

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μοντελοποίηση της Ροής και της Μεταφοράς
Στραγγισμάτων στην Ακόρεστη και Κορεσμένη
Ζώνη σε Υπόγειο Υδροφορέα
Εφαρμογή στο Χώρο Υγειονομικής Ταφής Αμαρίου

ΑΪΒΑΛΙΩΤΗ Β. ΜΑΡΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΙΚΗ:

Γ. ΚΑΡΑΤΖΑΣ (Επιβλέπων)

Ν. ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ

Ι. ΤΣΑΝΗΣ

Χανιά
Ιούλιος 2003

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Καρατζά Γεώργιο, ο οποίος αποτέλεσε για εμένα απαραίτητη βοήθεια και αστείρευτη πηγή γνώσεων. Με το πραγματικό ενδιαφέρον και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, μου έδωσε την δυνατότητα να βιώσω μια άριστη συνεργασία και κατέστησε δυνατή την εκπόνηση της παρούσας μελέτης.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην μοντελοποίηση της ροής και της μεταφοράς στραγγισμάτων στην ακόρεστη και στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους κάτω από το χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων της περιοχής Αμαρίου, του Νομού Ρεθύμνης. Συγκεκριμένα, η μελέτη αυτή εξετάζει το ενδεχόμενο ρύπανσης του υδροφορέα από τα στραγγίσματα του Χ.Υ.Τ.Α., σε περίπτωση αστοχίας των υλικών μόνωσης του πυθμένα και διαρροής ποσότητας στραγγισμάτων στο έδαφος.

Για την εκπόνηση της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δυο μοντέλα: το μοντέλο PRZM-3, το οποίο προσομοιώνει τη ροή και τη μεταφορά ρυπαντών στην ακόρεστη ζώνη και το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών Argus ONE, με το οποίο πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση στην κορεσμένη ζώνη. Όσον αφορά στην ακόρεστη ζώνη, δημιουργήθηκαν και εξετάστηκαν 20 διαφορετικά σενάρια, από τα οποία επιλέχτηκε εκείνο που έδινε τα δυσμενέστερα αποτελέσματα, για να συνεχιστεί η μοντελοποίηση και στην κορεσμένη ζώνη.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν ιδιαίτερα θετικά. Ακόμη και στη χειρότερη δυνατή εξεταζόμενη περίπτωση, σύμφωνα με την οποία το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι 50m και υπάρχουν 5 σημεία διαφυγής στραγγισμάτων στον Χ.Υ.Τ.Α., η ρύπανση του υπόγειου υδροφορέα δεν είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη. Αντίθετα, η ρύπανση περιορίζεται στα γεωγραφικά όρια του Χ.Υ.Τ.Α., ενώ παράλληλα οι συγκεντρώσεις που παρατηρούνται είναι χαμηλές. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν προβλέπουν την κατάσταση που θα επικρατεί στην περιοχή για τα επόμενα 30-50 χρόνια, με την προϋπόθεση ότι δεν θα υπάρξει κάποια αλλαγή στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

Συμπερασματικά, θα λέγαμε ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, η ρύπανση που μπορεί να προκληθεί στον υπόγειο υδροφορέα από τη διαφυγή στραγγισμάτων του Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου στο έδαφος είναι σχεδόν αμελητέα. Η παρουσία του Χ.Υ.Τ.Α. δεν αποτελεί απειλή για τα υπόγεια ύδατα της περιοχής, αλλά παρόλα αυτά θα πρέπει να εξασφαλιστεί μια ορθή διαχείριση των στραγγισμάτων, για να αποκλειστεί οποιαδήποτε πιθανότητα υποβάθμισης της ποιότητας τόσο των υπογείων όσο και των επιφανειακών υδάτων.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
2. Μοντελοποίηση υπόγειας ροής.....	4
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Κατηγορίες μοντέλων	4
2.3 Αριθμητικές μέθοδοι.....	7
2.4 Οριακές συνθήκες	13
2.5 Όροι εμπλουτισμού / άντλησης υδάτων	19
2.6 Σημαντικές παράμετροι εφαρμογής ενός μοντέλου.....	23
2.6.1 Κριτήριο σφάλματος.....	23
2.6.2 Χρόνος εκτέλεσης (execution time).....	24
2.6.3 Βαθμονόμηση	25
2.6.4 Πρόβλεψη	28
3. Ροή υπόγειων υδάτων	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Ροή σε κορεσμένο έδαφος	29
3.2.1 Ο νόμος του Darcy.....	29
3.2.2 Υδραυλική αγωγιμότητα.....	31
3.2.3 Γενική μορφή του νόμου του Darcy	34
3.2.4 Αρχή διατήρησης της μάζας	35
3.3 Ροή στην ακόρεστη ζώνη.....	36
3.3.1 Ο νόμος του Darcy.....	37
3.3.2 Υδραυλική αγωγιμότητα.....	38
3.3.3 Αρχή διατήρησης της μάζας	39
4. Μεταφορά ρύπων.....	40
4.1 Εισαγωγή.....	40
4.2 Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων	41
4.2.1 Διάχυση	41
4.2.2 Συμμεταφορά	42
4.2.3 Διασπορά.....	43
4.2.4 Εξίσωση συμμεταφοράς – διασποράς για μεταφορά διαλυμένων ουσιών	44

4.3 Χαρακτηρισμός ρυπαντών	46
4.4 Σημαντικές παράμετροι καθορισμού της ροής και της μεταφοράς ρύπων	48
4.4.1 Κινούμενο – ακίνητο ύδωρ (mobile – immobile water)	48
4.4.2 Preferential flow - fingering.....	49
4.4.3 Κολλοειδή σωματίδια	50
4.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες – Breakthrough Curves.....	50
5. Περιγραφή μοντέλων υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων	52
5.1 Περιγραφή του μοντέλου PRZM - 3.....	52
5.1.1 Μοντέλο PRZM	53
5.1.2 Μοντέλο VADOFT.....	54
5.1.3. Προσομοίωση Monte Carlo	56
5.2. Περιγραφή του μοντέλου Argus ONE	56
5.3 Περιγραφή του μοντέλου PTC.....	58
5.3.1 Βασικές εξισώσεις	59
5.3.2 Οριακές συνθήκες	61
6. Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.)	62
6.1 Εισαγωγή.....	62
6.2 Θεσμικό πλαίσιο	64
6.3 Επιλογή χώρων ελεγχόμενης εναπόθεσης απορριμμάτων.....	65
6.4 Μόνωση χώρου ελεγχόμενης εναπόθεσης απορριμμάτων	68
6.5 Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε έναν Χ.Υ.Τ.Α.	71
6.5.1 Δημιουργία διασταλαζόντων υγρών	77
6.5.2 Παραγωγή βιοαερίου	83
7. Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων Αμαρίου	88
7.1 Τοποθεσία – Περιοχή του Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου	88
7.2 Γενικά στοιχεία του Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου	89
7.2.1 Εξυπηρετούμενος πληθυσμός.....	89
7.2.2 Παραγωγή οικιακών απορριμμάτων	90
7.2.3 Σύνθεση των στερεών αποβλήτων.....	93
7.3 Κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.....	94
7.3.1 Βροχοπτώσεις	94
7.3.2 Ανεμολογικά χαρακτηριστικά	97

7.4 Γεωλογία – Υδρογεωλογία	97
7.4.1 Υδρογεωλογική συμπεριφορά του ευρύτερου πεδίου	97
7.4.2 Γεωλογική δομή και υδρογεωλογική συμπεριφορά της περιοχής του πεδίου ταφής των απορριμμάτων	98
7.4.3 Τεκτονικά.....	99
7.5 Διαμόρφωση πυθμένα του υφιστάμενου χώρου – Στεγανοποίηση πυθμένα.....	99
7.6 Περιγραφή αναγκαίων έργων – Προβλήματα στη λειτουργία του Χ.Υ.Τ.Α...	101
7.7 Διαχείριση στραγγισμάτων	102
7.7.1 Δίκτυο συλλογής στραγγισμάτων	103
7.7.2 Δίκτυο επεξεργασίας.....	103
7.8 Υδρολογικό ισοζύγιο	104
7.8.1 Βροχοπτώσεις	104
7.8.2 Επιφανειακή απορροή για το χώρο του Χ.Υ.Τ.Α.	104
7.8.3 Εξατμισοδιαπνοή	105
7.8.4 Διήθηση.....	105
8. Εφαρμογή μοντέλου ακόρεστης ζώνης PRZM-3	106
8.1. Δεδομένα εισαγωγής του VADOFT – Input files.....	106
8.2 Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου.....	107
8.3 Εφαρμογή στον χώρο υγειονομικής ταφής Αμαρίου.....	111
8.3.1 Παραδοχές και εξεταζόμενα σενάρια	111
8.3.2 Αποτελέσματα.....	114
8.2.3 Σχόλια και συμπεράσματα	135
9. Εφαρμογή μοντέλου κορεσμένης ζώνης Argus ONE.....	141
9.1 Δεδομένα εισαγωγής του προγράμματος.....	141
9.2 Αποτελέσματα.....	149
10. Συμπεράσματα	155
11. Βιβλιογραφία	157
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I: Τοπογραφικός και Γεωλογικός Χάρτης της Ευρύτερης Περιοχής του Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II: Οδηγός και Παραδείγματα Αρχείων Ελέγχου και Εισαγωγής Δεδομένων του Μοντέλου VADOFT	

1. Εισαγωγή

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν ένα αναπόσπαστο τμήμα του υδρολογικού κύκλου και έχουν ιδιαίτερη αξία για τον άνθρωπο. Λόγω της διαθεσιμότητάς τους και της γενικά καλής ποιότητάς τους, χρησιμοποιούνται ευρέως για την κάλυψη πολλών ανθρώπινων αναγκών και κυρίως για υδρευτικούς και αρδευτικούς σκοπούς. Παρόλα αυτά, τα φαινόμενα υποβάθμισης της ποιότητας και ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων είναι ιδιαίτερα συχνά τα τελευταία χρόνια, προκαλώντας μεγάλη ανησυχία τόσο στους πολίτες όσο και στους επιστήμονες.

Η ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων μπορεί να οφείλεται σε διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη διαφυγή επικίνδυνων χημικών ουσιών στο έδαφος και κατ' επέκταση στα υπόγεια ύδατα. Μια από τις πλέον «απειλητικές» για τα υπόγεια ύδατα δραστηριότητες του ανθρώπου είναι η δημιουργία και λειτουργία χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), εάν αυτές δεν πραγματοποιούνται υπό τις κατάλληλες και σαφώς ορισμένες από το νόμο προϋποθέσεις. Συγκεκριμένα, η παραγωγή στραγγισμάτων από τα απορρίμματα που εναποτίθεται στον Χ.Υ.Τ.Α. είναι το κύριο φαινόμενο, το οποίο εάν δεν ελεγχθεί και περιοριστεί, δύναται να προκαλέσει σοβαρότατο πρόβλημα ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα.

Για την αποφυγή εμφάνισης προβλημάτων ρύπανσης, αναγκαία είναι η προσεχτική και υπεύθυνη μελέτη των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών και συνθηκών που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή εγκατάστασης του Χ.Υ.Τ.Α.. Η ροή των υπόγειων υδάτων καθώς και η πιθανή μεταφορά στραγγισμάτων στο έδαφος και στον υδροφορέα, οφείλουν να διερευνηθούν και να προσομοιωθούν με τον πιο αξιόπιστο δυνατό τρόπο, έτσι ώστε να μπορέσει να υπάρξει αποτελεσματική προστασία του ευρύτερου γειτνιάζοντος περιβάλλοντος. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται ανακαλύπτοντας και προσεγγίζοντας, στο βέλτιστο δυνατό βαθμό, τις συνθήκες ροής και μεταφοράς ρύπων που επικρατούν στο πεδίο και πιο συγκεκριμένα στην ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη του εδάφους.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ακριβώς η μοντελοποίηση των συνθηκών ροής και μεταφοράς στραγγισμάτων στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα της ευρύτερης

περιοχής του χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων Αμαρίου του Νομού Ρεθύμνης. Το ενδεχόμενο ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα εξετάζεται προσεχτικά, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία της ακόρεστης ζώνης και επομένως παρέχοντας πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα όσον αφορά στην κατανομή των στραγγισμάτων στον υδροφόρο, στις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις αλλά και στο χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της στιγμή της διαρροής τους από το Χ.Υ.Τ.Α. και της εισροής τους στον υδροφόρο ορίζοντα.

Συγκεκριμένα, στην αρχή της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναφέρονται κάποιες βασικές πληροφορίες πάνω στη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής. Τα υπάρχοντα μοντέλα και οι βασικές κατηγοριοποιήσεις τους παρουσιάζονται συνοπτικά, παρέχοντας μια σφαιρική εικόνα των χαρακτηριστικών των μοντέλων, των κύριων παραμέτρων τους και γενικότερα του τρόπου εφαρμογής τους σε διάφορες περιπτώσεις.

Στα επόμενα δυο κεφάλαια παρουσιάζονται κάποιες βασικές σχέσεις και νόμοι που περιγράφουν τη ροή των υπόγειων υδάτων, τόσο σε ακόρεστο όσο και σε κορεσμένο έδαφος. Ακόμη, αναφέρονται οι κύριοι μηχανισμοί, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά ρύπων μέσα στο έδαφος και τους υπόγειους υδροφορείς και προσδιορίζονται κάποιες σημαντικές παράμετροι που τους επηρεάζουν άμεσα.

Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα δυο μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη μελέτη. Ειδικότερα, αναφέρονται οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούν, οι παραδοχές που κάνουν και τα δεδομένα εισαγωγής που απαιτούν για την εκτέλεσή τους.

Τα κεφάλαια 6 και 7 αφορούν στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Στο πρώτο παρέχονται κάποιες γενικές πληροφορίες για τους Χ.Υ.Τ.Α. και ειδικότερα για τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα και τα προβλήματα τα οποία μπορούν να εμφανιστούν λόγω αυτών. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται στοιχεία που αφορούν στο Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου. Συγκεκριμένα προσδιορίζεται η ακριβής του θέση, κάποια γενικά κατασκευαστικά και λειτουργικά στοιχεία του, καθώς και διάφορα υδρογεωλογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής.

Στα κεφάλαια 8 και 9 παρουσιάζεται η εφαρμογή και τα προκύπτοντα αποτελέσματα των μοντέλων ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης, αντίστοιχα. Τα δεδομένα που εισήχθησαν, τα σενάρια που εξετάστηκαν και τα αρχεία δεδομένων που δημιουργήθηκαν αναφέρονται αναλυτικά, έτσι ώστε να γίνεται κατανοητός ο τρόπος εφαρμογής των μοντέλων στην υπό μελέτη περιοχή.

Τέλος, στο 10^ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, γίνεται σχολιασμός των εξαγομένων από τα μοντέλα πληροφοριών και εκτιμάται ο κίνδυνος ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής Αμαρίου από τη διαφυγή των στραγγισμάτων του υπάρχοντος Χ.Υ.Τ.Α..

2. Μοντελοποίηση υπόγειας ροής

2.1 Εισαγωγή

Πολλά σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα αφορούν στην εναπόθεση και μεταφορά ρύπων στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα. Ως αποτέλεσμα, τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη ανάπτυξης μεθοδολογιών μελέτης των μηχανισμών που δρουν και των συνθηκών που επικρατούν στο έδαφος έχει καταστεί επιτακτική. Κύριο εργαλείο μελέτης της υπόγειας ροής είναι τα πολυάριθμα μοντέλα αριθμητικής προσομοίωσης που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς.

Γενικότερα, με τον όρο μοντέλο αναφερόμαστε σε ένα «επινόημα», το οποίο παρουσιάζει μια προσέγγιση της κατάστασης και των συνθηκών που επικρατούν στο πεδίο. Ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοιώνει έμμεσα την υπόγεια ροή με τη βοήθεια μιας βασικής εξίσωσης, η οποία αντιπροσωπεύει τις φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο σύστημα και μιας σειράς άλλων εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τα υδραυλικά ύψη ή τις παροχές κατά μήκος των ορίων του μοντέλου (οριακές συνθήκες). Αν το μοντέλο εξαρτάται από το χρόνο τότε χρειάζεται και ο προσδιορισμός αρχικών συνθηκών. [1]

2.2 Κατηγορίες μοντέλων

Τα είδη των μοντέλων για τα υπόγεια ύδατα είναι πολλά και διαφέρουν ανάλογα με το κριτήριο διάκρισής τους. Οι κυριότεροι διαχωρισμοί που πραγματοποιούνται και τα αντίστοιχα μοντέλα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα [2]:

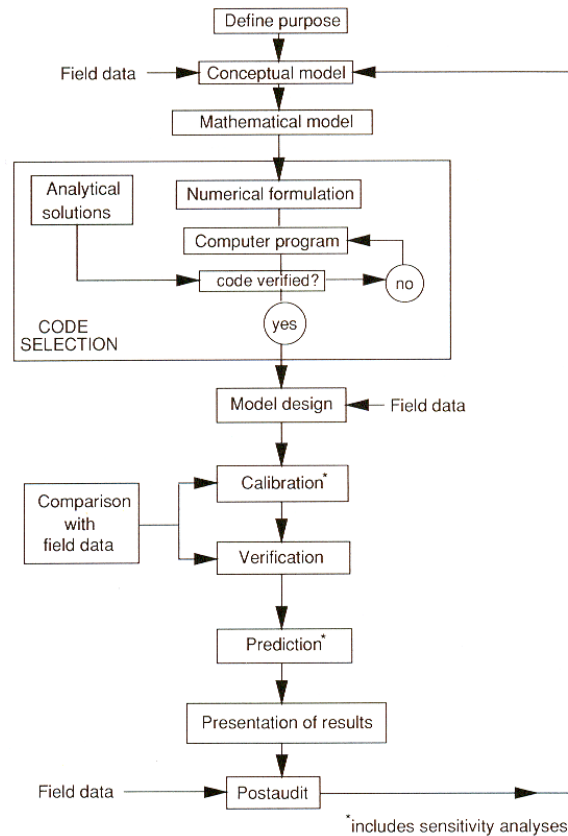
- Διαχωρισμός με βάση τις διαδικασίες που λαμβάνονται υπόψη
 - Μοντέλα παροχής (σενάρια απομάκρυνσης υδάτων, προσδιορισμός υδάτινου δυναμικού, αλληλεπίδραση ποταμών και υδροφορέων, κτλ.)
 - Μοντέλα μεταφοράς (κίνηση διαλυμένης μάζας και θερμότητας μέσω των υπόγειων υδάτων, ρύπανση και αποκατάσταση εδάφους και υδροφορέων, κτλ.)
 - Μοντέλα αλλοιώσεων (καθίζηση λόγω απομάκρυνσης ύδατος)

- Διαχωρισμός με βάση τις συνθήκες που επικρατούν
 - Μόνιμες συνθήκες (αντιπροσωπεύει την εξίσωση ισορροπίας του υδρολογικού συστήματος)
 - Μη μόνιμες συνθήκες (πρόβλεψη αντίδρασης συστήματος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες)

- Διαχωρισμός με βάση τη γεωμετρία
 - Μονοδιάστατα μοντέλα (εκτίμηση της ισορροπίας των υδάτων)
 - Δισδιάστατα μοντέλα (όταν υπάρχει κυρίως οριζόντια κίνηση υδάτων)
 - Τρισδιάστατα μοντέλα (οριζόντια και κάθετη κίνηση υδάτων)

- Διαχωρισμός με βάση την προσέγγιση που πραγματοποιείται
 - Μοντέλα με φυσική προσέγγιση (περιλαμβάνουν κουτιά άμμου, στήλες και αγωγούς νερού)
 - Μοντέλα με αναλογική προσέγγιση (προσομοιώνουν την παροχή με την κίνηση του ρεύματος)
 - Μοντέλα με μαθηματική προσέγγιση (κάνουν παραδοχές που απλοποιούν το σύστημα και τις εξισώσεις που ισχύουν). Τα μοντέλα αυτά μπορούν να είναι στοχαστικά, ντετερμινιστικά, αναλυτικά ή αριθμητικά.

Τα βασικά βήματα του πρωτοκόλλου για την εφαρμογή ενός μοντέλου υπόγειων υδάτων περιλαμβάνουν αρχικά την ανάπτυξη ενός θεμελιώδους μοντέλου (conceptual model) και ενός αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου, τα οποία στόχο έχουν την περιγραφή και την πρόβλεψη της κίνησης του υπόγειου νερού και της μεταφοράς ρυπαντών. Στη συνέχεια ακολουθούν και άλλες διαδικασίες όπως η εισαγωγή δεδομένων πεδίου, η βαθμονόμηση, η ανάλυση ευαισθησίας και άλλα, όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Διάγραμμα 1: Βασικά βήματα για την εφαρμογή ενός μοντέλου υπόγειων υδάτων. [1]

Οι προσεγγίσεις που μπορούν να εφαρμοστούν για την περιγραφή ενός συστήματος υπόγειας ροής είναι κυρίως δυο [1]:

- Προσέγγιση υδροφορέα (aquifer viewpoint)
- Προσέγγιση συστήματος ροής (flow system viewpoint)

Προσέγγιση υδροφορέα (aquifer viewpoint)

Σε αυτήν την προσέγγιση χρησιμοποιούνται οι έννοιες περιορισμένος και ελεύθερος υδροφορέας. Υδροφορέας είναι μια μονάδα πορώδους μέσου, η οποία έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ή να μεταφέρει σημαντικές ποσότητες νερού σε πηγάδια. Ελεύθερος είναι ο υδροφορέας που έχει ως ανώτερο όριο τη στάθμη του νερού, ενώ περιορισμένος αυτός του οποίου τα όρια είναι κάποια αδιαπέρατα στρώματα. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται για την ανάλυση της ροής σε πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση πολλών αναλυτικών λύσεων (Thiem, Theis, Jacob). Η υπόγεια ροή θεωρείται ότι είναι οριζόντια μέσα στον υδροφορέα και κάθετη μέσα από τα αδιαπέρατα στρώματα. [1]

Η προσέγγιση υδροφορέα χρησιμοποιείται δεχόμενοι ότι επικρατεί δισδιάστατη και οριζόντια ροή μέσα στον υδροφορέα. Αν έχουμε διαρροή μπορεί να υποτεθεί σχεδόν τρισδιάστατη ροή και ο όρος της διαρροής που φέρνει ή απομακρύνει νερό από τον υδροφορέα αντιπροσωπεύει την κάθετη ροή μέσα από τα αδιαπέρατα στρώματα. Το μέγεθος της διαρροής εξαρτάται από την διαφορά πίεσης εκατέρωθεν του αδιαπέρατου στρώματος, την κάθετη υδραυλική του αγωγιμότητα καθώς και το πάχος του. [1]

Προσέγγιση συστήματος ροής (flow system viewpoint)

Στην προσέγγιση αυτή δεν είναι σημαντικός ο χαρακτηρισμός των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων. Αντίθετα, στόχος είναι να κατασκευαστεί μια τρισδιάστατη κατανομή των υδραυλικών υψών, των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των ιδιοτήτων αποθήκευσης σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Μέσα στο σύστημα παρατηρείται οριζόντια αλλά και κάθετη ροή. [1]

Η βασική εξίσωση που ισχύει και προκύπτει από ισοζύγιο νερού και την εξίσωση του Darcy είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^*$$

όπου S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα και R^* είναι ένας θετικός όρος που αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου.

2.3 Αριθμητικές μέθοδοι

Η επίλυση των εξισώσεων που χρησιμοποιούν τα περισσότερα μοντέλα υπόγειας ροής γίνεται με την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Οι αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται πιο συχνά είναι οι ακόλουθες [1]:

- **Πεπερασμένες διαφορές**
- **Πεπερασμένα στοιχεία**
- **Ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές**

- Μέθοδος οριακής ολοκληρωτικής εξίσωσης
- Αναλυτικά στοιχεία

Ένα υπολογιστικό πρόγραμμα ή κώδικας μπορεί να λύσει ένα σετ αλγεβρικών εξισώσεων που δημιουργούνται προσεγγίζοντας τις χωρικές ολοκληρωτικές εξισώσεις (βασική εξίσωση, αρχικές και οριακές συνθήκες), οι οποίες σχηματίζουν το μαθηματικό πρόβλημα. Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων είναι εκείνες που χρησιμοποιούνται περισσότερο και κατασκευάζουν ένα πίνακα αλγεβρικών εξισώσεων, ο οποίος μπορεί να επιλυθεί εύκολα από έναν υπολογιστή.

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι γενικά μια κατανοητή και εύκολη μέθοδος. Απαιτεί λιγότερα δεδομένα για την κατασκευή του πλέγματος και υπολογίζει μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο με την παραδοχή ότι η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε όλο το τμήμα που περιβάλλει τον κόμβο αυτόν. Δεν υπολογίζει τη διακύμανση ανάμεσα σε δυο κόμβους με διαφορετικές τιμές.

Αντίθετα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζει καλύτερα περιοχές με ακανόνιστο σχήμα και όρια, με αποτέλεσμα το μέγεθος των στοιχείων καθώς και η τοποθέτηση των ορίων να προσαρμόζονται καλύτερα. Τα «εσωτερικά» όρια (ρήγματα) χειρίζονται καλύτερα, ενώ παράλληλα τα σημεία εμπλουτισμού και άντλησης του νερού (sink & source points) και οι μεταβαλλόμενες στάθμες του προσομοιώνονται πολύ καλύτερα. Ακόμη, υπολογίζεται μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο και ταυτόχρονα προσδιορίζεται με ακρίβεια η διακύμανσή του ανάμεσα σε δυο κόμβους με διαφορετικές τιμές.

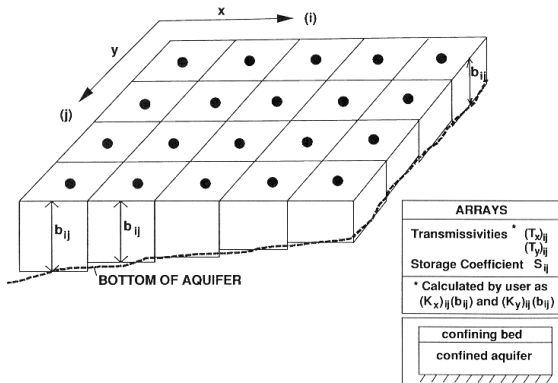
Για την κατασκευή του πλέγματος του αριθμητικού μοντέλου πρέπει να γίνει κατάταξη του μοντέλου ως προς τις χωρικές του διαστάσεις. Έτσι, έχουμε τις εξής 4 βασικές κατηγορίες μοντέλων [1] :

- Δισδιάστατα επιφανειακά (aquifer viewpoint)
- Δισδιάστατα (flow system viewpoint)
- Ημι-τρισδιάστατα (aquifer viewpoint)
- Τρισδιάστατα (flow system viewpoint)

Δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά είναι κατάλληλα για τέσσερις διαφορετικούς τύπους υδροφορέων.

➤ Περιορισμένοι υδροφορείς

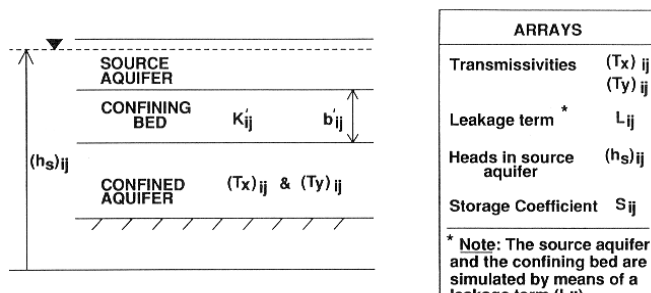


Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση της προσέγγισης που πραγματοποιεί ένα δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο περιορισμένου υδροφορέα. [1]

Υπολογίζονται η μεταβασιμότητα και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας για κάθε κόμβο ή στοιχείο. Η διακύμανση της μεταβασιμότητας μπορεί να σημαίνει είτε διακύμανση του βάθους του υδροφορέα είτε διακύμανση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η ανισοτροπία του υδροφορέα φαίνεται από τη διαφορετική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στις δυο κατευθύνσεις

x & y . Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να βρεθεί από τη βιβλιογραφία, ενώ η μεταβασιμότητα και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας από τεστ άντλησης. [1]

➤ Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή

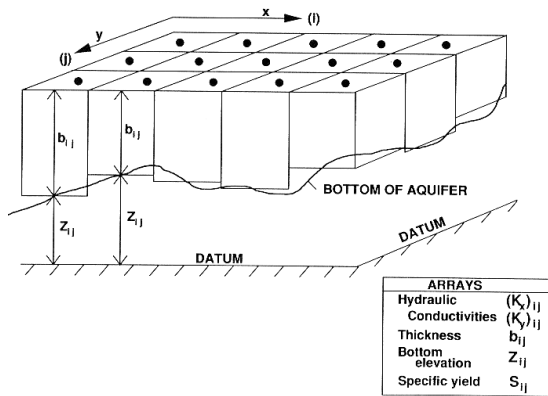


Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση της προσέγγισης που πραγματοποιεί ένα δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή. [1]

Το αδιαπέρατο στρώμα και ο υδροφορέας που τροφοδοτεί με νερό τον περιορισμένο υδροφορέα δεν ορίζονται σαφώς στο μοντέλο αλλά εκπροσωπούνται από έναν όρο διαρροής, ο οποίος είναι ο λόγος της κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας και του πάχους

του αδιαπέρατου στρώματος. Το μοντέλο υποθέτει ότι η πιεζομετρική γραμμή του υδροφορέα που τροφοδοτεί με νερό τον περιορισμένο υδροφορέα δεν αλλάζει με το χρόνο. Η διαρροή πραγματοποιείται σε χρόνο t_s , ο οποίος εξαρτάται από την κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα, την ειδική αποθηκευτικότητα και το πάχος του αδιαπέραστου στρώματος. [1]

➤ Ελεύθεροι υδροφορείς



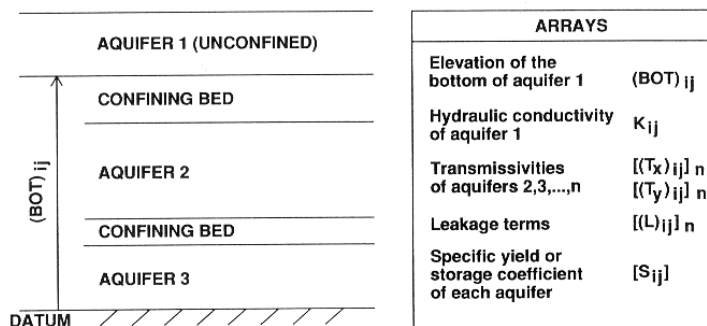
Στους ελεύθερους υδροφορείς γίνονται αποδεκτές οι παραδοχές του Dupuit και υπολογίζεται η στάθμη του υπόγειου νερού σε κάθε κόμβο. Απαιτούνται πίνακες με την υδραυλική αγωγιμότητα, το ενεργό πορώδες και το ύψος από ένα επίπεδο αναφοράς. [1]

Σχήμα 3 Σχηματική απεικόνιση της προσέγγισης που πραγματοποιεί ένα διςδιάστατο επιφανειακό μοντέλο ελεύθερου υδροφορέα. [1]

➤ «Μικτοί» υδροφορείς

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται όλα τα παραπάνω δεδομένα και απαιτούνται όλοι οι πίνακες των προαναφερθέντων περιπτώσεων. [1]

Ημι-τριςδιάστατα μοντέλα



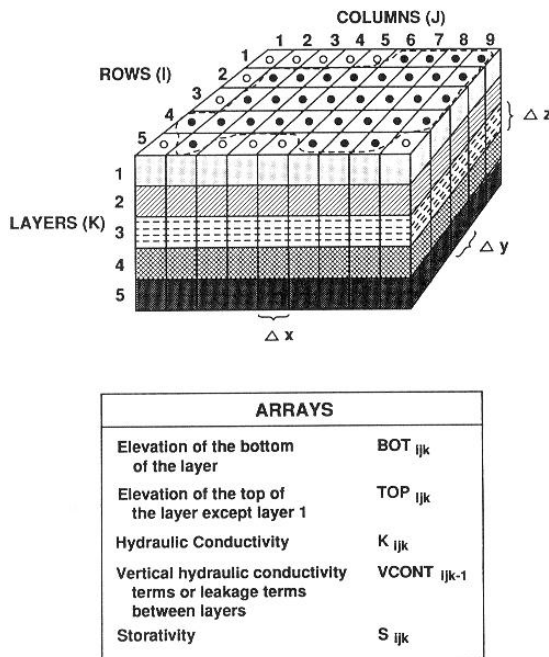
Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση της προσέγγισης που πραγματοποιεί ένα ημί-τριςδιάστατο μοντέλο. [1]

Τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν μια σειρά υδροφορέων, τους οποίους διαχωρίζουν αδιαπέρατα στρώματα. Η επίδραση των αδιαπέρατων στρωμάτων προσομοιώνεται με έναν όρο διαρροής L , ο οποίος

δείχνει την κάθετη ροή ανάμεσα στους υδροφορείς και είναι συνάρτηση της διαφοράς πίεσης εκατέρωθεν του αδιαπέρατου στρώματος, της υδραυλικής του αγωγιμότητας και του πάχους του. Αν η διαφορά της υδραυλικής αγωγιμότητας του αδιαπέραστου στρώματος και του υδροφορέα έχουν διαφορά τάξης μεγέθους μικρότερης από δύο, προτιμάται η χρήση ενός τριςδιάστατου μοντέλου. [1]

Τρισδιάστατα και Δισδιάστατα μοντέλα

Τα δεδομένα που χρειάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο είναι παρόμοια με αυτά ενός



Σχήμα 5: Σχηματική απεικόνιση της προσέγγισης που πραγματοποιούν τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα. [1]

δισδιάστατου επιφανειακού μοντέλου, με τη διαφορά ότι αυτά πρέπει να αναφέρονται σε όλα τα στρώματα ξεχωριστά. Παρόμοια είναι τα δεδομένα που χρειάζεται και ένα απλό δισδιάστατο μοντέλο. Τα δυο παραπάνω μοντέλα προσομοιώνουν ελεύθερους υδροφορείς όταν η κάθετη διαφορά πιεζομετρικών κλίσεων είναι μεγάλη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν πεπερασμένα στοιχεία και πεπερασμένες διαφορές εξίσου αποτελεσματικά. Αν υπάρχει κίνηση της στάθμης νερού ή μέτωπα διαρροών προτιμούνται τα πεπερασμένα

στοιχεία. Τέλος, τα τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση μεταβαλλόμενης εκροής νερού στα περιορισμένα στρώματα, για τα οποία θεωρείται μια συγκεκριμένη τιμή ειδικής αποθηκευτικότητας. [1]

Η επιλογή της απόστασης των κόμβων ενός πλέγματος είναι πολύ σημαντική, καθώς στην οριζόντια κατεύθυνση αυτή είναι συνάρτηση της αναμενόμενης κλίσης της επιφάνειας του νερού ή της πιεζομετρικής επιφάνειας και στην κάθετη διεύθυνση συνάρτηση της αλλαγής της πίεσης σε αυτήν.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην κατασκευή ενός πλέγματος είναι η μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του υδροφορέα. Μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα σε δυο στρώματα, τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπιστούν χωριστά και όχι ως μια ενιαία στατογραφική μονάδα. Γενικά, οι αλλαγές στην οριζόντια διεύθυνση θα πραγματοποιούνται σε μεγαλύτερη απόσταση από ότι στην κάθετη διεύθυνση. Οι τυχόν αλλαγές στις εκροές, εισροές και αντλήσεις του υδροφορέα απαιτούν πυκνότερο δίκτυο για να μπορέσουν να αναπαρασταθούν.

Τέλος, η έκταση της περιοχής που πρέπει να μελετηθεί είναι καθοριστικός παράγοντας της επιλογής της απόστασης των κόμβων καθώς και του συνολικού τους αριθμού. Αυτό που είναι επιθυμητό είναι μια εξισορρόπηση της ανάγκης για ακρίβεια αλλά και για ελαχιστοποίηση του αριθμού των δεδομένων και των υπολογισμών για λόγους πρακτικότητας.

Πλέγματα πεπερασμένων διαφορών

Το πλέγμα πεπερασμένων διαφορών είναι ορθογώνιο ή τετράγωνο με κελιά που σχηματίζουν σειρές και στήλες. Οι κόμβοι ονομάζονται χρησιμοποιώντας τη χρήση δεικτών i , j & k , οι οποίοι δείχνουν τη θέση τους μέσα στις σειρές, τις στήλες και τα στρώματα του πλέγματος. Έτσι, κατασκευάζονται πίνακες με τις τιμές των ιδιοτήτων του υδροφορέα σε κάθε κόμβο. Οι αποστάσεις των κόμβων μπορούν να είναι είτε ίσες είτε άνισες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Όταν στο εσωτερικό της περιοχής χρησιμοποιούνται πυκνοί κόμβοι, ίσως χρειαστεί αυτοί να «αραιωθούν» καθώς απομακρυνόμαστε. Ο κανόνας που ακολουθείται είναι ότι η απόσταση δυο κόμβων σε μια διεύθυνση δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1.5 φορές την απόσταση των δυο προηγούμενων κόμβων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε περίπτωση που δεν ισχύει ο παραπάνω περιορισμός δημιουργείται σφάλμα καθώς η δεύτερη παράγωγος του υδραυλικού ύψους υπολογίζεται σε σημεία που δεν συμπίπτουν απόλυτα με τους κόμβους. [1]

Δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων

Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων περιέχει πολυγωνικά στοιχεία που καλύπτουν όλη την υπό μελέτη περιοχή, χωρίς να είναι «διατεταγμένα». Ένα μειονέκτημα των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι η εισαγωγή των απαιτούμενων στοιχείων για κάθε κόμβο του πλέγματος είναι πολύ κοπιαστική και δύσκολη. Κάθε κόμβος και στοιχείο πρέπει να είναι αριθμημένα και πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα οι συντεταγμένες τους. Η αρίθμηση των κόμβων γίνεται από πάνω προς τα κάτω ή από κάτω προς τα πάνω, ανάλογα με το που είναι η μικρότερη διάσταση της περιοχής, και από αριστερά προς τα δεξιά. Η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει ξεχωριστά κάθε στοιχείο και έπειτα «συναρμολογεί» τις εξισώσεις κάθε στοιχείου σε έναν πίνακα. Η αρίθμηση των κόμβων πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται τα δεδομένα που πρέπει να εισάγονται για την εύρεση κάποιου μεγέθους σε κάποιο κόμβο. [1]

Η αναλογία της μικρότερης και της μεγαλύτερης διάστασης ενός στοιχείου πρέπει να είναι κοντά στη μονάδα και σε καμία περίπτωση να μην ξεπερνάει το 5. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται τα σφάλματα. Καλύτερη μείωση των σφαλμάτων πραγματοποιείται με τη χρήση κανονικών τριγωνικών στοιχείων. [1]

Ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει την υδροστατική πίεση στο κέντρο του κόμβου και η τιμή αυτή είναι η μέση για όλο το κελί. Στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων οι ιδιότητες του υδροφορέα μπορούν να προσδιοριστούν είτε στον κόμβο, είτε στο κελί είτε ακόμη και σε μια περιοχή γύρω από τον κόμβο που επηρεάζεται. Όταν έχουμε τριγωνικά στοιχεία συμφέρει να προσδιορίζονται οι ιδιότητες στους κόμβους που είναι πάντα λιγότεροι από τα στοιχεία.

Όταν δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για κάθε κόμβο μπορεί να χρησιμοποιηθεί παρεμβολή. Ανάμεσα από τις διάφορες μεθόδους παρεμβολής ξεχωρίζει η μέθοδος «kriging». Σύμφωνα με αυτήν επιλέγεται η καλύτερη γραμμική «αμερόληπτη» εκτίμηση (Best Linear Unbiased Estimate, BLUE). Η μεταβλητή θεωρείται ως μια τυχαία συνάρτηση της οποίας η χωρική συσχέτιση προσδιορίζεται με τις αλλαγές στην απόσταση. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη τη χωρική δομή της μεταβλητής και παρέχει μια εκτίμηση του σφάλματος της παρεμβολής ως τυπική απόκλιση των τιμών που δίνει. Η εκτίμηση του σφάλματος είναι αναγκαία όταν οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. [1]

2.4 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες είναι εξισώσεις, οι οποίες προσδιορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος νερού) ή την παράγωγο της εξαρτημένης μεταβλητής (flux) στα όρια των υπό μελέτη περιοχών. Σε σταθερές συνθήκες, οι οριακές συνθήκες επηρεάζουν τη μορφή της ροής ενώ σε μη μόνιμες συνθήκες επηρεάζουν τις λύσεις, καθώς η επίδραση των συνθηκών αυτών φτάνει τα όρια της υπό μελέτη περιοχής.

Τα όρια τα οποία μπορούμε να συναντήσουμε είναι δυο [1]:

- Φυσικά όρια, τα οποία σχηματίζονται λόγω της ύπαρξης αδιαπέρατων υπόγειων στρωμάτων ή επιφανειακών υδάτινων σωμάτων.

- Υδραυλικά όρια, τα οποία σχηματίζονται λόγω των υδρολογικών συνθηκών που επικρατούν και περιλαμβάνουν υπόγεια χωρίσματα και streamlines.

Τα υδρογεωλογικά όρια εκπροσωπούνται από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών [1]:

- **Πρώτο είδος:** Όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους (specified head boundaries – Dirichlet conditions), στα οποία είναι δεδομένο το υδραυλικό ύψος.
- **Δεύτερο είδος:** Όρια συγκεκριμένης ροής (specified flow boundaries – Neumann conditions), στα οποία είναι δεδομένη η flux κατά μήκος των ορίων. Όταν η flux είναι μηδέν τότε έχουμε οριακές συνθήκες μηδενικής ροής (no-flow boundary conditions)
- **Τρίτο είδος:** Συνθήκες ροής εξαρτώμενες από το υδραυλικό ύψος (head-dependent flow boundaries - Cauchy or mixed boundary conditions), στις οποίες υπολογίζεται η flux κατά μήκος των ορίων από μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους. Αυτός ο τύπος οριακών συνθηκών συχνά ονομάζεται και mixed.

Όταν καθορίζονται τα όρια ενός συστήματος πρέπει να ελέγχεται το αν η μορφή της ροής που προκύπτει από το μοντέλο είναι σύμφωνη με τη ροή που παρατηρείται στο πεδίο. Γενικά είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται φυσικά όρια μια και αυτά είναι υπάρχοντα μέρη του συστήματος.

Μερικά είδη ορίων που θα μπορούσαν ακόμη να χρησιμοποιηθούν είναι [1]:

- Επιφανειακοί υδάτινοι αποδέκτες – αποτελούν όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους
- Αδιαπέρατο πέτρωμα, ζώνες ρηγμάτων & εισροή αλμυρού νερού σε παραθαλάσσιες περιοχές – αποτελούν ιδανικά όρια μηδενικής παροχής (no flow boundaries)

Αδιαπέρατο πέτρωμα έχουμε σε περίπτωση που υπάρχει [1]:

- α) μικρή υδραυλική αγωγιμότητα
- β) μικρή υδραυλική κλίση κατά μήκος των ορίων

Γενικά, η χρήση μόνο οριακών συνθηκών ροής σε ένα πρόβλημα θα πρέπει να αποφεύγεται έτσι, ώστε να μη προκύπτουν πολλαπλές λύσεις, λόγω της επίλυσης διαφορικών εξισώσεων.

Σε προβλήματα σταθερών συνθηκών πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας οριακός κόμβος με γνωστό υδραυλικό ύψος, έτσι ώστε αυτός να αποτελέσει τη βάση για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού και στους άλλους κόμβους. Σε προβλήματα μη μόνιμων συνθηκών αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των αρχικών συνθηκών. [1]

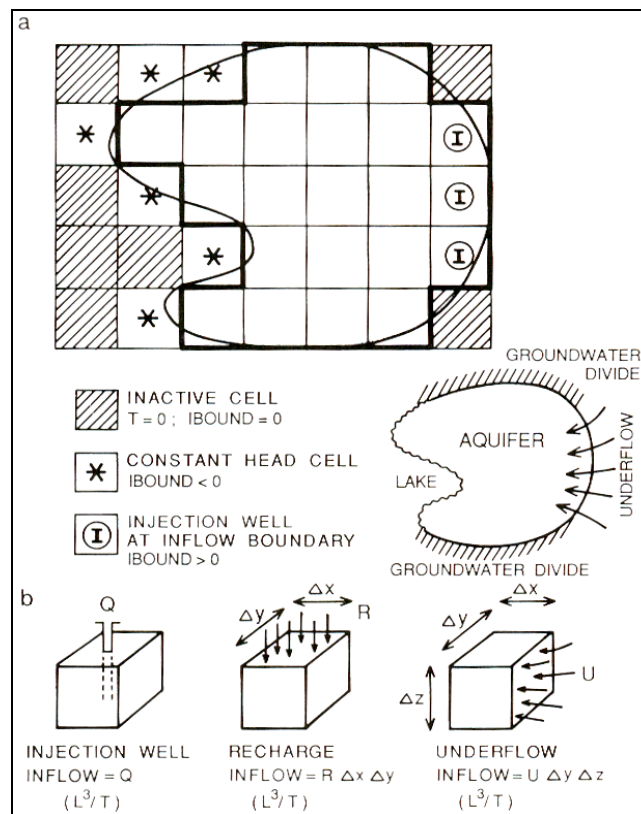
Συχνά είναι αναπόφευκτο να μην χρησιμοποιηθούν διάφορα από τα τοπικά φυσικά όρια που τυχόν που υπάρχουν. Στις περιπτώσεις αυτές υπάρχουν δυο επιλογές [1]:

- Απομακρυσμένα όρια – Σε δυναμικές προσομοιώσεις τα όρια τοποθετούνται μακριά από το κέντρο του πλέγματος έτσι, ώστε να μην επηρεάζονται από τις συνθήκες που επικρατούν και μεταβάλλονται μέσα στο πλέγμα. Κοντά στο κέντρο του πλέγματος δημιουργούνται μικρά και πολλά κελιά, ενώ όσο πάμε προς τα όρια της περιοχής τα κελιά γίνονται μεγαλύτερα και λιγότερα. Έτσι για παράδειγμα, σε περίπτωση άντλησης νερού από πηγάδι είναι δυνατόν να μην επηρεαστούν τα όρια είτε λόγω του ότι γίνεται προσομοίωση περιορισμένου χρόνου είτε λόγω του ότι υπάρχει ταυτόχρονη εισροή ύδατος από κοντινές πηγές.
- Υδραυλικά όρια – Τα όρια αυτά χρησιμοποιούνται συχνά για να μικρύνουν την έκταση της υπό μελέτη περιοχής και μπορεί να είναι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους, μηδενικής ροής ή συγκεκριμένης ροής. Αυτά μιμούνται το είδος της παροχής που υπάρχει στην ευρύτερη περιοχή και συχνά ονομάζονται τεχνητά όρια.

Τα υδραυλικά όρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν σταθερές συνθήκες όταν θέλουμε να κάνουμε βαθμονόμηση του μοντέλου. Αυτά όμως μπορεί και να μην είναι αποδεκτά καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις δημιουργούν σφάλματα. Συγκεκριμένα όταν έχουμε δυναμικές συνθήκες μπορούν αυτά να επηρεαστούν και να πρέπει να αλλάξουν. Όμως, λόγω του ότι θεωρούνται από το μοντέλο σταθερά και αλλάζουν μόνο από το χρήστη δημιουργούν σφάλματα σε άλλες υπολογιζόμενες τιμές. Σε αυτήν την περίπτωση είτε διευρύνονται τα όρια της υπό μελέτη περιοχής είτε επιλέγονται διαφορετικές τιμές των οριακών συνθηκών. [1]

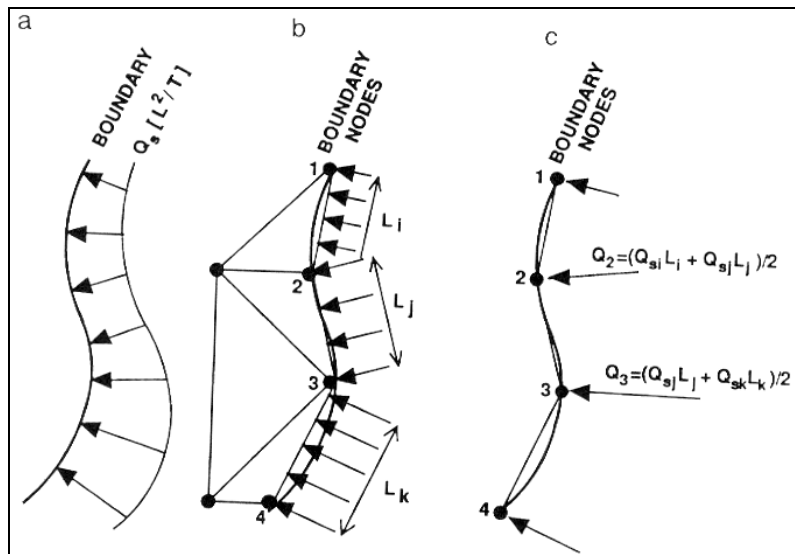
Προσομοίωση ορίων

- Σταθερό υδραυλικό ύψος: Η προσομοίωση ορίων συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους πραγματοποιείται ορίζοντας το υδραυλικό ύψος στους οριακούς κόμβους ίσο με γνωστές τιμές που έχουν μετρηθεί ή ληφθεί. Όταν το όριο είναι ένα ποτάμι το υδραυλικό ύψος κατά μήκος αυτού θα ποικίλει χωρικά, ενώ όταν το όριο είναι μια λίμνη ή ένα άλλο αποθηκευτικό σώμα επικρατούν σταθερές συνθήκες υδραυλικού ύψους κατά μήκος αυτών. Σε δισδιάστατα μοντέλα οι κόμβοι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους αντιπροσωπεύουν το κάθετο μέσο υδραυλικό ύψος του υδροφορέα ή επιφανειακά υδάτινα σώματα που διεισδύουν πλήρως μέσα στον υδροφορέα. Σε τρισδιάστατα μοντέλα οι κόμβοι αυτοί αντιπροσωπεύουν επιφανειακά υδάτινα σώματα ή τη στάθμη του νερού. Στα όρια μπορεί να γίνεται εισροή και εκροή ύδατος χωρίς να αλλάζει το υδραυλικό ύψος, γεγονός το οποίο συχνά δεν είναι ρεαλιστικό. Είναι δυνατόν ακόμη να αλλάξει η τιμή του υδραυλικού ύψους στα όρια, καθώς προχωράει η προσομοίωση, αρκεί να μπορεί να δικαιολογηθεί μια νέα τιμή για αυτό. [1]



Σχήμα 6: Εφαρμογή οριακών συνθηκών πρώτους είδους - σταθερού υδραυλικού ύψους. [1]

- Σταθερή ροή: Οι συνθήκες συγκεκριμένης ροής χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις fluxes σε επιφανειακά υδάτινα σώματα, υπόγειες ροές και πηγές. Επίσης, χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση υδραυλικών ορίων που ορίζονται από τα τοπικά συστήματα ροής. Αν και συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερο τα όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους (λόγω του ότι το υδραυλικό ύψος μετριέται ευκολότερα και είναι πιο χρήσιμο στη βαθμονόμηση), σε περιπτώσεις όπου η ροή είναι σταθερή ενώ το υδραυλικό ύψος δεν είναι, προτιμούνται τα όρια συγκεκριμένης ροής. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών τα όρια συγκεκριμένης ροής προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμό με συγκεκριμένο ρυθμό άντλησης ή εμπλουτισμού. Το νερό εισέρχεται ή εξέρχεται ομοιόμορφα από όλο το μήκος της πλευράς του κελιού. Στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων ο χρήστης τοποθετεί τη flux ανάμεσα στους δυο κόμβους και το πρόγραμμα επανατοποθετεί τη flux στους κόμβους, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. [1]



Σχήμα 7: Εφαρμογή οριακών συνθηκών δεύτερου είδους - σταθερής ροής. [1]

- Όρια μηδενικής ροής: Σημεία στα οποία μπορεί να γίνει η παραδοχή μηδενικής ροής είναι τα αδιαπέρατα πετρώματα, ζώνες ρηγμάτων, υπόγειοι διαχωρισμοί, γραμμές ροής ή ακόμα και γραμμές εισροής ή επαφής θαλάσσιου νερού με τον υδροφόρα. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών η προσομοίωση της μηδενικής ροής γίνεται με το μηδενισμό της

μεταβατικότητας ή της υδραυλικής αγωγιμότητας στα μη ενεργά κελιά ακριβώς έξω από τα όρια. Στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων η προσομοίωση γίνεται όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Τα περισσότερα μοντέλα θέτουν μηδενική ροή στα όρια της υπό μελέτη περιοχής αυτόματα και αλλάζουν μόνο με την παρέμβαση του χρήστη. [1]

- Ροή εξαρτώμενη από το υδραυλικό ύψος: Η flux κατά μήκος των ορίων εξαρτάται από τη διαφορά της τιμής του υδραυλικού ύψους που καταχωρεί ο χρήστης στη μια μεριά του ορίου και της τιμής που υπολογίζει το μοντέλο για την άλλη πλευρά του ορίου. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται η flux για κάθε κελί, ενώ στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζεται για κάθε κόμβο. Η διαρροή από ή προς μια λίμνη, ένα ποτάμι ή ένα αποθηκευτικό σώμα προσομοιώνεται με τη χρήση συνθηκών ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος και συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η σχέση [1]:

$$L = Q_L / A = K'_z / b' [h_{\text{source}} - h]$$

όπου Q_L είναι η ογκομετρική παροχή, A η επιφάνεια του κελιού που έχουμε διαρροή, h_{source} το υδραυλικό ύψος στην πηγή, h το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα κοντά στην πηγή, K'_z η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα της διεπιφάνειας και b' το πάχος της διεπιφάνειας. Με όμοιο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί και η εξατμισοδιαπνοή, η οποία θα εξαρτάται από το βάθος του νερού καθώς και η ροή σε περίπτωση αποστράγγισης.

Όλες οι επιλογές που υπάρχουν για τον ορισμό των οριακών συνθηκών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον προσδιορισμό εσωτερικών ορίων ή την προσομοίωση πηγών ή σημείων συγκέντρωσης του υπόγειου νερού. Συχνά ο καθορισμός εσωτερικών ορίων, π.χ. ενός ποταμού μπορεί να χωρίσει την υπό μελέτη περιοχή σε δυο ανεξάρτητα τμήματα, τα οποία μπορούν να αναλυθούν ξεχωριστά. [1]

2.5 Όροι εμπλουτισμού / άντλησης υδάτων

Το νερό μπορεί να «εισέλθει» ή να «εξέλθει» από ένα μοντέλο με έναν από τους εξής δυο τρόπους [1]:

- μέσω των ορίων της υπό μελέτη περιοχής
- μέσω πηγών και σημείων συγκέντρωσης νερού στο εσωτερικό του πλέγματος.

Οι πηγές και τα σημεία συγκέντρωσης νερού προσομοιώνονται όπως και τα όρια αν και δεν αποτελούν οριακές συνθήκες. Ανάλογα όμως με το μοντέλο που χρησιμοποιείται κάθε φορά αυτό μπορεί να αναιρεθεί και να θεωρηθούν ως οριακές συνθήκες.

Πηγάδια άντλησης νερού και εμπλουτισμού του υδροφορέα

Ένα τέτοιου είδους πηγάδι θεωρείται σημείο εμπλουτισμού ή άντλησης και συμβολίζεται με έναν κόμβο. Ο χρήστης προσδιορίζει το ρυθμό άντλησης ή εισροής νερού και έτσι ο κόμβος αυτός μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα χωρικό σημείο, σε τρισδιάστατο μοντέλο, ή απλά το πάχος του υδροφορέα σε ένα δισδιάστατο μοντέλο. Το πηγάδι θεωρείται ότι διαπερνά ολόκληρο τον υδροφορέα. [1]

Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών τα σημεία εμπλουτισμού ή άντλησης αντιπροσωπεύονται από έναν κόμβο που αυτός με τη σειρά αντιπροσωπεύεται από το κελί του. Η διάμετρος του πηγαδιού είναι μικρότερη από τις διαστάσεις του κελιού αυτού. Αν και χρειάζονται πολλά και μικρά κελιά για να αναπαρασταθεί με ακρίβεια η ροή γύρω από τα σημεία εμπλουτισμού ή άντλησης γενικά είναι επιθυμητό το αντίθετο και έτσι σχεδόν ποτέ δεν παρατηρείται το κελί να έχει ίδιες διαστάσεις με το πηγάδι. Τα συγκεκριμένα μοντέλα δεν μπορούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια το υδροστατικό ύψος του νερού κοντά στα σημεία αυτά γιατί οι τιμές που έχουν και υπολογίζουν για τις ποσότητες του νερού που εισέρχονται ή εξέρχονται αφορούν ολόκληρο το κελί και όχι μόνο τον κόμβο. [1]

Το υδροστατικό ύψος που υπολογίζει το μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει το υδροστατικό ύψος σε κάποιο σημείο που απέχει απόσταση r_e από το πηγάδι. Με μαθηματικές εκφράσεις που βασίζονται στην εξίσωση μόνιμων συνθηκών του Thiem (ισχύει όταν επικρατούν σχεδόν μόνιμες συνθήκες, όταν ο

ρυθμός απομάκρυνσης του νερού κοντά στο πηγάδι είναι μηδέν) μπορεί να προσεγγιστεί το υδραυλικό ύψος στο πηγάδι. Η ίδια παραδοχή μπορεί να γίνει και σε δυναμικές συνθήκες αν υποθεθεί ότι μετά από ορισμένο χρόνο η ποσότητα νερού που απομακρύνεται είναι αμελητέα. [1]

Σε δισδιάστατα μοντέλα και με την παραδοχή ότι το πηγάδι διαπερνά πλήρως τον υδροφορέα μπορεί να υπολογιστεί το υδραυλικό ύψος από τη σχέση του Thiem:

$$h_w = h_{i,j} - \frac{Q_{WT}}{2\pi T} \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)$$

όπου: Q_{WT} είναι ο ρυθμός εισροής ή απομάκρυνσης νερού από το πηγάδι, h_w είναι το υδραυλικό ύψος στο πηγάδι, $h_{i,j}$ το υδραυλικό ύψος που υπολογίζει το μοντέλο για τον κόμβο του πηγαδιού, T είναι η μεταβατικότητα και r_e είναι η ενεργός ακτίνα (effective well block radius). [1]

Σε ελεύθερους υδροφορείς αντί για την παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται η ακόλουθη:

$$h_w = \sqrt{h_{i,j}^2 - \frac{Q_{WT}}{\pi K} \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}$$

Στα μοντέλα αυτά όταν το πηγάδι δεν διαπερνάει πλήρως τον υδροφορέα αγνοείται το γεγονός αυτό, χωρίς να δημιουργούνται σημαντικά σφάλματα. Αντίθετα, σε τρισδιάστατα μοντέλα η μη πλήρης «διάσχιση» του υδροφορέα από το πηγάδι μπορεί να προσομοιωθεί, αρκεί να δίνονται στοιχεία για τις ποσότητες νερού σε κάθε στρώμα, οι οποίες υπολογίζονται από τις συνολικές ποσότητες νερού και την μεταβατικότητα κάθε στρώματος. Τα παραπάνω αποτελούν μόνο μια προσέγγιση καθώς δεν μπορεί να αποδειχθεί ότι η ύπαρξη πηγαδιού που διαπερνάει πάνω από έναν υδροφορέα ή στρατογραφικές μονάδες επιτρέπει τη μεταφορά νερού μέσα σε αυτούς. [1]

Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων

Στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων ο ρυθμός άντλησης νερού ή εμπλουτισμού του υδροφορέα εφαρμόζεται ακριβώς στον κόμβο ή στους κόμβους που υπάρχει το πηγάδι, και έτσι το προσομοιώνουν καλύτερα και με περισσότερη ακρίβεια από ότι τα

μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και δεν χρειάζεται η εφαρμογή φόρμουλων διόρθωσης των τιμών που παίρνουμε. [1]

Η flux κατά μήκος της στάθμης του νερού

Η flux κατά μήκος της στάθμης του νερού θεωρείται ως μια εσωτερική πηγή ή σημείο συγκέντρωσης νερού αν το μοντέλο χρησιμοποιεί τις παραδοχές Dupuit για τον υπολογισμό της. Διαφορετικά αυτή θεωρείται ως οριακή συνθήκη. Και στις δυο περιπτώσεις απαιτείται η κατασκευή ενός πίνακα τιμών της flux. [1]

Είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν οι ποσότητες του νερού που εισέρχονται ή εξέρχονται (recharge & discharge rates) από τον υδροφορέα και για το λόγο αυτό έχει γίνει αποδεκτό να υποτίθεται ένας χωρικά ομοιόμορφος ρυθμός εισροής και εκροής νερού κατά μήκος κάποιων ζωνών στάθμης του νερού, ο οποίος είναι ποσοστό της ετήσιας βροχόπτωσης. Αυτός συχνά προσδιορίζεται κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Φυσικά, στην πραγματικότητα ο ρυθμός αυτός ποικίλει κατά πολύ τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Ένα άλλο πρόβλημα στον προσδιορισμό της flux κατά μήκος της στάθμης του νερού είναι η αντιστοίχιση των συνολικών ποσοτήτων νερού που προσδιορίζονται για την ευρύτερη περιοχή με αυτές που ισχύουν για την υπό μελέτη περιοχή. Συγκεκριμένα, μπορεί να συμβεί κάποια κελιά να έχουν ρυθμό πολύ μεγαλύτερο από τη συνολική βροχόπτωση. Σημαντικό ρόλο παίζει ακόμη και ο αριθμός και το μέγεθος των κελιών. [1]

Ο προσδιορισμός της flux κατά μήκος της στάθμης του νερού μπορεί να πραγματοποιηθεί με δυο κυρίως τρόπους [1]:

- **Μοντελοποίηση του ισοζυγίου του νερού:** Έχει δημιουργηθεί ένα μοντέλο το οποίο έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει, τη χωρική κατανομή των ρυθμών εισροής και εκροής νερού από το σύστημα με τη βοήθεια χαρτών ισοδυναμικών γραμμών, εκτιμήσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πάχους της κορεσμένης ζώνης. Όλοι οι κόμβοι της επιφάνειας του νερού έχουν συγκεκριμένες τιμές υδραυλικού ύψους από το χάρτη, ενώ ο υπολογισμός του ισοζυγίου του νερού δίνει τις flux μεταξύ των κελιών. Η διαφορά εισροών και εκροών μεταξύ των κελιών αντιπροσωπεύει τις ποσότητες νερού που εισέρχονται και εξέρχονται από το σύστημα. Με τον

τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η χωρική κατανομή των flux, οι οποίες, αν δεν αναμένεται να αλλάζουν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οριακές συνθήκες. Σφάλματα τα οποία υπάρχουν στα δεδομένα που λαμβάνονται μπορούν να επιφέρουν ακόμη μεγαλύτερα σφάλματα στις τιμές των μεγεθών που υπολογίζονται.

- Μοντελοποίηση της ακόρεστης ζώνης: Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού της flux κατά μήκος της στάθμης του νερού είναι η χρήση μοντέλων ροής στην ακόρεστη ζώνη, τα οποία λαμβάνουν υπόψη το φιλτράρισμα του νερού, συνήθως είναι πιο περίπλοκα και απαιτούν περισσότερα στοιχεία. Ίσως να ήταν καλύτερα να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο κορεσμένης/ ακόρεστης ζώνης μια και η ροή ανάμεσα στις δυο αυτές ζώνες μπορεί να θεωρηθεί συνεχής και η επιφάνεια του νερού να υπολογιστεί ως η νοητή γραμμή μηδενικής υδροστατικής πίεσης.

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών η flux στην επιφάνεια του νερού αντιπροσωπεύεται από έναν όγκο νερού που εφαρμόζεται στην πάνω περιοχή του κελιού ανά μονάδα χρόνου. Στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων μια κατανεμημένη πηγή μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα στοιχείο ως recharge, ενώ τα recharge & discharge points μπορούν να εφαρμοστούν σε έναν κόμβο. Αργότερα όμως, οι κατανεμημένες πηγές πρέπει να εφαρμοστούν σε κόμβους. Το μοντέλο πολλαπλασιάζει τις flux που έχει δώσει ο χρήστης σε κάποιους κόμβους και έτσι το νερό κατανέμεται σε κάθε κόμβο του στοιχείου. [1]

Διαρροές

Η διαρροή μπορεί να είναι προς ή από τον υδροφορέα ανάλογα με τα υδραυλικά ύψη του υδροφορέα και της περιοχής μετά το «αδιαπέρατο» στρώμα. Ο όγκος και η κατεύθυνση μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ανάλογα με τα υδραυλικά ύψη και για το λόγο αυτό η διαρροή είναι μια οριακή συνθήκη που εξαρτάται από το υδραυλικό ύψος. Ο αποθηκευτικός «χώρος» μπορεί να είναι ένας ελεύθερος υδροφορέας, ένα ποτάμι ή μια λίμνη. Αν το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα είναι μεγαλύτερο από εκείνο του αποθηκευτικού «χώρου» τότε θα έχουμε απομάκρυνση του νερού από το μοντέλο. Στην αντίθετη περίπτωση έχουμε πρόσθεση νερού στο μοντέλο. Ο όγκος της διαρροής στα δισδιάστατα μοντέλα προσδιορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_L^* = -K_z' \left(\frac{h_{\text{source}} - h}{b'} \right) w l$$

όπου K_z' είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος που υπάρχει διαρροή και b' το πάχος του. Ο λόγος K_z'/b' είναι η διαρροή (leakage). Οι παράμετροι w και l είναι το πλάτος και το μήκος του «χώρου» αποθήκευσης, αντίστοιχα. Το h_{source} είναι το υδραυλικό ύψος της πηγής και h είναι το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα που υπολογίζει το μοντέλο. Ο ογκομετρικός ρυθμός της διαρροής πρέπει να μετατραπεί σε επιφανειακό ρυθμό που θα εφαρμοστεί στην κορυφή του κελιού. [1]

2.6 Σημαντικές παράμετροι εφαρμογής ενός μοντέλου

Εκτός από όλα τα οποία προαναφέρθηκαν υπάρχουν και κάποιες άλλες παράμετροι που είναι σημαντικές και πρέπει να προσδιοριστούν για την εφαρμογή ενός μοντέλου.

2.6.1 Κριτήριο σφάλματος

Οι προσομοιωμένες ροές είναι δυνατόν να περιέχουν σφάλματα αποκοπής, διακριτικότητας και σφάλματα λόγω επανάληψης των υπολογισμών. Τα σφάλματα διακριτικότητας μπορούν να αφορούν είτε το χρόνο είτε το χώρο και πρέπει να εντοπίζονται στα αρχικά στάδια της βαθμονόμησης του μοντέλου. Η επίδραση της «χωροθέτησης» των κόμβων και των κελιών στα αποτελέσματα του μοντέλου θα πρέπει να ελέγχεται με αλλαγή αυτών και τρέξιμο του μοντέλου, ώστε να γίνουν εμφανείς τυχόν αποκλίσεις και διαφορές. Αυτό αν και είναι δυνατόν στο μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ δύσκολο να γίνει στα μοντέλα περασμένων διαφορών. Επίσης, πρέπει να εξεταστεί η επίδραση του χρόνου σε δυναμικές προσομοιώσεις, χρησιμοποιώντας διαφορετικά χρονικά βήματα και ελέγχοντας τις αντίστοιχες λύσεις που προκύπτουν. [1]

Το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που αντιπροσωπεύουν την εξίσωση της ροής μπορούν να επιλυθούν χρησιμοποιώντας μεθόδους με πίνακες, επαναληπτικές μεθόδους ή έναν συνδυασμό αυτών των δυο. Όταν χρησιμοποιούνται επαναληπτικές μέθοδοι υπάρχει ένα επιπλέον σφάλμα, το οποίο είναι γνωστό ως επαναληπτικό υπολειμματικό σφάλμα (iteration residual error). Στην περίπτωση αυτή πρέπει να

οριστεί ένα όριο από το χρήστη, το οποίο θα κρίνει πότε έχουμε ικανοποιητική σύγκλιση στην πραγματική λύση. [1]

Όριο για τη ροή

Η τιμή που θα επιλεγεί ως όριο καθορίζεται από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διαφοράς των λύσεων για τη ροή ανάμεσα σε δυο επαναλήψεις. Η διαφορά υπολογίζεται για κάθε κόμβο, ενώ το όριο θα πρέπει να είναι δυο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που επιθυμούμε να έχουμε. Η διαφορά μπορεί να υπολογίζεται με πολλούς τρόπους, όπως για παράδειγμα ως η απόλυτη διαφορά των τιμών δυο διαδοχικών επαναλήψεων. Ακόμη, μπορούν να αθροιστούν οι απόλυτες τιμές των διαφορών της ροής όλων των κόμβων και το άθροισμα να συγκριθεί με το δεδομένο όριο. Σε γενικές γραμμές, το όριο της ροής θα πρέπει να είναι τόσο μικρό έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μία ακριβής λύση αλλά ταυτόχρονα να είναι δυνατή η σύγκλιση σε μια συγκεκριμένη τιμή. [1]

Όριο για το ισοζύγιο νερού

Ένας άλλος τρόπος να ελεγχθεί το ποσοστό του υπολειμματικού σφάλματος είναι να συγκριθούν οι ολικές εισροές και εκροές του νερού από το ισοζύγιο του νερού. Το σφάλμα υπολογίζεται ως η διαφορά των εκροών και των εισροών ως προς ένα από αυτά τα δύο. Το ιδανικό επιτρεπτό σφάλμα είναι 0,1% αλλά και μέχρι 1% μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό. Γενικότερα, το ισοζύγιο μάζας μπορεί να αποτελέσει έναν βασικό δείκτη ύπαρξης σφαλμάτων. Για παράδειγμα, υπερβολικά μεγάλες ροές ή όγκοι νερού μπορούν να απορρέουν από σφάλματα στις τιμές των δεδομένων. Το ισοζύγιο μάζας μπορεί να δείξει ακόμη και αν το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να δώσει μια αποδεκτή λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα. [1]

2.6.2 Χρόνος εκτέλεσης (execution time)

Μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για την εφαρμογή ενός μοντέλου είναι ο χρόνος που θα χρειαστεί για να ολοκληρώσει τους υπολογισμούς του (execution time). Αυτός ο χρόνος εξαρτάται από [1]:

- την αποτελεσματικότητα του προγράμματος μετατροπής που χρησιμοποιείται
- την ταχύτητα την οποία μπορεί το μοντέλο και ο υπολογιστής να φτάσει
- το μέγεθος του μοντέλου, π.χ. τον αριθμό των κόμβων και των δεδομένων που έχει

- τον τύπο της συσκευής εξόδου των αποτελεσμάτων

2.6.3 Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση είναι μια διαδικασία με την οποία προσπαθούμε να αποδείξουμε ότι το μοντέλο είναι κατάλληλο να δώσει ως αποτέλεσμα κάποιες συγκεκριμένες τιμές των εκάστοτε ζητούμενων μεγεθών που έχουν παρατηρηθεί στο πεδίο. Συγκεκριμένα, λύνοντας το λεγόμενο «αντίστροφο» πρόβλημα, προσπαθούμε από τη γνώση των τιμών κάποιων βασικών μεγεθών (π.χ. υδραυλικού ύψους) να προσδιορίσουμε τις τιμές κάποιων βασικών παραμέτρων (π.χ. υδραυλικής αγωγιμότητας, ειδικής αποθηκευτικότητας). Γνωρίζοντας τις παραμέτρους αυτές μπορούμε πλέον να λύσουμε το αρχικό πρόβλημα και να προσδιορίσουμε π.χ. το υδραυλικό ύψος σε όλα τα σημεία της υπό μελέτη περιοχής μέσω του μοντέλου. Το «αντίστροφο» πρόβλημα μπορεί να επεκταθεί τόσο ώστε να υπολογιστούν ακόμη και οριακές συνθήκες ή χωρικές κατανομές των παραμέτρων. [1]

Η βαθμονόμηση γίνεται συνήθως σε μόνιμες συνθήκες αλλά μπορεί εξίσου να πραγματοποιηθεί κάτω από δυναμικές συνθήκες, ανάλογα με το πρόβλημα. Στις μόνιμες συνθήκες μπορούν να ληφθούν ως ενδεικτικές τιμές οι μέσοι όροι μετρήσεων μεγάλων περιόδων. Σε περίπτωση που υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις ή έλλειψη αρκετών μετρήσεων δεν μπορεί να υποθεθεί ότι υπάρχουν σταθερές συνθήκες και γι' αυτό θα πρέπει να γίνει η βαθμονόμηση κάτω από δυναμικές συνθήκες.

Οι κύριοι τρόποι βαθμονόμησης είναι οι εξής [1]:

- καθορισμός των παραμέτρων με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος
- αυτόματη εκτίμηση των παραμέτρων

Η πρώτη θεωρείται λιγότερο αξιόπιστη λόγω του ότι δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα πρωτόκολλα ή έγγραφα σχετικά με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Δοκιμή και σφάλμα

Στη μέθοδο αυτή οι τιμές των παραμέτρων εφαρμόζονται σε κάθε κόμβο και αλλάζουν κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης μέχρι να επιτευχθούν οι στόχοι. Πριν τη βαθμονόμηση προσδιορίζεται το εύρος της αβεβαιότητας κάθε παραμέτρου και βάση αυτού άλλες παράμετροι αλλάζουν περισσότερο και άλλες λιγότερο. Η λύση

που προκύπτει για τη βαθμονόμηση μπορεί να μην είναι μοναδική αλλά να προκύπτει ως αποτέλεσμα περισσότερων από έναν συνδυασμών των τιμών των παραμέτρων που αλλάζουν. Μετά τη βαθμονόμηση πρέπει οπωσδήποτε να ακολουθήσει ανάλυση ευαισθησίας. Γενικά, η μέθοδος αυτή επηρεάζεται από τις γνώσεις και την κρίση του χρήστη, ο οποίος επιλέγει τις τιμές για τις δοκιμές και το τελικό σετ των τιμών των παραμέτρων. [1]

Αυτόματη βαθμονόμηση

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ειδικά ανεπτυγμένους κώδικες, οι οποίοι χρησιμοποιούν είτε άμεση είτε έμμεση προσέγγιση για την επίλυση του «αντίστροφου» προβλήματος. Στην άμεση προσέγγιση οι άγνωστες παράμετροι θεωρούνται εξαρτημένες μεταβλητές στην βασική εξίσωση και τα υδραυλικά ύψη ανεξάρτητες μεταβλητές. Η προσέγγιση όμως αυτή είναι επιρρεπής στην αστάθεια των λύσεων που προκύπτουν και δεν αναγνωρίζει τα σφάλματα μετρήσεων, γεγονός το οποίο την έχει καταστήσει «άχρηστη». Η άμεση προσέγγιση είναι παρόμοια με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος με την έννοια ότι το κανονικό πρόβλημα επιλύεται επανειλημμένα. Η διαφορά όμως είναι ότι εδώ ελέγχεται αυτόματα η λύση και ρυθμίζονται οι παράμετροι έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα. Αν και η έμμεση προσέγγιση δίνει πιο σταθερές λύσεις από την άμεση, εμπεριέχει και εκείνη κάποια αστάθεια και μπορεί να δώσει παράλογες λύσεις, όπως π.χ. αρνητικές τιμές των παραμέτρων. Ακόμη, στην έμμεση προσέγγιση οι λύσεις προκύπτουν μέσα από ένα στατιστικό πλαίσιο, στο οποίο τα σφάλματα των τιμών των υδραυλικών υψών και των άλλων παραμέτρων ποσοτικοποιείται. [1]

Μια πρώτη εκτίμηση της αξιοπιστίας της βαθμονόμησης προκύπτει συγκρίνοντας τις ισοϋψείς του υδραυλικού ύψους που προκύπτουν από μετρήσεις με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου. Αυτό όμως δεν είναι αρκετό και έτσι θα πρέπει να γίνει μια λίστα των μετρημένων και των προσομοιωμένων τιμών καθώς και των διαφορών τους. Ο μέσος όρος των διαφορών είναι ένα μέτρο του σφάλματος της βαθμονόμησης, το οποίο και πρέπει να ελαχιστοποιηθεί.

Επίπεδο βαθμονόμησης και κατανομή του σφάλματος

Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά επίπεδα βαθμονόμησης, στα οποία χρησιμοποιείται διαφορετικό κριτήριο για το επιτρεπτό

σφάλμα και διαφορετικός στόχος βαθμονόμησης. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται τμήματα του πλέγματος, στα οποία δεν είναι εφικτή η βαθμονόμηση υψίστου επιπέδου. Η κατανομή των επιπέδων αυτών πρέπει να παρουσιαστεί πάνω σε ένα χάρτη. Οι βαθμονομήσεις υπό σταθερές συνθήκες απαιτούν ένα χάρτη για κάθε μέγεθος βαθμονόμησης, ενώ υπό δυναμικές συνθήκες ένα χάρτη για κάθε μέγεθος βαθμονόμησης και κάθε χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται. Γενικά, η εκτίμηση της κατανομής του σφάλματος παρέχει μια πιο ουσιώδη βαθμονόμηση. [1]

Ανάλυση ευαισθησίας

Ο σκοπός της ανάλυσης ευαισθησίας είναι να ποσοτικοποιήσει την αβεβαιότητα του βαθμονομημένου μοντέλου, που προκαλούν οι αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις των παραμέτρων του υδροφορέα, τις δυνάμεις και τις πιέσεις που ασκούνται καθώς και τις οριακές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια αυτής οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, των παραμέτρων αποθηκευτικότητας, εμπλουτισμού του υδροφορέα και των οριακών συνθηκών αλλάζουν συστηματικά, είτε ένας ένας είτε σε συνδυασμούς, μέσα σε ένα δεδομένο λογικό εύρος τιμών. Το μέγεθος της αλλαγής που προκύπτει στις λύσεις του μοντέλου, συνήθως σε αυτές που αφορούν το υδραυλικό ύψος, δείχνει την ευαισθησία του. Μια πιο επίσημη ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να περιλαμβάνει τον προσδιορισμό συντελεστών ευαισθησίας και τον προσδιορισμό ίσως περιοχών του πλέγματος που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία. [1]

Επαλήθευση του μοντέλου

Μετά την εφαρμογή του μοντέλου και τη λήψη των λύσεων που δίνει πρέπει να γίνει μια επαλήθευση, δηλαδή ένας έλεγχος για το κατά πόσο οι τιμές που προκύπτουν είναι σύμφωνες με τις τιμές που έχουν προκύψει από ανεξάρτητες μετρήσεις, μέσα πάντα σε ένα δεδομένο όριο απόκλιση ή σφάλματος. Αν κατά τη διάρκεια της επαλήθευσης αποδειχθεί ότι πρέπει να γίνει επανεπιλογή των παραμέτρων, τότε αυτή ουσιαστικά γίνεται με μια δεύτερη βαθμονόμηση και χρειάζονται νέα ανεξάρτητα δεδομένα πεδίου για μια νέα επαλήθευση. Δυστυχώς, πολλές φορές δεν υπάρχουν πολλά σετ τιμών έτσι ώστε να είναι δυνατή και η βαθμονόμηση και η επαλήθευση των λύσεων του μοντέλου. Στις περιπτώσεις αυτές αναγκαστικά εμπιστευόμαστε ένα μοντέλο που είναι απλά βαθμονομημένο αλλά έχει καλή ανάλυση ευαισθησίας, τόσο στη βαθμονόμηση όσο και στις προβλέψεις του μοντέλου. [1]

2.6.4 Πρόβλεψη

Ο κύριος στόχος ενός μοντέλου είναι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς και των συνθηκών που επικρατούν σε ένα σύστημα στο μέλλον. Ένα πολύ σημαντικό μέλημα είναι ο προσδιορισμός του χρόνου για τον οποίο το μοντέλο αναμένεται να προβλέπει καταστάσεις. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, της επαλήθευσης και της ανάλυσης ευαισθησίας. Η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη προέρχεται κυρίως από την αβεβαιότητα στην αξιοπιστία του βαθμονομημένου μοντέλου καθώς και στην αβεβαιότητα σχετικά με τις συνθήκες που θα επικρατούν στο μέλλον στην υπό μελέτη περιοχή, οι οποίες πιθανόν να αλλάξουν καθιστώντας τα αποτελέσματα και τις παραδοχές του μοντέλου εσφαλμένα. Άλλωστε, συχνά, για την πρόβλεψη του μέλλοντος χρειάζεται η παραδοχή των τιμών κάποιων ανθρωπογενών ή φυσικών δραστηριοτήτων, π.χ. του ρυθμού άντλησης από πηγάδια και έτσι εισάγεται νέα αβεβαιότητα και σφάλματα στις προβλέψεις του μοντέλου. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η διεξαγωγή ανάλυσης ευαισθησίας και στα αποτελέσματα των μελλοντικών προβλέψεων. [1]

3. Ροή υπόγειων υδάτων

3.1 Εισαγωγή

Μέσα σε ένα πορώδες μέσο, όπως το έδαφος, μπορούν να υπάρχουν τριών ειδών ροές: [3]

- ροή υδάτων σε κορεσμένο έδαφος,
- ροή υδάτων σε ακόρεστο έδαφος
- ροή αερίων

3.2 Ροή σε κορεσμένο έδαφος

Κορεσμένο θεωρείται το έδαφος, στο οποίο το νερό που περιέχεται είναι ίσο με το πορώδες του εδάφους. Ο πλήρης κορεσμός ενός πορώδους μέσου, όμως, είναι σχεδόν αδύνατος υπό φυσιολογικές συνθήκες, λόγω παρουσίας αέρα μέσα στους πόρους του. Παρόλα αυτά, στην υπόγεια υδραυλική γίνεται η παραδοχή πλήρους κορεσμού του εδάφους και κατά συνέπεια είναι εφικτός ο ορισμός διαφόρων εννοιών, όπως για παράδειγμα του υδροφόρου ορίζοντα. [3]

Οι δρώσες δυνάμεις που προκαλούν τη ροή σε κορεσμένα εδάφη είναι οι βαρυτικές κλίσεις και οι κλίσεις του δυναμικού πίεσης. Για μόνιμη ροή σε κορεσμένο μέσο, η μεταβολή του όγκου του νερού που περιέχεται σ' αυτό με το χρόνο είναι μηδενική και επομένως το νερό που περιέχεται είναι ίσο με το πορώδες του εδάφους. [3]

3.2.1 Ο νόμος του Darcy

Η ταχύτητα διήθησης του νερού [q (L/T)] (seepage velocity) σε κορεσμένα εδάφη περιγράφεται από το νόμο του Darcy [3]:

$$q = -\frac{Q}{An} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dl}$$

όπου: Q: ο ρυθμός παροχής (L^3/T)

A: η επιφάνεια κάθετα στην οποία γίνεται η ροή του νερού (L^2)

n: το πορώδες του μέσου

K : η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

$\frac{dh}{dl}$: η υδραυλική κλίση

Το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω σχέση δηλώνει το γεγονός ότι το νερό κινείται από περιοχές υψηλού δυναμικού προς περιοχές χαμηλού δυναμικού, ενώ το υδραυλικό ύψος h σε ένα τυχαίο σημείο του εδάφους ορίζεται από τη σχέση [3]:

$$h = \frac{P}{\rho g} + z$$

όπου P : η υδροστατική πίεση

ρ : η πυκνότητα του νερού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

z : το υψόμετρο του σημείου από τον ορίζοντα άξονα αναφοράς

Με μια σειρά πειραμάτων σε ομοιόμορφο πορώδες μέσο, το οποίο αποτελείται από υάλινες σφαίρες διαμέτρου d , ομοιόμορφα κατανεμημένες και διαμέσου του οποίου μελετάται η ροή διαφόρων ρευστών που χαρακτηρίζονται από την πυκνότητά τους ρ , το ιξώδες μ και σταθερή υδραυλική κλίση $\frac{dh}{dl}$, μπορούμε να καταλήξουμε σε μια νέα μορφή του νόμου του Darcy [4]:

$$q = -\frac{Cd^2 \rho g}{\mu} \frac{dh}{dl}$$

όπου C ένας συντελεστής που εξαρτάται από την ταξινόμηση μεγέθους των κόκκων, την σφαιρικότητα και τη διάταξή τους. Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι [4]:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

όπου $k = Cd^2$ = ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου.

Η ειδική διαπερατότητα k είναι συνάρτηση μόνο του πορώδους μέσου (γεωμετρία και διάταξη κόκκων) και εκφράζεται σε μονάδες επιφάνειας (L^2). Σε περίπτωση εδάφους που δεν αντιδρά με τα ρευστά και δεν αλλάζουν οι υδραυλικές ιδιότητές του, η τιμή του k δεν αλλάζει για οποιοδήποτε είδος ρευστού. Αντίθετα, αλλαγή της ειδικής διαπερατότητας μπορεί να παρατηρηθεί λόγω [3]:

- της αλληλεπίδρασης του ρευστού και του πορώδους μέσου, που προκαλεί αλλαγές στη δομή των κόκκων,
- της εκάστοτε σύστασης του υπάρχοντος ύδατος στο πορώδες μέσο,
- της κινητικής ενέργειας που προκαλείται από βροχόπτωση ή αντλήσεις,
- του παγιδευμένου στο πορώδες μέσο αέρα,

- των μικροβιακών διεργασιών.

Ο νόμος του Darcy ισχύει όταν η ταχύτητα ροής είναι αρκετά μικρή, έτσι ώστε να τηρούνται τα κριτήρια της στρωτής ροής. Βασικό κριτήριο είναι ο αριθμός Reynolds, ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{|q|d_{10}}{\nu}$$

όπου: q : η ταχύτητα του Darcy

ν : κινηματικό ιξώδες

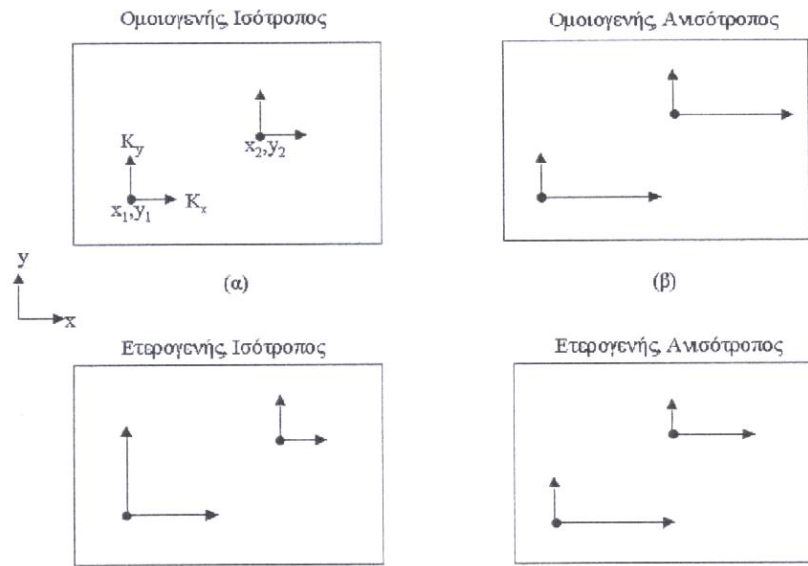
d_{10} : μια χαρακτηριστική διάμετρος κόκκων, τέτοια ώστε το 10% κατά βάρος του πορώδους υλικού να απαρτίζεται από κόκκους με διάμετρο μικρότερη από d_{10} .

Γενικά έχει βρεθεί ότι ο νόμος του Darcy ισχύει για $Re < 1$ αλλά έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και για $Re = 10$ χωρίς σοβαρό σφάλμα.

3.2.2 Υδραυλική αγωγιμότητα

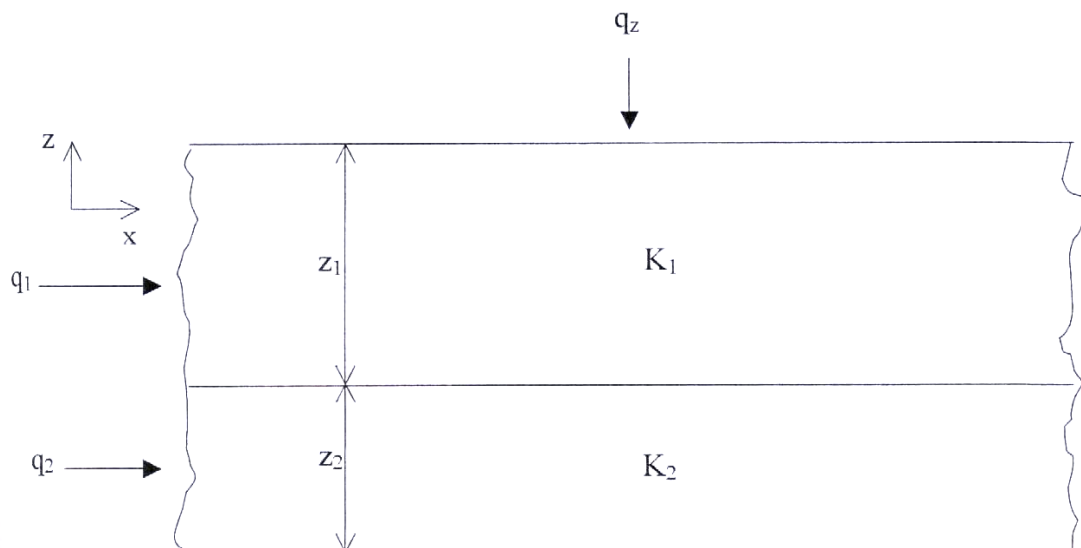
Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος του, η οποία συνήθως μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο ή και ανάλογα με την κατεύθυνση. Έτσι, ορίζονται οι ιδιότητες της ομοιογένειας ή ετερογένειας και της ισοτροπίας ή ανισοτροπίας. [4]

- *Ομοιογενής (homogeneous)* χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας που έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του
- *Ετερογενής (heterogeneous)* χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας του οποίου οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά
- *Ισότροπος (isotropic)* χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας, ο οποίος σε οποιοδήποτε ορισμένο σημείο του έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις
- *Ανισότροπος (anisotropic)* χαρακτηρίζεται με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση.



Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση των εννοιών της ομοιογένειας, ετερογένειας, ισοτροπίας και ανισοτροπίας. [4]

Στην περίπτωση που η υπόγεια ροή πραγματοποιείται διαμέσου στρωμάτων με διαφορετικές ιδιότητες είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε μια συνολική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, βάση των υδραυλικών αγωγιμοτήτων των επιμέρους στρωμάτων. Εάν η ροή είναι παράλληλη στα υπάρχοντα στρώματα ισχύουν τα ακόλουθα [4]:



Σχήμα 9: Οριζόντια και κάθετη ροή διαμέσου παράλληλων στρωμάτων με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες. [4]

Η παροχή q_1 του άνω στρώματος ανά μονάδα πλάτους δίνεται από τη σχέση:

$$q_1 = K_1 \frac{dh}{dx} z_1$$

Η παροχή q_2 του κάτω στρώματος ανά μονάδα πλάτους δίνεται από τη σχέση:

$$q_2 = K_2 \frac{dh}{dx} z_2$$

Για την οριζόντια ροή ο όρος $\frac{dh}{dx}$ είναι ίδιος και για τα δυο στρώματα. Επομένως, ο συνολικός ρυθμός ροής q_x ανά μονάδα πλάτους θα είναι ίσος:

$$q_x = q_1 + q_2 = \frac{dh}{dx} (K_1 z_1 + K_2 z_2)$$

Αν θεωρήσουμε τα δυο στρώματα ως ένα ομοιογενές σύστημα με μια τιμή οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας ολόκληρου του συστήματος K_x , τότε ο νόμος του Darcy θα έχει τη μορφή:

$$q_x = K_x \frac{dh}{dx} (z_1 + z_2)$$

όπου το K_x ισούται με:

$$K_x = \frac{K_1 z_1 + K_2 z_2}{z_1 + z_2}$$

Η γενική μορφή για n στρώματα είναι:

$$K_x = \frac{K_1 z_1 + K_2 z_2 + \dots + K_n z_n}{z_1 + z_2 + \dots + z_n}$$

Εάν η ροή πραγματοποιείται κάθετα στα υπάρχοντα στρώματα ο ρυθμός ροής ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$q_z = K_1 \frac{dh_1}{dz_1}$$

όπου dh_1 είναι η απώλεια φορτίου μέσα στο πρώτο στρώμα. Λύνοντας ως προς dh_1

έχουμε:

$$dh_1 = \frac{z_1}{K_1} q_z$$

Λόγω της αρχής της συνέχειας το q_z παραμένει σταθερό για το δεύτερο στρώμα και η απώλεια φορτίου dh_2 δίνεται από τη σχέση:

$$dh_2 = \frac{z_2}{K_2} q_z$$

Η ολική απώλεια φορτίου ισούται με:

$$dh_1 + dh_2 = \left[\frac{z_1}{K_1} + \frac{z_2}{K_2} \right] q_z$$

Θεωρώντας τα δυο στρώματα σαν ένα ομοιογενές σύστημα με μια τιμή κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας ολόκληρου του συστήματος K_z , ο νόμος του Darcy θα έχει τη μορφή:

$$q_z = K_z \left[\frac{dh_1 + dh_2}{z_1 + z_2} \right] \Rightarrow dh_1 + dh_2 = \left[\frac{z_1 + z_2}{K_z} \right] q_z$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$K_z = \frac{z_1 + z_2}{\frac{z_1}{K_1} + \frac{z_2}{K_2}}$$

Η γενική μορφή για n στρώματα είναι:

$$K_z = \frac{z_1 + z_2 + \dots + z_n}{\frac{z_1}{K_1} + \frac{z_2}{K_2} + \dots + \frac{z_n}{K_n}}$$

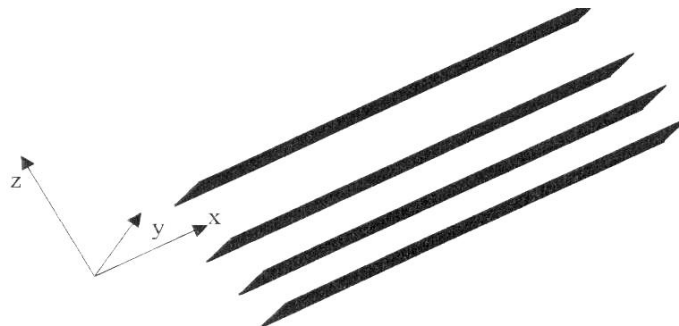
3.2.3 Γενική μορφή του νόμου του Darcy

Λόγω του φαινομένου της ανισοτροπίας, στην περίπτωση εφαρμογής του νόμου του Darcy η ταχύτητα της υπόγειας ροής είναι διανυσματικό μέγεθος με συνιστώσες στις τρεις κατευθύνσεις x, y και z. Εάν, ο άξονας του συστήματος συντεταγμένων είναι κάθετος στη διεύθυνση των στρωμάτων και οι άλλοι παράλληλοι τότε ισχύουν οι σχέσεις [4]:

$$v_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$



Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση των συστημάτων των συντεταγμένων της ροής και του εδάφους, τα οποία συμπίπτουν. [4]

Σε διαφορετική περίπτωση οι σχέσεις που ισχύουν είναι οι ακόλουθες:

$$v_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$v_y = -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$v_z = -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

3.2.4 Αρχή διατήρησης της μάζας

Στην περίπτωση που έχουμε μόνιμες συνθήκες, δηλαδή η τιμή και το διάνυσμα της ταχύτητας ροής είναι σταθερά, η ροή σε κορεσμένο έδαφος περιγράφεται από την εξίσωση Laplace, εφόσον ισχύσει η αρχή διατήρησης της μάζας από την οποία προκύπτει ότι [3]:

$$-\frac{\partial (v_x)}{\partial x} - \frac{\partial (v_y)}{\partial y} - \frac{\partial (v_z)}{\partial z} = 0$$

Για ασυμπίεστο ρευστό έχουμε:

$$-\frac{\partial (v_x)}{\partial x} - \frac{\partial (v_y)}{\partial y} - \frac{\partial (v_z)}{\partial z} = 0$$

Με τη βοήθεια του νόμου του Darcy, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει στην περίπτωση μόνιμων συνθηκών, ανισότροπου υδροφορέα και ταύτισης του συστήματος συντεταγμένων της ροής με αυτό της υδραυλικής αγωγιμότητας K . Αν γίνει η παραδοχή ομογενούς, ισοτροπικού υδροφορέα τότε η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται [3]:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Ειδική περίπτωση της εξίσωσης Laplace αποτελεί η προσέγγιση Dupuit, η οποία ισχύει για δισδιάστατη ανάλυση και βασίζεται στη γραμμικοποίηση των οριακών συνθηκών και/ ή στις μη γραμμικές εξισώσεις συνέχειας που περιγράφουν τους

ελεύθερους υδροφορείς. Οι βασικές παραδοχές της προσέγγισης αυτής είναι οι ακόλουθες [3]:

1. Η υδραυλική κλίση είναι ίση με την κλίση του υδροφόρου ορίζοντα.
2. Για υδροφόρους ορίζοντες με μικρή υδραυλική κλίση οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές κάθετες.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$$

Η εξίσωση της συνέχειας στην περίπτωση μη-μόνιμων συνθηκών δεν είναι ίση με μηδέν αλλά έχει τη μορφή [3]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial (u_x)}{\partial x} - \frac{\partial (u_y)}{\partial y} - \frac{\partial (u_z)}{\partial z} &= \frac{\partial \phi}{\partial t} \\ -\frac{\partial (u_x)}{\partial x} - \frac{\partial (u_y)}{\partial y} - \frac{\partial (u_z)}{\partial z} &= \phi \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \end{aligned}$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού και ϕ το πορώδες του μέσου.

Με τη βοήθεια του νόμου του Darcy και με την παραδοχή ότι $S_s = \rho g (\alpha + \phi \beta)$ = ειδική αποθηκευτικότητα (specific storage), όπου α = συμπιεστότητα υδροφορέα και β = συμπιεστότητα του υγρού, η παραπάνω σχέση γίνεται [3]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t}$$

3.3 Ροή στην ακόρεστη ζώνη

Η ακόρεστη ζώνη αποτελείται από το μέρος του εδάφους, όπου η περιεκτικότητα υγρασίας είναι μικρότερη από το πορώδες και η πίεση του ύδατος εντός του εδαφικού υλικού είναι αρνητική. Το νερό στην ακόρεστη ζώνη απορροφάται σαν ένα λεπτό στρώμα πάνω στην επιφάνεια των κόκκων και κρατείται ισχυρά από αυτούς λόγω της αρνητικής πίεσης ή πίεσης απορρόφησης. Καθώς προστίθεται περισσότερο νερό στους πόρους, η κίνησή του ύδατος περιορίζεται λόγω των ισχυρών δυνάμεων που εμφανίζονται από τα τριχοειδή φαινόμενα. [3]

Λόγω της παρουσίας αέρα μέσα στους πόρους των ακόρεστων εδαφών, η ροή μέσα σε αυτά διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με τη ροή σε κορεσμένα εδάφη.

Γενικά, η ροή σε ακόρεστα εδάφη οφείλεται στο περιεχόμενο νερό, στο τριχοειδές δυναμικό (capillary potential) ή την πίεση του εδάφους και το βαρυτικό δυναμικό. Επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως από τον ομοιοπολικό δεσμό υδρογόνου ανάμεσα στο έδαφος και το νερό, την παρουσία μικροπόρων, την ετερογένεια, το δυναμικό ροής, κτλ. Ακόμη, η υδραυλική κλίση δεν είναι θετική όπως στη ροή σε κορεσμένο έδαφος αλλά έχει αρνητική τιμή. [3]

Ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει τη ροή στα ακόρεστα εδάφη είναι η υγρασία, δηλαδή η περιεχόμενη σε αυτά ποσότητα ύδατος. Το ποσοστό πλήρωσης των πόρων του μέσου με νερό εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κυρίως κατηγορίες [3]:

- Κλιματικές παράμετροι: βροχόπτωση, θερμοκρασία εδάφους, σχετική υγρασία, εξάτμιση, εξατμισοδιαπνοή, κ.α.
- Εδαφικές παράμετροι: υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμένου εδάφους, ενεργό πορώδες, δυναμικό λόγω τριχοειδών φαινομένων, κ.α.

3.3.1 Ο νόμος του Darcy

Ο νόμος του Darcy στην περίπτωση ακόρεστης ροής ισχύει αλλά δεν είναι γραμμική συνάρτηση. Δίνεται από τη σχέση [3]:

$$q = -K \theta \frac{dh}{dl}$$

όπου $K(\theta)$ είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, ως συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας σε αυτό.

Υπάρχουν και περιπτώσεις που ο νόμος αυτός δεν ισχύει, όπως για παράδειγμα σε περίπτωση μη Νευτώνειας συμπεριφοράς. Τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να παρατηρηθούν όταν [3]:

- Η υδραυλική κλίση είναι μικρή και δεν υπάρχει κίνηση του νερού
- Η ταχύτητα δεν είναι γραμμική συνάρτηση της υδραυλικής κλίσης

Και στις δυο παραπάνω περιπτώσεις η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ανεξάρτητη της υγρασίας.

Η ταχύτητα του Darcy μπορεί να εκφραστεί και με τη βοήθεια του συντελεστή διάχυσης, δεχόμενοι ότι η υδραυλική αγωγιμότητα και το δυναμικό των τριχοειδών

φαινομένων (matric potential), ψ_m είναι μονοσήμαντες συναρτήσεις του της υγρασίας θ . Στην περίπτωση αυτή έχουμε [3]:

$$D \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta} = K \frac{d\psi_m}{d\theta} \quad \text{και} \quad q = -D \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

Ο συντελεστής D μπορεί να προσδιοριστεί είτε πειραματικά είτε με την προσέγγιση του Boltzman.

3.3.2 Υδραυλική αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται ανάλογα με το περιεχόμενο του εδάφους σε υγρασία (σε γενικές γραμμές όσο αυξάνεται η υγρασία, αυξάνεται η υδραυλική αγωγιμότητα), ενώ ακόμη εξαρτάται από το δυναμικό των τριχοειδών φαινομένων (matric potential), ψ_m , και μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση αυτού στο νόμο του Darcy. Παρόλα αυτά δεν συνηθίζεται λόγω δυσκολίας προσδιορισμού του ψ_m , που οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της υστέρησης. Για τον προσδιορισμό τόσο του $K(\theta)$ όσο και του $K(\psi_m)$ έχουν αναπτυχθεί πολλοί εμπειρικοί τύποι, βασισμένοι σε διαφορετικές παραδοχές. [5]

Επικρατέστερη όλων παρουσιάζεται να είναι η ακόλουθη σχέση, η οποία προσδιορίζει την υδραυλική αγωγιμότητα $K(\theta)$ συναρτήσει της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμένου εδάφους K_s , του υδατικού περιεχόμενου κορεσμένου εδάφους θ_s , του εναπομένοντος υδατικού περιεχόμενου θ_r και μιας μεταβλητής n , η οποία εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους. [5]

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^n$$

Μερικοί σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την υδραυλική αγωγιμότητα σε ακόρεστα εδάφη είναι [5]:

- Η υδραυλική κλίση i , που αλλάζει συνεχώς ανάλογα με την περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία
- Το matric potential, ψ_m , που επηρεάζεται άμεσα από την ποσότητα νερού που περιέχεται στο έδαφος
- Ύπαρξη διαφόρων στρωμάτων με διαφορετική κοκκομετρία και υγρασία

Χαρακτηριστικά, όσον αφορά στην κοκκομετρία του εδάφους, έχει παρατηρηθεί ότι σε λεπτόκοκκα εδάφη, αύξηση του δυναμικού λόγω τριχοειδών φαινομένων συνεπάγεται αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας, ενώ αντίθετα σε χονδρόκοκκα εδάφη, όσο αυξάνεται το δυναμικό λόγω τριχοειδών φαινομένων η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται. [6]

Άλλοι παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν μείωση στην υδραυλική αγωγιμότητα λόγω αύξησης του δυναμικού αναρρόφησης είναι [5]:

- Μείωση του αγωγιμότητας των πόρων λόγω απώλειας ύδατος από μεγαλύτερους πόρους
- Μείωση του ενεργού πορώδους
- Μη ευθύγραμμη κίνηση του ύδατος ανάμεσα από τους πόρους
- Μεγάλο ιξώδες
- Θερμοκρασία (ανάλογα με το υπάρχον ύδωρ, γενικά αυξάνει την υδραυλική αγωγιμότητα)

3.3.3 Αρχή διατήρησης της μάζας

Η εξίσωση της συνέχειας ισχύει σε ακόρεστα εδάφη ανεξάρτητα από τον αν μπορεί να εφαρμοστεί ο νόμος του Darcy. Όμως σε περίπτωση που ο νόμος του Darcy δεν ισχύει τότε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξίσωση της συνέχειας δεν είναι πολύ ακριβή και αξιόπιστα. [6]

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

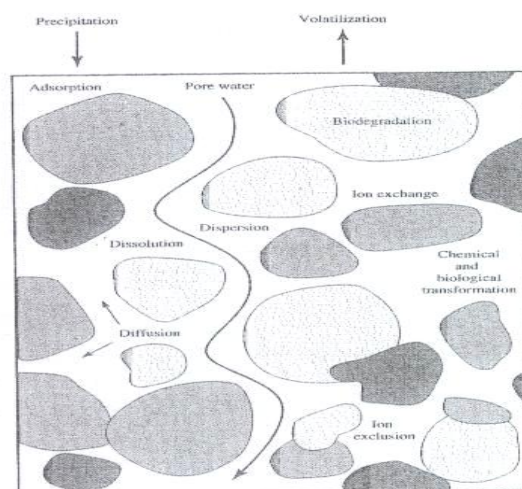
4. Μεταφορά ρύπων

4.1 Εισαγωγή

Κύριος στόχος της μοντελοποίησης της υπόγειας ροής μπορεί να θεωρηθεί η μελέτη και η πρόβλεψη της μεταφοράς διαφόρων ειδών ρύπων (χημικών ουσιών, μικροβιολογικών ρύπων, κ.α.) που μπορούν να υπάρξουν στο έδαφος και κατά συνέπεια στους υπόγειους υδροφορείς. Μια και η ροή των υδάτων είναι ο πρωτεύων παράγοντας μεταφοράς τους, η ανάλυσή της τόσο σε κορεσμένα όσο και σε ακόρεστα εδάφη είναι εξαιρετικά αναγκαία και ενδιαφέρουσα.

Η μεταφορά διαλυμένων ουσιών μέσα στο έδαφος περιλαμβάνει τόσο την κίνησή τους όσο και τη συγκέντρωσή τους σε αυτό. Η συγκέντρωση είναι αποτέλεσμα διαφόρων φαινομένων, όπως για παράδειγμα της βροχόπτωσης, της άντλησης υδάτων, της εναπόθεσης διαλυμάτων πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, της εξάτμισης, της αποξήρανσης, της ύπαρξης φυτών και της ροής. Η ροή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως [3]:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| ➤ Αποκλεισμός ιόντων (ion exclusion) | ➤ Δυναμικό λόγω τριχοειδών φαινομένων |
| ➤ Ιονανταλλαγή | ➤ Απορρόφηση |
| ➤ Εξάτμιση | ➤ Διάχυση |
| ➤ Διάλυση | Διασπορά |
| ➤ Καθίζηση | ➤ Υγρασία |
| ➤ Χημικοί και βιολογικοί μετασχηματισμοί | ➤ Υδραυλική αγωγιμότητα |



Σχήμα 11: Γραφική απεικόνιση των διαφόρων διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος. [4]

4.2 Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων

Οι δρώσες δυνάμεις που προκαλούν την κίνηση του διαλύματος και γενικά τη ροή μέσα στην ακόρεστη ζώνη είναι δυο ειδών: οι στατικές δυνάμεις, οι οποίες υπάρχουν πάντα και οι δυνάμεις αντίστασης, οι οποίες εμφανίζονται αφού υπάρξει κίνηση. Η στατική ισορροπία μπορεί να εκφραστεί σε όρους δυναμικού [3]:

$$\frac{\sum F^s}{m} = -\frac{\partial \psi_h}{\partial z}$$

όπου : ψ_h : το άθροισμα του βαρυτικού δυναμικού και του δυναμικού πίεσης

m : η μάζα του ρευστού

F^s : η συνισταμένη των στατικών δυνάμεων

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η κίνηση πραγματοποιείται από περιοχές υψηλού δυναμικού σε περιοχές χαμηλότερου δυναμικού.

Οι κύριοι μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων είναι οι ακόλουθοι [7]:

- Διάχυση: προκαλείται από διαφορά συγκεντρώσεων και είναι ανεξάρτητη από την κίνηση του υπόγειου νερού.
- Συμμεταφορά: εκπροσωπεί τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών και ρύπων λόγω ροής των υπόγειων υδάτων.
- Διασπορά: αντιπροσωπεύει τη διάλυση των ρυπαντών στο υπόγειο ύδωρ και τη μεταφορά τους μαζί με αυτό.
- Χημικές αντιδράσεις: περιλαμβάνουν μετασχηματισμούς των ρυπαντών, ανταλλαγές ιόντων, κ.α.
- Βιοαποικοδόμηση: περιλαμβάνει βιολογικούς μετασχηματισμούς.

4.2.1 Διάχυση

Σε μικρές ταχύτητες ροής κυρίαρχο φαινόμενο είναι η μοριακή διάχυση, η οποία περιγράφεται από τον πρώτο νόμο του Fick:

$$J_D = -D_d \frac{dC}{dz}$$

όπου: D_d : ο συντελεστής μοριακής διάχυσης (L^2T^{-1})

C : η συγκέντρωση (M/L^3)

z : η κάθετη απόσταση (m)

Σε περίπτωση που η συγκέντρωση αλλάζει με το χρόνο, η παραπάνω σχέση γίνεται ως εξής:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Συχνά στις παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιείται η πραγματική σταθερά διάχυσης D^* , η οποία είναι συνάρτηση του συντελεστή μοριακής διάχυσης και της σταθεράς ω , που σχετίζεται με τη στρεβλότητα, δηλαδή την ελικοειδή κίνηση των υπόγειων υδάτων [3].

$$D^* = \omega \cdot D_d$$

Θερμοδυναμικά, η δρώσα δύναμη για την εμφάνιση της μοριακής διάχυσης είναι το χημικό δυναμικό. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής μοριακής διάχυσης τόσο περισσότερο αναμειγνύεται ο ρυπαντής με το «λιμνάζον» νερό που είναι παγιδευμένο στους κλειστούς πόρους και επομένως, η παρουσία του ρυπαντή στο έδαφος παρατείνεται. [3]

4.2.2 Συμμεταφορά

Η διαδικασία μεταφοράς διαλυμένων ουσιών με τη ροή των υπόγειων υδάτων ονομάζεται συμμεταφορά. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε υψηλές ταχύτητες ροής των υπόγειων υδάτων και αποτελεί ίσως τον κυριότερο μηχανισμό μεταφοράς ρύπων στο έδαφος και τους υπόγειους υδροφορείς.

Η ποσότητα της ουσίας που μεταφέρεται είναι συνάρτηση της συγκέντρωσής της στα υπόγεια ύδατα και της ποσότητας του νερού της υπόγειας ροής. Η μονοδιάστατη ροή μάζας F_x , λόγω οριζόντιας μεταφοράς είναι ίση με την ποσότητα του ύδατος που ρέει, πολλαπλασιασμένη με τη συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών και δίνεται από τη σχέση [3]:

$$F_x = v_x \cdot n_e \cdot C$$

όπου $v_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dx}$ = μέση γραμμική ταχύτητα (L/T)

Η μονοδιάστατη εξίσωση οριζόντιας μεταφοράς έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x \frac{\partial C}{\partial x}$$

4.2.3 Διασπορά

Η ροή σε περίπτωση ύπαρξης ρυπαντή στο έδαφος μπορεί να διαχωριστεί σε δυο κατηγορίες: τη ροή του νερού, η οποία περιγράφεται πλήρως από το νόμο του Darcy και τη ροή του ρυπαντή, η οποία προκύπτει ως γινόμενο της παροχής του νερού και της διαλυμένης συγκέντρωσης της ρυπαντικής ουσίας στο έδαφος. Συμβολίζεται με J και αποτελεί μόνο μια προσέγγιση της ροής του ρυπαντή μια και η ροή του νερού δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει πλήρως τις συνθήκες που επικρατούν μέσα στους πόρους ενός ακόρεστου εδάφους. Ακόμη, πρέπει να προστεθεί ένας επιπλέον όρος για τον υπολογισμό της ολικής ροής του ρυπαντή, ο οποίος αντιπροσωπεύει μια επιπρόσθετη κίνηση που λαμβάνει χώρα και είναι η υδροδυναμική διασπορά D_H [3]. Έτσι, τελικά προκύπτει η εξής εξίσωση για τη ροή του ρυπαντή:

$$J_s = J + D_H$$

Η υδροδυναμική διασπορά είναι μια μη-σταθερών συνθηκών, μη αντιστρέψιμη διεργασία κατά την οποία η μάζα μια ουσίας αναμιγνύεται σε έναν διαλύτη, π.χ. μια χημική ουσία αναμιγνύεται με το ύδωρ που υπάρχει στο έδαφος. Η υδροδυναμική διασπορά αποτελείται από δυο μέρη: τη μηχανική διασπορά και τη μοριακή διάχυση. Αυτά τα δυο φαινόμενα αν και είναι διαφορετικά συνήθως είναι αδιαχώριστα και πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Παρόλα αυτά και τα δυο εξαρτώνται από κάποιες παραμέτρους, οι οποίες είναι δυνατόν να τα επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο. Έτσι, για παράδειγμα, η μηχανική διασπορά λαμβάνει χώρα σε εδάφη όπου επικρατεί μεγάλη υγρασία και υψηλές ταχύτητες ροής, ενώ αντίθετα η μοριακή διάχυση είναι το φαινόμενο που κυριαρχεί σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας και μικρής ταχύτητας ροής. Ακόμη, η μηχανική διασπορά παρατηρείται σε επίπεδο πόρων ενώ η μοριακή διάχυση σε επίπεδο μορίων. [3]

Στην περίπτωση που έχουμε υδροδυναμική διασπορά ο ρυπαντής που εισέρχεται στο έδαφος και το υπάρχον σε αυτό νερό αναμιγνύονται σχεδόν πλήρως και έτσι δεν δημιουργούνται δυο ξεχωριστές φάσεις. Σε περίπτωση όμως που δεν λαμβάνει χώρα διασπορά ή διάχυση, τα δυο ή περισσότερα ρευστά που υπάρχουν στο έδαφος δεν αναμιγνύονται αλλά δημιουργούνται ξεχωριστές φάσεις με διακριτές διεπιφάνειες, κατά μήκος των οποίων αναπτύσσεται δυναμικό λόγω τριχοειδών φαινομένων.

Τα αίτια που προκαλούν την εμφάνιση του φαινομένου της υδροδυναμικής διασποράς είναι κυρίως τα εξής [3]:

- Το εύρος του μεγέθους των πόρων του εδάφους
- Η εγκάρσια διάχυση μέσα στους πόρους, ειδικά σε περιοχές που υπάρχει ακίνητο ύδωρ
- Η μεταβαλλόμενη μοριακή χημική διάχυση

Η διασπορά οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη στερεών διαφορετικού μεγέθους μέσα στους πόρους και εξαρτάται από τη στατιστική κατανομή της ταχύτητας του ρευστού. Λαμβάνει χώρα σε δυο κατευθύνσεις, την οριζόντια, η οποία είναι η μεγαλύτερη και την κάθετη, που είναι συνήθως μικρότερη, εκτός και αν η ταχύτητα ροής και κατά συνέπεια και η οριζόντια διασπορά είναι πολύ μικρή. Η κίνηση ενός ρευστού και επομένως η ταχύτητά του εξαρτάται από το μονοπάτι του ακολουθεί, το μήκος του και το μέγεθος των πόρων. [3]

Η ροή λόγω υδροδυναμικής - μηχανικής διασποράς μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση [3]:

$$J_H = -D_H \frac{dC}{dz}$$

όπου: D_H : ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς (L^2T^{-1})

C : η συγκέντρωση (M/L^3)

z : η κάθετη απόσταση (m)

4.2.4 Εξίσωση συμμεταφοράς – διασποράς για μεταφορά διαλυμένων ουσιών

Η εξίσωση συμμεταφοράς – διασποράς στη διεύθυνση z έχει την ακόλουθη μορφή [3]:

$$D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

όπου: D_z : ο συντελεστής διαμήκους υδραυλικής διασποράς (L^2T^{-1})

C : η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας (ML^{-3})

v : η μέση γραμμική ταχύτητα του νερού (LT^{-1})

t : ο χρόνος (T)

Για να επιλύσουμε την εξίσωση συμμεταφοράς – διασποράς χρειάζεται η παραδοχή αρχικών και οριακών συνθηκών:

Οριακές συνθήκες: → Πάνω όριο : $C(0,t) = 0$ για $t < 0$ και $C(0,t) = C_o$ για $t > 0$

→ Κάτω όριο : $C(0,t) = 0$ για $t \leq 0$

Αρχικές συνθήκες: → $C(x,0) = 0$

Όποτε η εξίσωση που προκύπτει ως λύση της παραπάνω σχέσης είναι η εξής:

$$\frac{C(t)}{C_o} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z - vt}{2\sqrt{D_z t}} \right) + \exp \left(\frac{vz}{D_z} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{z + vt}{2\sqrt{D_z t}} \right) \right]$$

Όταν τα D_z , z ή t έχουν μεγάλες τιμές, ο τελευταίος όρος της παραπάνω εξίσωσης θεωρείται αμελητέος.

Ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς προσδιορίζεται ως συνάρτηση των συντελεστών μοριακής διάχυσης και μηχανικής διασποράς. Παρόλα αυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις ίσως να είναι περιττή η χρήση και των δυο αυτών συντελεστών, λόγω κυριαρχίας μόνο ενός φαινομένου, μοριακής διάχυσης ή μηχανικής διασποράς. Κριτήριο για την κυριαρχία του ενός ή του άλλου φαινομένου αποτελεί ο αριθμός Peclet:

$$Pe = \frac{vd}{D_d}$$

όπου: v : η μέση ταχύτητα του ύδατος στους πόρους

d : χαρακτηριστική διάμετρος των σωματιδίων του εδάφους

D_d : ο συντελεστής μοριακής διάχυσης

Χαρακτηριστικά έχουμε [3]:

- $Pe < 0.4 \rightarrow$ κυρίαρχος μηχανισμός είναι η μοριακή διάχυση ενώ η μηχανική διασπορά θεωρείται αμελητέα
- $0.4 < Pe < 5 \rightarrow$ η μοριακή διάχυση και η μηχανική διασπορά είναι εξίσου σημαντικά φαινόμενα
- $5 < Pe < 1000 \rightarrow$ κυρίαρχος μηχανισμός είναι η μηχανική διασπορά, χωρίς όμως η μοριακή διάχυση να θεωρείται αμελητέα

- $Re > 1000 \rightarrow$ κυρίαρχος μηχανισμός είναι η μηχανική διασπορά ενώ η μοριακή διάχυση θεωρείται αμελητέα

Στην περίπτωση εδαφών με αδιαπέραστο πυθμένα, η εξίσωση συµµεταφοράς – διασποράς δεν διαφοροποιείται σηµαντικά. Οι παράµετροι µεταφοράς, οι οποίες θα πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά και να ληφθούν υπόψη είναι [3]:

- Η ροή λόγω συµµεταφοράς και η µεταφορά της διαλυµένης ουσίας κατά µήκος του µέσου
- Η διαµήκης μηχανική διασπορά κατά µήκος του µέσου
- Η μοριακή διάχυση από το µέσο στο αδιαπέραστο στρώµα
- Η μοριακή διάχυση µέσα στο µέσο
- Απορρόφηση από το µέσο αλλά και από το αδιαπέρατο στρώµα
- Ραδιενεργή εξασθένιση

Γενικά, η ροή σε αυτή την περίπτωση είναι µικρή και η µεταφορά της διαλυµένης ουσίας καθυστερεί. Καθώς, λοιπόν, η διαλυµένη ουσία παραµένει περισσότερο καιρό µέσα στο πορώδες µέσο αναπτύσσονται ευνοϊκές συνθήκες για µικροβιακή αποδόµηση, µεγαλύτερη απορρόφηση και γενικότερα µείωση της συγκέντρωσής της µε το πέρασµα του χρόνου.

Ακόµη πιο περίπλοκη παρουσιάζεται να είναι η ροή σε περίπτωση όπου έχουµε στρωµατοποίηση, δηλαδή όταν η ροή πραγµατοποιείται µέσα από στρώµατα εδαφών µε διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Σε αυτήν την περίπτωση η επίλυση της εξίσωσης συµµεταφοράς – διασποράς είναι πολύ πολύπλοκη καθώς πολλοί νέοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη εισέρχονται σε αυτήν.

4.3 Χαρακτηρισµός ρυπαντών

Ο χαρακτηρισµός των ρυπαντών ανάλογα µε το αν έχουν την τάση να αντιδρούν µέσα στο έδαφος είναι πολύ σηµαντικός, προκειµένου να γίνει η µελέτη και η πρόβλεψη της µεταφοράς του. Συντηρητικός ονοµάζεται ο ρυπαντής, ο οποίος δεν αντιδρά µε το µέσο µέσα στο οποίο βρίσκεται και παράλληλα είναι πλήρως αναµεµιγµένος µε το νερό που βρίσκεται στο µέσο αυτό. Θεωρώντας ότι δεν

υπάρχουν όροι άντλησης ύδατος ή εμπλουτισμού του εδάφους με ύδωρ, η αρχή διατήρησης της μάζας μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από την εξής σχέση [3]:

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = -\nabla \cdot [J_H + J_v C] - \nabla \cdot J_s$$

όπου : θ : η περιεχόμενη υγρασία

C : η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας

t : ο χρόνος

J_H : η ροή λόγω υδροδυναμικής διασποράς, που λαμβάνει υπόψη και το φαινόμενο της διάχυσης και της διασποράς

J_v : η ογκομετρική ροή που εισέρχεται στον όγκο ελέγχου του εδάφους

J_s : η συνολική ροή της διαλυμένης ουσίας

Σε περίπτωση συντηρητικού ρυπαντή και ανισότροπης, πολυδιάστατης ροής η σχέση που προκύπτει από την αρχή διατήρησης της μάζας είναι η ακόλουθη [3]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial z_j} \right) - \frac{\partial v_i C}{\partial z_i}$$

όπου : D_{ij} : ο συντελεστής διασποράς

i, j : οι δείκτες των διευθύνσεων x, y και z

Αντίθετα, όταν στο έδαφος προστεθεί μια ουσία είναι μη συντηρητική, δηλαδή έχει την ιδιότητα να αντιδρά με το έδαφος ή με κάποια από τα συστατικά του, τότε στην εξίσωση της αρχής διατήρησης της μάζας λαμβάνονται υπόψη οι διαδικασίες της απορρόφησης και εκρόφησης [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} [C + C_s] - \nabla \cdot [J_H + J_v C]$$

όπου: C_s : η συγκέντρωση της ουσίας στη φάση απορρόφησης – καθίζησης.

Η παραπάνω εξίσωση έχει λυθεί για τρεις διαφορετικούς τύπους ισόθερμων απορρόφησης: γραμμικές, Freundlich και Langmuir, δίνοντας αντίστοιχες απλούστερες και περισσότερο εύχρηστες σχέσεις.

Λόγω του όρου συσσώρευσης/ άντλησης (source/sink term), S , στην εξίσωση συμμεταφοράς – διασποράς υπεισέρχεται ένας παράγοντας επιβράδυνσης R , ο οποίος επηρεάζεται κυρίως από την πυκνότητα του εδάφους (soil bulk density), την περιεχόμενη σε αυτό υγρασία και τα χαρακτηριστικά προσρόφησης στο έδαφος. Ο παράγοντας επιβράδυνσης είναι αδιάστατος και δίνεται από τη σχέση [3]:

$$R = \frac{\rho_b}{\theta} K + 1$$

4.4 Σημαντικές παράμετροι καθορισμού της ροής και της μεταφοράς ρύπων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τόσο η ροή των υπόγειων υδάτων όσο και η μεταφορά ρύπων στο υπέδαφος εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες, οι οποίοι συχνά είναι δύσκολο να προσδιοριστούν και να μελετηθούν. Διάφορα φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα και ίσως είναι αδύνατον να κατανοηθούν, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες ροής και μεταφοράς οποιονδήποτε ουσιών. Οι σημαντικότερες και πιθανόν οι πιο δύσκολα προσδιοριζόμενες παράμετροι που έχουν εντοπιστεί παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω.

4.4.1 Κινούμενο – ακίνητο ύδωρ (mobile – immobile water)

Το νερό που υπάρχει μέσα σε ένα πορώδες μέσο μπορεί να διαχωριστεί σε δυο ειδών: το κινούμενο και το ακίνητο (mobile – immobile water). Ως αποτέλεσμα, η ροή διαφέρει ανάλογα με το είδος του νερού που παρουσιάζεται. Σε περιοχές όπου έχουμε ακίνητο νερό η ροή οφείλεται στο φαινόμενο της διάχυσης και είναι σχετικά μικρή, ενώ αντίθετα σε περιοχές όπου έχουμε κινούμενο νερό κυρίαρχοι μηχανισμοί είναι αυτοί της συμμεταφοράς και της διασποράς. [3]

Η ύπαρξη ή μη των δυο παραπάνω μορφών νερού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, κυριότερος εκ των οποίων είναι η κοκκομετρία και οι σχετικές θέσεις των σωματιδίων του πορώδους μέσου. Έτσι, σε ορισμένα εδάφη που υπάρχουν περιοχές «λιμνάζοντος» ύδατος, μικροπόροι και μακροπόροι καθώς και προτιμώμενα από το νερό μονοπάτια, η ροή είναι αρκετά πολύπλοκη. Στις περιπτώσεις αυτές, συνήθως η πρόσβαση της διαλυμένης ουσίας σε περιοχές απορρόφησης και ανταλλαγής ιόντων με το έδαφος είναι περιορισμένη, κυρίως λόγω απουσίας φυσικής ισορροπίας. [3]

4.4.2 Επικρατέστερη ροή – Σχηματισμός δακτυλίων

Έχει παρατηρηθεί αρκετές φορές ραγδαία μεταφορά χημικών ουσιών από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τον υπόγειο υδροφόρο, μέσα από την ακόρεστη ζώνη. Ειδικοί πιστεύουν ότι τέτοια φαινόμενα, εκτός των άλλων, οφείλονται στην λεγόμενη μη ιδανική ροή. Παράγοντες όπως η ύπαρξη επικρατέστερης διαδρομής από το νερό (preferential flow), η ροή σε μικροπόρους και μακροπόρους και το χαρακτηριστικό φαινόμενο δημιουργίας δακτυλίων (fingering) μπορούν να αλλάξουν σημαντικά τη γενική μορφή και ταχύτητα της ροής και κατά συνέπεια τη μεταφορά ουσιών μέσα σε αυτήν και τον υδροφόρο.

Η εμφάνιση επικρατέστερης διαδρομής από το νερό, οφείλεται στην ύπαρξη «μονοπατιών» χαμηλότερης πυκνότητας και κατά συνέπεια μικρότερης αντίστασης, τα οποία το νερό ανακαλύπτει και ακολουθεί. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση παρουσίας μακροπόρων ή μικροπόρων, οι οποίοι μπορεί να έχουν δημιουργηθεί από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα από την ύπαρξη ριζών διαφόρων φυτών. Στην ακόρεστη ζώνη οι πόροι αυτοί είναι συνήθως γεμάτοι από αέρα. Έτσι, το νερό για να μπορέσει να απομακρύνει τον αέρα και να πάρει τη θέση του στους πόρους αυτούς θα πρέπει να βρίσκεται σε συνθήκες πίεσης μεγαλύτερων από την ατμοσφαιρική. [3]

Η δημιουργία δακτυλίων (fingering) σχετίζεται κυρίως με στρωματοποιημένα εδάφη, με συμπιεσμένο αέρα, υδροφοβικά εδάφη και την ανακατανομή του νερού που ακολουθεί μια νεροποντή. [3]

Γενικότερα, η εμφάνιση των παραπάνω φαινομένων καθιστά τη ροή ασυνεχή και επομένως δημιουργούνται πολλά προβλήματα τόσο στην κατανόηση των συνθηκών που επικρατούν στο έδαφος όσον αφορά στην ροή, όσο και στην μαθηματική περιγραφή της. Η λεγόμενη μη ιδανική ροή εξαρτάται άμεσα από την κατανομή του μεγέθους των πόρων, η οποία μπορεί να είναι δυο ειδών [3]:

- Ομοιόμορφη κατανομή: οι πόροι του μέσου είναι σχετικά ίδιου μεγέθους και ομοιόμορφου σχήματος. Στην περίπτωση αυτή έχει διαπιστωθεί ότι η μη ιδεατή ροή γίνεται πιο έντονη καθώς μειώνεται η περιεχόμενη στο μέσο υγρασία και μέχρι αυτή να φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή, πέρα από την οποία οποιαδήποτε μείωση της υγρασίας επιφέρει μείωση της μη ιδεατής ροής.

- Ανομοιόμορφη κατανομή: οι πόροι του μέσου διαφέρουν σημαντικά ως προς το μέγεθος και ως προς τη μορφή. Όταν έχουμε κορεσμένο μέσο η μη ιδεατή ροή είναι αυξημένη. Καθώς όμως γίνεται απομάκρυνση του νερού από το μέσο, η μη ιδεατή ροή μειώνεται και μετά από μια ορισμένη τιμή της περιεχόμενης υγρασίας η ροή αυξάνεται.

4.4.3 Κολλοειδή σωματίδια

Ένας άλλος τρόπος μεταφοράς των ρύπων είναι μέσω των κολλοειδών που υπάρχουν στο έδαφος. Η μεταφορά των κολλοειδών σωματιδίων εξαρτάται από τρεις θεμελιώδεις διαδικασίες: [3]

- Την παραγωγή των κολλοειδών
- Την σταθεροποίηση των αιωρούμενων κολλοειδών
- Την απορρόφηση και τη διήθηση

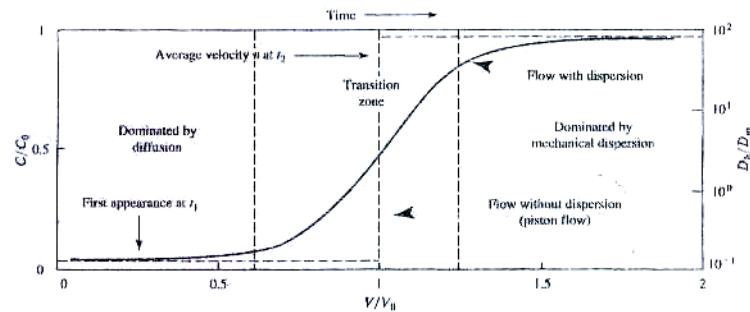
Οι κύριες τάξεις κολλοειδών υλικών που έχουν αναγνωριστεί είναι τα ανόργανα κολλοειδή, οι μικροοργανισμοί και τα οργανικά μόρια.

Η παρουσία κολλοειδών περιπλέκει ακόμη περισσότερο την επικρατούσα ροή μέσα στο έδαφος. Αν και δεν έχει μελετηθεί ακόμη πλήρως η μεταφορά των κολλοειδών και οι συνθήκες ροής, οι οποίες δημιουργούνται λόγω αυτών έχουν αναπτυχθεί κάποια σενάρια. Επικρατέστερο είναι το σενάριο, σύμφωνα με το οποίο αρχικά τα κολλοειδή αποκολλώνται από το έδαφος και σταθεροποιούνται σε διάφορες επιφάνειες του. Στη συνέχεια μεταφέρονται μέσα από αυτό στο υπόγειο νερό, είτε λόγω κορεσμένης είτε λόγω ακόρεστης ροής. Η αρχική αιώρηση και δημιουργία των κολλοειδών εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις δυνάμεις αποκόλλησης, οι οποίες περιλαμβάνουν φυσικές και χημικές δυνάμεις και το χημικό «περιβάλλον» που επικρατεί στο έδαφος (τιμή pH, παρουσία ιόντων, κ.τ.λ.). [3]

4.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες – Breakthrough Curves

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης πειραμάτων με στήλες εδάφους, μπορεί να δημιουργηθεί μια χαρακτηριστική καμπύλη (breakthrough curve), η οποία αναπαριστά τη συγκέντρωση του ρυπαντή στην εκροή από τη στήλη συναρτήσει του χρόνου ή της αθροιστικής αποστράγγισης του εδάφους. Η καμπύλη αυτή δίνει πληροφορίες για τη

σχετική κατανομή του ρυπαντή σε σχέση με τον όγκο ή την επιφάνεια ροής, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τον όγκο των πόρων του εδάφους και το χρόνο. Από την εξέταση μιας τέτοιας καμπύλης μπορεί να προκύψει ο βαθμός ομοιομορφίας του εδάφους, η παρουσία μικροπόρων και των διαφόρων μονοπατιών ροής μέσα στο έδαφος καθώς και ο βαθμός απορρόφησης από το έδαφος. [1]



Διάγραμμα 2: Μια τυπική καμπύλη που δείχνει την επίδραση της μοριακής διάχυσης και της μηχανικής διασποράς, της ταχύτητας και άλλων παραμέτρων, με βάση το χρόνο και τον όγκο των πόρων του εδάφους. t_1 είναι ο χρόνος που εμφανίζεται για πρώτη φορά ο ρυπαντής στην εκροή και t_2 ο χρόνος που θα χρειαστεί για να φτάσει η μισή ποσότητα του ρυπαντή στην εκροή. [1]

Μια καμπύλη, η οποία είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά δείχνει ότι η ανάμιξη του ρυπαντή με το ύδωρ δεν είναι πλήρης και ότι δεν πραγματοποιείται μετατόπιση και αντικατάσταση του περιεχόμενου στο έδαφος ύδατος. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε [1]:

- μεγάλο ποσοστό «λιμναζόντων» υδάτων στο έδαφος, οπότε η ταχύτητα ροής είναι σχεδόν μηδενική και επικρατεί μοριακή διασπορά,
- αποκλεισμό του ρυπαντή, λόγω των αλληλεπιδράσεων του ρυπαντή και των στερεών ,
- αυξημένη συγκέντρωση διαλύματος, που μπορεί να προκαλέσει περιορισμένη ανάμιξη του νερού και του ρυπαντή.

Μια καμπύλη είναι δυνατόν να είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά σε περίπτωση [1]:

- κατακράτησης του ρυπαντή ή διαφόρων συστατικών του, λόγω καθίζησης ή ιονανταλλαγής,
- χημικής αντίδρασης του ρυπαντή και του εδάφους,
- ιονανταλλαγής μεταξύ του ρυπαντή και των κόκκων του εδάφους.

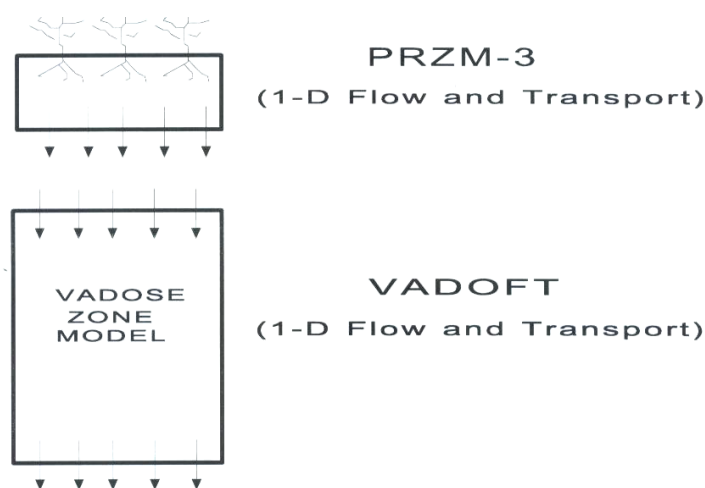
5. Περιγραφή μοντέλων υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων

5.1 Περιγραφή του μοντέλου PRZM - 3

Το μοντέλο PRZM-3 (Pesticide Root Zone Model – 3) είναι ένα νέο μοντέλο, του οποίου στόχος είναι η πρόβλεψη της μεταφοράς αλλά και των μετασχηματισμών διαφόρων χημικών ρυπαντών μέσα στη ζώνη εδαφικού ύδατος και στην ακόρεστη ζώνη. Ειδικότερα, τα κύρια εργαλεία που προσφέρει είναι [8]:

- Προσομοίωση της μεταφοράς και των μετασχηματισμών διαφόρων φυτοφαρμάκων που εναποτίθενται στο έδαφος, τόσο στην ζώνη εδαφικού ύδατος όσο και στην ακόρεστη ζώνη, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές αγροτικής διαχείρισης.
- Προσομοίωση της μεταφοράς και των μετασχηματισμών του αζώτου, το οποίο προέρχεται είτε από την ατμόσφαιρα είτε από σιπτικά συστήματα, στην ζώνη εδαφικού ύδατος και στην ακόρεστη ζώνη
- Παροχή πιθανών εκτιμήσεων των συγκεντρώσεων έκθεσης, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα των φυσικών συστημάτων και την αβεβαιότητα των ιδιοτήτων και των διεργασιών του συστήματος.

Το PRZM-3 χρησιμοποιεί δυο δευτερεύοντα μοντέλα, τα μοντέλα PRZM και VADOFT, ενώ παράλληλα έχει τη δυνατότητα εφαρμογής προσομοίωσης Monte Carlo για την ανάλυση της έκθεσης στο υπό εξέταση χημικό ρύπο.



Σχήμα 12: Σχηματική απεικόνιση της περιοχής μελέτης των δυο επιμέρους μοντέλων. [8]

5.1.1 Μοντέλο PRZM

Το μοντέλο PRZM (Pesticide Root Zone Model) είναι ένα μονοδιάστατο, δυναμικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, το οποίο εξετάζει την «τύχη» των φυτοφαρμάκων και διαφόρων οργανικών και ανόργανων ενώσεων του αζώτου στη ζώνη εδαφικού ύδατος, δηλαδή την ανώτερη επιφάνεια του εδάφους που καταλαμβάνουν οι ρίζες των φυτών. Περιλαμβάνει τόσο την υδρολογική όσο και τη χημική μεταφορά, ενώ επίσης έχει την ικανότητα περιγραφής διαφόρων φαινομένων, όπως εξάτμισης, μικροβιακών μετασχηματισμών, συμμεταφοράς, διάχυσης, αποδόμησης, μεταφοράς αερίων στο έδαφος, και προσομοίωσης της εδαφικής θερμοκρασίας και της άντλησης υδάτων. [8]

Ειδικότερα για τη ζώνη εδαφικού ύδατος, όπου οι ρίζες των φυτών είναι παρούσες, το μοντέλο αυτό παρέχει μεγάλη δυνατότητα μελέτης και προσομοίωσης των συνθηκών που επικρατούν και των διαφόρων διεργασιών που λαμβάνουν χώρα. Τέτοιες διεργασίες είναι η λήψη αζώτου από τις ρίζες των φυτών, η επιστροφή του αζώτου των φυτών ως οργανικό άζωτο, η απονιτροποίηση, η εξάτμιση της αμμωνίας, κτλ. [8]

Συγκεκριμένα, η περιγραφή των διεργασιών που μπορούν να προσομοιωθούν από το PRZM χωρίζεται σε 8 κατηγορίες [8]:

- Μεταφορά στο έδαφος
- Κίνηση ύδατος
- Χημική εφαρμογή και φυλλώδης έκπλυση
- Χημική έκπλυση
- Εδαφική διάβρωση
- Εξάτμιση
- Άντληση ύδατος
- Διεργασίες αζώτου

συμπεριλαμβάνει όρους για τη διήθηση, το ρυθμό εμπλουτισμού του εδάφους με νερό καθώς και τη ροή εισροής της διαλυμένης ουσίας στο έδαφος. [8]

Για την επίλυση των εξισώσεων της ροής ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει συνεχείς σχέσεις ανάμεσα στην πίεση, την υγρασία και την υδραυλική αγωγιμότητα. Όσον αφορά τις μη γραμμικές συνθήκες ροής, οι οριακές συνθήκες, οι οποίες πρέπει να οριστούν, μπορούν να είναι είτε σταθερού υδραυλικού ύψους είτε σταθερής ροής. Όλες οι οριακές συνθήκες μπορούν να είναι συναρτήσεις του χρόνου. [8]

Οι βασικές παραδοχές του μοντέλου VADOFT όσον αφορά στη ροή είναι οι ακόλουθες [8]:

- Η ροή στη υγρή φάση είναι μονοδιάστατη, ισοθερμική και περιγράφεται από το νόμο του Darcy
- Το ρευστό είναι ελαφρώς συμπιεστό και ομοιογενές.
- Η επίδραση του φαινομένου της υστέρησης στις σχέσεις σχετικής διαπερατότητας – κορεσμού και κορεσμού – δυναμικού λόγω τριχοειδών φαινομένων, είναι αμελητέα

Αντίστοιχες παραδοχές του μοντέλου για τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών είναι οι εξής [8]:

- Η διασπορά και η συμμεταφορά είναι μονοδιάστατη
- Οι ιδιότητες του ρευστού είναι ανεξάρτητες από τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας
- Η μεταφορά λόγω διασποράς/ συμμεταφοράς στο πορώδες μέσω περιγράφεται από το νόμο του Fick
- Ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς ορίζεται ως το άθροισμα των συντελεστών της μηχανικής διασποράς και της μοριακής διάχυσης
- Η απορρόφηση και η αποδόμηση της διαλυμένης ουσίας περιγράφεται από μια γραμμική ισόθερμη ισορροπίας και μια σταθερά αποδόμησης πρώτης τάξης
- Η μεταφορά αερίων είναι αμελητέα

5.1.3. Προσομοίωση Monte Carlo

Η υπορουτίνα MCARLO, η οποία πραγματοποιεί την προσομοίωση Monte Carlo, στόχο έχει τον προσδιορισμό των πιθανοτήτων εμφάνισης ορισμένων φορτίων ή συγκεντρώσεων στον υδάτινο υδροφόρο. Ειδικότερα, προσδιορίζει την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων που εξάγει το μοντέλο PRZM-3, με βάση την αβεβαιότητα που περιείχαν τα δεδομένα που εισήχθησαν σε αυτό αρχικά. [8]

Χρησιμοποιεί ένα αρχείο δεδομένων που αφορούν στις παραμέτρους που μεταβάλλονται και διεξάγει μια στατιστική ανάλυση στις μεταβλητές που δημιουργεί. Παράλληλα παρέχει στατιστικές περιλήψεις για τις προκύπτουσες μεταβλητές και δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει την κατανομή των παραμέτρων «κλειδιών» (κανονική, λογαριθμική, εμπειρική, τριγωνική, εκθετική, κ.τ.λ.). [8]

Η τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo περιλαμβάνει [8]:

- Επιλογή της κατάλληλης κατανομής για την περιγραφή της αβεβαιότητας των σχετικών μεταβλητών που εισάγονται
- Παραγωγή ψευδό-τυχαίων αριθμών από την κατανομή που έχει επιλεγεί, οι οποίοι εκπροσωπούν πιθανό σετ τιμών των μεταβλητών εισαγωγής
- Εφαρμογή του μοντέλου και υπολογισμός των δεδομένων που προκύπτουν ως στοιχεία εισαγωγής και αποτελεσμάτων (input & output)
- Επανάληψη των δυο παραπάνω βημάτων
- Παρουσίαση των τιμών που προέκυψαν (output) από το τρίτο βήμα, ως συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων
- Ανάλυση και εφαρμογή της κατανομής που προέκυψε ως εργαλείο λήψης αποφάσεων.

5.2. Περιγραφή του μοντέλου Argus ONE

Το Argus ONE είναι ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS), το οποίο είναι ανεξάρτητο από οποιοδήποτε μοντέλο (model independent) και χρησιμοποιείται για αριθμητική μοντελοποίηση. Χρησιμοποιεί την προσέγγιση ενός θεμελιώδους μοντέλου (conceptual model), συνδυασμένη με δυνατότητες εξαγωγής των αποτελεσμάτων σε κείμενο και υποστήριξης Plug-in. Επίσης, το Argus ONE αποτελεί

ένα περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών, το οποίο έχει την ικανότητα ανάπτυξης και παράταξης διεπιφανειών με γραφικό τρόπο. [9]

Το Argus ONE παρέχει ένα περιβάλλον, στο οποίο μπορεί να γίνει σύνθεση γεωχωρικών πληροφοριών και χρήση αυτών ως δεδομένα σε αριθμητικά μοντέλα. Όπως και σε άλλα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών, οι διάφορου είδους γεωχωρικές πληροφορίες αποθηκεύονται και εμφανίζονται σε στρώματα, τα οποία ο χρήστης μπορεί να δει και να επεξεργαστεί στην οθόνη. [9]

Πιο συγκεκριμένα, το Argus ONE είναι ένα πρόγραμμα που δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθούν δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων και πλέγματα πεπερασμένων διαφορών με ένα γραφικό, εύκολο τρόπο. Διαθέτει έναν αριθμό εργαλείων με τη βοήθεια των οποίων μπορούν να εισαχθούν ψηφιοποιημένοι χάρτες, να εξαχθούν περιγράμματα των υπό εξέταση περιοχών και να γίνει αυτόματα η δημιουργία των επιθυμητών πλεγμάτων ή δικτύων. Υπάρχει ακόμα η δυνατότητα να αποδοθούν συγκεκριμένες τιμές διάφορων παραμέτρων στο πλέγμα ή το δίκτυο ως σύνολο ή ξεχωριστά σε ορισμένα μόνο στοιχεία ή κόμβους, όπως για παράδειγμα οριακές και αρχικές συνθήκες, συγκεντρώσεις, κτλ. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση των στρωμάτων. [9]

Όπως ήδη αναφέρθηκε, από το Argus ONE είναι διαθέσιμα στρώματα πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, πάνω στα οποία γίνεται σύνθεση της διακριτής αναπαράστασης του πραγματικού συνεχούς κόσμου. Οι πληροφορίες συνθέτονται χρησιμοποιώντας μαθηματικές, λογικές και χωρικές συναρτήσεις για τον προσδιορισμό των σχέσεων των διάφορων στρωμάτων που δημιουργούνται. Αυτές οι σχέσεις διαμορφώνουν ένα θεμελιώδες μοντέλο, το οποίο αναπαριστά τις συσχετίσεις ανάμεσα στα χωρικά μεγέθη, όπως αυτές αρθρώνονται από το μοντέλο. [9]

Το Argus ONE εξασφαλίζει την ετοιμότητα των πληροφοριών που εισάγονται για να χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο. Ανεξάρτητα από τις αλλαγές που γίνονται από το χρήστη, το Argus ONE αυτόματα συνθέτει τις πληροφορίες σύμφωνα με τις σχέσεις και τους κανόνες που ορίζει το θεμελιώδες μοντέλο, έτσι ώστε αυτές να είναι έτοιμες να εισαχθούν στο μοντέλο. [9]

Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων καθώς και των συντιθέμενων πληροφοριών σε μορφή κειμένου ή σε οποιαδήποτε άλλη μορφή. Η δυνατότητα αυτή σε συνδυασμό με την προσέγγιση ενός θεμελιώδους μοντέλου καθιστά το Argus ONE ένα περιβάλλον που είναι ανεξάρτητο από οποιοδήποτε άλλο μοντέλο. Μπορεί, λοιπόν, να χρησιμοποιηθεί ως προ – επεξεργαστής για οποιοδήποτε μοντέλο. Ταυτόχρονα, παρέχει τη δυνατότητα χρήσης των γεωχωρικών στρωμάτων από οποιοδήποτε μοντέλο προσομοίωσης σε συνδυασμό με το Argus ONE. [9]

Η υποστήριξη plug-in επιτρέπει την αυτόματη αξιοποίηση όλων των προαναφερόμενων δυνατοτήτων. Η τεχνολογία «Plug – in Extension» (PIE's) δίνει τη δυνατότητα επικοινωνίας του Argus ONE με οποιοδήποτε εξωτερικό πρόγραμμα, όπως για παράδειγμα αριθμητικά μοντέλα ή κάποιου είδους αλγόριθμους ή εργαλεία. Όσον αφορά στα PIE's για την υπόγεια ροή και τα μοντέλα μεταφοράς μάζας, αυτά τα οποία είναι διαθέσιμα στο Argus ONE είναι τα MODFLOW, MOC3D, SUTRA, HST3D και PTC. [10]

Τέλος, το Argus ONE παρέχει αυτοματοποιημένα εργαλεία μηχανικού, τα οποία είναι απαραίτητα για μοντελοποίηση. Μερικές από τις δυνατότητες που προσφέρονται από το Argus ONE είναι [10]:

- Δημιουργία και επεξεργασία δικτύων πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων
- Ορισμός, διαχείριση και εφαρμογή οριακών ή αρχικών συνθηκών και παραμέτρων στα δημιουργούμενα στρώματα
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων και επικοινωνία με οποιοδήποτε αριθμητικό μοντέλο
- Γραφική παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

5.3 Περιγραφή του μοντέλου PTC

Το PTC είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής και της μεταφοράς ρυπαντών μέσω αυτής, με δυνατότητα χρήσης πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Ο μέγιστος αριθμός των στοιχείων που μπορεί να δημιουργήσει και να επεξεργαστεί το PTC είναι 2000. Είναι γραμμένο σε γλώσσα

προγραμματισμού FORTRAN 77 και σε συνδυασμό με το Argus ONE μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα σε περιβάλλον Windows. [11]

5.3.1 Βασικές εξισώσεις

Το PTC χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων [12] για να εκφράσει την υπόγεια ροή, χρησιμοποιώντας το υδραυλικό ύψος h ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0$$

και την ταχύτητα ροής,

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

καθώς και τη μεταφορά ρύπων, χρησιμοποιώντας τη συγκέντρωση C ,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right] \\ & - \left[V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} \right] + Q(C - C_0) - \theta \left[\frac{\partial C}{\partial t} \right] + E(C) \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned}$$

όπου:

- h , το υδραυλικό ύψος [L]
- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} , η υδραυλική αγωγιμότητα στην x, y και z κατεύθυνση [LT^{-1}]
- S , ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας [L^{-1}]
- Q , ο όρος της πηγής ή του σημείου συγκέντρωσης του υπόγειου νερού [L^3T^{-1}]
- V_x, V_y, V_z , οι ταχύτητες ροής στις τρεις διευθύνσεις x, y , και z [LT^{-1}]
- C , η συγκέντρωση του ρυπαντή [M/L^3]
- θ , το πορώδες του υδροφορέα
- C_0 , η συγκέντρωση σε ρυπαντή του αντλούμενου νερού, [M/L^3]
- $E(C)$, η συνάρτηση που εκφράζει τις ιδιότητες της χημικής απορρόφησης
- D , οι όροι διασποράς σε διάφορες κατευθύνσεις, οι οποίοι αναλυτικά ορίζονται ως:

$$\circ \quad D_{xx} = \left(\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_V V_z^2 \right) V + D_M$$

$$\circ \quad D_{yy} = \left(\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_V V_z^2 \right) V + D_M$$

$$\circ \quad D_{zz} = \left(\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_V V_z^2 \right) V + D_M$$

$$\circ \quad D_{yx} = D_{xy} = \left(\alpha_L - \alpha_T \right) V_x V_y / V$$

$$\begin{aligned} \circ \quad D_{yz} = D_{zy} &= \alpha_L - \alpha_V \bar{y}_y V_z / V \\ \circ \quad D_{zx} = D_{xz} &= \alpha_L - \alpha_V \bar{y}_z V_x / V \end{aligned}$$

όπου: α_L , ο συντελεστής διαμήκους διασποράς [L]

α_T , ο συντελεστής οριζόντιας εγκάρσιας διασποράς [L]

α_V , ο συντελεστής κάθετης εγκάρσιας διασποράς [L]

V , η τιμή του διανύσματος της ταχύτητας $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ [L/T]

D_M , ο συντελεστής μοριακής διάχυσης [L²/T]

Οι παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της μάζας και το νόμο του Darcy. Η σειρά επίλυσης των εξισώσεων από το πρόγραμμα είναι η ακόλουθη: αρχικά λύνεται η πρώτη εξίσωση και υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη, στη συνέχεια με το νόμο του Darcy προκύπτουν οι ταχύτητες ροής στις τρεις διευθύνσεις και τέλος από την τρίτη εξίσωση προσδιορίζεται η συγκέντρωση του ρυπαντή.

Η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων για ένα πολύπλοκο φυσικό σύστημα απαιτεί την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων, που συχνά περιέχουν μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Το PTC χρησιμοποιεί έναν ειδικό αλγόριθμο (splitting algorithm), ο οποίος ξεπερνάει αυτό το πρόβλημα, διακριτοποιώντας την υπό μελέτη περιοχή σε σχεδόν παράλληλα οριζόντια στρώματα. Κάθε ένα από τα στρώματα που δημιουργούνται «τμηματοποιείται» με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, προσεγγίζοντας καλύτερα την υπό μελέτη περιοχή, οποιοδήποτε και αν είναι το σχήμα της. Τα στρώματα αυτά συνδέονται κάθετα με ένα πλέγμα πεπερασμένων διαφορών. [12]

Το PTC υπολογίζει ξεχωριστά τις ιδιότητες των οριζόντιων πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα επιλύει τις εξισώσεις που συνδέουν κατακόρυφα τα στρώματα. Αυτή η διαφορετική προσέγγιση της υπό μελέτη περιοχής σε δυο διαφορετικές διευθύνσεις (κάθετα και οριζόντια) παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα καθώς μειώνει τον αριθμό και το μέγεθος των απαιτούμενων υπολογισμών. [12]

Το PTC εκτελεί αυτόματα ελέγχους τόσο για την ορθότητα των δεδομένων που εισάγονται σε αυτό όσο και για τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται και τα προκύπτοντα αποτελέσματα. Μερικοί από τους ελέγχους που πραγματοποιεί αφορούν

στην ισχύ της αρχής διατήρησης της μάζας και στις γραφικές απεικονίσεις και επεξεργασίες. Ακόμη, το PTC μπορεί να βελτιστοποιήσει την αρίθμηση των κόμβων των δημιουργούμενων πλεγμάτων ή δικτύων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το πλάτος του πίνακα (bandwidth), στον οποίο εισάγονται τα δεδομένα των στοιχείων και χρησιμοποιείται για τους διαφόρους υπολογισμούς που εκτελεί το πρόγραμμα. [12]

5.3.2 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες για τη ροή που μπορούν να τεθούν από το PTC και να επιλεγούν από το χρήστη είναι τριών ειδών [12]:

- Συνθήκη Dirichlet (σταθερό υδραυλικό ύψος)
- Συνθήκη Neumann (σταθερή ροή)
- Συνθήκη Robbins (ύπαρξη διαρροής)

Σε περίπτωση ελεύθερου υδροφορέα χρειάζεται η εισαγωγή δυο επιπλέον οριακών συνθηκών που αφορούν στην ανώτερη στάθμη του νερού στο επιφανειακό στρώμα. Η πρώτη συνθήκη δηλώνει ότι η στάθμη του νερού καθορίζει το πάχος του υδροφορέα στο ανώτερο στρώμα, ενώ η δεύτερη περιγράφει τη μεταβολή της στάθμης του νερού λόγω διήθησής του από την επιφάνεια της γης. [12]

Όσον αφορά στις οριακές συνθήκες της εξίσωσης μεταφοράς ρύπων, υπάρχουν δυο επιλογές [12]:

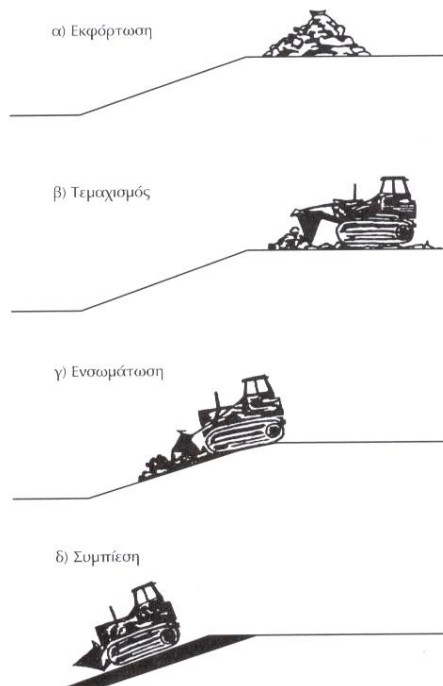
- Οριακή συνθήκη σταθερής συγκέντρωσης σε επιλεγμένους κόμβους
- Οριακή συνθήκη σταθερής ροής

6. Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.)

6.1 Εισαγωγή

Η χρήση χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) για τη διαχείριση των αστικών και άλλων απορριμμάτων είναι ιστορικά η παλαιότερη και πλέον διαδεδομένη μέθοδος σε όλο τον κόσμο. Ο όρος Χ.Υ.Τ.Α. που έχει επικρατήσει στην Ελλάδα αντιπροσωπεύει το σύνολο των εγκαταστάσεων και των φυσικών μέσων που χρησιμοποιούνται για την απόθεση των απορριμμάτων στο έδαφος και έχουν σχεδιαστεί με τέτοια τεχνολογία, ώστε να μειώνεται στο μέγιστο δυνατόν ο κίνδυνος για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον από τα απορρίμματα. [13]

Στους χώρους αυτούς τα απορρίμματα αποτίθενται, συμπυκνώνονται και καλύπτονται από γαιώδη υλικά, με αποτέλεσμα ο Χ.Υ.Τ.Α. να αποτελείται στο τέλος από επάλληλα στρώματα απορριμμάτων που έχουν συνθλιβεί, συμπιεστεί και καλυφθεί κατάλληλα.



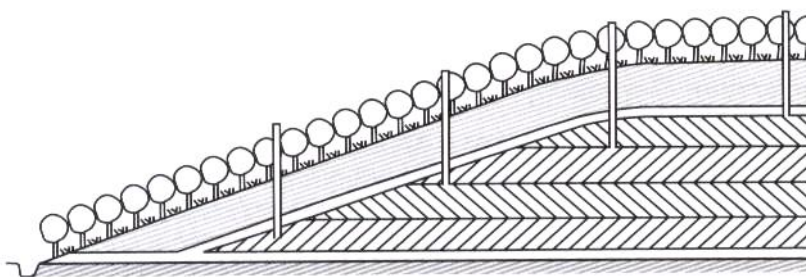
Σχήμα 14:Στάδια εναπόθεσης αποβλήτων [13]

Ο όρος κύτταρα χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον όγκο του υλικού που τοποθετείται σε μια χωματερή κατά τη διάρκεια μιας περιόδου λειτουργίας που τις περισσότερες φορές είναι μια ημέρα. Ένα κύτταρο περιέχει όλη την ποσότητα

απορριμμάτων που απορρίφθηκε συν το υλικό που χρησιμοποιείται ως το καθημερινό κάλυμμα του κάθε κυττάρου. Το κάλυμμα αυτό έχει πάχος 10 με 30 εκατοστά, αποτελείται συνήθως από χώμα ή άλλο αντίστοιχο υλικό και τοποθετείται για να αποτρέψει τη μεταφορά απορριμμάτων από τον αέρα αλλά και την ανάπτυξη μυγών και τρωκτικών στον Χ.Υ.Τ.Α.. [14]

Ένας Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεί ένα δυναμικό σύστημα, στο οποίο λαμβάνουν χώρα φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, οι οποίες εξελίσσονται κάτω από αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες και έχουν ως αποτέλεσμα τη γήρανση, την αποσάθρωση και τη δημιουργία αερίων και στραγγισμάτων. Το γεγονός αυτό καθιστά επιτακτική την ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης των διαφόρων αυτών διεργασιών, που είναι δυνατόν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα. Παράλληλα με τον έλεγχο των παραπάνω διεργασιών, κρίνεται αναγκαία η προσεκτική επιλογή του κατάλληλου χώρου εναπόθεσης των απορριμμάτων καθώς και η ασφαλής και ορθή κατασκευή και λειτουργία του.

Επίσης ιδιαίτερης σημασίας είναι και η αποκατάσταση του χώρου της ελεγχόμενης απόθεσης απορριμμάτων, μετά το πέρας της λειτουργίας του. Το τελευταίο κάλυμμα μιας χωματερής ακολουθεί το κλείσιμο του τελευταίου επιπέδου απόθεσης και καλύπτει την έκταση όλης της χωματερής. Συνήθως αποτελείται από αλληπάλληλα στρώματα χώματος και μεμβρανών που στόχο έχουν να αποτρέψουν οποιαδήποτε πιθανή αρνητική επίπτωση από στερεά, υγρά και αέρια απόβλητα μιας ελεγχόμενης απόθεσης. Συγκεκριμένα, σκοπός της τελικής κάλυψης είναι η αύξηση της επιφανειακής στράγγισης, η παρεμπόδιση της διήθησης του νερού, ο έλεγχος των παραγόμενων αερίων, η μείωση πιθανότητας πυρκαγιών και η δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για την ανάπτυξη φυτών. [13]



Σχήμα 15: Μονωμένη εγκατάσταση ελεγχόμενης εναπόθεσης, στην οποία φαίνονται τα συμπιεσμένα απόβλητα, το στρώμα μόνωσης και το έδαφος κάλυψης. [13]

6.2 Θεσμικό πλαίσιο

Για τους χώρους ελεγχόμενης εναπόθεσης μη επικίνδυνων στερεών αποβλήτων ισχύουν στην Ελλάδα οι εξής νομοθετικές ρυθμίσεις [13]:

- Νόμος 1650/88 (ΦΕΚ 160/1286) άρθρο 12 για την προστασία του περιβάλλοντος
- Κοινή Υπουργική Απόφαση αρ. 69728/829/96 (ΦΕΚ Β 358) «Μέτρα και όροι για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων» σε εναρμόνιση των οδηγιών 75/442/ΕΟΚ και 96/61/ΕΟΚ.
- Κοινές Υπουργικές Αποφάσεις αρ. 113944/97 (ΦΕΚ Β 1016) και 114218/97 (ΦΕΚ Β 1016), που αναφέρονται στον εθνικό σχεδιασμό και τις τεχνικές προδιαγραφές για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων
- Οδηγία 1999/31/ΕΚ περί Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων

Βασικός στόχος των Νομοθετικών Ρυθμίσεων είναι η κατά το δυνατόν πρόληψη ή/και η μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ειδικότερα της ρύπανσης των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, του εδάφους και της ατμόσφαιρας καθώς και των επιπτώσεων που αφορούν γενικά το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία του ανθρώπου και μπορούν να προέλθουν από έναν χώρο ελεγχόμενης εναπόθεσης απορριμμάτων. [13]

Η ΚΥΑ 39728/824/96 καθορίζει τις γενικές κατευθύνσεις και το πλαίσιο διαχείρισης των στερεών μη επικίνδυνων αποβλήτων. Δίνει προτεραιότητα στην πρόληψη και τη μείωση της παραγωγής και βλαπτικότητας των αποβλήτων και στην αξιοποίησή τους (ανάκτηση, ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση). Αναφέρεται στις διαδικασίες εφαρμογής των τεχνικών και του σχεδιασμού, θεσπίζει όρους για την καταλληλότητα των θέσεων και καθορίζει τις τεχνικές προδιαγραφές των μεθόδων διάθεσης. [13]

Η ΚΥΑ 113944/97 χαράζει γενικές κατευθύνσεις για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων προς εφαρμογή της ΚΥΑ 69728/824/96, ενώ η ΚΥΑ 114218/97 καταρτίζει το πλαίσιο των τεχνικών προδιαγραφών διαχείρισης των στερεών αποβλήτων. [13]

Τέλος, η οδηγία 1999/31/ΕΚ καθορίζει τα μέτρα, τις διαδικασίες και τις κατευθύνσεις για την πρόληψη ή την μείωση και αξιοποίηση των αποβλήτων καθώς και τα είδη των

αποβλήτων που γίνονται δεκτά για ελεγχόμενη εναπόθεση (Υγειονομική Ταφή). Παράλληλα, αναφέρεται στις διαδικασίες για χορήγηση άδειας λειτουργίας και καθορίζει τα μέτρα για τη λειτουργία, τον έλεγχο και την παρακολούθηση των χώρων και την μετέπειτα φροντίδα τους. [13]

6.3 Επιλογή χώρων ελεγχόμενης εναπόθεσης απορριμμάτων

Η επιλογή ενός κατάλληλου χώρου για την ελεγχόμενη εναπόθεση των απορριμμάτων είναι ένα δύσκολο έργο, το οποίο απαιτεί μεγάλη προσοχή και υπευθυνότητα. Οφείλει να ληφθεί υπόψη από τους εκάστοτε αρμόδιους ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων και κριτηρίων που θα δικαιολογούν επαρκώς την καταλληλότητα ενός χώρου για την εναπόθεση των απορριμμάτων μιας περιοχής.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την υπάρχουσα νομοθεσία απαιτείται [13]:

I. Ανάλυση της υπάρχουσας κατάστασης

- A) Δημογραφικά στοιχεία (πληθυσμός)
- B) Ποσότητες και σύνθεση των απορριμμάτων

II. Χάρτες, μελέτες, σχέδια

- A) Γενικός χάρτης και αεροφωτογραφίες της υπό εξέταση περιοχής
- B) Τοπογραφικός και γεωλογικός χάρτης
- Γ) Υδρογεωλογικές μελέτες
- Δ) Ρυθμιστικό σχέδιο και σχέδιο ανάπτυξης της περιοχής

Μετά τη συλλογή και την αξιολόγηση των παραπάνω στοιχείων εντοπίζονται οι χώροι που κρίνονται κατ' αρχήν κατάλληλοι για τη διάθεση των στερεών αποβλήτων. Κατά την προεπιλογή αποκλείονται οι χώροι που βρίσκονται στις παρακάτω περιοχές [13]:

- Περιοχές αρχαιολογικού και πολιτιστικού ενδιαφέροντος
- Παραδοσιακοί οικισμοί
- Θεσμοθετημένες περιοχές προστασίας και μεμονωμένα στοιχεία της φύσης και του τοπίου
- Οικιστικές περιοχές
- Περιοχές εντός ορίων σχεδίου πόλεως και εντός ορίων οικισμών με πληθυσμό κάτω των 2000 κατοίκων

- Περιοχές εντός ορίων Οικοδομικών Συνεταιρισμών Α ή και Β κατοικίας
- Περιοχές ιδιωτικής πολεοδόμησης του Ν. 1947/91 για οικιστική χρήση
- Περιοχές που βρίσκονται κοντά σε αεροδρόμια
- Περιοχές για τις οποίες ισχύει ειδική ή γενική απαγορευτική διάταξη, που αφορά και σε θέματα Εθνικής Ασφάλειας και Άμυνας

Σε γενικές γραμμές η ιδεώδης τοποθεσία για τη δημιουργία ενός χώρου υγειονομικής ταφής μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως [13]:

- Είναι υδρογεωλογικά αποδεκτή και δεν συντελεί στη ρύπανση των υπόγειων νερών, όταν χρησιμοποιηθεί για τη διάθεση απορριμμάτων
- Βρίσκεται σε κοντινή απόσταση και τα απορριμματοφόρα έχουν να διανύσουν μικρό μήκος εξωτερικής διαδρομής
- Είναι ελεύθερη από ρέον ή στάσιμο νερό
- Απέχει πάνω από 500 μέτρα από την τελευταία κατοικία
- Έχει καλή προσπέλαση από το υφιστάμενο οδικό δίκτυο
- Έχει κοντά της ηλεκτρικό ρεύμα, νερό και ευκολίες αποχέτευσης
- Η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του χώρου δίνει την ευχέρεια κατασκευής όλων των έργων υποδομής

Ειδικότερα, τα κριτήρια τα οποία πρέπει να εξεταστούν και να πληρούνται επαρκώς είναι τα ακόλουθα [13]:

α. Γεωλογικά, υδρογεωλογικά και υδρολογικά κριτήρια.

Τα κριτήρια αυτά αφορούν κύρια στο βαθμό φυσικής προστασίας των υπογείων και επιφανειακών νερών, ως παράγοντα πρόσθετης διασφάλισης τους στην υποθετική περίπτωση της μερικής αστοχίας των έργων και μέτρων στεγάνωσης και διαχείρισης των στραγγισμάτων. Αφορούν, επίσης, στην ασφάλεια των κατασκευών του Χ.Υ.Τ.Α. και κατά συνέπεια ενδιαφέρουν εν προκειμένω χαρακτηριστικά του υποψήφιου Χ.Υ.Τ.Α. και της ευρύτερης περιοχής του, όπως:

- Σύνθεση και ποιότητα εδάφους και υπεδάφους, διάβρωση, τεκτονικά χαρακτηριστικά, σεισμικότητα.
- Διαπερατότητα εδάφους και υπεδάφους.

(Τα παραπάνω με εξαίρεση τα τεκτονικά και τη σεισμικότητα ισχύουν σε περίπτωση που υπάρχει αξιοποιήσιμη υδροφορία.)

- Βάθος στάθμης, απόσταση ποιότητα και σπουδαιότητα από πλευράς χρήσης των υπογείων νερών, που επηρεάζονται (σε περίπτωση αστοχίας) από τον Χ.Υ.Τ.Α.
- Μέγεθος λεκάνης απορροής, επιφανειακή απορροή, ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις.
- Απόσταση και σπουδαιότητα των δυνάμενων να επηρεαστούν ρεμάτων και τελικών αποδεκτών.

β. Περιβαλλοντικά κριτήρια.

Τα κριτήρια αυτά αφορούν στις τυχόν επιπτώσεις από την κατασκευή του Χ.Υ.Τ.Α. στο κοντινό και ευρύτερο περιβάλλον, πέραν των νερών που εξετάστηκαν προηγουμένως. Ενδιαφέρουν, επομένως, χαρακτηριστικά του υποψήφιου Χ.Υ.Τ.Α. και της ευρύτερης περιοχής του, όπως:

- Σπουδαιότητα και απόσταση, από ευαίσθητα οικοσυστήματα.
- Σπουδαιότητα υπάρχουσας στην περιοχή χλωρίδας και πανίδας.
- Αισθητική κατάσταση του κυρίως χώρου του Χ.Υ.Τ.Α., σε σχέση με τη δυνατότητα αναβάθμισής του.

γ. Χωροταξικά κριτήρια.

Τα κριτήρια αυτά αφορούν στις ενδεχόμενες επιπτώσεις του Χ.Υ.Τ.Α. σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, που βρίσκονται σε ακτίνα επιρροής από αυτόν. Ενδιαφέρουν, επομένως, χαρακτηριστικά του υποψήφιου Χ.Υ.Τ.Α. και της ευρύτερης περιοχής του, όπως:

- Απόσταση, σε συνδυασμό με τα στοιχεία φυσικής προκάλυψης του Χ.Υ.Τ.Α., από οικισμούς, στρατιωτικές εγκαταστάσεις και στρατόπεδα, χώρους με μόνιμη και εποχιακή παρουσία μεγάλου αριθμού ατόμων, αρχαιολογικούς χώρους, αεροδρόμια, βιομηχανικές και βιοτεχνικές εγκαταστάσεις
- Κατεύθυνση των επικρατούντων ανέμων.
- Απόσταση από θέσεις οπτικής επαφής του χώρου με το εθνικό και επαρχιακό οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο, σε συνδυασμό με το προβαλλόμενο μέρος του απορριμματικού ανάγλυφου.
- Ευχέρεια παράκαμψης οικισμών και άλλων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων για την πρόσβαση στο Χ.Υ.Τ.Α.

- Οδική ή σιδηροδρομική απόσταση του χώρου από το κέντρο βάρους της εξυπηρετούμενης περιοχής.
- Υπάρχουσα επιβάρυνση της ευρύτερης περιοχής από πλευράς αστικών ρύπων (αερίων, υγρών, στερεών).
- Στοιχεία μικροκλίματος περιοχής (π.χ. συχνότητα και διεύθυνση καταβατικών ρευμάτων, συχνότητα και διάρκεια θερμοκρασιακών αναστροφών).

δ. Κριτήρια λειτουργικά και γενικής φύσης.

Εξετάζονται χαρακτηριστικά του υποψήφιου Χ.Υ.Τ.Α. όπως:

- Κλιματολογικές συνθήκες.
- Έκθεση του χώρου σε επικρατούντες ισχυρούς ανέμους.
- Εδαφομορφολογία του χώρου.
- Χωρητικότητα (δηλ. διάρκεια ζωής) του χώρου.
- Ευχέρεια απόκτησης του χώρου, σε σχέση με τον χαρακτήρα της περιοχής και το ιδιοκτησιακό του καθεστώς.
- Διαθεσιμότητα υλικού επικάλυψης.

ε. Κριτήρια οικονομικού κόστους.

Εξετάζονται κυρίως οι παρακάτω παράμετροι:

- Ευχέρεια εκτέλεσης, μέγεθος και τεχνική απλότητα των απαιτούμενων έργων υποδομής και περιβαλλοντικής προστασίας περιλαμβανομένης επίσης (α) της οδού που συνδέει το Χ.Υ.Τ.Α. με το υπάρχον κατάλληλο οδικό δίκτυο και (β) της τελικής αποκατάστασης και μεταφροντίδας.
- Αξία της γης.
- Διαθεσιμότητα δικτύων (ύδρευση, ηλεκτρική ενέργεια).
- Εκτιμώμενο κόστος μεταφοράς.

6.4 Μόνωση χώρου ελεγχόμενης εναπόθεσης απορριμμάτων

Με βάση τα κριτήρια που αφορούν στην προστασία των υπογείων και επιφανειακών υδάτων, κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος των διασταλαζόντων υγρών που δημιουργούνται σε ένα Χ.Υ.Τ.Α. και ειδικότερα η συλλογή και μεταφορά τους σε ένα σύστημα επεξεργασίας. Για το σκοπό αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται συστήματα στεγάνωσης του πυθμένα του χώρου διάθεσης των απορριμμάτων, τα οποία

αποτελούν βασικό παράγοντα ορθής λειτουργίας του και προστασίας του περιβάλλοντος.

Η προστασία του εδάφους, των υπογείων και επιφανειακών υδάτων επιτυγχάνεται με το συνδυασμό των παρακάτω συντελεστών [15]:

- Φυσική υπάρχουσα (ενδεχομένως) μόνωση.
- Σύστημα τεχνητής μόνωσης από συμπιεσμένα αργιλικά υλικά και συνθετική μεμβράνη.
- Σύστημα αποστράγγισης και συλλογής στραγγισμάτων.

Για τον προσδιορισμό των παραπάνω συντελεστών λαμβάνονται υπόψη τα γεωλογικά, υδρογεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των εδαφών, καθώς και το είδος των προς διάθεση απορριμμάτων.

Ένα τυπικό σύστημα τεχνητής μόνωσης μιας εγκατάστασης αποτελείται από τρία μέρη [15]:

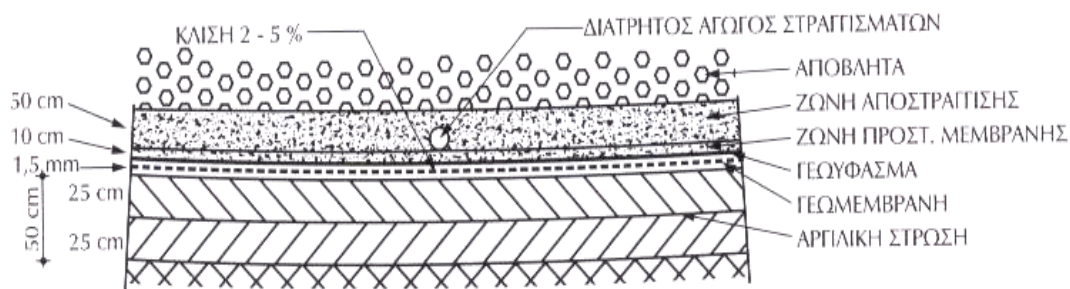
- Τη μόνωση της βάσης
- Τη μόνωση της επιφάνειας
- Τη μόνωση των πρανών ή τειχιών

Οι βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρεί ένα σύστημα στεγάνωσης ενός Χ.Υ.Τ.Α. είναι οι ακόλουθες [15]:

- Να κρατάει στεγανό το χώρο από τις βροχοπτώσεις και τα επιφανειακά ύδατα
- Να αντέχει σε θερμοκρασίες τουλάχιστον 70°C
- Να στεγανοποιεί τα παραγόμενα αέρια και στραγγίσματα
- Να αντέχει στις τυχόν καθιζήσεις και διαβρώσεις
- Να αντέχει στην επίδραση των μικροοργανισμών
- Να τοποθετείται απλά
- Να μπορεί να ελεγχθεί τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά τη λειτουργία
- Να μπορεί εύκολα να επιδιορθωθεί
- Να μην έχει υπερβολικό κόστος

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τεχνητών συστημάτων στεγάνωσης που έχουν σχεδιαστεί με τη χρήση διαφορετικών συνδυασμών διαφόρων υλικών. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι φυσικής προέλευσης ή και συνθετικά. Τα πλέον διαδεδομένα υλικά είναι [14]:

- Φυσική άργιλος: Η κοκκομετρία της αργίλου είναι πάρα πολύ μικρή με αποτέλεσμα τόσο το πορώδες όσο και η διαπερατότητα να είναι εξίσου μικρές. Η άργιλος λειτουργεί ως στρώμα στεγάνωσης καλύτερα όταν συμπιέζεται σε στρώματα πάχους 0,6 με 1m
- Ενισχυμένα με μπετονίτη πετρώματα: Ο μπετονίτης είναι ένα μίγμα αργιλικών πετρωμάτων που έχουν την ικανότητα να διογκώνονται καθώς απορροφούν υγρασία και να διαμορφώνουν ένα είδος συνθετικής αργίλου. Συνήθως προστίθεται σε υπάρχοντα πετρώματα για να μειώσει την περατότητά τους
- Γεωσυνθετικά αργιλικά στεγανά: Είναι ένα μίγμα από μπετονίτη που με μηχανικούς ή χημικούς τρόπους έχει διαμορφωθεί σε γεωύφασμα. Συνήθως το γεωσυνθετικό αργιλικό στεγανό έχει τις περισσότερες φορές μόλις 1cm πάχος
- Ελαστικές μεμβράνες: Είναι συνθετικές μεμβράνες από πολυμερές υλικό με εκπληκτικά χαμηλό βαθμό περατότητας. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από μεμβράνες αλλά ο πλέον κοινός τύπος είναι αυτός από πολυαιθυλένιο (PVC). Τα φύλλα της μεμβράνης αυτής, που συνήθως έχει πάχος 0,75-3m, συγκολλούνται μεταξύ τους με τη χρήση θερμότητας ή κάποιου χημικού μέσου.
- Γεωύφασμα: Είναι υφάσματα που χρησιμοποιούνται για να προστατέψουν τις ελαστικές πλαστικές μεμβράνες αλλά και ταυτόχρονα λειτουργούν ως μέσο φιλτραρίσματος για να απομακρυνθούν μικρά σωματίδια από τα διασταλάζοντα υγρά και να μην μπλοκάρεται το σύστημα απομάκρυνσής τους. Τα γεωυφάσματα συντίθενται από ίνες πολυπροπενίου ή πολυεστέρα.
- Γεωδίχτυα: Είναι πλαστικά φύλλα με μεγάλο σχετικά πορώδες που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των διασταλαζόντων υγρών ή αερίων από το Χ.Υ.Τ.Α.. Ο κύριος ρόλος τους είναι η απομάκρυνση των διασταλαζόντων υγρών.



Σχήμα 16: Σχηματική παράσταση συστήματος μόνωσης του πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α. και συλλογής στραγγισμάτων [13].

Η επιλογή του σωστού τύπου συστήματος μόνωσης και των κατάλληλων υλικών αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την κατασκευή ενός Χ.Υ.Τ.Α. και εξαρτάται από [13]:

- Τη σύνθεση των απορριμμάτων μια και αυτή καθορίζει τη σύσταση των διασταλαζόντων υγρών και φυσικά τις συγκεντρώσεις των οργανικών ουσιών και άλλων ρυπαντών
- Τη βροχόπτωση και γενικά την παραγόμενη ποσότητα διασταλαζόντων υγρών μια και μεγάλες ποσότητες θα πρέπει να διαχειριστούν διαφορετικά και να απομακρύνονται πιο γρήγορα από το Χ.Υ.Τ.Α.
- Την απόθεση βιομηχανικών – τοξικών απορριμμάτων στο Χ.Υ.Τ.Α.. Η ύπαρξη βαρέων μετάλλων κάνει τα διασταλάζοντα υγρά ιδιαίτερα τοξικά, απαγορεύοντας την οποιαδήποτε διαφυγή τους
- Το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα μια και η ύπαρξη μεγάλης απόστασης δίνει στο έδαφος τη δυνατότητα να προκαλέσει κάποια επεξεργασία στα διασταλάζοντα υγρά πριν αυτά φτάσουν σε αυτόν
- Τον τύπο του εδάφους κάτω από τον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α. μια και αδιαπέραστα πετρώματα ουσιαστικά αποτελούν από μόνα τους μια αδιαπέραστη μεμβράνη

6.5 Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε έναν Χ.Υ.Τ.Α.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε ένα χώρο ελεγχόμενης εναπόθεσης απορριμμάτων λαμβάνουν χώρα πολλές φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, είτε κάτω από αερόβιες είτε κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Αποτέλεσμα αυτών των διεργασιών είναι η μετατροπή του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων σε Humus καθώς και η διάβρωση των υλικών και η παράλληλη δημιουργία ευδιάλυτων ουσιών.

Επίσης, πραγματοποιείται φυσική και η βιολογική αποσάθρωση των απορριμμάτων, οι οποίες είναι ιδιαίτερα έντονες και οδηγούν στη μείωση του pH, την οξείδωση των οργανικών ουσιών προς CO₂ και τη διάλυση στερεών λόγω παρουσίας ανθρακικού οξέος.

Η ευρύτερη βιολογική διαδικασία που παρατηρείται σε Χ.Υ.Τ.Α. μπορεί να διαχωρισθεί σε 5 βασικά στάδια [14]:

- Φάση προσαρμογής
- Ενδιάμεση φάση
- Όξινη φάση
- Φάση μεθανογένεσης
- Φάση ωρίμανσης

Αναλυτικά σε καθένα από τα παραπάνω στάδια παρατηρούνται τα ακόλουθα φαινόμενα [14]:

Φάση προσαρμογής: Στη διάρκεια του σταδίου αυτού, το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των απορριμμάτων θα υποστεί την επίδραση των μικροοργανισμών που ουσιαστικά έχει ξεκινήσει πριν καν την εναπόθεση των απορριμμάτων στο Χ.Υ.Τ.Α.. Η αποδόμηση αυτή λαμβάνει χώρα υπό αερόβιες συνθήκες μια και υπάρχουν ποσότητες αέρα εγκλωβισμένες μέσα στα απορρίμματα. Αποτέλεσμα αυτής της εξώθερμης αποδόμησης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας που μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει τους 70°C. Το CO₂ που παράγεται απορροφάται από το νερό προκαλώντας το σχηματισμό οξέων που προσδίδουν στα διασταλάζοντα υγρά μια αυξημένη οξύτητα.

Οι μικροοργανισμοί που θα δράσουν κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης συνήθως προέρχονται από το υλικό που χρησιμοποιείται για να καλύψει το κάθε κύτταρο ή από την ιλύ των βιολογικών καθαρισμών που πολύ συχνά εναποτίθεται σε Χ.Υ.Τ.Α.. Η διάρκεια του σταδίου αυτού, όπως και κάθε άλλου σταδίου, είναι σχετική και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τη σύνθεση των απορριμμάτων, την ποιότητα της συμπίεσης αυτών και φυσικά την ποσότητα του εγκλωβισμένου οξυγόνου. Γενικά, η διάρκεια του σταδίου αυτού είναι μερικές ημέρες ή το πολύ εβδομάδες.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα αέρια του Χ.Υ.Τ.Α. έχουν της εξής κατ' όγκο σύνθεση:

- Αζωτο : 80% αρχικά και μειώνεται στο 70%
- Οξυγόνο : 20% αρχικά και μειώνεται σε τιμές λίγο πάνω από το 15%
- Διοξείδιο του άνθρακα : ξεκινάει από επίπεδα ατμοσφαιρικά και φτάνει μέχρι και το 10%

Τα διασταλάζοντα υγρά του Χ.Υ.Τ.Α. κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής έχουν τα παρακάτω χημικά χαρακτηριστικά:

- Το pH ξεκινάει από ουδέτερες τιμές και πέφτει ελαφριά
- Αύξηση της τιμής του COD από μηδενικές τιμές σε ελάχιστα πιο υψηλές
- Ελαφριά αύξηση της ποσότητας των πτητικών λιπαρών οξέων

Ενδιάμεση φάση: Κατά τη διάρκεια του σταδίου αυτού η ποσότητα του οξυγόνου μειώνεται δραματικά και αρχίζουν να επικρατούν αναερόβιες συνθήκες στο εσωτερικό της χωματερής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζει δραματικά ο χαρακτήρας των μικροοργανισμών που επικρατούν στη φάση αυτή. Αναερόβιοι μικροοργανισμοί γίνονται κυρίαρχοι. Υδρογονάνθρακες, πρωτεΐνες και λίπη υδρολύονται σε σάκχαρα που στη συνέχεια αποδομούνται ακόμη περισσότερο σε CO₂, H₂, NH₃ και οργανικά οξέα. Για αυτό και η φάση αυτή λέγεται φάση υδρόλυση και είναι η πρώτη από τις τρεις φάσεις που συνθέτουν τη συνολική διαδικασία σύνθεσης του μεθανίου. Η αυξημένη και πάλι παρουσία του διοξειδίου του άνθρακα και των οργανικών οξέων προκαλεί ακόμα μεγαλύτερη σύνθεση οξέων που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του pH. Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής η θερμοκρασία πέφτει μεταξύ των 30 και 50°C.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα αέρια του Χ.Υ.Τ.Α. έχουν την εξής σύνθεση κατ' όγκο:

- Αζωτο : κατακόρυφη πτώση της συγκέντρωσης σε επίπεδα χαμηλότερα του 20%
- Οξυγόνο : φθίνει ακόμη περισσότερο μέχρι ουσιαστικά να εκλείψει
- Διοξείδιο του άνθρακα : από το 10% φτάνει στο τέλος της φάσης αυτής σε τιμές μεγαλύτερες του 50%
- Υδρογόνο : στο τέλος της φάσης αυτής φτάνει λίγο κάτω από το 20%

Τα διασταλάζοντα υγρά του Χ.Υ.Τ.Α. κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής έχουν τα παρακάτω χημικά χαρακτηριστικά:

- Το pH πέφτει δραματικά σε τιμές κοντά στο 5
- Περαιτέρω αύξηση της τιμής του COD
- Περαιτέρω αύξηση της ποσότητας των πτητικών λιπαρών οξέων
- Εμφάνιση κάποιων βαρέων μετάλλων

Οξίνη φάση: Η μικροβιακή διαδικασία που ξεκίνησε στην προηγούμενη φάση επιταχύνεται με την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων οργανικών οξέων και μικρότερων ποσοτήτων υδρογόνου. Η παραγωγή των οξέων αυτών που είναι κυρίως CH_3COOH και παράγωγα αυτού, φουλβικού οξέος και άλλων πιο σύνθετων οργανικών οξέων καθώς και η υψηλή συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα προκαλεί ακόμη μεγαλύτερη πτώση στο pH, με αποτέλεσμα την εκχύλιση από τα απορρίμματα βαρέων μετάλλων και μεγάλης ποσότητας θρεπτικών στοιχείων. Οι μικροοργανισμοί που επικρατούν σε αυτή τη φάση χαρακτηρίζονται ως μη μεθανογενείς. Καθώς όμως η ποσότητα υδρογόνου που παράγεται μειώνεται στη διάρκεια του σταδίου αυτού ανοίγει ο δρόμος για την κυριαρχία και την ανάπτυξη μεθανογενών μικροοργανισμών.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα αέρια του Χ.Υ.Τ.Α. έχουν την εξής σύνθεση κατ' όγκο:

- Άζωτο : πτώση της συγκέντρωσης μέχρι μηδενισμού
- Διοξείδιο του άνθρακα : το κυρίαρχο αέριο αυτής της φάσης που φτάνει και σε τιμές πάνω από 90%
- Υδρογόνο : στη φάση αυτή φτάνει τη μέγιστη τιμή του (20%) αλλά κατά τη διάρκεια της ίδιας φάσης εξαφανίζεται ανοίγοντας το δρόμο σε μεθανογενείς μικροοργανισμούς
- Μεθάνιο : αρχίζει για πρώτη φορά να εμφανίζεται σε αυτή τη φάση

Τα διασταλάζοντα υγρά του Χ.Υ.Τ.Α. κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής έχουν τα παρακάτω χημικά χαρακτηριστικά:

- Το pH πέφτει σε τιμές κοντά στο 4
- Περαιτέρω αύξηση της τιμής του COD, που στη φάση αυτή φτάνει τη μέγιστη τιμή του

- Περαιτέρω αύξηση της ποσότητας των πτητικών λιπαρών οξέων, που και αυτά παρουσιάζουν μέγιστη τιμή στη φάση αυτή
- Αύξηση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων και κάποιων άλλων θρεπτικών στοιχείων

Φάση μεθανογένεσης: Η φάση αυτή αποτελεί την κύρια χρονικά φάση της διαδικασίας αποδόμησης του οργανικού κλάσματος των χωματερών αν και μερικές φορές ξεκινάει μέχρι και έξι μήνες μετά την τοποθέτηση των απορριμμάτων και φτάνει σε διάρκεια αρκετά χρόνια. Στη διάρκεια της φάσης αυτής τα οργανικά οξέα που είχαν σχηματιστεί και το υδρογόνο θα μετασχηματιστούν σε CH_4 και CO_2 . Οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι αποκλειστικά αναερόβιοι και καλούνται μεθανογενείς μικροοργανισμοί. Σημαντικές ποσότητες μεθανίου παράγονται 3 με 12 μήνες μετά την έναρξη της φάσης αλλά και η παραγωγή του αερίου αυτού μπορεί να φτάσει και 30 χρόνια μετά το κλείσιμο του Χ.Υ.Τ.Α.. Οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι είτε μεσοφιλικοί, με βέλτιστη θερμοκρασία 30-35°C, ή θερμοφιλικοί με βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης 45-65°C. Η διάσπαση των οξέων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του pH των διασταλαζόντων υγρών.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα αέρια του Χ.Υ.Τ.Α. έχουν την εξής σύνθεση κατ' όγκο:

- Διοξείδιο του άνθρακα : μειώνεται σε τιμές γύρω στο 40% και παραμένει σταθερό σε αυτά τα επίπεδα μέχρι και το τέλος της φάσης αυτής
- Μεθάνιο : το κυρίαρχο αέριο της φάσης αυτής που αποτελεί το 60%

Τα διασταλάζοντα υγρά του Χ.Υ.Τ.Α. κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής έχουν τα παρακάτω χημικά χαρακτηριστικά:

- Το pH αυξάνεται ξανά σε ουδέτερες τιμές
- Μείωση της τιμής του COD
- Μείωση της ποσότητας των πτητικών λιπαρών οξέων
- Μείωση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων και άλλων θρεπτικών στοιχείων

Φάση ωρίμανσης: Όταν ολοκληρωθεί η αποδόμηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων και η μετατροπή όλων των προϊόντων της σε CH_4 και CO_2 , η φάση

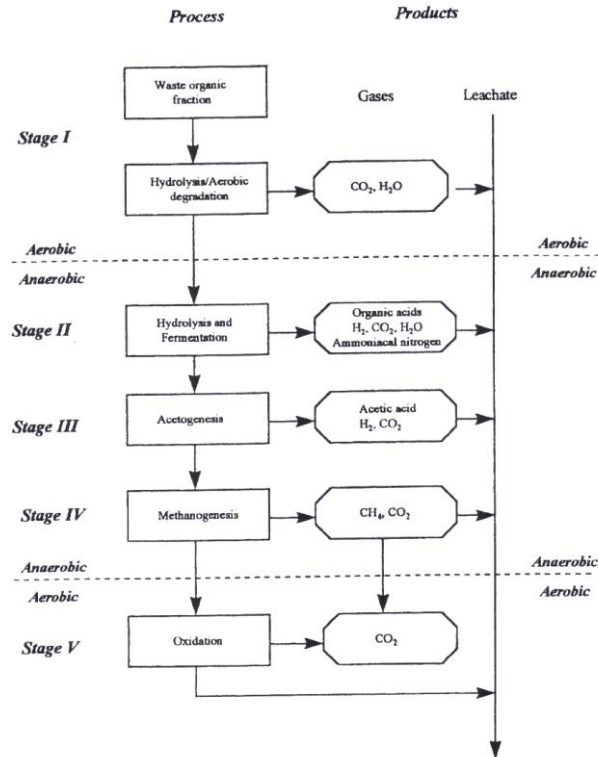
της μεθανογένεσης έχει ουσιαστικά ολοκληρωθεί και ξεκινάει το τελευταίο στάδιο στη ζωή ενός X.Y.T.A., αυτό της ωρίμανσης ή οξείδωσης. Παρόλα αυτά, καθώς η υγρασία που υπάρχει στον X.Y.T.A. συνεχίζει να κινείται προς τα κάτω, νέες ποσότητες οργανικών απορριμμάτων αποκαλύπτονται συνεχίζοντας την παραγωγή μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, αλλά σε σημαντικά χαμηλότερες ποσότητες από πριν. Οξυγόνο και άζωτο αρχίζουν να επανεμφανίζονται στα αέρια του X.Y.T.A., καθώς νέοι αερόβιοι μικροοργανισμοί αντικαθιστούν τους αναερόβιους που κυριαρχούσαν στο προηγούμενο στάδιο.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα αέρια του X.Y.T.A. έχουν την εξής σύνθεση κατ' όγκο:

- Διοξείδιο του άνθρακα : μειώνεται δραματικά, φτάνοντας σε τιμές γύρω στις ατμοσφαιρικές
- Μεθάνιο : παράλληλη πορεία με αυτή του διοξειδίου του άνθρακα
- Άζωτο : αύξηση της συγκέντρωσής του σε ατμοσφαιρικά επίπεδα (~80%)
- Οξυγόνο : αύξηση της συγκέντρωσής του σε ατμοσφαιρικά επίπεδα (~20%)

Τα διασταλάζοντα υγρά του X.Y.T.A. κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής έχουν τα παρακάτω χημικά χαρακτηριστικά:

- Το pH παραμένει σε ουδέτερες τιμές
- Χουμικά και φουλβικά οξέα παρουσιάζονται σε σημαντικές ποσότητες, η βιολογική διαχείριση των οποίων είναι αρκετά δύσκολη



Σχήμα 17: Συνολική απεικόνιση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια χωματερή κατά τη βιοαποδόμηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων. [14]

6.5.1 Δημιουργία διασταλαζόντων υγρών

Τα διασταλαζόντα υγρά δημιουργούνται από τη διήθηση των βρόχινων νερών όταν ξεπεραστεί η απορροφητικότητα των απορριμμάτων και αποτελούνται από μίγμα διηθούμενου νερού και των υγρών που παράγονται από τη διάσπαση των οργανικών ουσιών, λόγω της δράσης των μικροβίων. Τα υγρά αυτά συχνά κατεισδύουν και φτάνουν στους υπόγειους υδροφορείς, τους οποίους ρυπαίνουν. Η ρύπανση του υπόγειου νερού και του υπόγειου περιβάλλοντος, παραμένει απαρατήρητη για μεγάλο χρονικό διάστημα και διαπιστώνεται μόλις γίνει λήψη νερού από υπόγεια γεώτρηση ή κατά την έξοδό του στην επιφάνεια μέσω πηγών. Η κατανάλωση του ρυπανθέντος υπόγειου νερού μπορεί να προκαλέσει σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων ενώ η απομάκρυνσή του μέσω του συστήματος χρειάζεται δεκάδες έως εκατοντάδες έτη.



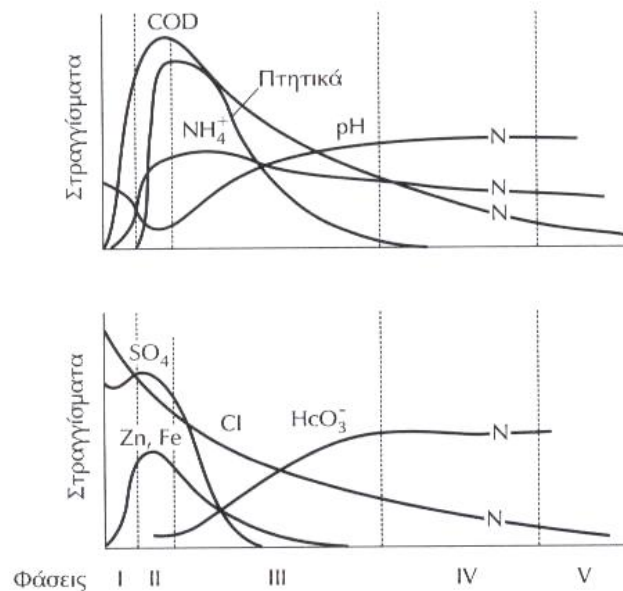
Σχήμα 18: Ρύπανση υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα από υγρά απορρίμματα [15].

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται μια τυπική ανάλυση διασταλαζόντων υγρών από οικιακά απορρίμματα.

Συστατικά	Τιμή mg/L	
	Διακύμανση	Τυπική
BOD ₅	2.000-30.000	10.000
TOC (Ολικός Οργανικός Άνθρακας)	1.500-20.000	6.000
COD (Chemical Oxygen Demand)	3.000-45.000	18.000
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά	200-1.000	500
Οργανικό Άζωτο	10-600	200
Αμμωνιακό Άζωτο	10-800	200
Νιτρικά	5-40	25
Ολικός Φώσφορος	1-70	30
Ορθοφώσφορος	1-50	20
Αλκαλικότητα ως CaCO ₃	1.000-10.000	3.000
pH	5,3-8,5	6
Ολική Σκληρότητα ως CaCO ₃	300-10.000	3.500
Ασβέστιο	200-3.000	1.000
Μαγνήσιο	50-1.500	250
Κάλιο	200-2.000	300
Νάτριο	200-2.000	500
Χλώριο	100-3.000	500
Θειικά	100-1.500	300
Ολικός Σίδηρος	50-600	60

Πίνακας 1: Τυπική ανάλυση διασταλαζόντων υγρών από οικιακά απορρίμματα [15].

Η αύξηση της πυκνότητας των απορριμμάτων και η αύξηση του βάθους του χώρου εναπόθεσής τους, ασκούν επίδραση στην επιβράδυνση της βιοαποδόμησης του οργανικού υλικού, δια της παρεμπόδισης του νερού να προχωρήσει μέσα στη διάθεση. Έτσι, τα διασταλάζοντα υγρά έχουν μικρότερο ρυπαντικό φορτίο αλλά παράγονται για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Επίσης, κατά την βιοαποδόμηση του σύνθετου οργανικού υλικού παράγονται οργανικά οξέα, που μπορούν να υποστούν περαιτέρω βιοχημικές ενέργειες και να δώσουν αέρια ή να εκπληθούν προς τα έξω και να δώσουν υγρά με μεγάλο BOD. Έτσι, καθώς αυξάνεται η παραγωγή αερίου, το BOD των υγρών των απορριμμάτων τείνει να ελαττωθεί. [13]



Διάγραμμα 3: Μεταβολές της σύστασης των στραγγισμάτων συναρτήσει της φάσης που επικρατεί στο Χ.Υ.Τ.Α. [13]

Η προεπεξεργασία των απορριμμάτων μπορεί να επηρεάσει τα περιβαλλοντικά προβλήματα των διασταλαζόντων υγρών. Οι πιο κοινές μέθοδοι προεπεξεργασίας είναι η θρυμματοποίηση, η δεματοποίηση και η καύση. Η θρυμματοποίηση αυξάνει την επιφάνεια των απορριμμάτων, επιταχύνει την αποσύνθεση και το ξέπλυμα των χημικών ουσιών αλλά παράλληλα παρουσιάζει μεγαλύτερες αιχμές BOD και COD στα υγρά, από ότι έχουν τα μη επεξεργασμένα απορρίμματα. Η δεματοποίηση ελαττώνει την επιφάνεια και αυξάνει την πυκνότητα, καθιστώντας δύσκολη την εισροή νερών στα απορρίμματα. Η καύση καταστρέφει την οργανική ύλη που

υπάρχει στα απορρίμματα. Από τα κατάλοιπα και τη στάχτη γίνεται έκπλυση ανόργανου υλικού. [13]

Όταν ο χώρος συγκρατηθεί σε αερόβια κατάσταση τα υγρά μεταβάλλονται. Τα προϊόντα της αεροβίωσης των οικιακών απορριμμάτων οξειδώνονται πληρέστερα από ότι σε μια αναερόβια διάθεση. Το οργανικό φορτίο των υγρών ενός νέου αερόβιου χώρου μπορεί να είναι κατά 70% χαμηλότερο από το φορτίο των υγρών ενός αναερόβιου χώρου. Η διατήρηση ενός χώρου διάθεσης σε αερόβια κατάσταση θεωρείται σαν ένας τρόπος επεξεργασίας των διασταλαζόντων υγρών. Η διατήρηση όμως ενός χώρου σε αερόβια κατάσταση, είναι δυσχερής στην πράξη και οι χώροι διάθεσης συνήθως παραμένουν σε αναερόβια κατάσταση. [13]

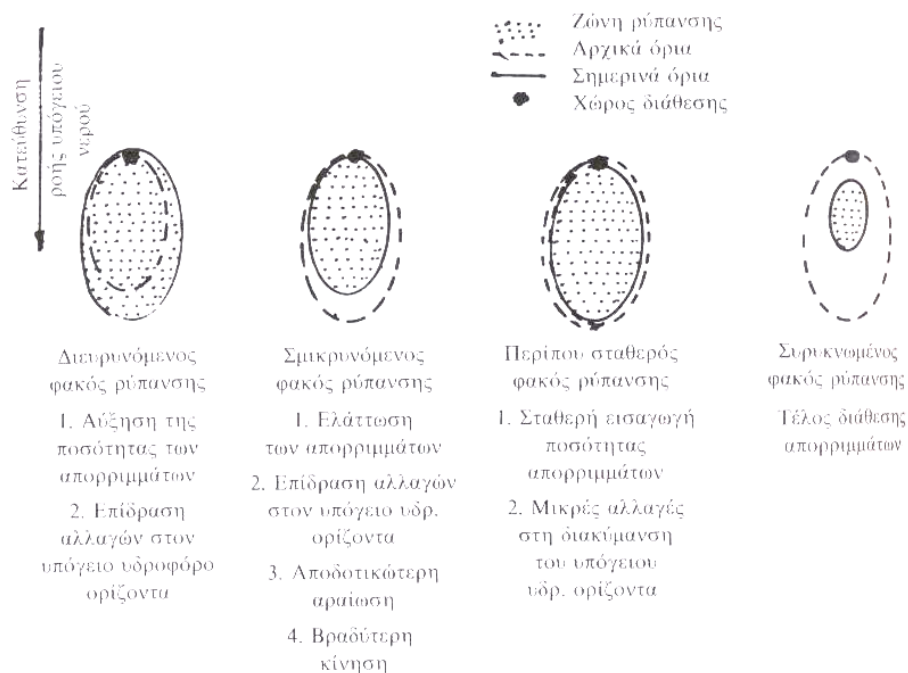
Το έδαφος μπορεί να ελαττώσει τη ρύπανση του νερού κατά τη δίοδο του δια της μάζας του. Αυτό πραγματοποιείται μέσω βιοχημικών, φυσικοχημικών και φυσικών διαδικασιών [15].

Βιοχημικές Διαδικασίες: Στη ζώνη της μέγιστης οργανικής ρύπανσης, το διαλυμένο οξυγόνο χρησιμοποιείται για τις βιοχημικές αντιδράσεις. Οι μικροοργανισμοί παίρνουν περαιτέρω οξυγόνο, δια αναγωγής των νιτρικών και των θειούχων. Στη ζώνη αναγωγής βρίσκονται μεγάλες τιμές αμμωνίας. Επίσης γίνεται απελευθέρωση CO₂, βιοχημική αναγωγή των θειούχων σε H₂S και συνδυασμός του H₂S με βαρέα μέταλλα, για να παραχθούν πολύ αδιάλυτα καθιζήματα μεταλλικών θειούχων. Σε περιοχές με μικρότερη οργανική ρύπανση μπορεί να διατηρηθεί λίγο διαλυμένο οξυγόνο. Η οργανική βιοαποδόμηση είναι ταχύτερη σε μια τέτοια ζώνη οξείδωσης και εκλύεται CO₂. Το παραγόμενο CO₂ μπορεί, λόγω πυκνότητας, να κατευθυνθεί κατά ένα μέρος, μέσω του εδάφους, στο υπόγειο νερό και ακολούθως να προκαλέσει ελάττωση του pH και αύξηση της σκληρότητας λόγω διάλυσης Ca και Mg (εφόσον υπάρχει στη δομή του εδάφους). Οι παθογόνοι οργανισμοί που μπορεί να βρεθούν στο χώρο, συνήθως δεν προχωρούν υπογείως πολύ μακριά, λόγω των δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών έξω από το χώρο. Σε λίγες δεκάδες μέτρα από το άκρο του χώρου διάθεσης είναι απίθανο να βρεθούν παθογόνα βακτήρια.

Φυσικές και χημικές διαδικασίες: Οι φυσικές και χημικές διεργασίες περιλαμβάνουν τη χημική καθίζηση, την απορρόφηση, την ανταλλαγή ιόντος και τη διύλιση. Στη

ζώνη αναγωγής σχηματίζονται αδιάλυτα βαρέα μέταλλα και θειούχα. Άλλες ενώσεις συνκαθιζάνουν μαζί με το υδροξείδιο του σιδήρου, λόγω της σταθεροποίησης επί της επιφάνειας των ιχνών ουσιών. Η απορρόφηση συγκρατεί τα ανόργανα και τα οργανικά υλικά στην επιφάνεια των υλικών σωματιδίων και ελαττώνεται ουσιοδώς, σε χαμηλές τιμές pH. Η ανταλλαγή ιόντος ανταλλάσσει τα δεσμευμένα στην επιφάνεια ιόντα με ιόντα της διάλυσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της απορρόφησης και της ανταλλαγής ιόντων είναι αντιστρεπτή. Όταν αρκετές ποσότητες ρυπαντικών ουσιών έχουν συγκρατηθεί και φθάσουν μετά πιο αραιωμένες ποσότητες υγρών, το έδαφος ή το πέτρωμα απελευθερώνει τους ρυπαντές πίσω στο νερό. Συγκράτηση γίνεται και δια της μηχανικής διύλισης μέσα από τα πετρώματα, που εξαρτάται από τις διαστάσεις των κόκκων και το μέγεθος των πόρων του εδάφους. Εάν το πέτρωμα είναι ρηγματωμένο, η αιωρούμενη ύλη μεταφέρεται πολλά χιλιόμετρα μέσω της ροής σε εξάρτηση με το πλάτος των ροών. Η αύξηση της διαδρομής των υγρών των απορριμμάτων μέσα από το έδαφος ή το πέτρωμα, πριν να συναντήσουν το υπόγειο νερό ή το επιφανειακό νερό, ελαττώνει τα προβλήματα ρύπανσης.

Μια ουσιώδης ακόρεστη ζώνη κάτω από το χώρο διάθεσης των απορριμμάτων παρέχει ένα τεράστιο δυναμικό συγκράτησης της ρύπανσης των διασταλαζόντων υγρών πριν φτάσουν στο υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Όταν όμως πραγματοποιηθεί η ρύπανση των υπόγειων νερών από τα διασταλάζοντα υγρά σχηματίζεται ένας φακός ρύπανσης, του οποίου η μορφή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ταχύτητα του υπόγειου νερού και η παροχή. Μια μεγάλη ταχύτητα του υπόγειου νερού οδηγεί σε μεγαλύτερο διασκορπισμό προς την κατεύθυνση ροής του υπόγειου νερού και μικρότερο πλευρικά. Έτσι, ο φακός των υγρών των απορριμμάτων γίνεται ένας στενός κώνος ρύπανσης προς τη διεύθυνση της ροής. Μια μικρότερη ταχύτητα υπόγειου νερού οδηγεί σε μεγαλύτερο πλευρικό διασκορπισμό, με βάση όμως πάντοτε τη ροή του υπόγειου νερού.



Σχήμα 19: Μεταβολές στο φακό της ρύπανσης από τη διάθεση απορριμμάτων [15].

Η διοχέτευση των υγρών των απορριμμάτων στο υπόγειο νερό εμφανίζει διάφορα προβλήματα. Η αύξηση του οργανικού άνθρακα αυξάνει το BOD του υπόγειου νερού, που είναι δυνατόν να αυξήσει την αναπαραγωγή των παθογόνων βακτηρίων. Η οργανική ύλη που βρίσκεται στα υγρά των απορριμμάτων, βιοαποδομεύεται πολύ βραδέως όταν τα υγρά φθάσουν στο υπόγειο νερό, διότι η ζήτηση οξυγόνου αποοξυγονώνει γρήγορα το υπόγειο νερό. Όταν επικρατήσουν αναερόβιες συνθήκες το σίδηρο και το μαγγάνιο διαλύονται στο υπόγειο νερό και δημιουργούνται περαιτέρω προβλήματα.

Η πιο σοβαρή επίδραση των διασταλαζόντων υγρών είναι η αύξηση της μεταλλικότητας που προκαλούν στο υπόγειο νερό. Η μεταλλικότητα του υπόγειου νερού οφείλεται σε ανόργανα ιόντα όπως τα χλωριούχα, τα οποία διανύουν ικανές αποστάσεις μέσα στο έδαφος ή το διαπερατό πέτρωμα, χωρίς συγκράτηση. Η αύξησης της μεταλλικότητας στο υπόγειο νερό μπορεί να το καταστήσει μη πόσιμο, ενώ η αύξηση της τοξικότητας να το κάνει επικίνδυνο για τη δημόσια υγεία.

Η πρόληψη της ρύπανσης του υπόγειου νερού είναι μια σημαντική ενέργεια, διότι ο χρόνος που απαιτείται για τον αυτοκαθαρισμό ενός υδροφορέα μετριέται συνήθως σε δεκαετίες, η δε τεχνητή αφαίρεση της ρύπανσης είναι εξαιρετικά δαπανηρή και

πολλές φορές πρακτικά ανέφικτη. Πολλές φορές όμως η ανακάλυψη της ρύπανσης γίνεται αφού γίνει ο διασκορπισμός της μέσα στο υπόγειο νερό και αφού ρυπανθεί ένας μεγάλος όγκος νερού, οπότε είναι δύσκολη κάθε θεραπευτική ενέργεια.

Οι κυριότερες στρατηγικές διαχείρισης των διασταλαζόντων υγρών σε ένα χώρο διάθεσης μπορούν διακριθούν σε δυο βασικές κατηγορίες [13]:

- Ελάττωση της ποσότητας των διασταλαζόντων υγρών (λόγος υγρών προς απορρίμματα μεγαλύτερος από 1:5)
 - Ελάττωση ποσότητας νερού που διηθείται στο χώρο διάθεσης
 - Επένδυση του πυθμένα με αδιαπέρατο υλικό
 - Μεγαλύτερη κλίση πυθμένα και συνεπώς μικρότερη διήθηση
 - Τοποθέτηση βλάστησης
- Συλλογή των υγρών και μεταφορά σε εγκατάσταση επεξεργασίας
 - Τοποθέτηση διάτρητων συλλεκτικών αγωγών
 - Αερόβια ή αναερόβια βιολογική επεξεργασία
 - Επεξεργασία στο έδαφος
 - Φυτικοχημική επεξεργασία
 - Ανακύκλωση των διασταλαζόντων υγρών μέσα στο χώρο διάθεσης
 - Επεξεργασία με λύματα

6.5.2 Παραγωγή βιοαερίου

Το βιοαέριο αποτελεί το δεύτερο βασικό παραπροϊόν της ταφής των απορριμμάτων και παράγεται λόγω της βιοαποδόμησής τους μέσω των μικροοργανισμών. Ουσιαστικά αποτελείται από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα αλλά ταυτόχρονα εμπεριέχει μικρές ποσότητες και άλλων αερίων, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα.

Στοιχείο	Περιεκτικότητα
Μεθάνιο	0-85% (κατ' όγκο)
Διοξείδιο του άνθρακα	0-88% (κατ' όγκο)
Μονοξείδιο του άνθρακα	0-3% (κατ' όγκο)
Υδρογόνο	0-3,6% (κατ' όγκο)
Οξυγόνο	0-32% (κατ' όγκο)
Άζωτο	0-83% (κατ' όγκο)
Αμμωνία	0-0,35 ppm
Υδρόθειο	0-70 ppm
Ακετόνη	100 ppm
Αιθυλομερκαπτάνη	0-120 ppm
Ακεταλδεΐδη	150 ppm
Βενζόλιο	0,6-32 ppm
Βινυλοχλωρίδιο	0,03-44 ppm
Χλωροφόρμιο	0,2-2 ppm
Διχλωρομεθάνιο	0,9-490 ppm
Τολουόλη	4-197 ppm
Ξυλόλη	2,3-139 ppm
Τριχλωροαιθυλένιο	1,2-116 ppm
Τετραχλωροαιθυλένιο	0,3-110 ppm
Αιθανόλη	16-1450 ppm
Προπάνιο	41-630 ppm
Βουτάνιο	2,3-626 ppm
PCB's	40-3,2 ng/m ³
Διοξίνες - φουράνες	0,01 ng/m ³

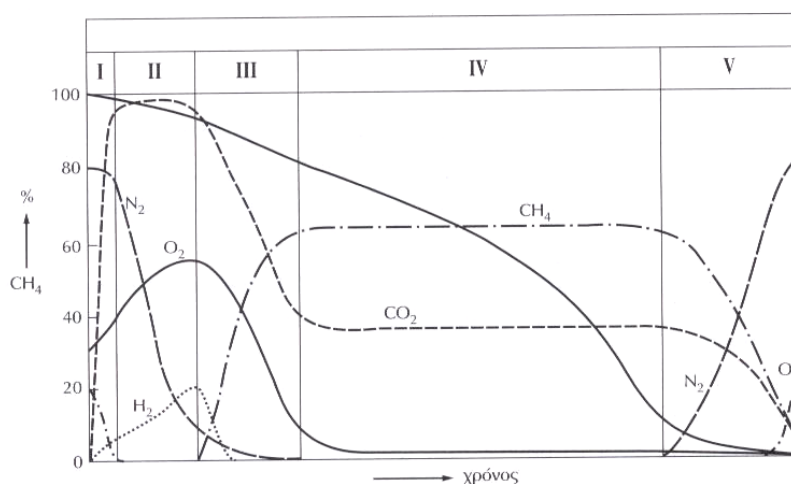
Πίνακας 2: Σύνθεση βασικών στοιχείων βιοαερίου [13].

Η βιολογική και βιοχημική αποσύνθεση των απορριμμάτων διαρκεί έναν αριθμό ετών και κατά τη χρονική αυτή διάρκεια γίνονται σημαντικές αλλαγές στη φύση και την ποσότητα των εκλυόμενων αερίων. Η ποσότητα των αερίων που παράγονται αλλά και η σύνθεσή τους εξαρτώνται κυρίως από τους παρακάτω παράγοντες [13]:

- Την ποσότητα των απορριμμάτων

- Τη σύνθεση των απορριμμάτων και κυρίως από το μέγεθος του οργανικού κλάσματος
- Τη σύνθεση του οργανικού κλάσματος σε βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα βιοαποδομήσιμα υλικά
- Την περιεχόμενη υγρασία στον Χ.Υ.Τ.Α.

Έχει εκτιμηθεί ότι μια τυπική ποσότητα μεθανίου που παράγεται συνήθως στην πράξη είναι 30-180m³/τόνο ξηρών απορριμμάτων, ενώ η χρονική περίοδος κατά την οποία παράγεται το 90% των αερίων εκτιμάται σε 80 χρόνια.



Διάγραμμα 4: Τυπική παραγωγή βιοαερίου σε ένα Χ.Υ.Τ.Α. κατά τη διάρκεια των διαφορετικών φάσεων που επικρατούν [13].

Η παραγωγή βιοαερίου και η σύσταση των διασταλαζόντων υγρών είναι άμεσα συνδεδεμένες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί καθώς αυξάνεται η παραγωγή αερίου, το BOD των υγρών των απορριμμάτων τείνει να ελαττωθεί. Αυτό οφείλεται στο ότι ο οργανικός άνθρακας που υπάρχει στα απορρίμματα έχει δυο οδούς διαφυγής, είτε μέσω του οργανικού φορτίου των στραγγισμάτων είτε με τη μορφή μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα. Ο τρόπος ο οποίος θα επικρατήσει καθορίζεται από τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν.

Οι λόγοι που καθιστούν αναγκαίο τον έλεγχο, τη συλλογή καθώς και την επεξεργασία των παραγόμενων αερίων είναι πολλοί και σημαντικοί [15]:

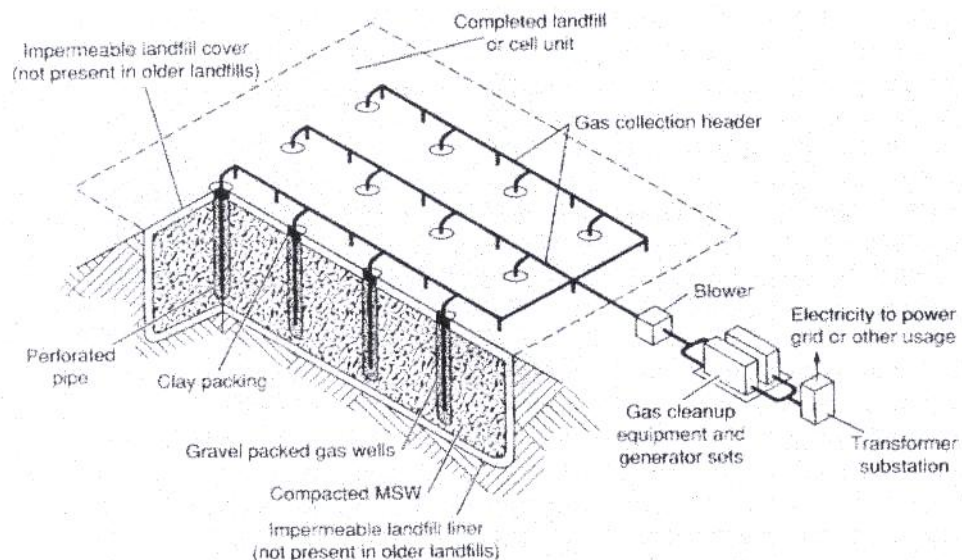
- Υπάρχει αυξημένος κίνδυνος εκρήξεων και πυρκαγιάς, καθώς το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα έχουν σχετικά χαμηλά όρια αυτανάφλεξης

- Υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας ασφυκτικών συνθηκών, οι οποίες θέτουν σε κίνδυνο την υγεία και γενικότερα τη ζωή των εργαζομένων στο Χ.Υ.Τ.Α.
- Οι παραγόμενες ποσότητες μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα είναι σημαντικές και επιβαρύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου
- Δημιουργούνται οσμές που οφείλονται σε ίχνη θειούχων και οι οποίες μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα έντονες και ενοχλητικές ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν

Για τη συλλογή του βιοαερίου πρέπει να δημιουργηθούν ειδικά φρεάτια μέσα στο χώρο εναπόθεσης των απορριμμάτων και ένα επαρκές δίκτυο σωληνώσεων. Το δίκτυο αυτό μπορεί να είναι είτε υπόγειο είτε επιφανειακό, αρκεί όμως να είναι καλά προστατευμένο από πιθανή διάτρηση. Γενικά, έχουν επικρατήσει τρεις τρόποι διαχείρισης του βιοαερίου [13]:

- Παθητικός εξαερισμός μέσω επιφάνειας: το βιοαέριο εξέρχεται από το εσωτερικό του ΧΥΤΑ μέσα από τμήματα (παράθυρα) της επιφανειακής κάλυψης, τα οποία διαστρώνονται με οργανικό εδαφικό υλικό (βιόφιλτρα). Υπολογίζεται ότι εδαφικό υλικό κάλυψης πλούσιο σε βακτηρίδια μπορεί από μόνο του να αποικοδομήσει το μεθάνιο σε νερό και οξυγόνο με ρυθμό $50\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{m}^2/\text{έτος}$. Στην περίπτωση που προβλέπονται περιμετρικοί τάφροι εξαέρωσης πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη στεγανοποίηση της απόληξης της τάφρου, έτσι ώστε να μην επιτρέπει την είσοδο όμβριων στα απορρίμματα.
- Άντληση βιοαερίου με φρεάτια: η μέθοδος αυτή συνιστάται όταν οι ποσότητες του βιοαερίου είναι μεγάλες και δεν επαρκεί ο παθητικός εξαερισμός. Επίσης κρίνεται κατάλληλος όταν προβλέπεται ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου.
 - Οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων συλλογής βιοαερίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 60m.
 - Τα κάθετα συστήματα συλλογής βιοαερίου πρέπει να διεισδύουν εντός του σώματος των αποβλήτων σε βάθος ίσο με το 80 - 90% του συνολικού πάχους των αποβλήτων και να απέχουν από τη στρώση στεγάνωσης τουλάχιστον 2m.
- Σύστημα ενεργητικής απαγωγής: το υλικό του συστήματος ενεργητικής απαγωγής οφείλει να είναι ανθεκτικό στις αναμενόμενες φυσικές (βάρος,

θερμοκρασία), χημικές (στραγγίσματα, βιοαέριο) και βιολογικές (μικροοργανισμοί) επιβαρύνσεις.



Εικόνα 1: Ένα τυπικό σύστημα συλλογής και επεξεργασίας των αερίων ενός Χ.Υ.Τ.Α. [14]

Μετά τη συλλογή του, το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να έχει πολλές χρήσεις, όπως:

- Πώληση σε ενδιαφερόμενους πελάτες
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσα αλλά και έξω από το Χ.Υ.Τ.Α.
- Έγχυση σε υφιστάμενο αγωγό εθνικού δικτύου φυσικού αερίου
- Μετατροπή σε άλλες χημικές μορφές

7. Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων Αμαρίου

7.1 Τοποθεσία – Περιοχή του Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου

Η θέση όπου βρίσκεται εγκατεστημένος ο χώρος υγειονομικής ταφής απορριμμάτων είναι εντός των διοικητικών ορίων του Δήμου Συβρίτου, στην ευρύτερη περιοχή της Κοινότητας Αμαρίου και πιο συγκεκριμένα στη θέση «Κούλε Μασχάλια». Βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 650 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας, δίπλα στο δρόμο Αρκάδι – Απόστολοι και σε απόσταση περίπου 6Km από τους πλησιέστερους οικισμούς και περίπου 3Km νότια της Μονής Αρκαδίου. Η ευρύτερη περιοχή περιβάλλεται από ορεινές εκτάσεις, στις οποίες η κύρια δραστηριότητα είναι η κτηνοτροφία, ενώ σε αρκετά χιλιόμετρα περιμετρικά του χώρου δεν παρεμβάλλεται καμία καλλιέργεια. [16]

Βιομηχανίες και βιοτεχνίες είναι σχεδόν ανύπαρκτες σε επίπεδο νομού με ελάχιστες εξαιρέσεις τις μονάδες παραγωγής τροφίμων, οι οποίες όμως βρίσκονται σε ακτίνα μεγαλύτερη των 10χλμ. Επίσης, δεν υπάρχει πρόβλεψη για τη δημιουργία βιοτεχνικών ζωνών κοντά στην περιοχή του Χ.Υ.Τ.Α., όπως επίσης δεν υπάρχει αεροδρόμιο αλλά ούτε προβλέπεται να δημιουργηθεί σε κοντινή απόσταση, μια και πρόκειται για ορεινή περιοχή. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί ότι καμία από τις περιοχές του Νομού Ρεθύμνης που έχουν χαρακτηριστεί ως ιδιαίτερου φυσικού κάλλους (σύμφωνα με την υπ' αριθμόν Α/931/36852/29 απόφαση του ΥΠΕΧΩΔΕ) δεν είναι γειτονική με τον Χ.Υ.Τ.Α.. [16]

Μορφολογικά η ευρύτερη περιοχή στην οποία σήμερα γίνεται η απόθεση απορριμμάτων είναι μια ορεινή έκταση. Γενικά η περιοχή χαρακτηρίζεται από πολύ έντονο ανάγλυφο με μεγάλες και απότομες κλίσεις. Το πιο υψηλό σημείο είναι το σημείο Κουλές (υψόμετρο 711m από την επιφάνεια της θάλασσας). Στο Δυτικό όριο της περιοχής διέρχεται ο δρόμος Αμαρίου – Μυλοποτάμου (ή Θρόνος – Αρκάδι). Ουσιαστικά η θέση Κουλέ Μασχάλια είναι η αρχή της λεκάνης απορροής του Αρκαδιώτη (με εμβαδόν περίπου 28.110m²) και η θέση Κουλές (711m) είναι ένα από τα σημεία της υδροκριτικής γραμμής. Μέσα στα όρια της λεκάνης δεν παρατηρούνται εστίες ρύπανσης (π.χ. ρυπασμένη λίμνη) ούτε πηγές που να τροφοδοτούν τα υδατορέματα. Τα ρέματα που διασχίζουν την περιοχή δεν είναι συνεχούς παροχής.

Ρέουν μόνο σε περιόδους βροχοπτώσεων και για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 2-3 ώρες). Στον τοπογραφικό χάρτη του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Ι έχει σχεδιαστεί η λεκάνη απορροής, ενώ ταυτόχρονα απεικονίζονται τα όρια του Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου.. [16]

7.2 Γενικά στοιχεία του Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου

7.2.1 Εξυπηρετούμενος πληθυσμός

Η τεχνική έκθεση του Συνδέσμου Κοινοτήτων Επαρχίας Αμαρίου, η οποία αναφέρεται στην κατασκευή και λειτουργία του Χ.Υ.Τ.Α., προέβλεπε ο χώρος να εξυπηρετεί το σύνολο των Κοινοτήτων και Οικισμών που ανήκουν στα διοικητικά όρια της επαρχίας Αμαρίου με μόνιμο πληθυσμό 5.796 κατοίκους. Κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου ο αριθμός του εξυπηρετούμενου πληθυσμού ανέρχεται σε 6.550 κατοίκους. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, στα οποία στηρίχτηκε η τεχνική έκθεση, ο Χ.Υ.Τ.Α. θα είχε διάρκεια ζωής περίπου 45 χρόνια.

Ο Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου με χωρητικότητα 87.000m³ ξεκίνησε τη λειτουργία του την 19/1/97 εξυπηρετώντας τις παρακάτω περιοχές :

- 2^η Εδαφική Περιφέρεια
- Κοινότητα Αγίας Γαλήνης
- Σύνδεσμος Δυτικού Ρεθύμνου
- Σύνδεσμος Επαρχίας Αμαρίου

Ο Χ.Υ.Τ.Α. αρχικώς εξυπηρετούσε 19.714 άτομα (από 1/9/97) κατά τη διάρκεια του χρόνου, ενώ σε περίοδο τουριστικής αιχμής ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός ανερχόταν σε 21.950. Ο Χ.Υ.Τ.Α. συνέχισε να εξυπηρετεί τον επιπλέον πληθυσμό και κατά τη διάρκεια του 1998. Από 1/1/99 με τη δημιουργία των νεοσύστατων Δήμων σύμφωνα με το σχέδιο Καποδίστρια τα δεδομένα των εξυπηρετούμενων περιοχών έχουν μεταβληθεί. Έτσι οι περιοχές που εξυπηρετούνται είναι οι παρακάτω:

- Δήμος Γεροποτάμου
- Δήμος Κουρητών
- Δήμος Συβρίτου
- Κοινότητα Αγίας Γαλήνης

- Σύνδεσμος Δυτικού Ρεθύμνου (αποτελείται από τους Δήμους Νικ. Φωκά και Λαπαίων εκτός της Κοινότητας Αργυρούπολης)

Ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός φτάνει τους 20.463 κατοίκους και σε περίοδο τουριστικής αιχμής τους 23.767 κατοίκους, σύμφωνα με τα στοιχεία του Ελληνικού Οργανισμού Τουρισμού (Διεύθυνση Τουρισμού Κρήτης, Παράρτημα Ρεθύμνου) και την Στατιστική Υπηρεσία Ρεθύμνου. Οι παραδοχές που έγιναν για το μέγεθος του εξυπηρετούμενου πληθυσμού και κατά συνέπεια του υπολογισμού των ποσοτήτων των απορριμμάτων του Νομού συνοψίζονται παρακάτω [16]:

- Ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός ισούται με τον μόνιμο πληθυσμό για μια περίοδο τεσσάρων μηνών. Αυτό συμβαίνει διότι η περιοχή χαρακτηρίζεται ως τουριστική για μια περίοδο τουλάχιστον οχτώ μηνών.
- Για διάρκεια έξι μηνών ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός υπολογίστηκε ως το άθροισμα των μόνιμων κατοίκων και του μέσου όρου των τουριστών.
- Για δυο μήνες (καλοκαίρι) θεωρήθηκε ότι είναι περίοδος τουριστικής αιχμής και ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός ισούται με τον μέγιστο πληθυσμό που μπορεί να δεχθεί ο Νομός.

7.2.2 Παραγωγή οικιακών απορριμμάτων

Επειδή δεν προβλέπεται γεφυροπλάστιγγα στον υφιστάμενο Χ.Υ.Τ.Α. δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία (Ζυγολόγια) των στερεών αποβλήτων που παράγονται και διατίθενται στον Χ.Υ.Τ.Α.. Παρόλα αυτά υπάρχουν μερικά ενδεικτικά στοιχεία συναρτήσεως των εισερχόμενων απορριμματοφόρων στον Χ.Υ.Τ.Α. (για το έτος 1998), τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

	Σύνολο Α/Φ για το 1998	Βάρος (Τόννοι/Έτος)
Σύνδεσμος Κοινοτήτων Αμαρίου	171	1317
Σύνδεσμος Δυτικού Ρεθύμνου	127	971
Κοινότητα Αγίας Γαλήνης	117	688
Δήμος Γεροπόταμου	537	3126

Πίνακας 3: Ενδεικτικά στοιχεία εισερχόμενων Α/Φ στον Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου για το 1998 και αντίστοιχο βάρος. [16]

Σύμφωνα με την απογραφή του 1991, ο εξυπηρετούμενος μόνιμος πληθυσμός (από 15 Σεπτεμβρίου 1999) ανέρχεται σε 28.384 άτομα. Κατά τους θερινούς μήνες ο

εξυπηρετούμενος πληθυσμός ανέρχεται σε 33.913 άτομα, ενώ την περίοδο αιχμής (2 μήνες Ιούλιο – Αύγουστο) ο πληθυσμός φτάνει τις 39.442.

Σύμφωνα με τον «Οδηγό Διαχείρισης Απορριμμάτων στην Ελληνική Περιφέρεια» (Ε.Ε.Τ.Α.Α.), 1995 (γ' έκδοση), η κατά άτομο παραγωγή οικιακών απορριμμάτων κυμαίνεται όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα. Οι συντελεστές που αναγράφονται αναφέρονται σε ημερήσια παραγόμενα κιλά απορριμμάτων ανά κάτοικο σε συνάρτηση με τον πληθυσμό του Ο.Τ.Α..

ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ (kg/ κάτοικο/ ημέρα)
Κάτω από 1000 κατοίκους	0,7
Μεταξύ 2000-5000κατοίκων	0,8
Πάνω από 5000 κατοίκους	1,1

Πίνακας 4: Συντελεστές παραγωγής απορριμμάτων. [16]

Αναλυτικότερα για Ο.Τ.Α. με πληθυσμό πάνω από 5000 κατοίκους, η ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων ανά κάτοικο λαμβάνεται ίση με 1,1kg. Η ποσότητα αυτή είναι κοντά στις μετρήσεις που έχουν γίνει κατά περιόδους για την παραγωγή ημερήσιας ποσότητας απορριμμάτων στα αστικά κέντρα.

Ο υπολογισμός των ποσοτήτων απορριμμάτων για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης γίνεται με βάση τους παρακάτω συντελεστές [17]:

- Συντελεστής 0,7kg/κάτοικο/ ημέρα για τους μόνιμους κατοίκους
- Συντελεστής 0,8kg/κάτοικο/ ημέρα για τους έξι μήνες τουριστικής κίνησης
- Συντελεστής 0,8kg/κάτοικο/ ημέρα για της περίοδο αιχμής

Για τον υφιστάμενο εξυπηρετούμενο πληθυσμό σύμφωνα και με τα παραπάνω στοιχεία υπολογίστηκαν οι ετήσιες παραγόμενες ποσότητες απορριμμάτων.

	Μόνιμος Πληθυσμός	Πληθυσμός τουριστικής περιόδου	Πληθυσμός περιόδου αιχμής
Πληθυσμός	28.384	33.913	39.442
Συντελεστής Παραγωγής	0,7	0,8	0,8
Απορρίμματα (τόννοι /ημέρα)	19,87	27,13	31,56
Περίοδος παραγωγής (ημέρες/ έτος)	120	180	60
ΣΥΝΟΛΟ (τόννοι)	2.384	5.019	1.893
ΣΥΝΟΛΟ (τόννοι/ έτος)			9.297

Πίνακας 5: Υφιστάμενη ετήσια παραγωγή απορριμμάτων. [16]

Ο υπολογισμός των παραγόμενων ποσοτήτων των απορριμμάτων γίνεται με βάση τα πληθυσμιακά δεδομένα ολόκληρου του Νομού Ρεθύμνου, τον πληθυσμό της τουριστικής περιόδου του Νομού αλλά και τον πληθυσμό της περιόδου αιχμής. Οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει ο Νομός Ρεθύμνου είναι συνοψισμένες αμέσως παρακάτω [16]:

- Ο Χ.Υ.Τ.Α. Ρεθύμνου μπορεί να δεχθεί στερεά απόβλητα για ακόμη 1,5 έτος (Ιανουάριος 2000). Λόγω των προβλημάτων που έχουν παρουσιαστεί από την λειτουργία του, είναι αδύνατον να συνεχίσει την εξυπηρέτηση των Ο.Τ.Α. και των οικισμών που εξυπηρετεί μέχρι τώρα.
- Η τοποθεσία που βρίσκεται ο υφιστάμενος Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου σε συνδυασμό με την άριστη (σύμφωνα με τους μελετητές) κατασκευή του έργου παρέχει τις δυνατότητες για την περαιτέρω αξιοποίηση του χώρου, έτσι ώστε όχι μόνο να συνεχίσει να εξυπηρετεί τους Ο.Τ.Α. αλλά και να διευρυνθεί ώστε να μπορέσει να εξυπηρετήσει και τον υπόλοιπο Νομό. Πρέπει να αναφερθεί ότι δεν έχει υποδειχθεί στο Νομό μέχρι τώρα άλλη τοποθεσία στην οποία να είναι δυνατή η χωροθέτηση νέου Χ.Υ.Τ.Α. για την εξυπηρέτηση του νομού ή μέρους αυτού.

Με τη βοήθεια των παραπάνω δεδομένων προέκυψαν οι ποσότητες απορριμμάτων που θα εισέρχονται στον Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου για μια περίοδο 20ετίας και για μόνιμο πληθυσμό 70.995 κατοίκους.

	Μόνιμος Πληθυσμός	Πληθυσμός τουριστικής περιόδου	Πληθυσμός περιόδου αιχμής
Πληθυσμός	70.995	83.736	97.377
Συντελεστής Παραγωγής	0,7	0,8	0,8
Απορρίμματα (τόννοι /ημέρα)	49,07	66,99	77,90
Περίοδος παραγωγής (ημέρες/ έτος)	120	180	60
ΣΥΝΟΛΟ (τόννοι)	5.888	12.058	4.674
ΣΥΝΟΛΟ (τόννοι/ έτος)			22.620

Πίνακας 6: Ετήσια παραγωγή απορριμμάτων σε σχέση με τον πληθυσμό του Νομού Ρεθύμνου. [16]

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι υπολογισμοί του συνολικά απαιτούμενου όγκου για την εξυπηρέτηση του Νομού Ρεθύμνου για τα έτη 2000 – 2020.

Έτος	Σύνολο (tn/year)	Συμπίεση (tn/m ³)	Όγκος (m ³)	Όγκος Επικ. 12% του όγκου	Όγκος μετά από καθ. 85%	Όγκος X.Y.T.A. (m ³ /year)	Συνολικός Όγκος Απορριμμάτων = 1,12*όγκο X.Y.T.A.
2000	22620	0,7	32314	3878	27467	31345	35106
2001	23072	0,7	32961	3955	28017	31972	35809
2002	23534	0,7	33620	4034	28577	32611	36525
2003	24005	0,7	34293	4115	29149	33264	37256
2004	24485	0,7	34978	4197	29731	33929	38000
2005	24974	0,7	35678	4281	30326	34608	38761
2006	25474	0,7	36391	4367	30933	35300	39536
2007	25983	0,7	37119	4454	31551	36005	40326
2008	26503	0,7	37861	4643	32182	36726	41133
2009	27033	0,7	38619	4634	32826	37460	41955
2010	27574	0,7	39391	4727	33483	38210	42795
2011	28125	0,7	40179	4821	34152	38973	43650
2012	28688	0,7	40982	4918	34835	39753	44523
2013	29261	0,7	41802	5016	35532	40548	45414
2014	29847	0,7	42638	5117	36242	41359	46322
2015	30444	0,7	43491	5219	36968	42187	47249
2016	31052	0,7	44361	5323	37707	43030	48194
2017	31674	0,7	45248	5430	38461	43891	49157
2018	32307	0,7	46153	5538	39230	44768	50140
2019	32953	0,7	47076	5649	40014	45663	51143
2020	33612	0,7	48017	5762	40815	46577	52166
	583220		833172	99981	708196	808177	905158

Πίνακας 7: Υπολογισμός συνολικού απαιτούμενου όγκου για το νομό Ρεθύμνης κατά τα έτη 2000-2020. [16]

7.2.3 Σύνθεση των στερεών αποβλήτων

Από μελέτες που έχουν γίνει σε διάφορες πόλεις στον Ελλαδικό χώρο, διαπιστώνεται μια διακύμανση στην ποιοτική σύνθεση των στερεών αποβλήτων όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

ΥΛΙΚΑ (%)	Αθήνα 1990	Θεσ/κη 1987	Ρόδος 1989	Ηράκλειο 1990
Οργανικά	48,5	51,7	43,0	52,5
Χαρτί	22,0	17,7	17,0	17,2
Γυαλί	3,5	4,1	14,0	1,4
Πλαστικό	10,5	7,2	10,0	14,3
Μέταλλα	4,2	5,9	10,0	2,8

Πίνακας 8: Ποιοτική σύσταση στερεών αποβλήτων σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. [16]

Τα απορρίμματα για την υπό εξέταση περιοχή είναι κατά βάση οικιακά. Η ακριβής σύνθεσή τους δεν είναι γνωστή, καθότι δεν έχουν διεξαχθεί μετρήσεις για την ευρύτερη περιοχή του Νομού Ρεθύμνης σχετικά με τη σύνθεση των απορριμμάτων και τα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά. Από μετρήσεις όμως κατά το 1990-1991 στο Βόρειο Άξονα του Ν. Χανίων, η σύσταση των απορριμμάτων προέκυψε ότι είναι αυτή που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

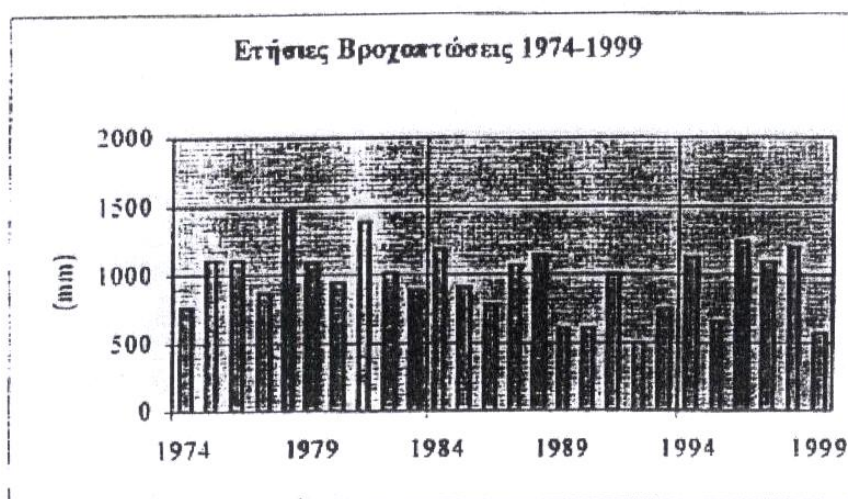
ΥΛΙΚΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ (%)
Υπολείμματα κουζίνας	55,0
Χαρτιά	19,0
Πλαστικά	9,0
Μέταλλα	4,0
Γυαλιά	4,0
Αδρανή Απόβλητα	2,0
Διάφορα (υφάσματα, Δέρμα, Λάστιχα, ξύλα, χόρτα)	4,0
Λοιπά	3,0

Πίνακας 9: Σύσταση απορριμμάτων για το βόρειο άξονα του Ν. Χανίων. [16]

7.3 Κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής

7.3.1 Βροχοπτώσεις

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζονται τα δεδομένα των βροχοπτώσεων που αφορούν την εξεταζόμενη περιοχή για την περίοδο 1974 – 1999. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από τον Μετεωρολογικού Σταθμού της Σχολής Ασωμάτων (ΚΡΗ ΑΣΩΜΑΤΟΙ), η οποία βρίσκεται σε ακτίνα από τον Χ.Υ.Τ.Α. περίπου 9Κm. Όπως φαίνεται, παρουσιάζεται μια μείωση στις ετήσιες τιμές των βροχοπτώσεων κατά την τελευταία δεκαετία σε σύγκριση με την δεκαετία του 1980. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει πιθανότητα να υπάρξουν πλημμυρικές παροχές στο μέλλον.



Διάγραμμα 5: Ετήσιες βροχοπτώσεις κατά την περίοδο 1974 – 1999 από το Μετεωρολογικό Σταθμό της Σχολής Ασωμάτων. [16]

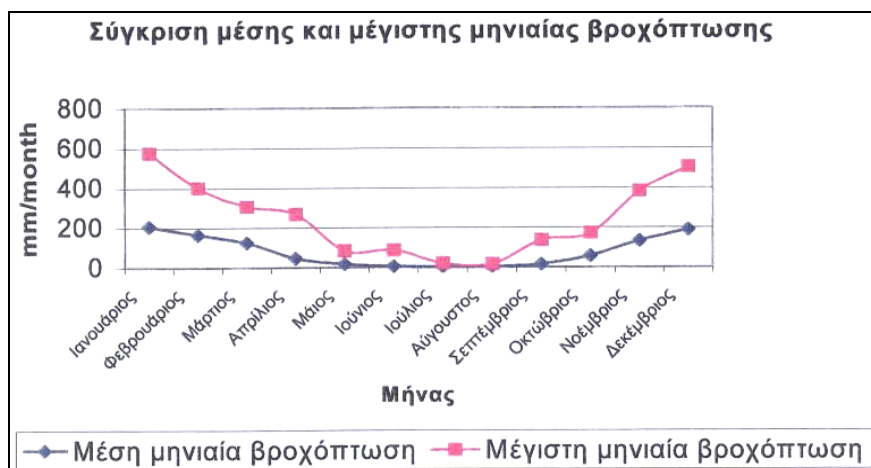
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των μέσων μηνιαίων βροχοπτώσεων και των μέγιστων μηνιαίων βροχοπτώσεων κατά την περίοδο 1974 – 1999.

Μήνας	Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση (mm)	Μέγιστη Μηνιαία βροχόπτωση (mm)	Μέγιστο 24ώρου (mm/d)
Ιανουάριος	205,2	576,9	124,0
Φεβρουάριος	164,7	400,1	173,3
Μάρτιος	124,1	306,4	110,0
Απρίλιος	46,8	268,2	132,0
Μάιος	17,8	84,0	84,0
Ιούνιος	5,8	88,0	68,0
Ιούλιος	1,9	19,5	19,35
Αύγουστος	2,2	17,2	14,5
Σεπτέμβριος	15,8	137,0	72,0
Οκτώβριος	58,3	170,9	152,5
Νοέμβριος	132,3	383,3	125,8
Δεκέμβριος	189,0	505,0	98,5

Πίνακας 10: Τιμές των μέσων και μέγιστων μηνιαίων βροχοπτώσεων 1974 – 1999. [16]

Αθροίζοντας τις μέσες τιμές των μηνιαίων βροχοπτώσεων μπορεί να υπολογιστεί η μέση ετήσια βροχόπτωση, η οποία είναι 963,9mm.

Τα δεδομένα αυτά, υπό τη μορφή διαγράμματος, έχουν ως εξής:



Διάγραμμα 6: Σύγκριση μέσης και μέγιστης μηνιαίας βροχόπτωσης. [16]

Το ετήσιο ύψος των μέσων μηνιαίων βροχοπτώσεων φτάνει στα 963,8mm/έτος κατά μέσο όρο και θεωρείται υψηλό για τα ελληνικά δεδομένα, ενώ το μέγιστο ετήσιο ύψος της βροχόπτωσης την τελευταία 25ετία (1974 – 1999) παρατηρήθηκε το 1978 και ήταν της τάξης των 1468,6mm.

Σημαντικό από την άποψη των έργων διαχείρισης των όμβριων υδάτων είναι η διακύμανση του μέσου μηνιαίου ύψους του νερού από 200mm τον Ιανουάριο στην ελάχιστη τιμή των 1,9mm τον Ιούλιο.

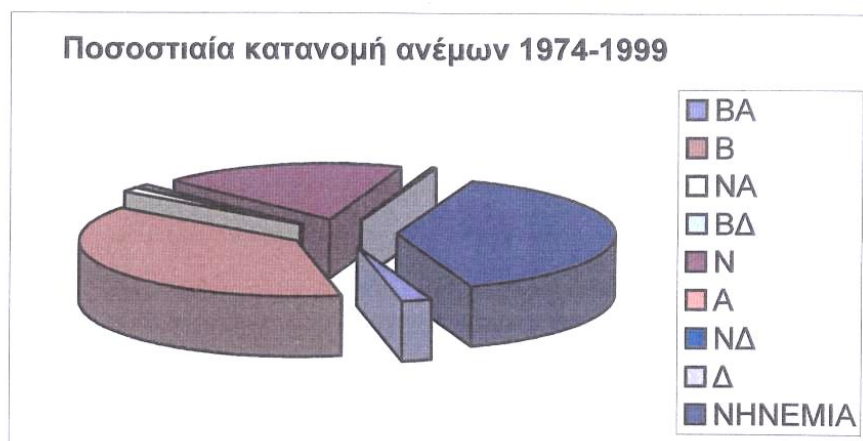
Σημαντικό στοιχείο για την αντιπλημμυρική προστασία του έργου, αλλά και την παραγωγή στραγγισμάτων του Χ.Υ.Τ.Α. είναι η μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση, η οποία ανέρχεται σε 173mm/day. Εξίσου σημαντική είναι και η μέγιστη ραγδαία βροχόπτωση, η οποία σύμφωνα με τα κλιματολογικά δεδομένα, παρατηρήθηκε το έτος 1978, το μήνα Δεκέμβριο και ήταν της τάξης των 33,5mm/hour.

Με βάση τα δεδομένα αυτά εμφανίζεται μια σημαντική εποχιακή σταθερότητα, η οποία συνεπάγεται ότι ο Χ.Υ.Τ.Α. μπορεί να λειτουργήσει καθ' όλη την διάρκεια της κάθε περιόδου, με διαφορετική κάθε φορά πρακτική διαχείρισης των στραγγισμάτων. Πράγματι, το καλοκαίρι ο Χ.Υ.Τ.Α. θα λειτουργήσει με ελάχιστη αναμενόμενη παραγωγή στραγγισμάτων, ενώ τους χειμερινούς μήνες η παραγωγή στραγγισμάτων αναμένεται αυξημένη .

7.3.2 Ανεμολογικά χαρακτηριστικά

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της διεύθυνσης των ανέμων, όπως αυτοί παρατηρήθηκαν την τελευταία 25ετία, βάσει των στοιχείων από τον Μετεωρολογικό Σταθμό Κρη Ασώματοι. Όπως είναι φανερό υπάρχουν δυο έντονα χαρακτηριστικά, τα οποία χαρακτηρίζουν την περιοχή. Η νηνεμία που επικρατεί είναι της τάξης του 38,8%, ενώ οι άνεμοι που πνέουν είναι κυρίως Βόρειοι σε ποσοστό 38,5%. Σημαντικό επίσης είναι ότι οι Νότιοι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή φτάνουν το 18%.

Η μέση ταχύτητα των ανέμων σε υψόμετρο – σύμφωνα με τις παρατηρήσεις της τελευταίας πενταετίας – έξι μέτρων πάνω από το έδαφος, κυμαίνεται στα 1,64m/sec.



Διάγραμμα 7: Ποσοστιαία κατανομή ανέμων. [16]

7.4 Γεωλογία – Υδρογεωλογία

7.4.1 Υδρογεωλογική συμπεριφορά του ευρύτερου πεδίου

Από γεωλογικής πλευράς η περιοχή βρίσκεται πάνω στη φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά. Η σειρά αυτή βρίσκεται επωθημένη πάνω στους ανθρακικούς σχηματισμούς της Ιονίου ζώνης, είναι έντονα πτυχωμένη και αποτελείται από ένα σύνολο μεταμορφωμένων κυρίως παραπετρωμάτων, με λίγες εμφανίσεις ορθοπετρωμάτων. Ο βαθμός μεταμόρφωσής τους ποικίλει από πολύ χαμηλό έως χαμηλό. [16]

Τα παραπετρώματα αντιπροσωπεύονται από σχιστόλιθους (μαρμαρυγιακούς, μαρμαρυγιακούς – χλωριτικούς, μοσχοβιτικούς με χλωριτοειδή, χαλαζιτικούς, ανθρακομιγείς – μαρμαρυγιακούς, γραφιτικούς – μαρμαρυγιακούς), φυλλίτες (κυρίως ανθρακομιγείς με χλωριτοειδή) και χαλαζίτες. Μέσα σε αυτά απαντούν ενστρώσεις ασβεστόλιθων, μαύρου έως υπόλευκου χρώματος, μεσοστρωματόδεις, κρυσταλλικοί και κατακερματισμένοι καθώς και διάσπαρτα τεμάχια μεταψαμμιτών και μεταπηλιτών. [16]

Τα ορθοπετρώματα κυρίως μεταβασάλτες (πρασινίτες) περιέχονται στα παραπετρώματα σαν φλέβες και κοίτες. Έχουν ιστό μικρο-μεσο-λεπιδοβλαστικό και υφή συμπαγή, παράλληλη μικροπτυχωμένη. Το πάχος τη σειράς είναι περίπου 300m [16].

Οι φυλλίτες – χαλαζίτες θεωρούνται αδιαπέρατα από το νερό πετρώματα. Οι περιβάλλοντες ανθρακικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από μεγάλο πάχος και έντονη καρστικοποίηση. Είναι υδροπερατοί και ενδέχεται να έχουν σημαντική υδροφορία. Συγκεκριμένα, είχε υποδειχθεί η εκτέλεση γεώτρησης για τις ανάγκες της Μονής Αρκαδίου με αναμενόμενο βάθος περίπου 200m από υψόμετρο περίπου 500m (ΙΓΜΕ).

7.4.2 Γεωλογική δομή και υδρογεωλογική συμπεριφορά της περιοχής του πεδίου ταφής των απορριμμάτων

Η ευρύτερη περιοχή δομείται από [16]:

- Αλλουβιακές προσχώσεις
- Νεογενείς σχηματισμούς (μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, μάργες, άργιλους και κροκαλοπαγή)
- Ασβεστόλιθους και δολομίτες του Ιουρασικού (ζώνη Τρίπολης)
- Φυλλίτες – χαλαζίτες περμοτριάδικής ηλικίας (ενότητας Άρνας σύμφωνα με Παπανικολάου 1986)
- Δολομίτες και ασβεστόλιθοι τριαδικού (αυτόχθονο Κρήτης) αντίστοιχοι των ασβεστόλιθων Παντοκράτορα της Ιόνιας ζώνης

Η φυλλιτική χολαλπική σειρά είναι επωθημένη στους υποκείμενους σχηματισμούς (ενότητα Τρίπολη ή ανώτεροι ορίζοντες της ενότητας Plattenkolk).

Η επαφή μεταξύ φυλλιτών, χαλαζιτών και σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης είναι επίσης τεκτονική. Σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές οι σχηματισμοί της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς είναι ανεξάρτητο κάλυμμα, ενώ κατά άλλους αποτελούν το υπόβαθρο της ανθρακικής σειράς της ζώνης Τρίπολης (Κατσικάτσος 1992).

7.4.3 Τεκτονικά

Στην ευρύτερη περιοχή διακρίνονται δυο ομάδες ρηγμάτων που παρουσιάζονται παρακάτω:

- Μια παλαιότερη με κύρια διεύθυνση ABA – ΔΝΔ
- Μια μεταγενέστερη διεύθυνσης B – N

Τα ανθρακικά πετρώματα του αυτόχθονου υπόβαθρου εμφανίζονται έντονα τεκτονισμένα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από γεωφυσικές έρευνες (ΙΓΜΕ). Η περιοχή ορίζεται προς ΝΔ από την τεκτονική Αμαρίου και Ανατολικά από το αντικλινόριο της Ίδης. Βόρεια διακρίνεται το τεκτονικό βύθισμα Ρεθύμνου Γαζάρου. Ο χώρος εγκατάστασης του Χ.Υ.Τ.Α. δομείται από σχηματισμούς φυλλιτών – χαλαζιτών, οι οποίοι είναι επωθημένοι σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς.

Στο Παράρτημα Ι παρατίθεται ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής, στον οποίο έχει σημειωθεί η ακριβής θέση του Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου.

7.5 Διαμόρφωση πυθμένα του υφιστάμενου χώρου – Στεγανοποίηση πυθμένα

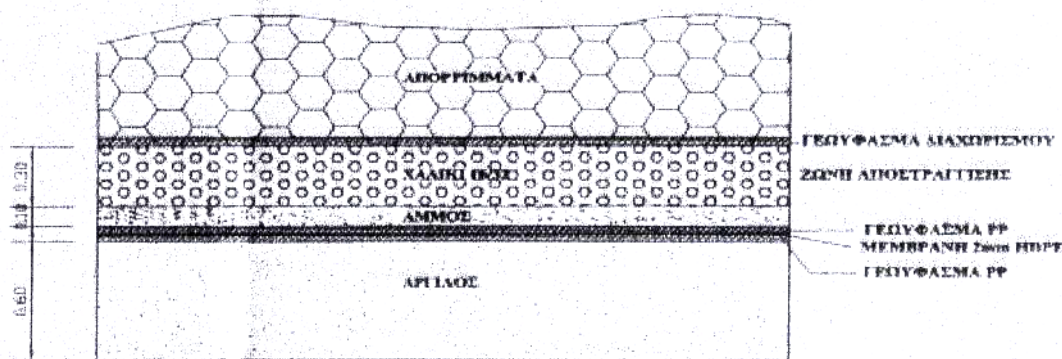
Η διαμόρφωση του πυθμένα σύμφωνα με την τεχνική μελέτη του έργου αποτελείται από τις παρακάτω στρώσεις [17]:

- Στρώση υπόβασης
- Στρώση μόνωσης
- Γεώφασμα
- Στρώση προστασίας
- Στρώση αποστράγγισης

Στο Σχήμα 20 φαίνεται ο τεχνητός γεωλογικός φραγμός που χρησιμοποιήθηκε για την στεγανοποίηση του πυθμένα.

Στρώση υπόβασης

Το υπάρχον εδαφικό υλικό στα τελευταία 20cm, αφού συμπυκνώθηκε κατάλληλα με διαδοχικό συμπυκνωτήρα, αποτελεί την στρώση υπόβασης.



Σχήμα 20: Η στεγανοποίηση του πυθμένα. [16].

Στρώση μόνωσης

Επάνω στη στρώση υπόβασης εδράζεται η στεγανωτική μεμβράνη. Η μεμβράνη υψηλής περιεκτικότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) είναι πάχους 1,5mm στον πυθμένα και 1,0mm στα πρηνή. Η χημική αντοχή της μεμβράνης είναι σύμφωνα με το DIN 8075.

Γεώφασμα

Το γεώφασμα είναι τοποθετημένο πάνω από τη μεμβράνη και κάτω από τους αγωγούς συλλογής των στραγγισμάτων και έχει βάρος 200g/cm².

Στρώση προστασίας

Για την προστασία της γεωμεμβράνης τοποθετήθηκε μια στρώση άμμου 20cm πάνω από γεώφασμα, η οποία τοποθετήθηκε και στον πυθμένα αλλά και εντός της μισγάγγειας της λεκάνης απόθεσης των απορριμμάτων.

Στρώση αποστράγγισης

Η στρώση αποστράγγισης αποτελείται από χαλίκια (λιθοσύντριμμα), κοκκομετρικής διαβάθμισης 16:32 σε ύψος 30cm. Το στρώμα αυτό τοποθετείται πάνω από την στρώση προστασίας σε όλη την έκταση του πυθμένα. Πάνω από την στρώση αποστράγγισης και για ύψος τουλάχιστον 20cm τοποθετήθηκαν απορρίμματα ελαφρά

προτεμαχισμένα τα οποία συμπυκνώθηκαν κατάλληλα προκειμένου να διαμορφωθεί η τελική επιφάνεια για την εναπόθεση των απορριμμάτων.

7.6 Περιγραφή αναγκαίων έργων – Προβλήματα στη λειτουργία του Χ.Υ.Τ.Α.

Ο υφιστάμενος χώρος έχει πάρει έγκριση περιβαλλοντικών όρων το 1995. Ο χώρος τηρεί τους παρακάτω περιβαλλοντικούς όρους [17]:

- Εφαρμόζεται η μέθοδος της υγειονομικής ταφής και γίνεται ημερήσια επικάλυψη των κυττάρων με στρώση πάχους 15 – 20cm
- Έχει γίνει η συλλογή των ανεξέλεγκτων απορριμμάτων και έχουν τοποθετηθεί στο υφιστάμενο χώρο
- Έχουν ληφθεί μέτρα πυροπροστασίας από τον κύριο του έργου κατασκευάζοντας αντιπυρική ζώνη
- Έχουν ληφθεί τα κατάλληλα μέτρα για την παρεμπόδιση ανάπτυξης τρωκτικών και άλλων ζώων σύμφωνα με τον περιβαλλοντικό όρο
- Ο χώρος έχει περιφραχτεί και θα γίνει ανύψωση της περίφραξης στην κατάντη τοποθεσία του χώρου για την εξάλειψη του φαινομένου διαφυγής μικρών ποσοτήτων απορριμμάτων
- Υπάρχει δεξαμενή συλλογής στραγγισμάτων και περιμετρική τάφος συλλογής και απομάκρυνσης των ομβρίων από την λεκάνη απόθεσης των απορριμμάτων και εκτός του υφιστάμενου χώρου. Τα στραγγίσματα που συλλέγονται επανακυκλοφορούν στο χώρο.
- Η μεταφορά των απορριμμάτων στο χώρο γίνεται από κλειστά απορριμματοφόρα
- Η στεγανοποίηση του χώρου που περιγράφεται στις παρακάτω παραγράφους καλύπτει τους περιβαλλοντικούς όρους που έχουν τεθεί, έτσι ώστε να μην υπάρχουν πιθανότητες διαφυγής στραγγισμάτων διαμέσου του τεχνικού γεωλογικού φραγμού κατάντη του χώρου.

Στην περίπτωση ανάγκης αναθεώρησης των περιβαλλοντικών όρων του υφιστάμενου χώρου δεν απαιτούνται επιπρόσθετα έργα εκτός εκείνων για την αποκατάσταση των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν τα τελευταία χρόνια. Τα προβλήματα αυτά είναι τα εξής [17]:

- Ο χώρος δεν δέχεται μόνο οικιακά απορρίμματα του Συνδέσμου της επαρχίας Αμαρίου του Νομού Ρεθύμνου αλλά και των άλλων δήμων, με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής του χώρου.
- Υπάρχουν διαφυγές μέρους των στραγγισμάτων κατάντη του χώρου με αποτέλεσμα να υπάρχουν περιβαλλοντικά προβλήματα στην περιοχή. Σαν λύση του προβλήματος προτείνεται ανακατασκευή του δικτύου συλλογής στραγγισμάτων, έτσι ώστε να εξαλειφθεί το φαινόμενο διαφυγής στραγγισμάτων στον περιβάλλοντα χώρο. Αυτό θα γίνει με την κατασκευή περιμετρικού αναχώματος κατάντη του υφιστάμενου χώρου – δημιουργία νέου φρεατίου επανακυκλοφορίας στραγγισμάτων
- Η απόθεση μεγάλου όγκου απορριμμάτων απαιτεί την κατασκευή δυο φρεατίων απαγωγής βιοαερίου για τη σωστή διαχείριση του παραγόμενου βιοαερίου στο χώρο
- Σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς όρους απαιτείται ένα σύστημα παρακολούθησης του χώρου που αποτελείται από:
 - Σύστημα παρακολούθησης διαφυγής στραγγισμάτων
 - Σύστημα παρακολούθησης ποιότητας υπογείων και επιφανειακών υδάτων
 - Σύστημα παρακολούθησης βιοαερίου
 - Σύστημα παρακολούθησης κατιζήσεων

7.7 Διαχείριση στραγγισμάτων

Στο Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου έχει διαπιστωθεί διαφυγή στραγγισμάτων κατάντη του χώρου, με αποτέλεσμα να έχουν διαπιστωθεί προβλήματα ρύπανσης. Τα προβλήματα αυτά πρέπει να λυθούν με τέτοιο τρόπο ώστε, όχι μόνο να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ρύπανσης, αλλά παράλληλα να υπάρξει σύνδεση με την προτεινόμενη επέκταση του χώρου. [16]

Κύριος στόχος του σχεδίου διαχείρισης των στραγγισμάτων είναι η καταστολή της διαφυγής τους από τον ενεργό χώρο προς την μισγάγγεια κατάντη του χώρου. Ο στόχος αυτός εξυπηρετείται από τα εξής έργα [16]:

- Ανάχωμα κατάντη του χώρου του Χ.Υ.Τ.Α., το οποίο θα παίζει ρόλο ενός μικρού φράγματος. Εκεί τα διαφεύγοντα στραγγίσματα από τον υφιστάμενο χώρο θα συλλέγονται και μέσω ενός αντλιοστασίου θα μεταφέρονται στην

υφιστάμενη δεξαμενή συλλογής στραγγισμάτων. Τα στραγγίσματα θα επανακυκλοφορούν στον υφιστάμενο χώρο.

- Η ένωση του υφιστάμενου φρεατίου ελέγχου στραγγισμάτων με το νέο αντλιοστάσιο επανακυκλοφορίας στραγγισμάτων θα γίνει, έτσι ώστε τα στραγγίσματα που υπερχειλίζουν από το υφιστάμενο φρεάτιο ελέγχου να καταλήγουν στο φρεάτιο επανακυκλοφορίας και από εκεί στη δεξαμενή στραγγισμάτων, από όπου θα επανακυκλοφορούν στον Χ.Υ.Τ.Α..

7.7.1 Δίκτυο συλλογής στραγγισμάτων

Η συλλογή των στραγγισμάτων του υφιστάμενου χώρου γίνεται από δίκτυο απαγωγής στραγγισμάτων που αποτελείται από 10 αγωγούς (Φ110) σε σχήμα ψαροκόκκαλου, ενώ και ο κεντρικός αγωγός έχει την ίδια διάμετρο. Τα στραγγίσματα δια μέσου του κεντρικού αγωγού καταλήγουν στο φρεάτιο ελέγχου των στραγγισμάτων. Εσωτερικά του αναχώματος υπάρχει τοποθετημένος αγωγός διαμέτρου Φ315, ο οποίος καταλήγει και αυτός στο φρεάτιο ελέγχου των στραγγισμάτων. Από εκεί τα στραγγίσματα μεταφέρονται στην δεξαμενή στραγγισμάτων συνολικού όγκου 120m³ και από εκεί γίνεται η επανακυκλοφορία στο χώρο απόθεσης των στραγγισμάτων. Το υφιστάμενο δίκτυο έχει διαστασιολογηθεί για λεκάνη έκτασης 16 στρεμμάτων. [16]

Για την αντιμετώπιση των διαφυγόντων στραγγισμάτων προτείνεται να κατασκευαστεί ανάχωμα κατάντη του χώρου. Εκεί θα κατασκευαστεί ένα νέο φρεάτιο / αντλιοστάσιο επανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων. Ουσιαστικά η λειτουργία του υφιστάμενου φρεατίου επανακυκλοφορίας θα αντικατασταθεί από το φρεάτιο εντός του αναχώματος και κατάντη του υφιστάμενου χώρου. Με την επέκταση του χώρου το υφιστάμενο δίκτυο θα ενωθεί με το καινούριο μέσω του νέου φρεατίου εντός του αναχώματος. [16]

7.7.2 Δίκτυο επεξεργασίας

Για την επεξεργασία των στραγγισμάτων χρησιμοποιείται η μέθοδος της επανακυκλοφορίας. Κατά την επέκταση (και μόνο) του υφιστάμενου χώρου είναι απαραίτητη η κατασκευή μονάδας βιολογικού καθαρισμού. [16]

7.8 Υδρολογικό ισοζύγιο

Το ισοζύγιο μάζας υπεράνω της επιφάνειας έχει ως εξής [16]:

$$P - R - E - I = \Delta S$$

όπου: P = ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις

R = η επιφανειακή από το χώρο

I = η διήθηση από την επιφάνεια του εδάφους

E = εξατμισοδιαπνοή

ΔS = αλλαγή του ρυθμού αποθήκευσης των επιφανειακών νερών

Στην υδρολογική λεκάνη της περιοχής του Χ.Υ.Τ.Α. δεν υπάρχουν επιφανειακά νερά (λίμνες, ποτάμια), γεγονός που σημαίνει ότι ο όρος της επιφανειακής συσσώρευσης ΔS είναι μηδενικός.

7.8.1 Βροχοπτώσεις

Οι τιμές της βροχόπτωσης έχουν ήδη δοθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η μέση μηνιαία ετήσια βροχόπτωση είναι 963,9mm. [16]

7.8.2 Επιφανειακή απορροή για το χώρο του Χ.Υ.Τ.Α.

Η επιφανειακή απορροή μικρών υδρολογικών λεκανών (μικρότερες των 100 εκταρίων) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση [16]:

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (\text{Fetter, 1994})$$

όπου: Q = η απορροή (m^3/s)

I = η μέση ένταση της βροχόπτωσης (m/s)

C = ο συντελεστής απορροής ο οποίος για την περίπτωση περιοχών με μεγάλες κλίσεις και χωρίς ιδιαίτερη βλάστηση λαμβάνεται ίσος με 0,20

Επομένως, η επιφανειακή απορροή λαμβάνεται ίση με 20% της βροχόπτωσης.

7.8.3 Εξατμισοδιαπνοή

Η πραγματική ετήσια εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται με βάση τον τύπο του Turc, ο οποίος συσχετίζει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή με τη μέση θερμοκρασία και το μέσο ετήσιο ύψος βροχής [16].

$$E = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (\text{C.W. Fetter, 1994})$$

όπου: E = πραγματική ετήσια εξατμισοδιαπνοή σε mm

P = μέσο ετήσιο ύψος βροχής σε mm

$L = 300 + 25T + 0,05T^3$

T = μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$)

Για μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα $15,7^{\circ}\text{C}$ η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι $E = 667,76817\text{mm}$.

7.8.4 Διήθηση

Η τιμή της διήθησης προκύπτει από το ισοζύγιο μάζας [16]:

$$I = P - E - R = 963.9 - 192.78 - 667.77 = 103.35\text{mm} / \text{έτος} = 2,83 \cdot 10^{-4} \text{m} / \text{d}$$

Για την έκταση του Χ.Υ.Τ.Α. που είναι περίπου 10 στρέμματα η τιμή της διήθησης είναι $103,35 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot 10.000 \text{m}^2 = 1033,5 \text{m}^3 / \text{έτος}$.

8. Εφαρμογή μοντέλου ακόρεστης ζώνης PRZM-3

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μοντέλο PRZM-3 αποτελείται από δυο επιμέρους μοντέλα: το PRZM και το VADOFT. Το πρώτο αφορά στη μοντελοποίηση της ροής και της μεταφοράς ρύπων στην περιοχή της ακόρεστης ζώνης που καταλαμβάνεται από ρίζες φυτών και επομένως δεν χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη. Αντίθετα, χρησιμοποιήθηκε μόνο το υπο-μοντέλο VADOFT, το οποίο είναι και το κατάλληλο για την περίπτωση του χώρου υγειονομικής ταφής, όπου έχουμε ακόρεστη ζώνη και απουσία βλάστησης. Ακόμη, λόγω έλλειψης στοιχείων για τη διακύμανση των τιμών των μεταβλητών που εισήχθησαν στο μοντέλο δεν αξιοποιήθηκε η δυνατότητα που παρέχει το μοντέλο PRZM-3 να πραγματοποιηθεί προσομοίωση Monte Carlo.

8.1. Δεδομένα εισαγωγής του VADOFT – Input files

Για να εφαρμοστεί το μοντέλο VADOFT πρέπει καταρχήν να κατασκευαστεί το λεγόμενο αρχείο ελέγχου, το οποίο καθορίζει ποια υπο μοντέλα θα χρησιμοποιηθούν, για πιο χρονικό διάστημα θα γίνει η προσομοίωση, ποια είναι τα input και output αρχεία που θα δημιουργηθούν καθώς και το αν θα γίνει προσομοίωση Monte Carlo. Ακόμη, απαιτείται ένα input αρχείο το οποίο θα ορίζει κάποια υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής αλλά και κάποια γενικότερα στοιχεία που αφορούν στην διακριτοποίηση της περιοχής και την επαναληπτική μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί.

Τα κύρια χαρακτηριστικά και στοιχεία που ορίζονται στο input αρχείο του VADOFT είναι τα ακόλουθα:

- Ο αριθμός των κόμβων που θα υπάρχουν στην ακόρεστη ζώνη, με μέγιστο αριθμό τους 100 κόμβους
- Ο αριθμός των διαφορετικών γεωλογικών στρωμάτων και των χημικών ουσιών που παρατηρούνται στην ακόρεστη ζώνη
- Το είδος των αρχικών και οριακών συνθηκών, η τιμή τους και το αν είναι σταθερές ή όχι με το χρόνο
- Η επαναληπτική μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί και το κριτήριο σύγκλισής της

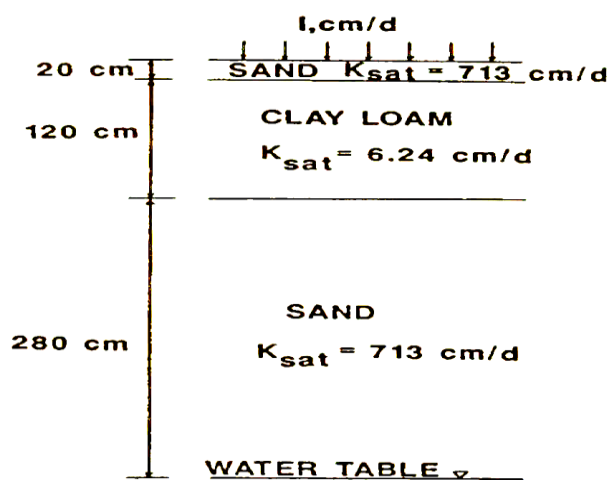
- Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υπάρχοντος εδάφους (πάχος, υδραυλική αγωγιμότητα, συντελεστής διαμήκους διασποράς, πορώδες, υγρασία, ειδική αποθηκευτικότητα, κτλ.)
- Η συσχέτιση διαφόρων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα του βαθμού κορεσμού και του ύψους πίεσης ή της σχετικής διαπερατότητας και του βαθμού κορεσμού

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II παρουσιάζεται ο οδηγός δημιουργίας των αρχείων ελέγχου και εισαγωγής δεδομένων, καθώς και κάποια ενδεικτικά αρχεία που δημιουργήθηκαν τόσο για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου, όσο και για τα διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν.

8.2 Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου

Πριν γίνει η εφαρμογή του μοντέλου στην υπό μελέτη περιοχή, κρίθηκε αναγκαίος ο έλεγχος της αξιοπιστίας και της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων που παρέχει. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο VADOFT εφαρμόστηκε για μια συγκεκριμένη περίπτωση, με δεδομένα χαρακτηριστικά, για την οποία υπήρχαν μετρήσεις πεδίου. Δημιουργήθηκε το κατάλληλο αρχείο δεδομένων, το οποίο εισήχθη στο μοντέλο και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το ύψος πίεσης, τη συγκέντρωση του ρυπαντή, το βαθμό κορεσμού και την ταχύτητα Darcy συγκρίθηκαν με τις υπάρχουσες τιμές του πεδίου.

Συγκεκριμένα, το πρόβλημα που εξετάστηκε απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 21: Γραφική απεικόνιση της δομής του προβλήματος που εξετάστηκε για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του VADOFT. [8]

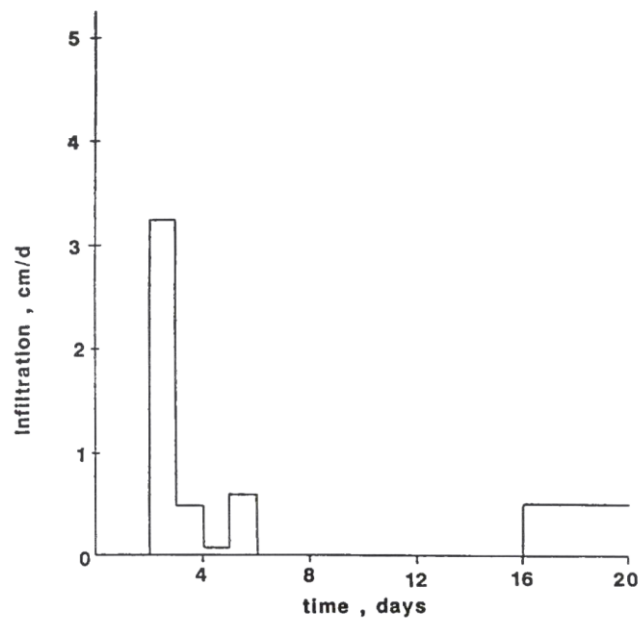
Πρόκειται για ένα πρόβλημα που ορίζει ότι υπάρχουν μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες, που αντιστοιχούν σε μη σταθερό ρυθμό διήθησης νερού στην επιφάνεια του εδάφους και μεταφορά ρύπων σε διαφορετικά γεωλογικά στρώματα, με υδραυλικές αγωγιμότητες που διαφέρουν κατά δυο τάξεις μεγέθους. Το πρόβλημα αυτό επιλέχθηκε για να δείξει την ικανότητα του VADOFT να χειριστεί μια μη γραμμική «κατάσταση» που περιλαμβάνει εδαφικά υλικά διαφορετικών υδραυλικών ιδιοτήτων. Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων και των σημαντικότερων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ιδιότητα	Υλικό 1 (sand)	Υλικό 1 (clay loam)
Υδραυλική αγωγιμότητα (cm/d)	713	6.24
Πορώδες	0.43	0.41
Residual Water Saturation	0.105	0.232
Air entry (cm)	0.0	0.0
Παράμετρος α (cm ⁻¹)	0.145	0.019
Παράμετρος β	2.68	1.31
Παράμετρος γ	0.63	0.24
Διαμήκης διασπορά a_L	1.0	1.0
Συντελεστής επιβράδυνσης R (cm)	1.1	1.5
Συντελεστής αποσύνθεσης (d ⁻¹)	0.00274	0.00274

Πίνακας 11: Τιμές των φυσικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του προβλήματος που εξετάστηκε για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του VADOFT. [8]

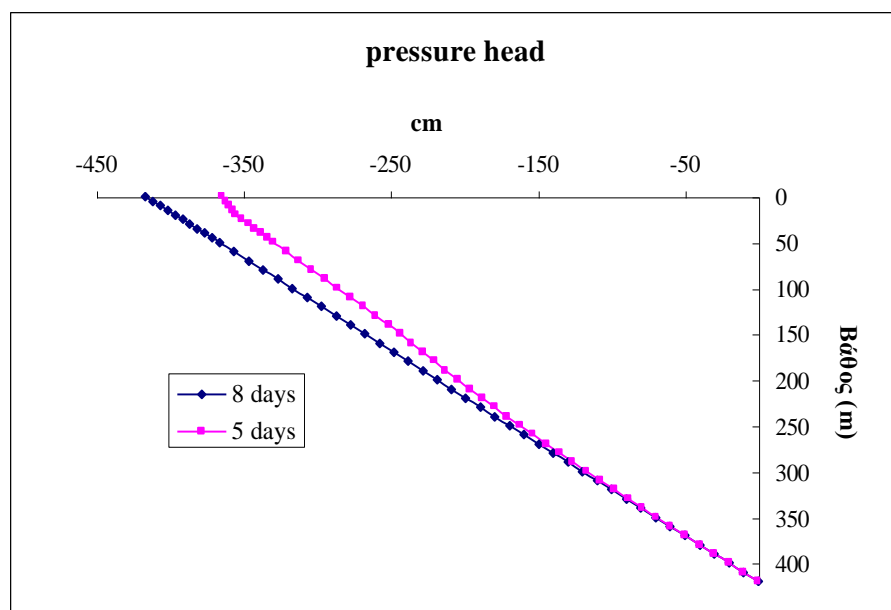
Όσον αφορά στις αρχικές συνθήκες έγινε η παραδοχή ότι υπάρχει υδροστατική κατανομή των πιέσεων στο έδαφος, με τιμή του ύψους πίεσης 0 και -420cm στην επιφάνεια του υδροφορέα και στην επιφάνεια του εδάφους, αντίστοιχα. Ακόμη, θεωρήθηκε ότι στην επιφάνεια του εδάφους υπάρχει αρχικά συγκέντρωση αναφοράς 1 και συγκέντρωση 0 στον υπόλοιπο όγκο του ακόρεστου εδάφους.

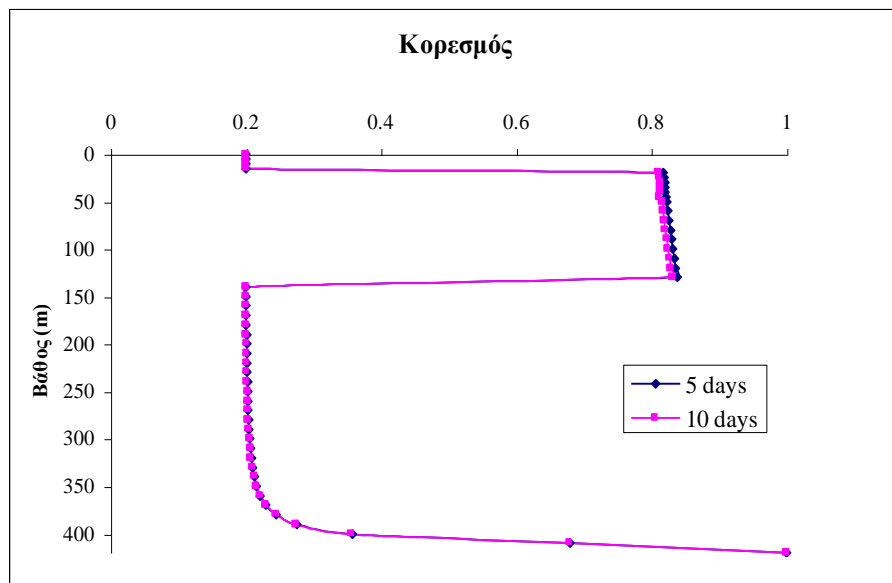
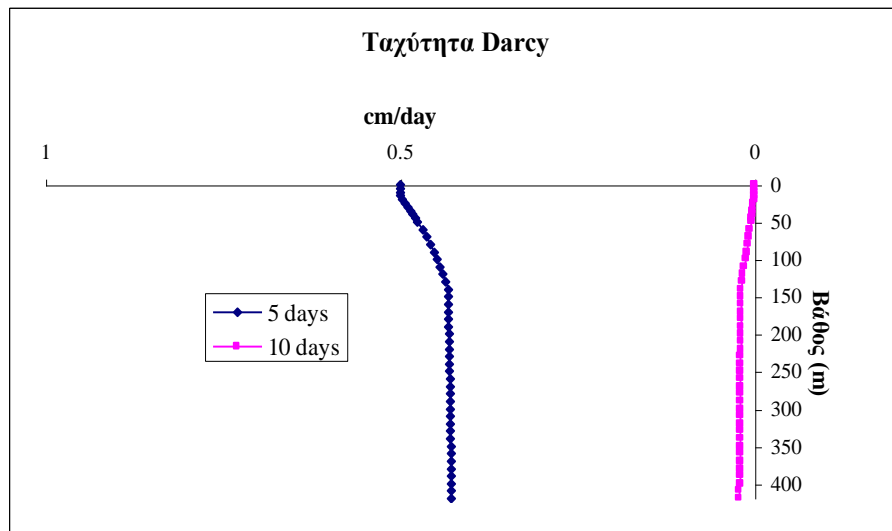
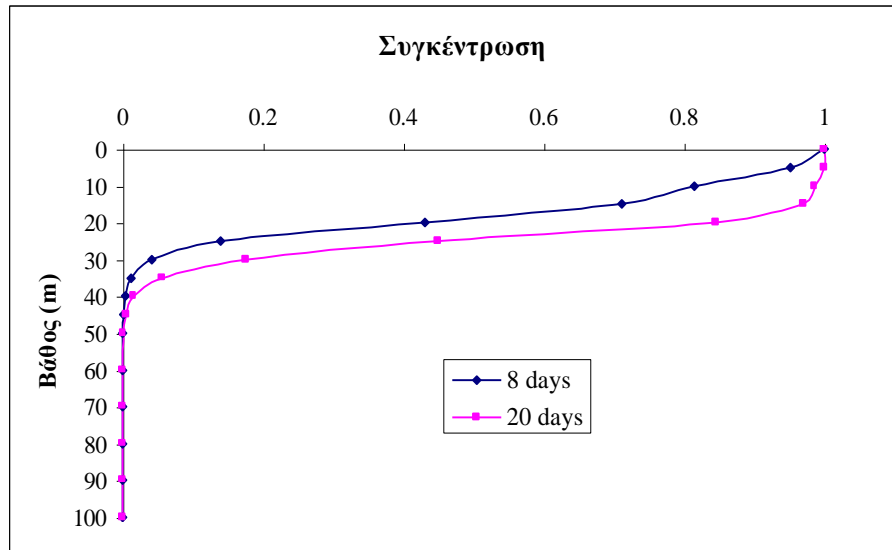
Για την προσομοίωση της ροής στην ακόρεστη ζώνη χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από το παρακάτω διάγραμμα της διήθησης συναρτήσεως του χρόνου:



Διάγραμμα 8: Διήθηση ύδατος στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει με το χρόνο. [8]

Η προσομοίωση έγινε για 20 ημέρες και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα συμφωνούσαν απόλυτα με τις τιμές του πεδίου, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά την πραγματικότητα.





8.3 Εφαρμογή στον χώρο υγειονομικής ταφής Αμαρίου

Μετά τη δοκιμή του μοντέλου και τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που προέκυψαν, έγινε η εφαρμογή του και στην υπό μελέτη περιοχή. Το μοντέλο «έτρεξε» για χρονικό διάστημα 30 ετών. Λόγω έλλειψης των τιμών κάποιων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα της εισροής στραγγισμάτων στο έδαφος και το πάχος της ακόρεστης ζώνης, δημιουργήθηκαν και εξετάστηκαν 20 διαφορετικά σενάρια.

8.3.1 Παραδοχές και εξεταζόμενα σενάρια

Η εφαρμογή του μοντέλου στην υπό μελέτη περιοχή πραγματοποιήθηκε ορίζοντας ότι υπάρχει ένας συγκεκριμένος τύπος εδάφους σε όλο το μήκος της ακόρεστης ζώνης και ένας συντηρητικός ρυπαντής που δεν μετασχηματίζεται και δεν δημιουργεί «θυγατρικές» ουσίες. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για μη μόνιμες συνθήκες, ενώ αντίθετα θεωρήθηκε ότι επικρατούν μόνιμες οριακές συνθήκες. Οι αρχικές συνθήκες όριζαν υδροστατική κατανομή των πιέσεων στην ακόρεστη ζώνη και συγκέντρωση αναφοράς 1 στην επιφάνεια του εδάφους.

Η ακόρεστη ζώνη χωρίστηκε σε 95 τμήματα, δηλαδή δημιουργήθηκαν 96 κόμβοι. Η επαναληπτική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Newton Raphson, ενώ οι γενικότερες παραδοχές που έγιναν για την εφαρμογή του μοντέλου σε κάθε σενάριο ήταν πάντα οι ίδιες και φαίνονται στα αντιπροσωπευτικά input αρχεία που παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που υπήρχαν για την υδρογεωλογία της περιοχής, τα οποία δεν ήταν σαφώς ορισμένα, δημιουργήθηκαν τα σενάρια που παρουσιάζονται στον Πίνακα 12, στα οποία τα μεγέθη τα οποία μεταβάλλονται κυρίως είναι η εισροή ρυπαντή, ο συντελεστής διαμήκους διασποράς, η υδραυλική αγωγιμότητα και το πάχος της ακόρεστης ζώνης.

Ιδιότητες/Σενάριο	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Βάθος (m)	50	50	50	50	50	50	50	50	100	100	50	50	50	100	50	100	100	100	50	100
K _s (cm/day)	0.0864	0.0864	0.0864	0.0864	0.0864	0.0864	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752	0.4752
α _L (cm)	500	300	500	500	500	300	300	500	1000	442	300	500	500	1000	300	442	1000	442	500	1000
Effective porosity	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
R	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Molec. Dif. Coef.	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Air entry	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Specific Storage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
β	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
γ	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RWS	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
DECAY	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Upstream weighting factor	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Default Darcy velocity	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Default water saturation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transformation mass factor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Influx (cm ³ /day)	0.01	0.03	0.03	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.44	0.44	0.44	0.44	0.42	0.42	0.44	0.42

Πίνακας 12: Τα 20 εξεταζόμενα σενάρια και τα μεγέθη τα οποία μεταβάλλονται σε κάθε περίπτωση

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αρχικά το μοντέλο εφαρμόστηκε με δεδομένο ότι η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους είναι ίση με 0,0864cm/day, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο τύπο εδάφους που παρουσιάζεται στην περιοχή του χώρου υγειονομικής ταφής. Η προσομοίωση έγινε για δυο διαφορετικές τιμές του συντελεστή διαμήκους διασποράς, οι οποίες προέκυψαν από την εφαρμογή των εξής τύπων:

$$a_L = 0.83 \log L^{2.14} \quad [4]$$

&

$$a_L = 0.1 \cdot L \quad [8]$$

όπου L είναι το πάχος της ακόρεστης ζώνης.

Το πάχος της ακόρεστης ζώνης δεν έχει προσδιοριστεί με ακρίβεια στην υπό μελέτη περιοχή. Υπάρχει μια γεώτρηση 50m στα κατάντη του Χ.Υ.Τ.Α., στην οποία δεν έχει βρεθεί νερό, ενώ από τη μορφολογία της περιοχής και διάφορες υπάρχουσες μελέτες προκύπτει ότι ο υδροφόρος πρέπει να βρίσκεται περίπου σε βάθος 200m. Στην παρούσα εργασία έγιναν δυο υποθέσεις για το πάχος της ακόρεστης ζώνης, οι οποίες αντιπροσώπευαν την χειρότερη δυνατή περίπτωση (πολύ μικρό πάχος ακόρεστης ζώνης, 50m) και μια μέση περίπτωση (πάχος ακόρεστης ζώνης ίσο με 100m). Έτσι προέκυψαν δυο διαφορετικές τιμές του συντελεστή διαμήκους διασποράς από κάθε σχέση, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Τύπος	L=50m	L=100m
$a_L = 0.83 \log L^{2.14}$	3m	4.42m
$a_L = 0.1 \cdot L$	5m	10m

Πίνακας 13: Πίνακας τιμών του συντελεστή διαμήκους διασποράς όπως αυτές προέκυψαν από την εφαρμογή δυο διαφορετικών τύπων και για δυο διαφορετικά πάχη ακόρεστης ζώνης.

Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε για διαφορετικές τιμές εισροής στραγγισμάτων στο έδαφος. Από μια συγκεκριμένη όμως τιμή και πάνω το μοντέλο δεν έτρεχε λόγω σφάλματος. Το σφάλμα που προέκυπτε οφειλόταν στο ότι η ποσότητα που εισέρρεε στο έδαφος ήταν τόσο μεγάλη, ώστε το έδαφος, λόγω της μικρής του υδραυλικής

αγωγιμότητας, δεν μπορούσε να την απορροφήσει, με αποτέλεσμα να έχουμε συσσώρευση στην επιφάνεια του εδάφους και τη δημιουργία μεγάλων θετικών τιμών ύψους πίεσης, τις οποίες το μοντέλο δεν δικαιολογούσε.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό και να εξεταστούν περισσότερα σενάρια, η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας πενταπλασιάστηκε. Με τον τρόπο αυτό εξετάστηκαν επιπλέον περιπτώσεις, οι οποίες εκπροσωπούν ίσως πιο δυσμενείς συνθήκες όσον αφορά την μεταφορά του ρυπαντή. Για ακόμη μια φορά δοκιμάστηκαν διαφορετικές τιμές εισροής ρυπαντή στο έδαφος και η προσομοίωση έγινε μέχρι και για τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή που μπορούσε να δεχτεί και να εκτελεστεί το μοντέλο.

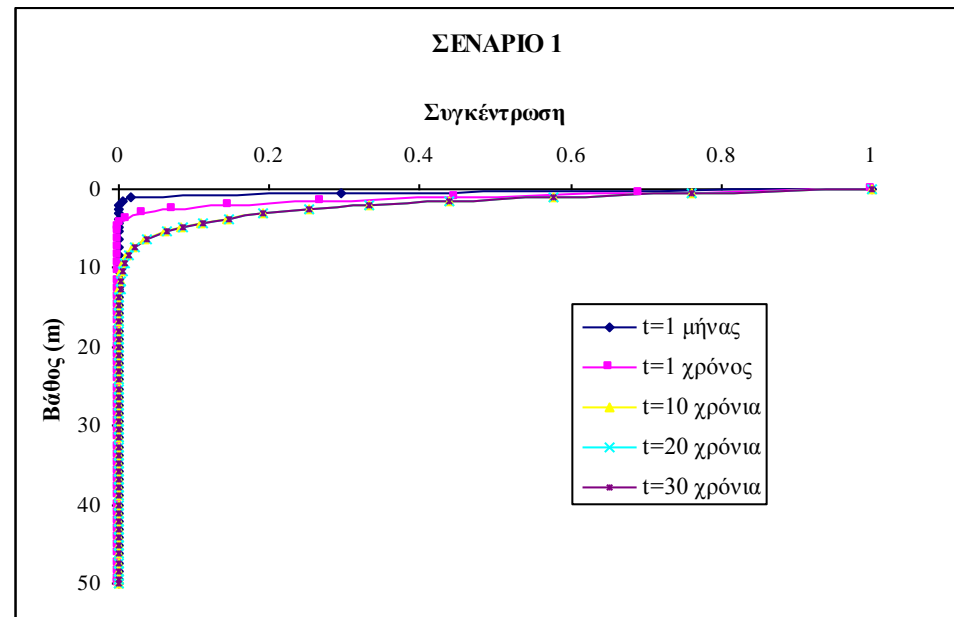
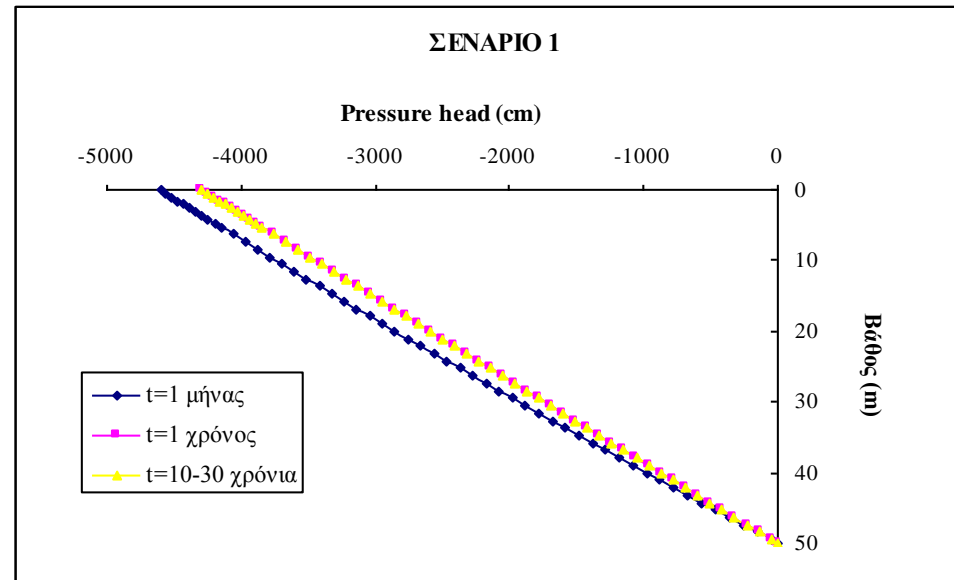
Τα σενάρια που έδιναν τα πιο δυσμενή αποτελέσματα εξετάστηκαν ξανά με διαφορετική τιμή του συντελεστή στάθμισης. (weighting factor). Οι τιμές που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις προηγούμενες και έτσι εξετάστηκε η επίδρασή του στα αποτελέσματα του μοντέλου.

8.3.2 Αποτελέσματα

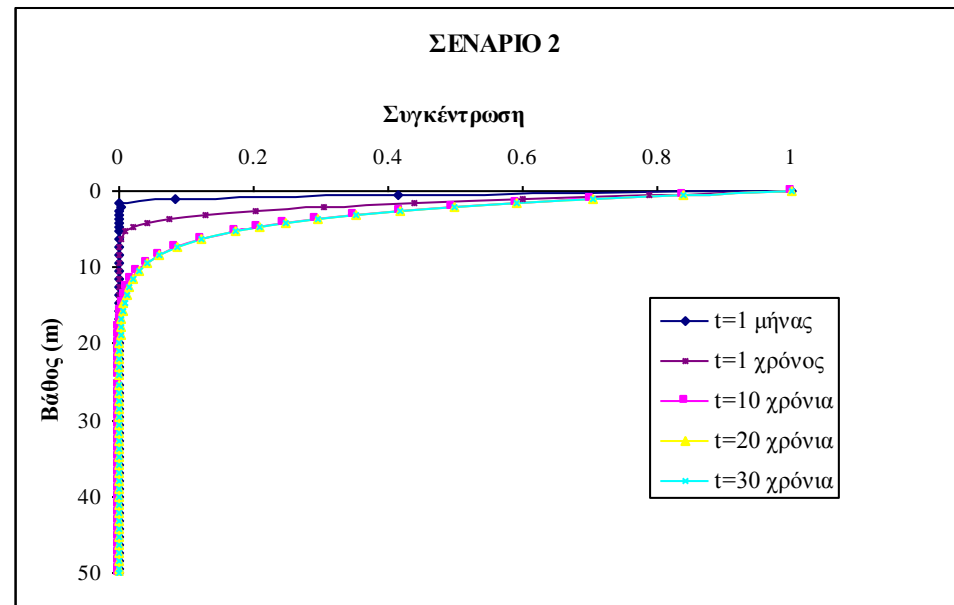
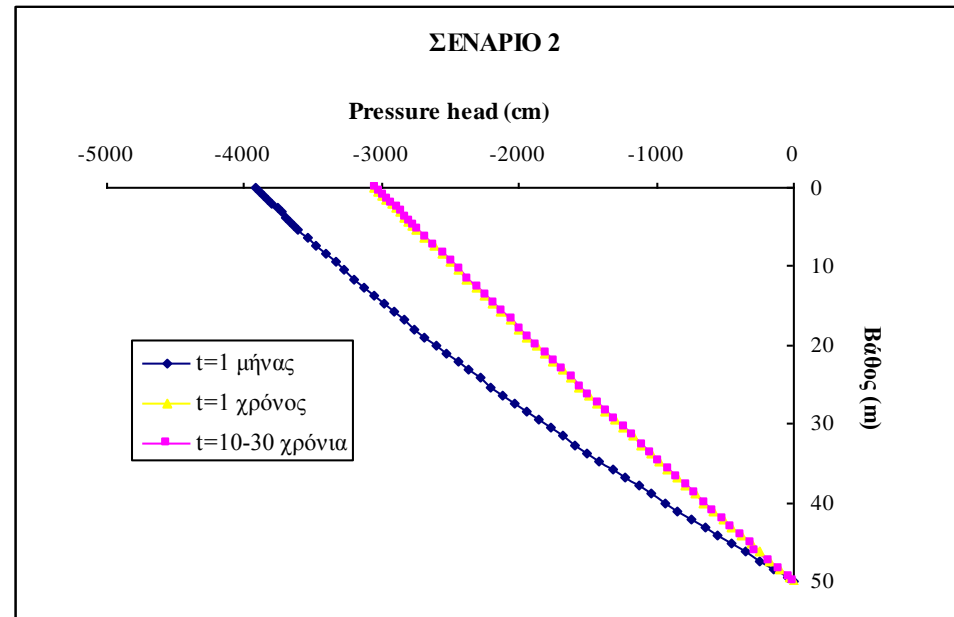
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αφορούν στο ύψος πίεσης (pressure head) και στην συγκέντρωση των στραγγισμάτων κατά μήκος της ακόρεστης ζώνης. Οι τιμές που ελήφθησαν ήταν υπό τη μορφή πινάκων και μετατράπηκαν με τη βοήθεια του Excel σε διαγράμματα, τα οποία δίνουν μια πιο παραστατική εικόνα των συνθηκών που δημιουργούνται.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τιμές των κυριότερων μεγεθών που εισήχθησαν στο μοντέλο για κάθε σενάριο και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν.

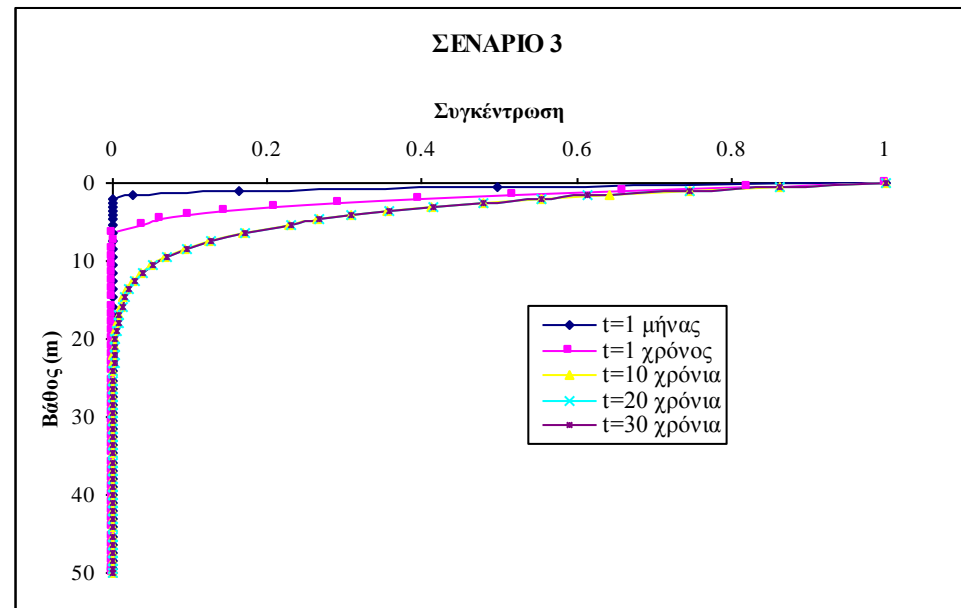
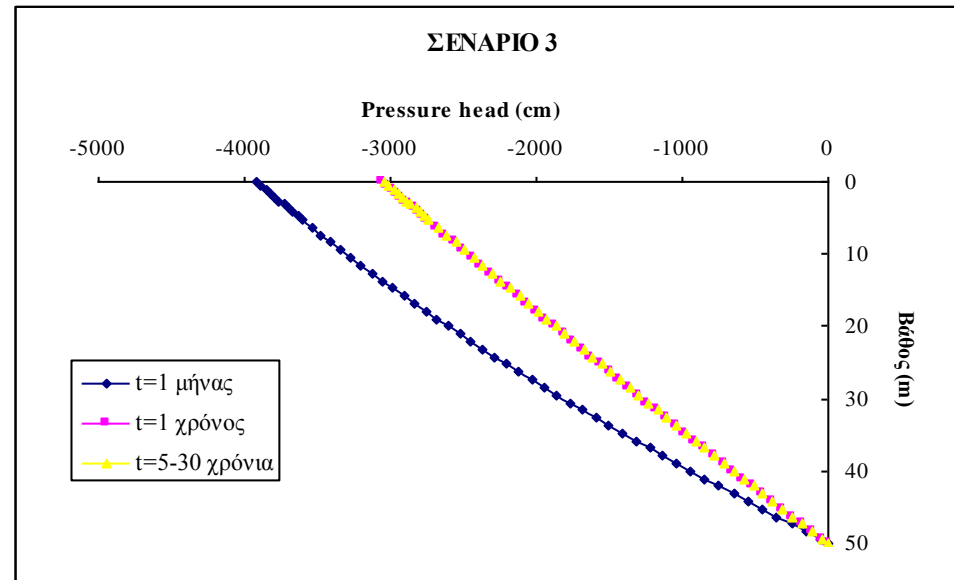
Ιδιότητες/ Σενάριο	1
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.0864
α_L (cm)	500
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef.	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.01



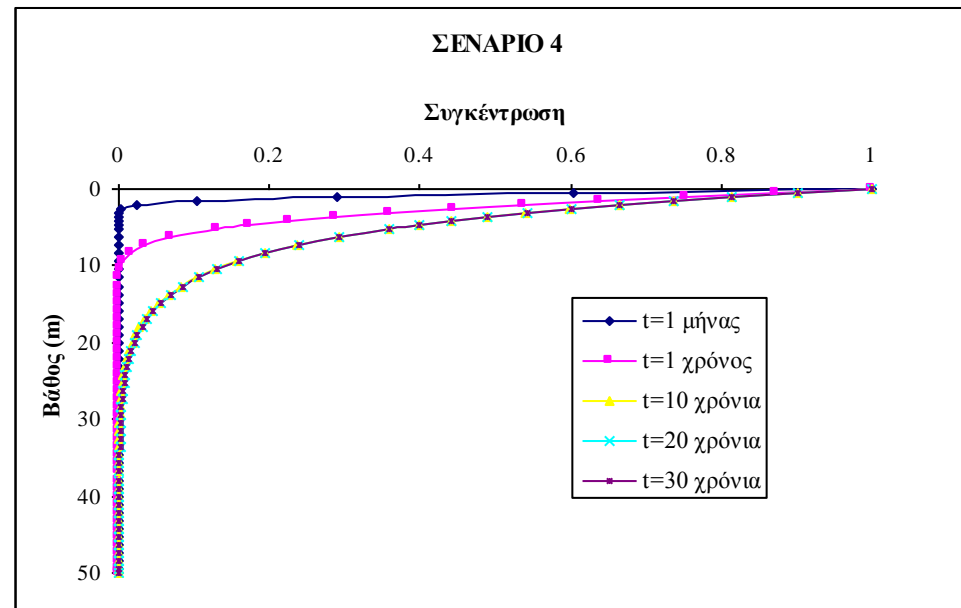
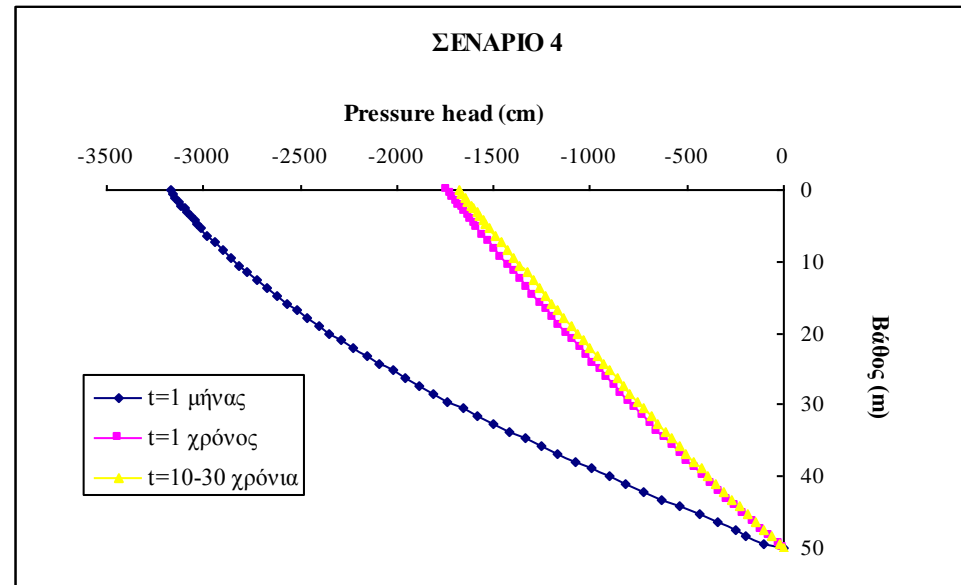
Ιδιότητες/ Σενάριο	2
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.0864
α_L (cm)	300
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.03



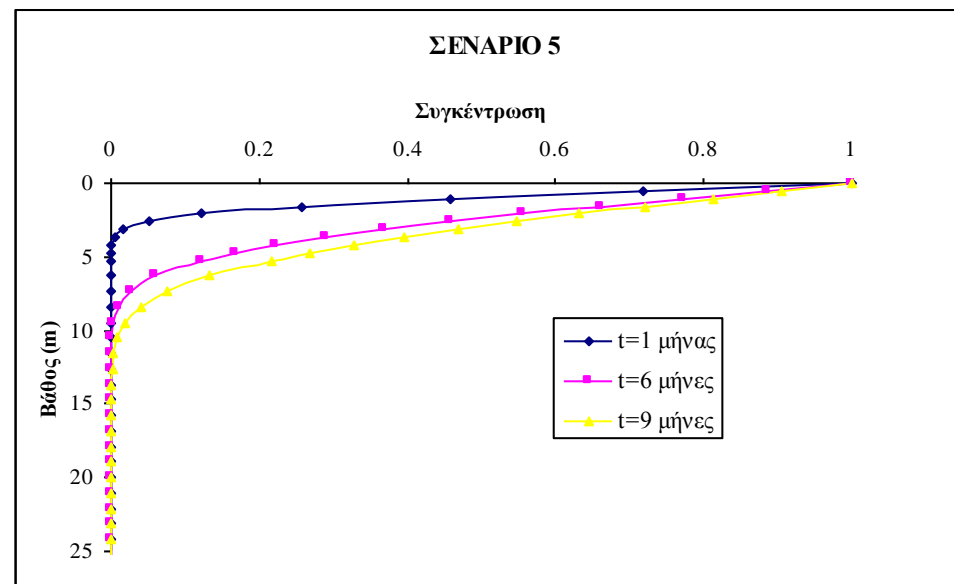
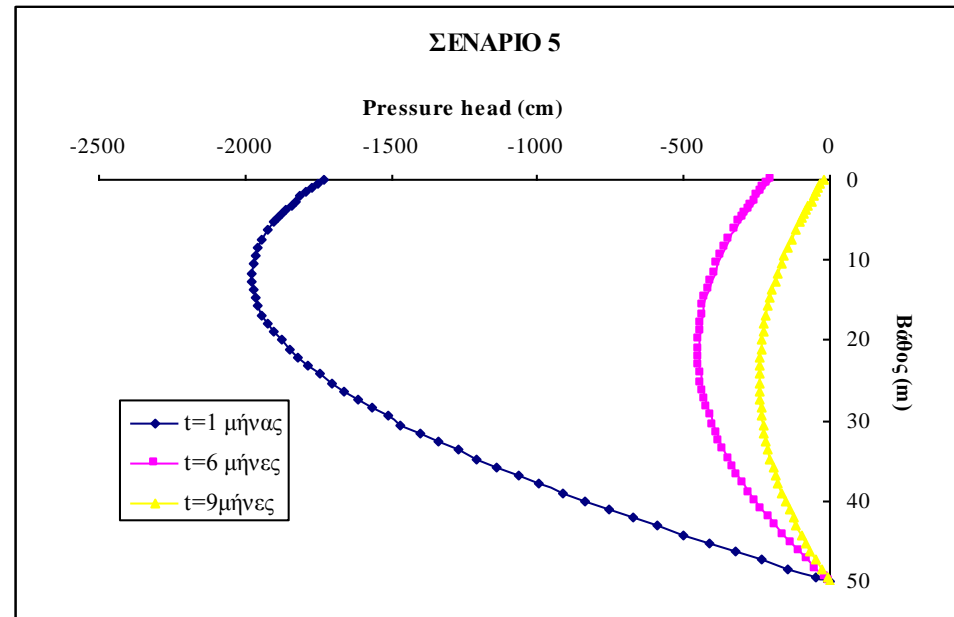
Ιδιότητες/ Σενάριο	3
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.0864
α_L (cm)	500
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef.	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.03



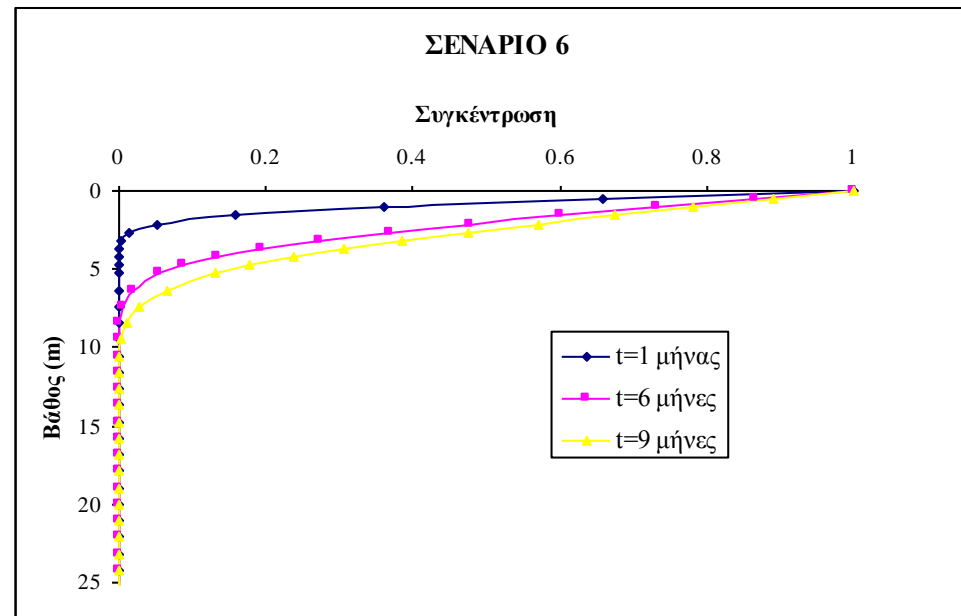
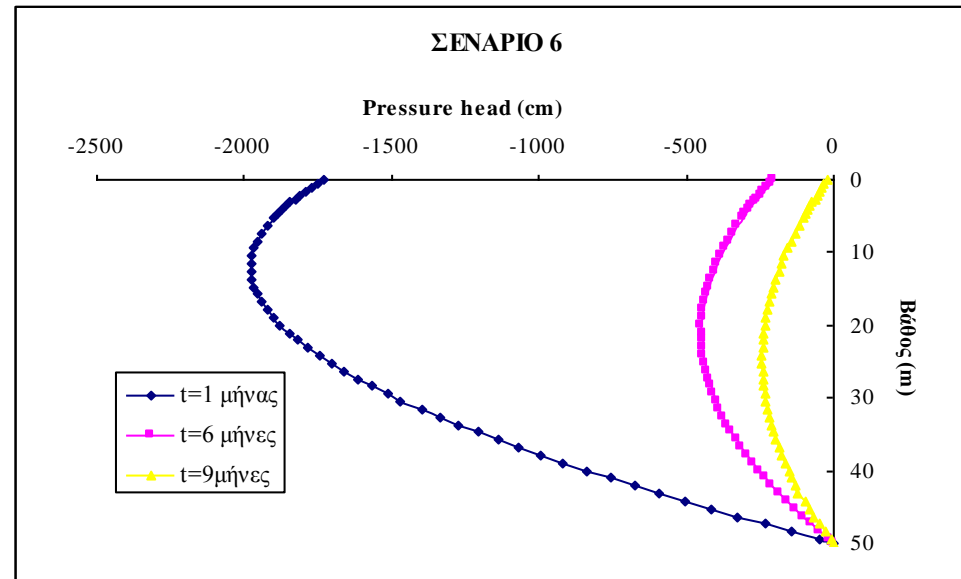
Ιδιότητες/ Σενάριο	4
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.0864
α_L (cm)	500
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef.	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.05



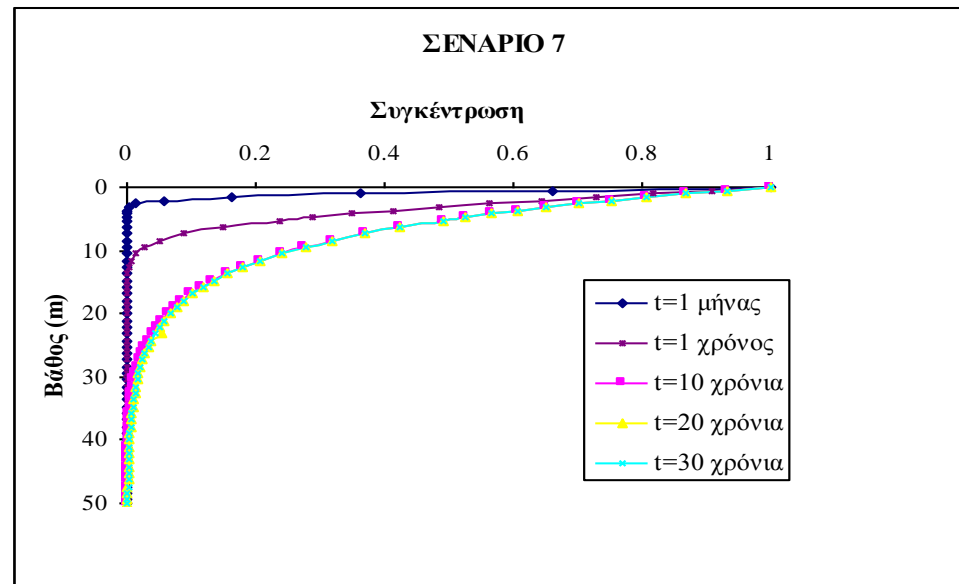
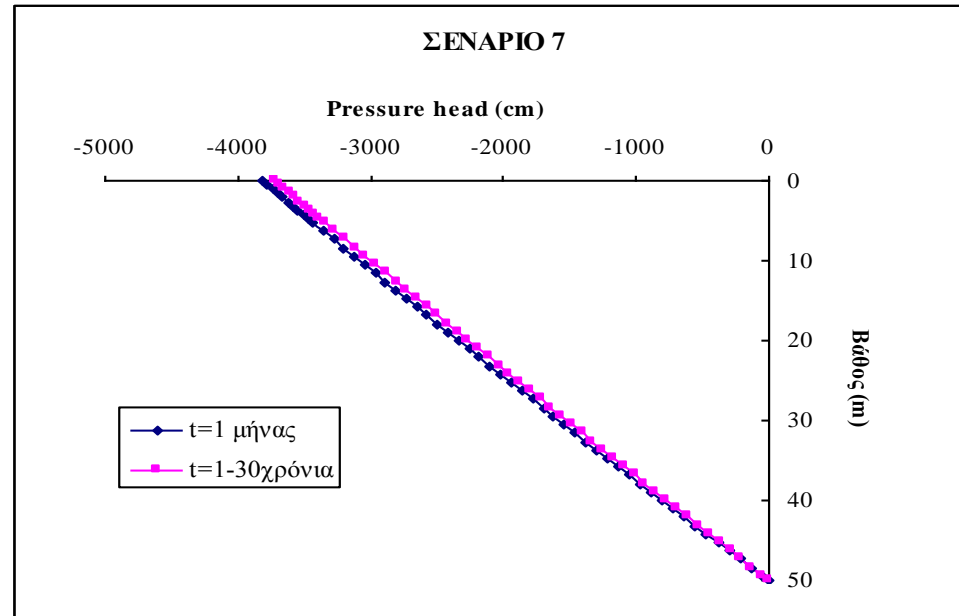
Ιδιότητες/ Σενάριο	5
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.0864
α_L (cm)	500
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.1



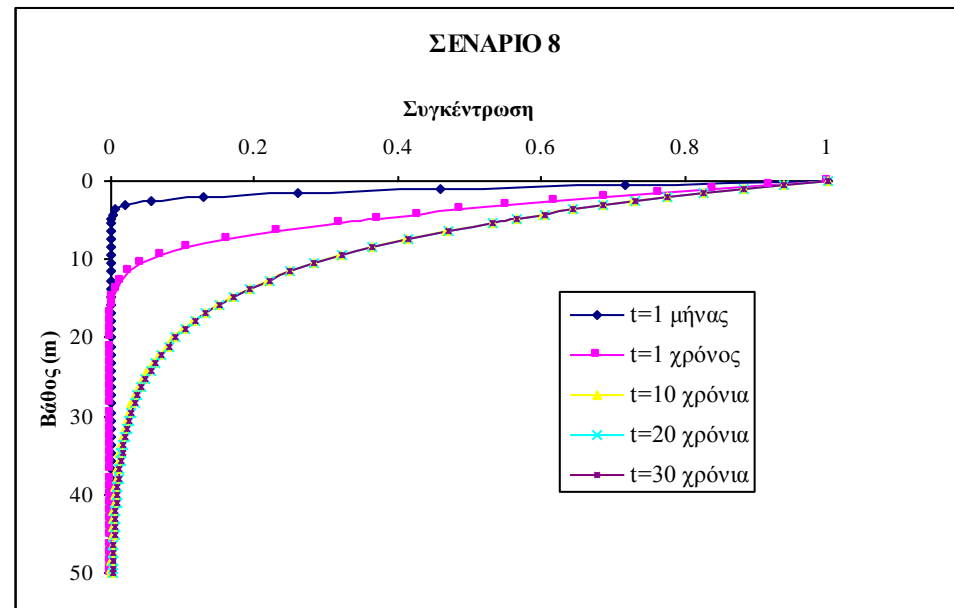
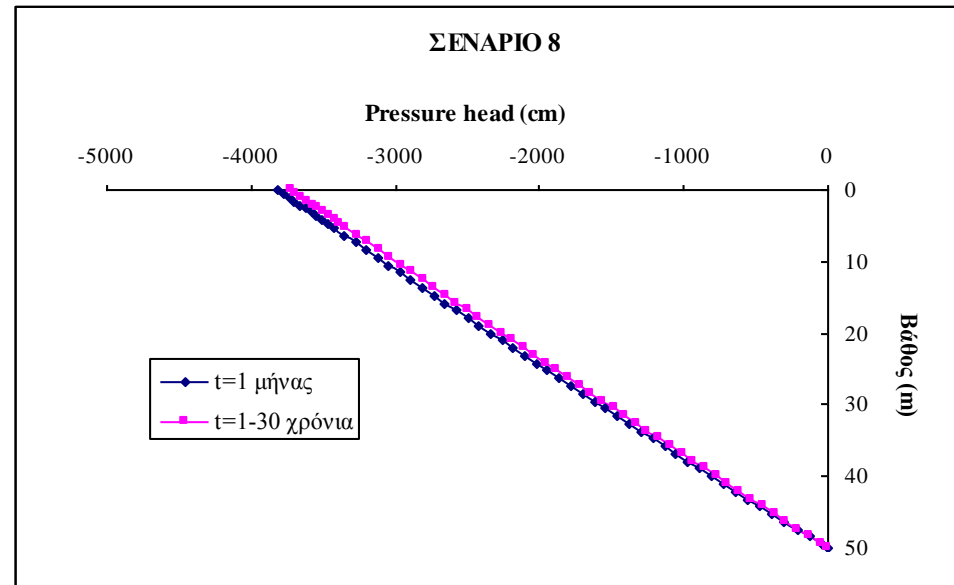
Ιδιότητες/ Σενάριο	6
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.0864
α_L (cm)	300
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.1



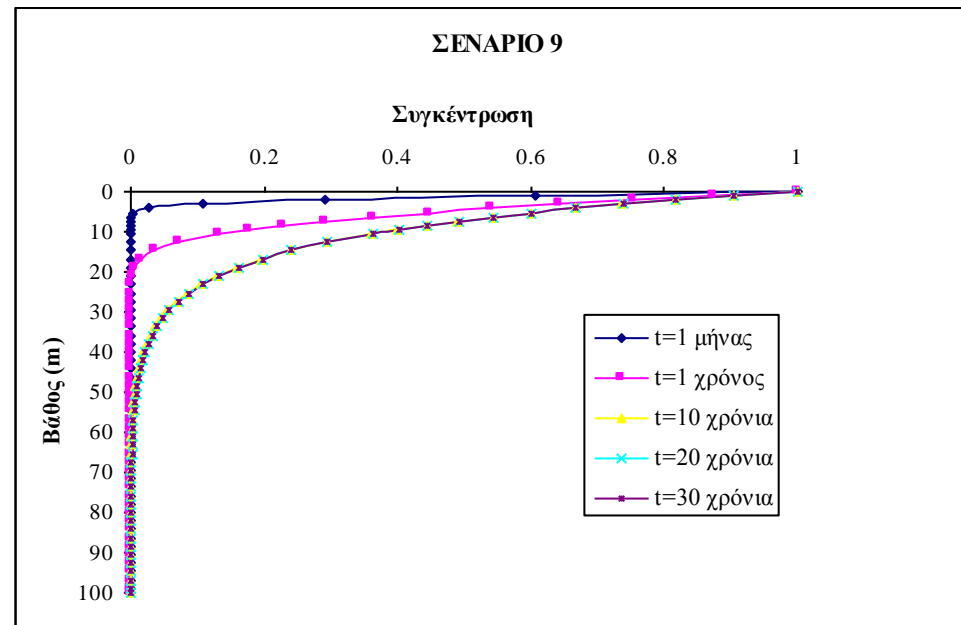
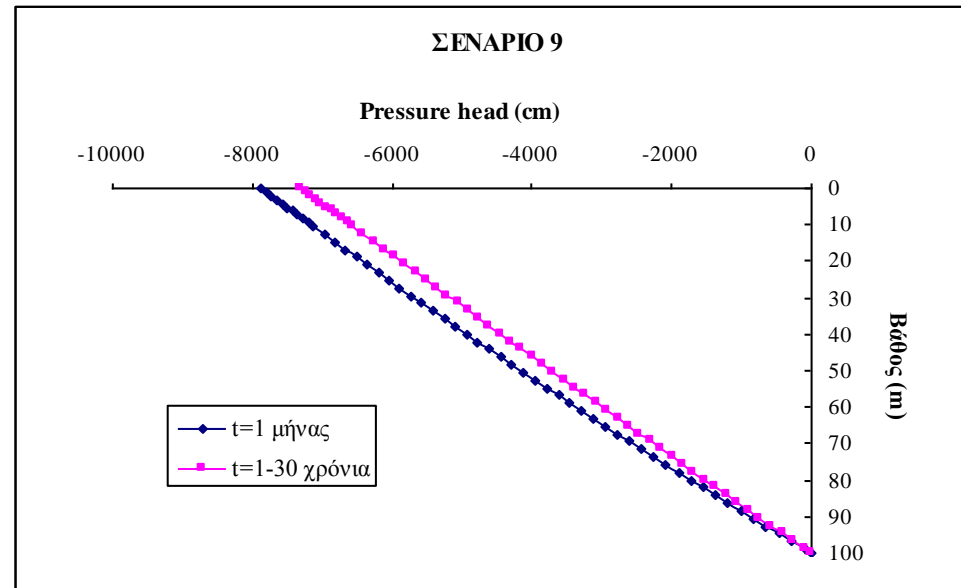
Ιδιότητες/ Σενάριο	7
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	300
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.1



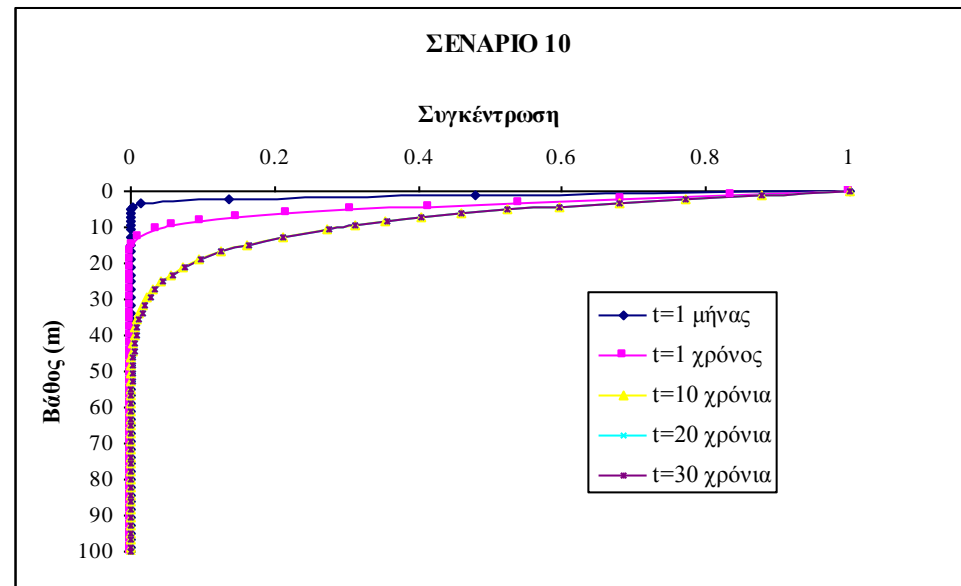
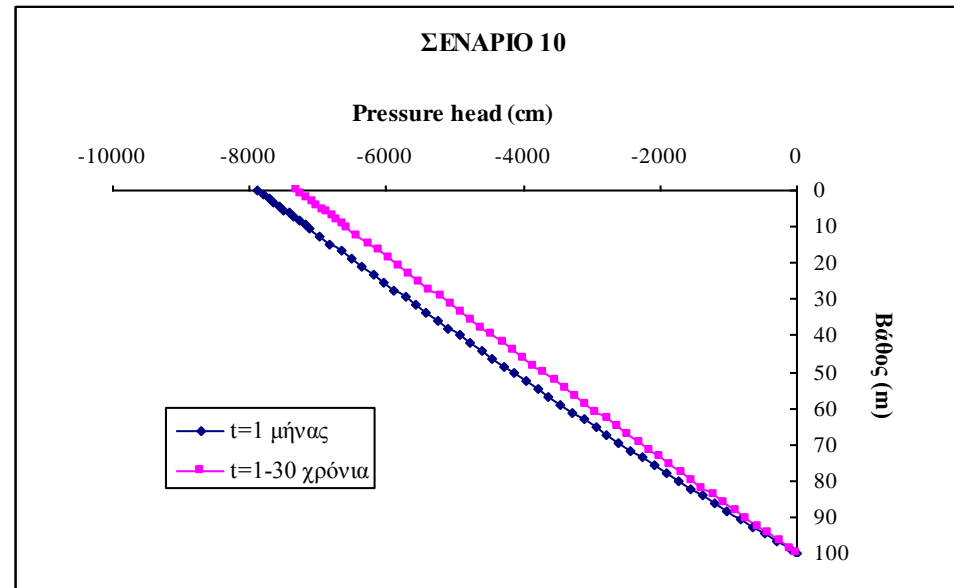
Ιδιότητες/ Σενάριο	8
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	500
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.1



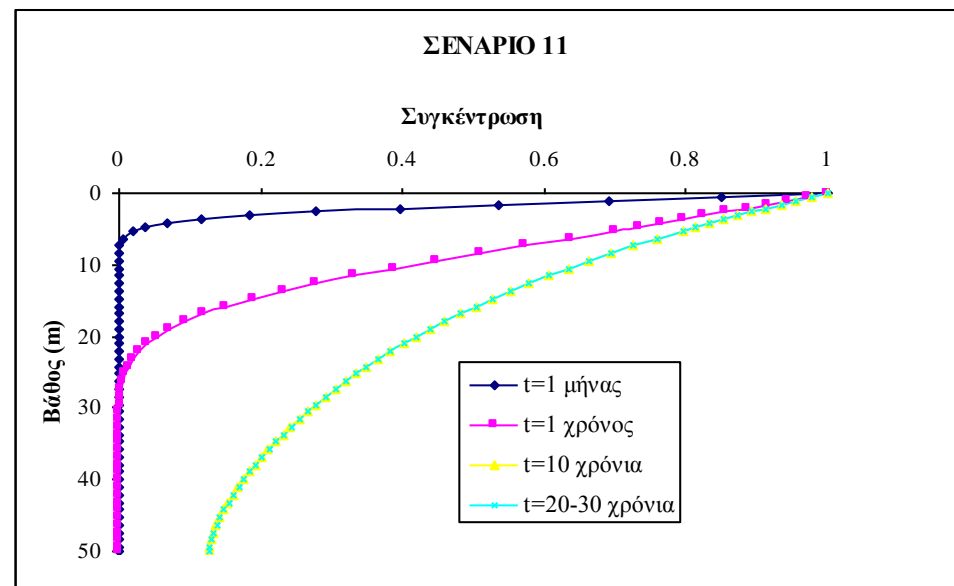
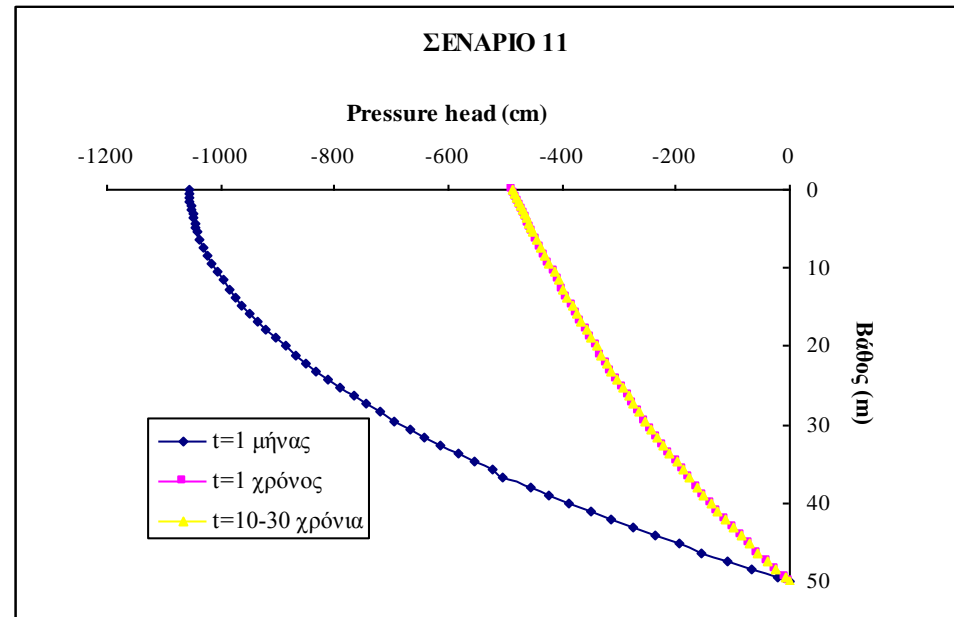
Ιδιότητες/ Σενάριο	9
Βάθος (m)	100
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	1000
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.1



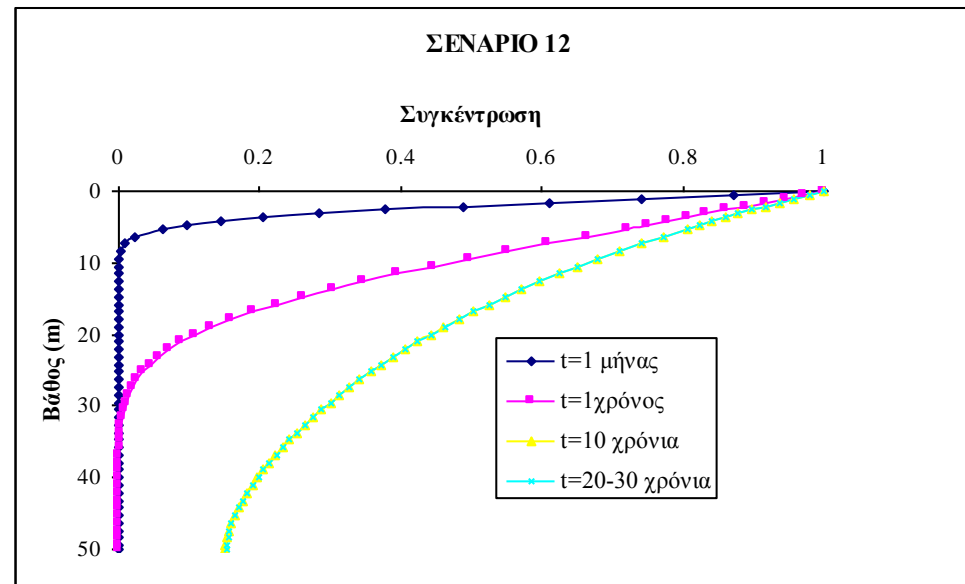
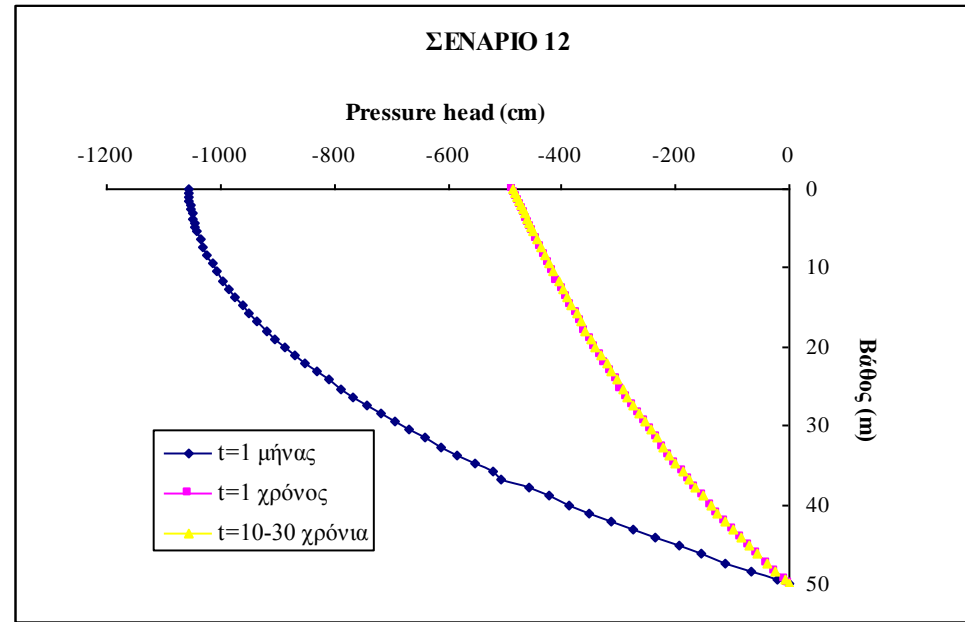
Ιδιότητες/ Σενάριο	10
Βάθος (m)	100
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	442
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.1



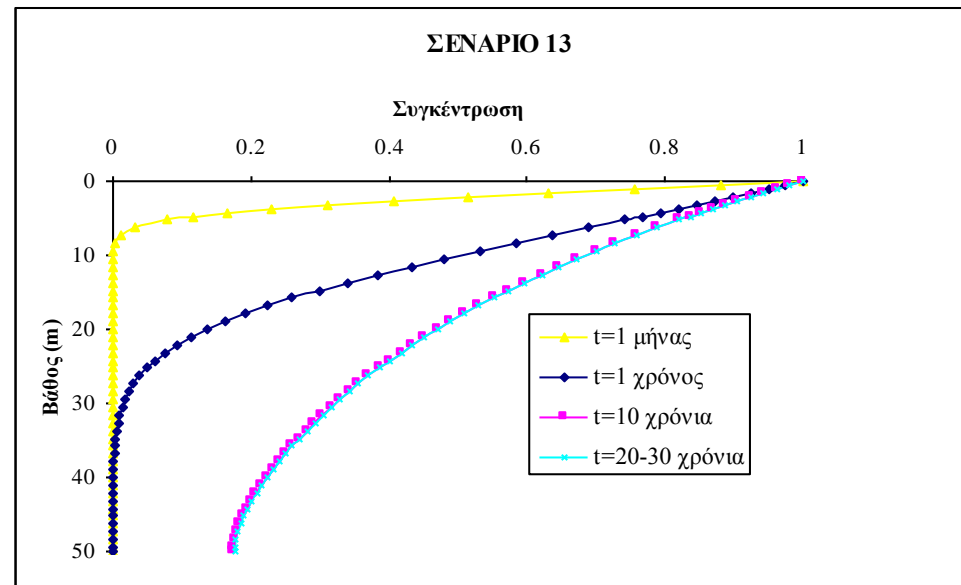
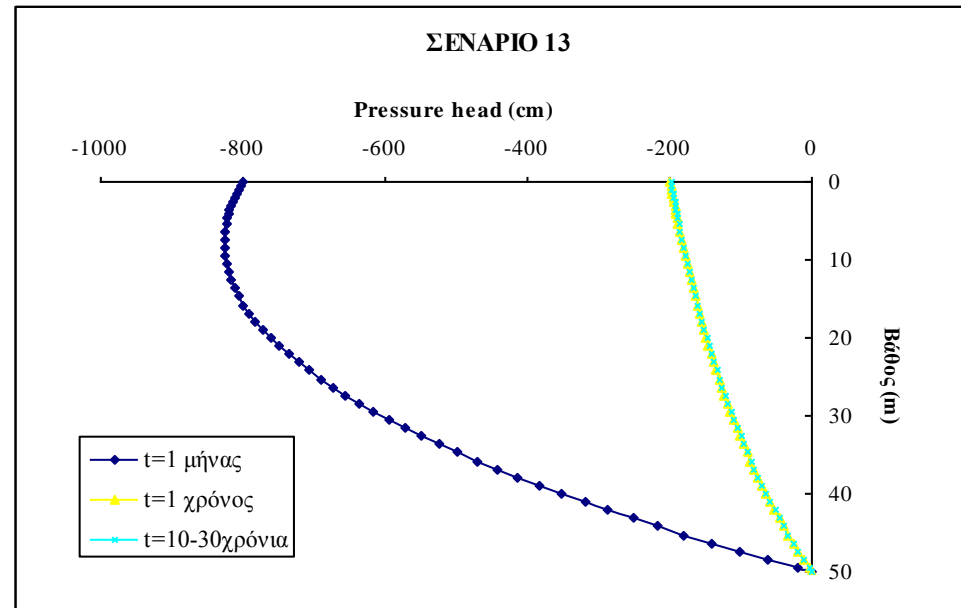
Ιδιότητες/ Σενάριο	11
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	300
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.4



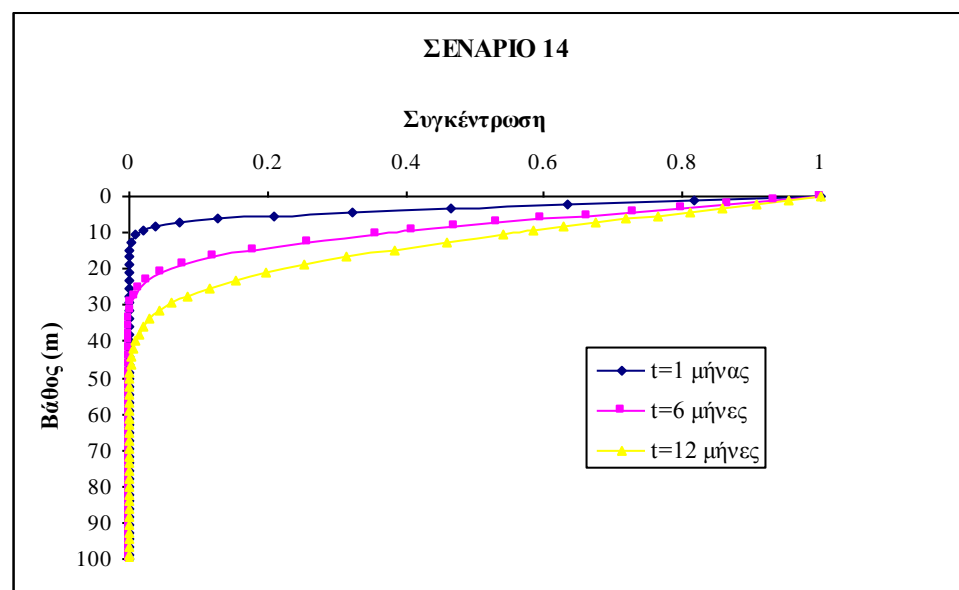
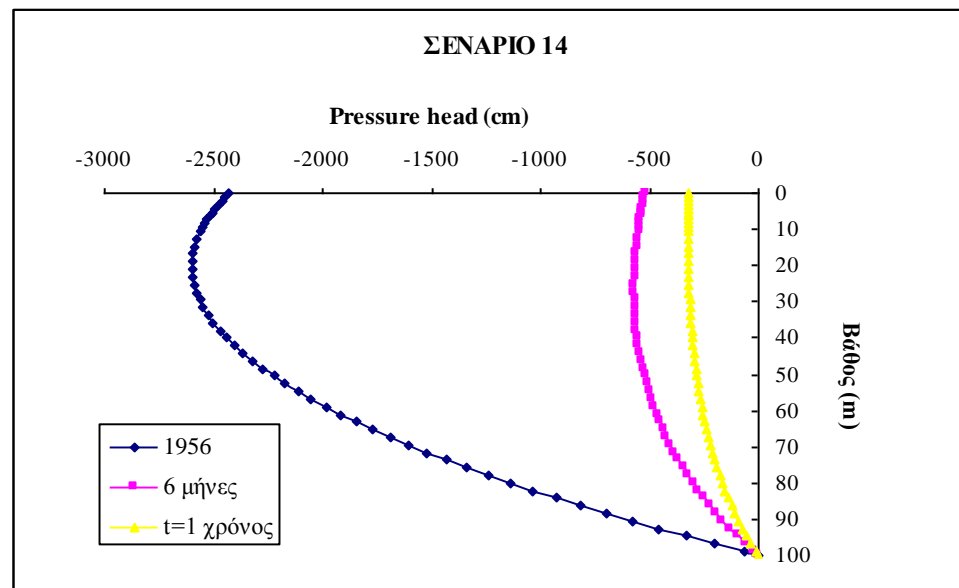
Ιδιότητες/ Σενάριο	12
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	500
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.4



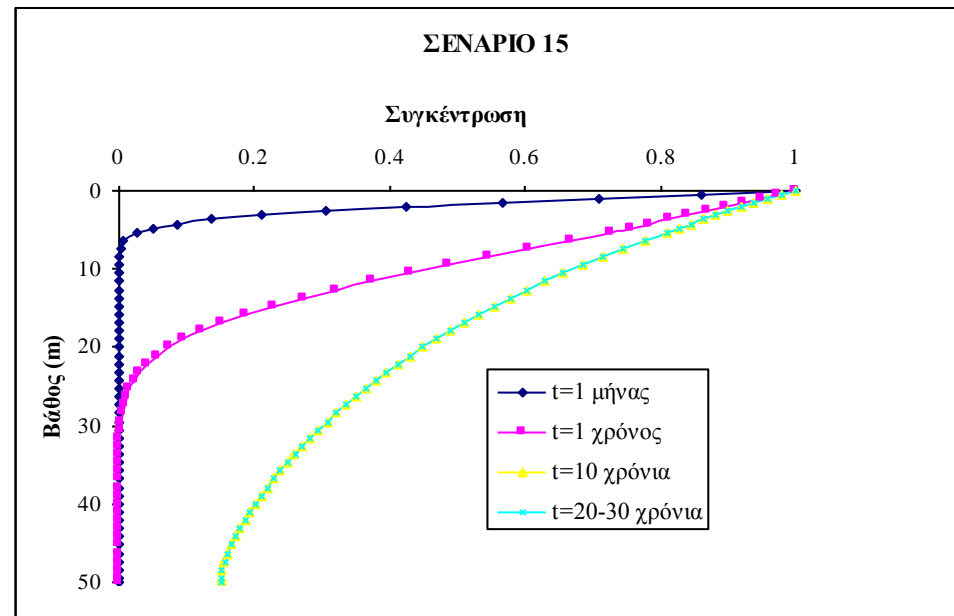
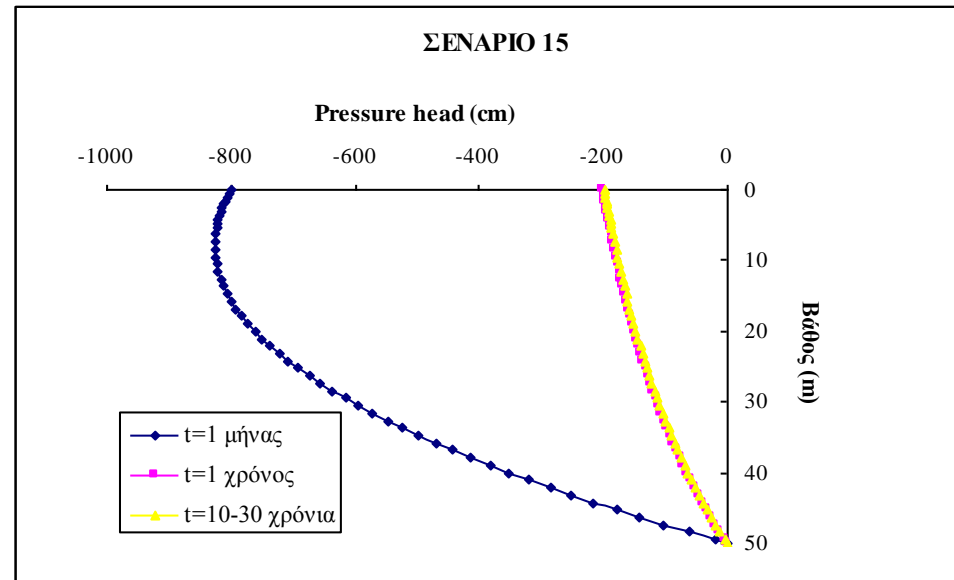
Ιδιότητες/ Σενάριο	13
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	500
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.44



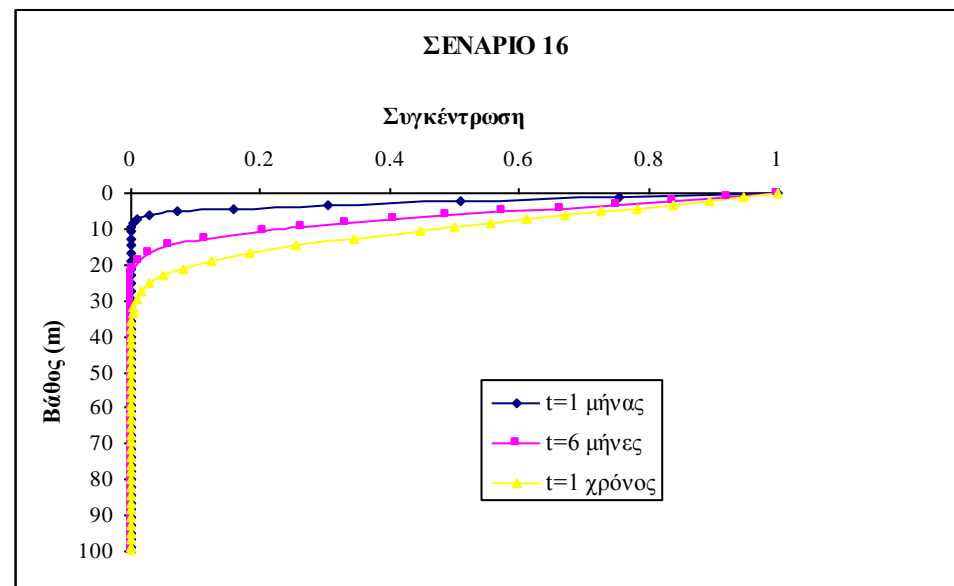
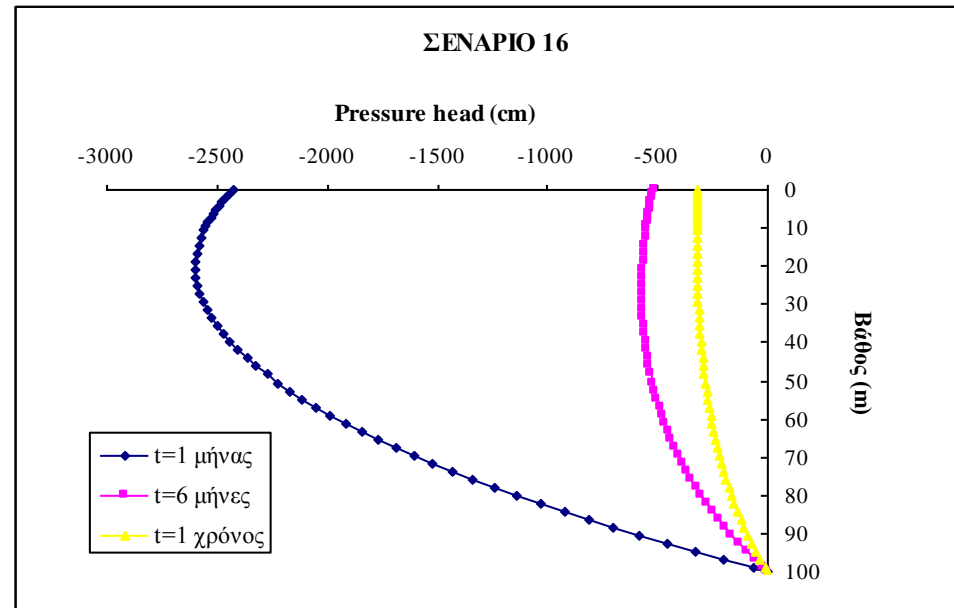
Ιδιότητες/ Σενάριο	14
Βάθος (m)	100
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	1000
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.44



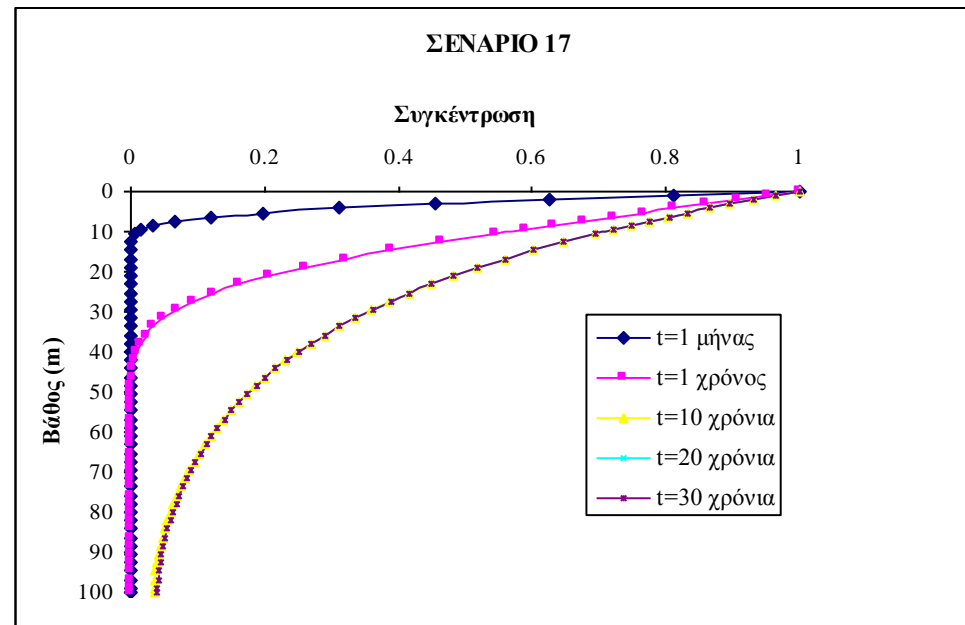
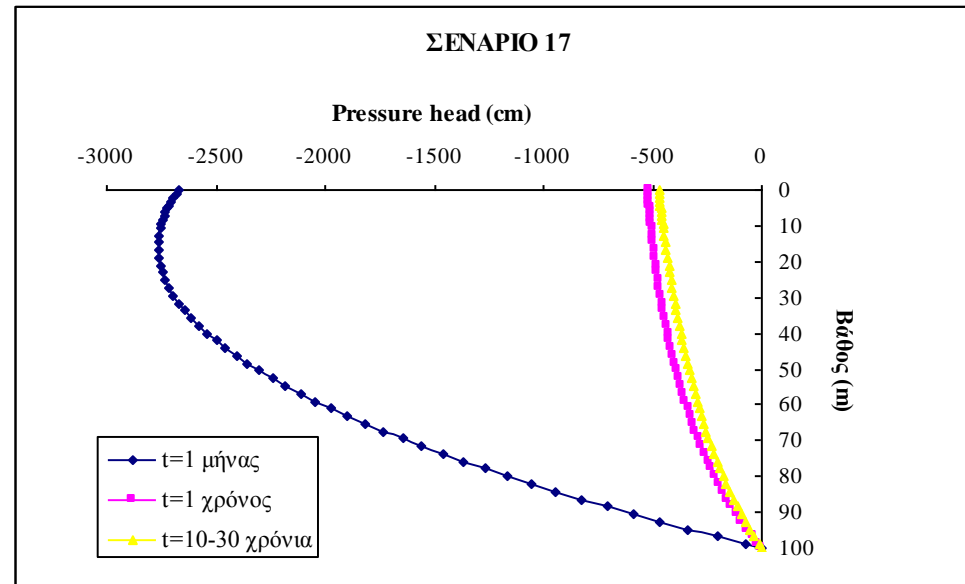
Ιδιότητες/ Σενάριο	15
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	300
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.44



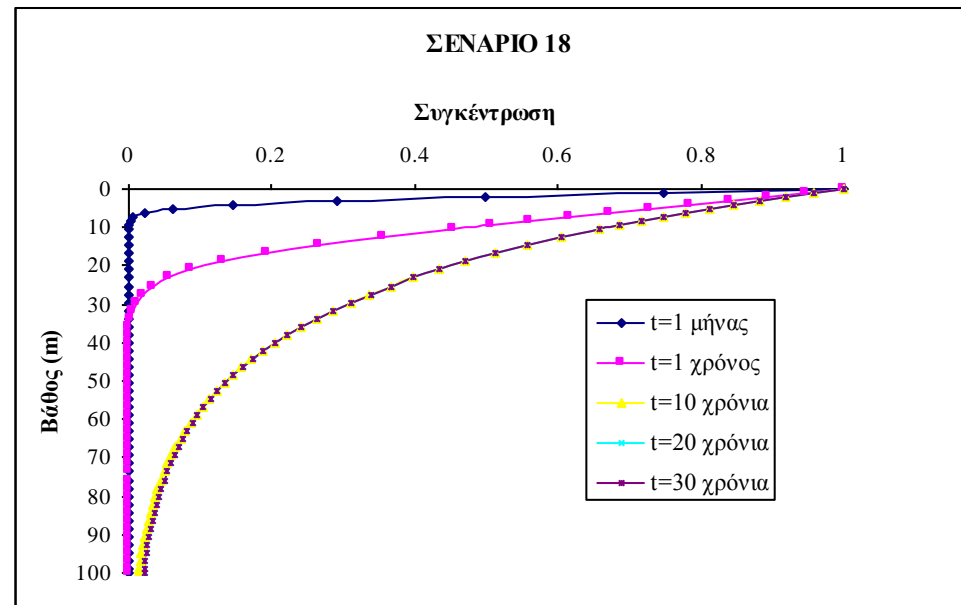
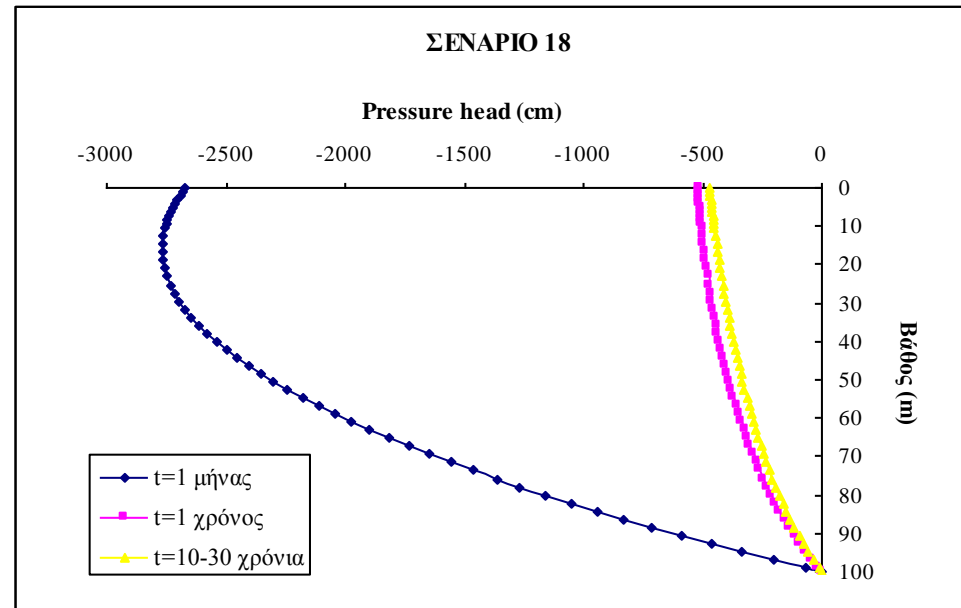
Ιδιότητες/ Σενάριο	16
Βάθος (m)	100
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	442
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.44



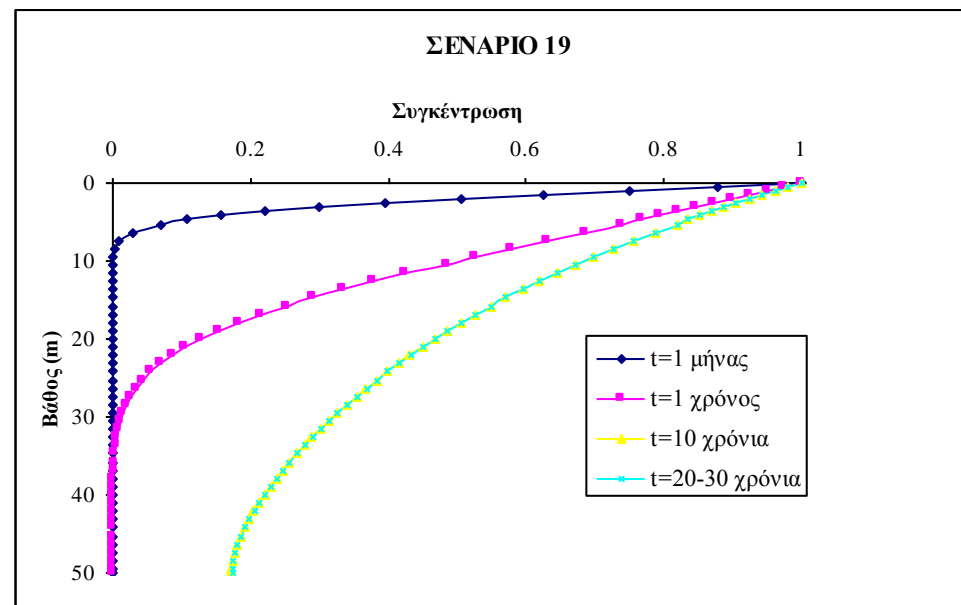
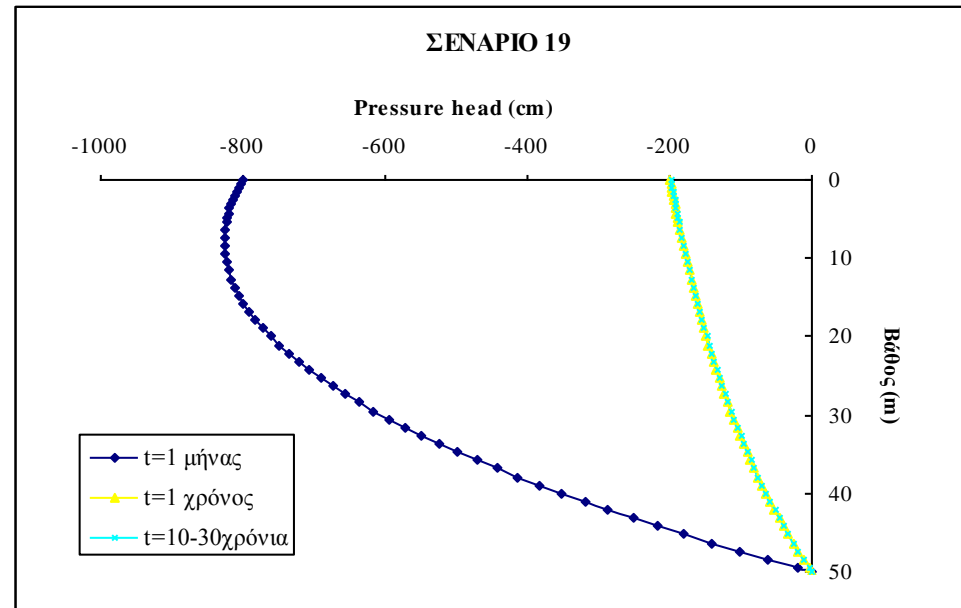
Ιδιότητες/ Σενάριο	17
Βάθος (m)	100
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	1000
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.42



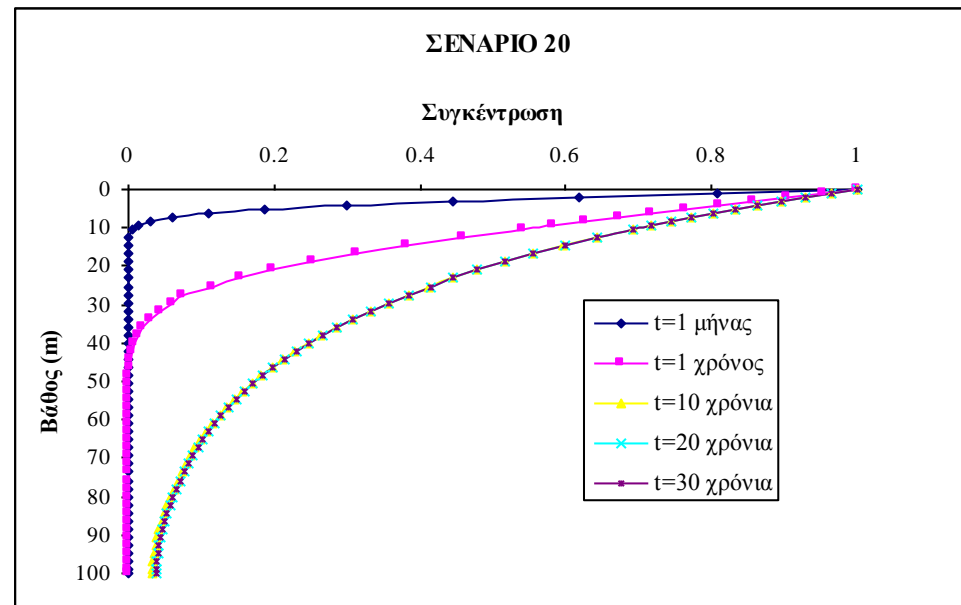
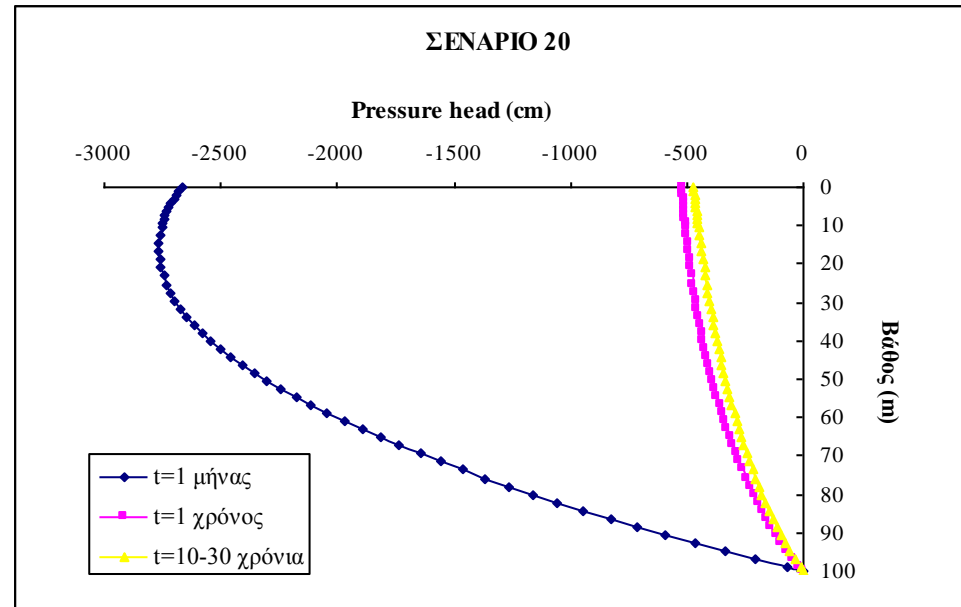
Ιδιότητες/ Σενάριο	18
Βάθος (m)	100
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	442
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	1
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.42



Ιδιότητες/ Σενάριο	19
Βάθος (m)	50
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	500
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	0
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.44



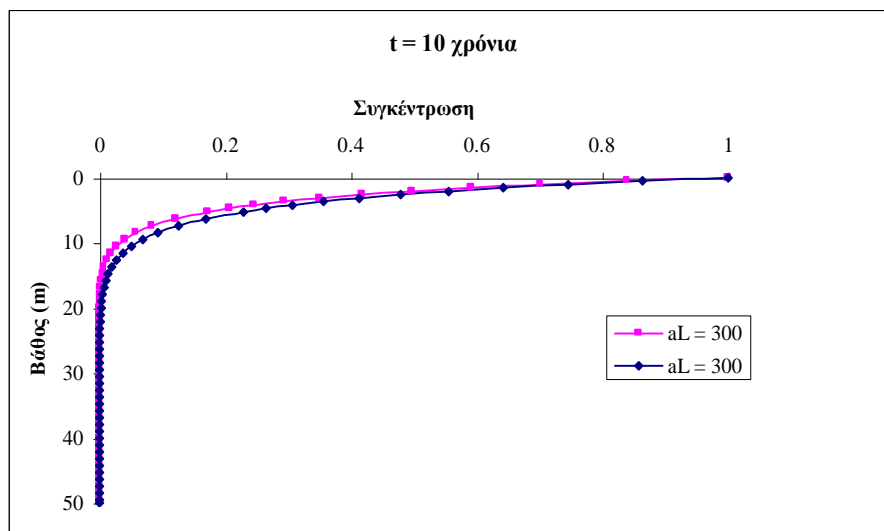
Ιδιότητες/ Σενάριο	20
Βάθος (m)	100
K_s (cm/day)	0.4752
α_L (cm)	1000
Effective porosity	0.2
R	1
Molec. Diffusion Coef..	0.0001
Air entry	0
Specific Storage	0
α	0.005
β	1.09
γ	0.825
N	0
RWS	0.35
DECAY	0.001
Upstream weighting factor	0
Default Darcy velocity	0
Default water saturation	0
Transformation mass factor	0
Influx (cm ³ / day)	0.42



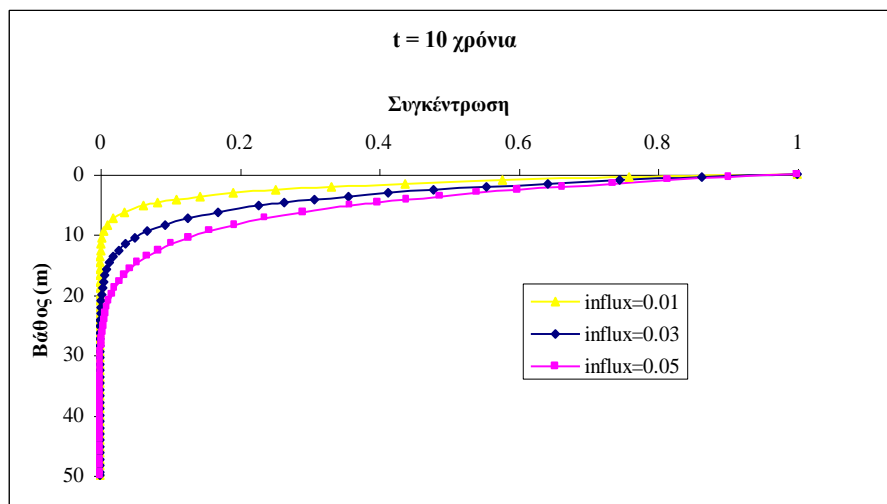
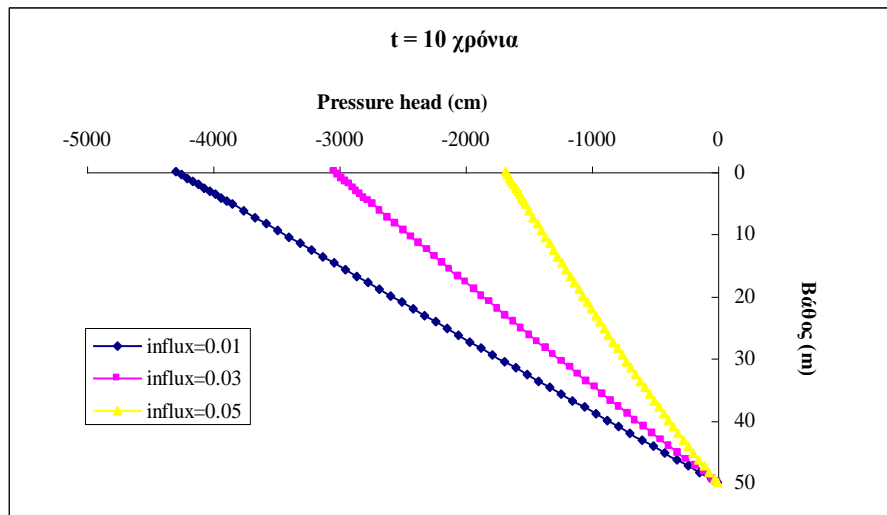
8.2.3 Σχόλια και συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα διαγράμματα που προέκυψαν για το ύψος πίεσης και τη συγκέντρωση των στραγγισμάτων στην ακόρεστη σε κάθε ένα από τα εξεταζόμενα σενάρια, μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Στις περιπτώσεις που η τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας είναι ίση με 0,0864cm/day (η οποία είναι και η πιο αντιπροσωπευτική για την περιοχή σύμφωνα με τη βιβλιογραφία), η τιμή της ποσότητας των στραγγισμάτων που εισέρχεται στο έδαφος δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη των 0,05cm³/day, λόγω της εμφάνισης σφάλματος στη ροή του προγράμματος. Για τιμές μεγαλύτερες από αυτήν τα στραγγίσματα παρουσιάζονται να «λιμνάζουν» στην επιφάνεια του εδάφους δημιουργώντας σχετικά μεγάλες, θετικές τιμές του ύψους πίεσης.
- Σε όλα τα σενάρια στα οποία η υδραυλική αγωγιμότητα ισούται με 0,0864cm/day, προκύπτει ότι ακόμη και μετά από 30 χρόνια, η συγκέντρωση του ρυπαντή στον υδροφορέα είναι μηδενική. Παρατηρείται επίσης ότι το σύστημα φτάνει σε μόνιμες συνθήκες μετά από 10 χρόνια, με αποτέλεσμα η μεταβολή τόσο του ύψους πίεσης όσο και της συγκέντρωσης των στραγγισμάτων να είναι σχεδόν μηδενική από εκεί και πέρα.
- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα σενάρια 2 & 3, που διαφέρουν μόνο ως προς τον συντελεστή διαμήκους διασποράς, όπως είναι φυσικό δεν διαφέρουν όσον αφορά στο ύψος πίεσης. Αντίθετα, ως προς τη συγκέντρωση παρατηρούνται διαφορές, οι οποίες όμως είναι πολύ μικρές και σε καμία περίπτωση δεν αλλάζουν τη γενικότερη εικόνα που δημιουργείται, όπως φαίνεται ξεκάθαρα στο ακόλουθο διάγραμμα.



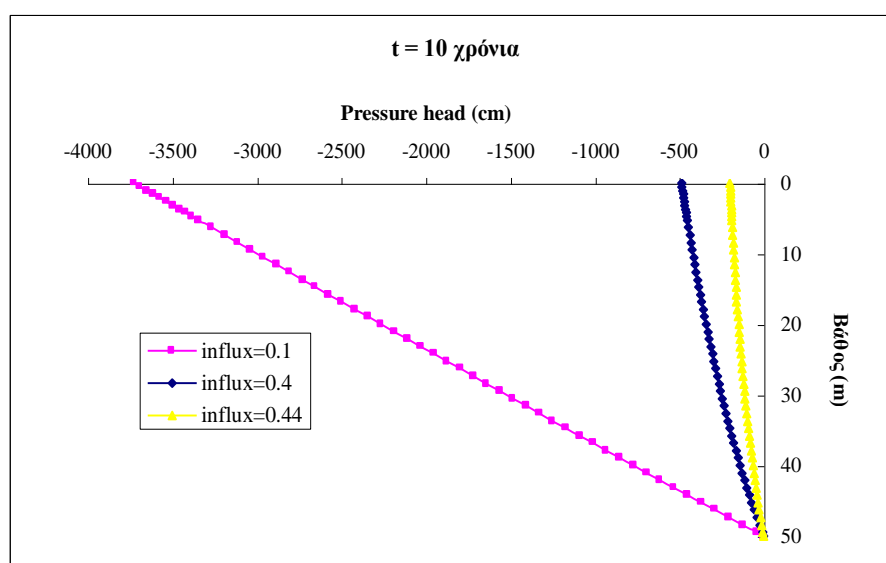
- Η μεταβολή της ποσότητας των στραγγισμάτων που εισρέει στο έδαφος επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα, στα οποία γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων 1, 3 και 4. Τα σενάρια αυτά διαφέρουν μόνο ως προς την ποσότητα των στραγγισμάτων που διοχετεύεται στην επιφάνεια του εδάφους.

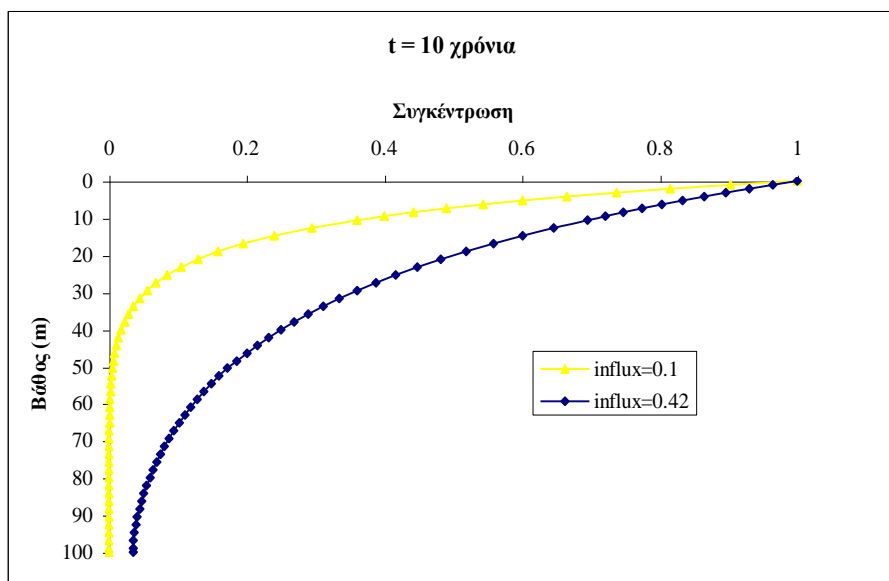
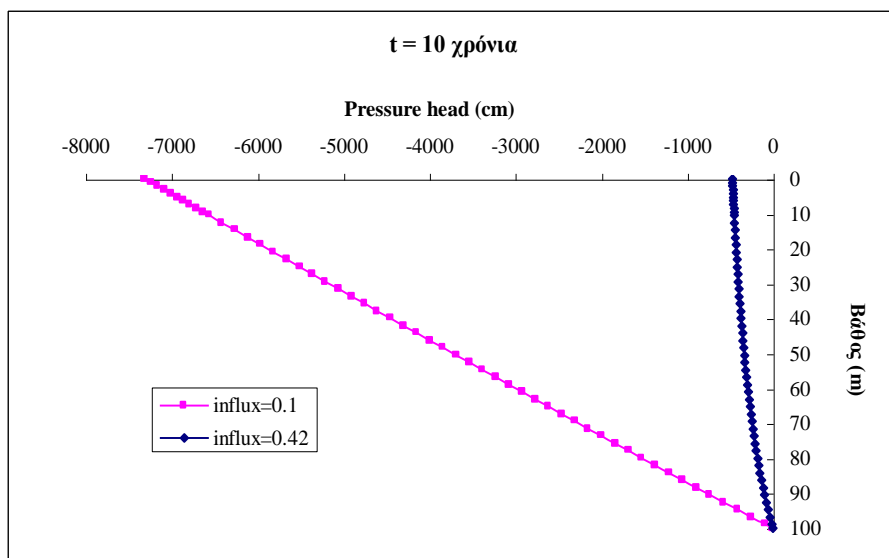
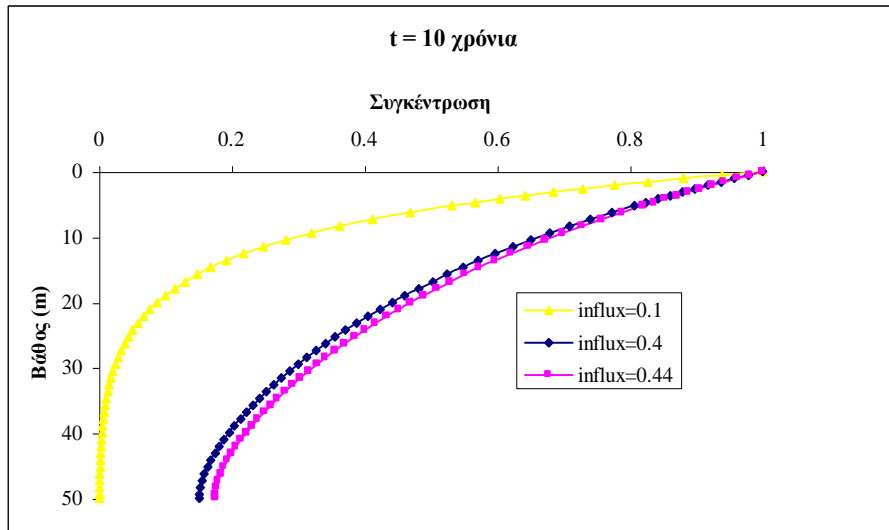


- Στα σενάρια που η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας έχει πενταπλασιαστεί, η μέγιστη ποσότητα εισροής στραγγισμάτων που μπορεί να προσομοιωθεί από το μοντέλο είναι $0,44\text{cm}^3/\text{day}$, όταν το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι 50m και $0,42\text{cm}^3/\text{day}$, όταν το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι 100m. Από αυτήν την τιμή και πάνω, δημιουργείται σφάλμα στο πρόγραμμα το οποίο σταματάει

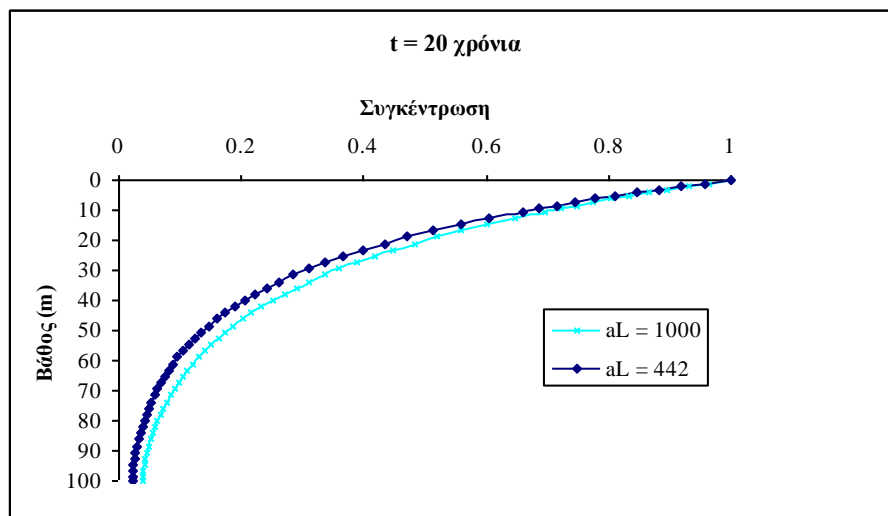
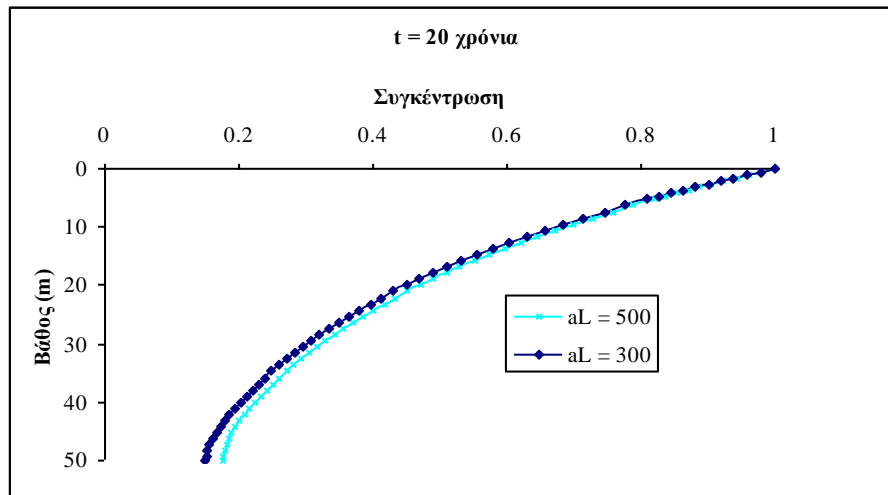
την προσομοίωσή του σε χρόνο $t = 9$ μήνες, οπότε και εμφανίζονται θετικές τιμές ύψους πίεσης.

- Σε όλα τα σενάρια στα οποία η υδραυλική αγωγιμότητα ισούται με $0,4752\text{cm/day}$, προκύπτει ότι το σύστημα φτάνει σε μόνιμες συνθήκες μετά από περίπου 10 χρόνια, με αποτέλεσμα η μεταβολή τόσο του ύψους πίεσης όσο και της συγκέντρωσης των στραγγισμάτων να είναι σχεδόν μηδενική από εκεί και πέρα. Στην περίπτωση που το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι 50m, δυσμενέστερο εμφανίζεται να είναι το σενάριο 13, σύμφωνα με το οποίο μετά από περίπου 10 χρόνια η συγκέντρωση στην επιφάνεια του υδροφορέα θα είναι 0,1763. Στην περίπτωση που το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι 100m, δυσμενέστερο εμφανίζεται να είναι το σενάριο 17, σύμφωνα με το οποίο μετά από περίπου 10 χρόνια η συγκέντρωση στην επιφάνεια του υδροφορέα θα είναι 0,0397.
- Για ακόμη μια φορά, η μεταβολή της ποσότητας των στραγγισμάτων που εισρέουν στο έδαφος επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο. Στα διαγράμματα που ακολουθούν γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων 8, 12 και 13, που δέχονται πάχος ακόρεστης ζώνης ίσο με 50m και των σεναρίων 9 και 17, που δέχονται πάχος ακόρεστης ζώνης ίσο με 100m. Τα σενάρια αυτά διαφέρουν μόνο ως προς την ποσότητα των στραγγισμάτων που εκλύεται στην επιφάνεια του εδάφους.



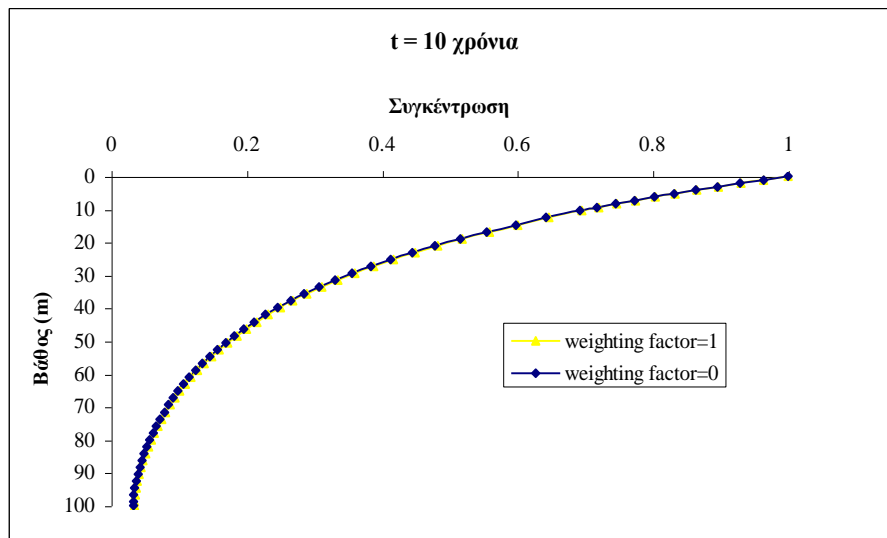


- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα σενάρια 13 & 15 και 17 & 18, που διαφέρουν μόνο ως προς τον συντελεστή διαμήκους διασποράς, όπως είναι αναμενόμενο δεν διαφέρουν όσον αφορά στο ύψος πίεσης. Ως προς τη συγκέντρωση παρατηρούνται για ακόμη μια φορά διαφορές, οι οποίες είναι πολύ μικρές και δεν επηρεάζουν τη γενικότερη κατανομή της συγκέντρωσης, όπως φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



- Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα σενάρια 13 & 19 και 17 & 20 είναι σχεδόν όμοια. Οι αποκλίσεις των τιμών που έδωσε το μοντέλο σε κάθε περίπτωση είναι τόσο μικρές που δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτές από τα διαγράμματα των μεγεθών. Η διαφορά των παραπάνω εξεταζόμενων σεναρίων ήταν μόνο η τιμή του weighting factor, γεγονός που δείχνει ότι η επίδρασή του στην κατανομή του ύψους πίεσης και της συγκέντρωσης στην ακόρεστη ζώνη δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Στο διάγραμμα που ακολουθεί

φαίνεται η ομοιομορφία των τιμών της συγκέντρωσης που προέκυψαν από τα σενάρια 17 & 20.



Με βάση όλα τα παραπάνω, θα μπορούσαμε να πούμε ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση του Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου, η ακόρεστη ζώνη αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εμπόδιο στη μεταφορά των στραγγισμάτων από την επιφάνεια του εδάφους στον υδροφορέα.

Ακόμη και στο δυσμενέστερο σενάριο, όπου το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι μόλις 50m, η υδραυλική αγωγιμότητα είναι πενταπλάσια αυτής που είναι αναμενόμενη για το υπάρχον πέτρωμα και η εισροή στραγγισμάτων στο έδαφος και η τιμή του συντελεστή διαμήκους διασποράς είναι η μέγιστη δυνατή, τα στραγγίσματα θα χρειαστούν σχεδόν 10 χρόνια για να αποκτήσουν συγκέντρωση στον υδροφορέα περίπου ίση με το 17,5% της συγκέντρωσης που παρατηρείται στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, σημαντικό είναι το ότι η συγκέντρωση αυτή δεν αναμένεται να αλλάξει για τουλάχιστον 20 χρόνια, μια και το σύστημα φτάνει σε μόνιμες συνθήκες.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε περίπτωση που το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι 100m, είναι ακόμη πιο ευνοϊκά. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του μοντέλου, τα στραγγίσματα θα χρειαστούν 10 χρόνια για να αποκτήσουν συγκέντρωση 0,0397 στον υδροφορέα, δηλαδή τιμή ίση μόλις με περίπου το 4% της αρχικής συγκέντρωσης που παρατηρείται στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτή η κατάσταση θα διατηρηθεί για τουλάχιστον 20 χρόνια, μια και το σύστημα φτάνει ξανά σε μόνιμες συνθήκες μέσα σε 10 χρόνια.

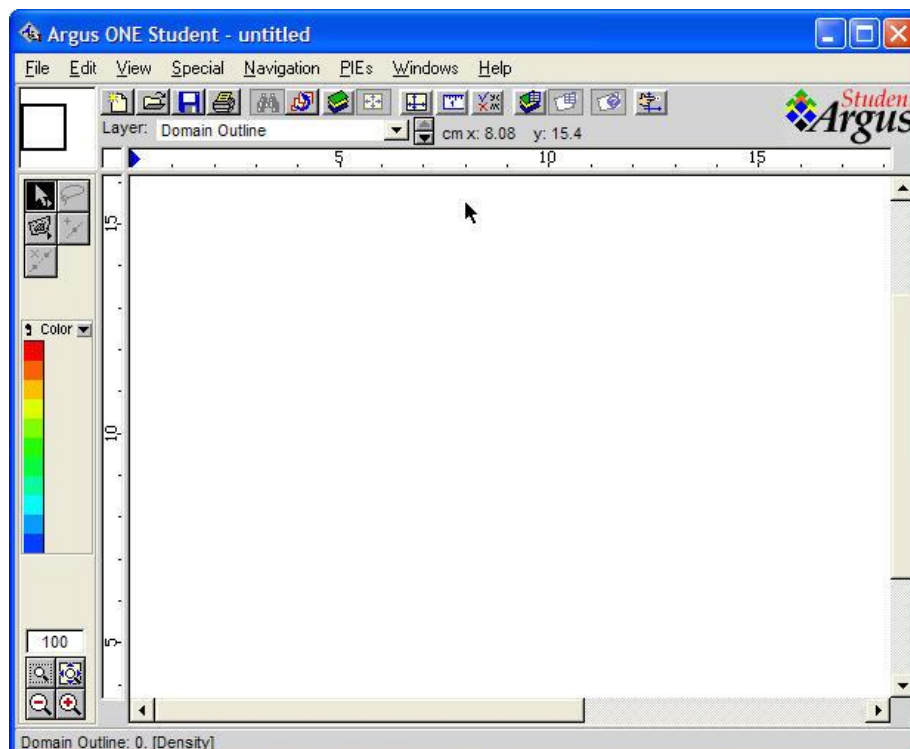
9. Εφαρμογή μοντέλου κορεσμένης ζώνης Argus ONE

Μετά την εφαρμογή του μοντέλου ακόρεστης ζώνης VADOFT και τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ρυπαντή στην επιφάνεια του υδροφορέα, η μοντελοποίηση της ροής και της μεταφοράς στραγγισμάτων συνεχίστηκε για την κορεσμένη ζώνη, με τη βοήθεια του προγράμματος Argus ONE και συγκεκριμένα του υπό-μοντέλου PTC. Από τα 20 σενάρια που είχαν δημιουργηθεί για την ακόρεστη ζώνη, εξετάστηκε εκείνο που έδινε τα δυσμενέστερα αποτελέσματα, το οποίο ήταν το σενάριο 13. Σύμφωνα με αυτό το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι 50m, η υδραυλική αγωγιμότητα είναι 5πλάσια της προβλεπόμενης από τη βιβλιογραφία, η εισροή στραγγισμάτων στο έδαφος είναι $0,44\text{cm}^3/\text{day}$ και η συγκέντρωση του ρυπαντή που παρατηρείται στον υδροφορέα μετά από 10 έως 30 χρόνια είναι 0,1763.

9.1 Δεδομένα εισαγωγής του προγράμματος

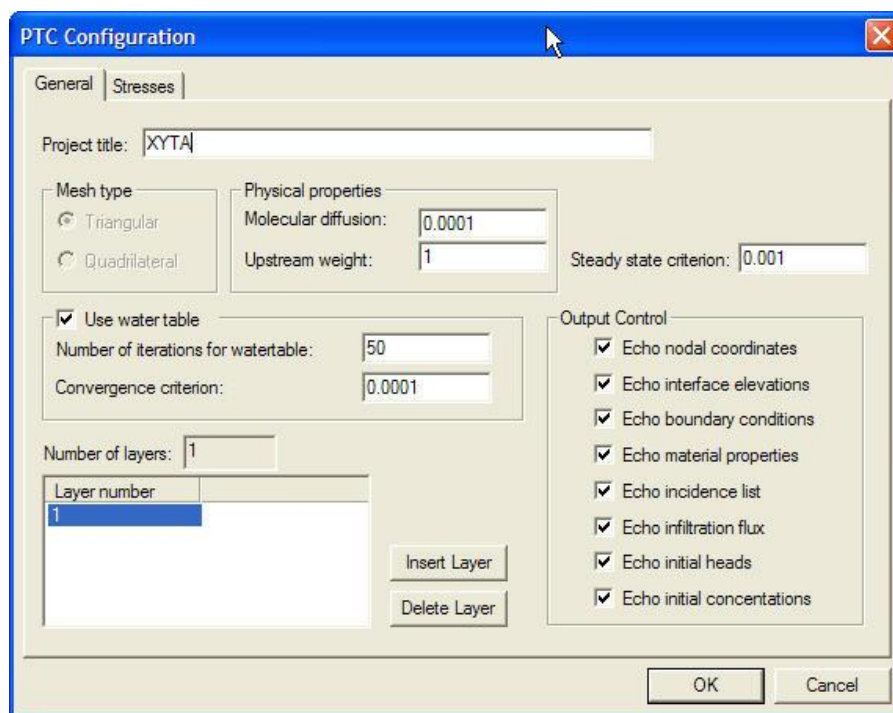
Τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου Argus ONE και τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω.

Ανοίγοντας το Argus ONE, εμφανίζεται το ακόλουθο περιβάλλον εργασίας.



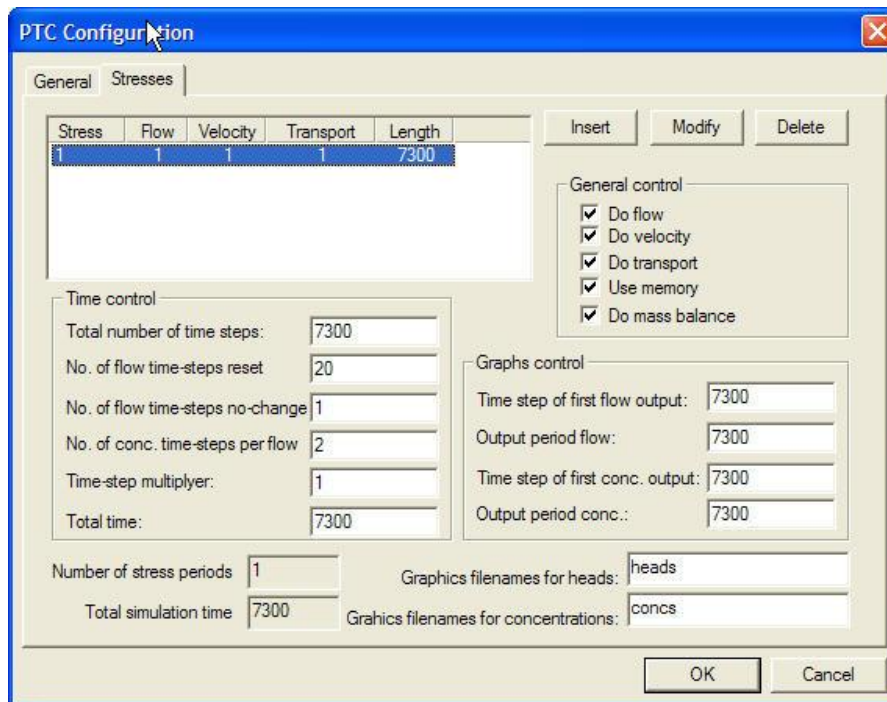
Παράθυρο 1: Το περιβάλλον εργασίας του Argus ONE.

Επιλέγεται η δημιουργία ενός νέου PTC project από το μενού PIES και εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο με τίτλο PTC Configuration. Σε αυτό προσδιορίζονται κάποιες βασικές παράμετροι, οι οποίες αφορούν το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν (τριγωνικά ή τετράπλευρα), τον αριθμό των στρωμάτων που υπάρχουν στην περιοχή, το είδος του υδροφορέα (ελεύθερος ή περιορισμένος), το κριτήριο σύγκλισης και τον αριθμό των επαναλήψεων που θα πραγματοποιήσει το μοντέλο καθώς και τα output αρχεία που θα δημιουργηθούν. Οι επιλογές που έγιναν για την εφαρμογή του μοντέλου στο X.Y.T.A. Αμαρίου φαίνονται στο ακόλουθο παράθυρο.



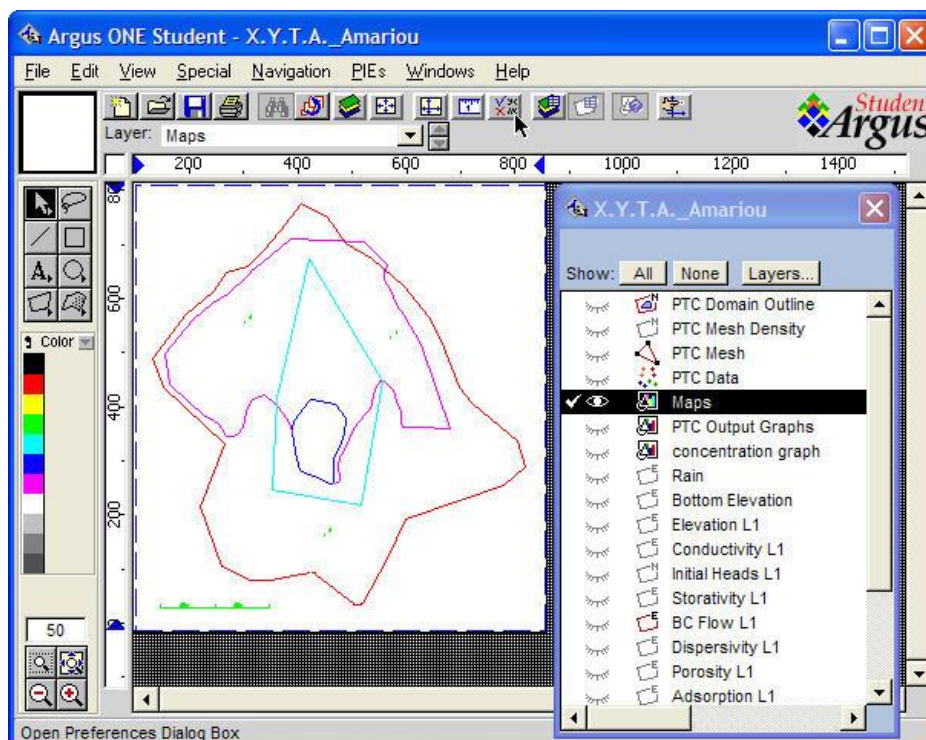
Παράθυρο 2: PTC Configuration.

Ακόμη, προσδιορίζεται ο χρόνος προσομοίωσης, ο οποίος ορίστηκε να είναι 2 χρόνια, δηλαδή 7.300 ημέρες. Για τη μοντελοποίηση της ροής επιλέχτηκε ως χρονικό βήμα η μια ημέρα ενώ για τη συγκέντρωση η μισή ημέρα. Τέλος, στο παράθυρο PTC Configuration καθορίζονται και υπολογισμοί που επιθυμούμε να πραγματοποιηθούν, δηλαδή αν θα γίνει προσδιορισμός των ταχυτήτων, των υδραυλικών υψών, ισοζύγιο μάζας, κτλ.



Παράθυρο 3: PTC Configuration.

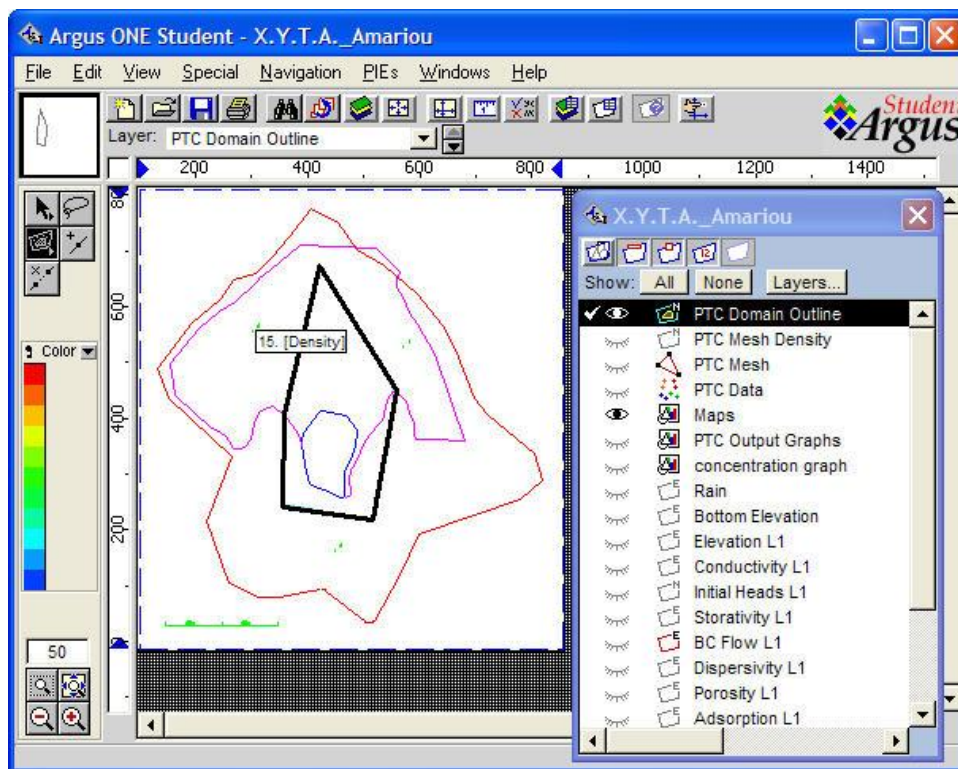
Στη συνέχεια εισάγεται στο μοντέλο ο χάρτης της υπό μελέτη περιοχής από την επιλογή Import Maps. Ο χάρτης αυτός αποτελεί το υπόβαθρο για τον καθορισμό της περιοχής μοντελοποίησης.



Παράθυρο 4: Χάρτης υπόβαθρο της περιοχής.

Στον παραπάνω χάρτη, με μπλε γραμμή έχει οριοθετηθεί ο X.Y.T.A. Αμαρίου, ενώ με γαλάζια γραμμή έχει οριστεί η περιοχή μοντελοποίησης. Πριν χρησιμοποιηθεί ο χάρτης αυτός ορίζεται η κλίμακά του, δηλαδή συσχετίζονται οι συντεταγμένες του πεδίου με αυτές της οθόνης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ισχύσει ότι 1cm στην οθόνη αντιστοιχεί σε 1m στην πραγματικότητα. Ακόμη, πρέπει να οριστούν οι χρησιμοποιούμενες μονάδες, οι οποίες στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ημέρες για το χρόνο και μέτρα για το μήκος.

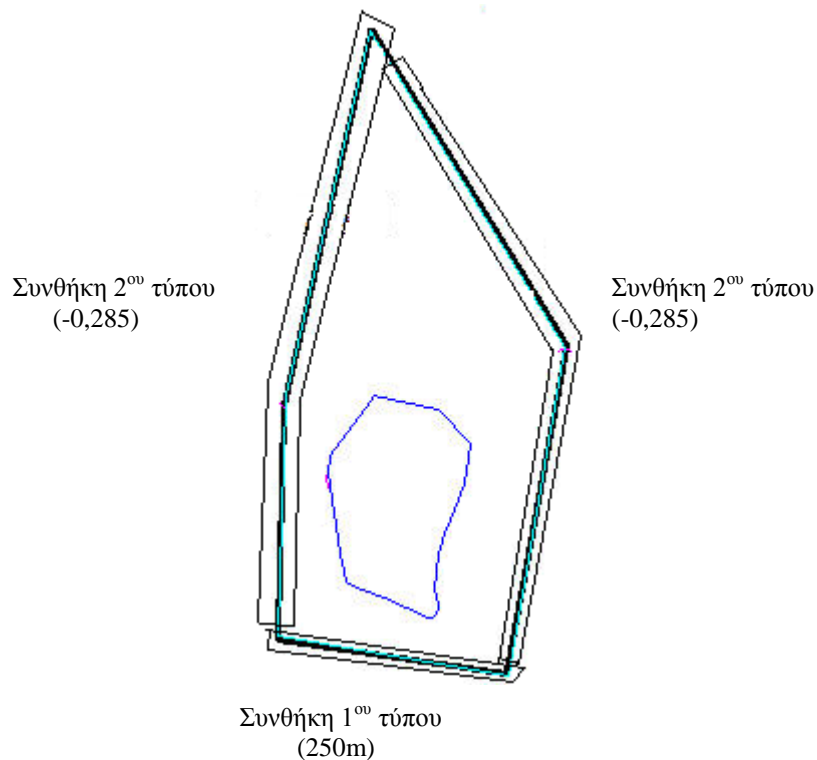
Όπως φαίνεται από το παραπάνω παράθυρο, με την επιλογή δημιουργίας ενός νέου PTC project δημιουργείται ένας αριθμός στρωμάτων (layers), τα οποία ορίζονται διαφορετικές παράμετροι, όπως για παράδειγμα υδραυλικά ύψη, οριακές συνθήκες, κτλ. Από αυτά αρχικά επιλέγεται το layer PTC Domain Outline, όπου ορίζεται η περιοχή μοντελοποίησης.



Παράθυρο 5: Καθορισμός της περιοχής μοντελοποίησης.

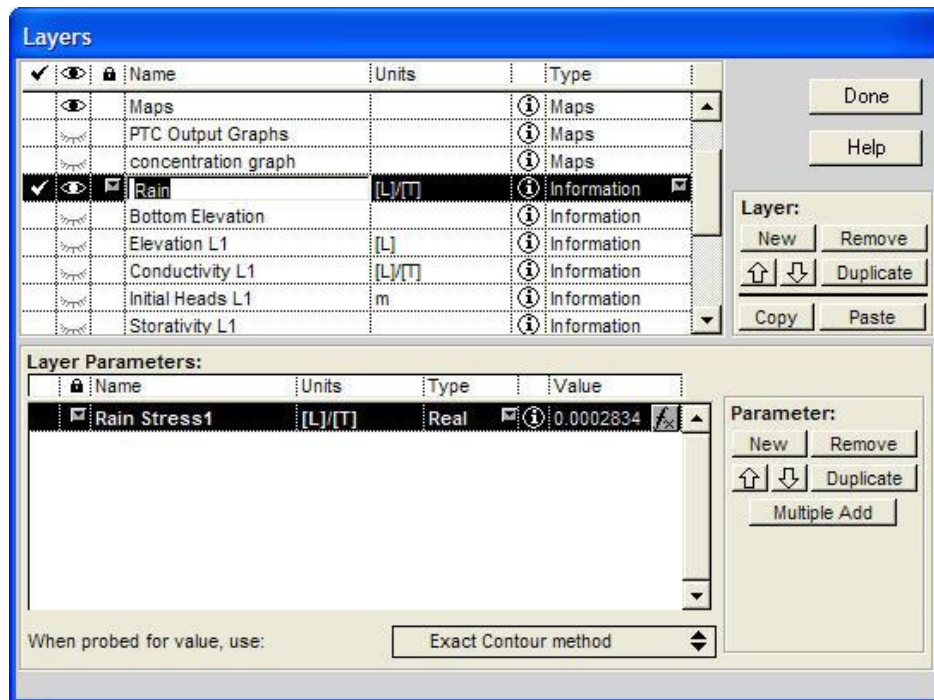
Στη συνέχεια καθορίζονται κάποια βασικά μεγέθη στα αντίστοιχα layers, όπως για παράδειγμα το υψόμετρο του πυθμένα (Bottom elevation) και το πάχος του γεωλογικού σχηματισμού που παρατηρείται στην περιοχή (elevation), που είναι 0m

και 300m, αντίστοιχα. Ακόμη, προσδιορίζονται οι οριακές συνθήκες στο layer BC Flow. Δεδομένου ότι εξετάστηκε το σενάριο στο οποίο το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι 50m, υποτέθηκε ότι το υδραυλικό ύψος στο κάτω όριο της περιοχής μοντελοποίησης είναι σταθερό και ίσο με 250m (Συνθήκη 1^{ου} είδους – Dirichlet). Στις δυο πλευρές της περιοχής μοντελοποίησης θεωρήθηκε ότι υπάρχει σταθερή υδραυλική κλίση ίση με $-0,285$ (συνθήκες 2^{ου} είδους – Newmann). Η τιμή αυτή επελέγη λαμβάνοντας υπόψη ότι στην περιοχή δεν υπάρχουν πηγάδια που να μεταβάλλουν σημαντικά την υδραυλική κλίση και επομένως δεν αναμένεται να υπάρχει μεταβολή της στάθμης του υδροφορέα μεγαλύτερη από 5-15m.



Σχήμα 22: Οριακές της συνθήκες της περιοχής.

Επιλέγοντας κάθε φορά το κατάλληλο layer εισήχθησαν στο μοντέλο όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την προσομοίωση. Συγκεκριμένα, ανοίγοντας το παράθυρο των layers δόθηκαν τιμές σε μεγέθη όπως η υδραυλική αγωγιμότητα (0,4752cm/day), η βροχόπτωση (0,0002834m/day), ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας (0.0001) και το πορώδες (0,2). Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται το παράθυρο διαλόγου, στο οποίο παρουσιάζονται όλα τα layers και εισάγονται οι τιμές όλων των απαραίτητων μεγεθών.



Παράθυρο 6: Πλαίσιο διαλόγου των layers και εισαγωγής δεδομένων.

Μια σημαντική παράμετρος που οφείλει να προσδιοριστεί είναι ο συντελεστής διαμήκους διασποράς. Η τιμή του συντελεστή αυτού είναι ανάλογη της απόστασης του σημείου που θα γίνει μέτρηση της συγκέντρωσης από την πηγή και μπορεί να προσδιοριστεί από διάφορους τύπους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι δυο τύποι:

$$a_L = 0.83 \log L^{4.14} \quad [4]$$

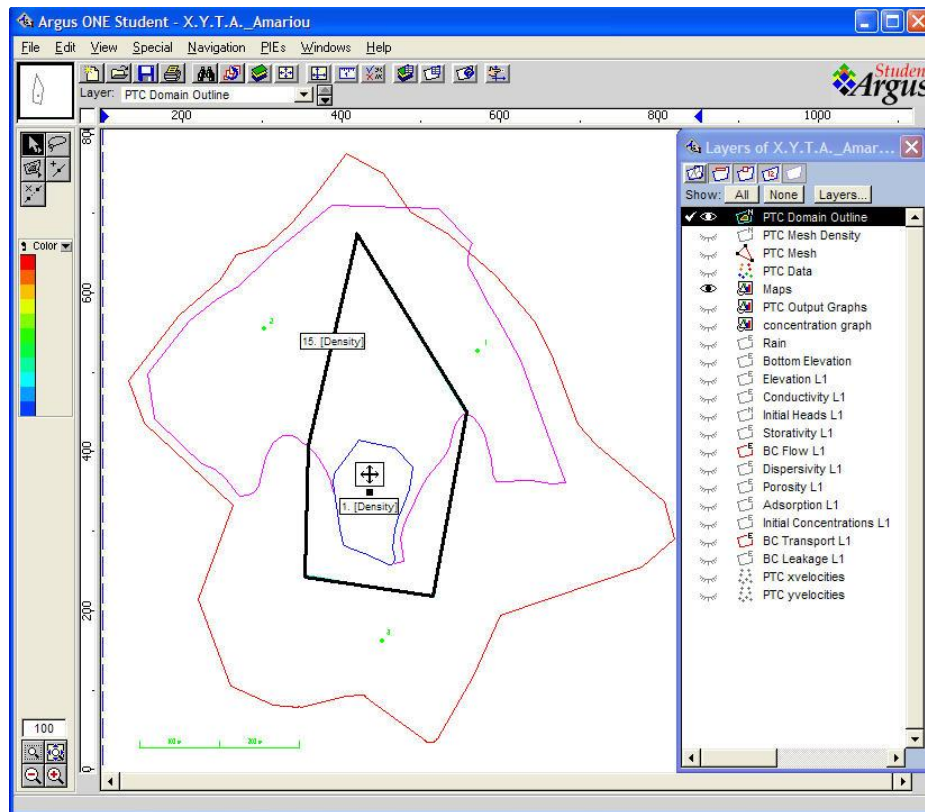
&

$$a_L = 0.0175 \cdot L^{1.46} \quad [4]$$

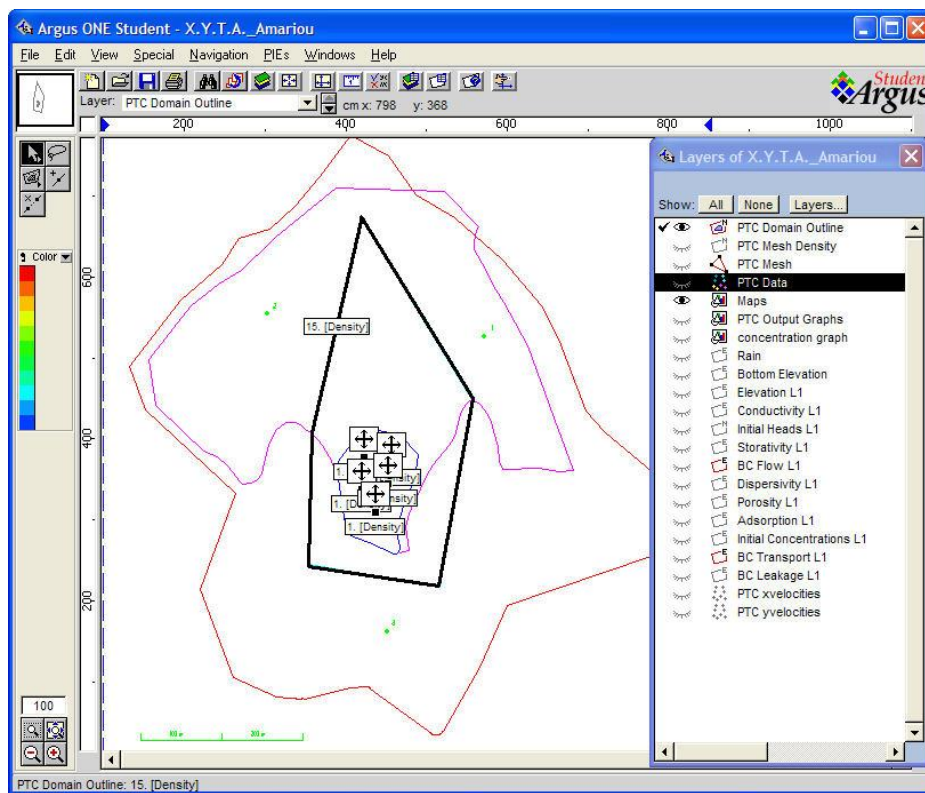
όπου L η απόσταση στην οποία ενδιαφερόμαστε να πάρουμε τη μέτρηση.

Υποθέτοντας ότι L=200m, η τιμή που προκύπτει από κάθε τύπο είναι 6,2m και 40m, αντίστοιχα. Λόγω της μεγάλης απόκλισης των δυο τιμών, αποφασίστηκε να γίνει ξεχωριστή προσομοίωση για κάθε τιμή και να συγκριθούν τα αποτελέσματα.

Τέλος, όσον αφορά στην προσομοίωση μεταφοράς των στραγγισμάτων, πρέπει να οριστεί ο αριθμός, η θέση και το «μέγεθος» της πηγής ρύπανσης. Σε αυτό το σημείο δημιουργήθηκαν δυο διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο θεωρεί ότι υπάρχει 1 σημείο αστοχίας της γεωμεμβράνης του X.Y.T.A. και επομένως μια σημειακή πηγή, ενώ το δεύτερο θεώρησε ότι υπάρχουν πέντε σημειακές πηγές μέσα στο χώρο του X.Y.T.A..



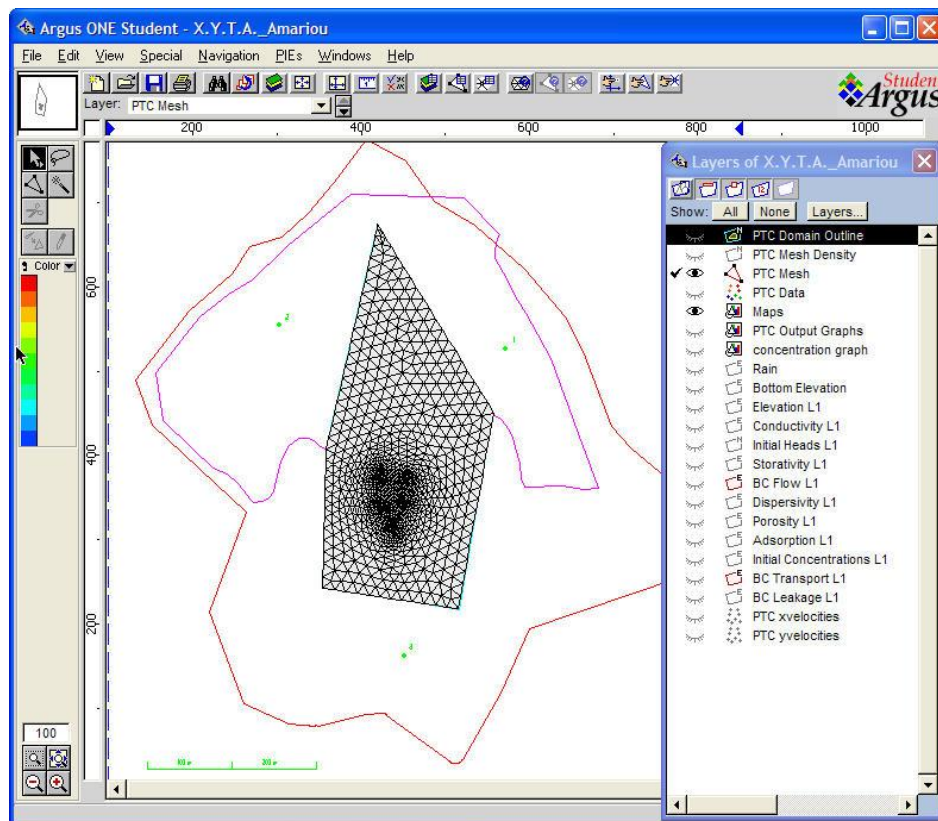
Παράθυρο 7: Η θέση της μοναδικής σημειακής πηγής ρύπανσης σύμφωνα με το πρώτο σενάριο.



Παράθυρο 8: Οι θέσεις των πέντε σημειακών πηγών ρύπανσης σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο.

Και στις δυο περιπτώσεις, η τιμή της συγκέντρωσης στις σημειακές πηγές καθορίστηκε με τη μορφή οριακών συνθηκών και ήταν ίση με 0,1763, όσο δηλαδή προέκυψε ότι θα είναι η συγκέντρωση των στραγγισμάτων στην επιφάνεια του υδροφορέα από την εφαρμογή του μοντέλου VADOFT.

Αφού καθοριστούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία, μπορεί πλέον να γίνει η διακριτοποίηση της περιοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στο layer PTC Mesh δίνεται η εντολή να δημιουργηθεί ο κάνναβος με τα πεπερασμένα στοιχεία, των οποίων ο αριθμός δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 2.000. Πριν τρέξει το μοντέλο επιθυμητό είναι να γίνει νέα αρίθμηση των κόμβων, η οποία θα είναι η βέλτιστη, από την εντολή Renumber και Optimize Bandwidth.



Παράθυρο 9: Ο κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργείται στην περίπτωση που υπάρχουν πέντε σημειακές πηγές στο X.Y.T.A..

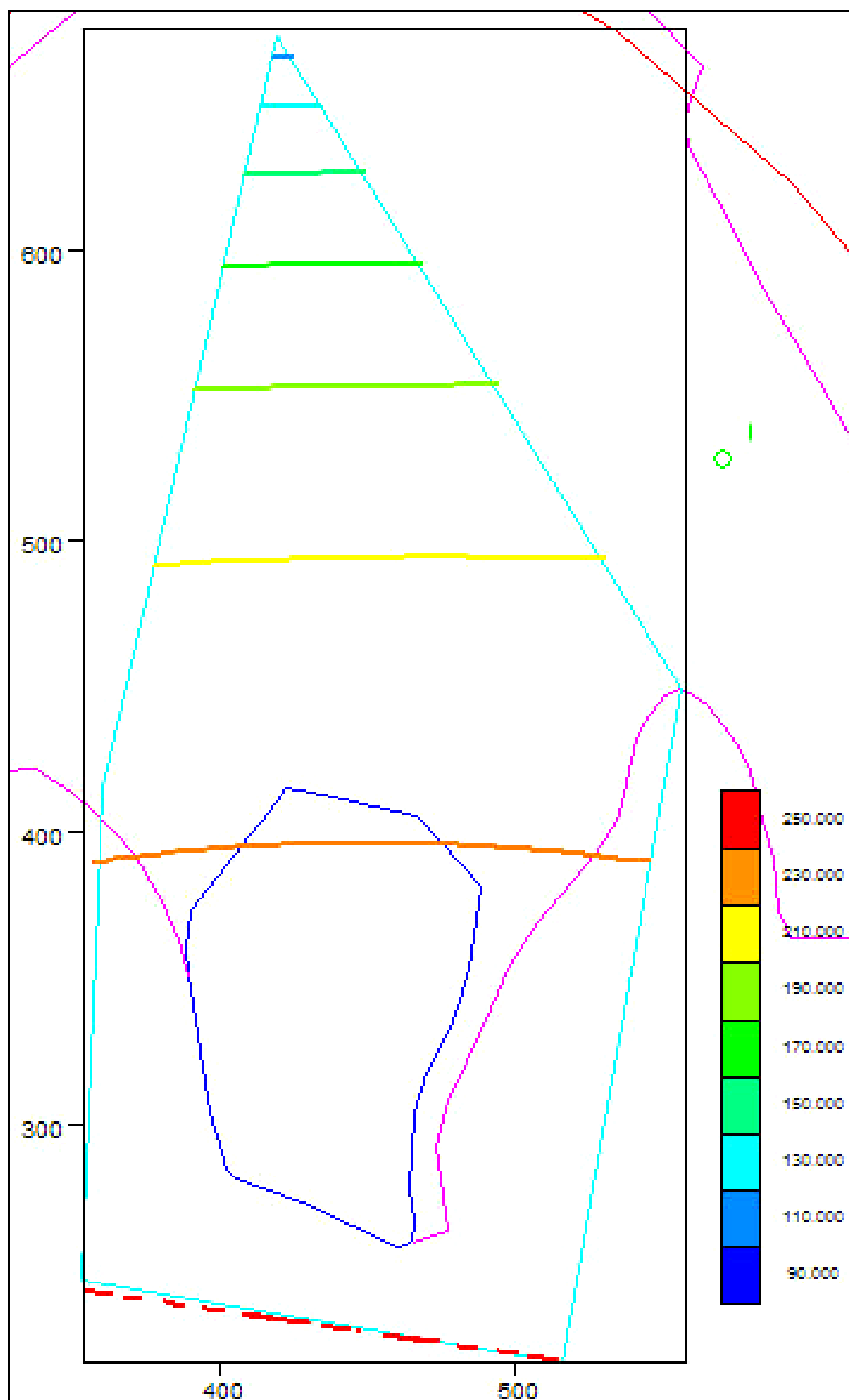
Σε αυτό το σημείο είναι όλα έτοιμα για να γίνει η εφαρμογή του προγράμματος, μέσα από την εντολή RUN PTC. Καθώς τρέχει το πρόγραμμα εμφανίζεται ένα παράθυρο DOS, το οποίο κλείνει μόλις ολοκληρωθεί η προσομοίωση. Ταυτόχρονα δημιουργούνται τα output αρχεία για το υδραυλικό ύψος και τη συγκέντρωση.

Τα αρχεία αυτά εισάγονται στη συνέχεια στο μοντέλο με την εντολή Import PTC Data. Έτσι δημιουργείται ένα καινούριο layer, το οποίο περιέχει τις πληροφορίες των output αρχείων και ονομάζεται PTC Data layer. Με τη βοήθεια αυτού του layer δημιουργούνται δυο νέα, στα οποία κατασκευάζονται χάρτες της κατανομής των υδραυλικών υψών και της συγκέντρωσης του ρυπαντή στην περιοχή μοντελοποίησης. Αυτά τα στρώματα αποτελούν το κύριο output του μοντέλου από όπου ο χρήστης μπορεί να βγάλει συμπεράσματα και να αποκτήσει μια εικόνα της κατάστασης που θα επικρατεί στην περιοχή σύμφωνα με το μοντέλο και τα δεδομένα που εισήχθησαν σε αυτό.

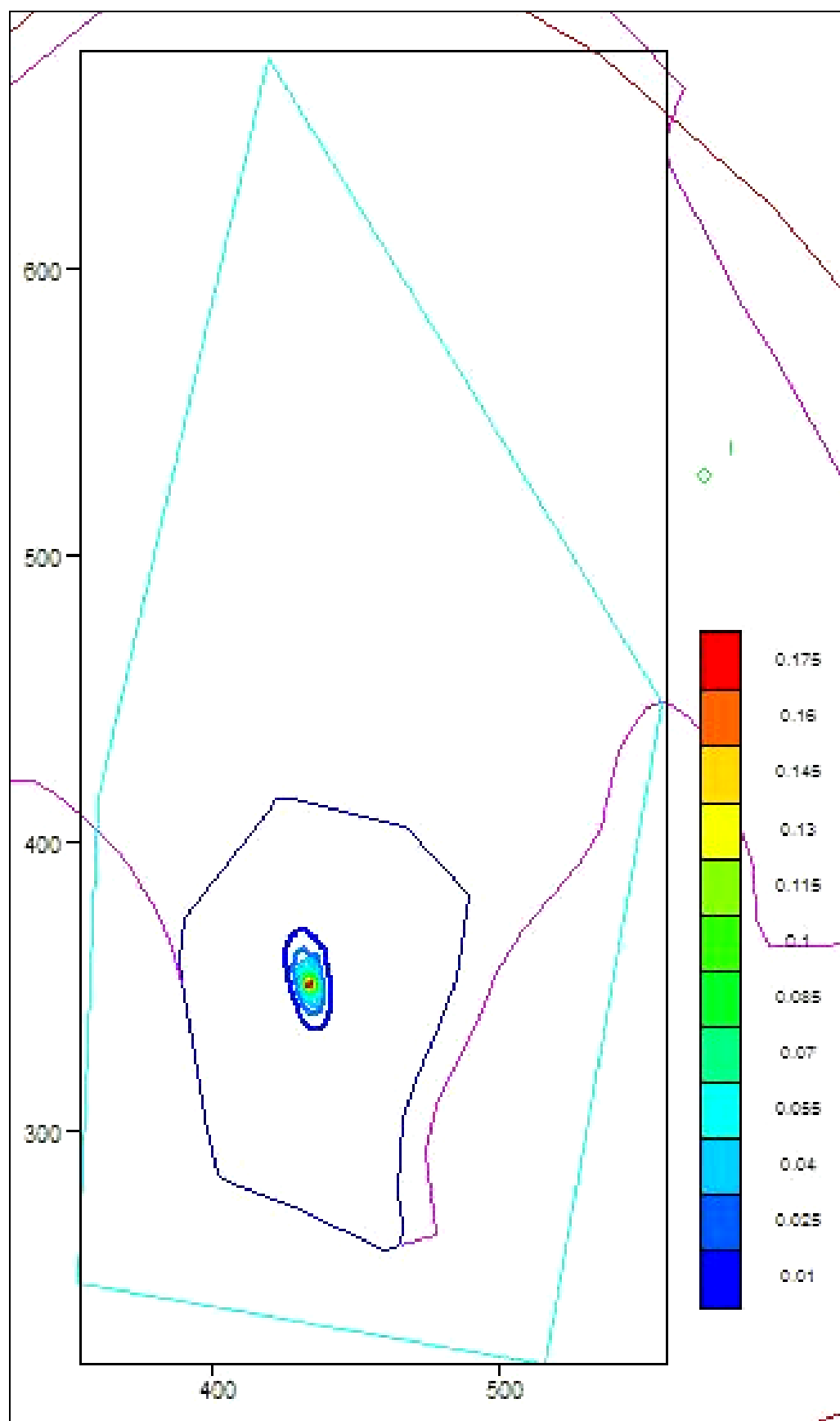
9.2 Αποτελέσματα

Όσον αφορά στα υδραυλικά ύψη, οι χάρτες που προέκυψαν σε κάθε σενάριο ήταν ίδια, γεγονός το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς είναι γνωστό ότι η κατανομή των υδραυλικών υψών δεν επηρεάζεται από τον συντελεστή διαμήκους διασποράς ή τον αριθμό των εστιών ρύπανσης.

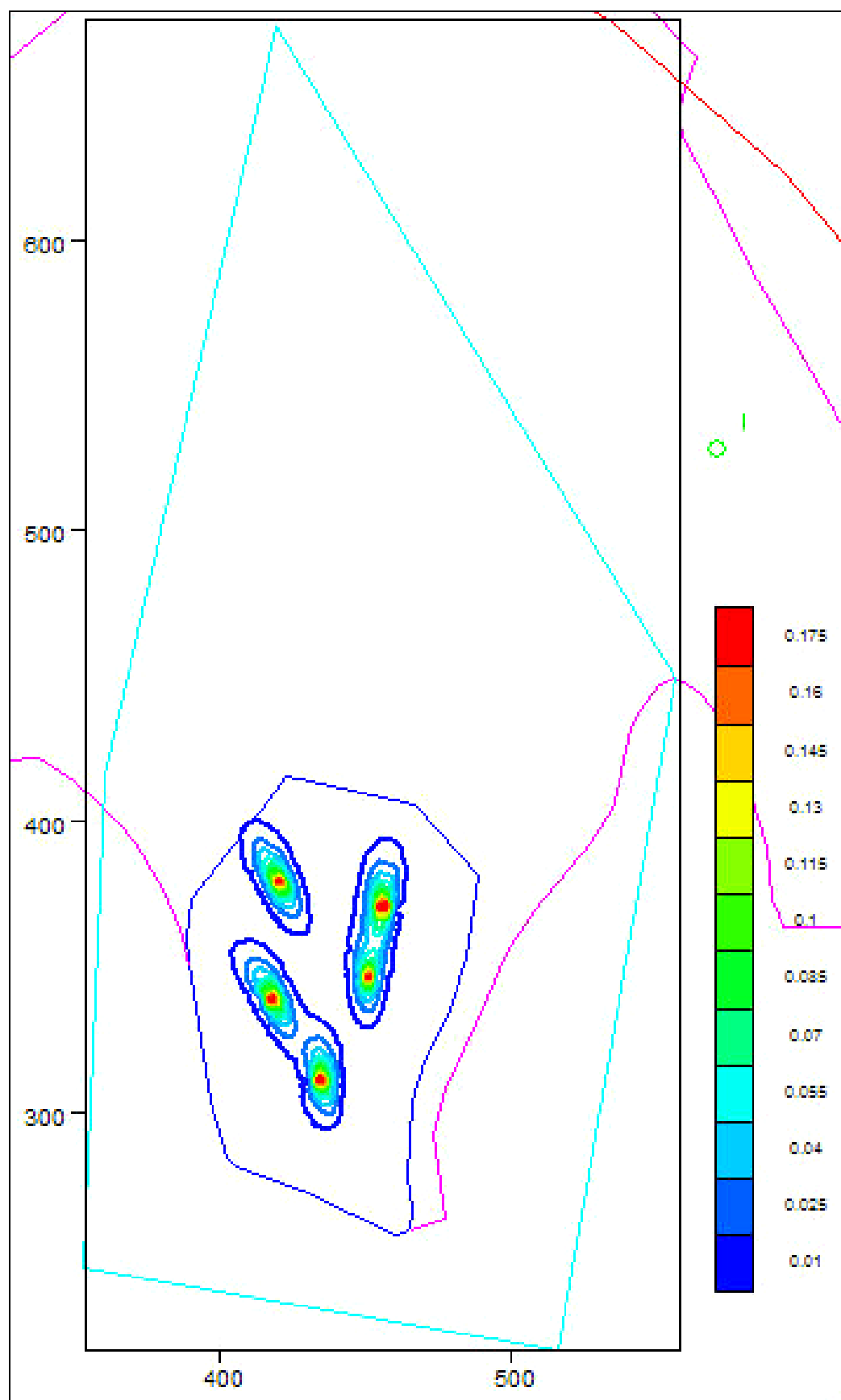
Όσον αφορά στην κατανομή των συγκεντρώσεων των στραγγισμάτων στην περιοχή μοντελοποίησης, αυτή διαφέρει αρκετά σε κάθε σενάριο. Στην περίπτωση που έχουμε μια σημειακή πηγή ρύπανσης, η συγκέντρωση των στραγγισμάτων είναι μεγαλύτερη όταν ο συντελεστής διαμήκους διασποράς είναι ίσος με 40m. Όπως όμως φαίνεται από τους χάρτες που ακολουθούν, ανεξάρτητα από τον συντελεστή διαμήκους διασποράς, τα στραγγίσματα σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνούν τα όρια του Χ.Υ.Τ.Α. προκαλώντας ελάχιστο πρόβλημα ρύπανσης του υδροφόρου. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και στην περίπτωση ύπαρξης πέντε διαφορετικών σημειακών πηγών. Για ακόμη μια φορά, η περιοχή ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα είναι μεγαλύτερη όταν ο συντελεστής διαμήκους διασποράς είναι ίσος με 40m, αλλά και πάλι περιορίζεται μέσα στα όρια του Χ.Υ.Τ.Α..



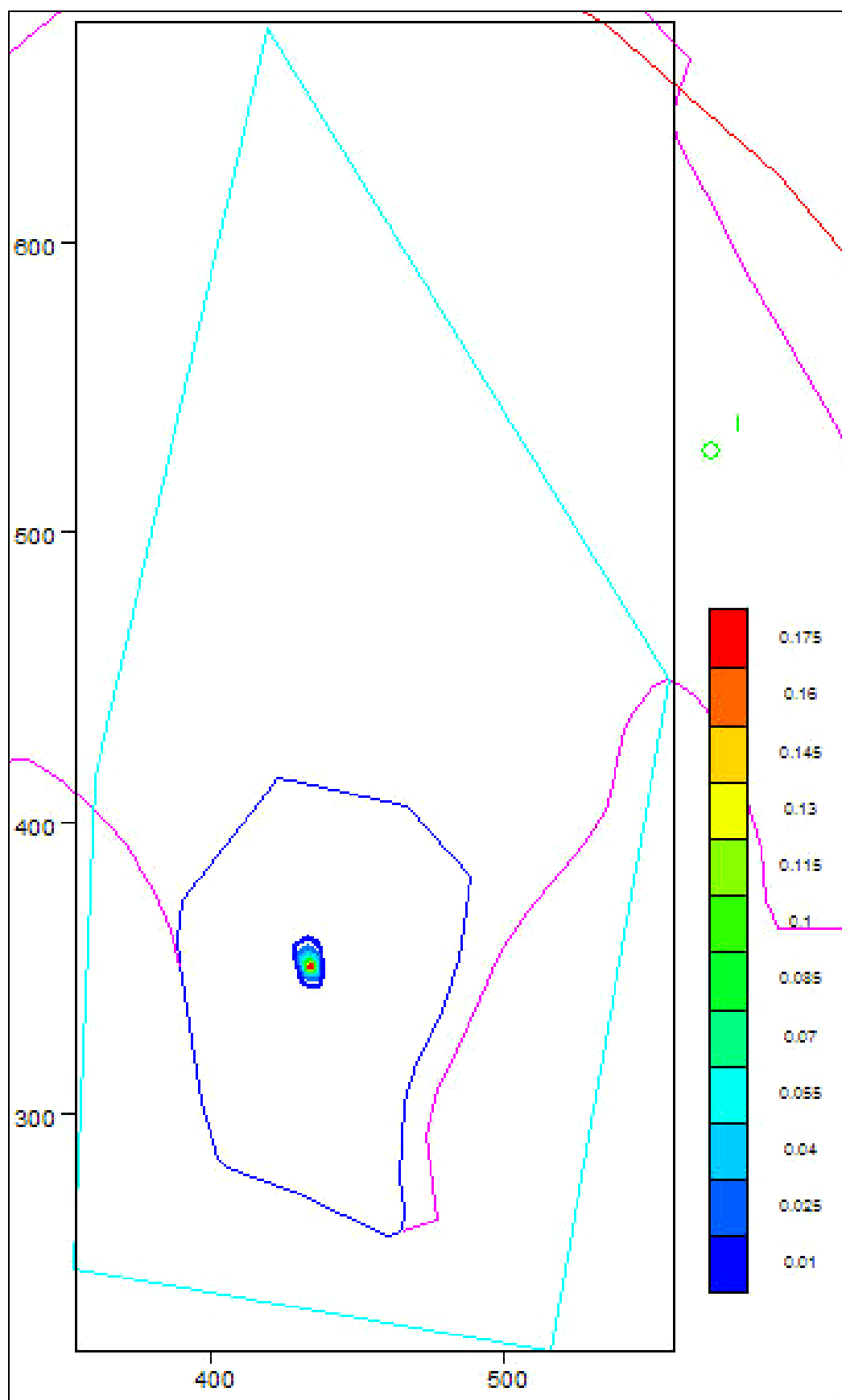
Σχήμα 23: Πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής μοντελοποίησης γύρω από τον Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου, σύμφωνα με τους υπολογισμούς του PTC.



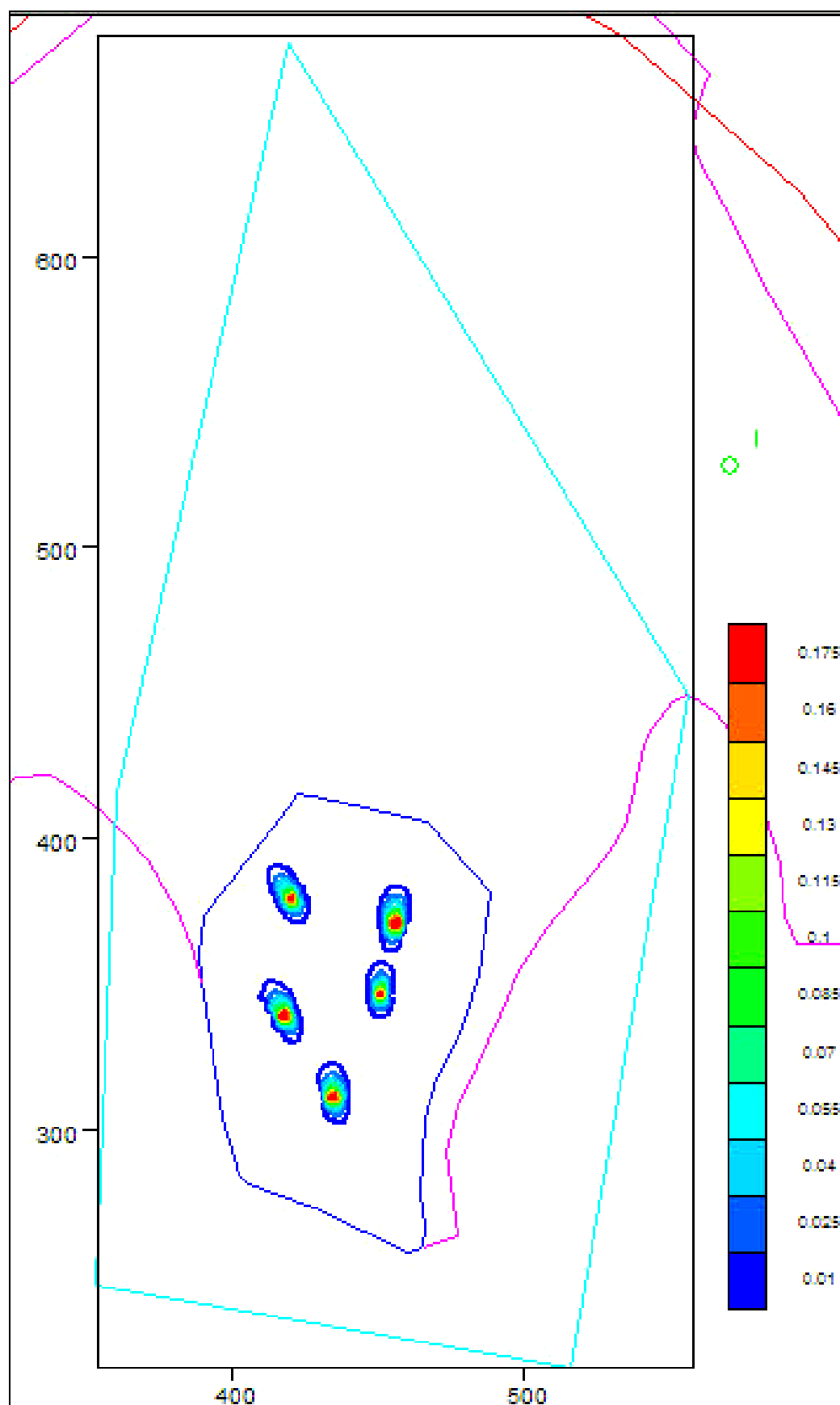
Σχήμα 24: Χάρτης καμπυλών ίσων συγκεντρώσεων στραγγισμάτων της περιοχής μοντελοποίησης γύρω από τον Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου, στην περίπτωση ύπαρξης 1 σημειακής πηγής ρύπανσης και για $a_L=40m$.



Σχήμα 25: Χάρτης καμπυλών ίσων συγκεντρώσεων στραγγισμάτων της περιοχής μοντελοποίησης γύρω από τον Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου, στην περίπτωση ύπαρξης 5 σημειακών πηγών ρύπανσης και για $a_L=40m$.



Σχήμα 26: Χάρτης καμπυλών ίσων συγκεντρώσεων στραγγισμάτων της περιοχής μοντελοποίησης γύρω από τον Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου, στην περίπτωση ύπαρξης 1 σημειακής πηγής ρύπανσης και για $a_L=6,2m$.



Σχήμα 27: Χάρτης καμπυλών ίσων συγκεντρώσεων στραγγισμάτων της περιοχής μοντελοποίησης γύρω από τον Χ.Υ.Τ.Α. Αμαρίου, στην περίπτωση ύπαρξης 5 σημειακών πηγών ρύπανσης και για $a_L=6,2m$.

10. Συμπεράσματα

Η προσομοίωση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς των στραγγισμάτων του χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων της περιοχής Αμαρίου, του Νομού Ρεθύμνης, τόσο στην ακόρεστη όσο και στην κορεσμένη ζώνη, έδωσε αποτελέσματα που ήταν αρκετά ενθαρρυντικά και θετικά. Όπως προέκυψε από τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, η ρύπανση που μπορεί να προκληθεί στα υπόγεια ύδατα της περιοχής από τα στραγγίσματα του Χ.Υ.Τ.Α. είναι πολύ περιορισμένη και επομένως δεν υπάρχει ιδιαίτερος λόγος ανησυχίας και φόβου από την μεριά των περιοίκων.

Η ύπαρξη πετρωμάτων χαμηλής διαπερατότητας και πορώδους, σε συνδυασμό με την παρουσία συστήματος συλλογής των στραγγισμάτων και μονωτικών στρώσεων στον πυθμένα του Χ.Υ.Τ.Α., καθιστά τη ροή και τη μεταφορά των στραγγισμάτων προς τον υπόγειο υδροφορέα ιδιαίτερα δύσκολη. Ειδικά όσον αφορά στην ακόρεστη ζώνη, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του αντίστοιχου μοντέλου PRZM-3, η ποσότητα των στραγγισμάτων που καταφέρνει να τη διασχίσει και να φτάσει στον υδροφόρο ορίζοντα είναι πολύ μικρή. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι, ακόμη και στη δυσμενέστερη περίπτωση, η μέγιστη συγκέντρωση που παρατηρείται στον υδροφορέα, σε βάθος χρόνου 30 ετών, είναι ίση μόλις με το 17,6% της αρχικής συγκέντρωσης που παρατηρείται στην επιφάνεια του εδάφους. Το γεγονός αυτό ενισχύει την αντίληψη που τονίζει ότι η ακόρεστη ζώνη του εδάφους μιας περιοχής μπορεί να λειτουργήσει ως ένα φυσικό εμπόδιο των ρυπαντών ή ως ένας φυσικός «αντιδραστήρας», ο οποίος μειώνει σημαντικά το ρυπαντικό φορτίο που εισέρχεται τελικά στον υπόγειο υδροφορέα.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης της ροής και της μεταφοράς των στραγγισμάτων του Χ.Υ.Τ.Α. στην κορεσμένη ζώνη, όπως αποδείχθηκε από αυτά δεν υπάρχει ουσιαστικός κίνδυνος ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Ακόμη και στην περίπτωση που τα σημεία διαφυγής των στραγγισμάτων είναι πέντε και ο συντελεστής διαμήκους διασποράς είναι μεγάλος (40m), η περιοχή ρύπανσης είναι περιορισμένη και χαρακτηρίζεται από πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου η ρύπανση περιορίζεται εντός των ορίων του Χ.Υ.Τ.Α. και εξασθενεί πλήρως σε ακτίνα 30 έως 40 μέτρων από τις σημειακές πηγές ρύπανσης.

Λαμβάνοντας ακόμη υπόψη το γεγονός ότι η προσομοίωση στην ακόρεστη ζώνη έγινε για 30 χρόνια και για την κορεσμένη ζώνη για 20 χρόνια, μπορεί να ειπωθεί ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη, περιγράφουν την κατάσταση που θα επικρατεί μετά από 30-50 χρόνια, δεδομένου ότι οι συνθήκες που επικρατούν δεν έχουν αλλάξει σημαντικά. Επομένως, όχι μόνο δεν τίθεται θέμα βραχυπρόθεσμης ρύπανσης των υπόγειων υδάτων της περιοχής από τα στραγγίσματα του Χ.Υ.Τ.Α., αλλά αποκλείεται και το ενδεχόμενο μακροπρόθεσμης υποβάθμισης της ποιότητας του υδροφορέα, σύμφωνα με το δυσμενέστερο δυνατό σενάριο.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι αν και η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία θεώρησε την ύπαρξη συνθηκών που ευνοούσαν τη μεταφορά των στραγγισμάτων (μεγάλο συντελεστή διαμήκους διασποράς, πενταπλάσια υδραυλική αγωγιμότητα από αυτήν που προτείνει η βιβλιογραφία, πάχος ακόρεστης ζώνης ίσο με 50m, κτλ), κρίνεται απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός των τιμών όλων εκείνων των παραμέτρων που καθορίζουν την υπόγεια ροή και τη μεταφορά ρυπαντών στην υπό μελέτη περιοχή, για να μπορέσει να γίνει μια καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών και επομένως μια πιο αξιόπιστη πρόβλεψη των μελλοντικών καταστάσεων.

11. Βιβλιογραφία

- [1] Anderson M.P., Woessner W.W., **Applied Groundwater Modeling - Simulation of Flow and Advective Transport**, Academic Press, San Diego, 1992
- [2] Stone W. J., **Hydrogeology in Practice – A Guide to Characterizing Ground – Water Systems**, Prentice Hall, 1999
- [3] Tindall J.A., Kunkel J.R., **Unsaturated Zone Hydrology For Scientists and Engineers**, Prentice Hall, 1999
- [4] Καρατζάς Γ.Π., **Σημειώσεις μαθήματος «Ροή Υπόγειων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων»**, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
- [5] Hari Prasad K.S., Mohan Kumar M. S., Sekhar M., Sadhana, **«Modeling flow through unsaturated zones: Sensitivity to unsaturated soil properties»**, Vol. 26, Part 6, December 2001
- [6] Kumar C.P., Scientist E1 and Head, **«Modeling of unsaturated flow»**, Hard Rock Regional Center, National Institute of Hydrology, Belgaum, Karnataka
- [7] Babu D.K., Pinder G.E., Niemi A., Ahlfeld D.P., Stothoff S.A., **«Chemical Transport by Three Dimensional Groundwater Flows»**, Ιούνιος 1997
- [8] Carsel R.F., Imhoff J.C., Hummel P.R., Cheplick J.M., Donigian A.S., Jr., **«A Model for Predicting Pesticide and Nitrogen Fate in the Crop Root and Unsaturated Soil Zones – User’s Manual»**
- [9] Pinder G.F., **«On the Modeling of Groundwater Systems Using Geographical Information Systems»**, Σεπτέμβριος, 2000
- [10] Pinder G.F., **«Groundwater Modeling Using Geographical Information Systems»**, Αύγουστος, 2001
- [11] Stothoff S.A., **«Princeton Transport Code Tutorial»**
- [12] Olivares Jose – Luis, **«Argus ONE – PTC interface, v. 2.2, User’s guide»**
- [13] Σκορδύλης Αδαμάντιος Δ., **«Ελεγχόμενη Εναπόθεση Στερεών Μη Επικίνδυνων Αποβλήτων»**, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2001.
- [14] Μανιός Θρασύβουλος, **«Διαχείριση και Επεξεργασία Αστικών Απορριμμάτων»**, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Φεβρουάριος 2001
- [15] Κόλλιας Παναγιώτης Σ., Δρ. Πολιτικός Μηχανικός – Υγειονολόγος, **«Απορρίμματα – Αστικά & Βιομηχανικά»**, Αθήνα 1993

- [16] Γιολδάσης Κώστας, Σφακιωτάκης Στέλιος, **Μεταπτυχιακή Εργασία «Μοντελοποίηση Μεταφοράς Στραγγισμάτων από το Χώρο Υγειονομικής Ταφής Αμαρίου Ρεθύμνης Εντός του Υπόγειου Υδροφορέα»**, Επιβλέπων Καθηγητής Γεωργιος Π. Καρατζάς, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2002
- [17] Ε.ΠΕ.Μ. **«Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Επέκτασης Χώρου Υγειονομικής Ταφής απορριμμάτων Αμαρίου, Νομού Ρεθύμνης»**, Ιανουάριος 2000