου είναι η κατά προσέγγιση μεταφορά των δεδομένων από την κλίμακα του φυσικού συστήματος στην κλίμακα του μοντέλου. Ως αποτέλεσμα της προσέγγισης αυτής, τα εισαγόμενα στοιχεία, προέρχονται από εκτιμήσεις που συχνά απέχουν αρκετά από την πραγματικότητα. Προφανώς το ίδιο πρόβλημα εμφανίζεται και στην περίπτωση προέκτασης των συμπερασμάτων εργασιών εργαστηριακής κλίμακας, προς την κλίμακα του φυσικού συστήματος.

Λόγω της αβεβαιότητας για κάποιες παραμέτρους και μηχανισμούς του συστήματος όπως έχει προαναφερθεί, αναγκαστικά τίθεται υπό αμφισβήτηση ο βαθμός αξιοπιστίας ενός ικανοποιητικά ρυθμισμένου προσομοιώματος. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, ένα μαθηματικό προσομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους παρακάτω λόγους:

- Να χρησιμεύσει ως ένα εργαλείο για μία διερεύνηση των μηχανισμών του δικτύου ροής.
- Να χρησιμοποιηθεί ως μία πρώτη προσέγγιση για την ποιοτική εκτίμηση της πιθανότητας ρύπανσης και επιβάρυνσης του υδροφορέα.
- Να διερευνηθεί το πλήθος των επιλύσεων που συμφωνούν με το προτεινόμενο εννοιολογικό μοντέλο.
- Να αποτελέσει υπόβαθρο για τον προσδιορισμό των αναγκών σε επιπλέον δεδομένα και μια βάση για επικαιροποίηση όταν νέα δεδομένα γίνουν διαθέσιμα.

Τα μοντέλα που κατασκευάζονται με σκοπό τη μελέτη της υπόγειας ροής σε εδαφικούς σχηματισμούς και ταυτόχρονα διακρίνονται από τη δυνατότητα απόδοσης υποθετικών μελλοντικών συνθηκών, κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, τα μαθηματικά μοντέλα, τα φυσικά και τα αναλογικά μοντέλα (Γιαννόπουλος, 2012). Αναλυτικότερα:

▪ Μαθηματικά μοντέλα:

Τα μαθηματικά μοντέλα στοχεύουν στην προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου ύδατος με χρήση και κατ' επέκταση επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Ευρεία χρήση τους παρατηρείται στον τομέα της υδρογεωλογίας. Βασικές διαφορικές εξισώσεις που επιλύουν είναι η εξίσωση (νόμος) Darcy, η εξίσωση της συνέχειας, η εξίσωση ροής του νερού καθώς και η εξίσωση Laplace. Τέλος τα μαθηματικά μοντέλα θεωρούνται κατάλληλα για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν υδροφορείς με φυσική γεωμετρία και με μεταβαλλόμενες παραμέτρους όπως για παράδειγμα το υδραυλικό φορτίο αλλά και το ρυθμό άντλησης από υδροληψίες.

▪ Φυσικά μοντέλα:

Τα φυσικά μοντέλα, λαμβάνουν χώρα σε εργαστηριακό περιβάλλον και αποτελούν κατά βάση μία αξιόπιστη αναπαράσταση των φυσικών λειτουργιών και φαινομένων ενός φυσικού συστήματος. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η προσομοίωση του υπό μελέτη φυσικού συστήματος σε κλίμακα μικρότερη αυτής του φυσικού περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα όμως θα πρέπει να αναφερθεί ότι το βασικό μειονέκτημα των μοντέλων αυτών αποτελεί η γενίκευση των διαδικασιών και αποτελεσμάτων του μοντέλου, για το κατά πολύ μεγαλύτερης κλίμακας προσομοιωμένο σύστημα.

▪ Αναλογικά μοντέλα:

Τα μοντέλα αυτά αποτελούν εργαστηριακές προσομοιώσεις φυσικών συστημάτων, για τα οποία η αναλυτική επεξεργασία τους δεν είναι εύκολη. Η προσομοίωση τους όμως βασίζεται σε μερικές διαφορικές εξισώσεις αλλά και σε οριακές συνθήκες οι οποίες χαρακτηρίζουν το φυσικό σύστημα. Γνωστότερα μοντέλα αυτού του είδους αποτελούν τα ηλεκτρικά ομοιώματα ενώ αναγκαίο να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια τα αναλογικά μοντέλα έχουν ουσιαστικά αντικατασταθεί από τα κατά πολύ αποτελεσματικότερα μαθηματικά μοντέλα.

Όσον αφορά τη μεταβλητή κατάσταση του εξεταζόμενου συστήματος, η προσομοίωση αφορά την στάθμη του ύδατος μέσα στο φράγμα τελμάτων. Το παραπάνω μοντέλο νερού περιλαμβάνει μία χαρακτηριστική εξίσωση κατάλληλη για υπολογισμό του υδραυλικού φορτίου (Γιαννόπουλος, 2012).

3.2 Αντικειμενικός στόχος της προσομοίωσης

Η ανάλυση ενός φυσικού συστήματος, αποσκοπεί κυρίως στη συστηματική οργάνωση και διεξοδική ανάλυση των σχετικών στοιχείων με το υπό μελέτη σύστημα και κατά συνέπεια στην καταλληλότερη εκμετάλλευση του πλήθους των πληροφοριών. Απώτερος στόχος, της ανάλυσης αυτής είναι η ορθολογική προσέγγιση των βασικών λειτουργιών του συστήματος καθώς και η αντικειμενικότερη διευθέτηση των παραμέτρων με κύριο γνώμονα την όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη διατύπωση του εξεταζόμενου συστήματος.

Δύο είναι οι βασικές μέθοδοι ανάλυσης συστημάτων, η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση. Η προσομοίωση ως μέθοδος ανάλυσης ενός συστήματος, αποτελεί ποσοτική μέθοδο που αναπαριστά τη συμπεριφορά του συστήματος. Η βελτιστοποίηση αποτελεί επίσης ποσοτική μέθοδο, η οποία όμως αξιολογεί τις εναλλακτικές λύσεις ενός προβλήματος με αυτόματο τρόπο. Ουσιαστικά αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης λύσης χωρίς δοκιμές με απαίτηση όμως υπολογιστικού χρόνου. Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης εκ των οποίων οι πιο διαδεδομένοι είναι ο γραμμικός προγραμματισμός και ο δυναμικός προγραμματισμός.

Η μελέτη ενός συστήματος, με στόχο την προσομοίωση του υδραυλικού φορτίου, βασίζεται στον καθορισμό του συστήματος με την επιλογή των γεωγραφικών ορίων και τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Απαιτεί επιπλέον τη συλλογή των σχετικών γεωλογικών και υδρολογικών πληροφοριών καθώς και τον καθορισμό των φυσικών περιορισμών αλλά και τον καθορισμό του μεγέθους των βασικών φυσικών μεταβλητών (π.χ. υδραυλική διαπερατότητα). Εν κατακλείδι, η επιστημονικά ολοκληρωμένη μελέτη απαιτεί, το σχεδιασμό πιθανών μελλοντικών σεναρίων και την αξιολόγηση της αξιοπιστίας της διαδικασίας προσομοίωσης.

Σχετικά με το παρόν μοντέλο, η κατασκευή, ουσιαστικά αποσκοπεί στην όσο το δυνατόν αντικειμενικότερη αποτύπωση του συστήματος του φράγματος τελμάτων και τη δημιουργία ενός υδρολογικού ισοζυγίου συνολικών εισροών και εκροών στο φράγμα, το οποίο εφόσον μεταβληθεί κατάλληλα, δύναται να αποδώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για πιθανές μελλοντικές συνθήκες της στάθμης του ύδατος στην λίμνη του φράγματος.

Κατά την κατασκευή του προσομοιώματος, απαραίτητη διαδικασία αποτέλεσε η κατάλληλη ρύθμιση των υδραυλικών παραμέτρων καθώς επίσης και η τελική βαθμονόμηση των δεδομένων με σκοπό τη ρεαλιστική απεικόνιση των μεταβολών στην στάθμη του υδροφόρου στο φράγμα.

3.3 Εννοιολογικό μοντέλο

Η μετατροπή των υδρολογικών, υδρογεωλογικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη συστήματος σε μαθηματική μορφή αποδεκτή από το επιλεγθέν λογισμικό πακέτο, αποτελεί το βασικό στόχο υλοποίησης του εννοιολογικού μοντέλου.

Φυσική συνέπεια της προσομοίωσης βάση του διαμορφωμένου εννοιολογικού μοντέλου, είναι η σχετικότητα της βαρύτητας και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, εφόσον οι παράμετροι θεωρούνται αντιπροσωπευτικές των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη συστήματος.

Τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής περιλαμβάνουν παραμέτρους όπως η βροχόπτωση, η κατείσδυση υδάτων επιφανειακής απορροής, η είσοδος υδάτων λόγω των τελμάτων και η άντληση. Τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής τα οποία εισάγονται στο μοντέλο είναι ο βαθμός κορεσμού των στρωμάτων καθώς και το είδος και η έκταση των διαφόρων σχηματισμών που αποτελούν το σύστημα μελέτης. Στα βασικά γεωλογικά χαρακτηριστικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου, παρατηρείται η κατανομή και διαμόρφωση των σχηματισμών μέσα στο υπό μελέτη σύστημα.

Στο εννοιολογικό μοντέλο αναπτύσσονται όλα τα βασικά χαρακτηριστικά και οι μηχανισμοί λειτουργίας του φράγματος τελμάτων. Κατά συνέπεια βάση των διαθέσιμων στοιχείων εισάγονται οι υπολογιστικές τιμές των υδραυλικών παραμέτρων, όπως για παράδειγμα η τιμή της μεταβιβαστικότητας, της υδραυλικής αγωγιμότητας και του βαθμού κορεσμού.

3.4 Επιλογή κατάλληλου υπολογιστικού λογισμικού

Το υπολογιστικό πακέτο Modflow αποτελεί το πλησιέστερο και πιο εύχρηστο κώδικα μοντελοποίησης για τα μοντέλα προσομοίωσης ροής υδάτων σε πορώδη μέσα. Το Modflow είναι ένα τρισεδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών προσομοίωσης της ροής των υπογείων υδάτων που αναπτύχθηκε από το Αμερικάνικο γεωλογικό ινστιτούτο (USGS). Οι εφαρμογές του Modflow έχουν αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια με την πρόσθεση νέων κωδικών, όπως τα προγράμματα εκτίμησης παραμέτρων και τα μοντέλα μεταφοράς διαλυμένων συστατικών Modpath και MT3DMS.

Ακόμα έχουν αναπτυχθεί διάφορα γραφικά περιβάλλοντα που διευκολύνουν την χρήση του προγράμματος. Ένα από αυτά είναι το Processing Modflow for Windows (PMWIN), το οποίο είναι δωρεάν λογισμικό για την επεξεργασία και οπτικοποίηση του Modflow (Wikipedia.org).

Το μαθηματικό προσομοίωμα του φράγματος τελμάτων, αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το εμπορικό πακέτο PMWIN, με εφαρμογή μαθηματικού κώδικα πεπερασμένων διαφορών (Modflow). Το προσομοίωμα αναπαριστά την μεταβολή του ύψους της επιφάνειας του νερού μέσα στο φράγμα μεταβάλλοντας τις παραμέτρους σχεδιασμού.

3.5 Λογισμικό πακέτο Modflow.

Το Modflow αποτελεί ένα πρόγραμμα που περιλαμβάνει διάφορες «υπορουτίνες», δηλαδή ανεξάρτητα υπολογιστικά πακέτα που δύνανται να εκτελέσουν τις απαραίτητες λειτουργίες προσομοίωσης, οι οποίες στηρίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Το Modflow ουσιαστικά αποτελεί ένα πρόγραμμα προσομοίωσης υδροφόρων συστημάτων. Ως υπολογιστικό πακέτο, δεν είναι κατάλληλο για την διαχείριση υδατικών πόρων. Επιπλέον για την εφαρμογή του, είναι απαραίτητη η πλήρης γνώση των υδρολογικών, υδρογεωλογικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών των υπό μελέτη υδροφόρων συστημάτων.

Πιο αναλυτικά το Modflow στην πραγματικότητα αποτελεί το πιο διαδεδομένο μοντέλο προσομοίωσης της ροής σε ένα πορώδες μέσο. Το πρόγραμμα βασίζεται στην αριθμητική επίλυση μίας διαφορικής εξίσωσης, που προκύπτει από την εφαρμογή του νόμου του Darcy και παράλληλα από τη χρήση της εξίσωσης διατήρησης της μάζας. Η ονομασία του εν λόγω υπολογιστικού πακέτου, στηρίζεται στην ολοκληρωμένη έκφραση του: Modular three dimensional finite difference ground water flow model.

Όπως αναφέρθηκε, το μοντέλο στηρίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών και η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, λαμβάνει χώρα στο κέντρο των κυψελίδων (κελιών) του σχηματισμένου κανάβου. Η παραπάνω διαδικασία προσομοιώνει την κίνηση του υπόγειου νερού σε πορώδες μέσο. Η προσομοίωση πραγματοποιείται στην κορεσμένη ζώνη του πορώδους μέσου (Chiang, 2005).

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι από τις παλαιότερες και πλέον συνηθισμένες υπολογιστικές τεχνικές επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Το συνεχές πεδίο ορισμού R , όπου ορίζεται η μερική διαφορική εξίσωση αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων R_D , όπου R_D υποσύνολο του R και παράλληλα το όριο Ω του πεδίου ορισμού αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων Ω_D που μπορεί να ανήκουν ή και να μην ανήκουν στο $R + \Omega$. Για κάθε σημείο P του R_D διατυπώνεται μία αλγεβρική εξίσωση που περιλαμβάνει την τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής στο σημείο P και σε γειτονικά σημεία του P εντός των R_D και Ω_D . Η αλγεβρική εξίσωση ονομάζεται εξίσωση πεπερασμένων διαφορών και αποτελεί προσέγγιση της μερικής διαφορικής εξίσωσης στο σημείο P . Η μεθοδολογία διατύπωσης και η μορφή της αλγεβρικής εξίσωσης εξαρτώνται άμεσα από την εφαρμοζόμενη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Εάν υπάρχουν N σημεία στο R_D προκύπτει ένα σύστημα N αλγεβρικών εξισώσεων με N άγνωστους. Εάν το σύστημα έχει μοναδική λύση, που

συνήθως έχει, οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής που προκύπτουν θεωρούνται προσεγγιστικές σε σχέση με αυτές της αναλυτικής λύσης. Η καλή ή κακή προσέγγιση ανάμεσα στην υπολογιστική (αριθμητική) και πραγματική (αναλυτική αν υπάρχει) λύση εξαρτάται από την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών που εφαρμόζεται και αξιολογείται μελετώντας την σύγκλιση, την ευστάθεια και την συνοχή του αριθμητικού σχήματος. Η διαδικασία αντικατάστασης της αναλυτικής διαφορικής εξίσωσης και του συνεχούς πεδίου ορισμού της με ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών που ορίζονται στους κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος ονομάζεται διακριτοποίηση. (Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, http://www.mie.uth.gr/n_ekp_yliko.asp?id=39)

Η βασική εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς που χρησιμοποιεί το Modflow θεωρώντας ότι η πυκνότητα του υγρού παραμένει σταθερή είναι:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \Delta V$$

Όπου:

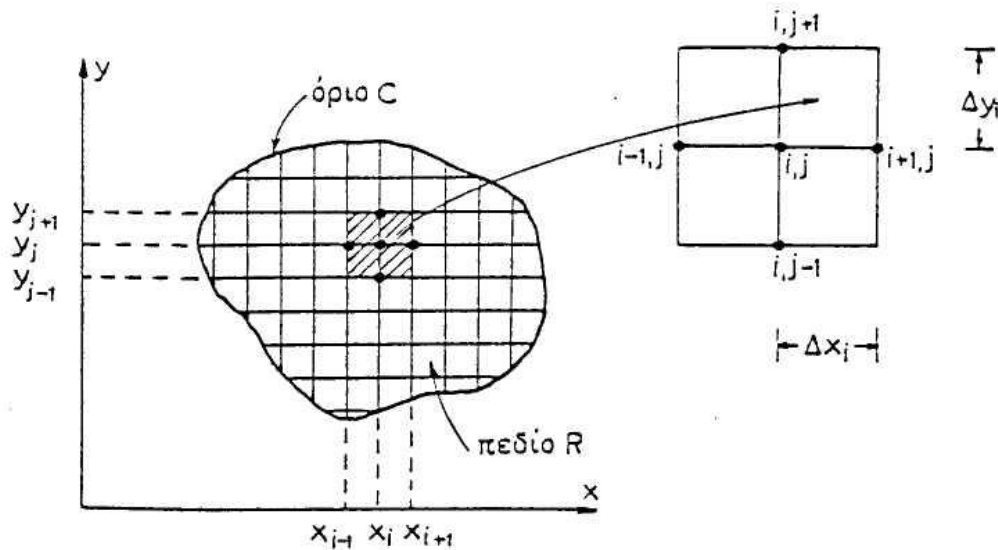
S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού (m^{-1}).

Q_i : ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κυψελίδα (m^3/s).

ΔV : ο όγκος της κυψελίδας (m^3).

$\Delta\Phi$: η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα Δt (m).

Επιπλέον στην απλοποιημένη περίπτωση ενός μονοδιάστατου προβλήματος και εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση του, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το ανάπτυγμα της σειράς Taylor για την εξαρτημένη μεταβλητή. Συγκεκριμένα εάν θεωρηθεί η συνάρτηση $f = f(x)$, με ανεξάρτητη μεταβλητή το x και εξαρτημένη το f , ο κλάδος των πεπερασμένων διαφορών διαμορφώνεται ως έχει παρακάτω:



Εικόνα 7: Τυπική μορφή κανάβου πεπερασμένων διαφορών (Λατινόπουλος & Θεοδοσίου, 2007)

Το ανάπτυγμα της f σε σειρά Taylor για τον κανάβο πεπερασμένων διαφορών, θα είναι το παρακάτω:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{df(x)}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \cdot \frac{d^2f(x)}{dx^2} + \dots$$

Σύμφωνα με τις βασικές αρχές λειτουργίας του λογισμικού πακέτου καθώς και την εξέλιξη του την τελευταία δεκαετία, η χρήση του με σκοπό την προσομοίωση ομοιογενών υδροφόρων συστημάτων, θεωρείται ως η πλέον κατάλληλη από το σύνολο της επιστημονικής κοινότητας (Λατινόπουλος & Θεοδοσίου, 2007)

Ο κώδικας διέπεται από ένα σύνολο βασικών αρχών, οι οποίες αναφέρονται παρακάτω επιγραμματικά: η σημαντικότερη αρχή του υπολογιστικού μοντέλου, είναι η δυνατότητα προσομοίωσης του υδροφόρου συστήματος για συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady state case). Επιπλέον δεν παρατηρείται ροή, εκτός της προκαθορισμένης οριοθέτησης του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος ενώ όπως έχει ήδη προαναφερθεί, το υπολογιστικό πακέτο, στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για το κέντρο κάθε κελιού του μοντέλου. Το μοντέλο κατά την προσομοίωση είναι δυνατόν να περιλαμβάνει διάφορους συνδυασμούς υδροφόρων συστημάτων, όπως για παράδειγμα ελεύθερα ή περιορισμένα υδροφόρα συστήματα, ενώ το πορώδες μέσω το οποίο προσομοιώνεται μπορεί να είναι ομοιογενές ή ανισότροπο. Τέλος κατά το σχεδιασμό του εννοιολογικού μοντέλου, στην περίπτωση συνδυασμού διαφορετικού είδους υδροφόρων στρωμάτων, το ανώτερο στρώμα συνίσταται να σχεδιάζεται ως ελεύθερο.

Σχετικά με τα σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του μοντέλου, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο εν λόγω υπολογιστικός κώδικας, συνοδεύεται από πλήρες εγχειρίδιο χρήσης ενώ υποστηρίζεται και από το Αμερικάνικο

Γεωλογικό Ινστιτούτο. Η χρήση του πακέτου Modpath η οποία παρατηρείται κυρίως κατά την προσομοίωση της μεταφοράς ρύπων σε υδροφόρα συστήματα, προσφέρει τρισδιάστατη απεικόνιση των γραμμών ροής, στην περίπτωση μόνιμης ροής.

Σχετικά με τα μειονεκτήματα της χρήσης του μοντέλου, θα πρέπει να αναφερθεί αρχικά, πως η αξιοπιστία της προσομοίωσης με τη χρήση του Modflow, κατά βάση εξαρτάται από την ομοιογένεια του υδροφόρου συστήματος το οποίο προσομοιώνεται καθώς επίσης και από την αξιοπιστία των εισαγόμενων στοιχείων στο υπολογιστικό πακέτο. Οι υδρολογικές και υδραυλικές παράμετροι, το εισαγόμενο υδραυλικό φορτίο, και οριακές συνθήκες, διαδραματίζουν κατά συνέπεια σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων και αντικειμενικά αποδεκτών λύσεων στην περίπτωση επίλυσης προβλημάτων ρύπανσης ή προβλημάτων σταδιακής μεταβολής των υδρολογικών παραμέτρων. Ως αποτέλεσμα των προαναφερθέντων, η ενδεχόμενη αναξιοπιστία ενός εισαγόμενου στοιχείου δύναται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης και είναι αρκετή να καταστήσει αναξιόπιστη ολόκληρη τη διαδικασία.

Οι βασικές παραδοχές που ισχύουν κατά την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης βάση του Modflow, περιλαμβάνουν την περίπτωση, άπειρης έκτασης του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος αλλά και την περίπτωση των προκαθορισμένων ορίων του υδροφορέα. Ακόμη στην περίπτωση περιορισμένης διαθεσιμότητας των πρωτογενών μετρήσεων, χρησιμοποιούνται διάφορα εργαλεία τα οποία συνδυάζουν γεωλογικά και στατιστικά στοιχεία, που στηρίζονται στην εφαρμογή της μεθόδου της παρεμβολής. Σχετικά με τις ιδιότητες του ύδατος το οποίο βρίσκεται σε κίνηση στο εσωτερικό του υδροφόρου συστήματος το οποίο προσομοιώνεται, ως βασικές παραδοχές λαμβάνονται η σταθερότητα της πυκνότητας του νερού, η τρισδιάστατη κίνηση του υπόγειου ύδατος αλλά και η ομοιόμορφη και ομοιογενής κατανομή των ιδιοτήτων του κάθε κελιού σε ολόκληρο το εσωτερικό της ίδιας της κυψελίδας (Γιανόπουλος, 2012).

Το ύψος της επιφάνειας του υπόγειου νερού, κατά την χρήση του μοντέλου Modflow, υπολογίζεται στο κέντρο της κάθε κυψελίδας το οποίο ονομάζεται κόμβος. Τα χωρικά αυτά τμήματα, δηλαδή τα καθορισμένα διαστάσεων τετράγωνα ή ορθογώνια κελιά, διαμορφώνουν τη χωρική διακριτοποίηση του υδροφόρου συστήματος με το σχεδιαστικό ενός δικτύου εφαιπόμενων κυψελίδων, το οποίο παρουσιάζεται στο μοντέλο ως κάναβος. Το δίκτυο που έχει σχηματιστεί, εμφανίζεται στο μοντέλο ως ένας «πίνακας» αποτελούμενος από παράλληλες γραμμές, παράλληλες στήλες και εφαιπόμενα στρώματα. Οι κυψελίδες που δύναται να χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση, αναφέρονται ως ενεργές κυψελίδες καθώς στο εσωτερικό του, πραγματοποιείται ροή υπόγειου νερού (Γιανόπουλος, 2012). Πιο συγκεκριμένα στα όρια του καθορισμένου υδροφορέα, παρατηρούνται ενεργά κελιά με αμετάβλητο υδραυλικό φορτίο (σταθερό φορτίο), αλλά και κελιά μηδενικής ροής (no flow cells) στα οποία δε λαμβάνει χώρα καμία εισροή νερού και κατά συνέπεια καμία υπόγεια ροή.

3.5.1 Περιβάλλον χρήσης PMWin

Το PMWIN επιτρέπει την δημιουργία και την προσομοίωση μοντέλων με έως και 1000 χρονικές περιόδους, 80 στρώματα και 250000 κελιά σε κάθε στρώμα του μοντέλου. Τα εργαλεία του μοντέλου περιλαμβάνουν, το εργαλείο παρουσίασης των αποτελεσμάτων (presentation tool), το εργαλείο εξαγωγής των αποτελεσμάτων (result extractor), το εργαλείο παρεμβολής πεδίου (field interpolator), το εργαλείο δημιουργίας πεδίου (field generator), τον υπολογισμό του διαθέσιμου νερού (water budget calculator) και το εργαλείο προβολής γραφήματος (graph viewer).

➤ Εργαλείο εξαγωγής των αποτελεσμάτων

Το εργαλείο αυτό επιτρέπει στον χρήστη την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από οποιοδήποτε χρονικό διάστημα σε ένα φύλλο εργασίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης περιλαμβάνουν το ύψος στήλης νερού (hydraulic heads), ταπείνωση υδροφόρου ορίζοντα (drawdowns), την ροή από κελί σε κελί (cell-by-cell flow terms), συμπίκνωση (compaction), καθίζηση (subsidence), ταχύτητες του Darcy (Darcy velocities), συγκεντρώσεις (concentrations) και mass terms.

➤ Εργαλείο παρεμβολής πεδίου

Το εργαλείο παρεμβολής πεδίου λαμβάνει δεδομένα των μετρήσεων και τα παρεμβάλει σε κάθε κελί του μοντέλου. Το πλέγμα του μοντέλου μπορεί να αποτελείται από ακανόνιστα διαστήματα.

➤ Εργαλείο δημιουργίας πεδίου

Δημιουργεί πεδία με ανομοιογενή μεταβιβαστικότητα ή υδραυλική διαπερατότητα. Επιτρέπει στον χρήστη να προσομοιάσει στατιστικά αποτελέσματα και επιρροές από άγνωστες μικρής κλίμακας ανομοιογένειες.

➤ Υπολογισμός του διαθέσιμου νερού

Το εργαλείο αυτό δεν υπολογίζει την διαθεσιμότητα στην ζώνη που έχει καθοριστεί από τον χρήστη αλλά και την ανταλλαγή των ροών ανάμεσα στις ζώνες αυτές. Επιτρέπει στον χρήστη να προσδιορίσει την ροή του νερού μέσα από ένα συγκεκριμένο όριο.

➤ Εργαλείο προβολής γραφήματος

Με το εργαλείο αυτό δίνεται η δυνατότητα εμφάνισης καμπυλών των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο. Τέτοια αποτελέσματα μπορεί να είναι το ύψος στήλης νερού, ταπείνωση υδροφόρου ορίζοντα, καθίζηση, συμπίκνωση και συγκεντρώσεις.

➤ Εργαλείο παρουσίασης των αποτελεσμάτων

Με την χρήση του εργαλείου παρουσίασης μπορεί ο χρήστης να δημιουργήσει χάρτες περιγραμμάτων των δεδομένων εισόδου και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Μπορεί επίσης να δημιουργήσει και να εμφανίσει ακολουθίες κίνησης δύο διαστάσεων χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (ύψος στήλης νερού, ταπείνωση υδροφόρου ορίζοντα ή συγκεντρώσεις) (Chiang & Kinzelbach, 1998).

Ο κώδικας Modflow, όπως έχει προαναφερθεί περιλαμβάνει επιμέρους υπολογιστικά πακέτα τα οποία διαμορφώνονται στο εσωτερικό του μοντέλου σε μορφή λίστας, εκ των οποίων το κάθε ένα, εκτελεί μία συγκεκριμένη εργασία προσομοίωσης. Τα υπολογιστικά αυτά πακέτα αποτελούν ουσιαστικά υπορουτίνες του συνολικού υπολογιστικού προγράμματος Modflow. Η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων στο μοντέλο, όπως για παράδειγμα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα, τα υδραυλικά φορτία τα οποία διαμορφώνουν την κίνηση του υπόγειου ύδατος αλλά και επίσης οι αρχικές συνθήκες πιεζομετρίας στον υδροφορέα (αρχικά υδραυλικά φορτία – initial heads), γίνεται με την χρήση των εν λόγω υπορουτίνων. Κατά την εφαρμογή του κώδικα Modflow σε μία περιοχή, οι συχνά χρησιμοποιούμενες υπορουτίνες, παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω:

- Πλευρική τροφοδοσία με σταθερό εξωτερικό ύψος ύδατος (G.H.B.)

Η υπορουτίνα G.H.B. αποτελεί την πλευρική τροφοδοσία του υδροφορέα, εφόσον προκαθοριστεί ένα σταθερό υδραυλικό ύψος στα όρια της περιοχής των ενεργών κυψελίδων του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος. Η χρήση του πακέτου G.H.B. (Groundwater Head Boundary), απαιτεί την επίλυση της εξίσωσης Dupuit, για την περιοχή του υδροφορέα που έχει επιλεγθεί να τροφοδοτηθεί πλευρικά κατά συνέπεια, τη γνώση σημαντικών υδραυλικών παραμέτρων όπως της υδραυλικής αγωγιμότητας αλλά επίσης και τη γνώση της κατεύθυνσης της ροής. Ουσιαστικά το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση της υπόγειας υδραυλικής επικοινωνίας γειτονικών υδροφορέων. Η υδραυλική παροχή όπως είναι κατανοητό, είναι αντιστρόφως ανάλογη της υδραυλικής αγωγιμότητας της εκάστοτε περιοχής και επίσης ανάλογη με την διαφορά των υδραυλικών υψών, ανάμεσα στην εξωτερική πηγή τροφοδοσίας και την εσωτερικά παρατηρούμενη στάθμη ύδατος σε κάθε σημείο ενδιαφέροντος του υδροφορέα.

Επιπλέον η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται σύμφωνα με την εξίσωση Dupuit, από τις διαστάσεις της περιοχής που τροφοδοτείται πλευρικά. Πιο συγκεκριμένα η αγωγιμότητα είναι ανάλογη του μήκους που παρατηρείται μεταξύ του εξωτερικού σημείου γνωστής στάθμης ύδατος και του εσωτερικού σημείου γνωστού υδραυλικού ύψους, αλλά και αντιστρόφως ανάλογη του πλάτους της πλευρικής εισαγωγής νερού.

- Εισαγωγή ύδατος με εμπλουτισμό (recharge)

Ο εμπλουτισμός του υδροφορέα με χρήση αυτού του πακέτου, περιλαμβάνει κυρίως την κατείσδυση από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, την κατείσδυση επιφανειακά απορρεόντων υδάτων σε περιοχές γνωστού ποσοστού κατεισδύμενου ύδατος προερχόμενου από επιφανειακές απορροές, καθώς επίσης και την τροφοδοσία του υδροφορέα από εσωτερικές πηγές οι οποίες εμπλουτίζουν το σύστημα. Η κατείσδυση με τη χρήση αυτής της υπορουτίνας, μπορεί να σημειωθεί μόνο στο ανώτερο στρώμα του υδροφορέα. Σύμφωνα με το προαναφερθέν, ο εμπλουτισμός σημειώνεται στην επιφάνεια του εδάφους, όπως στην πραγματικότητα παρατηρείται κατά την κατείσδυση επιφανειακών υδάτων.

- Γεωτρήσεις άντλησης, εμπλουτισμού και παρατήρησης (pump – observation wells)

Η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται για την εισαγωγή δεδομένων γεωτρήσεων άντλησης (αρδευτικές, υδρευτικές) ή εμπλουτισμού σε έναν υδροφορέα. Η χρήση του πακέτου προσφέρει τη δυνατότητα καθορισμού συγκεκριμένων χρονικών περιόδων άντλησης ή εμπλουτισμού του υδροφορέα. Κατά την χρήση του, η άντληση ύδατος είναι δυνατή με την προσθήκη αρνητικού προσήμου στις εισαγόμενες τιμές παροχής των γεωτρήσεων, ενώ στον αντίποδα, οι θετικές εισαγόμενες τιμές υποδηλώνουν τον εμπλουτισμό του υδροφορέα. Τέλος είναι δυνατόν να απενεργοποιηθεί η διαδικασία άντλησης ή εμπλουτισμού οποιασδήποτε γεώτρησης για ορισμένο επιθυμητό χρονικό διάστημα, χωρίς να είναι απαραίτητη η απομάκρυνση της γεώτρησης (inactive well).

Σχετικά με τις γεωτρήσεις παρατήρησης, είναι δυνατός, ο καθορισμός της θεωρητικά απαιτούμενης στάθμης ύδατος, σε συγκεκριμένα σημεία, για τα οποία σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα, η πιεζομετρία του υδροφορέα είναι γνωστή.

- Σταθερό υδραυλικό φορτίο (constant head)

Στο πακέτο αυτό παρατηρείται αμετάβλητη ποσότητα εισερχόμενου ύδατος κατά την διάρκεια ολόκληρης της προσομοίωσης. Τα φορτία στα επιλεχθέντα ενεργά κελιά, παρουσιάζουν σταθερό υδραυλικό φορτίο από την έναρξη της προσομοίωσης έως και το πέρας της. Συγκεκριμένα κατά την χρήση του μοντέλου και της υπορουτίνας constant head, προσφέρεται η δυνατότητα εισαγωγής σταθερού υδραυλικού ύψους κατά την έναρξη μίας χρονικής περιόδου αλλά και η δυνατότητα εισαγωγής σταθερού φορτίου στο πέρας της ίδιας χρονικής περιόδου.

- Υδατορέματα (rivers, streams)

Στην περίπτωση αυτή, τα υδατορέματα επηρεάζουν υδραυλικά τον υδροφορέα ή επηρεάζονται τα ίδια από τον υδροφορέα. Σύμφωνα με την υπορουτίνα αυτή, πραγματοποιείται προσομοίωση της υπόγειας ροής που λαμβάνει χώρα μεταξύ των ρευμάτων και του υδροφορέα. Ανάλογα με την υδραυλική κλίση που παρατηρείται μεταξύ του

υδατορέματος και του υδροφόρου ορίζοντα, σημειώνεται τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα από τα υδατορέματα ή αντίστροφα, τροφοδοσία των ρεμάτων από τον υδροφόρο ορίζοντα.

- Τοίχος αποστράγγισης (drain)

Η συγκεκριμένη υπορουτίνα, χρησιμεύει στην εξαγωγή υδάτων από το σύστημα, με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι δυνατή η συγκράτηση του ύδατος στο εσωτερικό του υδροφορέα στην περίπτωση που αυτό είναι αναγκαίο (π.χ. αυξημένες αντλητικές συνθήκες και απαίτηση επαναφοράς ύδατος). Επιπρόσθετα το πακέτο αυτό προσφέρει και τη δυνατότητα απελευθέρωσης σημαντικής ποσότητας ύδατος συνήθως στα κατάντη του υδροφόρου συστήματος ούτως ώστε σε περίπτωση που κρίνεται αναγκαίο για την ορθή βαθμονόμηση του μοντέλου να είναι δυνατή η πτώση της στάθμης ύδατος στο εσωτερικό του υδροφορέα. Κατά κύριο λόγο, ο σχεδιασμός του πακέτου αυτού στηρίζεται στην απαίτηση επιστροφής του αρδευτικού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα.

- Αρχικά υδραυλικά ύψη (initial heads)

Στην περίπτωση προσομοίωσης ενός συστήματος και εφόσον επιλεγεί σταθερή κατάσταση (steady state), παρατηρείται ικανοποιητική αναπλήρωση του υδροφορέα με την προϋπόθεση ότι δεν μεταβάλλονται σημαντικά τα αρχικά υδραυλικά φορτία. Επίσης προκειμένου να παρατηρηθεί ομαλή εξέλιξη της υπόγειας ροής κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με αποφυγή μίας αρχικής αδικαιολόγητης απότομης πτώσης του μέσου υδραυλικού ύψους, κρίνεται απαραίτητη η επιλογή των αρχικών υψών του νερού στον υδροφορέα. Με τη χρήση της υπορουτίνας των αρχικών υδραυλικών υψών και την κατάλληλη επιλογή της αρχικής στάθμης, αποφεύγεται οποιαδήποτε αναίτια αρχική πτώση ή ακόμα και αδικαιολόγητη άνοδος του υδροφόρου ορίζοντα κατά την έναρξη της προσομοίωσης.

- Εξαγωγή αποτελεσμάτων (output control)

Το πακέτο αυτό, έχει την δυνατότητα σύνδεσης με βοηθητικά προγράμματα γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Κατά βάση, στο πακέτο λαμβάνει χώρα ο καθορισμός της μορφής των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Εκτός της αναφοράς των παραπάνω υπορουτίνων και των δυνατοτήτων τους, είναι εξαιρετικά σημαντικό να αναφερθεί πως ο κώδικας Modflow, παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού χρονικών περιόδων στο εσωτερικό των υπορουτίνων και ορισμένων ανάλογων επιθυμητών υδραυλικών παραμέτρων (π.χ. μεταβολή παροχής αγωγιμότητας), με σκοπό το σχεδιασμό υποθετικών σεναρίων χρονικής μεταβολής των παραμέτρων αυτών (Chiang & Kinzelbach, 1998).

Εν ολίγοις, όπως παρουσιάζεται και στην παρούσα διπλωματική, η χρήση του μοντέλου Modflow παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού και υλοποίησης υποθετικών σεναρίων. Τα υποθετικά σενάρια αποτελούν συνήθως μελλοντικές υποθέσεις οι οποίες αποσκοπούν στο να διερευνηθεί η ευαισθησία του μοντέλου στη μεταβολή βασικών ή μη παραμέτρων. Σύμφωνα με τα προεπιλεγθέντα σενάρια, μεταβάλλονται υποθετικά οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εφαρμογής του μοντέλου. Οι ενδεικτικότερες προς μεταβολή παράμετροι είναι οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων και η ποσότητα κατεισδύμενου ύδατος βροχόπτωσης. Με τη χρήση τέτοιου είδους σεναρίων επιτρέπεται να μελετηθεί οποιαδήποτε υποθετική κατάσταση και να γίνει αξιόπιστη πρόβλεψη της εξέλιξης διαφόρων ανθρωπογενών αλλά και φυσικών φαινομένων. Παραδείγματα τέτοιων υποθετικών σεναρίων αποτελούν, η αύξηση της άντλησης του νερού από το φράγμα, η αλλαγή του βαθμού κορεσμού των τελμάτων, αλλαγή της διαπερατότητας των τελμάτων και η αλλαγή της ποσότητας των κατακρημνισμάτων.

Είναι αρκετά σημαντικό να σημειωθεί, ότι κατά την κατασκευή του μοντέλου, θα πρέπει να επιλεγθούν βασικές παράμετροι, οι οποίες θα παραμείνουν αναλλοίωτες κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αλλά και κατά τη διάρκεια χρήσης των εκάστοτε υπορουτίνων για την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων. Στα αρχικά κατασκευαστικά βήματα ενός μοντέλου σε Modflow περιβάλλον, χρησιμοποιούνται δύο βασικά πακέτα, καθορισμού των αρχικών βασικών συνιστωσών, βάση των οποίων δομείται το υπό κατασκευή μοντέλο.

- Βασικό πακέτο

Κατά την κατασκευή του μοντέλου, στο βασικό πακέτο δύναται να επιλεγθούν οι μονάδες μέτρησης των παραμέτρων που συναντώνται στο μοντέλο. Ακόμη το βασικό πακέτο περιλαμβάνει εντολές διαμόρφωσης του κανάβου (αριθμός στηλών, αριθμός γραμμών) καθώς και εντολές επιλογής του αριθμού των στρωμάτων του υδροφορέα. Επίσης γίνεται καθορισμός της χρονικής περιόδου προσομοίωσης αλλά και των οριακών συνθηκών σε κάθε κόμβο των κυψελίδων που διαμορφώνουν τον κανάβο της υπό μελέτη περιοχής. Κατά την εμφάνιση των τριών πρώτων παραθύρων – του βασικού πακέτου – όταν ξεκινά η κατασκευή του μοντέλου, μπορεί επιπλέον να επιλεγεί ο τύπος της υπόγειας ροής για την επιθυμητή προσομοίωση (flow type) από την ένδειξη flow simulation, την περίπτωση ύπαρξης μεταφερόμενης προσομοίωσης (transport simulation) όταν παρατηρείται μεταφορά ρύπου μέσω της υπόγειας ροής, καθώς επίσης και την επιθυμητή φωτογραφία της υπό εξέταση περιοχής (bitmap).

- Κεντροβαρική διάταξη ροής

Κατά την χρήση του πακέτου αυτού, εισάγονται πληροφορίες που αφορούν το μέγεθος της μεταβιβασιμότητας για την περίπτωση των περιορισμένων υδροφορέων καθώς και το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περίπτωση των ελεύθερων υδροφορέων. Ακόμη εισάγονται τιμές του συντελεστή εναποθηκευτικότητας και του ενεργού πορώδους (Γιαννόπουλος, 2012).

Στη διαδικασία επίλυσης, το πρόγραμμα Modflow χρησιμοποιεί επαναληπτικές μεθόδους εκ των οποίων οι τέσσερις σημαντικότερες είναι οι ακόλουθες (Chiang & Kinzelbach, 1998):

- Άμεση επίλυση DE45 (direct solution).
- Υπό προϋποθέσεις επαναληπτική διαδικασία συζυγών κλίσεων 2 P.C.G.2 (preconditioned conjugate gradient 2).
- Ισχυρά πεπλεγμένη διαδικασία S.I.P. (strongly implicit procedure).
- Διαδοχική υπερχαλάρωση κομματιών S.S.O.R. (slice – successive over relaxation).

Το μοντέλο Modflow επιλύει αριθμητικά τη διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής (όπως αυτή έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο) με εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών. Η επίλυση πραγματοποιείται σε τρεις διαστάσεις και σε συνθήκες μόνιμης αλλά και μη μόνιμης ροής. Για την αποτελεσματική λειτουργία της παραπάνω διαδικασίας επίλυσης, το υπολογιστικό πακέτο Modflow, χρησιμοποιεί διάφορα πακέτα επίλυσης (solver packages), εκ των οποίων τα βασικότερα είναι τα παρακάτω:

- PCG2 solver package
- SIP solver package

Το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας είναι η έκδοση PMWin του υπολογιστικού πακέτου Modflow, που όπως αναφέρθηκε είναι το λογισμικό του πακέτου Modflow για τα Windows. Στο παρόν μοντέλο, ως μηχανή επίλυσης επιλέχθηκε το βασικό πακέτο επίλυσης PCG2. Πιο συγκεκριμένα, η μηχανή επίλυσης PCG2 (Preconditioned Conjugate Gradient 2), χρησιμοποιεί τη μέθοδο της συζυγούς βαθμίδας με σκοπό την επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου. Το πακέτο αυτό περιλαμβάνει δύο επιλογές όσον αφορά τη βασική προϋπόθεση επίλυσης:

- Την επιλογή της πολυωνυμικής προϋπόθεσης.
- Την επιλογή της προϋπόθεσης Cholesky.

Η σύγκλιση της επίλυσης στην περίπτωση της μηχανής επίλυσης PCG2, καθορίζεται με τη χρήση των μεταβολών των υδραυλικών φορτίων αλλά και τη χρήση των κριτηρίων υπολοίπου. Επιπλέον δύναται να πραγματοποιηθεί προσομοίωση γραμμικών καθώς και μη γραμμικών συνθηκών ροής. Συγκεκριμένα στην περίπτωση των μη γραμμικών προβλημάτων, κατά την επίλυση χρησιμοποιούνται επαναλήψεις Picard, βάση των οποίων είναι δυνατή η εξασφάλιση της ύπαρξης αλλά και της μοναδικότητας των λύσεων σε 1ης τάξης εξισώσεις, για τις οποίες οι αρχικές συνθήκες θεωρούνται δεδομένες (Γιαννόπουλος, 2012).

4. Έλεγχος ευαισθησίας μοντέλου.

Αρχικά κατασκευάστηκε ένα απλό μοντέλο στρωμάτων, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να γίνει ο έλεγχος του βαθμού ευαισθησίας του κώδικα Modflow. Με αυτόν τον τρόπο παρατηρήθηκαν οι μεταβολές που υπήρξαν στα αποτελέσματα ανάλογα με την υπορουτίνα του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε στην απεικόνιση του υδροφόρου ορίζοντα και την κατάσταση που επικρατεί κατά την προσομοίωση. Ακόμα χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικής γεωμετρίας κελιά και παρατηρήθηκε αν επηρεάζεται και σε τι βαθμό το τελικό αποτέλεσμα στον υπολογισμό του ύψους της επιφάνειας του νερού, καθώς επίσης και τις αλλαγές που σημειώνονται από μία σταθερή ποσότητα κατακρημνισμάτων και μία μεταβλητή κατά την διάρκεια του χρόνου.

4.1 Σχεδιασμός του μοντέλου

Για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό της προσομοίωσης, απαιτείται η εισαγωγή των ποσοτήτων του υδρολογικού ισοζυγίου του υδροφορέα στο μοντέλο προσομοίωσης καθώς και η μετατροπή του μεγέθους των βασικών γεωμετρικών και υδραυλικών παραμέτρων σε μορφή αναγνωρίσιμη από το υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο θα εισαχθούν. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε παραγράφους προηγούμενων κεφαλαίων, κατά την κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης, αρχικά επιλέγονται βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου όπως για παράδειγμα το μέγεθος του κανάβου προσομοίωσης, τις μονάδες των μεταβλητών που χρησιμοποιεί το μοντέλο κ.α. Οι επιλογές αυτές πραγματοποιούνται στα αρχικά παράθυρα που εμφανίζονται κατά την κατασκευή του μοντέλου και παραμένουν αμετάβλητες σε ολόκληρη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

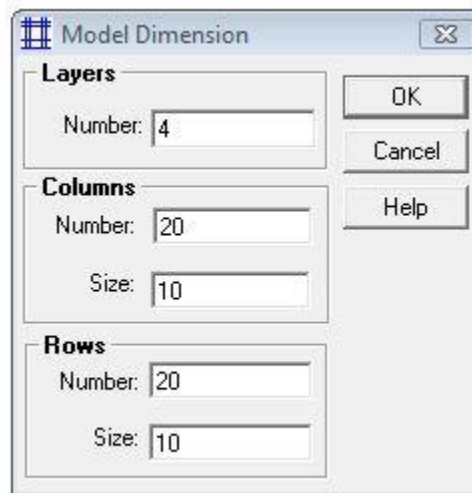
Βασικά βήματα ανάπτυξης του μοντέλου, αποτελούν η ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη υδροφορέα, η παρουσίαση και ανάλογη επεξεργασία του υδρολογικού ισοζυγίου και η κατάλληλη χρήση των υπορουτίνων του υπολογιστικού κώδικα για την εισαγωγή των απαραίτητων για την εκτέλεση της προσομοίωσης δεδομένων.

Σχετικά με το περιβάλλον εργασίας στο μοντέλο PMWin, στον κύριο κατάλογο επιλογών συναντάται η επιλογή Αρχείο (File) με την οποία μπορεί να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο ή μπορεί να ανοίξει για επεξεργασία ένα από τα υπάρχοντα μοντέλα. Στην συνέχεια η επιλογή διαμόρφωσης του πλέγματος (Grid) στην οποία εισάγονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κανάβου, το είδος των στρωμάτων και οι συνοριακές συνθήκες. Έπειτα η επιλογή του καθορισμού των παραμέτρων (Parameters) στην οποία προσδιορίζονται οι χρονικές και οι χωρικές παράμετροι του μοντέλου. Η επιλογή εκτέλεσης της προσομοίωσης (Models) στην οποία είναι δυνατόν να επιλεγεί η μηχανή επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και οι υπορουτίνες που θα χρησιμοποιηθούν. Η επιλογή των εργαλείων (Tools) στην οποία επιλέγεται πιο εργαλείο θα χρησιμοποιηθεί όπως αυτά αναφέρονται στην παράγραφο 3.5.1. καθώς και η επιλογή της βοήθειας του χρήστη (Help).

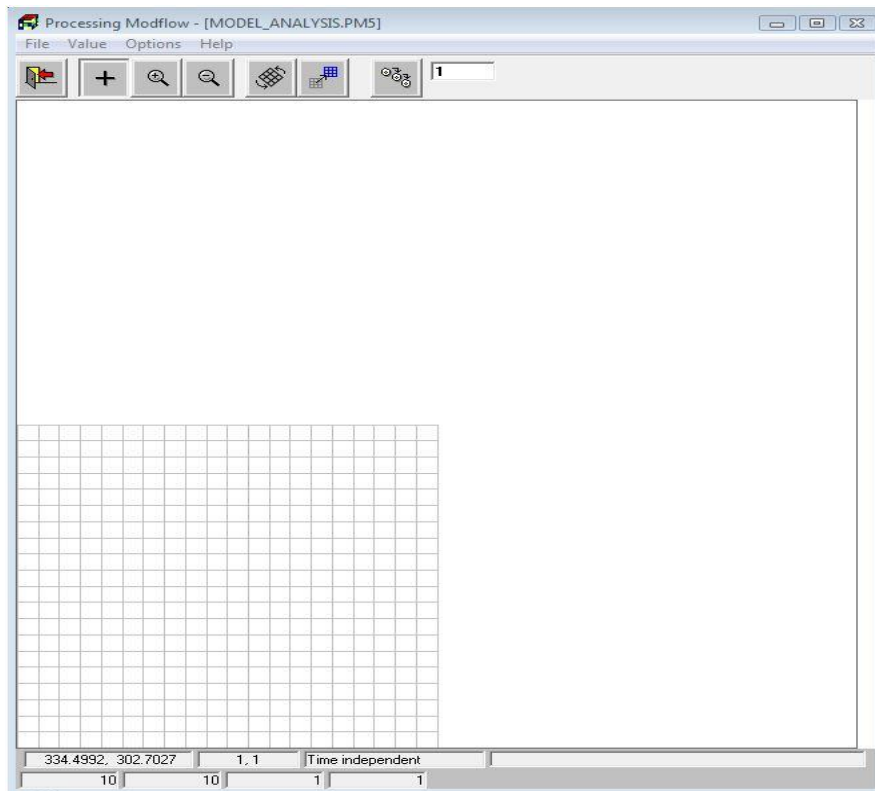
4.1.1 Ανάλυση γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Στα αρχικά στάδια κατασκευής του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω, κατά σειρά εμφάνισης στο περιβάλλον εργασίας του κώδικα:

- Άνοιγμα καινούργιου φακέλου στην επιφάνεια εργασίας.
- Άνοιγμα του προγράμματος Modflow και επιλογή New από την επιλογή File που εμφανίζεται πάνω στην γραμμή εργαλείων (toolbar) του μοντέλου.
- Άνοιγμα του καινούργιου φακέλου από την επιφάνεια εργασίας μέσω του μοντέλου και καταχώρηση ονομασίας της εργασίας ως: model_analysis. Κατόπιν αυτού αποθηκεύεται η εργασία (επιλογή Save).
- Επιλογή Mesh Size από το μενού Grid στην γραμμή εργαλείων.
- Επιλέγεται ο αριθμός των στρωμάτων να είναι ίσος με 4, ο αριθμός των στηλών και των γραμμών να είναι ίσος με 20 και το μέγεθος τους ίσο με 10.
- Επιλέγεται OK και leave editor

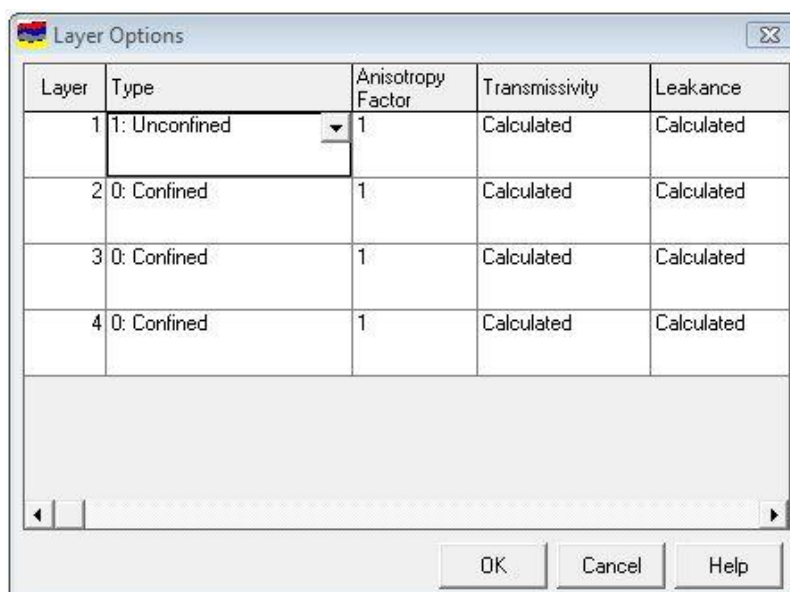


Εικόνα 8: Διαστάσεις του μοντέλου



Εικόνα 9: Ο κάναβος του μοντέλου

- Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστεί το είδος των στρωμάτων στο μοντέλο, επιλογή Layer type από την επιλογή Grid της γραμμής εργαλείων.
- Επιλογή 1: Unconfined από την στήλη type για το πρώτο στρώμα, και 0:Confined για τα υπόλοιπα στρώματα και μετά OK.



Εικόνα 10: Επιλογή του είδους των στρωμάτων

- Στην συνέχεια ορίζονται οι οριακές συνθήκες για το μοντέλο, επιλέγοντας Boundary Conditions > IBOUND (Modflow) της επιλογής Grid.
- Οι συνθήκες ορίζονται πατώντας δεξί κλικ στο επιθυμητό κελί την τιμή 1: για ενεργό κελί, (-1): για κελί με καθορισμένο ύψος στήλης νερού και 0: για ανενεργό κελί και μετά OK.

Για το συγκεκριμένο μοντέλο ορίζονται όλα τα κελιά με την τιμή 1, εκτός από τα κελιά (1,1) έως (1,20) για τα στρώματα 2 έως 4, που λαμβάνουν την τιμή -1 λόγω της ύπαρξης του υδροφόρου ορίζοντα στα τρία τελευταία στρώματα.

- Έπειτα ορίζεται η γεωμετρία του μοντέλου, επιλέγοντας τις τιμές των υψομέτρων των στρωμάτων. Αυτό πραγματοποιείται με την επιλογή Top of Layers (TOP) από την επιλογή Grid και ορισμό των τιμών στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγοντας Reset Matrix από το μενού Value.
- Με τον ίδιο τρόπο ορίζεται και το βάθος του κάθε στρώματος. Επιλέγοντας Bottom of Layers (BOP) από την επιλογή Grid και ορισμό των τιμών στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγοντας Reset Matrix από το μενού Value.

4.1.2 Ανάλυση χρονικών παραμέτρων και χωρική διακριτοποίηση.

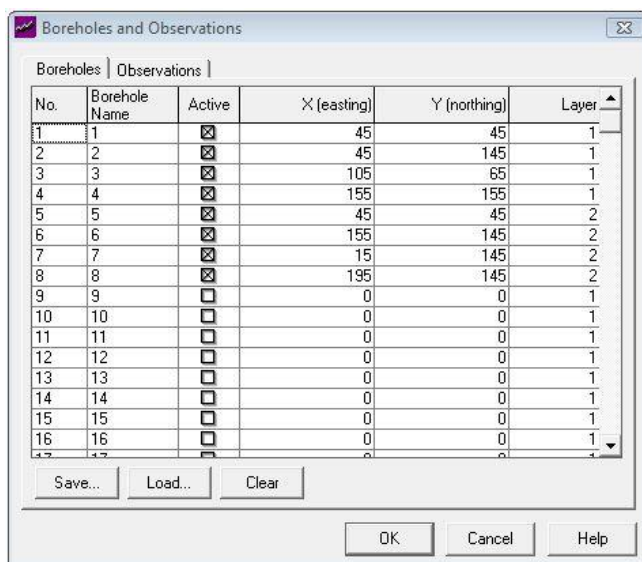
Αρχικά ορίζονται οι χρονικές παράμετροι, επιλέγοντας Time... από την επιλογή Parameters της γραμμής εργαλείων. Οι χρονικές παράμετροι περιλαμβάνουν την μονάδα του χρόνου που θα χρησιμοποιηθεί, τον αριθμό των περιόδων προσομοίωσης, τα βήματα σε κάθε χρόνο και το βήμα μεταφοράς. Στον κώδικα Modflow, ο χρόνος προσομοίωσης διαιρείται σε περιόδους – δηλαδή, χρονικά διαστήματα κατά την διάρκεια των οποίων όλες οι

εξωτερικές καταπονήσεις είναι σταθερές – οι οποίες, με την σειρά τους διαιρούνται σε χρονικά βήματα. Στα περισσότερα μοντέλα μεταφοράς, κάθε χρονικό βήμα υποδιαιρείται περαιτέρω σε μικρότερα βήματα μεταφοράς. Η διάρκεια των περιόδων προσομοίωσης δεν έχει σχέση με μία προσομοίωση ροής σταθερής κατάστασης (steady state flow simulation). Για το συγκεκριμένο μοντέλο ορίστηκαν 12 περίοδοι για την προσομοίωση με διάρκεια 30 ημερών και το βήμα σε κάθε χρόνο είναι ένα.

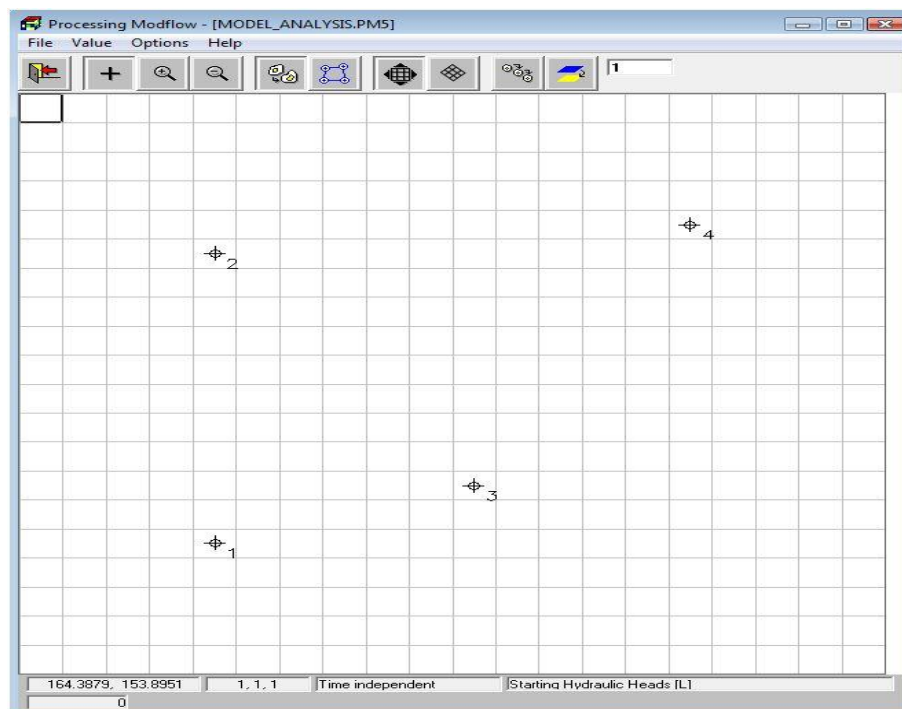
Στην συνέχεια ορίζονται οι αρχικές τιμές του ύψους του νερού για κάθε κελί, οι τιμές αυτές αλλάζουν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Τα μόνα κελιά που διατηρούν σταθερή την αρχική αυτή τιμή χωρίς να επηρεάζονται από την προσομοίωση είναι αυτά που έχουν οριστεί ως σταθερά κελιά (fixed – head boundary). Αυτές οι αρχικές τιμές ορίζονται από την επιλογή Initial Hydraulic Heads από την επιλογή Parameters της γραμμής εργαλείων. Στο μοντέλο που δημιουργήθηκε η αρχική τιμή των κελιών που αντιπροσωπεύουν τον υδροφόρο ορίζοντα, ήταν 15 και η μονάδα μέτρησης το μέτρο.

Έπειτα ορίζεται η οριζόντια και η κάθετη αγωγιμότητα των στρωμάτων (horizontal and vertical conductivity). Ο ορισμός των τιμών τους πραγματοποιείται από τις αντίστοιχες επιλογές του μενού Parameters της γραμμής εργαλείων. Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε η ίδια τιμή για όλα τα στρώματα και για τις δύο διευθύνσεις και είναι ίση με 10^{-5} m/s.

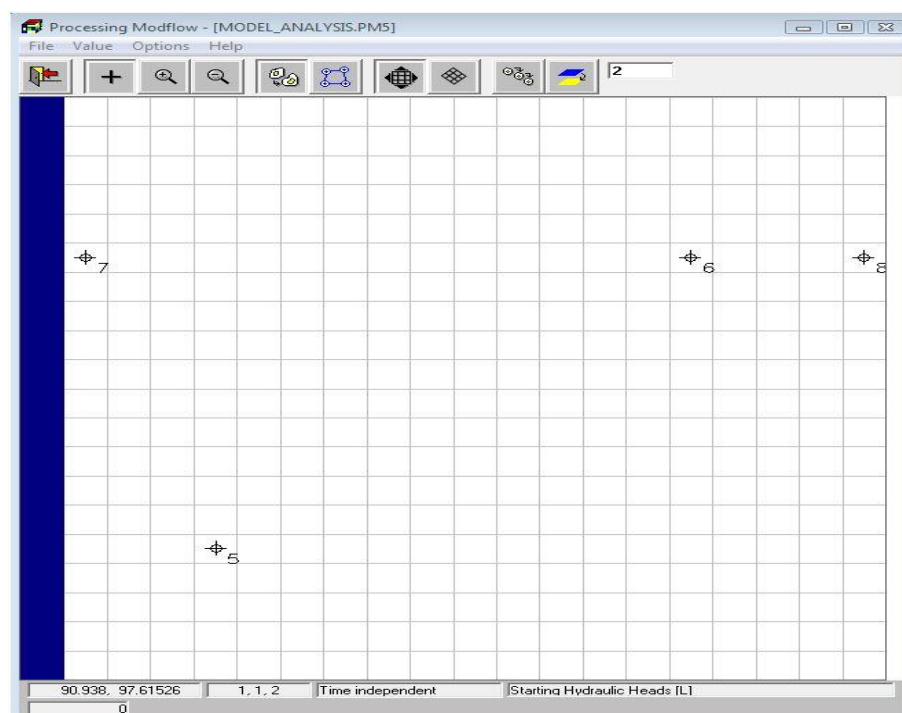
Για να μπορεί να γίνει εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε γράφημα πρέπει να οριστούν κάποια σημεία παρατήρησης, όπου θα μπορεί να καταγραφεί η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου με τον χρόνο στην διάρκεια της προσομοίωσης. Τα σημεία αυτά ορίζονται στην επιλογή Boreholes and Observations στο μενού Parameters της γραμμής εργαλείων.



Εικόνα 11: Εισαγωγή σημείων παρατήρησης



Εικόνα 12: Σημεία παρατήρησης στον κানাβο στρώμα 1



Εικόνα 13: Σημεία παρατήρησης στον κানাβο στρώμα 2

Άλλος ένας παράγοντας που πρέπει να οριστεί στο μοντέλο είναι η τιμή του ενεργού πορώδους. Επιλέγοντας την αντίστοιχη εντολή από την επιλογή Parameters, ορίστηκε η τιμή του ενεργού πορώδους ίσο με 0.25.

4.1.3 Διαμόρφωση του μοντέλου προσομοίωσης με χρήση υπορουτίνων

Στην παρούσα παράγραφο αναπτύσσεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης με χρήση των εντολών – υπορουτίνων του κώδικα Modflow. Οι υπορουτίνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Drain (τοίχος αποστράγγισης)
- General Head Boundary (το ύψος στήλης νερού εξαρτάται από την ροή)
- Recharge (εμπλουτισμός)

Η χρήση των υπορουτίνων και η εισαγωγή δεδομένων σε αυτές παρουσιάζονται στην συνέχεια:

- Drain (τοίχος αποστράγγισης)

Στην περίπτωσης χρήσης της υπορουτίνας – εντολής Drain απαιτείται ο προσδιορισμός του ύψους του τοίχου αποστράγγισης για κάθε χρονική περίοδο. Επιπλέον απαιτείται η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας για την περιοχή στην οποία τοποθετείται το τοίχος αποστράγγισης (Drain).

Η λειτουργία του τοίχους αποστράγγισης ορίζεται ως εξής: όταν το ύψος της επιφάνειας του νερού σε ένα κελί αποστράγγισης είναι μεγαλύτερο από το ύψος του επιπέδου αποστράγγισης, το νερό ρέει μέσα στο στραγγιστήριο και απομακρύνεται από το μοντέλο. Η απομάκρυνση του νερού στο τοίχος αποστράγγισης είναι ίση με μηδέν όταν το ύψος στήλης νερού είναι χαμηλότερο ή ίσο με το μέσο ύψος του τοίχους αποστράγγισης. Ο εμπλουτισμός από τον τοίχο αποστράγγισης είναι πάντα μηδέν, ανεξαρτήτως του ύψους στήλης νερού στον υδροφόρο ορίζοντα.

Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας (C_d) του κελιού αποστράγγισης δίνεται συνήθως από τον τύπο:

$$C_d = K \cdot L$$

Όπου, L είναι το μήκος της αποστράγγισης μέσα στο κελί και K είναι μία ισοδύναμη υδραυλική αγωγιμότητα που περιγράφει όλη την απώλεια του ύψους της στήλης του νερού μεταξύ της αποστράγγισης και του υδροφόρου ορίζοντα. Εξαρτάται από το υλικό και τα χαρακτηριστικά του τοίχου αποστράγγισης και από το άμεσο περιβάλλον. Η τιμή C_d είναι συνήθως άγνωστη και πρέπει να προσαρμοστεί κατά την διάρκεια δημιουργίας του μοντέλου (Chiang & Kinzelbach, 1998).

Η υδραυλική αγωγιμότητα στο πρώτο στρώμα του μοντέλου στο οποίο τοποθετείται το τοίχος Drain, είναι 0.00001 m/s η οποία μετατρέπεται σε 8,64 m²/day και εισάγεται στην αντίστοιχη μεταβλητή C_d της υπορουτίνας

Drain. Το ύψος του τοίχους για όλες τις χρονικές περιόδους της προσομοίωσης παραμένει σταθερό και βρίσκεται στα 15m, δηλαδή περίπου στα 5 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, με στόχο την εξαγωγή των πλευρικών εκροών ύδατος στα κατάντη του υδροφορέα.

- General Head Boundary

Η υπορουτίνα – πακέτο General Head Boundary χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ορίων που το ύψος στήλης νερού σε αυτά εξαρτάται από την ροή (Cauchy οριακές συνθήκες). Για την χρήση αυτής της υπορουτίνας απαιτείται ο καθορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας για την περιοχή στην οποία τοποθετείται το General Head Boundary. Επιπλέον απαιτείται ο καθορισμός του ύψους του υδραυλικού φορτίου στο όριο.

Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας (C_b) υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται και για το κελί αποστράγγισης, που αναφέρεται παραπάνω. Ένα κελί GHB είναι ισοδύναμο με ένα κελί σταθερού υδραυλικού φορτίου όταν η υδραυλική αγωγιμότητα του κελιού είναι πολύ μεγάλη. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και του υδραυλικού φορτίου που ορίζονται την αρχή παραμένουν σταθερές κατά την διάρκεια μίας περιόδου της προσομοίωσης και κάθε περίοδος μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές (Chiang & Kinzelbach, 1998).

Στο μοντέλο που δημιουργήθηκε ο υδροφόρος ορίζοντας, όπως αναφέρεται και παραπάνω, είναι στα τρία τελευταία στρώματα στην αριστερή πλευρά των στρωμάτων. Η υδραυλική αγωγιμότητα που ορίστηκε είναι 0.00001 m/s η οποία μετατρέπεται σε 8,64 m²/day και εισάγεται στην αντίστοιχη μεταβλητή C_b της υπορουτίνας GHB. Το ύψος του υδραυλικού φορτίου για όλες τις χρονικές περιόδους της προσομοίωσης παραμένει σταθερό και βρίσκεται στα 15m, δηλαδή περίπου στα 5 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

- Recharge (εμπλουτισμός)

Η υπορουτίνα Recharge χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μιας πραγματικά διανεμημένης τροφοδοσίας του συστήματος υπόγειων υδάτων. Επομένως η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται στην περίπτωση τροφοδοσίας από τις πηγές και την κατείσδυση της βροχόπτωσης. Για την χρήση του πακέτου αυτού απαιτείται ο ορισμός του μεγέθους του εμπλουτισμού της ροής καθώς επίσης και ο προσδιορισμός των κελιών που θα δεχθούν αυτόν τον εμπλουτισμό. Το πακέτο δίνει τρεις επιλογές: 1) η τροφοδοσία εφαρμόζεται μόνο στα κελιά του ανώτερου στρώματος, 2) κατακόρυφη κατανομή της τροφοδοσίας που καθορίζεται από τον δείκτη I_{RCH} , ο οποίος καθορίζει το στρώμα όπου εφαρμόζεται η τροφοδοσία και 3) η τροφοδοσία εφαρμόζεται στο υψηλότερο ενεργό κελί σε κάθε κατακόρυφη στήλη. Ο χρήστης σε αυτήν την περίπτωση δεν χρειάζεται να προκαθορίσει το στρώμα στο οποίο θα εφαρμοστεί ο εμπλουτισμός. Η κατάλληλη στρώση επιλέγεται αυτόματα από την υπορουτίνα. Αν το υψηλότερο ενεργό κελί είναι ένα κελί με σταθερό υδραυλικό φορτίο, η τροφοδοσία θα παρεμποδιστεί και δεν θα μπορεί να πάει βαθύτερα (Chiang & Kinzelbach, 1998).

Στον σχεδιασμό του συγκεκριμένου μοντέλου η τροφοδοσία αποτελείται από τα κατακρημνίσματα της βροχής, τα οποία όμως μειώνονται από την εξατμισοδιαπνοή που έχει η περιοχή. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την βροχόπτωση προέρχονται από μετρήσεις στην περιοχή των Χανίων για το έτος 2011, από τα δεδομένα αυτά προσδιορίστηκε ότι η μεγαλύτερη βροχόπτωση που καταγράφηκε ήταν περίπου 120 mm/month οπότε η βροχόπτωση αυτή αναλογεί σε 4mm/day. Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε μία τιμή 3 mm/day όταν η τροφοδοσία παραμένει σταθερή και για την περίπτωση που η τροφοδοσία είναι μεταβλητή κατασκευάστηκε μία κανονική κατανομή για την βροχόπτωση με μέγιστη τιμή τα 4mm/day (meteo.gr). Οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής στην περιοχή προέρχονται από μετρήσεις για το έτος 2008 (Σκαραντωνάκης, 2010), οπότε η τιμή της τροφοδοσίας για κάθε περίοδο διέπεται από την σχέση: $Recharge = Precipitation - Evapotranspiration$. Τέλος ο εμπλουτισμός εφαρμόστηκε μόνο στο πρώτο στρώμα αφού προέρχεται μόνο από την βροχόπτωση.

4.2 Παρουσίαση και ανάλυση σεναρίων μεταβολής συνθηκών στο μοντέλο

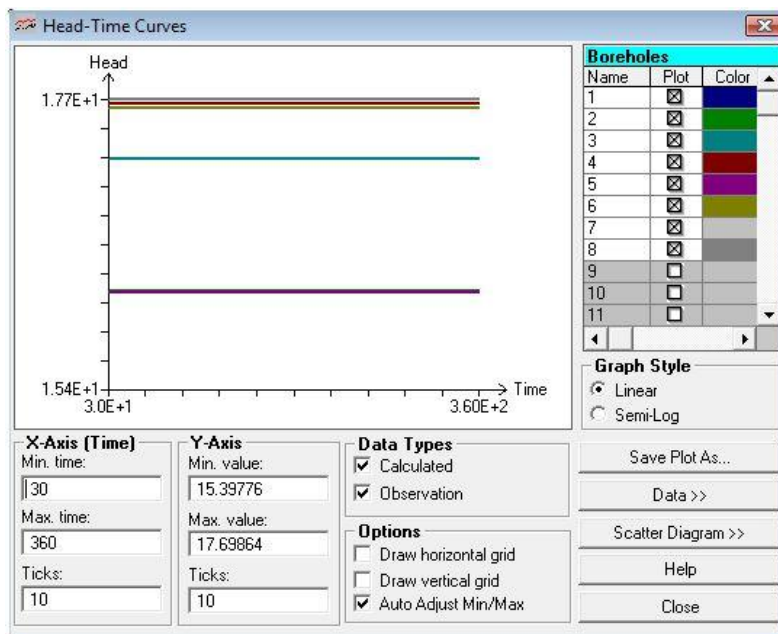
Όπως προαναφέρθηκε για τον έλεγχο της ευαισθησίας του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στις συνθήκες που ισχύουν στο μοντέλο και καταγράφηκαν οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν. Για την μελέτη αυτή επιλέχθηκε η κατασκευή τεσσάρων σεναρίων αλλαγής παραμέτρων όπως είναι η γεωμετρία των κελιών. Πιο συγκεκριμένα κατασκευάστηκε ένα σενάριο όπου μεταβάλλεται η γεωμετρία των κελιών, ένα σενάριο όπου αλλάζει το είδος της προσομοίωσης από steady state flow simulation σε transient flow simulation, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του μοντέλου αμετάβλητα. Στο τρίτο σενάριο αλλάζει το είδος της τροφοδοσίας από σταθερή σε μεταβλητή και τέλος στο τέταρτο σενάριο γίνεται σύγκριση ανάμεσα σε constant head boundary και general head boundary.

- 1^ο σενάριο: Αλλαγή γεωμετρίας κελιών.

Το μοντέλο της προσομοίωσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 4.1.1, έχει διαστάσεις 200 m x 200 m και συνολικό πάχος 20 m και αποτελείται από 4 στρώματα. Ο υδροφόρος ορίζοντας που βρίσκεται στην αριστερή πλευρά του έχει ύψος στήλης νερού ίση με 15 m και τοποθετείται στα τρία βαθύτερα στρώματα του μοντέλου. Τα σημεία παρατήρησης είναι στις θέσεις που αναφέρονται προηγουμένως. Η τροφοδοσία του μοντέλου αποτελείται από την βροχόπτωση της περιοχής και λαμβάνεται σταθερή σε όλες τις περιόδους προσομοίωσης και ίση με 3 mm/day.

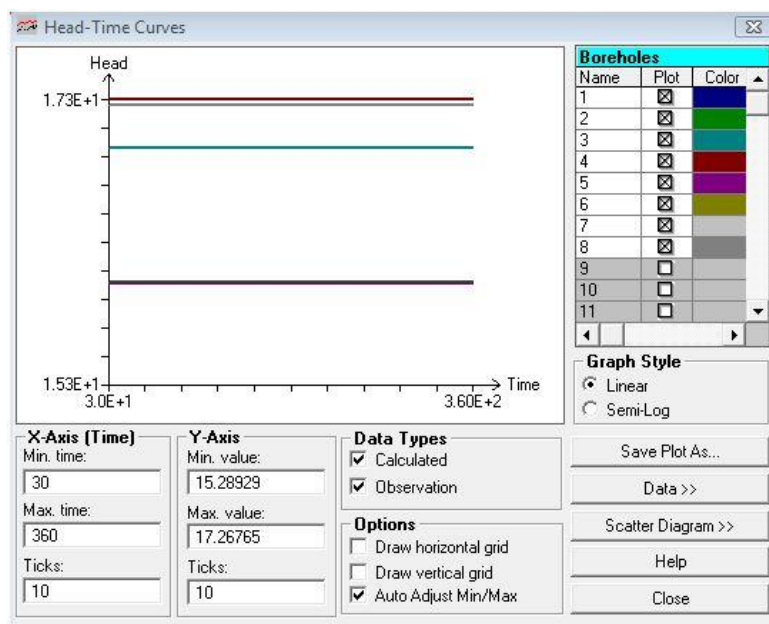
Για να παρατηρηθούν οι αλλαγές που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα από την αλλαγή της γεωμετρίας των κελιών, πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις για το ίδιο μοντέλο αλλάζοντας κάθε φορά των αριθμό των στηλών και των γραμμών του κανάβου ταυτόχρονα με το πάχος του κελιού ώστε να διατηρηθούν αμετάβλητες οι διαστάσεις του μοντέλου. Σε όλες τις περιπτώσεις το είδος της προσομοίωσης είναι steady state flow simulation.

Στην πρώτη περίπτωση δημιουργήθηκε ένας κάναβος από 40 γραμμές και 40 στήλες, η κάθε μία από τις οποίες έχουν πλάτος 5 m. Μετά το πέρας της προσομοίωσης το διάγραμμα Head – Time που δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα είναι το παρακάτω.



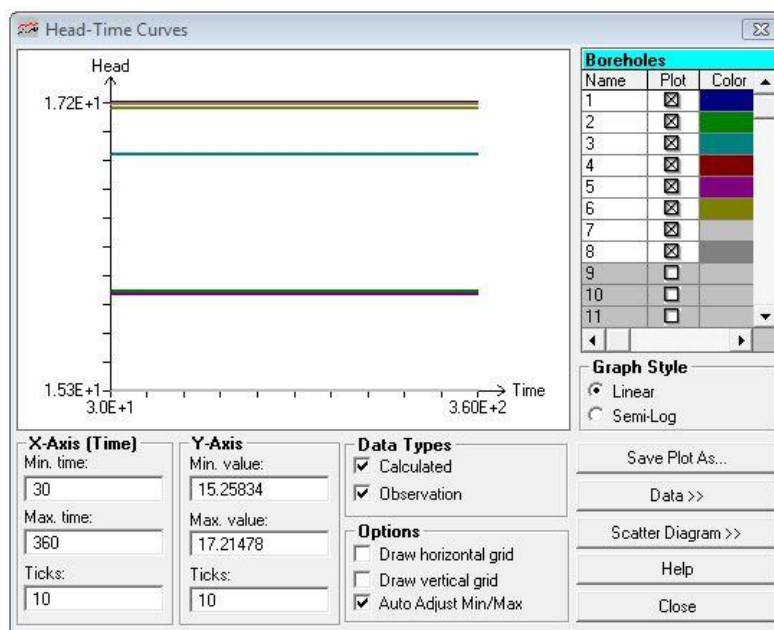
Εικόνα 14: 5m cell width constant head, steady state flow simulation

Στην δεύτερη περίπτωση δημιουργήθηκε ένας κάναβος από 20 γραμμές και 20 στήλες, η κάθε μία από τις οποίες έχουν πλάτος 10 m. Το διάγραμμα Head – Time που προήλθε από την προσομοίωση φαίνεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15: 10m cell width constant head, steady state flow simulation

Στην τελευταία περίπτωση δημιουργήθηκε ένας κάναβος από 13 γραμμές και 13 στήλες, η κάθε μία από τις οποίες έχουν πλάτος 15 m, από την προσομοίωση του οποίου προήλθε το διάγραμμα Head – Time που ακολουθεί.



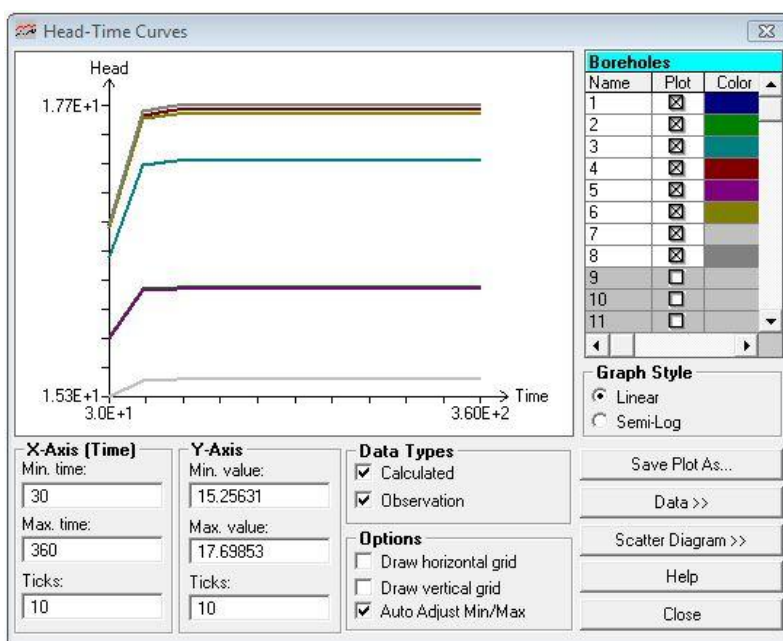
Εικόνα 16: 15m cell width constant head, steady state flow simulation

- 2^ο σενάριο: Σύγκριση steady state flow simulation και transient flow simulation.

Το μοντέλο της προσομοίωσης, όπως και στο προηγούμενο σενάριο, έχει διαστάσεις 200 m x 200 m και συνολικό πάχος 20 m και αποτελείται από 4 στρώματα. Ο υδροφόρος ορίζοντας που βρίσκεται στην αριστερή πλευρά του έχει ύψος στήλης νερού ίση με 15 m και τοποθετείται στα τρία βαθύτερα στρώματα του μοντέλου. Τα σημεία παρατήρησης είναι στις θέσεις που αναφέρονται στην παράγραφο 4.1.2. Η τροφοδοσία του μοντέλου αποτελείται από την βροχόπτωση της περιοχής και λαμβάνεται σταθερή σε όλες τις περιόδους προσομοίωσης και ίση με 3 mm/day.

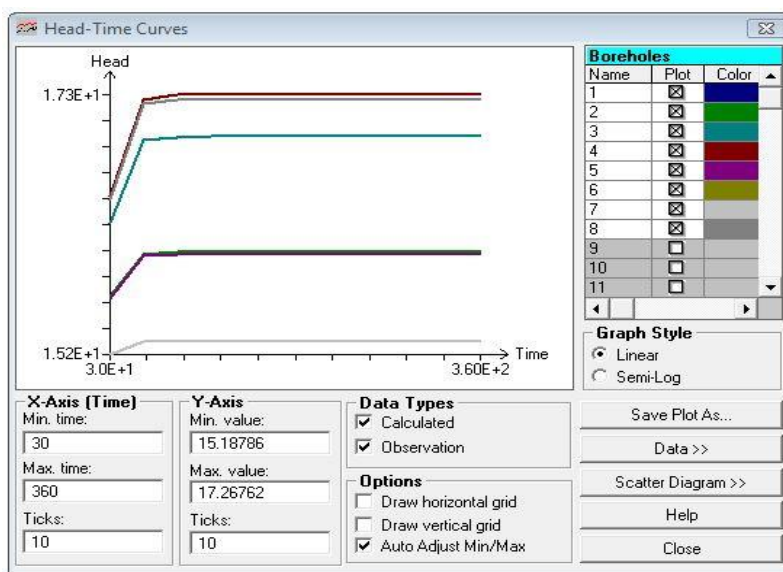
Για να παρατηρηθούν οι αλλαγές που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα από την αλλαγή του είδους της προσομοίωσης, θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα από τις τρεις προσομοιώσεις του προηγούμενου σεναρίου και θα επαναληφθεί η προσομοίωση για τα ίδια μοντέλα αλλάζοντας μόνο το είδος της προσομοίωσης από steady state flow simulation σε transient flow simulation. Όταν πραγματοποιείται transient flow simulation, λαμβάνεται υπόψη από τον κώδικα Modflow και η ειδική αποθηκευτικότητα του σχηματισμού. Σε αυτό το μοντέλο λαμβάνεται Specific Storage (S_s) ίση με 0.0001 1/m για όλα τα στρώματα.

Στην πρώτη περίπτωση ο κানাβος αποτελείται από 40 γραμμές και 40 στήλες, η κάθε μία από τις οποίες έχουν πλάτος 5 m. Μετά το πέρας της προσομοίωσης το διάγραμμα Head – Time που δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα παρουσιάζεται στην εικόνα 17.



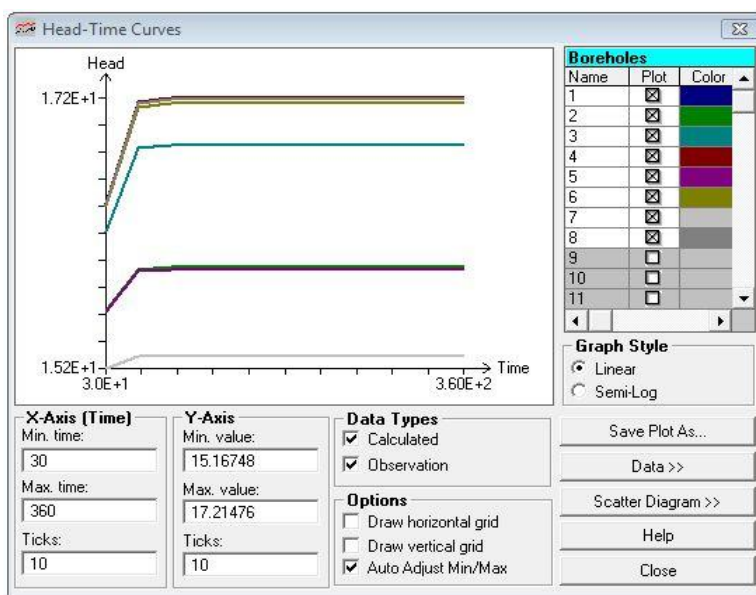
Εικόνα 17: 5m cell width constant head, transient flow simulation

Στην δεύτερη περίπτωση ο κানাβος έχει 20 γραμμές και 20 στήλες, η κάθε μία από τις οποίες έχουν πλάτος 10 m. Το διάγραμμα Head – Time που προήλθε από την προσομοίωση είναι το παρακάτω.



Εικόνα 18: 10m cell width constant head, transient flow simulation

Στην τελευταία περίπτωση ο κানাβος αποτελείται από 13 γραμμές και 13 στήλες, η κάθε μία από τις οποίες έχουν πλάτος 15 m, από την προσομοίωση του οποίου προήλθε το διάγραμμα Head – Time που ακολουθεί.



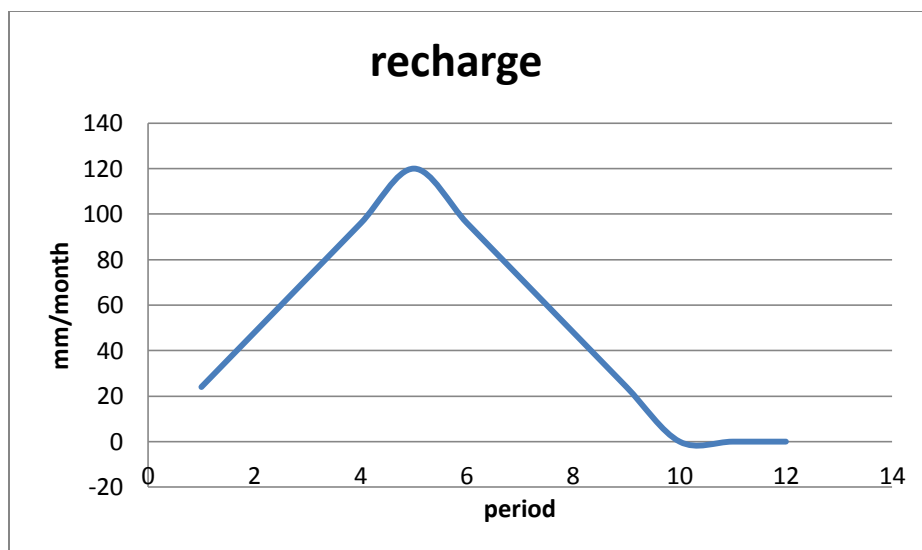
Εικόνα 19: 15m cell width constant head, transient flow simulation

- 3^ο σενάριο: Αλλαγή τροφοδοσίας από σταθερή σε μεταβλητή.

Το μοντέλο της προσομοίωσης, είναι το ίδιο που χρησιμοποιήθηκε και στα προηγούμενα σενάρια, έχει διαστάσεις 200 m x 200 m και συνολικό πάχος 20 m και αποτελείται από 4 στρώματα. Ο υδροφόρος ορίζοντας που βρίσκεται στην αριστερή πλευρά του έχει ύψος στήλης νερού ίση με 15 m και τοποθετείται στα τρία βαθύτερα στρώματα του μοντέλου. Τα σημεία παρατήρησης είναι στις θέσεις που αναφέρονται παραπάνω στην παράγραφο 4.1.2. Η τροφοδοσία του μοντέλου αποτελείται από την βροχόπτωση της περιοχής η οποία ακολουθεί την κανονική κατανομή με την μέγιστη τιμή να παρουσιάζεται στην 5 περίοδο της προσομοίωσης και είναι ίση με 4 mm/day.

Πίνακας 1: Κατανομής βροχόπτωσης

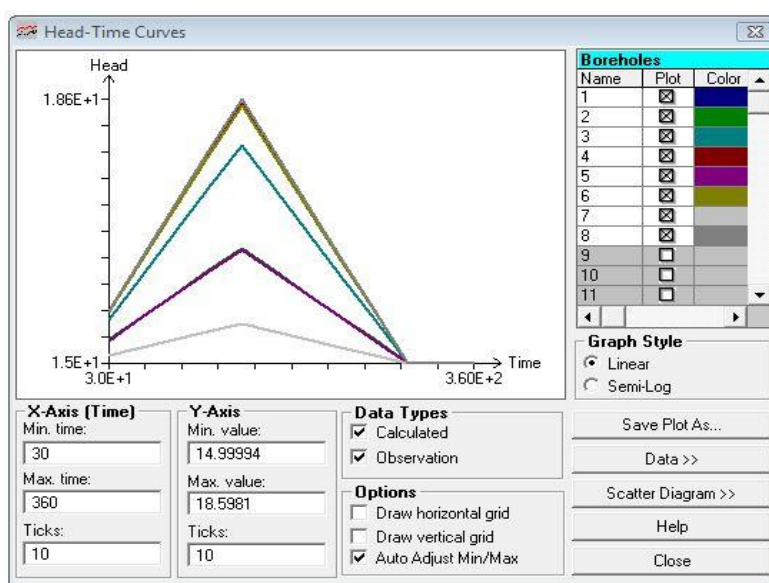
period	m/month	m/day
1	0,024	0,0008
2	0,048	0,0016
3	0,072	0,0024
4	0,096	0,0032
5	0,12	0,004
6	0,096	0,0032
7	0,072	0,0024
8	0,048	0,0016
9	0,024	0,0008
10	0	0
11	0	0
12	0	0



Εικόνα 20: Κατανομή τροφοδοσίας ανά περίοδο

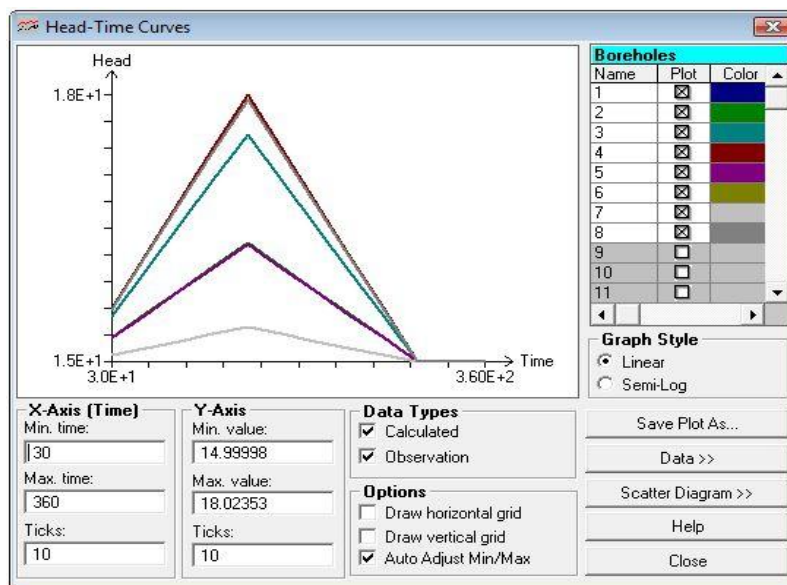
Για να παρατηρηθούν οι αλλαγές που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα από την αλλαγή του είδους της προσομοίωσης, θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα από τις τρεις προσομοιώσεις του πρώτου σεναρίου και θα επαναληφθεί η προσομοίωση για τα ίδια μοντέλα αλλάζοντας μόνο το είδος της τροφοδοσίας από σταθερή σε μεταβλητή. Σε όλες τις περιπτώσεις το είδος της προσομοίωσης είναι steady state flow simulation.

Στην πρώτη περίπτωση αλλάζοντας το είδος της τροφοδοσίας προήλθε το διάγραμμα Head – Time που ακολουθεί.



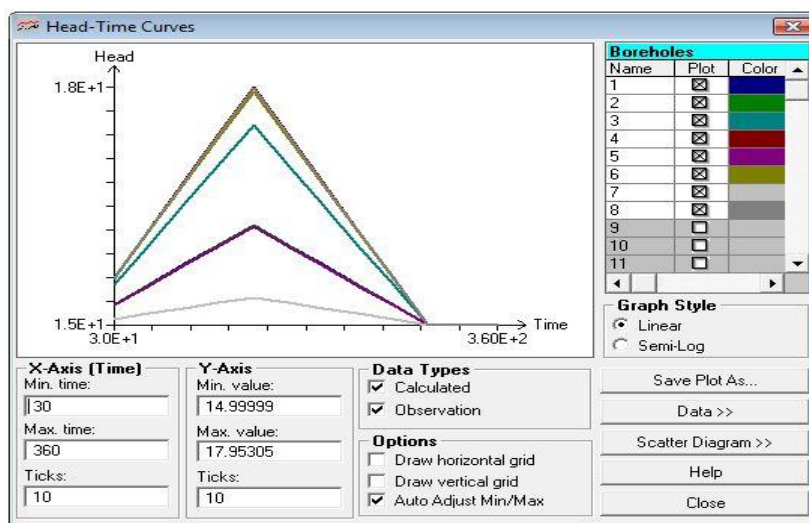
Εικόνα 21: 5m cell width constant head, with variable recharge

Στην δεύτερη περίπτωση αλλάζοντας το είδος της τροφοδοσίας σε μεταβλητή δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα Head – Time.



Εικόνα 22: 10m cell width constant head, with variable recharge

Στην τελευταία περίπτωση αλλάζοντας το είδος της τροφοδοσίας δημιουργήθηκε το διάγραμμα Head – Time που ακολουθεί.



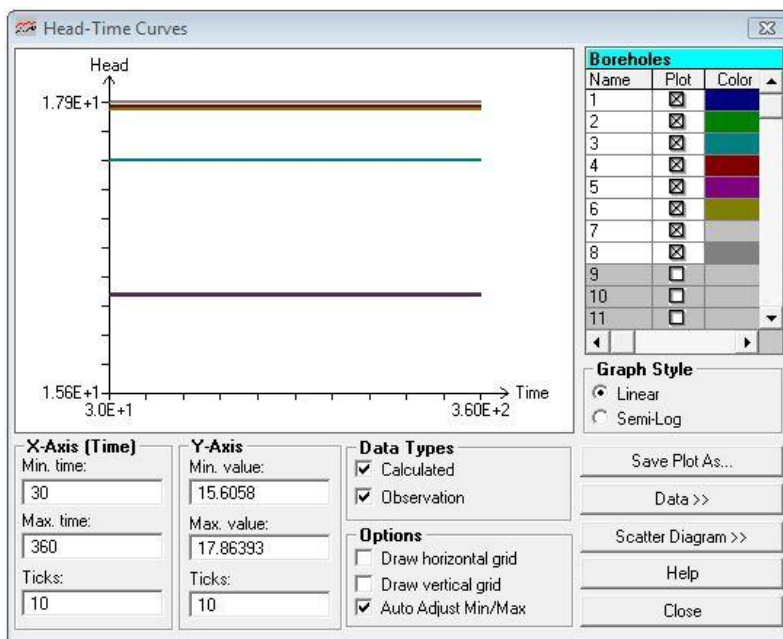
Εικόνα 23: 15m cell width constant head, with variable recharge

- 4ο σενάριο: Σύγκριση Constant Head Boundary και General Head Boundary.

Το μοντέλο της προσομοίωσης, όπως και πρώτο σενάριο, έχει διαστάσεις 200 m x 200 m και συνολικό πάχος 20 m και αποτελείται από 4 στρώματα. Ο υδροφόρος ορίζοντας που βρίσκεται στην αριστερή πλευρά του έχει ύψος στήλης νερού ίση με 15 m και τοποθετείται στα τρία βαθύτερα στρώματα του μοντέλου. Τα σημεία παρατήρησης είναι στις θέσεις που αναφέρονται στην παράγραφο 4.1.2. Η τροφοδοσία του μοντέλου αποτελείται από την βροχόπτωση της περιοχής και λαμβάνεται σταθερή σε όλες τις περιόδους προσομοίωσης και ίση με 3 mm/day.

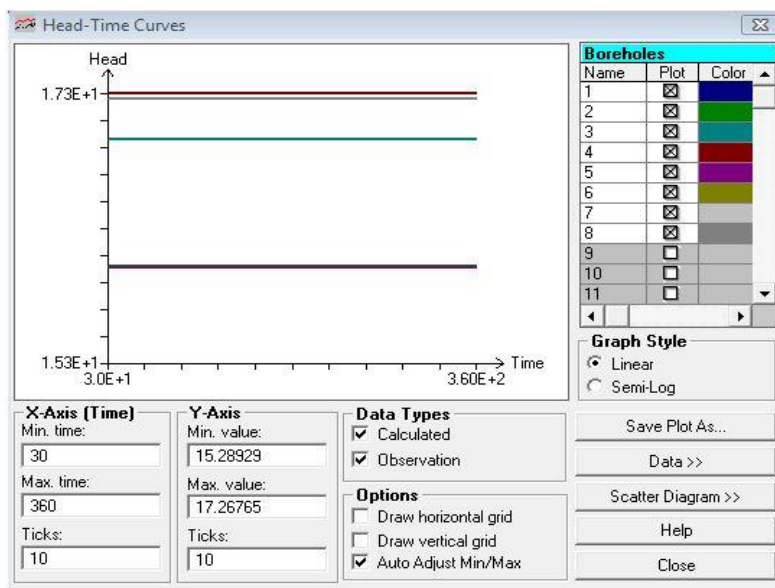
Για να παρατηρηθούν οι αλλαγές που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα από την αλλαγή του είδους του ορίου του υδροφόρου ορίζοντα, θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα από τις τρεις προσομοιώσεις του πρώτου σεναρίου και θα επαναληφθεί η προσομοίωση για τα ίδια μοντέλα αλλάζοντας μόνο το είδος του ορίου του υδροφόρου ορίζοντα από Constant Head Boundary σε General Head Boundary. Σε όλες τις περιπτώσεις το είδος της ροής είναι steady state flow simulation.

Στην πρώτη περίπτωση ο κάναβος αποτελείται από 40 γραμμές και 40 στήλες, η κάθε μία από τις οποίες έχουν πλάτος 5m. Η υδραυλική αγωγιμότητα των στρωμάτων είναι ίση με 0.00001 m/sec η οποία μετατρέπεται σε 4,32 m²/day και εισάγεται στην αντίστοιχη μεταβλητή C_b της υπορουτίνας GHB. Μετά το πέρας της προσομοίωσης το διάγραμμα Head – Time που δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα είναι το παρακάτω.



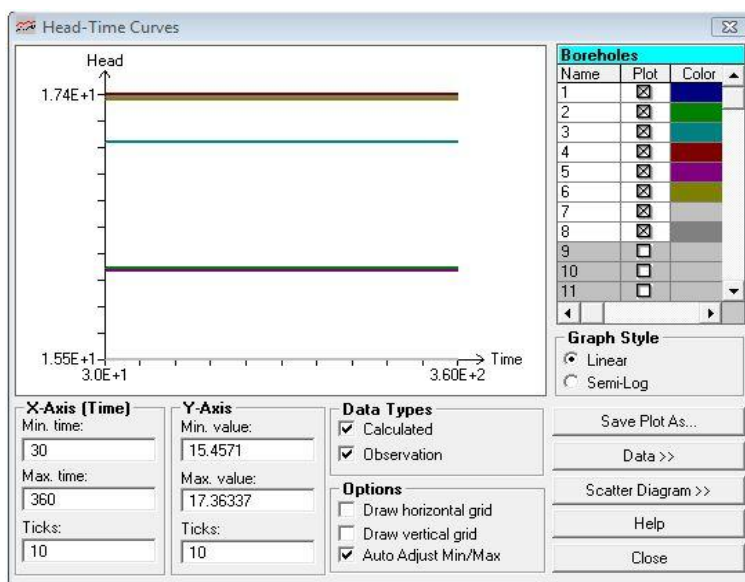
Εικόνα 24: 5m cell width general head, steady state flow simulation

Στην δεύτερη περίπτωση ο κάναβος έχει 20 γραμμές και 20 στήλες, η κάθε μία από τις οποίες έχουν πλάτος 10m. Η υδραυλική αγωγιμότητα των στρωμάτων είναι ίση με 0.00001 m/s η οποία μετατρέπεται σε 8.64 m²/day. Το διάγραμμα Head – Time που προήλθε από την προσομοίωση είναι το παρακάτω.



Εικόνα 25: 10m cell width general head, steady state flow simulation

Στην τελευταία περίπτωση ο κάναβος αποτελείται από 13 γραμμές και 13 στήλες, η κάθε μία από τις οποίες έχουν πλάτος 15m, από την προσομοίωση του οποίου προήλθε το διάγραμμα Head – Time που ακολουθεί. Η υδραυλική αγωγιμότητα των στρωμάτων είναι ίση με 0.00001 m/s η οποία μετατρέπεται σε 12,96 m²/day.



Εικόνα 26: 15m cell width general head, steady state flow simulation

4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης – σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Συνοπτικά για το κεφάλαιο έως τώρα, στην ενότητα 4.1 παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός του μοντέλου προσομοίωσης, ενώ στην ενότητα 4.2 παρουσιάστηκαν τα σενάρια μεταβολής των παραμέτρων σχεδιασμού για τον έλεγχο της ευαισθησίας του κώδικα Modflow. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τις προηγούμενες παραγράφους πραγματοποιήθηκαν 12 συνολικά προσομοιώσεις, τρεις για κάθε σενάριο, υπόγειας ροής με την χρήση του κώδικα Modflow για τον σχηματισμό μελέτης. Οι προσομοιώσεις αυτές αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω:

- Σενάριο 1°, μεταβολή της γεωμετρίας των κελιών αλλάζοντας ταυτόχρονα το πλάτος των κελιών και τον αριθμό των στηλών και των γραμμών.
- Σενάριο 2°, αλλαγή στο είδος της προσομοίωσης από steady state flow simulation σε transient flow simulation, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του μοντέλου αμετάβλητα.
- Σενάριο 3°, αλλαγή στο είδος της τροφοδοσίας από σταθερή σε μεταβλητή, διατηρώντας το είδος της προσομοίωσης σε steady state flow simulation.
- Σενάριο 4°, σύγκριση ανάμεσα σε constant head boundary και general head boundary στον υδροφόρο που βρίσκεται στο όριο του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων καθώς και ο σχολιασμός τους παρατίθενται στη συνέχεια:

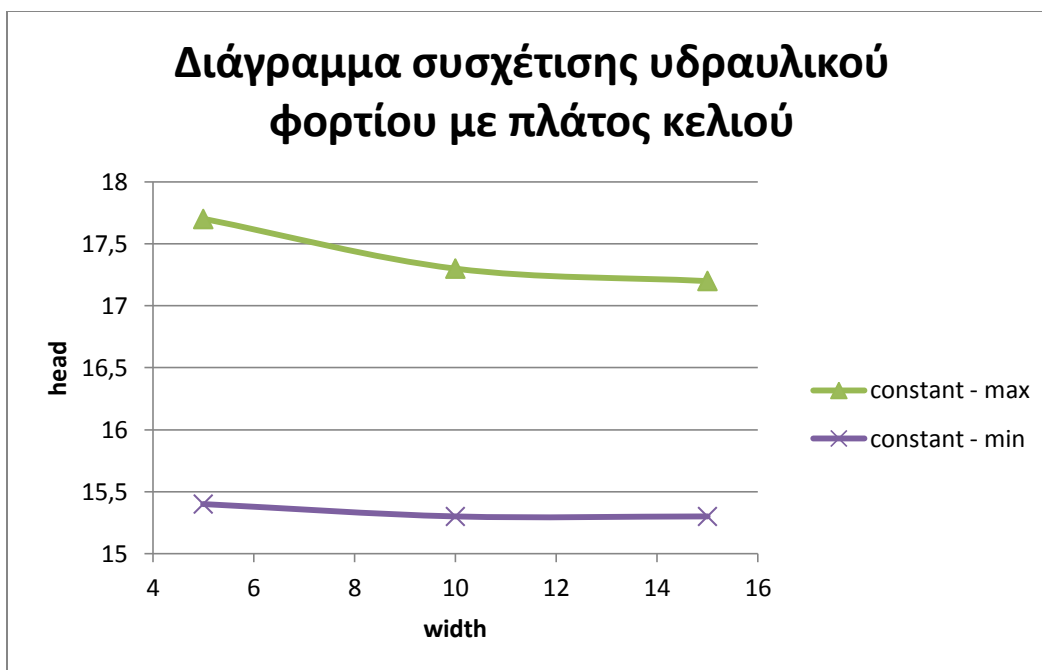
4.3.1 Σενάριο 1ο.

Τα αποτελέσματα από τις τρεις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με αλλαγή των διαστάσεων των κελιών παρουσιάζονται στις εικόνες 14, 15 και 16. Από τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν η μικρότερη και η μεγαλύτερη τιμή ύψους στήλης νερού που υπολογίστηκε από το πρόγραμμα για κάθε προσομοίωση.

Πίνακας 2: Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 1ο

width	head	
	min	max
5	15,4	17,7
10	15,3	17,3
15	15,3	17,2

Με την χρήση των παραπάνω στοιχείων του πίνακα κατασκευάστηκε το διάγραμμα στην εικόνα 27 για καλύτερη ερμηνεία των μεταβολών.



Εικόνα 27: Διάγραμμα συσχέτισης φορτίου με πλάτος κελιού

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το πλάτος του κελιού μειώνεται η τιμή του ύψους της στήλης του νερού που υπολογίζεται για το ίδιο σημείο. Η μεταβολή αυτή φαίνεται να μηδενίζεται από κάποιο σημείο και έπειτα, αυτό παρατηρείται για πλάτος κελιού μεγαλύτερο από 10m το υδραυλικό φορτίο που υπολογίζεται μεταβάλλεται ελάχιστα.

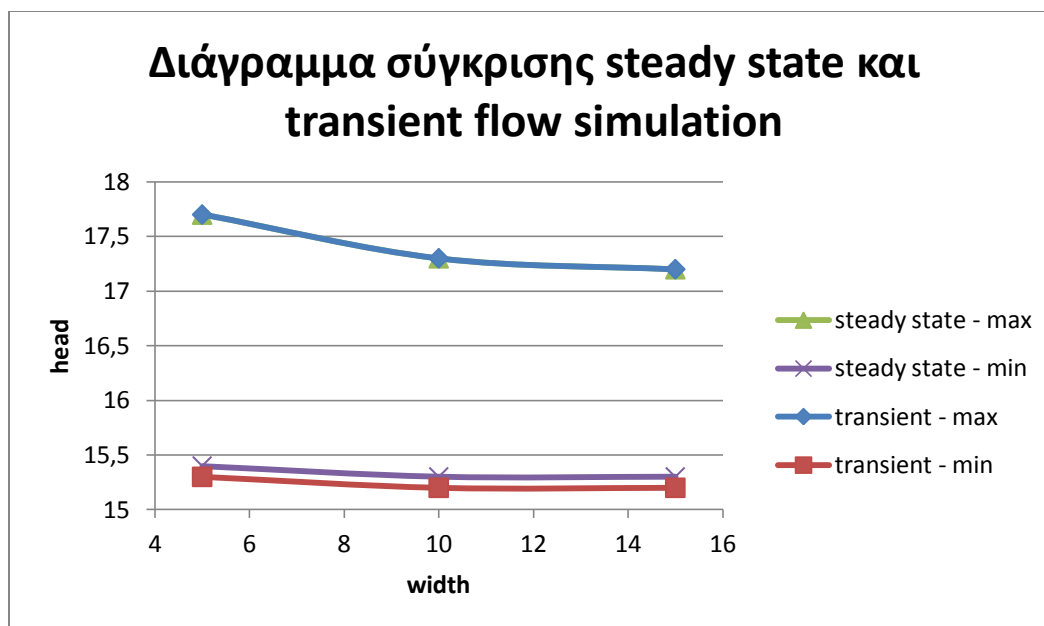
4.3.2 Σενάριο 2ο.

Τα αποτελέσματα από τις τρεις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με αλλαγή του είδους της προσομοίωσης παρουσιάζονται στις εικόνες 17, 18 και 19. Από τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ξανά η μικρότερη και η μεγαλύτερη τιμή ύψους στήλης νερού που υπολογίστηκε από το πρόγραμμα για κάθε προσομοίωση και κατασκευάστηκε ο πίνακας που ακολουθεί χρησιμοποιώντας και τις τιμές του προηγούμενου σεναρίου.

Πίνακας 3: Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 2^ο

width	steady state simulation		transient simulation	
	head		head	
	min	max	min	max
5	15,4	17,7	15,3	17,7
10	15,3	17,3	15,2	17,3
15	15,3	17,2	15,2	17,2

Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα δημιουργήθηκε το διάγραμμα που ακολουθεί.



Εικόνα 28: Διάγραμμα σύγκρισης steady state και transient flow simulation

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι για σταθερή τροφοδοσία του σχηματισμού και για σταθερό ύψος στήλης νερού στο όριο που απεικονίζει τον υδροφόρο ορίζοντα, οι τιμές υδραυλικού φορτίου που υπολογίζονται από την προσομοίωση δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Επομένως για αυτές τις συνθήκες προσομοίωσης δεν έχει σημασία αν θα πραγματοποιηθεί steady state simulation ή transient simulation.

Οι μικρές αυτές μεταβολές στις τιμές προέρχονται από τον τρόπο που λειτουργούν αυτά τα δύο είδη προσομοίωσης. Όταν πραγματοποιείται μία steady state simulation προσομοιάζεται μία σταθερή κατάσταση χωρίς να λαμβάνονται υπόψη αλλαγές που μπορεί να γίνονται με το πέρασμα των περιόδων προσομοίωσης, ενώ όταν πραγματοποιείται μία transient simulation προσομοιάζεται μία μεταβατική κατάσταση λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στον σχηματισμό με το πέρας της προηγούμενης περιόδου και χρησιμοποιούνται σαν αρχή για την επόμενη περίοδο προσομοίωσης.

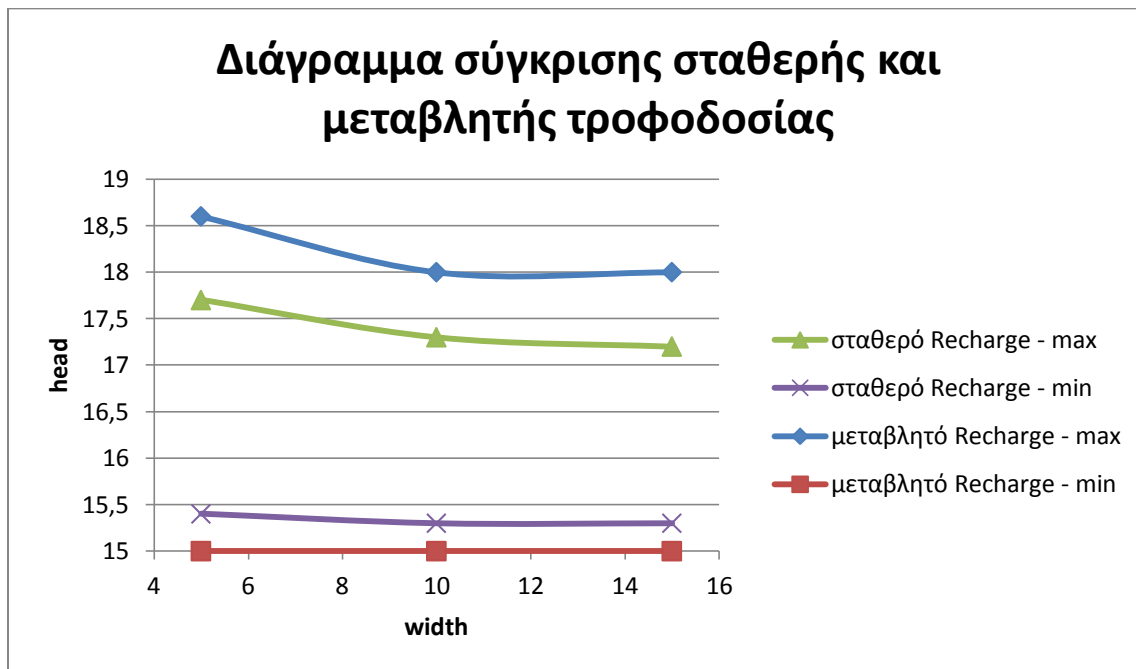
4.3.3 Σενάριο 3ο.

Τα αποτελέσματα από τις τρεις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για αυτό το σενάριο με αλλαγή του είδους της τροφοδοσίας παρουσιάζονται στις εικόνες 21, 22 και 23. Από τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για άλλη μία φορά η μικρότερη και η μεγαλύτερη τιμή ύψους στήλης νερού που υπολογίστηκε από το πρόγραμμα για κάθε προσομοίωση και κατασκευάστηκε ο πίνακας 4 χρησιμοποιώντας και τις τιμές που υπολογίστηκαν από την προσομοίωση του πρώτου σεναρίου.

Πίνακας 4: Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 3ο

width	stable recharge		variable recharge	
	head		head	
	min	max	min	max
5	15,4	17,7	15	18,6
10	15,3	17,3	15	18
15	15,3	17,2	15	18

Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα δημιουργήθηκε το διάγραμμα στην εικόνα 29.



Εικόνα 29: Διάγραμμα σύγκρισης σταθερής και μεταβλητής τροφοδοσίας

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι τα αποτελέσματα που θα εξέλθουν μετά το πέρας της προσομοίωσης επηρεάζονται από το είδος της τροφοδοσίας. Εάν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης προστίθεται στον σχηματισμό μία σταθερή τροφοδοσία τότε δεν θα υπάρχουν διακυμάνσεις στις τιμές του ύψους στήλης νερού που θα υπολογιστούν, αντιθέτως αν η τροφοδοσία είναι μεταβλητή κατά την διάρκεια της προσομοίωσης τότε θα υπάρχει αρκετά μεγάλη διαφοροποίηση στις υπολογιζόμενες τιμές. Η διακύμανση αυτή στις τιμές δηλώνει την διακύμανση του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα ανάλογα με την εποχή του χρόνου, παρουσιάζοντας το μέγιστο σημείο στην μέση περίπου του υδρολογικού έτους που είναι ο χειμώνας με τις έντονες βροχοπτώσεις και τον μηδενισμό της ανύψωσης της στάθμης του υδροφόρου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Η διακύμανση αυτή στις τιμές της στάθμης του νερού μέσα στο φράγμα μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντη για το συγκεκριμένο μοντέλο καθώς δεν δημιουργείται πιθανότητα υπερχειλίσσης του αναχώματος, αφού το συνολικό πάχος του μοντέλου έχει οριστεί στα 20 m.

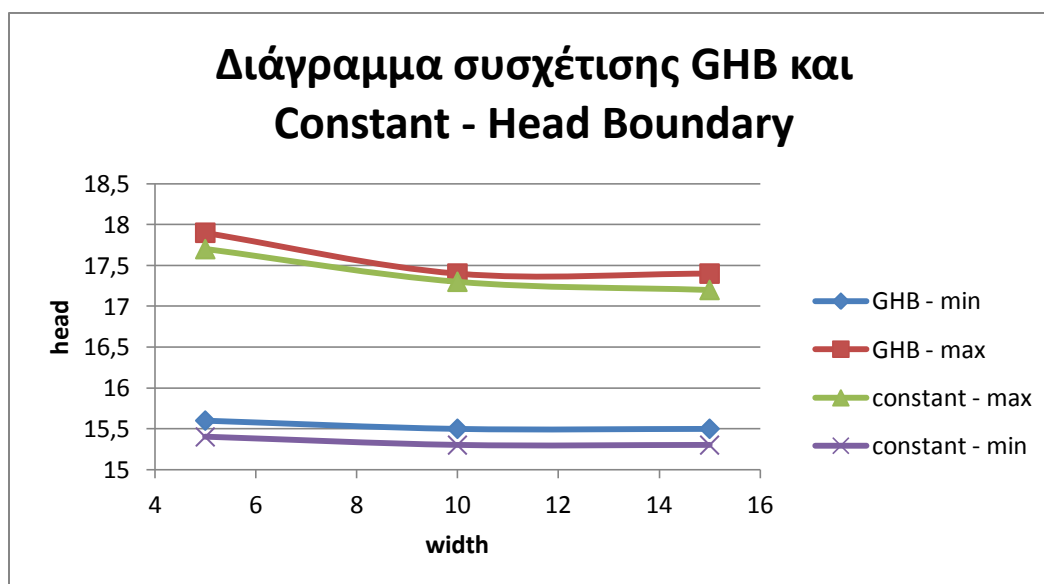
4.3.4 Σενάριο 4ο.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για αυτό το τελευταίο σενάριο με αλλαγή του είδους του ορίου του υδροφόρου παρουσιάζονται στις εικόνες 24, 25 και 26. Από τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν η μικρότερη και η μεγαλύτερη τιμή ύψους στήλης νερού που υπολογίστηκε από το πρόγραμμα για κάθε προσομοίωση και κατασκευάστηκε ο πίνακας που ακολουθεί χρησιμοποιώντας και τις τιμές που υπολογίστηκαν από την προσομοίωση του πρώτου σεναρίου.

Πίνακας 5: Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 4ο

width	Constant – head boundary		general – head boundary	
	head		head	
	min	max	min	max
5	15,4	17,7	15,6	17,9
10	15,3	17,3	15,5	17,4
15	15,3	17,2	15,5	17,4

Με την χρήση των αποτελεσμάτων που περιέχονται στον παραπάνω πίνακα κατασκευάστηκε το διάγραμμα που ακολουθεί για την ερμηνεία τους.



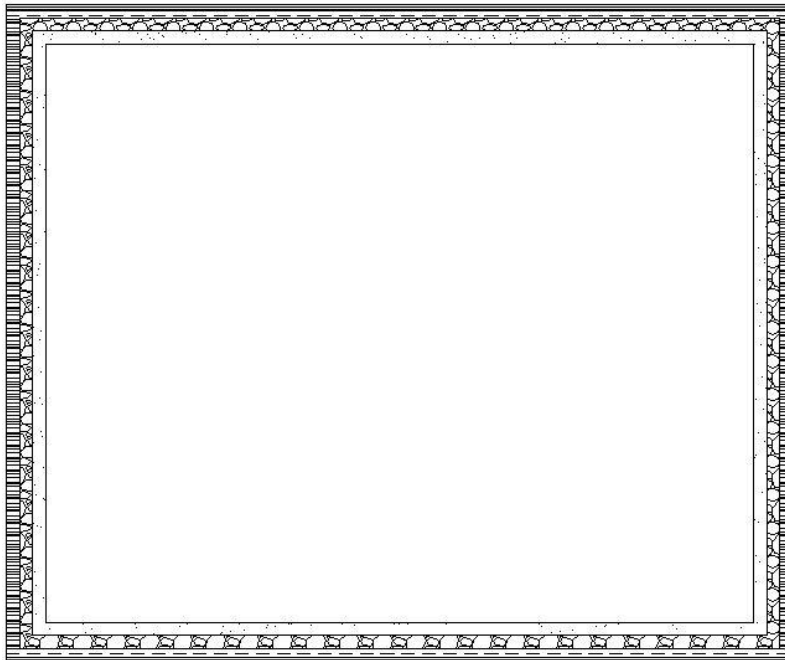
Εικόνα 30: Διάγραμμα συσχέτισης GHB και Constant Head Boundary

Με την βοήθεια του παραπάνω διαγράμματος παρατηρείται ότι η διαφοροποίηση των τιμών για τα ίδια σημεία παρατήρησης σε έναν σχηματισμό διαφέρουν ελάχιστα εξαρτώμενα από τον τρόπο καθορισμού του υδροφόρου ορίζοντα κατά την κατασκευή του μοντέλου. Παρατηρείται καταγραφή υψηλότερων τιμών όταν ο υδροφόρος ορίζοντας έχει οριστεί σαν GHB. Η διαφοροποίηση αυτή είναι αποδεκτή αφού όταν οριστεί ένα κελί στο μοντέλο σαν Constant Head Boundary η τιμή του δεν μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ αν το ίδιο κελί οριστεί σαν GHB η τιμή του μπορεί να μεταβληθεί κατά την προσομοίωση εξαρτώμενο από την ροή του ύδατος στον σχηματισμό.

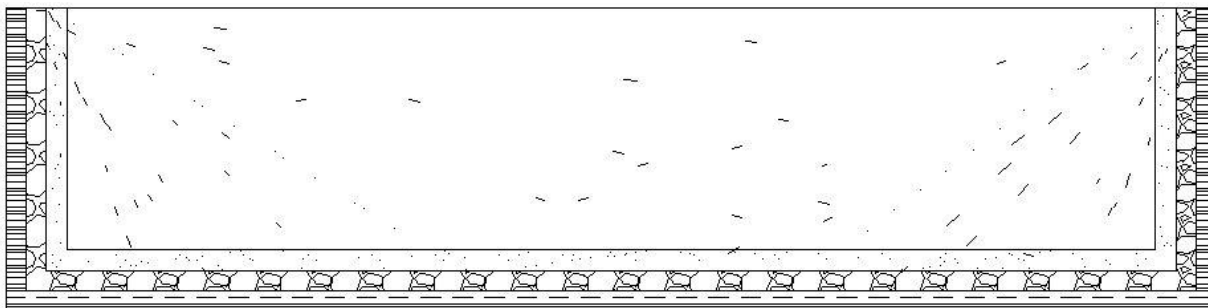
5. Μοντέλο ταμιευτήρα αποθήκευσης τελμάτων.

Ένα φράγμα τελμάτων όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, είναι ένα χωμάτινο φράγμα αποθήκευσης των τελμάτων που παράγονται από το εργοστάσιο εμπλουτισμού. Μία τυπική διάταξη φράγματος τελμάτων παρουσιάζεται στα σχήματα (κάτοψη και τομή) που ακολουθούν στην εικόνα 31 και 32. Η διάταξη αυτή του φράγματος περιλαμβάνει ένα σύστημα αποστράγγισης που περιβάλλει τον όγκο των τελμάτων και ένα αδιαπέρατο στρώμα που ελαττώνει την πιθανότητα διαρροών από το φράγμα. Το σύστημα αποστράγγισης περιλαμβάνει ένα στρώμα από άμμο που έρχεται σε επαφή με τα τέλματα στο φράγμα, γύρω από το στρώμα της άμμου υπάρχει ένα στρώμα από χαλίκια. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η εισροή των λεπτομερών υλικών των τελμάτων στο στρώμα των χαλικιών που θα είχε σαν αποτέλεσμα την πλήρωση των πόρων και την αστοχία του στραγγιστηρίου. Τέλος το αδιαπέρατο στρώμα αποτελείται από αργιλικό υλικό, όπως έχει παρουσιαστεί και σε προηγούμενη παράγραφο (Moldovan *et. al.*, 2008).

Στην κατασκευή του συγκεκριμένου μοντέλου απεικόνισης του φράγματος τελμάτων, τα τοιχώματα του φράγματος θεωρήθηκαν κάθετα για να μπορέσει να γίνει η διακριτοποίηση στον κώδικα Modflow.



Εικόνα 31: Κάτοψη φράγματος τελμάτων



Εικόνα 32: Τομή φράγματος τελμάτων

5.1 Σχεδιασμός του μοντέλου

Για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό της προσομοίωσης απαιτείται, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η εισαγωγή των ποσοτήτων του υδρολογικού ισοζυγίου του υδροφορέα στο μοντέλο προσομοίωσης καθώς και η μετατροπή του μεγέθους των βασικών γεωμετρικών και υδραυλικών παραμέτρων σε μορφή αναγνωρίσιμη από το υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο θα εισαχθούν. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε παραγράφους προηγούμενων κεφαλαίων, κατά την κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης, αρχικά επιλέγονται βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου όπως για παράδειγμα το μέγεθος του κανάβου προσομοίωσης, οι μονάδες των μεταβλητών που χρησιμοποιεί το μοντέλο κ.α. Οι επιλογές αυτές πραγματοποιούνται στα αρχικά παράθυρα που εμφανίζονται κατά την κατασκευή του μοντέλου και παραμένουν αμετάβλητες σε ολόκληρη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

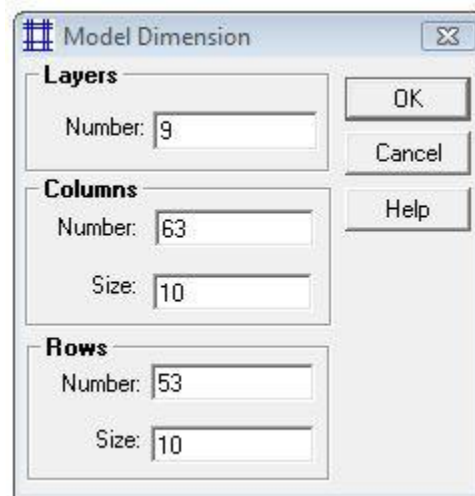
Βασικά βήματα ανάπτυξης του μοντέλου, αποτελούν η ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη σχηματισμού, η παρουσίαση και ανάλογη επεξεργασία του υδρολογικού ισοζυγίου και η κατάλληλη χρήση των υπορουτίνων του υπολογιστικού κώδικα για την εισαγωγή των απαραίτητων για την εκτέλεση της προσομοίωσης δεδομένων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο περιβάλλον εργασίας του κώδικα PMWin, υπάρχουν οι εξής δυνατότητες επιλογών: Η επιλογή Αρχείο (File) με την οποία μπορεί να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο ή μπορεί να ανοίξει για επεξεργασία ένα από τα υπάρχοντα μοντέλα. Η επιλογή διαμόρφωσης του πλέγματος (Grid) στην οποία εισάγονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κανάβου, το είδος των στρωμάτων και οι συνοριακές συνθήκες. Η επιλογή του καθορισμού των παραμέτρων (Parameters) στην οποία προσδιορίζονται οι χρονικές και οι χωρικές παράμετροι του μοντέλου. Η επιλογή εκτέλεσης της προσομοίωσης (Models) στην οποία είναι δυνατόν να επιλεχτεί η μηχανή επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και οι υπορουτίνες που θα χρησιμοποιηθούν, η επιλογή των εργαλείων (Tools) στην οποία επιλέγεται πιο εργαλείο θα χρησιμοποιηθεί όπως αυτά αναφέρονται στην ενότητα 3.5.1. καθώς και η επιλογή της βοήθειας του χρήστη (Help).

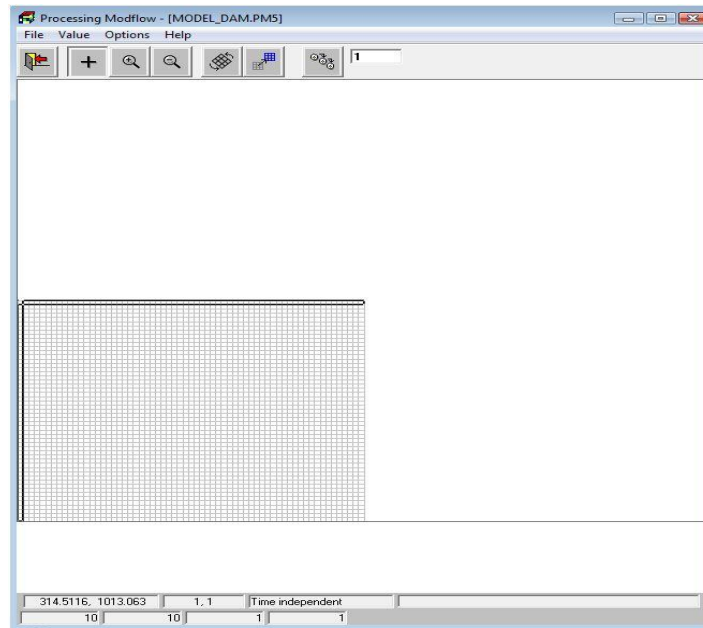
5.1.1 Ανάλυση γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Στα αρχικά στάδια κατασκευής του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν τα ίδια βήματα που ακολουθήθηκαν και στην ενότητα 4.1.1 και τα οποία κατά σειρά εμφάνισης στο περιβάλλον εργασίας του κώδικα είναι:

- Άνοιγμα καινούργιου φακέλου στην επιφάνεια εργασίας.
- Άνοιγμα του προγράμματος Modflow και επιλογή New από την επιλογή File που εμφανίζεται πάνω στην γραμμή εργαλείων (toolbar) του μοντέλου.
- Άνοιγμα του καινούργιου φακέλου από την επιφάνεια εργασίας μέσω του μοντέλου και καταχώρηση ονομασίας της εργασίας ως: model_dam. Κατόπιν αυτού αποθηκεύεται η εργασία (επιλογή Save).
- Επιλογή Mesh Size από το μενού Grid στην γραμμή εργαλείων.
- Επιλέγεται ο αριθμός των στρωμάτων να είναι ίσος με 9, ο αριθμός των στηλών είναι 63 και των γραμμών να είναι ίσος με 53 και το πλάτους τους ίσο με 10.
- Επιλέγεται OK και leave editor

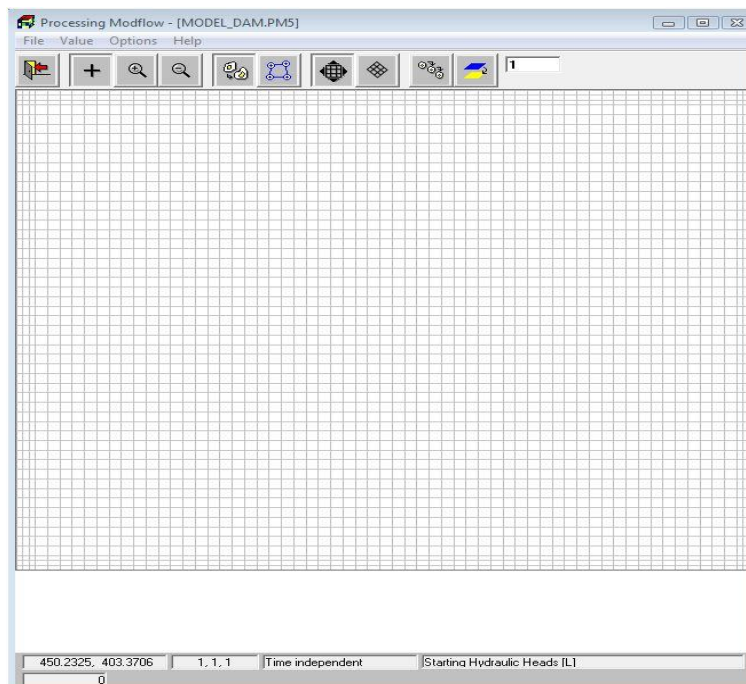


Εικόνα 33: Διαστάσεις του μοντέλου



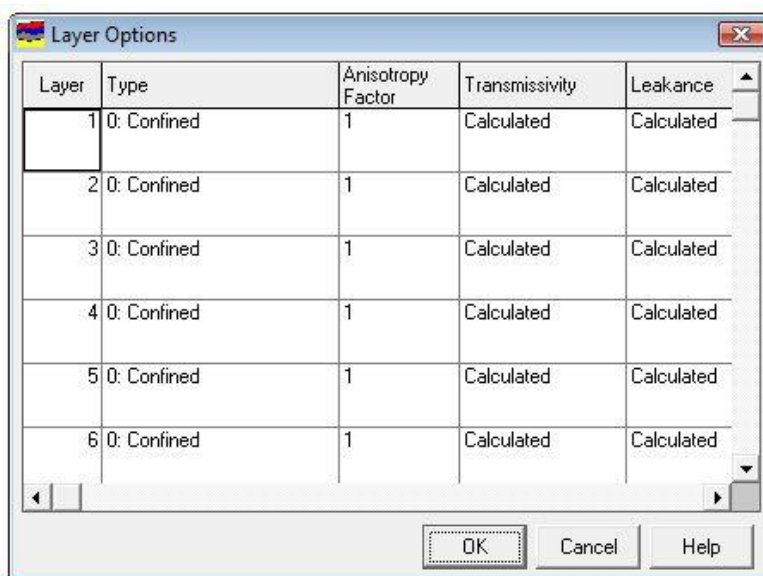
Εικόνα 34: Ο αρχικός κάναβος του μοντέλου

Στην συνέχεια έγινε αλλαγή του πλάτους των εξωτερικών στηλών και γραμμών από 10m σε 5m, ώστε να δημιουργηθούν τα στρώματα των στραγγιστηρίων και του αδιαπέρατου στρώματος.



Εικόνα 35: Ο τελικός κάναβος του μοντέλου

- Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστεί το είδος των στρωμάτων στο μοντέλο, επιλογή Layer type από την επιλογή Grid της γραμμής εργαλείων.
- Επιλογή 0: Confined για όλα στρώματα του σχηματισμού και μετά OK.



Εικόνα 36: Επιλογή του είδους των στρωμάτων

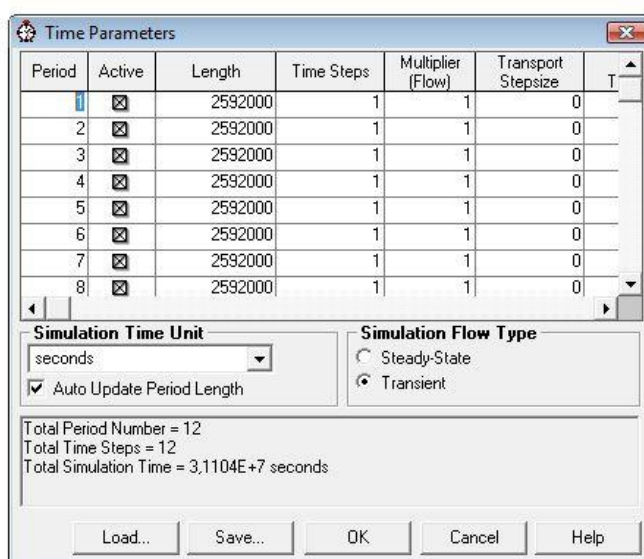
- Στην συνέχεια ορίζονται οι οριακές συνθήκες για το μοντέλο, επιλέγοντας Boundary Conditions > IBOUND (Modflow) της επιλογής Grid.
- Ορίζονται πατώντας δεξί κλικ στο επιθυμητό κελί την τιμή 1: για ενεργό κελί, (-1): για κελί με καθορισμένο ύψος στήλης νερού και 0: για ανενεργό κελί και μετά OK.

Για το συγκεκριμένο μοντέλο ορίζεται για όλα τα κελιά η τιμή 1, ώστε να είναι ενεργά κελιά και να λαμβάνουν μέρος στην προσομοίωση. Δεν υπάρχουν κελιά στο μοντέλο που να λαμβάνουν άλλη τιμή αφού δεν υπάρχει κάποιο όριο με υδροφόρο ορίζοντα ή ανενεργά κελιά.

- Έπειτα ορίζεται η γεωμετρία του μοντέλου, επιλέγοντας τις τιμές των υψομέτρων των στρωμάτων. Αυτό πραγματοποιείται με την επιλογή Top of Layers (TOP) από την επιλογή Grid και ορισμό των τιμών στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγοντας Reset Matrix από το μενού Value.
- Με τον ίδιο τρόπο ορίζονται και το βάθος του κάθε στρώματος. Επιλέγοντας Bottom of Layers (BOP) από την επιλογή Grid και ορισμό των τιμών στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγοντας Reset Matrix από το μενού Value.

5.1.2 Ανάλυση χρονικών παραμέτρων και χωρική διακριτοποίηση.

Αρχικά ορίζονται οι χρονικές παράμετροι, επιλέγοντας Time... από την επιλογή Parameters της γραμμής εργαλείων. Οι χρονικές παράμετροι περιλαμβάνουν την μονάδα του χρόνου που θα χρησιμοποιηθεί, τον αριθμό των περιόδων προσομοίωσης, τα βήματα σε κάθε χρόνο και το βήμα μεταφοράς. Στην παράγραφο 4.1.2 γίνεται εκτενέστερη αναφορά στην διαίρεση του χρόνου στον κώδικα Modflow. Για το συγκεκριμένο μοντέλο ορίστηκαν 12 περίοδοι για την προσομοίωση με διάρκεια 30 ημερών, επομένως $86400 \text{ s/day} \cdot 30 \text{ days/month} = 2592000 \text{ s/month}$ και το βήμα σε κάθε χρόνο είναι ένα. Το είδος της προσομοίωσης θα είναι transient flow simulation για το συγκεκριμένο μοντέλο, επειδή λόγω της μικρής περατότητας που έχουν τα στρώματα δεν μπορεί να προσομοιωθεί η ροή του νερού ανάμεσα στα στρώματα με steady state flow simulation.



Εικόνα 37: Ορισμός χρονικών παραμέτρων

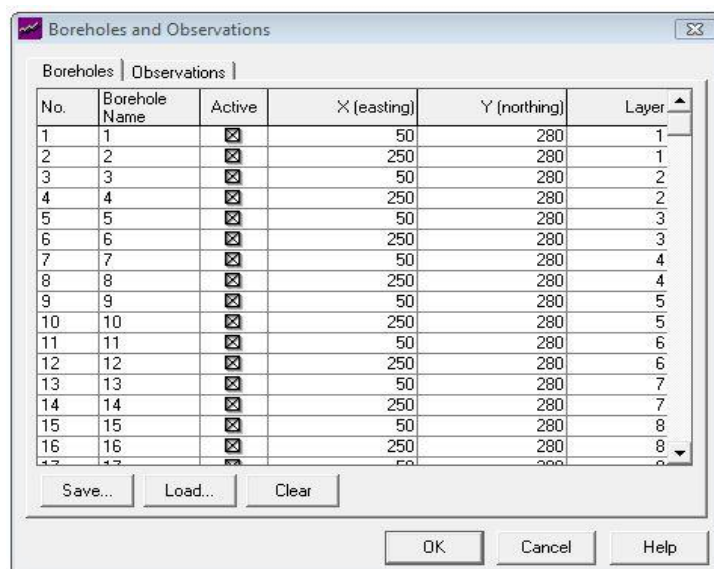
Στην συνέχεια ορίζονται οι αρχικές τιμές του ύψους του νερού για κάθε κελί, οι τιμές αυτές αλλάζουν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Τα μόνα κελιά που διατηρούν σταθερή την αρχική αυτή τιμή χωρίς να επηρεάζονται από την προσομοίωση είναι αυτά που έχουν οριστεί ως σταθερά κελιά (fixed head boundary). Επίσης η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει τον βαθμό κορεσμού του μοντέλου πριν την προσομοίωση. Αυτές οι αρχικές τιμές ορίζονται από την επιλογή Initial Hydraulic Heads από την επιλογή Parameters της γραμμής εργαλείων. Στο μοντέλο που δημιουργήθηκε η αρχική τιμή των κελιών είναι 75m επειδή το μοντέλο είναι κορεσμένο. Η τιμή αυτή του ύψους στήλης νερού μπορεί να αλλάξει κατά την προσομοίωση αφού κανένα κελί στο μοντέλο δεν έχει οριστεί σαν fixed head boundary.

Έπειτα ορίζεται η οριζόντια και η κάθετη αγωγιμότητα των στρωμάτων (horizontal and vertical conductivity). Ο ορισμός των τιμών τους πραγματοποιείται από τις αντίστοιχες επιλογές του μενού Parameters της γραμμής εργαλείων. Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που φαίνονται στον πίνακα 6, ανάλογα με το υλικό που αντιπροσωπεύει το κάθε κελί.

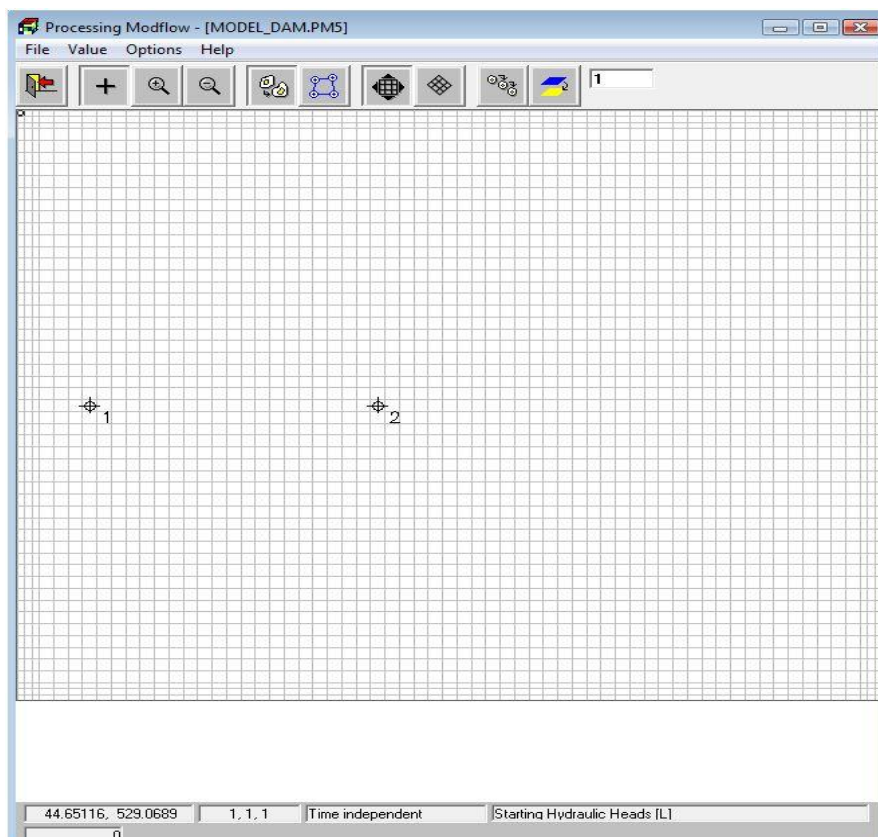
Πίνακας 6: Τιμές παραμέτρων των υλικών του φράγματος (Moldovan *et. al.*, 2008)

Parameter	Tailings body	Sand	Coarse rock Drain	Impervious layer
Horizontal hydraulic conductivity	10^{-5} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s
Vertical hydraulic conductivity	10^{-5} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s
Effective porosity	0,36	0,30	0,30	0,10
Specific storage	0,1 1/m	0,1 1/m	0,1 1/m	0,1 1/m

Για να μπορεί να γίνει εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε γράφημα πρέπει να οριστούν κάποια σημεία παρατήρησης, όπου θα μπορεί να καταγραφεί η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου με τον χρόνο στην διάρκεια της προσομοίωσης, όπως έγινε και στο μοντέλο για την εύρεση της ευαισθησίας του κώδικα. Τα σημεία αυτά ορίζονται στην επιλογή Boreholes and Observations στο μενού Parameters της γραμμής εργαλείων.



Εικόνα 38: Εισαγωγή σημείων παρατήρησης



Εικόνα 39: Σημεία παρατήρησης στον κάναβο στρώμα 1

Στις ίδιες συντεταγμένες είναι τα σημεία παρατήρησης και για τα υπόλοιπα στρώματα του μοντέλου

Άλλος ένας παράγοντας που πρέπει να οριστεί στο μοντέλο είναι η τιμή του ενεργού πορώδους. Επιλέγοντας την αντίστοιχη εντολή από την επιλογή Parameters, ορίστηκε η τιμή του ενεργού πορώδους που αναφέρεται στον παραπάνω πίνακα μαζί με τις υπόλοιπες παραμέτρους για κάθε υλικό.

5.1.3 Διαμόρφωση του μοντέλου προσομοίωσης με χρήση υπορουτίνων

Στην παρούσα ενότητα αναπτύσσεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης με χρήση των εντολών – υπορουτίνων του κώδικα Modflow. Οι υπορουτίνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Recharge (εμπλουτισμός).
- Well (γεωτρήσεις άντλησης).

Η χρήση των υπορουτίνων και η εισαγωγή δεδομένων σε αυτές παρουσιάζονται στην συνέχεια:

- Recharge (εμπλουτισμός).

Η υπορουτίνα Recharge χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μιας πραγματικά διανεμημένης τροφοδοσίας του συστήματος υπόγειων υδάτων. Επομένως η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται στην περίπτωση τροφοδοσίας από τις πηγές και της κατείδυσης της βροχόπτωσης. Για την χρήση του πακέτου αυτού απαιτείται ο ορισμός του μεγέθους του εμπλουτισμού της ροής καθώς επίσης και ο προσδιορισμός των κελιών που θα δεχθούν αυτόν τον εμπλουτισμό. Το πακέτο δίνει τρεις επιλογές: 1) η τροφοδοσία εφαρμόζεται μόνο στα κελιά του ανώτερου στρώματος, 2) κατακόρυφη κατανομή της τροφοδοσίας που καθορίζεται από τον δείκτη I_{RCH} , ο οποίος καθορίζει το στρώμα όπου εφαρμόζεται η τροφοδοσία και 3) η τροφοδοσία εφαρμόζεται στο υψηλότερο ενεργό κελί σε κάθε κατακόρυφη στήλη. Ο χρήστης σε αυτήν την περίπτωση δεν χρειάζεται να προκαθορίσει το στρώμα στο οποίο θα εφαρμοστεί ο εμπλουτισμός. Η κατάλληλη στρώση επιλέγεται αυτόματα από την υπορουτίνα. Αν το υψηλότερο ενεργό κελί είναι ένα κελί με σταθερό υδραυλικό φορτίο, η τροφοδοσία θα παρεμποδιστεί και δεν θα μπορεί να πάει βαθύτερα (Chiang & Kinzelbach, 1998).

Στον σχεδιασμό του συγκεκριμένου μοντέλου η τροφοδοσία αποτελείται από τα κατακρημνίσματα της βροχής, τα οποία όμως μειώνονται από την εξατμισοδιαπνοή που έχει η περιοχή. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την βροχόπτωση προέρχονται από μετρήσεις στην περιοχή των Χανίων για το έτος 2011, από τα δεδομένα αυτά προσδιορίστηκε ότι η μεγαλύτερη βροχόπτωση που καταγράφηκε ήταν περίπου 120 mm/month οπότε η βροχόπτωση αυτή αναλογεί σε 4mm/day. Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε μία τιμή $3 \text{ mm/day} = 3,5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ όταν η τροφοδοσία παραμένει σταθερή και για την περίπτωση που η τροφοδοσία είναι μεταβλητή κατασκευάστηκε μία κατανομή για την βροχόπτωση με την βοήθεια του προγράμματος excel, λαμβάνοντας υπόψη το ύψος της βροχόπτωσης και το μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής (meteo.gr). Οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής στην περιοχή προέρχονται από μετρήσεις για το έτος 2008 (Σκαραντωνάκης, 2010), οπότε η τιμή της τροφοδοσίας για κάθε περίοδο διέπεται από την σχέση: $\text{Recharge} = \text{Precipitation} - \text{Evapotranspiration}$. Τέλος ο εμπλουτισμός εφαρμόστηκε μόνο στο πρώτο στρώμα αφού προέρχεται μόνο από την βροχόπτωση.

- Well (γεωτρήσεις άντλησης).

Η υπορουτίνα Well χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μίας γεώτρησης άντλησης ή μίας γεώτρησης έκχυσης νερού στον σχηματισμό. Για την χρήση του πακέτου αυτού απαιτείται αρχικά ο ορισμός της θέσης της γεώτρησης και στην συνέχεια ο ορισμός του βαθμού της παροχής από την γεώτρηση. Ακόμα για να γίνει ορισμός στον κώδικα εάν η γεώτρηση είναι άντλησης ή έκχυσης αλλάζει το πρόσημο που ορίζεται μαζί με την παροχή. Ένα αρνητικό πρόσημο στην παροχή που ορίζεται στο κελί της γεώτρησης ορίζει μία γεώτρηση άντλησης για τον κώδικα. Αντίστοιχα ένα θετικό πρόσημο στην παροχή ορίζει μία γεώτρηση έκχυσης ρευστού στον σχηματισμό.

Ο ρυθμός άντλησης ή έκχυσης μίας γεώτρησης είναι σταθερός κατά την διάρκεια μίας συγκεκριμένης περιόδου προσομοίωσης και είναι ανεξάρτητος από την περιοχή του κελιού και από το ύψος στήλης νερού στο κελί. Ο κώδικας Modflow κάνει την παραδοχή ότι η γεώτρηση διατρέχει το πλήρες πάχος του κελιού. Το Modflow μπορεί να προσομοιάσει γεωτρήσεις που διαπερνά περισσότερα από ένα στρώμα στον σχηματισμό. Σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμός άντλησης της γεώτρησης πρέπει να οριστεί για κάθε στρώμα ξεχωριστά. Ο συνολικός ρυθμός άντλησης για μία πολυστρωματική γεώτρηση είναι ίσος με το άθροισμα των ρυθμών των μεμονωμένων στρωμάτων. Για περιορισμένα (confined) στρώματα, ο ρυθμός άντλησης για κάθε στρώμα (Q_k) μπορεί να προσδιοριστεί κατά προσέγγιση με διαίρεση του συνολικού βαθμού άντλησης (Q_{total}) κατ' αναλογία με τις μεταβιβαστικότητες των στρωμάτων (Chiang & Kinzelbach, 1998).

$$Q_k = Q_{total} \cdot \frac{T_k}{\Sigma T}$$

Όπου, T_k είναι η μεταβιβαστικότητα του στρώματος k και ΣT είναι το άθροισμα των μεταβιβαστικοτήτων όλων των στρωμάτων που διαπερνά η γεώτρηση.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο η γεώτρηση διαπερνά όλα τα στρώματα εκτός από το τελευταίο στρώμα που είναι το αδιάπερατο στρώμα και είναι τοποθετημένη στο κελί (32,27), δηλαδή στην μέση περίπου του όγκου των τελμάτων. Ο ρυθμός άντλησης είναι ίδιος για όλες τις περιόδους της προσομοίωσης που χρησιμοποιείται η άντληση του νερού από το φράγμα.

5.2 Παρουσίαση και ανάλυση σεναρίων μεταβολής συνθηκών στο μοντέλο

Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας, δηλαδή για να γίνει η παραμετρική διερεύνηση του σχεδιασμού ενός φράγματος τελμάτων, πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στις συνθήκες σχεδιασμού που ισχύουν στο μοντέλο και καταγράφηκαν οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν. Για την διερεύνηση αυτή επιλέχθηκαν να μελετηθούν τέσσερις διαφορετικές παράμετροι που λαμβάνουν μέρος στον σχεδιασμό του μοντέλου. Οι παράμετροι αυτοί που μελετήθηκαν είναι η περατότητα των σχηματισμών, η παροχή της γεώτρησης άντλησης, η τροφοδοσία του μοντέλου από την βροχόπτωση και ο κορεσμός του μοντέλου. Κάθε μία από τις μεταβλητές θα λαμβάνει διαφορετικές τιμές και θα καταγράφονται τα αποτελέσματα της κάθε προσομοίωσης.

- 1^ο σενάριο: μελέτη περατότητας σχηματισμών.

Η μελέτη των αποτελεσμάτων από την αλλαγή της διαπερατότητας γίνεται με την αλλαγή της υδραυλικής αγωγιμότητας (κάθετης και οριζόντιας) των στρωμάτων. Οι παράμετροι σχεδιασμού που διατηρήθηκαν σταθερές κατά την προσομοίωση των διαφορετικών καταστάσεων διαπερατότητας είναι:

- Το ενεργό πορώδες έλαβε τις τιμές που αναφέρονται στον πίνακα της παραγράφου 5.1.2.

- Η μεταβλητή Specific Storage παρέμεινε αμετάβλητη με τιμή 0,1 1/m
- Το αρχικό ύψος νερού (initial hydraulic head) του μοντέλου ορίστηκε στα 75m, αφού θεωρείται πλήρως κορεσμένο.
- Οι τιμές των υδραυλικών αγωγιμοτήτων οριζόντιων και κάθετων για τα υλικά του στραγγιστηρίου και του αδιαπέρατου στρώματος παραμένουν σταθερές, αλλάζει μόνο η τιμή στα στρώματα τελμάτων.
- Η τροφοδοσία του μοντέλου (recharge) αποτελείται μόνο από την βροχόπτωση και όπως αναφέρεται παραπάνω συνυπολογίζεται σε αυτήν και η εξατμισοδιαπνοή από την επιφάνεια του φράγματος. Οι τιμές της τροφοδοσίας μετά την αφαίρεση της εξατμισοδιαπνοής από την βροχόπτωση παρουσιάζεται στον πίνακα 7 που ακολουθεί.

Πίνακας 7: Τροφοδοσία μοντέλου

periods	recharge(m/s)
1	3,45679E-08
2	4,12423E-08
3	6,17284E-09
4	-1,81327E-09
5	-1,83642E-08
6	-4,94599E-08
7	-5,90278E-08
8	-6,03395E-08
9	-3,43364E-08
10	2,19136E-08
11	6,55864E-10
12	2,07948E-08

Η αντιστοιχία της αρίθμησης των περιόδων προσομοίωσης με τους ημερολογιακούς μήνες είναι: η πρώτη περίοδος αντιπροσωπεύει τον μήνα Ιανουάριο, η δεύτερη περίοδος αντιπροσωπεύει τον Φεβρουάριο κλπ.

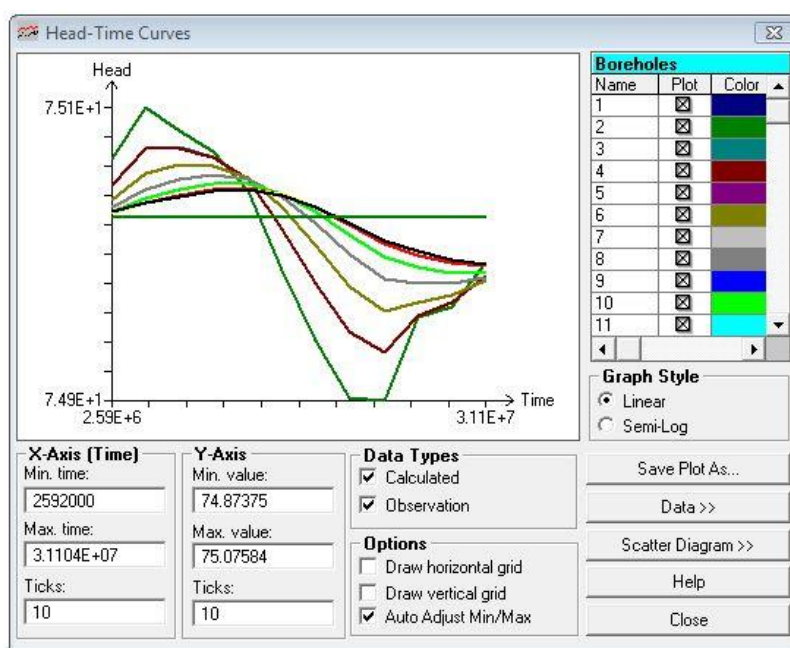
Στο σενάριο αυτό της μελέτης πραγματοποιήθηκαν 8 προσομοιώσεις που η κάθε μία παρουσίαζε μία διαφορετική περίπτωση διαπερατότητας. Οι τιμές της αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά παρουσιάζονται στον πίνακα που προηγείται από το διάγραμμα που προήλθε από την εκτέλεση του κώδικα Modflow.

1^η περίπτωση: Η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα είναι 2 τάξεις μεγέθους μικρότερη από την κάθετη.

Πίνακας 8: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 1^η περίπτωση

Parameter	Tailings body	Sand	Coarse rock Drain	Impervious layer
Horizontal hydraulic conductivity	10^{-7} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s
Vertical hydraulic conductivity	10^{-5} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s

Το διάγραμμα που δημιουργήθηκε είναι:



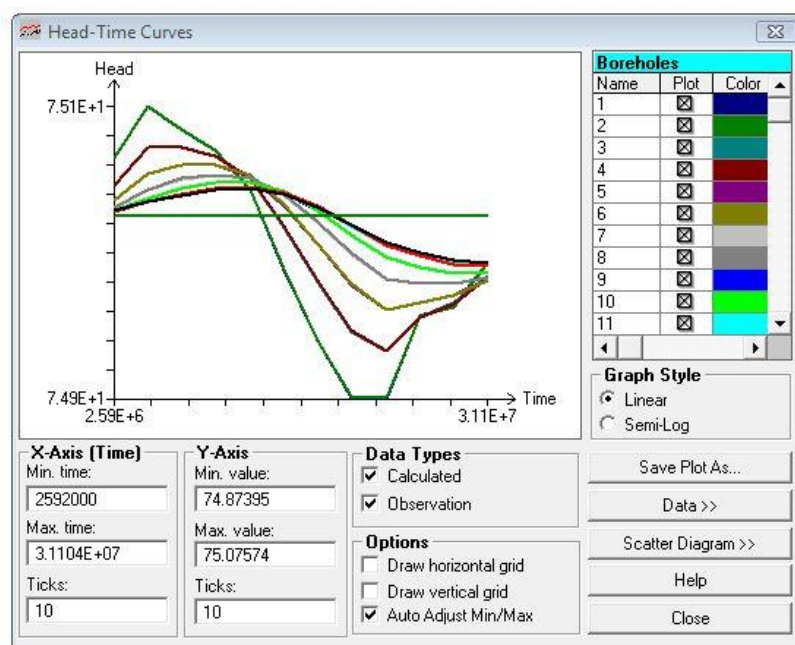
Εικόνα 40: Οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-7} m/s

2^η περίπτωση: Η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα είναι 1 τάξη μεγέθους μικρότερη από την κάθετη.

Πίνακας 9: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 2^η περίπτωση

Parameter	Tailings body	Sand	Coarse rock Drain	Impervious layer
Horizontal hydraulic conductivity	10^{-6} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s
Vertical hydraulic conductivity	10^{-5} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s

Το διάγραμμα που προήλθε από τις παραπάνω τιμές είναι:



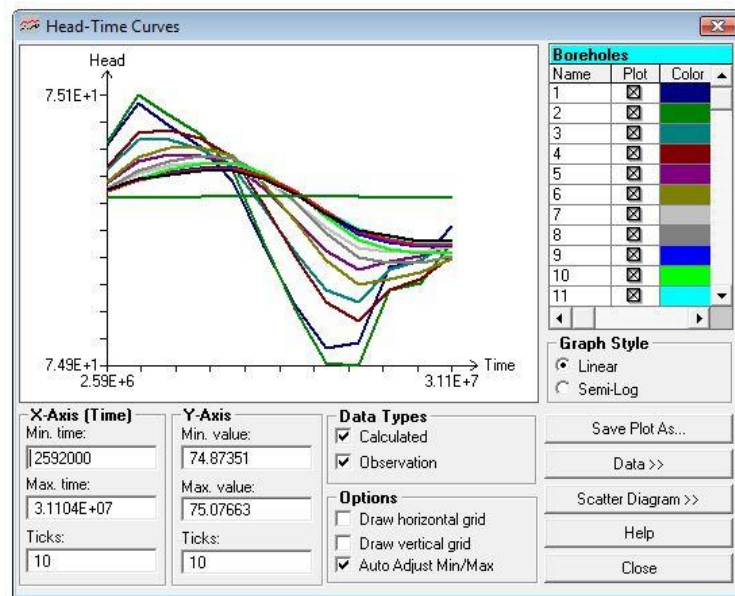
Εικόνα 41: Οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-6} m/s

3^η περίπτωση: Η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα είναι ίδιας τάξης μεγέθους με την κάθετη.

Πίνακας 10: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 3^η περίπτωση

Parameter	Tailings body	Sand	Coarse rock Drain	Impervious layer
Horizontal hydraulic conductivity	10^{-5} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s
Vertical hydraulic conductivity	10^{-5} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s

Το διάγραμμα που κατασκευάστηκε είναι:



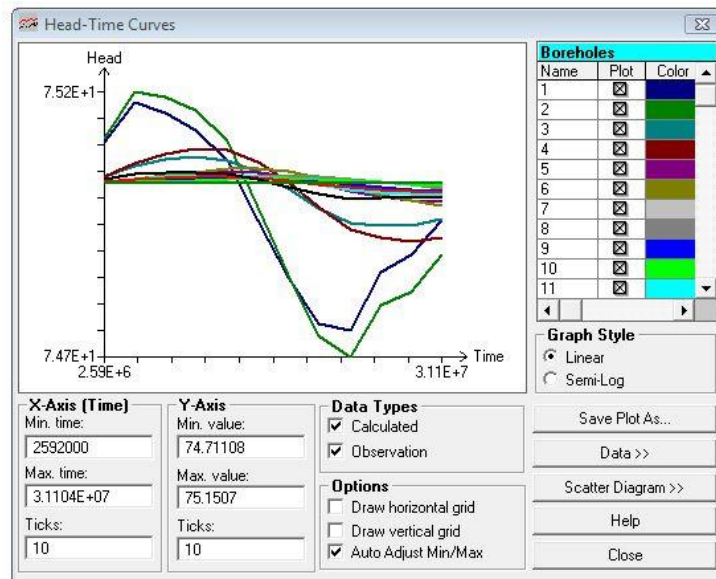
Εικόνα 42: Οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-5} m/s

4^η περίπτωση: Η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα είναι 1 τάξη μεγέθους μικρότερη από την οριζόντια.

Πίνακας 11: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 4^η περίπτωση

Parameter	Tailings body	Sand	Coarse rock Drain	Impervious layer
Horizontal hydraulic conductivity	10^{-5} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s
Vertical hydraulic conductivity	10^{-6} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s

Το διάγραμμα για τις παραπάνω τιμές είναι:



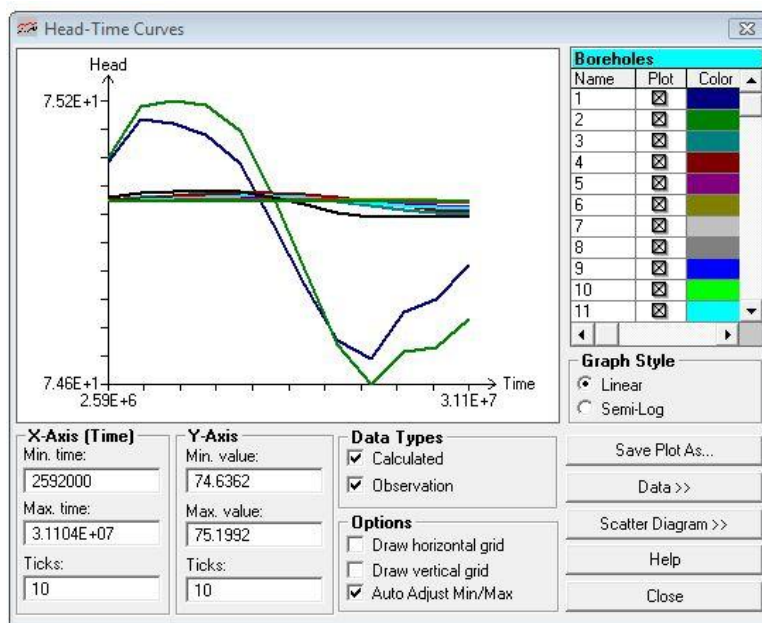
Εικόνα 43: Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-6} m/s

5^η περίπτωση: Η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα είναι 2 τάξεις μεγέθους μικρότερη από την οριζόντια.

Πίνακας 12: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 5^η περίπτωση

Parameter	Tailings body	Sand	Coarse rock Drain	Impervious layer
Horizontal hydraulic conductivity	10^{-5} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s
Vertical hydraulic conductivity	10^{-7} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s

Το διάγραμμα που κατασκευάστηκε είναι:



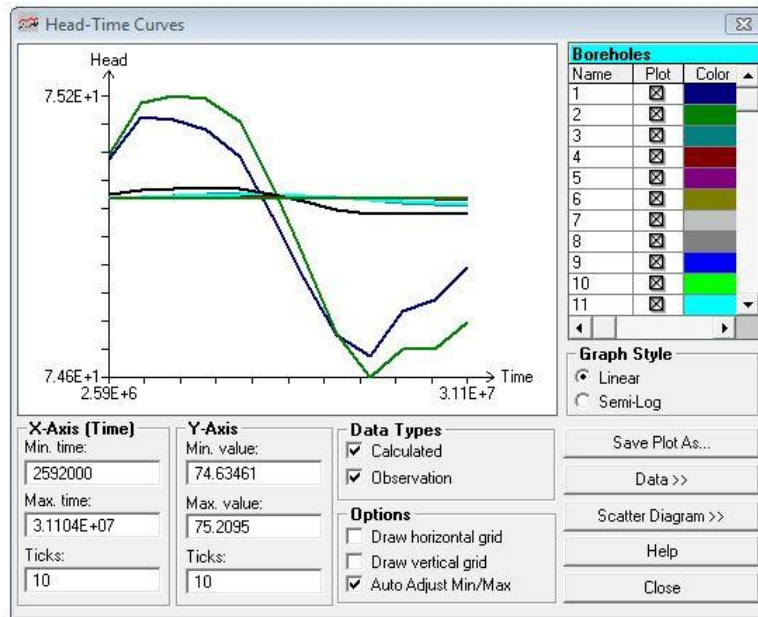
Εικόνα 44: Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-7} m/s

6^η περίπτωση: Η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα είναι 3 τάξεις μεγέθους μικρότερη από την οριζόντια.

Πίνακας 13: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 6^η περίπτωση

Parameter	Tailings body	Sand	Coarse rock Drain	Impervious layer
Horizontal hydraulic conductivity	10^{-5} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s
Vertical hydraulic conductivity	10^{-8} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s

Το διάγραμμα που προήλθε από την προσομοίωση είναι:



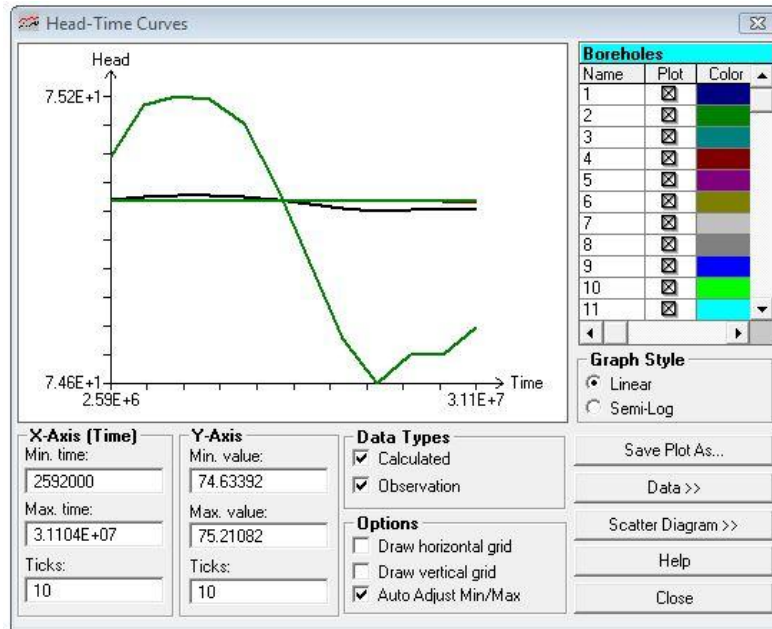
Εικόνα 45: Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-8} m/s

7^η περίπτωση: Η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα είναι 1 τάξη μεγέθους μικρότερη από την οριζόντια.

Πίνακας 14: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 7^η περίπτωση

Parameter	Tailings body	Sand	Coarse rock Drain	Impervious layer
Horizontal hydraulic conductivity	10^{-7} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s
Vertical hydraulic conductivity	10^{-8} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s

Στην περίπτωση αυτή τα τέλματα είναι σχεδόν αδιαπέρατα. Το διάγραμμα που προήλθε από την προσομοίωση είναι:



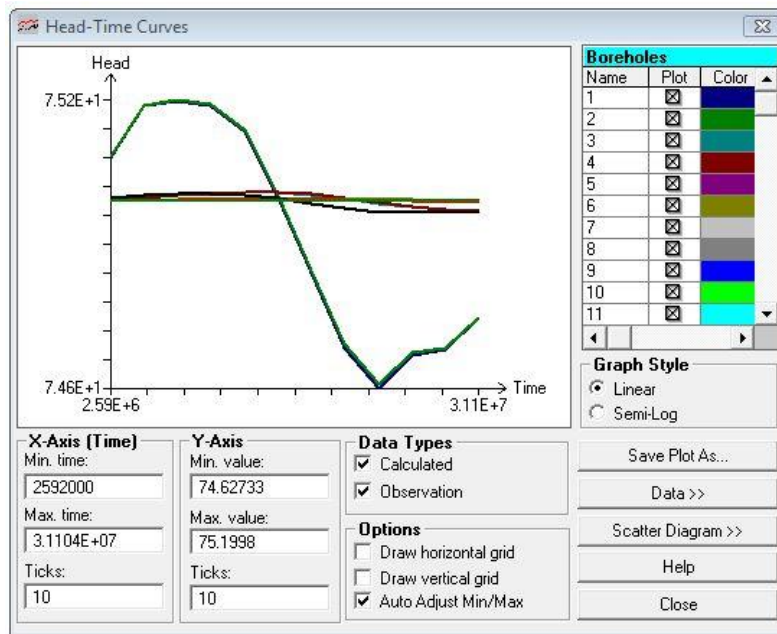
Εικόνα 46: Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-8} m/s, οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-7} m/s

8^η περίπτωση: Η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα είναι 1 τάξη μεγέθους μικρότερη από την οριζόντια.

Πίνακας 15: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 8^η περίπτωση

Parameter	Tailings body	Sand	Coarse rock Drain	Impervious layer
Horizontal hydraulic conductivity	10^{-6} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s
Vertical hydraulic conductivity	10^{-7} m/s	10^{-4} m/s	10^{-1} m/s	10^{-9} m/s

Στην περίπτωση αυτή τα τέλματα είναι ημι – περατοί σχηματισμοί. Το διάγραμμα που κατασκευάστηκε είναι:



Εικόνα 47: Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-7} m/s, οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-6} m/s

- 2^ο σενάριο: μελέτη ρυθμού άντλησης γεώτρησης.

Η μελέτη των αποτελεσμάτων από την αλλαγή του ρυθμού άντλησης της γεώτρησης γίνεται με την αλλαγή της παροχής άντλησης από όλα τα στρώματα του μοντέλου. Οι παράμετροι σχεδιασμού που διατηρήθηκαν σταθερές κατά την προσομοίωση των διαφορετικών καταστάσεων ρυθμού άντλησης είναι:

- Το ενεργό πορώδες έλαβε τις τιμές που αναφέρονται στον πίνακα της ενότητας 5.1.2.
- Η μεταβλητή Specific Storage παρέμεινε αμετάβλητη με τιμή 0,1 1/m
- Το αρχικό ύψος νερού (initial hydraulic head) του μοντέλου ορίστηκε στα 75m, αφού θεωρείται πλήρως κορεσμένο.
- Οι τιμές των υδραυλικών αγωγιμοτήτων οριζόντιων και κάθετων για τα υλικά του μοντέλου αναφέρονται στον πίνακα στην παράγραφο 5.1.2. και διατηρήθηκαν σταθερές σε όλα τα στρώματα.
- Η τροφοδοσία του μοντέλου (recharge) αποτελείται μόνο από την βροχόπτωση και όπως αναφέρεται παραπάνω συνυπολογίζεται σε αυτήν και η εξατμισοδιαπνοή από την επιφάνεια του φράγματος. Ο πίνακας με τις τιμές της τροφοδοσίας μετά την αφαίρεση της εξατμισοδιαπνοής από την βροχόπτωση παρουσιάζεται στο προηγούμενο σενάριο μελέτης.

Στο σενάριο αυτό της μελέτης πραγματοποιήθηκαν 8 προσομοιώσεις που η κάθε μία παρουσίαζε μία διαφορετική περίπτωση άντλησης. Η διαφοροποίηση σε κάθε προσομοίωση αφορά είτε την παροχή άντλησης της γεώτρησης

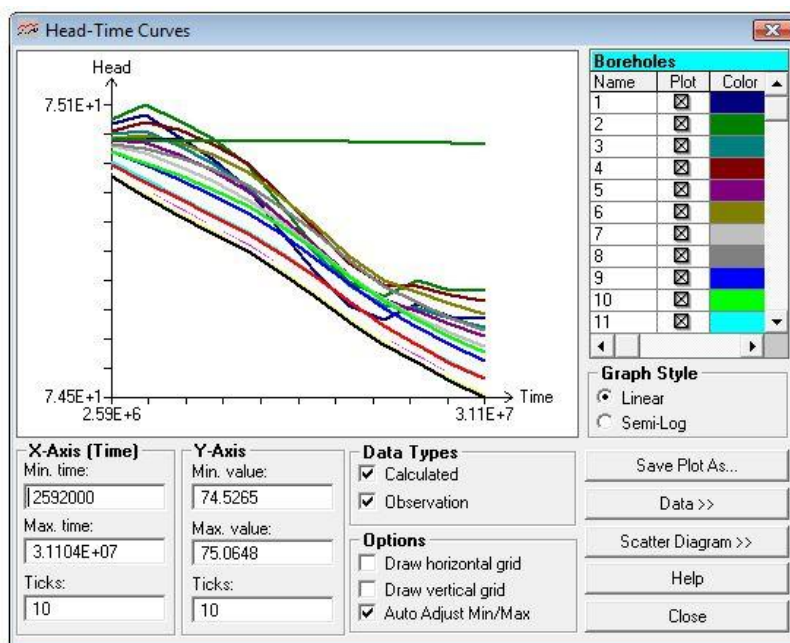
είτε την περίοδο που θα διαρκεί η άντληση. Η γεώτρηση άντλησης τοποθετήθηκε στο κέντρο σχεδόν του φράγματος, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 5.1.3. Στην ίδια ενότητα δίνεται η εξίσωση υπολογισμού του ρυθμού άντλησης από κάθε στρώμα.

1^η περίπτωση: παροχή $Q_{\text{total}} = 2000 \text{ m}^3/\text{day} = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$ σταθερή όλο τον χρόνο.

Πίνακας 16: Πίνακας τιμών παροχής ανά στρώμα

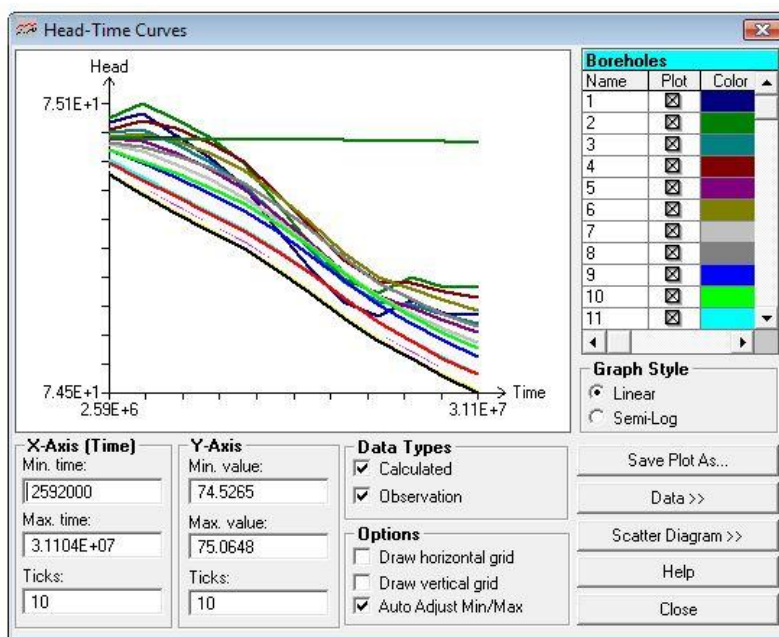
layer	Tk	Tk/ΣT	Qk
1	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$4.577 \cdot 10^{-6}$
2	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$4.577 \cdot 10^{-6}$
3	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$4.577 \cdot 10^{-6}$
4	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$4.577 \cdot 10^{-6}$
5	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$4.577 \cdot 10^{-6}$
6	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$4.577 \cdot 10^{-6}$
7	$5 \cdot 10^{-4}$	$9.98 \cdot 10^{-4}$	$2.295 \cdot 10^{-5}$
8	$5 \cdot 10^{-1}$	0.998	0.0229
Sum	0.5011		

Το διάγραμμα που δημιουργήθηκε από την προσομοίωση είναι:



Εικόνα 48: Παροχή $Q_{\text{total}} = 2000 \text{ m}^3/\text{day}$ όλο τον χρόνο

2^η περίπτωση: παροχή $Q_{\text{total}} = 2000 \text{ m}^3/\text{day} = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$ σταθερή. Άντληση τους τέσσερις πρώτους μήνες του έτους. Οι παροχές άντλησης αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα για κάθε στρώμα και το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι:



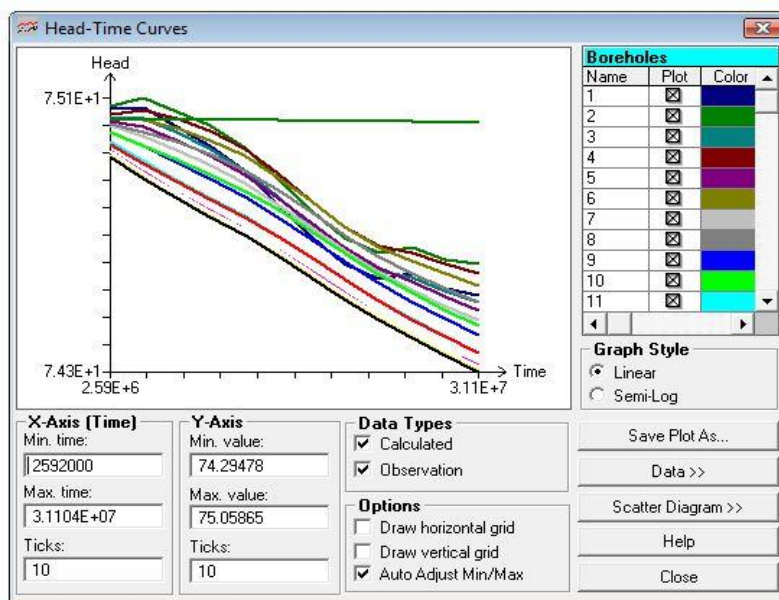
Εικόνα 49: Παροχή $Q_{\text{total}} = 2000 \text{ m}^3/\text{day}$ τους τέσσερις πρώτους μήνες του έτους.

3^η περίπτωση: παροχή $Q_{\text{total}} = 3000 \text{ m}^3/\text{day} = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}$ σταθερή όλο τον χρόνο.

Πίνακας 17: Πίνακας τιμών παροχής ανά στρώμα

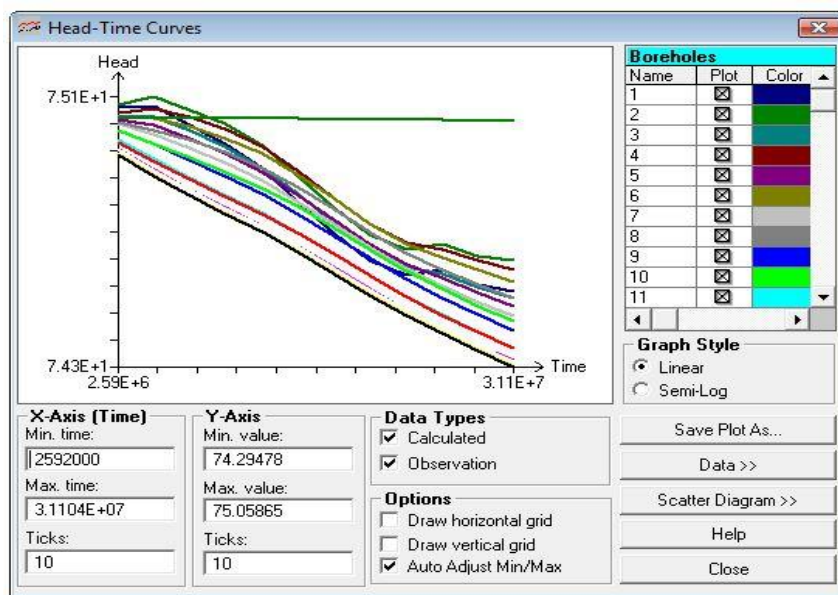
layer	Tk	Tk/ΣΤ	Qk
1	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$6.965 \cdot 10^{-6}$
2	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$6.965 \cdot 10^{-6}$
3	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$6.965 \cdot 10^{-6}$
4	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$6.965 \cdot 10^{-6}$
5	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$6.965 \cdot 10^{-6}$
6	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$6.965 \cdot 10^{-6}$
7	$5 \cdot 10^{-4}$	$9.98 \cdot 10^{-4}$	$3.493 \cdot 10^{-5}$
8	$5 \cdot 10^{-1}$	0.998	0.0349
Sum	0.5011		

Το διάγραμμα που κατασκευάστηκε από τον κώδικα για την συγκεκριμένη άντληση είναι:



Εικόνα 50: Παροχή $Q_{\text{total}} = 3000 \text{ m}^3/\text{day}$ όλο τον χρόνο

4^η περίπτωση: παροχή $Q_{\text{total}} = 3000 \text{ m}^3/\text{day} = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}$ σταθερή. Άντληση τους τέσσερις πρώτους μήνες του έτους. Οι παροχές άντλησης αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα για κάθε στρώμα. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι:



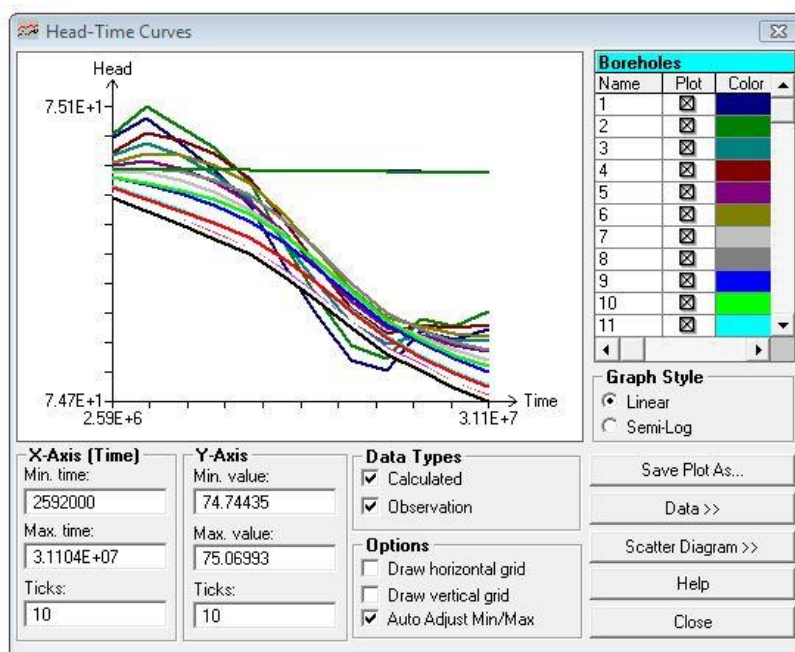
Εικόνα 51: Παροχή $Q_{\text{total}} = 3000 \text{ m}^3/\text{day}$ τους τέσσερις πρώτους μήνες του έτους.

5^η περίπτωση: παροχή $Q_{\text{total}} = 1000 \text{ m}^3/\text{day} = 0.0116 \text{ m}^3/\text{s}$ σταθερή όλο τον χρόνο.

Πίνακας 18: Πίνακας τιμών παροχής ανά στρώμα

layer	Tk	Tk/ΣT	Qk
1	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$2.308 \cdot 10^{-6}$
2	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$2.308 \cdot 10^{-6}$
3	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$2.308 \cdot 10^{-6}$
4	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$2.308 \cdot 10^{-6}$
5	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$2.308 \cdot 10^{-6}$
6	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$2.308 \cdot 10^{-6}$
7	$5 \cdot 10^{-4}$	$9.98 \cdot 10^{-4}$	$1.1577 \cdot 10^{-5}$
8	$5 \cdot 10^{-1}$	0.998	0.0116
Sum	0.5011		

Η συγκεκριμένη παροχή άντλησης έδωσε το παρακάτω αποτέλεσμα:



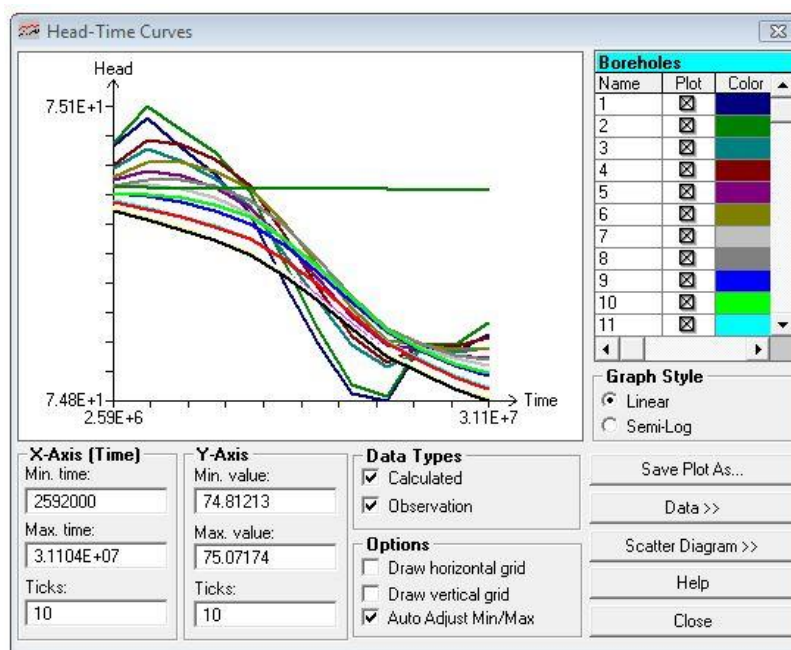
Εικόνα 52: Παροχή $Q_{\text{total}} = 1000 \text{ m}^3/\text{day}$ όλο τον χρόνο

6^η περίπτωση: παροχή $Q_{\text{total}} = 700 \text{ m}^3/\text{day} = 8.10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ σταθερή όλο τον χρόνο.

Πίνακας 19: Πίνακας τιμών παροχής ανά στρώμα

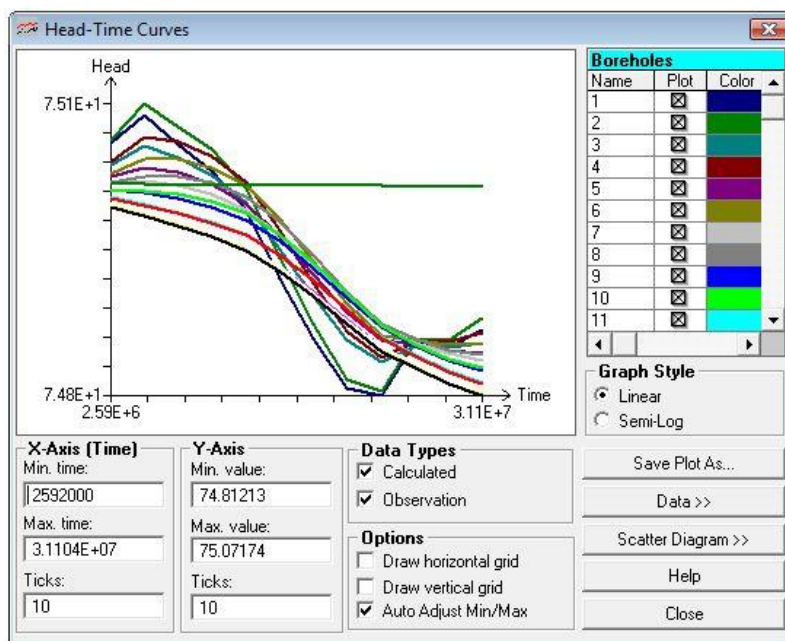
layer	Tk	Tk/ΣT	Qk
1	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$1.612 \cdot 10^{-6}$
2	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$1.612 \cdot 10^{-6}$
3	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$1.612 \cdot 10^{-6}$
4	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$1.612 \cdot 10^{-6}$
5	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$1.612 \cdot 10^{-6}$
6	10^{-4}	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$1.612 \cdot 10^{-6}$
7	$5 \cdot 10^{-4}$	$9.98 \cdot 10^{-4}$	$8.084 \cdot 10^{-6}$
8	$5 \cdot 10^{-1}$	0.998	$8.084 \cdot 10^{-3}$
Sum	0.5011		

Τα αποτελέσματα την παραπάνω προσομοίωσης φαίνονται στο διάγραμμα:



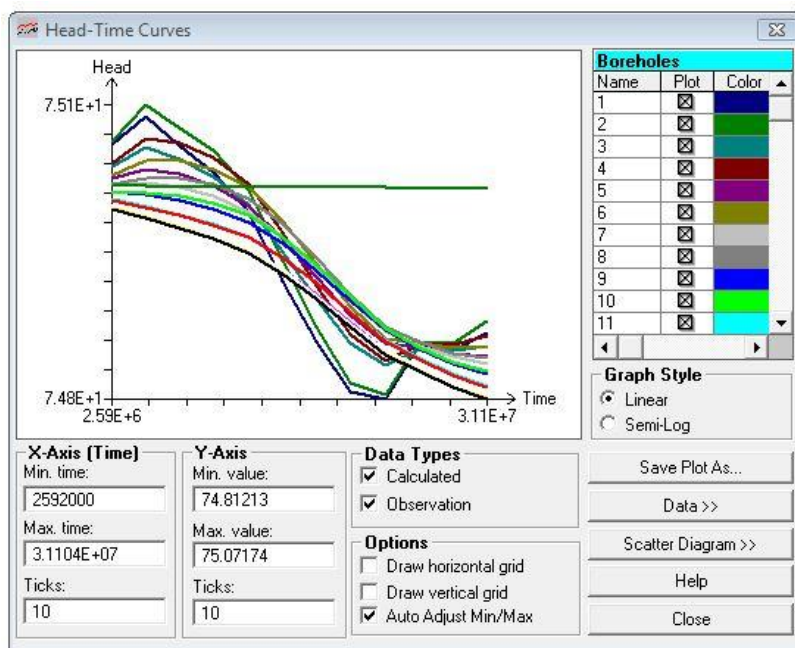
Εικόνα 53: Παροχή $Q_{\text{total}} = 700 \text{ m}^3/\text{day}$ όλο τον χρόνο

7^η περίπτωση: παροχή $Q_{\text{total}} = 700 \text{ m}^3/\text{day} = 8.10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ σταθερή. Άντληση τους τρεις πρώτους μήνες του έτους. Οι παροχές άντλησης αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα για κάθε στρώμα. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι:



Εικόνα 54: Παροχή $Q_{\text{total}} = 700 \text{ m}^3/\text{day}$ τους τρεις πρώτους μήνες του έτους

8^η περίπτωση: παροχή $Q_{\text{total}} = 700 \text{ m}^3/\text{day} = 8.10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ σταθερή. Άντληση τους τρεις πρώτους μήνες και τους τρεις τελευταίους μήνες του έτους. Οι παροχές άντλησης αναφέρονται στον πίνακα που υπάρχει στην 6^η περίπτωση προσομοίωσης για κάθε στρώμα. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι:



Εικόνα 55: Παροχή $Q_{\text{total}} = 700 \text{ m}^3/\text{day}$ τους τρεις πρώτους μήνες και τρεις τελευταίους του έτους

- 3^ο σενάριο: μελέτη τροφοδοσίας φράγματος.

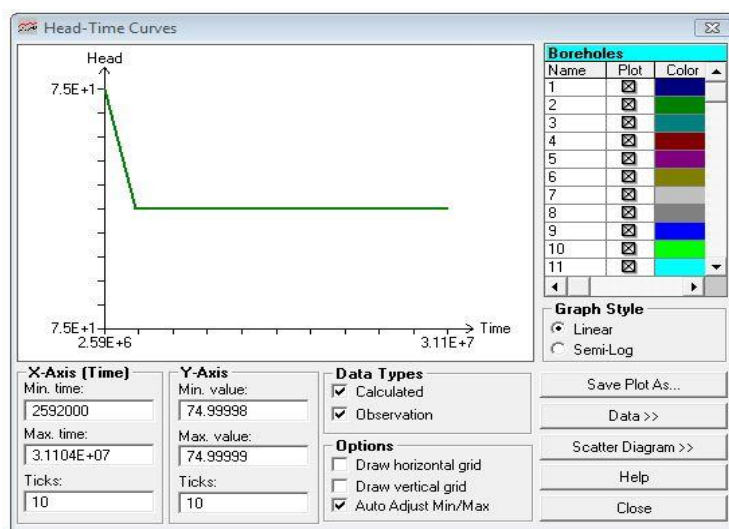
Η μελέτη των αποτελεσμάτων που θα είχε η αλλαγή στο είδος της τροφοδοσίας που θα δεχόταν το φράγμα τελμάτων, πραγματοποιείται με προσομοίωση διαφορετικών ειδών τροφοδοσία στην επιφάνεια του φράγματος. Οι παράμετροι σχεδιασμού που διατηρήθηκαν σταθερές κατά την προσομοίωση των διαφορετικών καταστάσεων τροφοδοσίας είναι:

- Το ενεργό πορώδες έλαβε τις τιμές που αναφέρονται στον πίνακα της ενότητας 5.1.2.
- Η μεταβλητή Specific Storage παρέμεινε αμετάβλητη με τιμή 0,1 1/m
- Το αρχικό ύψος νερού (initial hydraulic head) του μοντέλου ορίστηκε στα 75m, αφού θεωρείται πλήρως κορεσμένο.
- Οι τιμές των υδραυλικών αγωγιμοτήτων οριζόντιων και κάθετων για τα υλικά του μοντέλου αναφέρονται στον πίνακα στην ενότητα 5.1.2. και διατηρήθηκαν σταθερά σε όλα τα στρώματα.
- Στο συγκεκριμένο μοντέλο δεν υπάρχει άντληση, ώστε να μην αποφορτίζεται το μοντέλο.

Στο σενάριο αυτό της μελέτης πραγματοποιήθηκαν 3 προσομοιώσεις που η κάθε μία παρουσίαζε μία διαφορετική περίπτωση τροφοδοσίας. Η διαφοροποίηση σε κάθε προσομοίωση αφορά το είδος της τροφοδοσίας. Ο εμπλουτισμός του μοντέλου γίνεται από την επιφάνεια του. Η εξίσωση υπολογισμού της τροφοδοσίας δίνεται στην ενότητα 5.1.3.

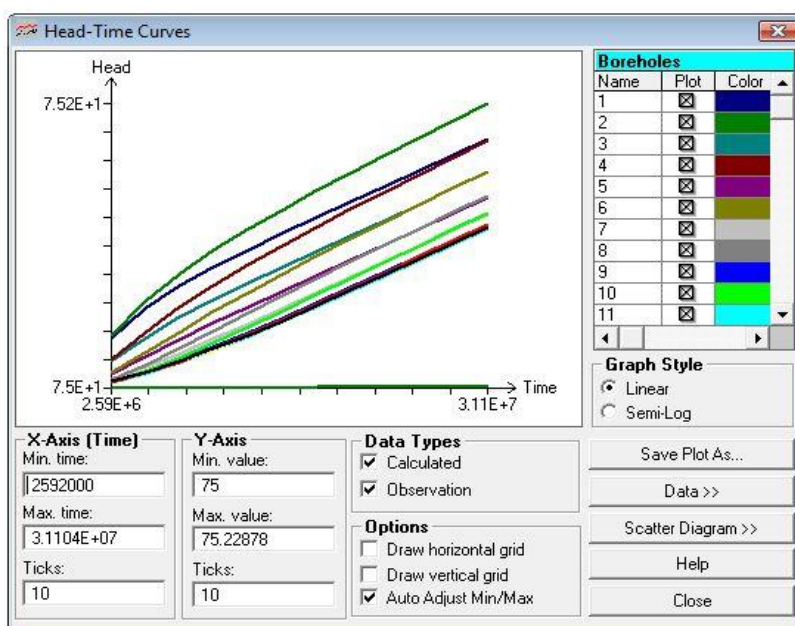
1^η περίπτωση: Δεν υπάρχει τροφοδοσία του συστήματος.

Το αποτέλεσμα αυτής της προσομοίωσης ακολουθεί.



Εικόνα 56: Μηδενική τροφοδοσία

2^η περίπτωση: Η τροφοδοσία του συστήματος είναι σταθερή όλη την διάρκεια του έτους. Η τιμή της είναι ίση με $0.003 \text{ m/day} = 3.5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. Τα αποτελέσματα είναι:



Εικόνα 57: Σταθερή τροφοδοσία

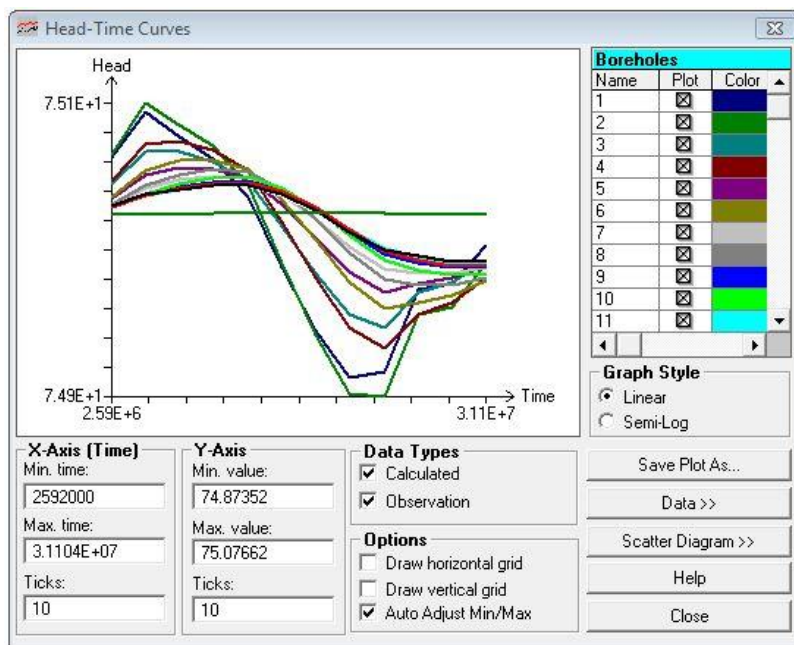
3^η περίπτωση: Η τροφοδοσία του συστήματος είναι μεταβλητή ανάλογα με την περίοδο της προσομοίωσης. Ο πίνακας με τις τιμές της τροφοδοσίας μετά την αφαίρεση της εξατμισοδιαπνοής από την βροχόπτωση παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 20: Τιμές μεταβλητής τροφοδοσίας

periods	recharge(m/s)
1	3,45679E-08
2	4,12423E-08
3	6,17284E-09
4	-1,81327E-09
5	-1,83642E-08
6	-4,94599E-08
7	-5,90278E-08
8	-6,03395E-08
9	-3,43364E-08
10	2,19136E-08
11	6,55864E-10
12	2,07948E-08

Η αντιστοιχία της αρίθμησης των περιόδων προσομοίωσης με τους ημερολογιακούς μήνες είναι: η πρώτη περίοδος αντιπροσωπεύει τον μήνα Ιανουάριο, η δεύτερη περίοδος αντιπροσωπεύει τον Φεβρουάριο κλπ., όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο σενάριο.

Η προσομοίωση αυτής της κατάστασης έδωσε το ακόλουθο αποτέλεσμα.



Εικόνα 58: Μεταβλητή τροφοδοσία

- 4^ο σενάριο: μελέτη βαθμού κορεσμού μοντέλου.

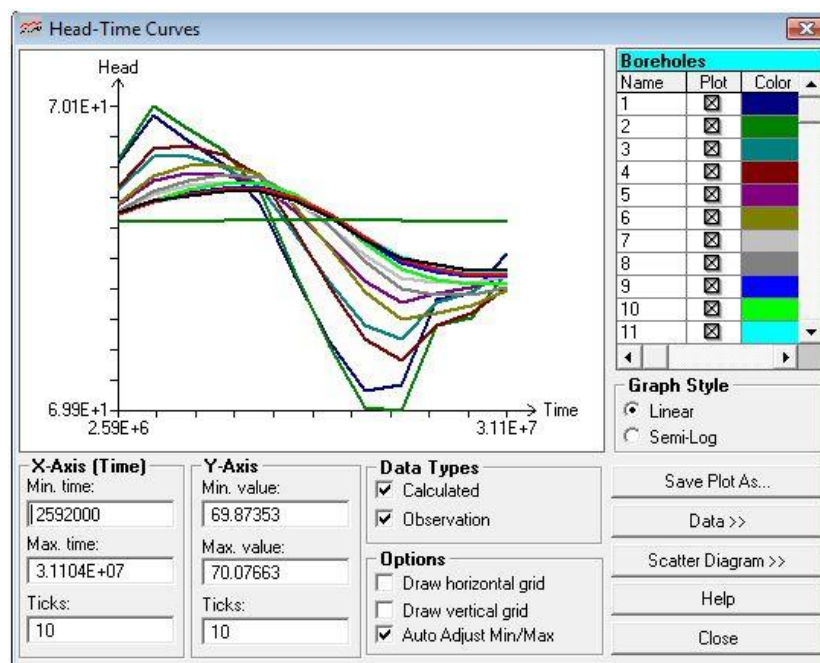
Η μελέτη των αποτελεσμάτων από την αλλαγή του βαθμού κορεσμού του μοντέλου γίνεται με την αλλαγή της μεταβλητής Specific Storage και της παραμέτρου του αρχικού ύψους νερού (initial hydraulic head). Οι παράμετροι σχεδιασμού που διατηρήθηκαν σταθερές κατά την προσομοίωση των διαφορετικών βαθμών κορεσμού είναι:

- Το ενεργό πορώδες έλαβε τις τιμές που αναφέρονται στον πίνακα της ενότητας 5.1.2.
- Οι τιμές των υδραυλικών αγωγιμοτήτων οριζόντιων και κάθετων για τα υλικά του μοντέλου αναφέρονται στον πίνακα στην ενότητα 5.1.2. και διατηρήθηκαν σταθερά σε όλα τα στρώματα.
- Η τροφοδοσία του μοντέλου (recharge) αποτελείται μόνο από την βροχόπτωση και όπως αναφέρεται παραπάνω συνυπολογίζεται σε αυτήν και η εξατμισοδιαπνοή από την επιφάνεια του φράγματος. Ο πίνακας με τις τιμές της τροφοδοσίας μετά την αφαίρεση της εξατμισοδιαπνοής από την βροχόπτωση παρουσιάζεται στο προηγούμενο σενάριο μελέτης.
- Ο ρυθμός άντλησης της γεώτρησης είναι $Q_{\text{total}} = 2000 \text{ m}^3/\text{day}$.

Στο σενάριο αυτό της μελέτης πραγματοποιήθηκαν 7 προσομοιώσεις που η κάθε μία παρουσίαζε έναν διαφορετικό βαθμό κορεσμού στο μοντέλο. Η διαφοροποίηση σε κάθε προσομοίωση αφορά την μεταβλητή Specific Storage και την παράμετρο του αρχικού ύψους νερού (initial hydraulic head).

1^η περίπτωση: Specific Storage = 0.1 1/m και initial hydraulic head στα 70 m.

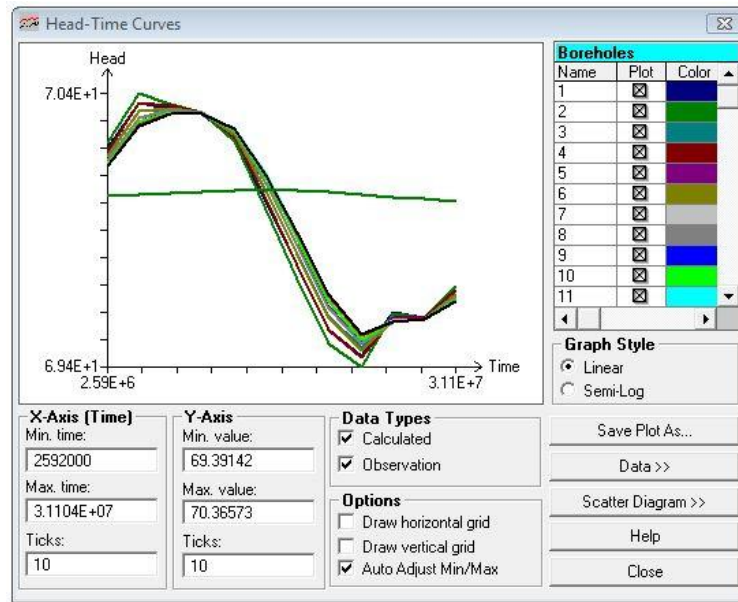
Το αποτέλεσμα καταγράφεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Εικόνα 59: Specific Storage = 0.1 1/m και initial hydraulic head στα 70μ.

2^η περίπτωση: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 70 m.

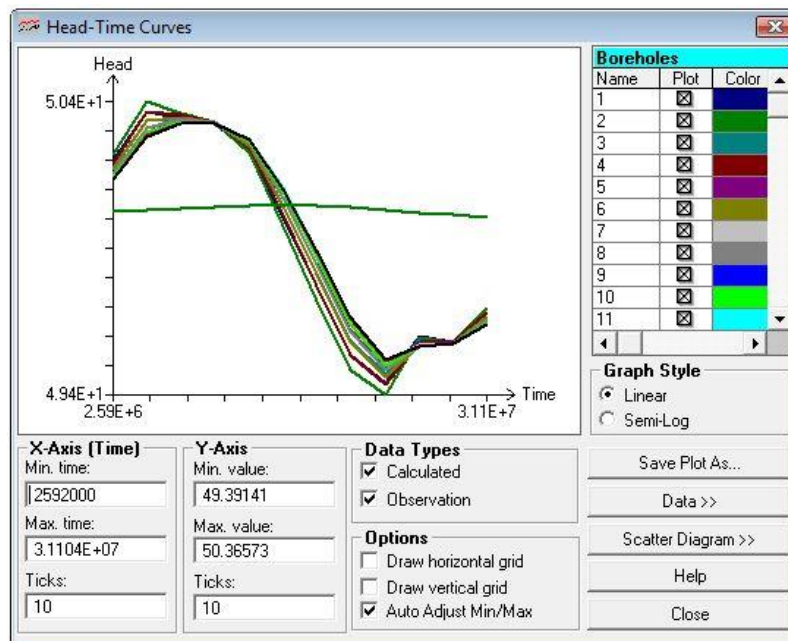
Το αποτέλεσμα ακολουθεί.



Εικόνα 60: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 70μ.

3^η περίπτωση: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 50 m.

Το διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζει τα αποτελέσματα.

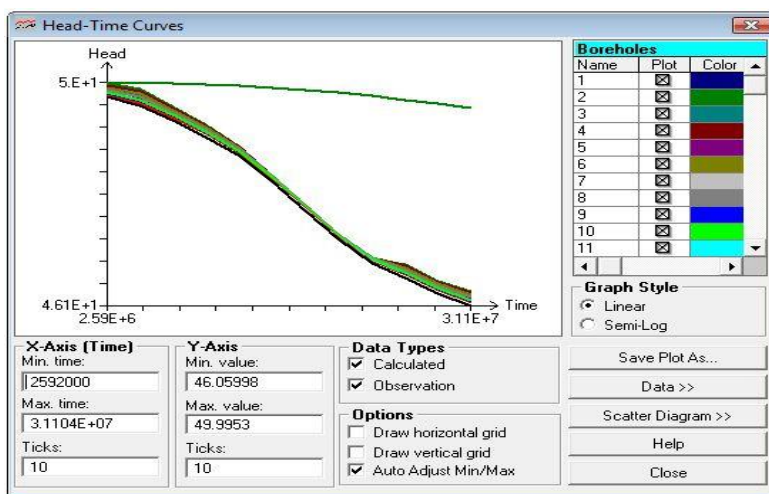


Εικόνα 61: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 50μ.

4^η περίπτωση: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 50 m.

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση γίνεται ταυτόχρονα άντληση με γεώτρηση παροχής 2000 m³/day καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου.

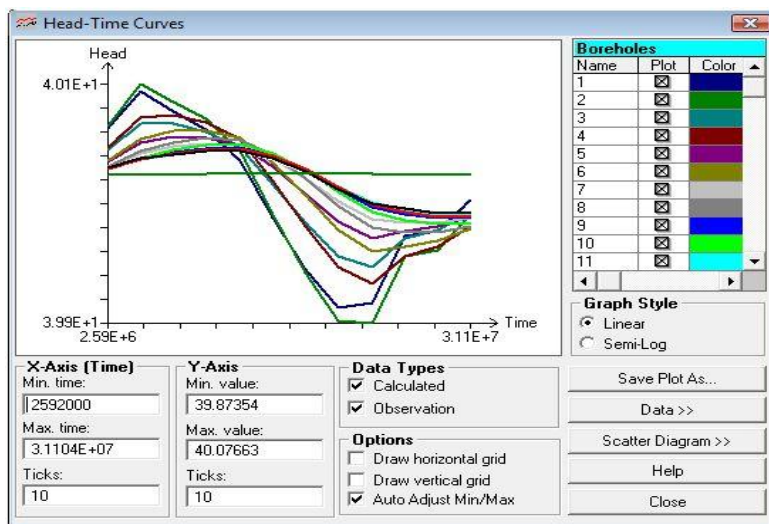
Το διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζει τα αποτελέσματα.



Εικόνα 62: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 50 m με άντληση

5^η περίπτωση: Specific Storage = 0.1 1/m και initial hydraulic head στα 40 m.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται παρακάτω.

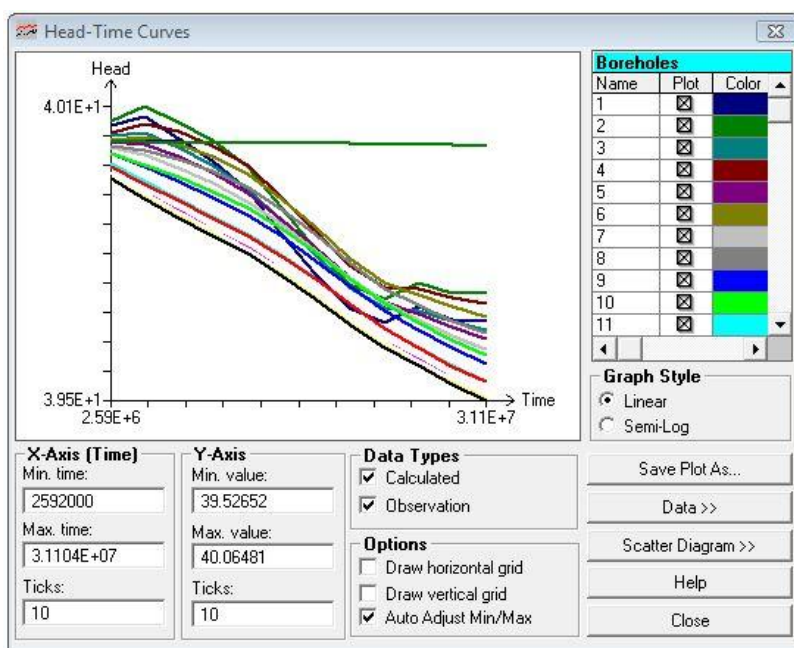


Εικόνα 63: Specific Storage = 0.1 1/m και initial hydraulic head στα 40μ.

6^η περίπτωση: Specific Storage = 0.1 1/m και initial hydraulic head στα 40 m.

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση γίνεται ταυτόχρονα άντληση με γεώτρηση παροχής 2000 m³/day καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου.

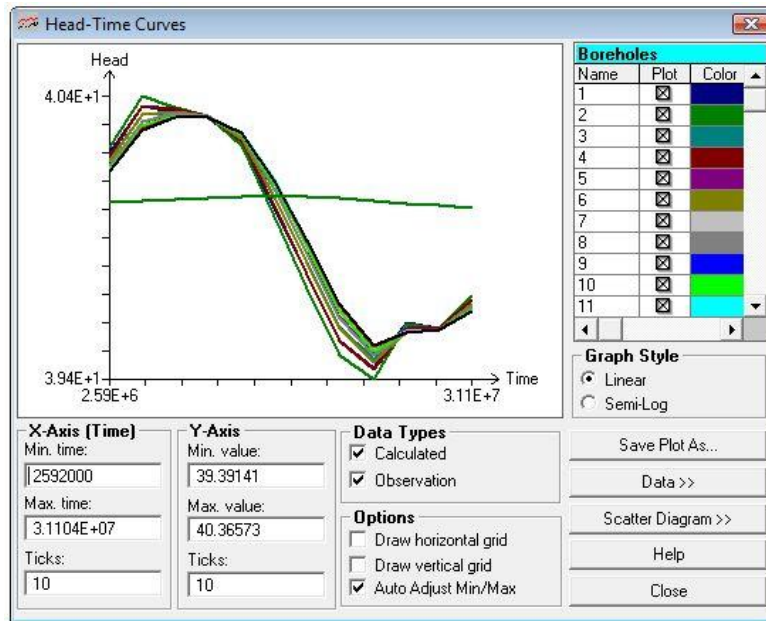
Το διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζει τα αποτελέσματα.



Εικόνα 64: Specific Storage = 0.1 1/m και initial hydraulic head στα 40 m με άντληση

7^η περίπτωση: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 40 m

Στο τελευταίο αυτό μοντέλο δεν χρησιμοποιήθηκε άντληση όπως στο προηγούμενο. Τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν από την προσομοίωση παρουσιάζονται στην συνέχεια.



Εικόνα 65: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 40μ.

5.3 Συζήτηση αποτελεσμάτων.

Συνοπτικά για το κεφάλαιο έως τώρα, στην ενότητα 5.1 παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός του μοντέλου προσομοίωσης, ενώ στην ενότητα 5.2 παρουσιάστηκαν τα σενάρια μεταβολής των παραμέτρων σχεδιασμού για την πραγματοποίηση της παραμετρικής διερεύνησης ενός φράγματος τελμάτων με χρήση του κώδικα Modflow. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τις προηγούμενες παραγράφους πραγματοποιήθηκαν 26 συνολικά προσομοιώσεις υπόγειας ροής με την χρήση του κώδικα Modflow για τον σχηματισμό μελέτης. Οι προσομοιώσεις αυτές αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω:

- Σενάριο 1^ο, μελέτη περατότητας σχηματισμών.
- Σενάριο 2^ο, μελέτη ρυθμού άντλησης γεώτρησης.
- Σενάριο 3^ο, μελέτη τροφοδοσίας φράγματος.
- Σενάριο 4^ο, μελέτη βαθμού κορεσμού μοντέλου.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων καθώς και ο σχολιασμός αυτών παρατίθενται στα ακόλουθα:

5.3.1 Σενάριο 1ο.

Τα αποτελέσματα από τις 8 προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με αλλαγή της περατότητας των στρωμάτων παρουσιάζονται στις εικόνες με αριθμό από 40 έως 47. Παρατηρώντας τα διαγράμματα αυτά βγαίνει το συμπέρασμα ότι το μοντέλο επηρεάζεται περισσότερο από την αλλαγή της κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας παρά από την αλλαγή της οριζόντιας. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της τροφοδοσίας στην επιφάνεια του

μοντέλου, που στην περίπτωση μίας μικρής κάθετης διαπερατότητας εμποδίζεται η κατείσδυση του νερού σε χαμηλότερα στρώματα επομένως παρουσιάζεται μία υψηλή συγκέντρωση αυτού στην επιφάνεια.

5.3.2 Σενάριο 2ο.

Τα αποτελέσματα από τις 8 επόμενες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με αλλαγή του ρυθμού άντλησης της γεώτρησης παρουσιάζονται στις εικόνες 48 έως 55. Παρατηρώντας τα διαγράμματα που προήλθαν από αυτές τις προσομοιώσεις μπορεί κάποιος να καθορίσει την παροχή της γεώτρησης που θα έχει το καλύτερο αποτέλεσμα στο σύστημα. Η μικρότερη παροχή που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση είναι $700 \text{ m}^3/\text{day}$ στην τελευταία περίπτωση που μελετήθηκε, το διάγραμμα της οποίας παρουσιάζει ένα μέγιστο 75.1 m στο πρώτο στρώμα για την δεύτερη μόνο περίοδο προσομοίωσης. Αυτή η στιγμιαία υπέρβαση του υψομέτρου του μοντέλου μπορεί να οφείλεται σε έλλειψη χρόνου ώστε το νερό της βροχής να κατέβει σε κατώτερα στρώματα. Επίσης η δεύτερη περίοδος προσομοίωσης είναι αυτή που καταγράφει ταυτόχρονα και την μέγιστη βροχόπτωση.

5.3.3 Σενάριο 3ο.

Τα αποτελέσματα από τις τρεις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για αυτό το σενάριο με αλλαγή του είδους της τροφοδοσίας του μοντέλου παρουσιάζονται στις εικόνες 56, 57 και 58. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι με μία σταθερή βροχόπτωση σε όλη την διάρκεια του χρόνου, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία γεώτρηση άντλησης ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο υπερχειλίσας του φράγματος. Στην περίπτωση όμως που η βροχόπτωση δεν είναι σταθερή στην διάρκεια του έτους αλλά υπάρχουν περίοδοι βροχόπτωσης και άλλοι περίοδοι ξηρασίας μπορεί να μην χρειαστεί καθόλου η άντληση με γεώτρηση από το φράγμα. Αυτό εξαρτάται πάντα από το ύψος των βροχοπτώσεων της περιοχής που βρίσκεται το φράγμα.

5.3.4 Σενάριο 4ο.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για αυτό το τελευταίο σενάριο με αλλαγή του βαθμού κορεσμού του μοντέλου παρουσιάζονται στις εικόνες 59 έως 65. Από τις προσομοιώσεις αυτές παρατηρήθηκε ότι εάν τα τέλματα που τοποθετούνται μέσα στο φράγμα δεν είναι κορεσμένα, τότε δεν υπάρχει περίπτωση υπερχειλίσας του φράγματος και επίσης δεν χρειάζεται η δημιουργία γεώτρησης για την άντληση νερού από τον ταμιευτήρα.

6. Συμπεράσματα – Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Το λογισμικό Modflow μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιωθεί η στάθμη του υδραυλικού φορτίου σε ένα ταμιευτήρα τελμάτων με ιδιαίτερη έμφαση στο σχεδιασμό του φράγματος που περικλείει έναν τέτοιο ταμιευτήρα, ώστε να διασφαλιστεί η ακεραιότητα του έναντι πιθανής αστοχίας ή υπερχείλισης. Στην παρούσα εργασία έγινε μία πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιώντας πολλές απλοποιητικές παραδοχές όπως αναφέρονται στην ενότητα 5.

Από την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου προέκυψε ότι το μοντέλο προσομοίωσης είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της τιμής της ειδικής αποθηκευτικότητας (specific storage) και της υδραυλικής αγωγιμότητας (hydraulic conductivity) των στρωμάτων. Το συγκεκριμένο μοντέλο επηρεάζεται περισσότερο από τις μεταβολές της κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας λόγω της βροχόπτωσης στην επιφάνεια του μοντέλου.

Από την παραμετρική ανάλυση του μοντέλου του ταμιευτήρα τελμάτων προκύπτει ότι με κατάλληλο σχεδιασμό μπορεί:

- 1) να αποφευχθεί η υπερχείλιση του φράγματος και
- 2) να μειωθεί η πίεση του νερού των πόρων στο σώμα του ταμιευτήρα και του φράγματος.

6.2 Προτάσεις

Το μοντέλο στην παρούσα εργασία έτρεξε για ένα έτος αλλά μπορεί να επεκταθεί η διάρκεια της προσομοίωσης σε μεγαλύτερες περιόδους με περισσότερες εναλλαγές υγρών και ξηρών μηνών.

Το μοντέλο έχει ένα απλουστευμένο σχέδιο φίλτρων αλλά μπορεί να επεκταθεί σε άλλα σχέδια όπως για παράδειγμα στο σχέδιο φράγματος σε κοιλάδα.

7. Παράρτημα

7.1 Παράρτημα Α – Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Τύποι αναχώματος: (α) ανάντη, (β)κατάντη, (γ) κεντρικής γραμμής ανάχωμα (πηγή: Vick 1990).....	17
Εικόνα 2: Μονό (α) και πολλαπλό (β) φράγμα σε κοιλάδα (πηγή: Vick 1990)	18
Εικόνα 3: Μονή (α) και τμηματική (β) σύνθεση κυκλικού αναχώματος (πηγή: Vick 1990)	20
Εικόνα 4: Ανάντη μέθοδος κατασκευής αναχώματος (πηγή: Vick 1990).....	32
Εικόνα 5: Κατάντη μέθοδος κατασκευής (πηγή: Vick 1990)	34
Εικόνα 6: Μέθοδος κατασκευής σε κεντρική γραμμή (πηγή: Vick 1990)	36
Εικόνα 7: Τυπική μορφή κανάβου πεπερασμένων διαφορών (Λατινόπουλος & Θεοδοσίου, 2007)	50
Εικόνα 8: Διαστάσεις του μοντέλου.....	59
Εικόνα 9: Ο κánaβος του μοντέλου	60
Εικόνα 10: Επιλογή του είδους των στρωμάτων	61
Εικόνα 11: Εισαγωγή σημείων παρατήρησης.....	62
Εικόνα 12: Σημεία παρατήρησης στον κánaβο στρώμα 1	63
Εικόνα 13: Σημεία παρατήρησης στον κánaβο στρώμα 2	63
Εικόνα 14: 5m cell width constant head, steady state flow simulation	67
Εικόνα 15: 10m cell width constant head, steady state flow simulation	68
Εικόνα 16: 15m cell width constant head, steady state flow simulation	68
Εικόνα 17: 5m cell width constant head, transient flow simulation.....	69
Εικόνα 18: 10m cell width constant head, transient flow simulation	70
Εικόνα 19: 15m cell width constant head, transient flow simulation	70
Εικόνα 20: Κατανομή τροφοδοσίας ανά περίοδο	72
Εικόνα 21: 5m cell width constant head, with variable recharge	72
Εικόνα 22: 10m cell width constant head, with variable recharge	73
Εικόνα 23: 15m cell width constant head, with variable recharge	73
Εικόνα 24: 5m cell width general head, steady state flow simulation.....	74
Εικόνα 25: 10m cell width general head, steady state flow simulation.....	75
Εικόνα 26: 15m cell width general head, steady state flow simulation.....	75
Εικόνα 27: Διάγραμμα συσχέτισης φορτίου με πλάτος κελιού	77
Εικόνα 28: Διάγραμμα σύγκρισης steady state και transient flow simulation	78
Εικόνα 29: Διάγραμμα σύγκρισης σταθερής και μεταβλητής τροφοδοσίας	79
Εικόνα 30: Διάγραμμα συσχέτισης GHB και Constant Head Boundary	80
Εικόνα 31: Κάτοψη φράγματος τελμάτων.....	82
Εικόνα 32: Τομή φράγματος τελμάτων	83
Εικόνα 33: Διαστάσεις του μοντέλου	84
Εικόνα 34: Ο αρχικός κánaβος του μοντέλου	85
Εικόνα 35: Ο τελικός κánaβος του μοντέλου	85
Εικόνα 36: Επιλογή του είδους των στρωμάτων	86
Εικόνα 37: Ορισμός χρονικών παραμέτρων	87
Εικόνα 38: Εισαγωγή σημείων παρατήρησης.....	88
Εικόνα 39: Σημεία παρατήρησης στον κánaβο στρώμα 1	89

Εικόνα 40: Οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-7} m/s	93
Εικόνα 41: Οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-6} m/s	94
Εικόνα 42: Οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-5} m/s	95
Εικόνα 43: Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-6} m/s	96
Εικόνα 44: Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-7} m/s	97
Εικόνα 45: Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-8} m/s	98
Εικόνα 46: Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-8} m/s, οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-7} m/s	99
Εικόνα 47: Κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-7} m/s, οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-6} m/s	100
Εικόνα 48: Παροχή $Q_{total} = 2000 \text{ m}^3/\text{day}$ όλο τον χρόνο.....	101
Εικόνα 49: Παροχή $Q_{total} = 2000 \text{ m}^3/\text{day}$ τους τέσσερις πρώτους μήνες του έτους	102
Εικόνα 50: Παροχή $Q_{total} = 3000 \text{ m}^3/\text{day}$ όλο τον χρόνο.....	103
Εικόνα 51: Παροχή $Q_{total} = 3000 \text{ m}^3/\text{day}$ τους τέσσερις πρώτους μήνες του έτους	103
Εικόνα 52: Παροχή $Q_{total} = 1000 \text{ m}^3/\text{day}$ όλο τον χρόνο.....	104
Εικόνα 53: Παροχή $Q_{total} = 700 \text{ m}^3/\text{day}$ όλο τον χρόνο.....	105
Εικόνα 54: Παροχή $Q_{total} = 700 \text{ m}^3/\text{day}$ τους τρεις πρώτους μήνες του έτους	106
Εικόνα 55: Παροχή $Q_{total} = 700 \text{ m}^3/\text{day}$ τους τρεις πρώτους μήνες και τρεις τελευταίους του έτους.....	106
Εικόνα 56: Μηδενική τροφοδοσία	107
Εικόνα 57: Σταθερή τροφοδοσία.....	108
Εικόνα 58: Μεταβλητή τροφοδοσία.....	109
Εικόνα 59: Specific Storage = 0.1 1/m και initial hydraulic head στα 70μ.....	110
Εικόνα 60: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 70μ.....	111
Εικόνα 61: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 50μ.....	111
Εικόνα 62: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 50 m με άντληση.....	112
Εικόνα 63: Specific Storage = 0.1 1/m και initial hydraulic head στα 40μ.....	112
Εικόνα 64: Specific Storage = 0.1 1/m και initial hydraulic head στα 40 m με άντληση.....	113
Εικόνα 65: Specific Storage = 0.01 1/m και initial hydraulic head στα 40μ.....	114

7.2 Παράρτημα Β – Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Κατανομή βροχόπτωσης.....	71
Πίνακας 2: Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 1ο	76
Πίνακας 3: Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 2 ^ο	77
Πίνακας 4: Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 3ο	79
Πίνακας 5: Πίνακας αποτελεσμάτων σενάριο 4ο	80
Πίνακας 6: Τιμές παραμέτρων των υλικών του φράγματος (Moldovan <i>et. al.</i> , 2008).....	88
Πίνακας 7: Τροφοδοσία μοντέλου.....	92
Πίνακας 8: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 1 ^η περίπτωση.....	93
Πίνακας 9: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 2 ^η περίπτωση.....	93
Πίνακας 10: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 3 ^η περίπτωση.....	94
Πίνακας 11: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 4 ^η περίπτωση.....	95
Πίνακας 12: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 5 ^η περίπτωση.....	96
Πίνακας 13: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 6 ^η περίπτωση.....	97
Πίνακας 14: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 7 ^η περίπτωση.....	98
Πίνακας 15: Πίνακας τιμών υδραυλικών αγωγιμοτήτων για την 8 ^η περίπτωση.....	99
Πίνακας 16: Πίνακας τιμών παροχής ανά στρώμα	101
Πίνακας 17: Πίνακας τιμών παροχής ανά στρώμα	102
Πίνακας 18: Πίνακας τιμών παροχής ανά στρώμα	104
Πίνακας 19: Πίνακας τιμών παροχής ανά στρώμα	105
Πίνακας 20: Τιμές μεταβλητής τροφοδοσίας.....	108

8. Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία:

- Γιαννόπουλος Γ., Προσομοίωση της υπόγειας ροής στην προσχωματική λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου Κρήτης και εξέταση σεναρίων μεταβολής υδροληπτικών και βροχομετρικών συνθηκών με χρήση του μοντέλου Visual Modflow, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2012.
- Λατινόπουλος Π. και Θεοδοσίου Ν., Διδακτικές σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., 2007.
- Σκαραντωνάκης Χ., Διερεύνηση επιφανειακής ξηρασίας στο Ν. Χανίων, Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010.

Διεθνής Βιβλιογραφία:

- Brawner, C.O. and D.B. Campbell. (1977). "The Tailings Structure and its Characteristics - A Soil's Engineer's Viewpoint." In: Tailings Disposal Today, Proceedings of the First International Tailings Symposium, Tucson, Arizona, Oct. 31, Nov. 3, 1977. C.L. Aplin and G.O. Arsall Jr. (Editors).
- Chiang, W.-H. (2005). 3D – Groundwater modeling with PMWIN. Springer, Irvine, California, U.S.A.
- Chiang, W.-H. and W. Kinzelbach (1998). Processing Modflow - A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution.
- Lighthall, P.C., B.D. Watts and S. Rice. 1989. "Deposition Methods for Construction of Hydraulic Fill Tailings Dams." In: Geotechnical Aspects of Tailings Disposal and Acid Mine Drainage. The Vancouver Geotechnical Society, Vancouver, British Columbia, May 26, 1989.
- Lottermoser, B. (2003). Mine wastes – Characterization, Treatment and Environmental Impacts. Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Moldovan, B., M. Hendry and G. Harrington (2008). The arsenic source term for an in – pit uranium mine tailings facility and its long – term impact on the regional groundwater, *Applied Geochemistry*, 23, (6), 1437-1450.
- Rico, M., G. Benito and A. Díez-Herrero (2008). Floods from tailings dam failures, *Journal of Hazardous Materials*, 154, (1–3), 79-87.
- Ritcey, G.M. (1989). Tailings Management: Problems and Solutions in the Mining Industry. Elsevier Science Publishers, B.U. Amsterdam, The Netherlands.
- U.S. Environmental Protection Agency (1994). Technical Report – *Design and evaluation of tailings dams*, Washington.

- Vick, S.G. (1990). Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. BiTech Publishers Ltd, Wiley, New York.
- Zandarín, M., L. Oldecop, R. Rodríguez and F. Zabala (2009). The role of capillary water in the stability of tailing dams, *Engineering Geology*, 105, (1–2), 108-118.

Ηλεκτρονικές πηγές (Δικτυογραφία):

- Μετεωρολογικές προγνώσεις για την Ελλάδα, <http://www.meteo.gr/>

Ημερομηνία προσπέλασης: 15/06/12

- Wikipedia, <http://www.wikipedia.org/>

Ημερομηνία προσπέλασης: 02/07/12

- Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Διδακτικές σημειώσεις, http://www.mie.uth.gr/n_ekp_yliko.asp?id=39

Ημερομηνία προσπέλασης: 14/09/12